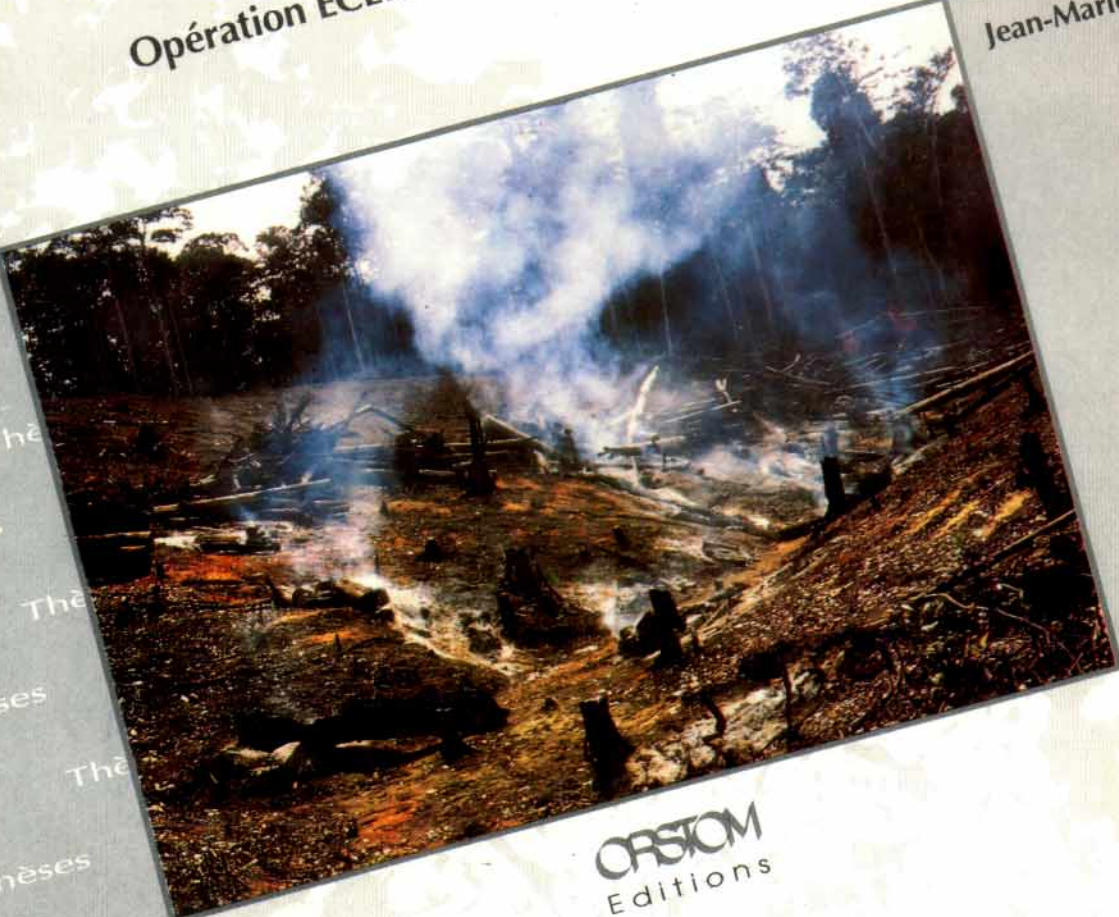




**LES EFFETS DU DÉFRICHEMENT
DE LA FORÊT AMAZONIENNE
ET DE LA MISE EN CULTURE
SUR L'HYDROLOGIE
DE PETITS BASSINS VERSANTS**

Opération ECEREX en Guyane française

Jean-Marie FRITSCH



ORSTOM
Editions

Jean-Marie FRITSCH

**LES EFFETS DU DÉFRICHEMENT
DE LA FORÊT AMAZONIENNE
ET DE LA MISE EN CULTURE
SUR L'HYDROLOGIE
DE PETITS BASSINS VERSANTS**

Opération ECEREX en Guyane française

Editions de l'ORSTOM

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

Collection ÉTUDES et THÈSES

PARIS 1992

Cet ouvrage a fait l'objet d'une thèse, soutenue le 8 novembre 1990,
pour obtenir le diplôme de Doctorat,
(Spécialité : mécanique, génie mécanique, génie civil)
à l'Université de Montpellier II

La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les «copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective» et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, «toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite» (alinéa 1er de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

AVANT-PROPOS

Dans mon enfance j'avais la certitude que mon destin serait de piloter des avions, avec pour toute solution de repli celle de piloter des hélicoptères. Lorsqu'il m'a fallu mettre de l'eau dans mon rêve, ce ne pouvait évidemment être que celle de cours d'eau majestueux ou tumultueux, qui seuls me paraissaient dignes de considération pour la Science Hydrologique. Au terme d'une étude de près de 10 années sur bassins versants élémentaires, dont les débits s'écrivent en litres par seconde, il me reste à triompher de l'épreuve ultime de la mise en conformité du Projet et de la Réalité, sous peine de constater qu'il n'y aurait décidément pas de pilote dans mon avion. Bien qu'étant rompu à cet exercice de style par mon vécu professionnel quotidien, l'amplitude des contorsions psychologiques exigées par cette tâche ont failli me décourager définitivement ! Il fut un temps où, en tournant le dos aux Indes, on pouvait avec un peu de réussite découvrir l'Amérique, mais cette opportunité me paraissant aujourd'hui trop aléatoire pour me conforter dans une vision sereine de ma Destinée, je préfère m'en remettre à la pensée d'un hydrologue célèbre du début du siècle (*), qui est gravée dans la pierre d'un jardin public de Montpellier : *"C'est en allant vers la mer que les fleuves restent fidèles à leurs sources"*.

Mes premiers remerciements vont tout naturellement vers Claude Bocquillon, mon Directeur scientifique. La vision à la fois critique et optimiste qu'il a de l'Hydrologie m'a beaucoup impressionné. Ses conseils m'ont été précieux, et leurs effets peuvent facilement être identifiés, tant dans le contenu et que dans la physionomie de ce mémoire.

Pierre Dubreuil, est l'un des Pères Fondateurs du Programme ECEREX, et celui qui a insufflé au Projet sa dimension hydrologique. Son implication passée dans la connaissance de l'hydrologie de Guyane française, et ses engagements anciens et actuels dans la problématique des bassins versants représentatifs et expérimentaux, le destinaient tout naturellement à occuper le rang le plus éminent dans mon Jury de soutenance. Je l'en remercie vivement.

Je voudrais que Bernard Pouyaud trouve ici, à plus d'un titre, l'expression de ma plus chaleureuse gratitude pour avoir été rapporteur mais, bien avant cela, pour avoir pris les mesures qui m'ont libéré de tout autre engagement pendant plus d'un an. Tout au long de l'avancement, j'ai trouvé auprès de lui l'intérêt scientifique, la pertinence des conseils et le réconfort amical qui m'ont permis de mener ce travail à son terme.

Si ce mémoire est avant tout celui d'un hydrologue, j'ai voulu le conduire en symbiose étroite avec la Science du Sol, sans l'apport de laquelle la portée de mon entreprise aurait été singulièrement diminuée. La fonction déterminante de rapporteur que Georges Pedro a accepté d'assumer dans ce jury me laisse à penser que mon projet n'aura pas été vain. A l'occasion des discussions que nous avons pu avoir, j'ai apprécié la conception globale et dépourvue de tout sectarisme qu'il a de sa discipline et des sciences connexes. La forme définitive de mon mémoire doit beaucoup aux exigences de sa rigueur et à son grand professionnalisme.

(*) : Jean Jaurès (1859 - 1914)

J'ai rencontré Jean-Charles Fontes pour la première fois en Guyane sur les bassins ECEREX. J'ai été séduit d'emblée par l'étendue de son univers thématique, la diversité de son expérience géographique et par son humanisme. Je le remercie d'avoir accepté de juger ce travail.

Roelof Oldeman a parcouru les Grands Bois de Guyane bien avant moi. Il a tiré de cette expérience une connaissance innovante et incontestée du fonctionnement de l'écosystème forestier. Sa présence dans le Jury matérialise la composante biologique du Programme ECEREX, et reflète l'importance de cette participation. Je le remercie bien cordialement d'avoir accédé à ma requête, et d'avoir fait le déplacement depuis Wageningen pour participer à la soutenance.

Le programme ECEREX a vu le jour sur le terrain en 1976. Il me faut renoncer à dresser une liste de tous les participants impliqués dans cette étude multidisciplinaire ; la lecture en serait sans aucun doute fastidieuse, avec le risque de n'être pas, pour autant, exhaustive.

Michel-Alain Roche a été le promoteur des activités hydrologiques du programme en Guyane. Il a conçu et supervisé la réalisation du dispositif hydrométrique des 10 bassins versants, et donné à l'expérimentation sa physionomie définitive. Il a suivi les opérations sur le terrain pendant les 2 premières années du programme, et a dressé une synthèse hydrologique du milieu naturel sur cette période. Pendant le temps qu'aura duré notre cohabitation en Guyane, j'ai pu apprécier ses conceptions très personnelles de la pratique de la Recherche.

René Boulet a été l'inspirateur de l'analyse pédologique, qui a été utilisée avec bonheur à ECEREX. F.X. Humbel, E. Fritsch, Y. Lucas, comptent parmi les nombreux disciples qui ont oeuvré à la prospection pédologique des bassins-versants et à la compréhension de l'organisation pédologique de la zone d'étude.

Jean-Michel Sarraillh a été le coordinateur du projet à partir de 1979. Il lui revient tout le mérite de la programmation, de l'exécution et du suivi des aménagements sur les bassins expérimentaux. Sur des bases toujours franches et amicales, nos rapports ont été fructueux, tant dans l'exercice scientifique multidisciplinaire, que dans celui plus subtile de la collaboration inter-Organismes.

Tout au long des 8 années d'observations intensives, le suivi quotidien des bassins versants a été assuré par Jean-Claude Bron et Siméon Fraumar. C'est à leur constance et à leur application que l'on doit de disposer de séries de données complètes et de qualité, conditions préalables sans lesquelles tout ce travail n'eut pas été possible.

Ont participé à l'implantation et au fonctionnement du dispositif hydrologique ECEREX, en particulier aux travaux de génie civil, d'hydrométrie et de topographie, A. Barrily, G. Delfieu, J.C. Grandin, M. Gréard.

La saisie et le traitement des diagrammes de pluviographie ont été assurés par le Service hydrologique de l'ORSTOM à Bondy. La plus grande part de la saisie et des traitements de base des données hydrométriques, ainsi que toute la mise en forme manuelle de 7723 événements caractéristiques de crue ont été réalisées par Y. Borel, qui s'est acquitté de cette tâche ingrate avec méthode et persévérance.

Après la période Guyanaise est venue l'Epoque Montpelliéraine, qui aura duré plus de 3 ans. Ce temps du mûrissement n'aurait été qu'une vaine et morne attente, sans les interactions bénéfiques et passionnantes que j'ai pu avoir avec mes compagnons de route, Pierre Chevallier, puis Christophe Bouvier, qui ont franchi la ligne d'arrivée avant moi.

Je remercie Valérie Thauvin, qui avait traité les données de la saison des pluies de 1987 sur les bassins en pins et en eucalyptus, et qui a mis à ma disposition, des résultats élaborés immédiatement utilisables. J'ai ainsi pu incorporer dans ce travail, l'étude hydrologique des bassins en sylviculture, avec des plantations âgées de 6 ans.

Hélène Lubes m'a apporté le support statistique dont j'avais besoin, sans jamais se départir de sa bonne humeur. Frédéric Moniod a exorcisé mes doutes et m'a fait retrouver la motivation nécessaire, quand celle-ci m'avait abandonné.

Michel Estèves s'est penché sur les données d'ECEREX, et a entrepris la modélisation pluie-débit de ces bassins élémentaires. Ce projet conjoint, m'a permis de découvrir le chercheur et sa méthode, et les deux facettes ont été également gratifiantes et prometteuses. Les résultats de cette association sont connus et encourageants, et n'ont pas pu être incorporés à ce mémoire pour de simples questions de calendrier. Les perspectives sont tout à fait prometteuses, mais ceci est déjà une autre histoire

Olivier Planchon et Sophie Geffard m'ont apporté leur aide pendant les dernières semaines, et l'énergie nécessaire à la mise en orbite finale (souvent au tarif de nuit).

Il me vient déjà des regrets de devoir quitter le Cercle des Noctambules du centre ORSTOM de Montpellier, dont j'ai été un membre actif ces derniers mois. Je leur souhaite bonne chance à tous, chercheurs et futurs chercheurs.

Je remercie Pierre Ribstein - pour tout - depuis le premier jour ; il est au dernier rang, seul artifice possible pour lui dire quelle est sa vraie place.

Enfin je remercie toutes celles et tous ceux qui m'ont apporté leurs compétences et m'ont prodigué leur soutien, leur amitié et leur affection, et qui, en cela, détiennent une part de ma Réalité, puisqu'il est dit que *"La façade d'une maison n'appartient pas à celui qui la possède, mais à celui qui la contemple"* (*)

Montpellier, octobre 1990

(*) : Proverbe Thaïlandais ?



Brûlis des andains après défrichement (Bassin J)

RESUME

En Guyane Française, dans le cadre du Programme ECEREX, "Etude de l'écosystème forestier naturel et de son évolution sous l'effet des transformations", dix petits bassins versants entièrement recouverts par la forêt primaire ont fait l'objet d'un suivi hydrologique pendant 2 ans.

Puis, sept bassins ont été défrichés mécaniquement selon divers protocoles, un bassin a été défriché manuellement pour une culture traditionnelle sur brûlis et deux bassins témoins sont restés en forêt primaire.

Différents aménagements ont été implantés sur les bassins après défrichement : prairie pâturée, verger d'agrumes, plantations sylvicoles de pins et d'eucalyptus, recrû spontané de la forêt.

Les modifications provoquées par les différentes utilisations du sol sur l'écoulement et les débits de pointe sont mises en évidence par la méthode des bassins appariés (*paired watershed technique*).

Sur sol nu, l'année du défrichement, les écoulements ont augmenté de +66% à +200%, selon les bassins. Ces gains ont diminué sur les bassins aménagés. Après 3 à 6 ans, les écoulements ne sont plus significativement différents de ceux du milieu naturel, sauf sur la prairie pâturée (gain de +27%).

Sur sol nu, les débits de pointe ont augmenté de +17% à +166%, selon les bassins versants et les méthodes d'estimation. Sur les bassins aménagés, les débits de pointe ont retrouvé des valeurs proches du milieu naturel sur les aménagements incluant l'arbre (sylviculture, recrû), alors que sur la prairie, et après 4 années, les pointes dépassaient encore leur valeur naturelle de +76%.

Un élément essentiel à prendre en compte dans l'interprétation des résultats de cette expérimentation est l'extrême hétérogénéité hydrologique du milieu naturel : Sur une même année, les écoulements ont varié entre 239 mm et 1088 mm selon les bassins versants considérés - soit un rapport de 1 à 5 - alors que le milieu est réputé homogène pour ce qui concerne la géologie (même roche-mère de schistes altérés), la couverture végétale (forêt primaire intacte) et les intrants pluviométriques (les bassins sont très proches les uns des autres). L'étude pédologique a montré que cette différenciation n'était pas chaotique, mais dépendait de l'organisation particulière des couvertures pédologiques dans la région.

Cette situation a des conséquences très importantes au plan méthodologique : la dispersion naturelle des comportements hydrologiques étant du même ordre de grandeur que celle créée par les aménagements, l'interprétation des résultats bruts de l'expérimentation doit être menée avec discernement, pour mettre en évidence des changements qui soient statistiquement significatifs. Cette variabilité du milieu naturel permet de mieux comprendre le caractère parfois contradictoire et controversé des conclusions de la littérature sur les effets hydrologiques de la déforestation et des changements d'occupation du sol.

THE EFFECTS OF MANUAL AND MECHANIZED CLEAR-CUT OF THE AMAZONIAN MOIST FOREST AND OF
ALTERNATIVE LAND USES, ON STREAM FLOW VOLUMES AND PEAK DISCHARGES OF SMALL
EXPERIMENTAL WATERSHEDS.
ECEREX EXPERIMENT IN FRENCH GUIANA

ABSTRACT

In the scope of an ecological study of tropical moist forest in French Guiana (ECEREX Research Project), 10 small watersheds covered with natural forest were monitored for 2 years.

After which, 7 basins were clear-cut using heavy equipment and according to various methods. One basin was manually clear-cut for traditional slash-and-burn cultivation. Two basins were left intact.

Several land use policies were applied after mechanical deforestation : cattle raising on pasture, pomelo orchard, pine afforestation, eucalyptus afforestation and natural regrowth.

The impact caused by the different land uses on storm flow volumes and peak flows was underlined using the paired watershed technique.

The first year after clear-cut, on bare soil, storm flow increases ranged from +66% to 200% depending on the basin. These augmentations decreased once the basins were replanted. Three to six years after deforestation, storm flow volumes were not significantly different from original values, except for the pasture (increase of 27%).

Peak discharges on bare soil increased 17% to 166%, depending on the basin and estimation methods. During the following years, peak discharges regained their natural level for the afforested basins and those left in natural regrowth. For the pasture, after four years, peak discharges still passed the natural level by 76%

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	11
Première partie : PROBLEMATIQUE ET CONTEXTE NATUREL.....	15
1.1 La problématique et les réponses.....	19
1.2 Esquisse du milieu naturel.....	23
Deuxième partie : HYDROLOGIE DU MILIEU NATUREL.....	47
2.1 Les chemins de l'eau dans le milieu naturel.....	51
2.2 Le dispositif de mesure hydrologique.....	71
2.3 La séparation des écoulements sur l'hydrogramme.....	83
2.4 Une perception hydrologique du milieu forestier.....	100
2.5 La composante atmosphérique du bilan de l'eau en forêt.....	127
Troisième partie : METHODES D'EVALUATION DES EFFETS PROVOQUES PAR L'EXPERIMENTATION.....	145
3.1 Justification et description du protocole expérimental.....	149
3.2 Principes et méthodes de l'hydrologie expérimentale.....	157
3.3 Mise en oeuvre de la méthode des bassins appariés.....	164
Quatrième partie : HYDROLOGIE DES BASSINS EN SOL NU : l'Epoque Rouge.....	193
4.1 La situation des bassins versants l'année du défrichement : l'Epoque Rouge.....	197
4.2 L'augmentation des volumes de crue en Epoque Rouge.....	199
4.3 Recherche d'une période homogène en Epoque Rouge.....	205
4.4 L'augmentation des volumes de crue pendant l'Epoque Rouge stabilisée.....	214
4.5 Aspects et causes de l'augmentation des écoulements.....	219
Cinquième partie : HYDROLOGIE DES BASSINS AMENAGES : l'Epoque Jaune.....	251
5.1 Une prairie pâturée : le bassin A.....	253
5.2 Le recrû naturel : les bassins D et E.....	265
5.3 La sylviculture à croissance rapide : les bassins G et H.....	281
5.4 La culture itinérante sur brûlis : le bassin I.....	297
5.5 Un verger de pomelos : le bassin C.....	306
Sixième partie : CONCLUSIONS.....	325
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	343
TABLE DES MATIERES.....	361
LISTE DES TABLEAUX.....	367
LISTE DES FIGURES.....	371
ANNEXES	

INTRODUCTION

L'existence d'interactions entre les éléments du cycle hydrologique et le couvert végétal a une acceptation quasi générale. La forêt, que le sens commun perçoit à la fois comme un écran et comme une éponge, serait ainsi particulièrement prédisposée pour exercer des effets modérateurs sur les crues. Dans un passé déjà ancien, cette connaissance intuitive s'est parfois traduite dans les actes par des opérations volontaristes de grande envergure, comme par exemple le reboisement des zones de parcours surpâturées de l'Aigoual sous l'impulsion de Georges Fabre à partir de 1875.

De nos jours, le recul de la forêt, et spécialement de la forêt tropicale humide, est une réalité planétaire. Les "forêts fermées" d'Amérique du Sud, d'Asie et d'Afrique paient chaque année un lourd tribut à l'extension de fronts pionniers de colonisation, qui s'accompagnent d'une déforestation organisée ou sauvage, dans des proportions qui donnent le vertige. L'estimation la moins sévère des surfaces déforestées est de l'ordre de 7,5 millions d'hectare par an (Hadley et Lanly, 1983). Selon le critère utilisé par la FAO et le PNUE, ce terme de *déforestation* désigne ici *l'abattage intégral et le remplacement de la forêt par une autre forme d'utilisation des terres*. Une estimation antérieure, prenant en compte toute modification écologique sensible de l'écosystème, avait abouti à un taux annuel de 18 à 20 millions d'hectares par an (Myers, 1980).

Que l'on considère les eaux courantes sous le simple aspect de la ressource, ou comme étant le vecteur des éléments minéraux et organiques en solution et en suspension, les modifications du régime hydrologique induites par ce changement d'occupation du sol constituent un impact de première grandeur. A ce titre, cette approche croisée "hydrologie - couvert végétal" a fait l'objet de nombreux travaux, principalement en régions tempérées, dont les conclusions sont parfois contradictoires, mais qui laissent supposer que les relations de cause à effet entre l'occupation du sol et les écoulements sont, pour le moins, difficiles à mettre en évidence.

Le bassin versant expérimental, sur lequel est reproduit le phénomène préoccupant (dans ce cas, la déforestation), est le dispositif le plus communément utilisé pour évaluer finement ces impacts hydrologiques sur des espaces réduits (quelques km², ou moins), et sur des pas de temps courts (une année, ou moins).

Dans un entendement peu élaboré, le suivi hydrologique d'une expérimentation sur bassin versant pourrait être considéré comme une application exemplaire de la méthode empirique, c'est à dire littéralement "*qui ne fait pas appel à la théorie, et qui n'est fondée que sur l'expérience*". Pourtant, l'utilisation directe des résultats d'observations faites sur un bassin expérimental s'avère presque toujours impropre à résoudre le problème posé. Au delà de l'évidence tangible et parfois spectaculaire de l'expérimentation, dont les conditions doivent évidemment être parfaitement identifiées et maîtrisées, la nécessaire connaissance de l'objet hydrologique sur lequel s'applique ce traitement, et la sensibilité de la méthodologie qui permet d'évaluer les effets provoqués par ce traitement, font de l'expérimentation hydrologique sur bassin versant une problématique scientifique complète et complexe.

L'objectif de ce mémoire est d'évaluer les modifications du comportement hydrologique, provoquées par la suppression de la forêt naturelle amazonienne, et induites par des utilisations ultérieures de l'espace, à finalités agricoles, sylvicoles et pastorales. Ces modifications ont pu être mises en évidence grâce aux possibilités du dispositif expérimental implanté dans le cadre du programme ECEREX (ECologie, ERosion, EXpérimentation) en Guyane française.

Le dispositif expérimental principal était composé de 10 petits bassins versants. Huit d'entre eux ont été utilisés pour les expérimentations proprement dites, tandis que deux bassins ont été conservés en forêt naturelle et utilisés comme témoin. Une phase préalable de deux ans, appelée *Epoque Verte*, a été programmée pour parfaire la connaissance du milieu naturel et procéder au calage des algorithmes, entre bassins témoins et bassins expérimentaux, qui ont été utilisés pour comparer les comportements hydrologiques des bassins traités avec leur comportements originels en forêt.

Une première partie est consacrée à l'évocation des contextes scientifique, économique et institutionnel du programme ECEREX, et à une présentation des traits dominants du milieu naturel guyanais.

La partie 2 aborde certaines spécificités de l'hydrologie des zones humides, présente les caractéristiques hydrométriques du dispositif, ainsi que celles des régimes hydrologiques en milieu forestier, telles qu'elles peuvent être appréhendées sur des bassins versants élémentaires. La diversité des réponses hydrologiques entre bassins versants, largement contrôlée par certains caractères pédologiques, a fait l'objet d'une attention toute particulière.

Après l'historique des interventions et la description des protocoles expérimentaux sur chaque bassin versant (durée des observations, nature et date des divers traitements), la partie 3 est consacrée à l'identification et au calage des opérateurs numériques qui ont été utilisés pour mettre en évidence les effets des traitements, ainsi qu'à une discussion sur la sensibilité et la précision de ces algorithmes. Les informations des bassins témoins ont été couplées avec celles des bassins traités, selon la méthode des bassins appariés (*paired watershed technique*).

Sept bassins sur huit ont fait l'objet d'une exploitation forestière mécanisée, à l'issue de laquelle six bassins ont subi un défrichement agricole, ayant eu pour effet de mettre le sol à nu. La partie 4 présente l'évolution des volumes écoulés et des débits de pointe pendant cette période en sol nu, identifiée dans le rapport comme l'*Epoque Rouge*.

La partie 5 concerne l'évolution hydrologique des bassins après la réalisation des différents scénarios d'aménagement, cette période constituant l'*Epoque Jaune* de l'expérimentation.

Une sixième et dernière partie est consacrée aux conclusions. Elle contient notamment les principaux enseignements hydrologiques du programme, ainsi qu'une réflexion sur la signification dimensionnelle du modèle réduit expérimental qui a été mis en oeuvre à ECEREX, sur des bassins versants élémentaires, dont les surfaces sont comprises entre 1 et 2 hectares.

PREMIERE PARTIE :

PROBLEMATIQUE ET CONTEXTE NATUREL

Cette **première partie** est consacrée à une présentation générale du milieu naturel en Guyane, et à l'évocation du contexte dans lequel a été conçue l'opération ECEREX (Programme multidisciplinaire d'étude de l'écosystème forestier guyanais, et des conditions de sa mise en valeur). On y présente également les objectifs assignés à l'étude hydrologique, et les moyens mis en oeuvre pour les réaliser (suivi de bassins versants expérimentaux).

Le chapitre 1.1 expose les conditions qui ont présidé à la genèse du programme

Une présentation sommaire du milieu naturel de la Guyane fait l'objet du chapitre 1.2 ; on y trouvera notamment :

- Des éléments relatifs au régime des précipitations, mettant en évidence le caractère tropicale humide de la zone d'étude (abondance et rythme saisonnier des précipitations, relations intensités-durées),
- Un exposé des principes d'une étude pédologique fondée sur des critères de fonctionnement hydrodynamique des versants ; cette approche sera utilisée ensuite pour la caractérisation des sols des bassins versants.

1.1 LA PROBLEMATIQUE ET LES REPOSES

Dans la grande saga des projets de développement économique qui encombrèrent l'histoire de la Guyane depuis les temps lointains de la "France Equinoxiale" du bon Roy Henry-le-Béarnais jusqu'à l'avènement de la Région mono-Départementale "Guyane Française", le "Plan Vert " de 1974 restera une péripétie majeure. Il s'agissait de développer le secteur primaire, essentiellement l'agriculture, en association avec l'exploitation forestière, de promouvoir la transformation locale du produit de ces activités et de susciter ainsi l'émergence d'un secteur secondaire virtuellement inexistant. Une vision technocratique du milieu naturel, où luxuriance est confondue avec fertilité, une expérimentation agronomique insuffisamment éprouvée, la carence en nombre et en qualité des paysanneries locales ou allochtones, et de façon générale la non prise en compte de ce qu'il est convenu d'appeler "la spécificité du fait guyanais" sont autant de raisons qu'il est facile d'invoquer a posteriori pour justifier l'échec de ce Plan. En moins de 4 ans, l'entreprise s'étiola, et s'achève sans avoir réussi à laisser la marque d'un quelconque changement d'envergure dans le paysage économique.

Dans la mouvance de ce plan de développement, l'implantation d'une filière de production de pâte à papier paraissait assurée et la réalisation de plusieurs projets semblait imminente en 1976 (Sarrailh, 1984) :

Le projet le plus avancé est présenté par le Groupement ARBOCEL, formé par la société américaine Parsons et Whittmore, le Groupement Européen de Cellulose, la Caisse Centrale de Coopération Economique et le Centre Technique Forestier Tropical (CTFT). Il prévoit la production combinée de bois d'oeuvre et de pâte à papier, avec une usine de pâte kraft blanchie, à base de feuillus hétérogènes pouvant produire 8 000 tonnes par jour et une scierie capable de débiter 100 m³ par jour, avec possibilité d'extension de cette capacité. L'alimentation de cette chaîne requiert la coupe de 5 000 hectares de forêt par an. L'emprise du permis d'exploitation ARBOCEL s'étend sur 300 000 hectares sur la zone de collines jouxtant la plaine côtière ancienne entre Kourou et Sinnamary.

La concession ARBOCEL était flanquée à l'Ouest par la zone du projet Aussedat-Rey-Papeteries de France (zone Maroni-Mana) et à l'Est par le projet International Paper C° qui prévoyait le traitement annuel d'environ un million de m³ de bois.

Le scénario prévoyait une première phase pendant laquelle l'alimentation de la filière aurait été faite exclusivement aux dépens de la forêt naturelle à raison de 15 000 hectares par an, puis l'introduction progressive d'essences à croissance rapide, telles que pins ou eucalyptus, qui seraient plantées sur les surfaces préalablement exploitées.

A côté de ces espaces réservés à la sylviculture, une partie des zones défrichées serait utilisée pour des aménagements agricoles, fruticoles ou pastoraux. Enfin, la plus grande part des surfaces serait laissée à la régénération spontanée de la forêt.

1.1.1 LE MONTAGE INSTITUTIONNEL DU PROGRAMME ECEREX

Toutefois, il fallait bien considérer que l'accomplissement de ce scénario risquait de s'accompagner d'effets secondaires fâcheux et indésirables. A cet effet, les Pouvoirs Publics ont mis en place des mesures d'accompagnement, destinées à quantifier et à minimiser les risques écologiques induits par ce projet, en suscitant la genèse d'un programme pluridisciplinaire de recherche dont le CTFT et l'ORSTOM avait assuré la conception et le montage (Bailly et Dubreuil, 1976). Outre la participation des Organismes promoteurs, ce projet co-financé par le Comité d'Action Concertée GRNR¹ de la DGRST² a compté avec l'engagement du Muséum d'Histoire Naturelle de Paris et de l'INRA.

Pour répondre à l'attente du Développement, les objectifs du Projet sont nettement finalisés et formulés dans les termes suivants :

- préciser et quantifier les impacts de l'exploitation papetière sur les paramètres de l'environnement. Cette composante implique de parfaire au préalable la connaissance et la compréhension de l'écosystème forestier en Guyane, de façon à préciser clairement l'état initial du système,
- définir les techniques nécessaires à l'implantation d'aménagements après l'exploitation papetière tels que pâturages, vergers, sylviculture, etc,
- estimer la productivité des systèmes de production dérivés et déterminer les conditions de gestion permettant d'assurer leur pérennité,
- fonder des modèles d'aménagement susceptibles d'être généralisés en Guyane.

La règle du fonctionnement pluridisciplinaire instaurée entre les participants prévoit le partage des champs thématiques selon les compétences scientifiques particulières de chaque organisme, la confrontation et l'harmonisation des méthodologies de travail et des calendriers entre les différentes équipes, la mise à disposition des résultats à l'ensemble de la communauté scientifique du projet sans délais ni restrictions.

Le thème "hydrologie de surface - érosion - conservation des sols" est partagé entre l'ORSTOM (études sur bassins versants) et le CTFT (études sur parcelles). Les autres activités en relation directe avec ce thème sont assurées par l'ORSTOM (pédologie, botanique), le CTFT (inventaire forestier, réalisation des aménagements) et l'INRA (bioclimatologie, interception, eau dans les sols). Le CTFT assure en outre la coordination scientifique et budgétaire et la représentation du Projet auprès des bailleurs de fond.

¹ : Gestion des Ressources Naturelles Renouvelables

² : Direction Générale à la Recherche Scientifique et Technique

Un bulletin de liaison et de diffusion des résultats à périodicité semestrielle a permis la circulation de l'information entre les participants et de faire les points scientifiques intermédiaires. Un nombre important de résultats obtenus par diverses disciplines qui n'ont pas été publiés ailleurs seront extraites de ces bulletins et utilisées dans ce travail. La parution du N° 1 (février 1979) a été l'occasion de figer la signification du sigle ECEREX. Créé par l'hydrologue (Roche, 1979), le label ECEREX ECoulements, ERosion, EXpérimentation représentait bien la thématique de cette discipline mais ne pouvait être retenu comme emblème d'un projet aux préoccupations plus vastes. Mais comme par ailleurs le sigle était passé dans l'usage, il a été conservé et traduit par ECologie, ERosion EXpérimentation.

Le Comité MAB de l'UNESCO a porté un regard bienveillant sur ce projet en l'incluant dans le programme MAB 1, lui concédant ainsi le label enviable de "Man And Biosphère".

1.1.2 LA METHODE EXPERIMENTALE

Le site choisi est situé le long du CD21 ou piste de Saint-Elie, nom vernaculaire de cette "pénétrante" forestière de 21 km de long, perpendiculaire à la RN1 à 5 km à l'ouest du bourg de Sinnamary (figure 1.1.01).

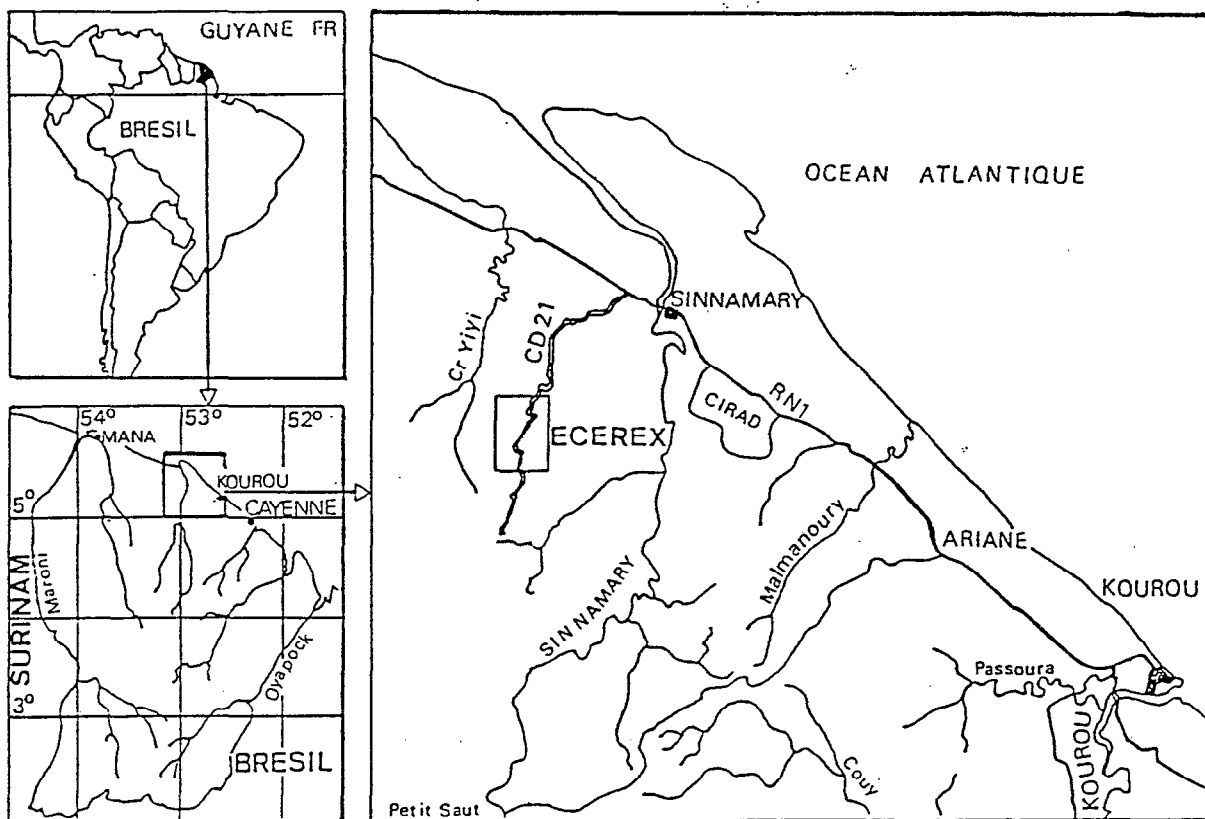


Figure 1.1.01 : Localisation du programme ECEREX

Source : CTFT - Conservation des Sols

Ce site présentait les avantages suivants :

- il était situé à l'intérieur de la zone du permis d'exploitation du consortium ARBOCEL,
- la piste était praticable pour les véhicules utilitaires et de tourisme en toutes saisons et donnait accès à une forêt non perturbée par l'activité humaine, puisque ce site était éloigné de toute voie navigable et que la piste n'avait été ouverte qu'en 1976. Cette conjonction favorable était exceptionnelle en Guyane à cette époque où le réseau routier très embryonnaire imposait d'utiliser la voie d'eau dès que l'on quittait la plaine côtière.

Ce caractère favorable du site s'est ensuite progressivement dégradé par suite d'une colonisation agricole spontanée le long de la piste au point qu'à partir de 1981, il a été nécessaire d'imposer un périmètre légal de protection pour conserver intactes les caractéristiques des bassins en phase d'étude du milieu naturel, des bassins-témoins et des zones d'études du recrû forestier.

Les activités requises pour la réalisation des objectifs ont été menées à deux niveaux :

- des études "diffuses" réparties sur l'ensemble de la zone forestière du projet. Il s'agit essentiellement des travaux d'inventaire, des études de l'anatomie et de la physiologie de la forêt et des relations plantes-animaux.
- des études "captives", menées sur des unités expérimentales sur lesquelles seront reproduites les manipulations prévues par le projet papetier, afin d'observer et de mesurer les impacts provoqués par le déforestation et les aménagements.

L'étude des bilans d'eau et des flux de sédiments avant et après traitement, nécessairement conduite sur des systèmes fermés - bassins versants ou parcelles - est identifiée par les promoteurs comme un thème central de l'étude d'impact.

Ces bassins versants ont été choisis de concert par hydrologue et pédologues (Roche, 1979 ; Boulet, 1979), de manière à intégrer la grande variabilité du milieu naturel, que laissait prévoir une analyse pédologique fondée sur la dynamique de l'eau le long des versants. Le nombre de 10 bassins finalement retenu semblait adéquat, tant pour atteindre à la connaissance exhaustive du milieu naturel, que pour tester pendant la phase d'expérimentation la plupart des scénarios d'aménagements prévus.

Les caractéristiques du modelé et les contraintes hydrauliques ont été déterminantes pour fixer la surface des bassins-versants à 1 ou 2 hectares. Au delà de cette surface, le lit des cours d'eau rejoint la zone inondable : le régime hydrologique devient plus complexe que celui d'un bassin seulement "versant", et il devient difficile d'estimer les débits avec précision (étalement des écoulements, tarages non biunivoques).

Les observations ont débuté sur 2 bassins en janvier 1977 et les 2 derniers bassins ont été mis en service en décembre 1978.

Le protocole (Roche, 1979) prévoit l'étude de chaque bassin versant sous forêt naturelle pendant 2 saisons pluvieuses au minimum, avant de procéder au déforestage et à la mise en place de l'expérimentation choisie. Cette phase de connaissance du milieu naturel doit permettre d'élaborer une modélisation pluies-débits des bassins versants. Ces modèles permettront de reconstituer les écoulements des bassins dans leur état originel, de les comparer avec les valeurs effectivement mesurées pendant les expérimentations, et d'en évaluer ainsi les effets. Une possibilité complémentaire de prédiction est offerte par les informations collectées sur 2 bassins témoins, qui conserveront leur couvert forestier originel pendant toute la durée de l'expérience, constituant ainsi des modèles hydrologiques naturels (*paired-watershed technique*).

Le terme de la phase intensive du suivi des bassins versants était fixé à la fin de l'année 1984.

1.2 ESQUISSE DU MILIEU NATUREL

1.2.1 ELEMENTS DU CLIMAT DE LA GUYANE

1.2.1.1 Pluie annuelle

La pluviosité en Guyane Française est abondante : il tombe entre 2 et 4 mètres d'eau par an, selon les sites. Plusieurs cartes d'isohyètes moyennes interannuelles ont été élaborées, par exemple, Hiez et Dubreuil (1964) ; Boyé et al. (1979) ; Anonyme - Bulletin climatologique mensuel de la Météorologie Nationale. Cette dernière interprétation, périodiquement remise à jour, fait l'objet de la figure 1.2.01 (normales trentenaires 1956-1985).

Tous les auteurs ont été confrontés à l'embarras de tracer les isohyètes à l'intérieur du pays, où le nombre des postes pluviométriques est notoirement insuffisant pour représenter avec certitude la répartition spatiale des précipitations, ce qui explique des différences sensibles entre les tracés dans la moitié Sud du pays. Tous ces documents s'accordent cependant sur l'existence d'une zone de plus forte pluie sur une bande parallèle à la côte et située entre 20 et 30 km à l'intérieur des terres. A l'exception de l'extrême Nord-Ouest du pays (Région de Mana - St. Laurent), cette dorsale dépasse 3000 mm, atteignant probablement plus de 4000 mm localement au Sud Est de Cayenne sur les reliefs de Kaw. Il y a donc un gradient positif important dans le sens NO-SE (1500 mm à Mana et 3500 mm à St Georges de l'Oyapock), et un autre gradient selon un axe perpendiculaire à la côte (NE-SO), de la mer jusqu'au sommet de la dorsale. La pluviométrie diminue ensuite vers l'intérieur.

Selon la figure 1.2.01, la zone de l'expérimentation ECEREX se situe entre les isohyètes 3000 et 3500 mm.

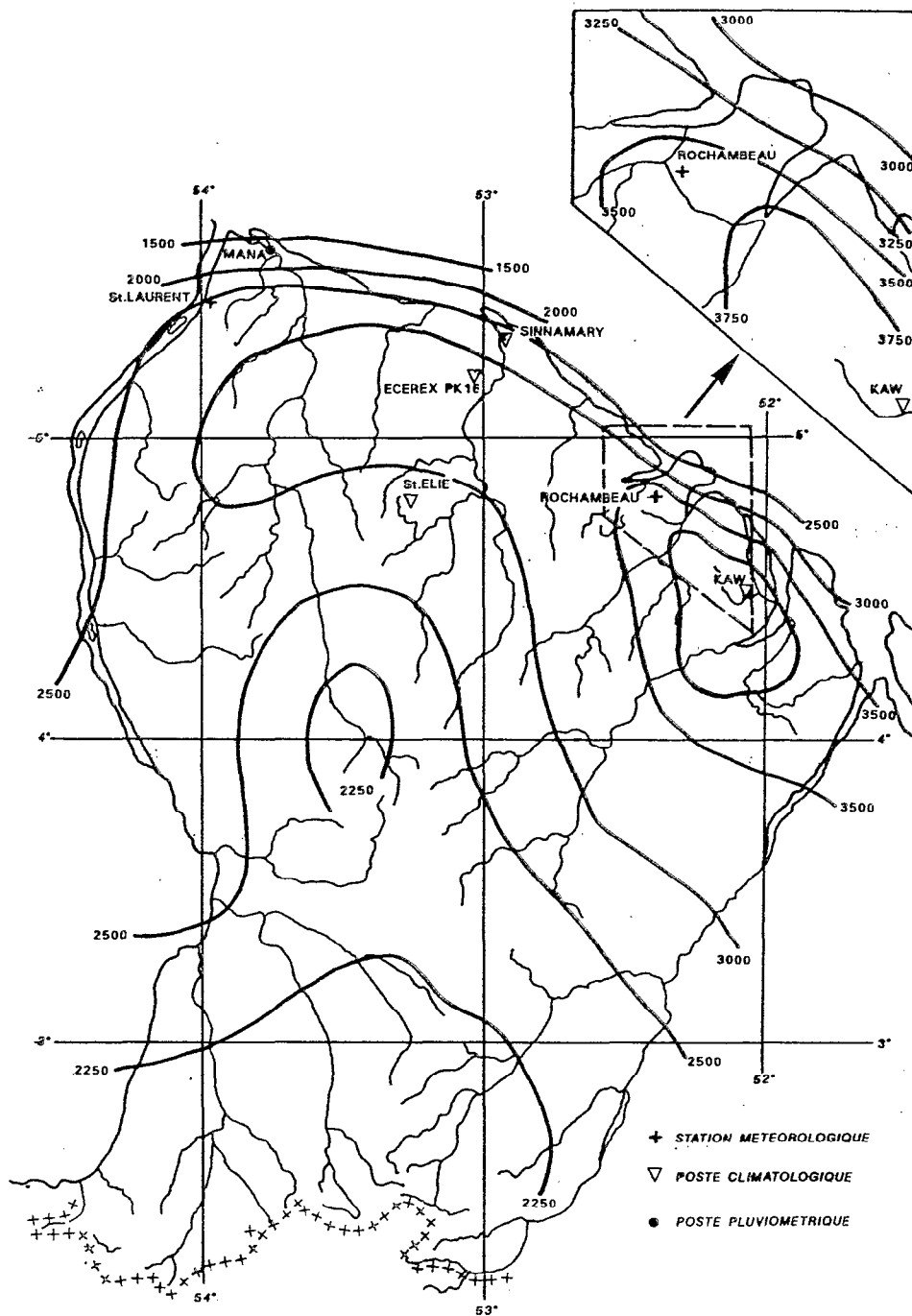


Figure 1.2.01 : Pluviométrie moyenne annuelle sur la Guyane

Période 1956-1985 - Isohyètes en millimètres

Source : Service Météorologique de la Guyane

1.2.2.2 Masses d'air et types de temps

De part sa position en latitude (entre 2° et 6° Nord) et sa situation côtière, la Guyane se trouve sous l'influence de deux centres d'action anticyclonique :

- l'anticyclone des Açores, qui dirige l'alizé de NE,
- l'anticyclone de St. Hélène, qui dirige l'alizé de SE.

La convergence des masses d'air transportées par les alizés a pour conséquence la création et l'entretien d'une zone de perturbation, dite **Zone Intertropicale de Convergence (ZIC)**. La ZIC se déplace en un mouvement saisonnier qui suit le passage du soleil au zénith, avec un retard de 6 semaines à 3 mois. Ce mouvement de la zone perturbée détermine le rythme des saisons pluviométriques, à savoir :

- La saison des pluies :

La ZIC est présente, ou la Guyane est située dans le flux de l'alizé de NE. Cette situation persiste habituellement de fin novembre à mi-juillet. Mais présence de la ZIC ou flux de NE ne sont pas nécessairement synonymes de pluie. Delourme (1956), puis Fougerouze (1965) ont constaté que ces conditions pouvaient correspondre à des types de temps très variés. Fougerouze a proposé une classification des types de temps de saison des pluies en fonction de l'instabilité des masses d'air, selon la terminologie suivante : ZIC modérée à forte, instabilité de NE modérée à forte, ZIC faible à modérée, ZIC inactive, régime de NE peu actif à inactif.

Les périodes de beau temps ne sont pas rares pendant cette saison des pluies et correspondent aux deux derniers types de temps : c'est ainsi que pendant les 213 jours de saison des pluies, de décembre à juillet, en prenant comme référence le poste bien arrosé de Rochambeau, il y a "seulement" 124 jours - soit 58% du temps - avec des pluies dépassant 5 mm (Anonyme - Météorologie Nationale, 1977).

Une période de beau temps privilégiée s'observe lorsque la ZIC atteint sa position la plus méridionale, au Sud de la Guyane (entre 0° et 5° Sud). Cette situation est généralement observée en février-mars et se traduit par une accalmie sensible dans les précipitations et par un minimum pluviométrique relatif en février : à Rochambeau, il tombe 328 mm en février contre 408 mm en janvier et 391 mm en mars (période 1951-85). Ce régime se maintient en général pendant les 2 premières décades du mois de mars, et le total pluviométrique de ce mois, en hausse par rapport à février, est dû à l'occurrence de pluies importantes qui accompagnent la remontée de la ZIC vers le Nord pendant les derniers jours du mois. A Cayenne-Ville, on dénombre moins de 10 jours de plus de 5 mm pendant chacun des mois de février et mars : c'est "le petit été de mars" de la tradition orale. L'occurrence statistique de cette période de rémission, ainsi que le fait astronomique incontestable du passage du soleil au zénith 2 fois par an ont amené certains auteurs à considérer qu'il y avait 4 saisons en Guyane : "petite saison des pluies", "petit été de mars", "grande saison des pluies" et "saison sèche" (Hiez et Dubreuil, 1964 ; Blancaneaux, 1981). *Régime équatorial de transition* ou *régime tropical de transition*, les nuances subtiles ne manquent pas pour qualifier le régime pluviométrique de la Guyane et alimenter des débats d'experts quelque temps encore...

Le mois de mai est partout le plus pluvieux, suivi par juin ou avril selon les stations. A Rochambeau, le total de ces trois mois de "grande saison des pluies", soit 1484 mm représente plus de 40% de la pluie annuelle.

- La saison sèche :

Elle dure de fin juillet à fin novembre et correspond à une position de la ZIC au Nord de la Guyane. C'est généralement une période de beau temps au sein d'un flux d'alizé de SE. Cependant, ces masses d'air peuvent être animées par une instabilité faible à modérée et donner quelques pluies orageuses en soirée. A Rochambeau, les 4 mois d'août à novembre reçoivent 466 mm, soit à peine 12% du total annuel. Au coeur de cette saison sèche (septembre et octobre), des pluviométries journalières supérieures à 5 mm ne s'observent en moyenne que durant 7 jours sur 61. Selon les zones, la période de "sécheresse", définie par $P < ETP$, dure entre 14 et 18 semaines (Guillobez et Godon, 1984).

Le régime thermique est peu contrasté : la température moyenne annuelle est de 26.1°C à Rochambeau (période 1951-1985) ; les moyennes du mois le plus chaud (octobre) et du mois le moins chaud (juin) sont respectivement de 26.6°C et de 25.9°C. Par rapport à ces chiffres, les écarts diurnes sont relativement importants : 6°C à 8°C pendant la saison des pluies et 10°C à 12°C en saison sèche (Perrot, 1975).

Les pluies et les températures situent sans équivoque la Guyane Française dans le domaine tropical humide, avec quelques spécificités, comme une variabilité pluviométrique interannuelle importante pour cette latitude et une répartition mensuelle des pluies très irrégulière d'une année à l'autre.

le coefficient K3 (rapport des pluies de l'année décennale humide aux pluies de l'année décennale sèche) vaut 1,7 à Rochambeau. Pour un régime pluviométrique de type équatorial, cette valeur est forte, si on la compare à celles calculées par Olivry (1986) sur les stations du Cameroun humide où les K3 les plus élevés sont de 1,4, comme par exemple à Douala ($P = 4129$ mm), à Manfé (3359 mm) ou à Kribi (2822 mm). Des K3 de 1,7 correspondent aux distributions des pluies annuelles de la partie la plus au vent de l'île de la Guadeloupe (pluie annuelle 1200 à 1500 mm) dans un régime tropical insulaire soumis à l'influence des cyclones et réputé pour sa variabilité (Chaperon et al., 1985).

Quant à l'irrégularité inter-mensuelle, on notera par exemple que l'année 1976, qui est la plus forte dans la série de données, comporte à la fois les records d'abondance en saison pluvieuse et d'indigence en saison sèche. A Rochambeau, on a enregistré :

- Total annuel de 1976 : 5428 mm, soit 1,5 fois la normale (récurrence cinquantennale humide)
- Total de janvier à juillet (saison des pluies) : 4697 mm, soit 1,65 fois la normale.
- Total d'août à novembre (saison sèche) : 205 mm, soit 0,42 fois la normale

La bande côtière entre Cayenne et Sinnamary avait reçu alors moins de 5 mm de pluie au cours des 2 mois de septembre et d'octobre.

1.2.2 LE REGIME DES PRECIPITATIONS A ECEREX

1.2.2.1 Pluies décennales, mensuelles et annuelles

La moyenne pluviométrique interannuelle mesurée à ECEREX PK16 s'établit à 3136 mm (tableau 1.2.01). Cette valeur, calculée en année hydrologique (octobre à septembre) sur la décennie 1977-78 à 1986-87 est fortement marquée par une série de 3 années à faible total en fin de période (1984-85 à 1986-87).

La période 1977-1984 qui correspond aux observations hydrologiques intensives (étalonnage des bassins-versants en milieu naturel, défrichage, mise en place des aménagements) était nettement plus humide, puisque la moyenne calculée sur cette période était de 3324 mm.

L'enchaînement des mécanismes climatiques décrits plus haut est visible sur l'histogramme des précipitations décennales moyennes (figure 1.2.02). On peut y voir l'occurrence des premières pluies associées à l'arrivée de la Zone Intertropicale de Convergence dans les derniers jours de novembre et l'établissement de la "petite saison des pluies", puis l'accalmie du 10 février au 20 mars pendant laquelle la ZIC est passée au sud de la Guyane (période avec moins de 70 mm par décade). Le retour de la ZIC est brutal et s'accompagne de fortes pluies (dernière décade de mars avec 145 mm), et marque le début de "la grande saison des pluies" entre le 10 avril et le 20 juin. Il tombe alors plus de 110 mm par décade.

Le figuré des pluviométries mensuelles moyennes, maximales et minimales (figure 1.2.03) permet d'apprécier l'amplitude de l'irrégularité saisonnière à ECEREX : la moyenne du mois le plus arrosé (mai) s'établit à 513 mm mais aura varié pendant la décennie entre 339 mm (1978) et 1006 mm (1984).

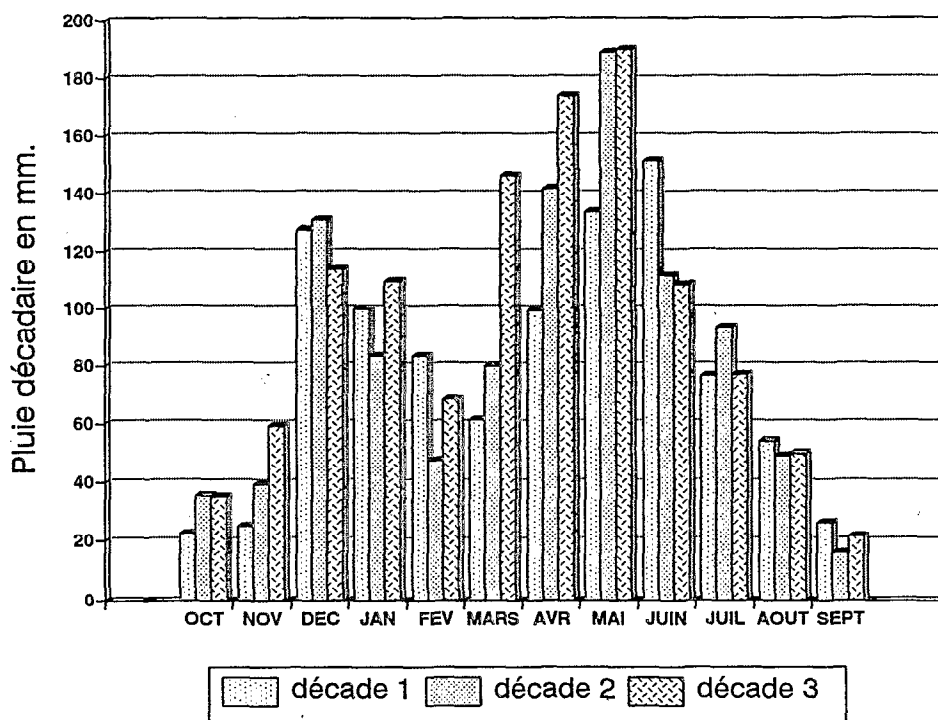


Figure 1.2.02 : Pluviométrie moyenne par décade à ECEREX (BV A et PK 16)

Période : janvier 1977 à septembre 1987

Source : CTFT-Conservation des Sols

	oct.	nov.	dec.	jan.	fev.	mars	avr.	mai	juin	juil	août	sept.	Année
1977				142,8	226,3	223,7	540,3	661,7	276,0	214,0	201,5	155,5	
1977-78	97,2	81,4	696,7	310,6	240,8	210,1	293,8	338,8	342,3	293,1	333,8	166,6	3405,2
1978-79	94,4	88,7	601,3	250,1	158,0	520,7	603,9	360,3	324,0	324,1	202,1	75,9	3603,5
1979-80	13,9	98,7	279,4	306,4	32,5	325,8	444,1	635,6	536,3	289,7	141,7	45,8	3149,9
1980-81	113,2	126,5	244,6	310,0	432,4	68,5	376,1	451,9	369,7	281,1	126,7	28,5	2929,2
1981-82	89,3	101,1	414,0	267,0	342,5	437,5	479,2	672,5	322,2	185,5	90,6	49,9	3451,3
1982-83	26,3	159,3	134,1	251,1	210,4	473,1	914,3	393,3	205,1	154,5	65,0	68,0	3054,5
1983-84	29,7	30,6	247,4	643,9	83,1	343,4	337,9	1005,8	403,8	262,7	141,0	149,5	3678,8
1984-85	179,7	262,7	497,7	110,5	105,3	262,0	224,7	402,3	427,5	197,6	266,8	13,0	2949,8
1985-86	155,2	79,1	328,8	272,6	239,2	187,7	65,3	475,4	562,1	227,7	134,3	10,6	2738,0
1986-87	135,1	210,4	282,3	208,8	154,9	48,8	417,1	393,5	221,7	255,2	36,8	29,4	2394,0
Moyenne	93,4	123,9	372,6	293,1	199,9	287,8	415,6	512,9	371,5	247,1	153,9	63,7	3135,4
Maximum	179,7	262,7	696,7	643,9	432,4	520,7	914,3	1005,8	562,1	324,1	333,8	166,6	3678,8
Minimum	13,9	30,6	134,1	110,5	32,5	48,8	65,3	338,8	205,1	154,5	36,8	10,6	2394,0

Tableau 1.2.01 : Pluies mensuelles et annuelles à ECEREX (BV.A et PK.16)

Période : janvier 1977 à septembre 1987

Source : CTFT-Conservation des Sols

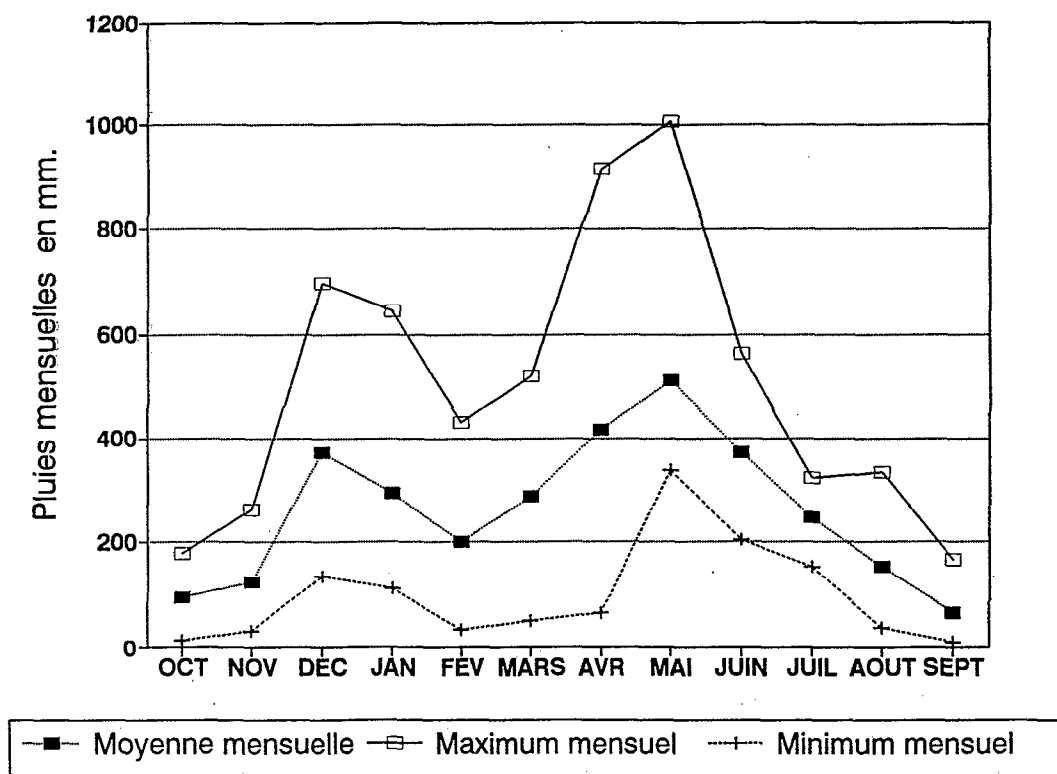


Figure 1.2.03 : Pluies mensuelles moyennes, maximales et minimales à ECEREX (BV.A et PK.16)

Période : janvier 1977 à septembre 1987

Source : CTFT-Conservation des Sols

1.2.2.2 Stations pluviométriques de référence

L'expérimentation ECEREX porte sur une courte période. La transposition des résultats obtenus à cette occasion impose d'établir une relation avec une série climatique de plus longue durée, permettant d'apprécier à la fois la représentativité spatiale du site et les caractéristiques temporelles de la période de l'expérimentation.

Les stations pluviométriques du réseau de la Météorologie Nationale et du Réseau Météorologique Départemental susceptibles d'être utilisées comme référence de longue durée pour ECEREX sont :

Sinnamary-Ville, située à 15 km à vol d'oiseau seulement, mais qui bénéficie d'un régime côtier nettement moins arrosé : la moyenne interannuelle sur la période 1956-1985 s'établit à 2708 mm (Anonyme - Météorologie Nationale, 1985).

La station de **St. Elie-Bourg** située à 60 km dans le S-SO d'ECEREX, au delà de la dorsale de pluviométrie maximum, dans une situation climatique déjà représentative de l'intérieur du pays. Les relevés comportent des lacunes assez nombreuses (97 mois de relevés sont manquants entre 1949 et 1988). Sur cette période la pluie moyenne interannuelle à St. Elie est de 2575 mm (Anonyme - Météorologie Nationale, 1988).

La station météo synoptique de **Rochambeau Aéroport** est beaucoup plus éloignée (90 km), mais sa distance à la mer est comparable à celle de la zone ECEREX, et de ce fait le total interannuel et le régime des précipitations à Rochambeau sont proches de ceux d'ECEREX. La moyenne annuelle à Rochambeau sur la période 1951-1985 est de 3685 mm (Anonyme - Météorologie Nationale, 1985)

Cette caractéristique peut être vérifiée à partir des corrélations des pluies à ECEREX avec celles des trois stations de référence. La corrélation la plus significative est obtenue avec Rochambeau comme station de base (tableau 1.2.02 et figure 1.2.04). La pluie mensuelle moyenne calculée à ECEREX serait ainsi égale à 90% de celle de Rochambeau.

	Ecerex/Rochambeau	Ecerex/Sinnamary	Ecerex/St Elie
b	-6,8	659	290
a	0,912	0,995	1,08
n	84	82	75
r	0,909	0,839	0,664

Tableau 1.2.02 : Résultats de l'ajustement linéaire des pluies mensuelles
(a=pente, b=ordonnée à l'origine, n=nombre de points, r=coef. de corrélation)
Période 1977-1983 - Pluies mensuelles en dixièmes de mm

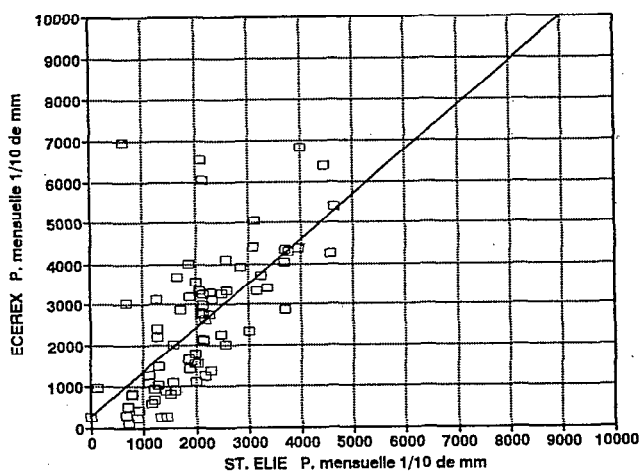
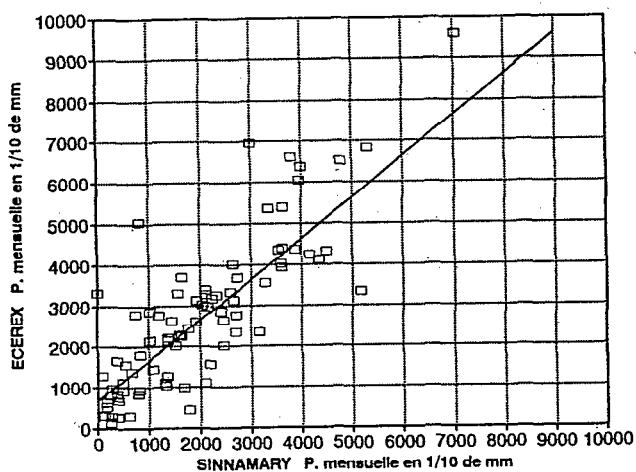
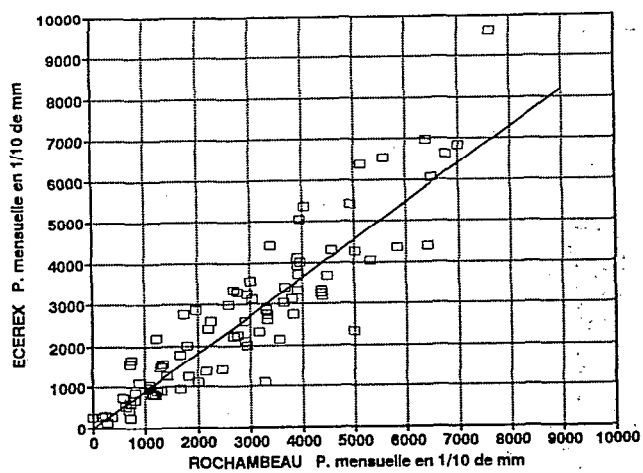


Figure 1.2.04 : Corrélation des pluies mensuelles à ECEREX avec les stations de Rochambeau, Sinnamary et St. Elie

Les échelles abscisses et ordonnées sont en centaines de millimètres

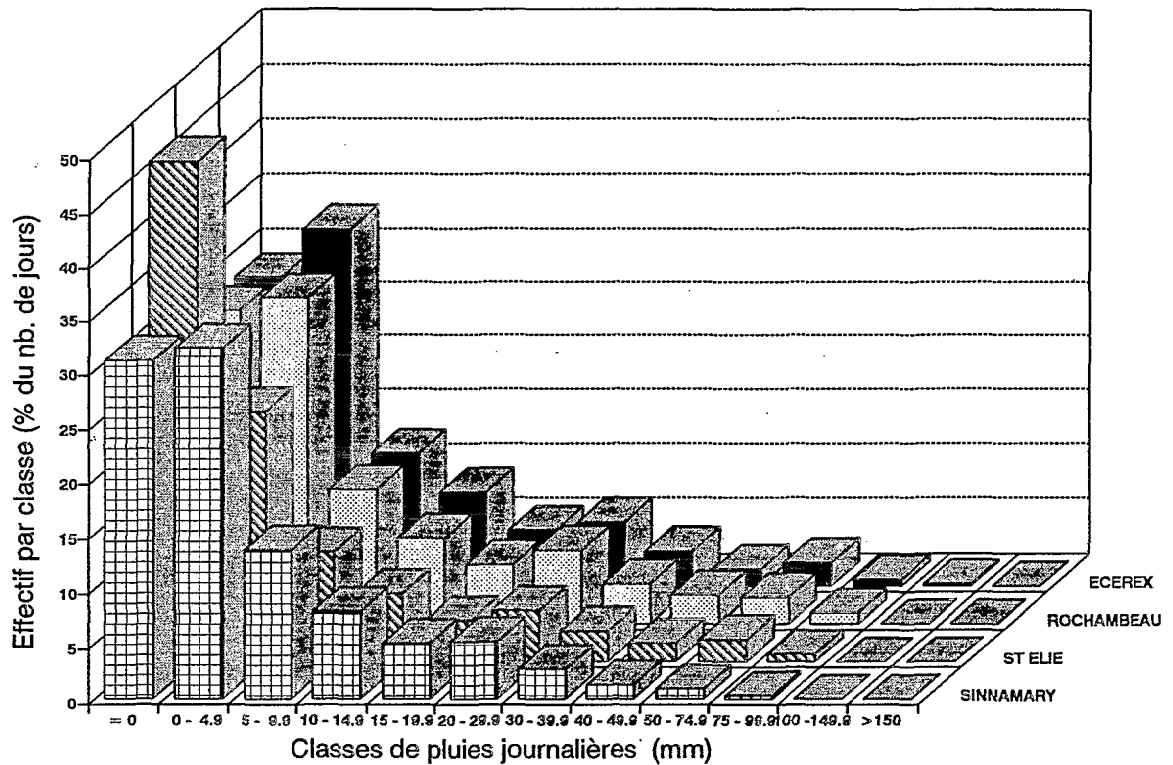


Figure 1.2.05 : Distribution fréquentielle des pluies journalières
à ECEREX, Rochambeau, Sinnamary et St. Elie

En ordonnées : pourcentage du nombre total de jours sur la période
En abscisses : limites des classes en dixièmes de millimètres

limites des classes (mm)	ECEREX 1977-85	Rochambeau 1955-81	Sinnamary 1955-84	St, Elie 1954-84
= 0	28,3	28,7	45,9	31,0
0 - 4,9	32,8	29,9	22,7	32,0
5 - 9,9	12,1	12,1	9,9	13,6
10 - 14,9	8,5	7,8	6,1	8,0
15 - 19,9	5,0	5,3	3,7	5,1
20 - 29,9	5,8	6,6	4,6	5,3
30 - 39,9	3,1	3,7	2,8	2,7
40 - 49,9	1,5	2,6	1,7	1,3
50 - 74,9	2,1	2,4	2,0	0,9
75 - 99,9	0,5	1,0	0,6	0,2
100 -149,9	0,1	0,0	0,0	0,0
>1500	0,0	0,0	0,0	0,0
Total	100	100	100	100

Tableau 1.2.03 : Distribution fréquentielle des pluies journalières
à ECEREX, Rochambeau, Sinnamary et St. Elie

Valeurs en pourcentage du nombre total de jours sur la période

La répartition en fréquence des pluies journalières par tranches de hauteurs vient confirmer cette observation (tableau 1.2.03 et figure 1.2.05). Les histogrammes de Rochambeau et d'ECEREX sont très semblables dans toutes les classes de précipitation. A Sinnamary, au contraire, la fréquence des jours sans pluie est beaucoup plus élevée, au détriment de l'ensemble des classes de pluies journalières non nulles. Le régime de St. Elie est plus proche d'ECEREX, mais cette station n'a jamais été équipée d'un pluviographe et ne permet pas d'établir de statistiques de référence sur des périodes inférieures à 24 heures. La station de Rochambeau-Aéroport constitue de fait la meilleure référence possible et sera retenue comme station représentative de longue durée.

Selon cette hypothèse, et à partir de la corrélation n°1 du tableau 1.2.02 appliquée aux pluies de Rochambeau (période 1951-1985), l'espérance de la pluie interannuelle moyenne à ECEREX est de 3350 mm.

1.2.2.3 Relations Intensités-Durées-Fréquences

Toujours pour cette station de Rochambeau, on a procédé à une estimation des relations intensités-durées-fréquences des précipitations à partir des informations suivantes :

- un abaque (figure 1.2.06), publié par la Météorologie Nationale (Anonyme, 1988), utilisable pour des durées allant de 6 minutes à 4 jours,

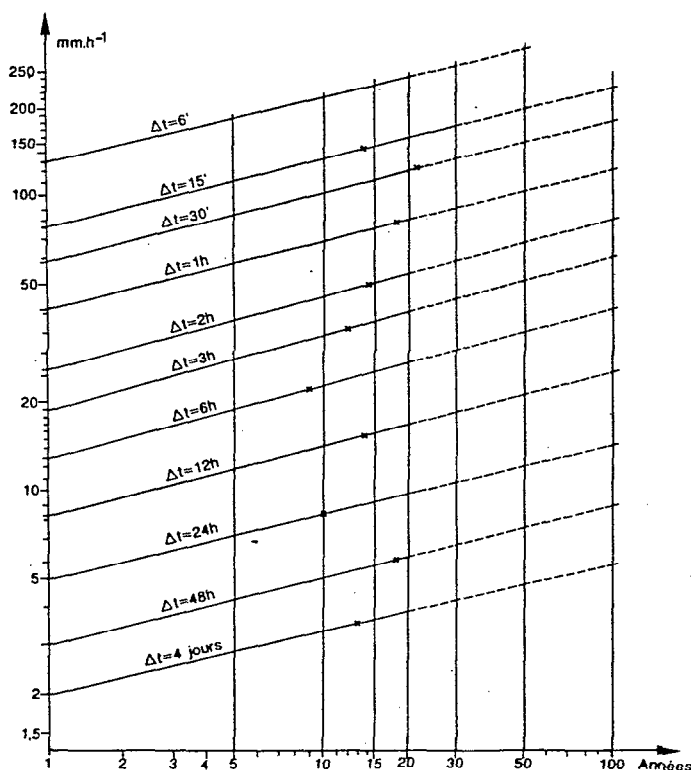


Figure 1.2.06 : Relation Intensité-Durée-Fréquences à Rochambeau
pour des pas de temps de 6 minutes à 4 jours

Période 1961-1980 - Source : Service Météorologique de la Guyane

- une étude statistique à laquelle nous avons procédé, pour des durées allant de 1 jour à 30 jours. On a extrait de la séquence des pluies journalières (période 1955-1981) les totaux glissants sur des périodes de 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20 et 30 jours consécutifs. Une loi de Galton a été ajustée à l'échantillon des plus fortes valeurs annuelles pour chacune des durées considérées. La figure 1.2.07 et le tableau 1.2.04 présentent le résultat de ces ajustements.

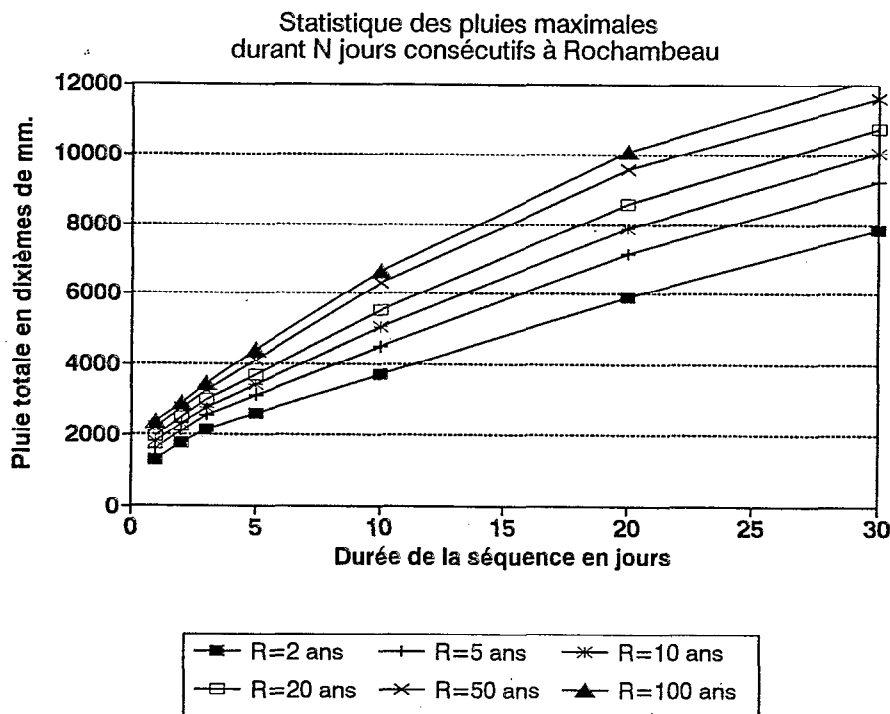


Figure 1.2.07 : Relation Intensité-Durée-Fréquences à Rochambeau pour des pas de temps de 1 à 30 jours

Période 1955-1981

Fréquences : F=0,5	F=0,8	F=0,9	F=0,95	F=0,98	F=0,99	
Récurrences 2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	
1 jour	127	159	179	195	220	236
2 jours	175	209	230	248	272	288
3 jours	213	253	277	298	325	345
5 jours	257	309	342	369	410	437
10 jours	371	448	501	549	628	661
20 jours	587	712	786	859	955	1007
30 jours	785	921	1003	1074	1158	1223

Tableau 1.2.04 : Statistique des précipitations maximales à Rochambeau pendant 1, 2, 3, 5, 10, 20 et 30 jours consécutifs.

Résultats de l'ajustement selon une loi de Galton - (période 1955-1981)

F : Fréquences au non-dépassement. - Intensités en millimètres par heure. - Hauteurs en millimètres

On peut alors caractériser le régime hauteur-intensité-durée pour deux récurrences (biennale et décennale) dans le tableau synthétique 1.2.05.

		6'	15'	30'	1 h	2 h	3 h	6 h	12 h	24 h	2 j	3 j	5 j	10 j	20 j	30 j
2 ans	mm/h	150	90	68	47	30	22	15	9,5	6						
	mm	15	23	34	47	60	66	90	114	144	175	213	257	371	587	785
10 ans	mm/h	215	132	105	70	45	35	26	14,5	8,2						
	mm	22	33	53	70	90	105	156	174	196	230	277	342	501	786	1003

Tableau 1.2.05 : Intensités et durées des pluies à Rochambeau pour les récurrences biennales et décennales et pour des pas de temps de 6 minutes à 30 jours
Intensités en millimètres par heure - hauteurs en millimètres

Cette démarche introduit un léger biais statistique, puisqu'elle marie des résultats obtenus à partir de pluviogrammes exploités avec un pas de temps glissant, avec des relevés de pluies journalières faits à heure fixes. Outre que cette différence s'estompe complètement pour des durées de quelques jours, l'objectif de ce tableau se limite à une caractérisation sommaire de la pluviométrie de la zone climatique de l'expérimentation ECEREX et à relativiser certains de nos résultats par rapport aux travaux d'hydrologie forestière menés dans le Monde, et dont une bonne partie concernent des forêts de climats océaniques tempérés.

Ces valeurs s'appliquent au site de Rochambeau et par conséquent elles surestiment légèrement les précipitations à ECEREX pour une intensité-durée donnée. *Pour l'expérimentation ECEREX, on peut retenir des valeurs de l'ordre de 45 mm pour la pluie horaire de récurrence biennale et de 140 mm pour la pluie de 24 heures de même fréquence. Ces valeurs sont respectivement de 70 mm et de 190 mm pour les fréquences décennales des pluies horaire et journalière.*

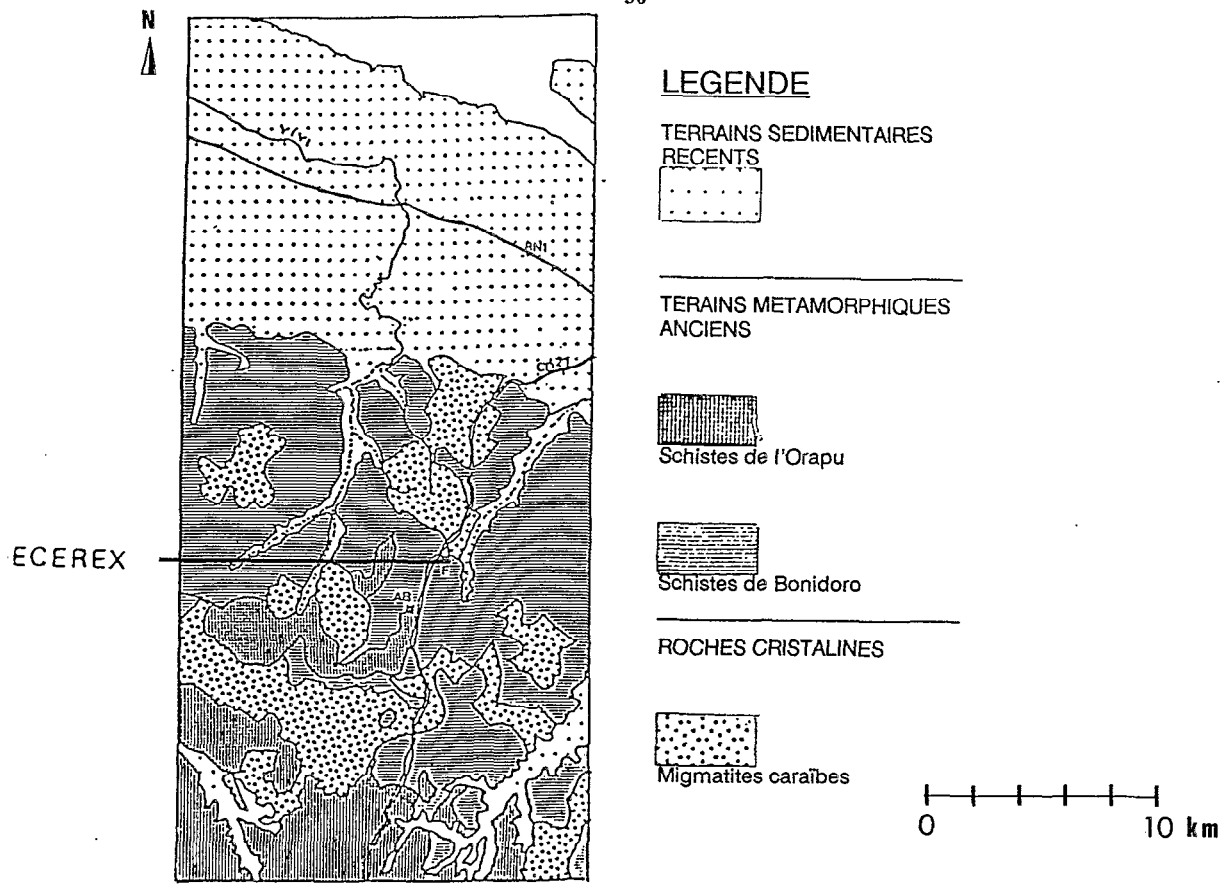


Figure 1.2.08 : Carte géologique de la zone étudiée

Source : Sarraïh (1989)

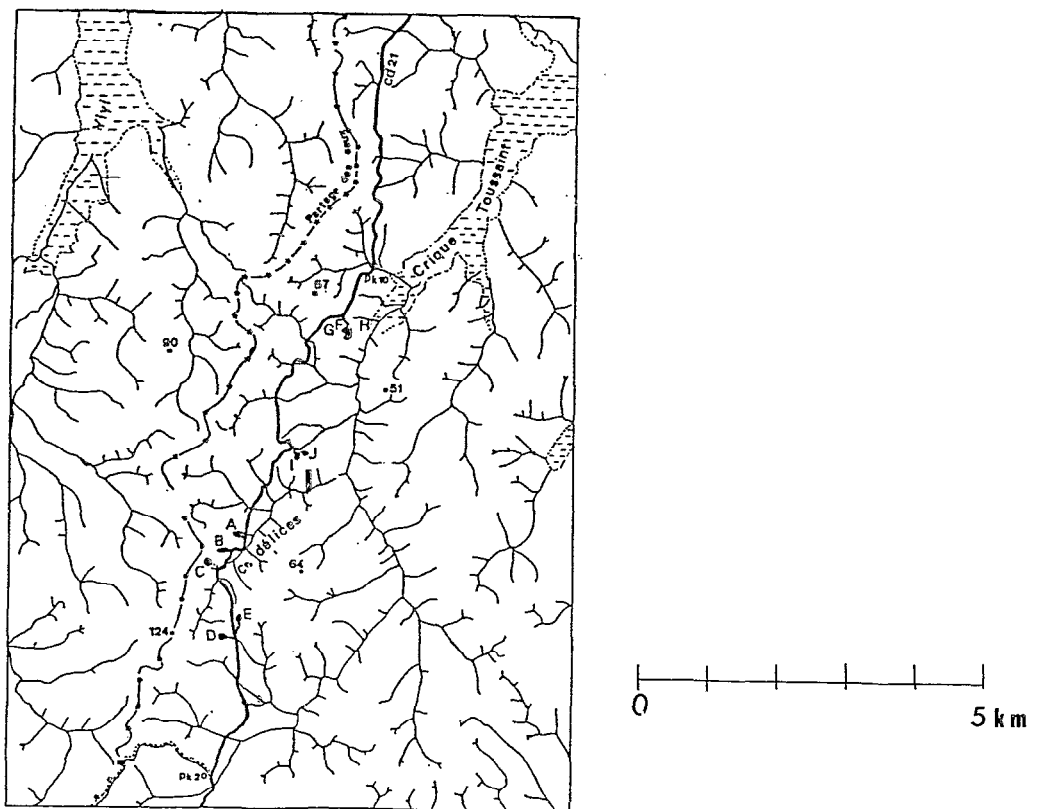


Figure 1.2.09 : Chevelu du réseau hydrographique

Source : Sarraïh (1989)

1.2.3 GEOLOGIE ET MODELE

Le substratum géologique de la zone d'étude est composé de terrains sédimentaires anciens, les schistes de Bonidoro (figure 1.2.08). Les faciès de la roche-mère sont très variables. Barruol (1959) les décrits comme "des schistes fins, qui comprennent parfois des couches ferrugineuses concrétionnées et sont riches en séricite.". Ces caractères ont pu être observés à la faveur de quelques sondages et ce sont les formations d'altération de ces dépôts qui nous sont accessibles à l'affleurement.

Le modelé de cette zone s'individualise en petites collines aux pentes assez fortes (de 15 à 30%), donnant un relief "en dents de peignes" (Choubert, 1974) ou "en amandes" (Boyer, 1976). Les lignes de crêtes sont allongées et culminent à 100 m environ. **La faible longueur des versants crée des unités élémentaires de drainage très petites** (figure 1.2.09) et les talwegs sont nettement marqués pour des surfaces drainées de l'ordre du demi-hectare. Lorsque les bassins versants dépassent la taille de "l'amande élémentaire" (2 à 5 hectares), les talwegs se raccordent à des fonds de vallée plats, dans lesquels les lits mineurs s'entaillent en chenaux sinueux ; la pente du profil en long est insignifiante. Ces collecteurs du drainage sont submergés dès l'occurrence de crues d'importance moyenne, et l'écoulement s'étale alors sur plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines de mètres de largeur.

1.2.4 SOLS ET EAUX A ECEREX

Il faut faire en sorte que tout soit aussi simple que possible, mais pas plus simple (attribué à A. Einstein)

Si le chapitre sur la pédologie est une tradition incontournable dans une étude d'hydrologie analytique, la compilation de la plupart des études de ce type, laisse le sentiment que les données pédologiques des bassins versants sont amenées là à titre illustratif, et que ces informations ont été rarement déterminantes dans le choix du site des bassins versants représentatifs, ni décisives pour étayer les conclusions de l'étude. Dans certains cas, la reconnaissance pédologique a été commandée *a posteriori* comme pour constituer une pièce réglementaire au dossier : données hydrologiques et informations pédologiques coexistent, mais elles sont faiblement ou pas du tout interactives. La zone forestière tropicale humide a été une terre d'élection pour ce type de situation, qui s'est vérifiée en particulier en Guyane Française pour les trois bassins versants représentatifs étudiés préalablement à ceux d'ECEREX (Crique Virgile, Crique Cacao, Crique Grégoire).

Pourtant, la plupart des hydrologues ont tenté de croiser leur thématique avec cette information pédologique mais, à les en croire, leurs efforts auraient été le plus souvent mal récompensés. A propos des coefficients de ruissellement très élevés mesurés sur des bassins versants en zone forestière de Côte d'Ivoire, Rodier (1976) conclut " *Si on était sûr que la nature du sol y était pour quelque chose, on ne voyait guère comment on pouvait généraliser ces résultats, car les causes de l'imperméabilité du bassin n'étaient pas simples. On doit dire qu'en domaine forestier et ferrallitique, la majorité des sols est assez perméable. Seul un horizon superficiel dit fréquemment horizon de consistance peut présenter de faibles porosités et perméabilités relatives, mais étant donné l'importance des précipitations tout se passe comme si on avait un horizon imperméable. Pour ceux des sols ferrallitiques, qui manifestement doivent être considérés comme*

imperméables, les horizons superficiels sont perméables, soit en raison de la structure grumeleuse, soit en raison de l'appauvrissement en éléments fins (horizons sableux)."

Le verdict est abrupt et sans appel : les unités de sol que le pédologue individualise sur sa carte, ont un sens précis par rapport à sa propre science, mais l'hydrologue est impuissant lorsqu'il lui faut établir une relation biunivoque entre un objet identifié dans la terminologie pédologique (sol ferrallitique, par exemple) et son comportement hydrologique. Ceci est tellement vrai, que bien souvent dans les synthèses régionales, les hydrologues ont été contraints d'abandonner l'information pédologique, et avoir recours à la géologie (c'est à dire aux caractéristiques de la roche-mère) comme paramètre discriminant entre bassins versants (Dubreuil, 1985). Ce fut le cas en Guyane Française lorsqu'au début des années 60, les hydrologues ont cherché à caractériser la variabilité hydrologique sur le territoire. Leurs choix en matière de représentativité ont été guidés par l'extension des formations géologiques les plus caractéristiques et ont abouti au suivi d'un bassin représentatif sur granites (Grégoire), d'un bassin sur schistes (Virgile) et d'un bassin sur "roches vertes" (Cacao).

L'étude des bassins versants ECEREX a échappé à cette fatalité, car une approche pédologique originale est née et s'est développée en Guyane Française à la fin de la dernière décennie. En une démonstration exemplaire de l'effet de "feed-back" du Développement sur la Recherche de Base, c'est la pression des échecs répétés des tentatives de mise en valeur agricole qui a amené certains pédologues à s'interroger sur la pertinence des critères de classification des sols qui étaient en usage. En effet, comment ne pas rester perplexe, lorsqu'à quelques mètres de distance, la même unité pédologique "officielle" présente des comportements agronomiques opposés, passant d'un sol bien aéré dans lequel l'eau s'infiltrait profondément pratiquement en permanence et qui ne présente pas de contraintes agronomiques particulières, alors qu'à quelques mètres de là, l'eau stagne dans les mares et un écoulement abondant se produit dans chaque talweg élémentaire à la faveur de la moindre averse. Quelle est la clé permettant de comprendre cette organisation, d'expliquer son fonctionnement, de prévoir sa variabilité ?

Les premiers jalons vers une résolution de cette problématique ont été posés par Boulet (1977). Depuis cette date, de nombreux travaux ont été orientés dans la même voie, sur le terrain du programme ECEREX et sur d'autres sites de Guyane. Sans prétendre être exhaustif, on peut citer : Fritsch E. (1977), Boulet et al. (1978), Humbel (1978), Fritsch E. (1979), Boulet et al. (1979), Lucas (1983).

Il est malaisé et peut-être présomptueux de vouloir résumer en quelques lignes ces travaux luxuriants et de brosser à grands traits l'Etat de l'Art selon cette Ecole. Les motivations et les objectifs de cette approche n'ont pas pour finalité de servir de support à la science hydrologique, mais visent à définir une méthodologie pour l'analyse des systèmes pédologiques prenant en compte la répartition spatiale des sols, mais aussi leur origine et leur évolution. L'utilisation de la méthode à des fins hydrologiques est une démarche utilitaire et réductrice qui comporte certaines simplifications et impose quelques raccourcis, que les auteurs admettront sans aucun doute.

L'unité élémentaire de cette investigation pédologique est le versant. Le principe de la prospection consiste à repérer l'occurrence ou la disparition de certains caractères physiques, en surface ou en profondeur (par exemple "apparition de traces d'hydromorphie dans l'horizon superficiel" ou bien "disparition en profondeur d'un horizon sec au toucher"). Ces caractères, observés ponctuellement, sont reportés sur une carte et interpolés sous forme de "lignes d'iso-différenciation". Par différence avec les lignes d'isovaleurs

habituellement figurées sur les cartes, ces lignes peuvent se recouper, car "...La couverture meuble des versants est constituée d'un assemblage complexe de volumes pédologiques, dérivant les uns des autres ou s'influencent mutuellement, volumes dont les limites sont obliques par rapport à la surface topographique et non perpendiculaires à celle-ci." (Boulet, 1979). La carte obtenue doit figurer cette vision tridimensionnelle en plan, ce qui aboutit à un document très renseigné, mais complexe à l'image de la réalité, et dont la consultation est généralement difficile.

Les conditions de circulation des eaux pilotent l'évolution physique et géochimique d'une couverture pédologique. Dans cette approche qui privilégie l'organisation et l'évolution des sols en systèmes, les indicateurs du régime hydrique interne et superficiel des sols sont largement utilisés comme critères de différenciation. La méthode permet de caractériser les sols des bassins versants ECEREX en une présentation synthétique de la dynamique de l'eau sur les versants et dans les bas-fonds. Cette dynamique est ramenée à 5 cas typiques, correspondant à 5 stades d'évolution de la couverture pédologique (Boulet, 1983).

Tous les sols sont issus d'une même couverture pédologique, à l'origine homogène et peu différenciée. L'enfoncement du réseau hydrographique dans cette couverture initiale a entraîné un déséquilibre dans les conditions de drainage interne de ces sols. Les nouvelles conditions du drainage provoquent des transformations de cette couverture, qui se propagent à partir des talwegs vers les sommets des interfluves. C'est l'évolution qui crée la différenciation et les étapes de cette évolution sont repérées sur la figure 1.2.10 :

Stade I :

La couverture pédologique initiale est bien conservée. L'horizon de surface est poreux, à structure micro-agrégée. Cet horizon est épais et ses caractéristiques se maintiennent sur plus de 1,5 mètres. Ce n'est qu'au delà de cette profondeur que des horizons plus compacts et moins drainants font leur apparition. De haut en bas, ces horizons sont appelés *horizon argileux rouge*, puis *horizon rouge sériciteux*. L'horizon argileux rouge contient de 40 à 50% d'argile alors que paradoxalement, l'horizon poreux superficiel est plus riche encore et contient typiquement de 50 à 70% d'argile. Les arrangements structuraux sont donc déterminants par rapport à la texture pour le régime hydrologique interne de ces sols.

L'infiltration de l'eau dans l'horizon superficiel, facilitée par l'orientation verticale de la porosité, est rapide et il faut des conditions pluviométriques exceptionnellement abondantes pour que ces terrains arrivent à saturation, perdent leur comportement perméable et génèrent ainsi des crues moyennes à fortes.

Ces sols à dynamique de l'eau verticale et profonde sont dits à **Drainage Vertical Libre (DVL)**. Ils sont peu fréquents dans la zone de l'étude, et subsistent à l'état de lambeaux sur les parties amont des interfluves.

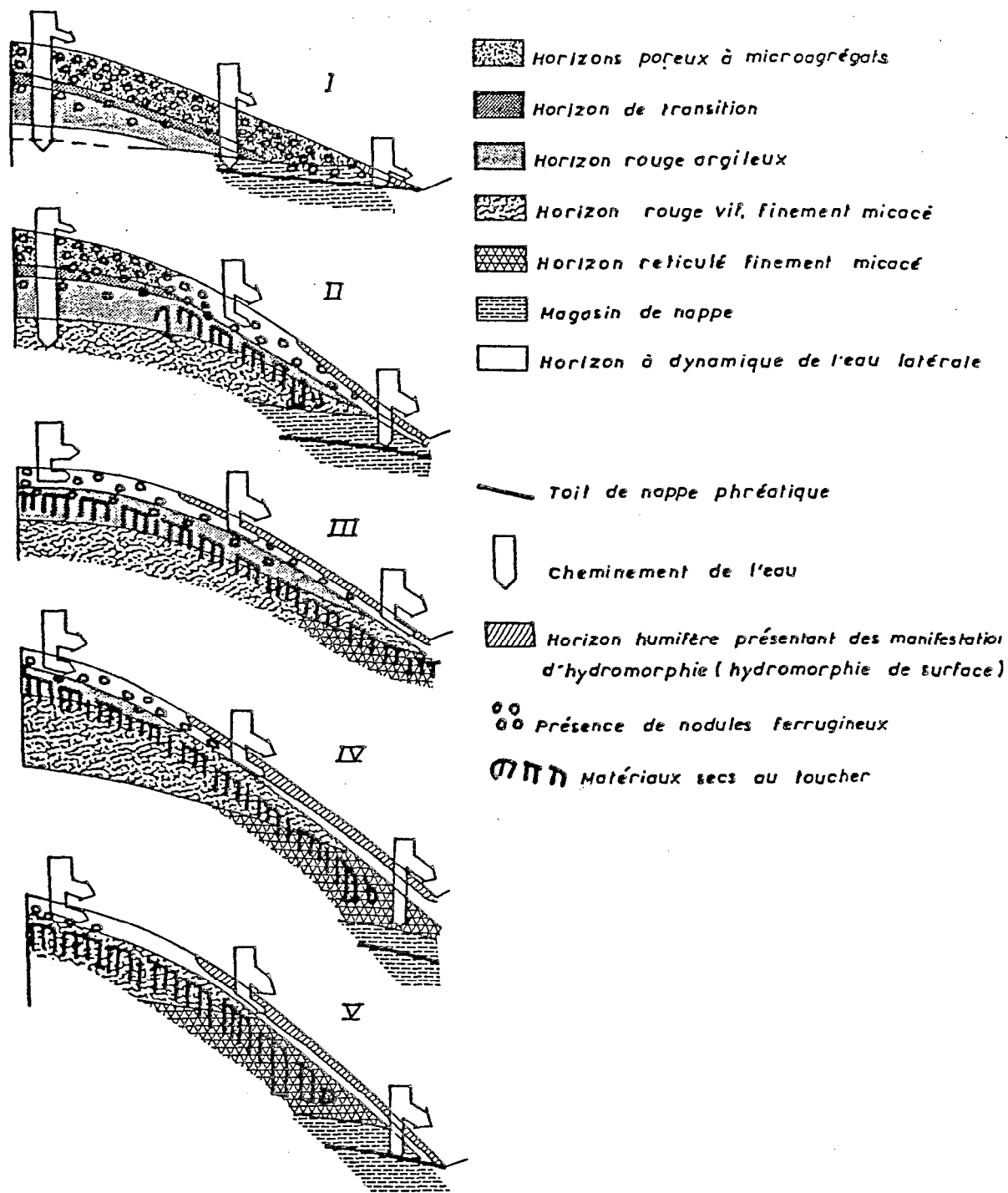


Figure 1.2.10 : Schéma des différents stades d'évolution des couvertures pédologiques

sur schistes Bonidoro

Source: Boulet (1979)

Stades II et III :

Lorsque cet horizon supérieur poreux s'amincit en deçà de un mètre environ, des saturations se produisent à sa base, au contact des horizons plus compacts sous-jacents. Cet amincissement, qui affecte d'abord l'aval des versants, provoque un changement brutal dans la dynamique hydrique interne du sol. En descendant la pente sur un même transect, on passe d'un système de type **DVL**, au comportement perméable, à un système où la dynamique de l'eau est superficielle et latérale. La circulation de l'eau n'est plus verticale, mais orientée dans le sens de la pente, parallèlement à la surface du versant. Le fort ralentissement du drainage vertical génère des nappes d'eau perchées à partir de 5 à 15 cm et jusqu'à 60 cm de profondeur environ. Cette nappe n'est pas continue, mais se présente sous forme de poches d'eau, plus ou moins bien reliées entre elles par des chenaux anastomosés. A l'ouverture des fosses, la nappe se vidange (figure 1.2.11), ce qui est une preuve de la quantité importante d'eau piégée dans ces horizons. Cependant, les lois de l'hydraulique n'autorisent pas à conclure à l'existence et à l'importance volumique d'écoulements latéraux internes en conditions naturelles à partir de cette observation (Atkinson, 1978). Pour preuve de l'existence effective de ces flux, Boulet et al., (1979) font appel à des arguments d'ordre géochimique : il existe dans cet horizon, une concentration relative des éléments les plus résistants à l'hydrolyse, en l'occurrence des nodules ferruginisés. Ce fait est interprété comme étant le résultat d'un entrainement différentiel des éléments plus fins par les flux latéraux. Ce qui demeure indiscutable, c'est que les bassins sur sols de type II-III ont des crues fréquentes avec des coefficients d'écoulement très élevés.

Cette dynamique, dite à **Drainage Vertical Bloqué (DVB)** affecte d'abord la partie basse des versants (c'est le stade II), puis peut se généraliser à l'ensemble d'un bassin élémentaire, depuis le talweg jusqu'à la ligne de partage des eaux. Le stade III de l'évolution pédologique est alors atteint.

Parmi d'autres critères, l'horizon compact argileux rouge était identifié et décrit par les pédologues pendant la prospection par son caractère "sec au toucher". Cet attribut est lié aux caractéristiques mécaniques des échantillons prélevés dans cet horizon (toucher sériciteux, absence de plasticité) et ne signifie pas que ces niveaux compacts ne permettent aucune percolation profonde de l'eau. Prise au pied de la lettre, la terminologie **DVL** est donc impropre et outrancière. Ce fait avait été pressenti par Boulet (1981) et Guehl (1984), puis confirmé par des mesures tensiométriques (Grimaldi et Boulet, 1989). On utilisera donc l'appellation sols à **Dynamique Superficielle et Latérale (DSL)** qui est plus significative, bien que le binôme **DVB-DVL** soit passé dans l'usage, et qu'un grand nombre de travaux pluridisciplinaires aient été publiés en utilisant ces sigles.

Stades IV et V :

La poursuite de l'enfoncement de la surface topographique dans la couverture initiale fait que le talweg atteint le magasin de nappe général. Cette situation affecte la partie aval des bassins élémentaires et les fonds de vallées des petits bassins versants. Les bassins versants présentent alors des écoulements de base qui peuvent être permanents entre les crues et ces zones de nappe affleurante confèrent aux bassins versants considérés des aptitudes à l'écoulement rapide tout à fait exceptionnelles.

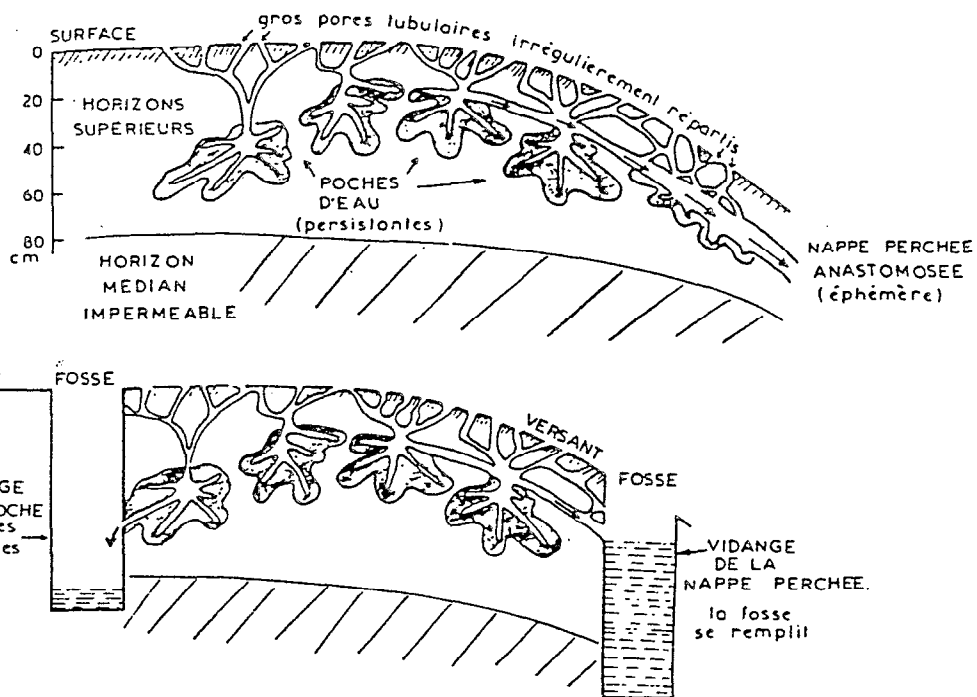


Figure 1.2.11 : Schématisation des poches d'eau et de la nappe perchée dans les sols à dynamique superficielle et latérale.

Comportement à l'ouverture des fosses

Source : Humbel (1978)

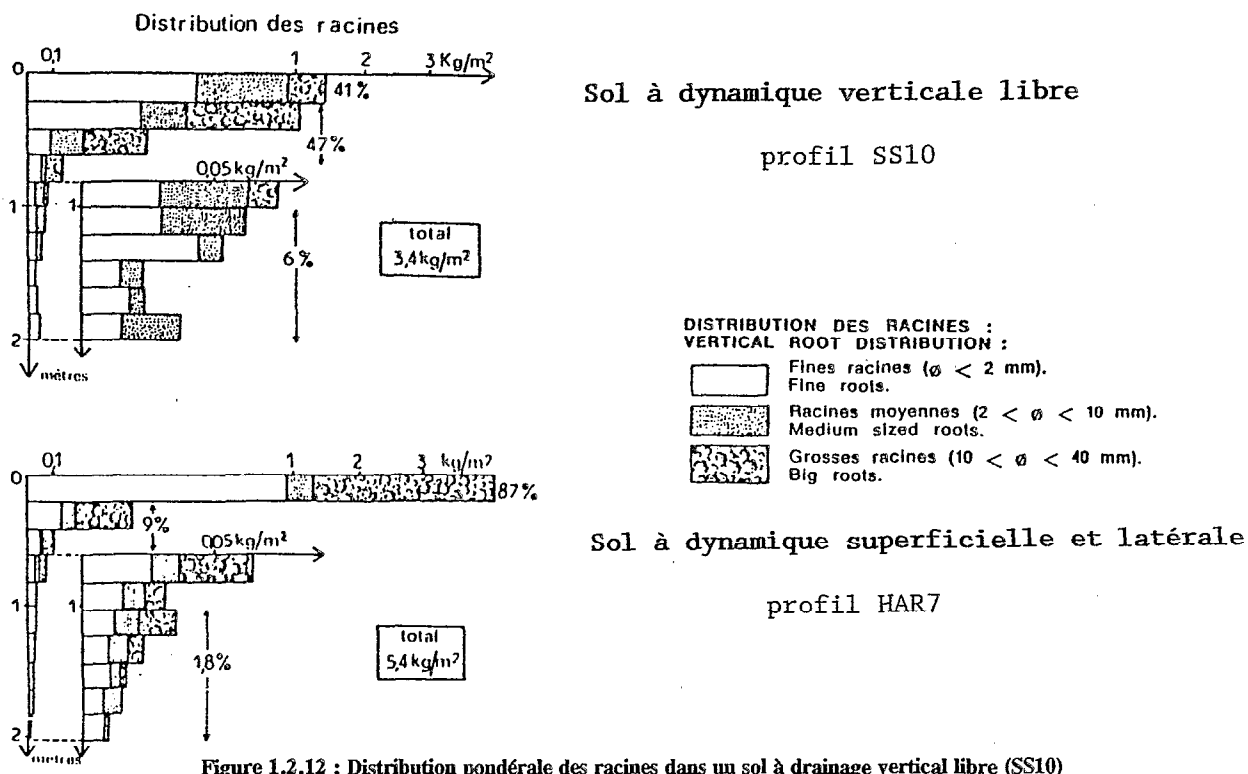


Figure 1.2.12 : Distribution pondérale des racines dans un sol à drainage vertical libre (SS10)

et dans un sol à dynamique superficielle (HAR7)

Distributions en kg.m^{-2} , profondeurs en m. - Source : Humbel (1978)

On utilisera le qualificatif "Ecoulement Rapides de Crue - (ERC)" utilisé par Cosandey (1986) sans préjuger encore des mécanismes de production de l'eau des crues (ruissellement de surface, écoulements internes de différentes natures, etc).

En anticipant un peu sur les résultats d'observations hydrologiques, quelques chiffres permettent de fixer les ordres de grandeur des différences de comportements de bassins-élémentaires en milieu naturel pour les 3 groupes qui viennent d'être décrits :

Sols à Drainage Vertical Libre : Rapportée à la pluie annuelle, la part de l'ERC sur un bassin entièrement sur sols à DVL n'est que de 4,2% (valeur annuelle du bassin C en 1978). Il aura fallu un épisode pluvieux très intense, soit 290 millimètres en moins de 4 jours (du 20 au 23 décembre 1977), pour observer une crue avec un coefficient d'ERC notable, de 21%.

Sols à Dynamique Superficielle et Latérale : L'ERC annuel est 4 fois plus élevé sur ces sols à DSL que sur ceux à DVL. Des coefficients d'ERC par averse dépassant 50% ne sont pas rares. Par exemple, ils ont été observés 5 fois par an en moyenne entre 1977 et 1983 sur le bassin B.

Versants à DSL et présence d'une nappe de bas-fond : l'Ecoulement Rapide de Crue annuel représente de 30% à 35% de la pluie et l'écoulement total annuel de l'ordre de 45% de celle-ci (chiffres constatés au bassin F, moyenne 1978-1983). Les coefficients d'ERC par averse dépassent 75% neuf fois par an.

Humbel (1978) a procédé à des mesures physiques et hydriques pour quantifier les caractères des différents types de sol. Des mesures d'infiltration forcée - dites de perméabilité de surface - ont été faites en mesurant le temps d'infiltration d'une lame d'eau de 12 cm d'épaisseur à l'intérieur de cadres métalliques en acier de 250 cm² de section. Une expérimentation est faite avec 10 cadres placés à quelques décimètres les uns des autres. Le résultat de chaque mesure est exprimé en cm.h⁻¹ en divisant la lame d'eau (12 cm) par le temps nécessaire jusqu'à infiltration complète. La méthode ne prétend pas déterminer les paramètres hydrauliques d'un type de sol, comme le permet l'utilisation d'un simulateur de pluie, mais de fournir un indice relatif de comparaison entre les différentes unités étudiées.

Les résultats se différencient nettement selon deux modes, entre les groupes à drainage vertical libre et ceux à dynamique superficielle et latérale (tableau 1.2.06 et figure 1.2.13) :

La perméabilité de surface est plus forte sur sols à drainage libre avec une médiane comprise entre 360 et 912 cm.h⁻¹, alors que sur sols à drainage bloqué, ces valeurs oscillent entre 40 et 206 cm.h⁻¹.

Une autre constatation s'impose : la dispersion des mesures individuelles, c'est à dire la micro-hétérogénéité, est très importante sur les sols à DSL. Ainsi, à ECEREX, sur un même site (HAR7), le rapport des valeurs des perméabilités maximale et minimale atteint 2400.

La comparaison de l'enracinement dans un sol à DSL (site HAR7) et dans un sol à DVL (site SS10) vient confirmer et expliquer ces caractéristiques de perméabilité (figure 1.2.12). Sur DSL, rapportée au poids total des racines dans la tranche 0-2 m, la tranche 0-20 cm contient 87% du poids, la tranche 20-60 cm n'en contient que 9%, et la tranche 1-2 m moins de 2%.

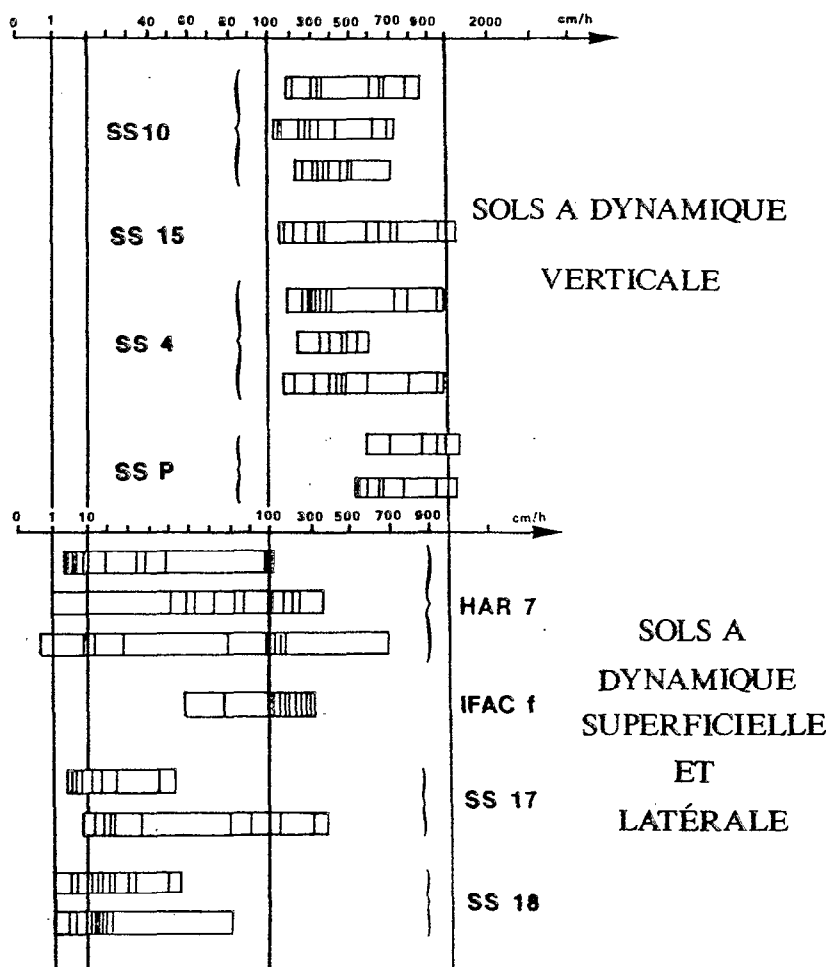


Figure 1.2.13 : Dispersion des résultats de mesure des perméabilités de surface. Unité = cm.h^{-1} .
 Les sols à dynamique verticale sont plus perméables et la dispersion des perméabilités est moins forte que sur les sols à dynamique verticale. Sources : Boulet et al. (1979) ; Humbel (1978)

Tableau 1.2.06 : Dispersion des résultats de mesure des perméabilités de surface. Unité = cm.h^{-1} .
 Sources: Boulet et al. (1979) ; Humbel (1978)

Sols à Dynamique Verticale Libre

Site	k+	k-	k+/k-	M	m	M/m	i	i/m	n
SS10	864	119	7,3	426	360	1,2	343	1,0	36
SS15	1234	160	7,7	553	476	1,2	475	1,0	12
SS4	1080	152	7,1	522	455	1,1	448	1,0	48
SSP	1440	576	2,5	914	912	1,0	516	0,6	24

Sols à Dynamique Superficielle et Latérale

Site	k+	k-	k+/k-	M	m	M/m	i	i/m	n
HAR7	720	0,3	2400	115	62	1,9	120	1,9	36
IFAC-f	320	76	4,2	191	206	0,9	133	0,6	12
SS17	393	8	49	66	40	1,7	58	1,5	24
SS18	480	88	5,5	92	61	1,5	84	1,4	24

k+ : valeur maximale; k- : valeur minimale; i:interquartile
 n : nombre de mesures; M : moyenne; m : médiane

Sur sol à DVL, le gradient vertical est moins marqué (66% des racines entre 0 et 20 cm ; 25% entre 20 et 60 cm, et 5% dans la tranche 1-2 m), et surtout, on trouve 3 fois moins de grosses racines dans la tranche 0-20 cm (diamètre supérieur à 1 cm) que dans les sols à dynamique verticale .

Les 10 bassins versants expérimentaux ont été choisis de manière à intégrer toute la gamme des situations pédologiques existantes dans la zone de l'étude.

1.2.5 LA FORET

La forêt dense est le paysage dominant en Guyane Française sur 90% du territoire. La suppression de cette forêt constituant la caractéristique majeure de l'expérimentation sur bassins versants, il est intéressant d'apporter les informations les plus caractéristiques sur sa structure.

Selon les résultats d'un inventaire exhaustif établi sur 41,8 hectares de la zone ECEREX, on dénombre en moyenne 224 arbres par hectare ayant de plus de 20 cm de diamètre à hauteur de poitrine (Lescure, 1981). Les très gros arbres sont rares : 168 tiges ont des diamètres compris entre 20 et 40 cm et 3 seulement ont plus de 80 cm. Cette répartition est très semblable à celles mesurées sur d'autres sites de l'Amérique Tropicale - Vénézuéla, Surinam, Brésil. (Klinge et Rodriguez, 1968 ; Rollet, 1974 ; Ohler, 1980).

Cette forêt est très riche en espèces : on compte 200 espèces d'arbres de plus de 20 cm de diamètre dans la zone de l'étude (Lescure et al., 1983) et jusqu'à 120 espèces sur une placette d'inventaire de 2500 m², en considérant tous les diamètres supérieurs à 5 cm (Puig et Lescure, 1981).

Le moteur de la sylvigénèse en forêt naturelle est le *chablis*. Ce terme désigne à la fois la chute d'un ou de plusieurs arbres et l'extension des dégâts occasionnés par cette chute (Oldemann, 1974). Les chablis ont été étudiés à ECEREX (Riera, 1982 ; Riera, 1983). Sur une surface inventoriée de 21,5 hectares, celui-ci a dénombré 16 chablis nouveaux en 1 an, soit une surface perturbée totale de 2377 m². Les surfaces moyennes des trouées sont de 200 m² pour les chablis à un seul arbre et de 660 m² pour ceux provoqués par plusieurs arbres.

Ces chiffres doivent être considérés avec attention et mis en rapport avec le concept hydrologique de bassin représentatif de l'écosystème forestier : ils signifient que l'extension des chablis nouveaux occupe en moyenne chaque année 1% de la surface. Si cette emprise n'est pas considérable au point de vue de l'occupation des sols, il faut prendre en considération une surface assez grande pour intégrer cette hétérogénéité moyenne et pour que celle-ci se stabilise d'une année sur l'autre. Cette condition est contraignante sur un bassin versant élémentaire d'un hectare : sur une telle surface, on a 75 chances sur 100 d'observer chaque année un chablis d'extension quelconque, et si les petits chablis sont les plus nombreux (44% d'entre eux occupent moins de 100 m²), il subsiste toutefois un risque de 10% d'être affecté par un chablis de 600 à 700 m² qui élimine subitement de 6 à 7% du couvert forestier, pouvant entraîner des effets perceptibles sur le régime hydrologique. Toujours à cette échelle de l'hectare, l'impact d'un tel événement sur les transports solides est

encore multiplié : l'érosion mécanique est très faible sous forêt naturelle (quelques kg de terre par hectare et par an) et un gros arbre déraciné offre directement à l'impact des gouttes de pluie un volume de terre facilement mobilisable, d'un ordre de grandeur équivalent ou supérieur à celui de l'érosion moyenne annuelle sur ce bassin versant.

La phytomasse de la forêt a été établie par échantillonnage destructif sur une parcelle d'inventaire et à partir de relations diamètre-phytomasse appliquées aux 10 bassins versants et à une parcelle de 25 ha, dite parcelle ARBOCEL (Lescure et al., 1983). La phytomasse des arbres de plus de 20 cm de diamètre représente 90% de la phytomasse totale. Selon les bassins versants, la phytomasse totale varie entre 372 tonnes par hectare et 270 tonnes par hectare de matière sèche (tableau 1.2.07).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
346	337	360	<u>372</u>	313	288	<u>270</u>	327	287	263

Tableau 1.2.07 : Phytomasses sur les 10 bassins versants ECEREX
valeurs en tonnes.ha⁻¹, en poids sec, pour les arbres de plus de 20 cm de diamètre.

Le sens commun veut que la forêt soit la plus belle dans les régions de Guyane où les sols sont à drainage libre. Boulet (1981) utilise en prospection le critère du "tour d'horizon" qui consiste à compter le nombre d'arbres de plus de 70 cm de diamètre visibles sur 360°. Lorsque ce nombre dépasse 4 ou 5, le pédologue "*est presque assuré de se trouver sur un sol à drainage vertical libre*", et de fait, il est indiscutable que sur les faibles surfaces échantillonnées, la fréquence observée des individus dans les forts diamètres était 4 fois plus élevée sur sols à DVL que sur sols à DSL.

Compte tenu de la petitesse de l'échantillon, les botanistes sont moins catégoriques et Lescure (1981) signale que la proposition réciproque n'est pas vraie, et que la structure de la forêt en un point donné dépend des avatars de la sylvigénèse, et en particulier de la date et de l'importance des chablis anciens sur le site. Cet auteur signale encore qu'il n'est pas possible d'établir de corrélations statistiquement significatives à l'échelle des bassins versants (sur 1 à 2 ha) entre la structure de la forêt (décrite par la fréquence du nombre d'individus par classes de diamètre) et les caractères pédologiques, et qu'il faut passer à des surfaces beaucoup plus grandes pour éliminer le bruit de fond de la sylvigénèse et voir apparaître la signification statistique du drainage interne des sols. Dans ces conditions, Lescure et al., (1983) ont mis en évidence l'existence d'une liaison significative entre phytomasse et type de sol : en moyenne, la phytomasse est plus élevée sur sols à drainage vertical libre (396 t.ha⁻¹), que sur sols à drainage bloqué (245 t.ha⁻¹). Cette proposition est vérifiée avec un coefficient de Spearman significatif avec un risque d'erreur inférieur à 1%.

De la même façon, la composition floristique de la forêt sur les bassins versants ne peut pas être directement rattachée au type de drainage des sols (Lescure et Boulet, 1985).

DEUXIEME PARTIE :
HYDROLOGIE DU MILIEU NATUREL

Cette **deuxième partie** est consacrée à la présentation du dispositif de mesure, et à la problématique du cycle de l'eau en forêt naturelle (*Epoque Verte*).

- Une revue bibliographique, qui fait l'objet de la partie 2.1, traite des concepts et des travaux relatifs aux "chemins de l'eau", c'est à dire, des fonctionnements des petits bassins versants en régions forestières humides. Ce milieu est caractérisé par la prédominance d'une dynamique hydrologique interne au profil pédologique, par opposition aux régions plus sèches et à végétation éparse, où les processus dominants sont contrôlés par la dynamique des états de surface.
- Le chapitre 2.2 décrit les caractéristiques des différents dispositifs, qui ont été utilisés pour l'étude hydrologique en l'*Epoque Verte* (parcelles, bassin élémentaires, petit bassin versant) : on y trouvera la présentation des conditions naturelles (pédologie, couvert végétal), ainsi qu'une description des équipements hydrométriques et des procédures de collecte et de traitement des données.
- Le chapitre 2.3 est une réflexion sur l'intérêt et les limites des différentes méthodes de séparation des écoulements de crue (par méthodes analytiques, graphiques, hydrochimiques et isotopiques).
- Le chapitre 2.4 est consacré à l'étude des comportements des bassins en *Epoque Verte*. Les réponses hydrologiques, très variables d'un bassin à l'autre, sont mises en relation avec les caractéristiques pédologiques et hydrodynamiques des versants et des bas-fonds de chaque bassin.
- Le chapitre 2.5 traite de l'évapotranspiration potentielle et réelle de la forêt ; une revue bibliographique met en évidence les difficultés de l'évaluation de ce terme du bilan ; l'estimation la plus réaliste de l'ETR en Guyane forestière est donnée par le déficit d'écoulement de grands bassins versants. La fin du chapitre est consacrée au processus de l'interception de la pluie par la voûte forestière, et à l'analyse des données disponibles en Guyane à ce sujet. Une estimation de l'incertitude de la mesure de ce terme du bilan est également présentée.

2.1 LES CHEMINS DE L'EAU : Revue bibliographique

Mais au fait, d'où vient-l'eau ?

De tous temps, il y eut des hommes pour se poser la question de la provenance de l'eau qu'ils voyaient couler dans le lit des rivières : Thalès de Miletos (624-548 Av. JC), moins perspicace en hydrologie qu'en géométrie -mais personne n'est parfait - avait attribué les crues du Nil aux vents Etèsiens, soufflant du Nord qui refoulaient les eaux de la rivière dans le Delta et faisait monter le niveau en amont. (Biswas et Asce, 1967). Presque à la même époque cependant, Anaxagoras de Clazomene (500-428 Av. JC) propose cette formulation assez étonnante: "... *Les rivières tirent leur origine à la fois des pluies et des eaux de la Terre, car la Terre est creuse et elle contient de l'eau dans ses cavités. Et le Nil monte en été à cause de l'eau qui descend des neiges qui sont en Ethiopie.*" (Biswas, 1966). 2500 ans plus tard, il est universellement admis que les eaux courantes proviennent des précipitations, mais bien des indéterminations subsistent sur les modalités de cette transformation, et Pearce et al. (1986) peuvent publier les résultats de leurs travaux avec ce sous-titre en exergue : "*Where Does the Water Come From ?*".

2.1.1 "FOREST HYDROLOGY STORY" : Hydrologie des pays humides et Anglo-Saxons.

2.1.1.1 La vague de l'écoulement sub-superficiel

Pendant la première moitié du XX^{ème} Siècle, le concept hydrologique universellement en usage est que les écoulements visibles dans le réseau hydrographique sont constitués par de l'eau préalablement **infiltrée** provenant de la vidange des nappes phréatiques et par de l'eau **ruisselée**, qui n'a jamais pénétré dans le sol ; ce mécanisme du ruissellement est considéré comme dominant pendant les épisodes pluvieux intenses et immédiatement après ceux-ci, et tenu pour responsable des hautes eaux et des eaux moyennes qui s'écoulent dans le réseau hydrographique.

La genèse de ce ruissellement et sa modélisation ont été systématisées par Horton (1933). C'est le refus d'infiltration du sol à partir d'une intensité de pluie donnée qui déclenche l'accumulation de l'eau en surface et son mouvement sur les versants en direction du réseau hydrographique.

Ce mécanisme est essentiellement contrôlé par deux paramètres :

- la capacité d'infiltration du sol à saturation ("*Final constant infiltration rate*"), exprimée en mm.h^{-1} , qui est une caractéristique bien déterminée du profil pédologique sur un site donné,

- la capacité initiale d'infiltration du sol au début de l'averse qui dépend des conditions pluviométriques antérieures. Cette capacité d'infiltration, appelée aussi capacité d'absorption, diminue pendant la pluie et permet de définir sur le hyétogramme la **Pluie Excédentaire**, appelée aussi **Pluie Nette**, comme étant celle qui dépasse à chaque instant la capacité d'absorption du sol et qui est quantitativement égale au volume d'eau de ruissellement qui s'écoule rapidement à l'exutoire d'un petit bassin versant.

Ce mécanisme de formation du ruissellement, considéré comme la cause essentielle de l'écoulement dans le réseau hydrographique en dehors des périodes d'étiage, reste le concept dominant dans la Communauté Hydrologique internationale jusqu'au début des années 60, lorsqu'émerge aux Etats-Unis une conception alternative à celle de l'Ecole hortonienne. Ce mouvement atteint rapidement une masse critique et ses défenseurs exposent le nouvel Etat de l'Art à l'occasion du Symposium "*Forest Hydrology*" à l'Université de Pennsylvannie du 29 août au 10 septembre 1965 (Comptes-Rendus édités par Sopper et Lull, 1967).

Il est fondamental de noter que ce démarquage est l'oeuvre de scientifiques spécialisés dans le domaine forestier, c'est à dire de milieux humides, dans lesquels une composante biologique importante vient se combiner avec les phénomènes physiques qui gouvernent les mouvements de l'eau à la surface du sol et à l'intérieur de celui-ci : une constante très générale dans ce biotope est l'existence d'horizons pédologiques superficiels relativement plus poreux que les horizons sous-jacents, par le fait du développement racinaire et de l'activité de la mésofaune. Il est important de noter aussi que les mesures et les observations qui ont amené la structuration de cette théorie provenaient à l'origine de la côte Est des USA, c'est à dire d'un domaine climatique humide tempéré.

Selon Hewlett et Hibbert (1967), le nouveau paradoxe hydrologique s'énonce ainsi "*La discussion à propos de l'écoulement d'un bassin versant commence généralement par l'affirmation que l'écoulement est le produit du ruissellement de surface et que les autres types d'écoulement ne sont que de rares exceptions à cette règle générale. L'approche inverse est peut-être plus logique en zone forestière : c'est à dire partir de l'hypothèse que tout l'écoulement est constitué d'écoulement sub-superficiel (subsurface flow) jusqu'à preuve évidente du contraire.*".

La première référence historique dans ce sens avait été formulée 6 ans plus tôt (Hewlett, 1961) et comportait un diagramme devenu célèbre, et qui reste une référence commentée et reproduite 25 ans plus tard (figure 2.1.01) ; ainsi Ward (1984), qui considère cette représentation "*comme l'une des plus importantes avancées conceptuelles de base dans l'Histoire de l'Hydrologie.*".

Sur cette figure on constate que **toute l'eau de la pluie s'infiltré** et rejoint par voie souterraine la zone saturée située à proximité du talweg (la nappe phréatique). La dimension des flèches indique que la contribution des versants est croissante au fur et à mesure que l'on s'approche du talweg, mais que **la part dominante des écoulements est générée dans le bas-fond, sur une surface correspondant à l'extension de la zone saturée.**

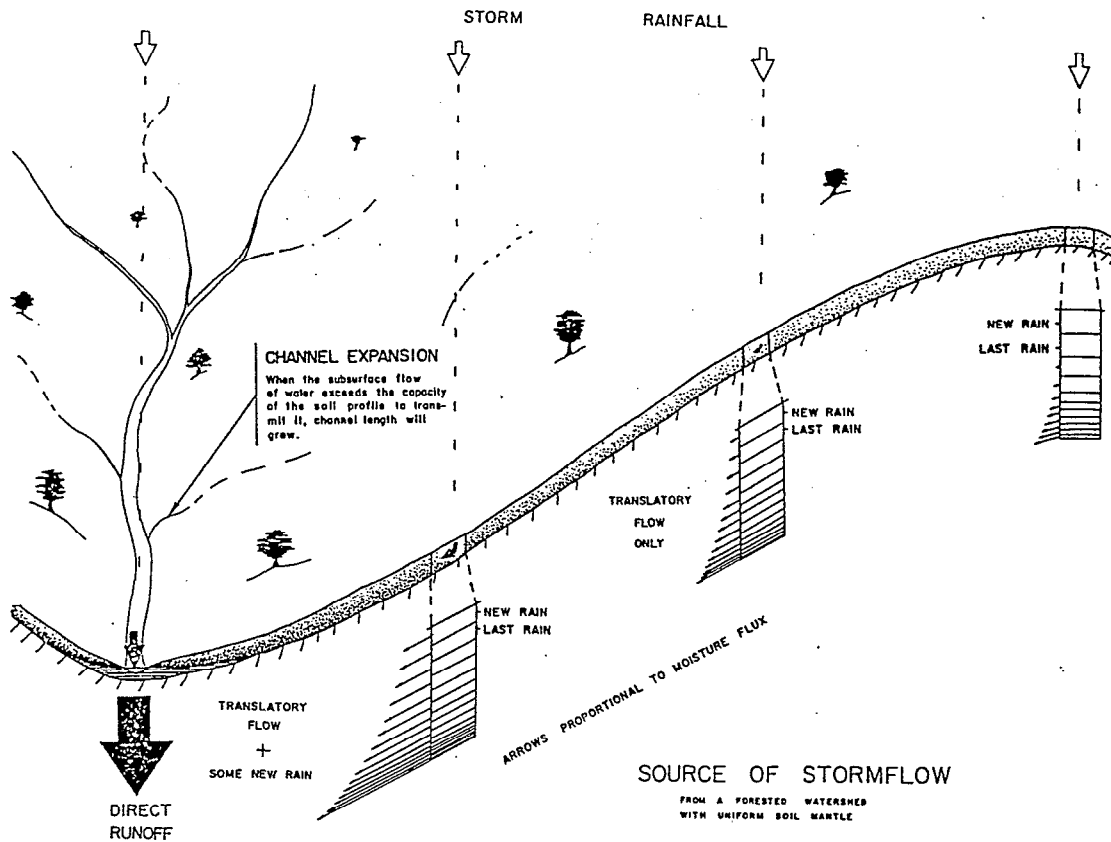
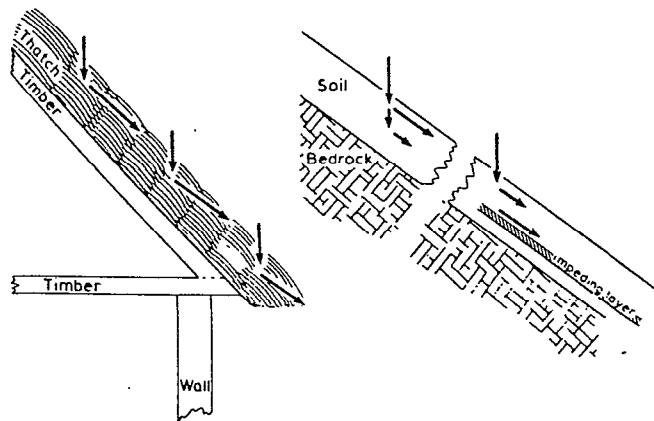


FIG. 1. Diagram showing the source of stormflow (direct runoff) from a forested watershed with a uniform soil mantle. The interaction between the factors illustrated constitutes the variable source area concept of runoff from small watersheds.

Figure 2.1.01 : Fonctionnement d'un bassin versant en crue. Fac-similé de Hewlett et Hibbert (1967).



"L'analogie du toit de chaume" de Zaslavsky et Sinai (1981) : ...Il n'est pas un hydrologue qui ayant mesuré les caractéristiques d'infiltration de bottes de paille irait recommander ce matériau comme produit de couverture. Et pourtant, même sous les plus fortes pluies, le bâtiment reste au sec, on ne voit pas d'eau couler sur le chaume sous forme de "ruissellement", il n'y a pas "d'eau souterraine", ni accumulation dans des zones de "saturation temporaire", i.e. toute la pluie est évacuée le long de la bande étroite constituée par le chaume. Le toit de chaume fonctionne parce que la disposition de la paille impose une perméabilité préférentielle le long des brins et parce que le toit est en pente. Ça ne marcherait pas si les brins étaient placés verticalement ou si le toit était plat.... Dans le cas du sol, on sait que, avec ou sans horizon compact sous la surface, il y a généralement une conductivité hydraulique préférentielle dans les horizons poreux les plus superficiels qui est orientée parallèlement à la surface...(traduction de l'auteur)

Figure 2.1.02 : "L'analogie du toit de chaume" de Zaslavsky et Sinai (1981).

Commentaire et figure extraits de Ward (1984)

L'existence et l'importance de l'écoulement de sub-surface dans les concepts de fonctionnement du bassin versant avaient été accueillies avec scepticisme par une partie de la communauté hydrologique. Vingt cinq ans plus tard, ces concepts font partie des idées dominantes de la Science Hydrologique. On peut en voir pour preuve le fait que des arguments relevant "du bon-sens" peuvent être invoqués pour décrire ces processus et justifier leur existence (Zaslavsky et Sinai, 1981. figure 2.1.02).

Cette approche nouvelle des mécanismes du fonctionnement d'un bassin versant allait rencontrer une immense faveur et être largement reprise, amendée et explicitée par de nombreux hydrologues, tels Betson (1964) ; Anonyme T.V.A. (1965) ; Kirkby et Chorley (1967) ; Ragan (1968) ; Dunne et al. (1970) ; Dunne et al. (1975) ; Dunne (1978) ; Dunne (1983). Les travaux touchant à cette "Découverte" sont menés dans un contexte passionnel chargé, comme en témoignent certains malentendus, à l'intérieur même du clan des "modernes", à propos du bon usage de la nouvelle terminologie et des références bibliographiques citées dans certains travaux qui auraient pu mettre en cause la paternité "Hewlettienne" de cette théorie, comme par exemple Knisel (1973) "contre" Freeze (1972b).

Les disciples du changement se recrutent chez des hydrologues praticiens comme ceux de la Tennessee Valley Authority ou parmi des chercheurs académiques aux sensibilités naturalistes ou géomorphologiques. Ils ont constaté que le ruissellement peut être observé communément sur les routes, les chemins, les aires en sol naturel compacté, mais jamais ou très exceptionnellement sous une forêt ou dans une prairie, et que cette occurrence est en tous cas beaucoup plus rare que les crues des rivières. D'autre part, les perméabilités mesurées sur les sols forestiers sont bien supérieures aux intensités des pluies qui précèdent les crues ordinaires : le ruissellement est donc bien un concept théorique qui ne peut pas rendre compte des mécanismes de production de l'eau dans un tel bassin versant.

L'importance des flux hydriques internes est mise en évidence en plein champ par Whipkey (1965) qui enregistre des hydrogrammes d'écoulement sub-superficiel, à différentes profondeurs, sous une chênaie de l'Ohio. Le profil pédologique de l'expérimentation comporte un horizon sablo-limoneux (avec 65% de sables de plus de 50 microns), épais de 90 cm, qui surmonte un horizon plus limoneux (42% de sables), situé entre 90 et 120 cm de profondeur. Une fosse de 2,44 mètres de large ouverte à l'aval d'une parcelle de 17 mètres de long sur une pente de 28%, a permis de collecter les suintements à différentes profondeurs (surface, -56cm, -90 cm, -120 cm, -150 cm). Les pluies ont été simulées artificiellement sous la forme de 24 averses de 25 à 107 mm. avec des intensités comprises entre 15 et 44 mm.h⁻¹. Sur l'ensemble des "crues", la surface de la parcelle avait drainé 1% seulement du total de l'eau recueillie, alors que ces proportions relatives étaient respectivement de 16%, 64%, 16% et 3% pour les horizons 0-56 cm, 56-90 cm, 90-120 cm et 12-150 cm. Les quantités absolues récupérées dans l'ensemble des niveaux représentaient de 4% à 14% de la pluie simulée, selon les conditions d'humectation préalable du profil. Les ordres de grandeur des temps de base de ces hydrogrammes sont de 7 à 8 heures et ceux des temps de montée de 30 à 60 minutes.

Entre temps, Hewlett et Hibbert (1963) avaient procédé à une expérience de laboratoire destinée à vérifier la théorie des écoulements internes. En observant les variations d'humidité dans le sol, sur un modèle réduit à pente variable de 13,8 mètres de long (45 pieds) et de 0,9 mètre d'épaisseur, ces auteurs ont pu reproduire un mécanisme préalablement identifié sur le terrain, en l'occurrence un transfert d'eau assimilable à un véritable écoulement latéral, capable de participer largement au débit de base immédiatement après les crues et qui constitue un mécanisme essentiel de leur genèse, par l'alimentation de zones saturées situées au bas des versants et à proximité des talwegs, sur lesquelles est produite la plus grande part, sinon la totalité des volumes de crues.

L'occurrence d'hydrogrammes de crue exclusivement composés d'écoulements sub-superficiels est fréquemment décrite par les hydrologues anglo-saxons. Ainsi, Dunne (1978) publie les résultats d'une compilation de données provenant de parcelles ou de petits bassins versants (Whipkey, 1965 ; Whipkey, 1969 ; Dunne, 1969 ; Wilson et Ligon, 1970 ; Hewlett et Nutter, 1970) montrant des coefficients d'écoulements "sub-superficiels purs" à l'échelle de la crue, compris entre 0,2% et 20% et pouvant atteindre 62% (Whipkey, 1969). Une relation analytique permet même de calculer le temps de réponse qui sépare le début de l'averse et le débit de pointe de l'hydrogramme sub-superficiel en fonction d'une surface drainée pouvant varier entre 10^{-4} km² et 1 km² (en l'occurrence $T = 18,5 * A^{0.26}$ avec T en heures et A en km²).

Toutefois, Dunne retrace ces résultats dans leur contexte physico-climatique et précise fort justement que la plupart des exemples cités sont associés à des averses de hauteurs exceptionnelles et de périodes de retour très grandes pour les régions considérées : en première approximation celles-ci sont comprises entre 5 ans et plus de 100 ans. C'est ainsi que les hauteurs d'averses à l'origine des crues étudiées par Hewlett et Nutter (1970) sur un petit bassin de 15 ha en Caroline du Nord et qui avaient fourni entre 2% et 20% d'écoulement sub-superficiel, variaient entre 100 et 500 mm : si l'existence de flux sub-superficiels puissants ne fait pas de doute, la contribution directe aux talwegs par cette voie ne suffit que très exceptionnellement à générer des crues notables.

Pour expliquer l'ordinaire des écoulements, il faut faire appel à d'autres mécanismes, en l'occurrence ceux des aires participantes alimentées par les écoulements internes le long des versants. Le concept hortonien de l'apparition du ruissellement est une vision "verticaliste" ; il s'applique à un monolithe de sol isolé de toutes influences amont ou latérales. Par opposition, le schéma de Hewlett faisant intervenir les mouvements de l'eau depuis les sommets d'interfluves jusqu'au talweg peut être qualifié de "latéraliste".

2.1.1.2 La vision hydrologique "latéraliste" : les Mots pour le dire

Dans l'état du Vermont, sur la côte Nord-Est des USA, dans un climat hyper-humide, Dunne et Black (1970) ont mesuré pendant deux ans sous pluies naturelles et simulées, les drainages superficiel et internes de 2 parcelles adjacentes situées sur un "versant raide et bien drainé" (la pente est de 63%).

- **L'une des parcelles, dont le profil est rectiligne, n'a jamais produit aucun écoulement superficiel pendant les crues individuelles étudiées, même pendant une pluie simulée de 49 mm en 2 heures appliquée sur un sol gorgé d'eau après la fonte des neiges et dont la période de récurrence serait de 50 ans selon les auteurs. L'eau recueillie à l'aval provient surtout du niveau -210 cm et dans une moindre mesure du niveau -60cm, mais représente moins de 2% de la pluie de ces averses - donc pas de ruissellement, mais pas beaucoup de drainage rapide non plus.**

L'autre parcelle, qui est implantée dans l'amorce d'un petit vallon, a une pente concave et son comportement hydrologique est très différent : le drainage total de l'horizon racinaire (0 -60 cm) a représenté 1,4% de la pluie, celui de l'horizon profond (-60 cm à -250 cm) 2,53% de celle-ci alors que l'écoulement superficiel (*overland flow*) qui a mobilisé 6,8% de la pluie est très largement dominant dans le bilan.

L'auteur conclut à l'importance des facteurs de différenciation géomorphologiques et pédologiques à l'échelle du versant, ainsi qu'à l'existence effective de l'écoulement de sub-surface, qui peut même constituer l'unique mécanisme de production et d'alimentation du réseau hydrographique dans des régions géomorphologiques et climatiques comme celles du Vermont. Il considère toutefois que dans le cas général la composante principale de l'eau des crues rejoint le talweg par la surface, mais cette eau n'est pas constituée par du ruissellement généré par le processus décrit par Horton. Elle est produite selon un mécanisme différent appelé "*Saturation Overland Flow*" ou Ecoulement Superficiel par Saturation. Cet écoulement se subdivise lui-même en deux composantes, identifiées comme "*Direct Precipitation on to Saturated Area*" et "*Return flow*".

Selon Dunne (1983), "*le niveau de la nappe phréatique remonte en surface sur une zone de plus en plus étendue au pied des versants, ce qui détermine un plan de suintement (seepage face) le long duquel l'eau s'écoule*" : c'est le terme appelé "*Return Flow*" (traduisible par Remontée Sub-superficielle, aussi appelé Exfiltration par certains auteurs français). "*L'extension de cette surface variable pendant l'averse détermine à chaque instant la zone saturée sur laquelle la pluie directe alimente l'écoulement par "Direct Precipitation on to Saturated Area"*". L'ensemble des écoulements produits par Exfiltration et par Pluie Directe sur les Aires Saturées constitue l'Écoulement Superficiel par Saturation. ("*Saturation Overland Flow*").

Hewlett et Hibbert (1967) avaient déjà explicité ces mêmes concepts, en insistant sur l'importance des écoulements internes, qui sont déterminants dans la réponse hydrologique du bassin versant, par leur participation volumique dans l'hydrogramme de crue, mais surtout parce qu'ils constituent le mécanisme déclencheur d'un certain type d'écoulement appelé "*Saturation Overland Flow*". "*...lorsque le flux sub-superficiel provenant de l'amont du versant dépasse la capacité du sol à le transmettre, l'eau vient en surface, ce qui est assimilable à une extension du réseau hydrographique*". Par différence avec celle de Dunne, cette formulation ne fait pas mention explicite de la nécessité d'une remontée phréatique en surface, mais postule de la même façon que l'écoulement observé à l'exutoire d'un bassin versant provient de zones d'extension limitée, pratiquement assimilables à des nappes d'eau libre et sur lesquelles les coefficients d'écoulement sont pratiquement voisins de l'unité. ("*Source Areas Concept*"). Au fur et à mesure que la pluie tombe l'Exfiltration se localise de plus en plus haut sur le versant, ce qui revient à dire que l'extension de cette partie du bassin à participation hydrologique dominante augmente pendant la crue. C'est la formulation du "*Variable Source Areas Concept*" ou "Unités Participantes à Surfaces Variables". Pour les tenants de cette école, le rapport adimensionnel du volume écoulé au volume précipité - le coefficient de ruissellement - représente en fait la proportion de terrains saturés sur le bassin versant pendant la crue (Burch et al., 1987) ; (Moore et al., 1986).

Kirkby et Chorley (1967) avaient également constaté que le ruissellement pouvait se produire sur les bassins versants forestiers avec des intensités de pluie bien inférieures à la capacité d'infiltration des sols et expliquaient ce fait par la dynamique de l'écoulement interne qui est forcé vers la surface dans certaines conditions : par exemple lorsque celui-ci atteint la zone saturée dans la partie basse des versants, **mais également bien au-dessus des talwegs**, à la faveur de ruptures de concavités des versants ou d'amincissements localisés de l'horizon poreux superficiel. Dans ce dernier cas, l'exfiltration n'est pas subordonnée à l'existence d'une nappe phréatique, ni limitée à la proximité de celle-ci, mais peut se produire n'importe où sur le versant.

Toutefois, l'établissement rapide de l'Écoulement par Saturation Superficielle pendant une averse, c'est à dire en quelques dizaines de minutes, suppose qu'il y ait effectivement un mouvement de l'eau sub-superficielle le long du versant, pour que celle-ci puisse alimenter la nappe et faire monter son niveau, ou dépasser localement la capacité de transmission du sol et provoquer l'exfiltration. Or les vitesses de cet écoulement interne qui ont pu être mesurées sont généralement incompatibles avec cette hypothèse, Dunne (1978) donnant des chiffres pouvant atteindre au maximum 30 à 45 cm.h⁻¹. Hewlett et Hibbert (1967) avaient répondu par avance à cette objection en affirmant que ce processus pouvait fonctionner tout de même, parce que "l'eau ancienne" présente dans le profil au début de la crue est chassée vers le bas par "l'eau nouvelle" précipitée pendant l'averse. Pour preuve de l'existence physique de ce flux appelé "*Translatory Flow*" (traduit par "Déplacement de l'eau par Effet Piston"), ces auteurs en appellent aux résultats d'une expérience en laboratoire de Horton J.H. et Hawkins (1965) : on introduit 1 pouce d'eau marquée au tritium au sommet d'une colonne de terre de 1,2 mètre de hauteur, préalablement saturée. Le drainage étant libre à l'extrémité inférieure, une tranche d'un pouce d'eau non marquée était ajoutée chaque jour au sommet de la colonne. Finalement, l'échantillon d'eau marquée a traversé la colonne de terre pratiquement sans diffusion ni mélange (87% de l'eau initialement contenue dans la colonne s'était déjà écoulée lorsque la pointe de concentration du tritium dans l'eau de drainage était atteinte). Zimmerman et al. (1966) ont reproduit l'expérience sur un profil vertical en plein champ et ont conclu : "*une averse contenant un traceur isotopique forme un niveau d'eau marqué, qui malgré les effets de diffusion, descend dans le profil comme une quantité reconnaissable entre l'eau de pluie ancienne et l'eau de pluie nouvelle*".

Plus récemment, des résultats d'analyses isotopiques présentés par Sklash et al. (1986), tirés d'une expérimentation de Pearce et al. (1986) viennent conforter sérieusement la théorie du déplacement de l'eau dans les versants par effet piston. L'objet de l'étude est un petit bassin versant de 3.8 ha. en zone humide de Nouvelle-Zélande (Tawhai Forest) ; la pluie annuelle est voisine de 2600 mm et l'écoulement de 1550 mm (Rowe, 1979) **Les eaux anciennes ont très largement dominé dans les volumes écoulés au cours de trois crues échantillonnées et ont constitué 79%, 74% et 79% de l'écoulement rapide, alors que les Coefficients d'Écoulement Rapide très élevés de ces crues, atteignant respectivement 27%, 37% et 49% de la pluie, auraient plaidé a priori en faveur d'une forte proportion d'eau en provenance directe de l'averse génératrice.**

Cette conclusion quelque peu surprenante - l'écoulement rapide est composé d'eau ancienne - peut aller dans le même sens que celles de Dunne et al. (1975), qui avaient mis en évidence l'importance volumique de l'Exfiltration (pouvant être de l'eau "ancienne") dans l'Écoulement par Saturation Superficielle, au détriment de la part produite par Précipitation Directe sur les Zones Saturées (eau "nouvelle"). Ceux-ci avaient estimé qu'au moment du débit de pointe, l'eau provenant de l'Exfiltration constituait de 42% à 72% de l'ensemble de l'Écoulement par Saturation Superficielle, en fonction des conditions locales de pente et de composition granulométrique des sols. On doit remarquer cependant que cette conclusion n'apportait pas d'information

directe sur l'âge des eaux exfiltrées ("ancienne" ou "récente") et surtout qu'elle était établie à partir d'observations faites sur une portion de versant, au-dessus du talweg, c'est à dire sur une zone réputée pour sa faible participation volumique aux débits d'un bassin versant complet, et donc difficilement transposable à cette échelle.

Les résultats de l'expérimentation de suivi isotopique de Pearce et al. (1986) et Sklash et al. (1986) sont doublement intéressants lorsqu'ils sont confrontés avec ceux que Mosley (1979) avait obtenus quelques années plus tôt sur ce même bassin versant de Tawhai Forest. Mosley n'avait pas fait appel à l'effet piston pour expliquer la formation des crues et avait conclu son étude en affirmant que l'écoulement sub-superficiel dans la macroporosité tubulaire était suffisamment rapide (de l'ordre de $0,3 \text{ cm.s}^{-1}$ avec des maximums à 2 cm.s^{-1}), pour qu'il puisse participer à l'écoulement des crues dans le talweg, car le temps de parcours de cet écoulement sub-superficiel entre le sommet des interfluves et le talweg ne serait que de 2,8 heures, compte-tenu de la longueur moyenne des pentes dans la région qui est de l'ordre de 30 m. L'auteur précise toutefois *"qu'il n'est pas crédible que les racines ou les chenaux du réseau racinaire puissent être continus sur des distances de plus de quelques mètres ..."* et que *"...la fréquence élevée et la durée de ces écoulements sub-superficiels, dans ce climat à forte pluviométrie, ont probablement créé des chenaux à la base du profil qui constituent maintenant un chemin continu pour le mouvement de l'eau."*

Il est bien clair que le corollaire de l'existence d'un écoulement sub-superficiel rapide et abondant était qu'une large proportion d'eau récente se retrouvât dans l'écoulement des crues, à l'exutoire du bassin versant ; or cette hypothèse est nettement mise en défaut par ces résultats de Pearce et al. (1986), et en confrontant leurs résultats qui sont contradictoires avec ceux de Mosley (1979), ces auteurs sont amenés à mettre en cause la méthodologie utilisée par celui-ci sur le terrain : l'eau d'alimentation était injectée dans le profil sur une largeur d'un mètre, à partir d'une gouttière percée placée à même le sol, seulement 1 mètre à l'amont de la fosse où étaient collectés les effluents, au niveau de contact de l'horizon poreux superficiel et d'un horizon compact sous-jacent. Atkinson (1978) avait déjà fait observer que toute méthode visant à collecter l'écoulement interne le long d'une surface libre (par ouverture d'une tranchée), captait forcément de l'écoulement saturé, puisque l'eau doit être à la pression atmosphérique pour quitter le profil. Ce mode opératoire a pour effet de créer artificiellement un coin d'écoulement en régime saturé à la base de la tranchée et modifie donc sérieusement la nature du phénomène étudié. Toujours selon Atkinson (1978), la mise en oeuvre de cette technique ne devrait être envisagée que lorsque ce coin en écoulement saturé existe de façon naturelle comme sur les sites de berges de lit majeur (*stream bank*). Cet auteur a également étudié l'influence de la nature de l'écoulement interne (saturé ou non-saturé) sur la "taille du bassin versant" : en supposant que la portion de versant étudiée soit homogène, l'eau captée provient d'une zone amont plus étroite que la largeur de la fosse en régime d'écoulement non-saturé, alors que la surface drainée est plus large que la fosse et s'ouvre "en entonnoir" vers l'amont à partir du plan de captation dans le cas d'un écoulement interne en régime saturé.

2.1.1.3 La modélisation hydrologique et la théorie des aires participantes

Une modélisation mathématique de l'écoulement selon les concepts précédents a été bâtie par Freeze (1972a, 1972b). A partir d'un modèle déterministe comportant une vision en 3 dimensions des mécanismes de formation de l'écoulement sur les versants, en zones saturées et non-saturées, Freeze conclut à l'existence de limitations sévères au fait que l'écoulement sub-superficiel puisse constituer une part importante dans l'écoulement des crues. Selon lui, il faut des conditions géomorphologiques très particulières, décrites comme un paysage de collines à pentes convexes, se raccordant à des lits bien incisés, et des sols avec des conductivités hydrauliques très élevées pour que l'écoulement sub-superficiel soit un mécanisme viable. Toujours selon Freeze (1972b), *"Sur les pentes concaves à faibles perméabilités et sur toutes les pentes convexes, les hydrogrammes sont surtout composés par du ruissellement direct des précipitations sur de petites zones humides, à surface variable, situées à proximité du réseau hydrographique. La saturation superficielle de ces zones saturées vient d'en bas par la remontée des nappes phréatiques elles mêmes alimentées par l'infiltration verticale plutôt que par les flux latéraux sub-superficiels"*. Il conclut également à la rareté de l'occurrence du ruissellement de type Hortonien en zone forestière humide.

Ce serait un euphémisme que de dire que les résultats de Freeze, qui confirment le mécanisme des Zones Participantes à Surface Variable, mais mettent en doute l'importance volumique et fonctionnelle des écoulements latéraux, ont été contestés vivement lors de leur publication. Des hydrologues forestiers praticiens réfutent globalement sa démarche de numéricien égaré en pays naturaliste et rejettent son modèle simulant un bassin versant fictif alimenté avec des données fictives (Snyder, 1973). Knisel (1973) apporte une contre-preuve à la faible importance que Freeze avait attribuée à l'écoulement sub-superficiel en présentant un bilan hydrologique établi sur 3 ans à l'exutoire d'un bassin versant de 0,34 ha situé dans la plaine côtière de Tifton dans l'Etat de Georgie, et dans lequel l'écoulement sub-superficiel représente 81,1% de l'ensemble des écoulements ; il précise, document photographique à l'appui, que ces chiffres sont pourtant représentatifs d'une région où les fonds de vallées sont plats et où les talwegs ne sont pas incisés et considère que la faiblesse des écoulements sub-superficiels mise en évidence par Freeze ne reflète rien d'autre que la volonté du concepteur de limiter cette composante dans son modèle.

Une autre tentative marquante de la modélisation selon la théorie des Aires Participantes à Surface Variable a été celle de Beven et Kirkby (1979), prolongée par Beven et Wood (1983). Ce modèle, appelé TOPMODEL, a pour particularité essentielle d'être "calé sur la théorie" et cherche à reproduire l'extension de la zone de saturation à partir des données topographiques et des caractéristiques pédologiques du bassin versant. Hornberger et al. (1985) ont utilisé TOPMODEL sur un bassin versant de 5 km², couvert de forêt secondaire, situé dans l'Etat de Virginie (USA). Les mécanismes de formation de l'écoulement sur ce bassin versant étaient bien connus et sont décrits comme *"Présence d'une nappe phréatique à proximité de la surface et prédominance du Ruissellement produit par Saturation Superficielle, sur une zone alimentée par l'Écoulement Sub-superficiel"*. Cet écoulement sub-superficiel se nourrit à partir de nappes perchées qui s'individualisent très temporairement sur les versants au contact d'un horizon relativement imperméable situé entre 60 et 100 cm de profondeur. Des détecteurs de ruissellement ont confirmé que l'écoulement en surface n'est pratiquement pas fonctionnel sur les versants (le ruissellement a pu être observé sur deux sites du bassin versant seulement). Malgré la parfaite adéquation de l'objet hydrologique étudié avec la structure mécaniste du modèle, les résultats ont été assez décevants, aux dires des auteurs, en particulier lors des phases d'opération du modèle en dehors de la période de calage.

La modélisation hydrologique à partir de la théorie des aires participantes a fait l'objet de nombreux travaux, parmi lesquels Engman et Rogowski (1974) ; Troendle (1979) ; Sloan et Moore (1984), etc.

Pendant les années 70, l'école latéraliste continue la chasse aux fausses certitudes et aux idées reçues - ou considérées comme telles. La dépendance des volumes de crues et des débits de pointe avec l'intensité de l'averse génératrice est une cible particulièrement visée.

En étudiant les relations entre pluies, volumes de crue et débits de pointe sur un bassin forestier de 7,8 km² dans les Monts Appalaches, Hewlett et al. (1977a) constatent que l'introduction des intensités sur quelques minutes, comme paramètre supplémentaire dans des régressions multiples, n'apporte pas d'amélioration significative de la dispersion résiduelle. Leur conclusion est qu'il n'y a pas de lien de cause à effet entre débits ou volumes de crues et intensités des averses génératrices. Lee et Tajchman (1977) mettent vivement en cause ces résultats en invoquant la piètre qualité des données pluviographiques, les caractéristiques particulières du bassin versant, et le fait pertinent que les modèles testés prenaient implicitement en compte l'intensité de la pluie par l'intermédiaire d'un paramètre P₆₀, qui est la hauteur de pluie maximum en 1 heure pendant l'averse. Toutefois, sept ans plus tard, Hewlett et al. (1984) persistent et confirment que les intensités sur de courtes durées sont sans effet sur les volumes de crue et les débits de pointe à partir des données de 15 bassins versants forestiers situés dans diverses régions des USA, en Australie et en Afrique du Sud.

Des résultats concordants ont été obtenus par Bren et Turner (1985) sur un bassin versant élémentaire sous forêt d'eucalyptus (Etat de Victoria-Australie). Au terme d'une étude statistique, les auteurs ont mis en évidence que les intensités en 15, 30 et 60 minutes ne sont pas un facteur significatif pour expliquer le volume de l'hydrogramme de crue et que ces mêmes intensités sont faiblement corrélées au débit de pointe.

2.1.2 L'AIRES CONTRIBUTIVE FRANÇAISE A L'HYDROLOGIE LATERALISTE

Où l'on voit que l'idée des Aires Contributives n'a pas germé sous un chapeau Stetson, mais sous un Bêret.

2.1.2.1 "Club" et "Lobby" n'ont pas d'équivalents en français

A l'époque où des débats passionnés agitaient les hydrologues forestiers anglo-saxons, la sérénité semble régner à l'Est de la Pointe du Raz et les écoulements hypodermiques ne paraissent pas en mesure de saper dans leurs fondements les conceptions hydrologiques alors en usage.

Roche (1963) exprime à ce sujet un point de vue sans équivoque : *"L'existence de quelque chose qui n'appartient pas au débit de base fourni par les nappes, mais qui n'a pas le même comportement que le ruissellement pur a été mis en évidence par les hydrologues lorsqu'ils ont cherché à décomposer en ses différentes composantes l'hydrogramme de crue. On a cru alors qu'il s'agissait d'un écoulement dans les premiers centimètres du sol, écoulement qui aurait été parallèle à la surface comme le ruissellement, d'où les appellations hypodermique et de sub-surface. Cette interprétation est contraire à toutes les lois de la mécanique, et on ne voit pas sous l'influence de quelles forces pourrait avoir lieu un tel écoulement qui d'ailleurs n'a jamais été observé. En fait, l'écoulement hypodermique tel qu'il vient d'être décrit n'existe pas : Il s'agit tout simplement d'un ruissellement de très faible hauteur de lame ou en mince filets, freiné par la base de la végétation ou les aspérités du sol. on peut voir là quelque chose d'analogue à la notion de couche limite en hydraulique. ... Plusieurs auteurs ont proposé l'expression ruissellement retardé, beaucoup mieux adaptée. ... Dans le cas de bassins forestiers à pentes faibles, toutes les crues peuvent avoir une allure hypodermique, ce qui est assez normal puisqu'en définitive la distinction entre ruissellement pur et ruissellement hypodermique n'est qu'une question de degré d'intensité du ruissellement observable directement et qualitativement sur le terrain ..."*

En général les avis sont plus nuancés, et la plupart des hydrologues ont la perception qu'il existe des comportements spécifiques de l'eau vis à vis du sol dans les milieux humides, et dans le milieu forestier en particulier. Pour l'anecdote et le chauvinisme, on peut remonter à Mariotte (1686) : *" On objecte encore que les pluies d'été quoique très grandes, n'entrent dans la terre que d'environ un demi-pied, ce que l'on peut remarquer dans les jardins et les terres labourées. Je demeure d'accord de l'expérience, mais je soutiens que dans les terres non cultivées et dans les bois, il y a plusieurs petits canaux qui sont très près de la surface et dans lesquels l'eau de pluie entre et que ces canaux sont continus jusqu'à une grande profondeur...."*. (D'après Tixeront, 1973 - cité par l'Hôte, 1987).

Une référence plus proche, tout à fait étonnante, concerne l'étude hydrologique du bassin versant d'Alrance faite par P. Cappus en 1960. Dans une présentation insolite de ses résultats (l'article commence par l'étude des étiages), l'auteur propose tout simplement "une nouvelle théorie pour le ruissellement".

Il subdivise la surface totale A du bassin versant en zone de ruissellement d'extension A_r et en zone d'infiltration d'extension A_i et considère que le coefficient de ruissellement d'une pluie élémentaire L_r/P représente en fait le rapport des surfaces A_r/A . Cappus affirme que l'extension de la zone de ruissellement se confond avec l'aire d'affleurement de la nappe phréatique et que le coefficient de ruissellement est un invariant pour un niveau donné de la nappe et pour des pluies faibles à moyennes. Par contre, les pluies fortes sont susceptibles de faire varier l'étendue de la nappe pendant la crue et d'accroître le coefficient de ruissellement entre le début et la fin de l'événement.

Il serait difficile de ne pas considérer qu'il s'agit là d'une formulation complète et élaborée de la théorie des Aires Participantes à Surface Variable. Cappus annonce encore que le coefficient de ruissellement est indépendant de l'intensité de la pluie, et de l'état de la couverture végétale. Ces concepts seront explicités beaucoup plus tard, en termes de signification statistique, par Woodruff et Hewlett (1970) ; Hewlett et al. (1977) ; Hewlett et Bosch (1984).

Comme pour mieux servir la Mémoire Hydrologique, la théorie de Cappus a été exposée publiquement à l'occasion de la réunion annuelle de la Société Hydrotechnique de France (17 et 18 mars 1960), devant les représentants les plus éminents de l'Hydrologie Française, et le compte-rendu de la discussion qui s'ensuit permet de saisir l'état d'esprit de l'auditoire à cette époque. Le débat qui s'engage ne laisse aucun doute sur l'attention soutenue des auditeurs, ni d'ailleurs sur le fait que ceux-ci ne sont en rien troublés par cette "nouvelle théorie" :

G. Rémenieras fait remarquer que *"Le débit de base utilisé par M. Cappus est en corrélation non seulement avec la quantité d'eau contenue dans la zone de saturation du terrain, mais aussi avec celle emprisonnée dans la zone d'aération, c'est à dire avec la plus ou moins grande humidité des couches superficielles. Or, l'humidité des couches superficielles conditionne dans une certaine mesure le coefficient de ruissellement d'une averse. La prise en compte du débit de base peut donc être considérée dans la méthode de M. Cappus comme une manière simplifiée de tenir compte du taux d'infiltration du bassin."* En quelque sorte, le niveau de la nappe serait à la capacité d'infiltration du bassin ce que l'évaporomètre Piche est au pouvoir évaporant de l'atmosphère, et le débit de base continuera d'être utilisé dans l'Ecole Française comme **un indicateur de l'état de saturation global du bassin versant et non comme la cause directe de l'écoulement de crue** (par exemple Ikounga, 1978). Cette acceptation est particulièrement claire dans certains travaux où des régressions ont été établies entre le débit de base avant la crue et un indice de saturation global du bassin versant calculé à partir des données climatiques, dans le but de mieux caler ce dernier paramètre (Anonyme ORSTOM, 1966).

Dans la suite de la discussion, J. Rodier relativise les enseignements tirés du bassin d'Alrance par rapport au régime pluviométrique océanique de la région dans lequel les intensités sont particulièrement faibles, et de fait, l'intensité moyenne d'une averse décennale de durée égale au temps de concentration du bassin (6 heures) n'est que de 9 mm.h^{-1} (Dosseur et Guilbot, 1974).

Puis M. Tixeront fait part d'une expérience personnelle qui va dans le même sens que celle exposée par Cappus : *"Dans des terrains analogues (micaschistes), on peut trouver des puits à faible débit, à des niveaux très variables, avec de très faibles réserves d'eau. Il est donc très difficile de faire la différence entre nappe souterraine et écoulement hypodermique. Dans un pays de collines, il y a effectivement un niveau d'eau de profondeur variable, plus forte au sommet des collines et moins dans les vallées. Ainsi, l'eau monte plus vite dans les vallées, et il se forme une zone où une partie du bassin devient saturée sans que la totalité le soit. Cette observation confirme l'importance du rapport de la surface saturée sur la surface totale du bassin, signalé par M. Cappus."*

A cette époque, les mécanismes générateurs d'écoulement de crue ont été perçus de manière tout à fait comparable de chaque côté de l'Atlantique, et depuis lors, la chronique bibliographique française n'a cessé d'être jalonnée d'études hydrologiques fondées sur la genèse du ruissellement dans des zones limitées du bassin versant dont l'extension est contrôlée par des flux latéraux internes (écoulements sub-superficiels et "effet piston"). Ces concepts s'imposent au coup-par-coup "par la base", en fonction des conditions naturelles du bassin étudié, mais ne débouchent pas sur la structuration d'un Mouvement Hydrologique "latéraliste" et la doctrine dominante considère que les bassins versants dont le régime serait réglé par les écoulements latéraux et un ruissellement limité aux zones saturées aval constituent des cas bien particuliers.

Parmi les références latéralistes en zone humide tempérée, on peut citer Blavoux (1978) ; Mérot (1978) ; Branchard et Audoux (1981) ; Da Costa Dos Reis Da Silva (1986) ou Cosandey (1987) qui montre que l'écoulement rapide d'un petit bassin de 20 ha. en Bretagne peut s'expliquer par le ruissellement direct sur la surface d'affleurement de la nappe.

En zone tropicale humide de Côte d'Ivoire, à propos de l'étude du bassin du Manso, Dubreuil (1960 b) note que *" l'hydromorphie topographique qui affecte les talwegs et les bas de pente donne des ruissellements très abondants, alors que les sols ferrallitiques plus perméables ne se rencontrent guère que vers les lignes de crêtes."*

Dans une synthèse de l'étude des crues décennales en Afrique, Rodier (1976) explique que les plus forts coefficients de ruissellement de la crue décennale (de 58% à 62% de l'averse) se rencontrent sur des bassins qui présentent *"des phénomènes d'engorgement au voisinage de la surface" et "des sols imperméables situés parfois dans la partie basse du bassin, en particulier lorsqu'il s'agit de sols hydromorphes"*.

Les très nombreuses mesures sur parcelles implantées sous forêt dense en Côte d'Ivoire ont mis en évidence un ruissellement très faible, de 0,1 à 1,2 % des 2100 mm. de pluie annuelle (Roose et al., 1983). En admettant comme les auteurs que ces versants sont représentatifs de la zone bioclimatique, ces coefficients de ruissellement sont si faibles et les écarts si grands avec les valeurs régionales du "ruissellement" sur des bassins versants de quelques km² (qui sont elles de l'ordre de quelques % à quelques dizaines de %), qu'il faut bien admettre que la plus grosse part de l'écoulement rapide ne provient pas des zones de versants sur lesquels sont implantées les parcelles et qu'il est donc produit dans les bas-fonds.

Il est toutefois aisé de produire des contre-exemples permettant de balayer toute généralisation hâtive : dans le Sud-Ouest humide du Nigéria, Jeje et al. (1986) ont étudié une parcelle de 140 m. de long, à l'aval de laquelle étaient captés les drainages superficiels et internes, selon le protocole préconisé par Atkinson (1978). La pente du versant est de 10°, la couverture végétale est une forêt secondaire épaisse. L'horizon 0-50 cm. des sols développés sur des altérites de schistes et de gneiss migmatisés présente une texture limono-argileuse. Faisant référence à Wipkey (1965), les auteurs concluent à un résultat *inattendu* (sic), à savoir que la plus grande part du drainage - soit 58,4% - provient de l'horizon très superficiel (0-3 cm), c'est à dire de la litière, alors que les observations ont été faites pendant une année sèche (1982), dans des conditions jugées a priori favorables à l'infiltration et au drainage interne (Pluie annuelle 924 mm, soit 66% de la normale).

Une autre illustration de la diversité des fonctionnements hydrologiques peut-être trouvée dans Blancaneaux (1981) qui compare les écoulements mesurés sur les mêmes dispositifs (Case ERL0 - Erosion-Lessivage Oblique) en Guyane Française (Crique Grégoire) et en Côte d'Ivoire à Divo (résultats publiés par Roose 1981). Le substrat est granito-gneissique dans les 2 cas ; la pente est de 9,5% à Divo et de 13,3% à Grégoire. Le coefficient d'écoulement superficiel annuel a été de 19,7% à Grégoire (P = 2488 mm) et 1,4% seulement à Divo (P = 1955 mm). De même les coefficients annuels de drainage oblique (sur 6 m de large et 1,64 m de profondeur) ont été de 0,04% à Divo et de 1,1% à Grégoire avec des valeurs journalières de plus de 10%.

2.1.2.2 Intensif ou Extensif : Le dilemme des systèmes de production agricole, mais parfois aussi de la Recherche Hydrologique

On ne peut pas manquer de s'interroger sur les raisons historiques de ces différences dans l'évolution de la Science Hydrologique en France et dans les pays anglo-saxons. Cette interrogation interpelle tout particulièrement l'hydrologue de l'ORSTOM, au moment où les thèses du "tout ruissellement" sont sérieusement malmenées et que les concepts latéralistes connus depuis près de 30 ans viennent ingénument éclore à l'ombre des simulateurs de pluie (Chevallier, 1988).

Selon une théorie anarchiste du Savoir assez peu encourageante, exposée par Feyerabend (1975) et citée par Beven (1987), le succès ou la stagnation des idées nouvelles dépend de paramètres subjectifs et aléatoires, tels que le montant des aides à la recherche ou les perspectives de travail, autant que de la confrontation des résultats avec les données d'observation. Plus prosaïquement, à propos de cette démarche scientifique inductive qui passe pour faire découler la théorie des observations, Beven rappelle que les observations dépendent fatalement de la théorie (*) et qu'un changement de théorie entraîne souvent une nouvelle interprétation des mêmes observations. Pour illustrer cette dialectique tripolaire Théorie-Mesure-Interprétation, il n'est pas vraiment étonnant que Beven ait justement choisi l'exemple des deux théories de genèse de l'écoulement des crues - selon Horton et selon Hewlett !

Les véritables causes du succès relatif de ces idées sont sans doute plus triviales et l'utilisation opérationnelle des concepts "nouveaux" en hydrologie analytique a parfois pu s'avérer moins féconde que leurs promoteurs ne l'avaient prévu.

(*) : J'ai personnellement entendu un cobaye de laboratoire confier à son collègue de cage : "Je crois que j'ai finalement réussi à éveiller l'intelligence de cet homme en blouse blanche. Maintenant chaque fois que j'appuie sur ce bouton, il m'apporte une ration de maïs".

Ainsi, à propos d'une étude des petits bassins versants forestiers de Côte d'Ivoire, Dubreuil (1960a) constate que les résultats de l'analyse des coefficients de ruissellement en fonction de la pluie et du débit de base Q_0 sont assez décevants. D'autre part, la répartition hétérogène des averses sur le bassin est une donnée importante qui vient perturber la belle organisation des aires participantes. Et si les "latéralistes" cités ne se plaignent jamais d'avoir été incommodés par cette contrainte, cela tient au fait que la théorie des Aires Participantes a été forgée sur les bassins versants élémentaires - *headwater streams*, (Ward, 1984) - dont les surfaces étaient la plupart du temps de l'ordre de l'hectare ou de la dizaine d'hectares, - exceptionnellement de quelques centaines d'hectares -, alors que les bassins représentatifs forestiers étudiés par l'ORSTOM en Afrique drainaient entre 5 km² et 200 km² (Rodier, 1976).

Une autre série de raisons tient au fait qu'au terme de descriptions subtiles de différents processus d'écoulement, les hydrologues se retrouvaient tous, également démunis, avec un simple limnigramme pour tout objet d'analyse scientifique, mis à part quelques privilégiés travaillant sur des bassins versants de recherche phénoménologique très bien équipés. Si les possibilités d'interprétation de ce document sont multiples (Cf 2.3), l'utilisation finale dépend assez peu de la Théorie. Il n'est pas impossible qu'au niveau des pratiques opérationnelles en hydrologie analytique, l'avancée décisive apportée par la nouvelle théorie ait pu paraître surtout d'ordre sémantique, puisqu'elle consistait à appeler "Ecoulement rapide" (*Quick Flow*) le volume de l'hydrogramme généralement appelé "Ruissellement".

Mais la cause profonde de l'évolution divergente est à mettre sur le compte des objectifs qui avaient été assignés au programme d'étude des petits bassins versants, et plus particulièrement à ceux exploités par l'ORSTOM en zone tropicale humide (Dubreuil et al., 1972) : la principale propriété de ces bassins était d'être représentatifs, c'est à dire que les observations hydrologiques qui y avaient été faites devaient pouvoir être transférées à d'autres bassins, et cette transposition devait être possible en l'absence de toute mesure hydrométrique sur le bassin cible, et à partir d'informations peu élaborées (carte topographique, carte géologique, carte d'isohyètes, chronique de précipitations enregistrée sur des stations "à proximité", etc.). On conçoit aisément que l'utilisation du débit de base ou de l'extension de la nappe phréatique comme paramètres sensibles pour l'estimation des volumes ou des débits de crue d'un bassin inconnu ne constituaient pas des critères particulièrement adaptés à cet objectif de régionalisation.

Cette ambition de transposition des résultats à l'ensemble d'une région, qui constitue finalement l'Utilité Sociale de l'Hydrologie Analytique, a laissé en arrière-plan l'approfondissement phénoménologique détaillé du fonctionnement d'un bassin versant donné, au profit de la mise au point d'estimateurs robustes et "portables".

Le discours scientifique en vogue considère qu'il n'existe plus aujourd'hui de méthode de Recherche spécifique aux Pays en Développement par rapport aux Pays Développés. Il n'y aurait qu'une seule approche, aisément identifiable au Label de Qualité Scientifique, ... décerné par la communauté dominante. Cette situation n'a pas toujours prévalu, (dans les secteurs de la Connaissance aux retombées concrètes et immédiates), et le programme d'étude des Bassins Représentatifs de l'ORSTOM est un exemple de cette recherche finalisée pour le Développement, qui a permis de planter les premiers repères quantitatifs dans une aire géographique dépourvue d'une information minimum.

Par ailleurs, une contribution essentielle que l'étude des bassins représentatifs devait apporter au Développement, était l'estimation des crues de périodes de récurrence assez élevées (10 ans environ), dites crues de projet, pour assurer le dimensionnement des ouvrages de petite hydraulique. Pour des telles périodes de retour, correspondant à des averses ponctuelles de 100 à 200 mm, il est bien certain que l'extension de l'aire participante est maximum et peut affecter des surfaces importantes du bassin versant, et que dans ces conditions extrêmes, les résultats obtenus à partir de chacune des deux théories convergent davantage qu'en situation d'écoulement ordinaire. On rejoint la théorie du Gradex (Guillot et Duband, 1968), selon laquelle la capacité de rétention du bassin versant est atteinte pour des crues de fréquences plus rares que décennales, et qu'à partir de ce moment, les caractéristiques du bassin versant sont gommées (et les théories de genèse du ruissellement aussi !) et la production de l'écoulement ne dépend plus que des apports pluviométriques.

On peut comprendre que dans de telles conditions, la prédétermination de la crue décennale à partir de la capacité d'infiltration, selon une vision "verticaliste", ait pu être qualifiée de prometteuse (Casenave et al., 1982). L'hydrologie n'étant pas une science exacte et des théories pas tout à fait justes pouvant aboutir à des résultats pas tout à fait faux, ces auteurs ont pu proposer une discrétisation spatiale des bassins versants forestiers de Côte d'Ivoire, à partir de mesures de la capacité d'infiltration au mini-simulateur de pluie. La fonction de production du ruissellement sur chaque unité dépend de la pluie, d'un indice d'humidité initial et de caractéristiques texturales et structurales du sol, sans qu'il soit nécessaire d'introduire des interférences hydrologiques latérales entre les unités pédologiques.

Les préoccupations du Développement ont fait porter les efforts d'investigation hydrologique là où les problèmes d'eau se posaient avec le plus d'acuité, c'est à dire plutôt dans les régions sèches : il n'est donc pas étonnant que sur les 241 bassins versants représentatifs étudiés, 36 seulement soient des bassins forestiers (Dubreuil et al, 1975). Or, dans les régions sèches, le ruissellement, contrôlé par les états de surface, est bien le processus dominant pour la production des écoulements en crue : la spécialisation dans un certain milieu géographique conditionne les inclinations d'une communauté vers une Ecole Hydrologique plutôt qu'une autre.

On notera encore, à propos des interactions entre Outils et Connaissance, que la méthode retenue pour le calcul de la crue décennale sur un bassin quelconque (Rodier et Auvray, 1965 ; Rodier, 1976) fait appel à l'utilisation d'un modèle global, fondé sur l'hydrogramme unitaire de Sherman, qui peut difficilement prendre en compte une conception hétérogène des mécanismes en amont du site de simulation. Le modèle du ruissellement défini par Horton et l'hydrogramme unitaire de Sherman (1932) ont formé un binôme indissociable, fournissant des solutions pragmatiques à partir d'une procédure rustique bien adaptée à une époque où les ordinateurs n'existaient pas. Cette alliance aura, sans aucun doute, favorisé la pérennité et l'acceptation quasi-universelle du ruissellement hortonien, généralisé sur l'ensemble du bassin versant.

2.1.3 VERS UNE SYNTHÈSE SANS COMPROMIS

Au terme de cette incursion dans la profusion des concepts du fonctionnement hydrologique des petits bassins versants, il semble indispensable de dégager quelques lignes directrices dans cette information pouvant servir de canevas pour l'interprétation des écoulements mesurés à ECEREX et des régimes hydrologiques des bassins versants.

On ne peut manquer d'être frappé par la convergence des conclusions d'une approche pédologique basée sur la dynamique hydrique qui commande l'organisation et l'évolution des systèmes de sols et d'une recherche hydrologique sur les mécanismes du fonctionnement d'un bassin versant en zone humide. Ce constat est d'autant plus remarquable lorsque l'on sait qu'il n'y a jamais eu la moindre communication entre ces deux approches, qui n'ont de ce fait pu s'influencer mutuellement, et il est a priori réconfortant que des pédologues de l'ORSTOM en Guyane et des hydrologues forestiers US de Georgie, qui n'ont ni les mêmes objets d'étude ni les mêmes finalités scientifiques, aboutissent à des visions concordantes.

Un faisceau d'arguments s'est peu à peu imposé, mettant en évidence la prédominance des processus hydriques internes aux profils pédologiques dans les milieux humides, l'importance des échanges hydrologiques latéraux, soit par participation directe à l'écoulement des crues, soit en tant que mécanismes déclencheurs indirects : par alimentation des nappes de bas fond ou par production d'écoulements de surface sur zones saturées. Les hydrologues acquis à l'hypothèse préalable d'un fonctionnement général hortonien des bassins versants se sont ralliés à ce point de vue, suite aux résultats peu significatifs obtenus avec les techniques de simulation artificielle de pluie sur de petites surfaces (1 m²) : *"En zone de forêt tropicale, les différents travaux (Casenave et al., 1982 ; Collinet, 1984), montrent l'influence prépondérante des organisations internes de la couverture pédologique sur les écoulements....Le ruissellement résulte le plus souvent de phénomènes d'engorgement à plus ou moins grande profondeur, d'où l'importance des zones de bas-fonds, généralement complètement saturées en saison des pluies et d'où provient une grande partie du ruissellement du bassin."* (Casenave, 1986).

Par ailleurs, il est quelque peu déconcertant de constater qu'après avoir insisté sur l'importance des organisations des systèmes pédologiques le long des versants, les hydrologues hewlettien ont été le plus souvent amenés à faire état dans leurs études d'informations pédologiques d'une indigence affligeante, limitées à des considérations texturales (... les sols sont argilo-limoneux...) ou à des descriptions stationnelles et "anatomiques" des profils, alors qu'il a été déclaré au préalable que c'est dans la physiologie pédologique qu'il faut chercher le critère explicatif principal du bassin versant. Cette situation a évolué favorablement avec le temps et les études récentes sont amplement documentées en la matière (Moore et al., 1986 ; Burch et al., 1987), mais manifestement, les préoccupations de la Science des Sols n'étaient pas concordantes en lieux et en temps (monde anglo-saxon et fin des années 60) pour s'associer à l'hydrologie des zones humides, et éclairer et relativiser les avancées conceptuelles de cette spécialité.

Ce rendez-vous manqué est probablement l'une des causes du climat passionnel qui a présidé à l'émergence de l'hydrologie latéraliste et de la théorie des Aires Participantes. En prétendant que la dynamique hydrologique interne était **partout et toujours** le processus responsable de l'écoulement des crues, les pourfendeurs du "tout-ruissellement" s'engageaient dans une voie aussi sectaire et intolérante que celle qu'ils dénonçaient.

Ce sont des géomorphologues, à la sensibilité hydrologique développée, qui ont cherché à établir les bases d'une synthèse et d'une harmonisation des deux théories. Le schéma de Dunne (1978) (figure 2.1.03) représente les milieux climatiques sur un axe horizontal, selon lequel on part d'un milieu aride ou semi-aride, qui est le domaine du ruissellement hortonien dans lequel les états de surface sont déterminants, pour arriver à un domaine humide dans lequel la dynamique interne est dominante et où s'applique le concept des Aires Participantes à Surface Variable. Cette interprétation implique de fait, que dans tous les milieux intermédiaires qui ne sont pas franchement typés comme aride ou humide, les deux processus peuvent coexister - dans l'espace sur un même bassin versant - et dans le temps sur un site donné en fonction du pédoclimat local à un instant donné (couvert végétal, utilisation du sol, distribution temporelle des pluies). Le caractère universel et apaisant de la figuration de Dunne a été maintes fois invoqué et reproduit dans des travaux portant sur la genèse de l'écoulement des petits bassins versants, comme par exemple Bruijnzeel (1983) ou Chevallier (1988).

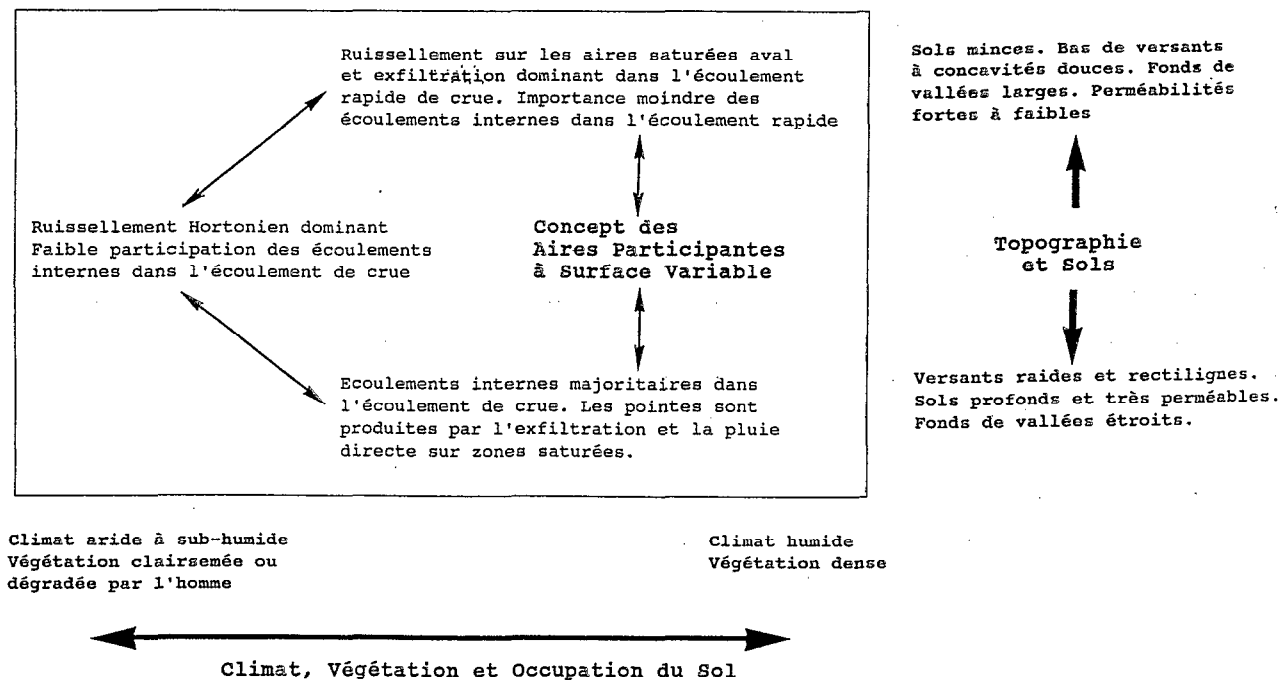


Figure 2.1.03 : Fonctionnement des systèmes hydrologiques en relation avec le modelé et les conditions morphoclimatiques (extrait de Dunne, 1978).

Il n'est pas vraiment surprenant que les géomorphologues aient été les artisans de la synthèse car la géomorphologie dans son évolution a connu un avatar assez comparable : dans la conception originelle de cette Science, le modelé était l'oeuvre de "l'érosion normale", ensemble de processus universels et mal définis, principalement commandés par l'action des eaux courantes et aboutissant à la pénéplanation (Davis, 1899). Ce n'est qu'à partir de la seconde moitié de ce siècle que les géomorphologues mettent en évidence l'importance de la géomorphologie climatique, c'est à dire le fait que les processus responsables du modelé sont variables selon les milieux climatiques considérés (Cholley, 1950 ; Tricart, 1965).

L'exégèse du schéma de Dunne appelle un commentaire supplémentaire si l'on se réfère à la variabilité représentée le long de l'axe vertical dans la partie droite du graphique : il est suggéré que dans les milieux humides, terres d'élection du concept des aires participantes, l'occurrence des différents mécanismes de production d'écoulement rapide est sous le contrôle des formes du modelé (il est dit par exemple que les bassins versants à pentes concaves et à fonds de vallées plats sont dominés par la pluie directe sur les surfaces saturées et l'exfiltration, alors que des versants raides et rectilignes seraient plutôt le domaine des écoulements de subsurface).

Cette idée soutend la démarche de certains utilisateurs des Modèles Numériques de Terrain (MNT) : si le modelé est la signature des processus dynamiques qui s'exercent sur lui, et en particulier du régime hydrologique et des mécanismes de formation de l'écoulement, l'analyse numérique du relief par des algorithmes appropriés (Beven, 1986) devrait aboutir à définir des paramètres d'entrée d'un modèle hydrologique, avec pour résultats :

- l'amélioration de l'aspect conceptuel du modèle,
- la possibilité de transposition géographique du modèle hydrologique à un autre bassin versant dont on connaît le MNT.

Des indices rustiques globaux, de relief ou de pente ont été utilisés largement et depuis fort longtemps comme paramètres de transposition (Rodier et Auvray, 1965), et il est tout à fait hors de notre propos de contester l'intérêt des MNT en hydrologie ou de minimiser les possibilités nouvelles offertes par cette filière. On peut néanmoins en pressentir certaines limites et relativiser les espérances que l'on peut nourrir sur le caractère universel des résultats obtenus par cette seule technique :

- Appréhendé à l'échelle du MNT, le modelé du bassin versant peut être l'image de processus hydrologiques qui ne sont plus fonctionnels aujourd'hui et les indicateurs du fonctionnement ne sont perceptibles qu'à une échelle de micro-modelé non prise en compte dans la maille du MNT (par exemple les bossellements sur les versants en climats tempérés humides, indices de sols fluants parce que gorgés d'eau, ou les griffures preuve de la concentration du ruissellement de surface).
- Le deuxième écueil est plus fondamental et tient au fait que l'association d'une forme du modelé avec une dynamique hydrologique n'est valable qu'à l'intérieur d'un même système morphoclimatique. Par exemple une vallée large à fond plat, qui pourra être l'indicateur d'une vallée glaciaire avec des alluvions grossiers en climat tempéré (déterminant un certain régime hydrologique), pourra correspondre à une zone de sédimentation composée de dépôts fins et compacts en zone tropicale (et donc un fonctionnement très différent). De la même façon, les algorithmes de l'organisation des aires participantes dans un vallon en berceau anglais ne pourront

être transposés directement au milieu forestier tropical humide dans lequel les versants sont rectilignes et délimitent des vallons en V pour les bassins élémentaires et se raccordent à des bas-fonds plats lorsque les bassins atteignent la taille kilométrique. La relation entre dynamique hydrologique et modelé n'étant bijective qu'à l'intérieur d'un même milieu climatique et dans des conditions géologiques semblables, la voie de la portabilité de l'association modèle hydrologique - MNT sur des bassins inconnus promet d'être encore longue et encombrée.

2.2 LE DISPOSITIF DE MESURE HYDROLOGIQUE

Un dispositif de mesure des écoulements superficiels et des transports solides à diverses échelles, a été implanté à partir de 1977. Il comporte des parcelles, des bassins versants élémentaires et un petit bassin versant. Les caractéristiques de chaque ensemble ont été décrites respectivement par Sarrailh (1983), Roche M.A. (1982) et Fritsch et al. (1987).

Les bassins élémentaires constituent le principal instrument d'investigation du dispositif hydrologique, tant pour l'identification de la variabilité du milieu naturel que pour l'évaluation des modifications après défrichement. Ils sont répartis le long de la piste de St. Elie, entre les points kilométriques 11,5 et 17,5. A vol d'oiseau, l'extension maximum du dispositif, orienté selon un axe Nord-Sud, est de 5 km (figure 2.2.01).

2.2.1 LES PARCELLES SOUS FORET NATURELLE

Cet ensemble comprend 3 unités :

Deux parcelles quasi-adjacentes, implantées sur une toposéquence typique d'un versant parvenu au stade III de l'évolution pédologique (Dynamique de l'eau Superficielle et Latérale):

- Une parcelle (P_A) de 400 m² (40 m selon la pente et 10 m de largeur). Mesurée selon le protocole de Humbel (1978), la partie amont de cette parcelle présente une perméabilité de surface élevée : la médiane des mesures est à 214 cm.h⁻¹, ce qui correspond aux valeurs fortes de la gamme pour ce type de sols à DSL ; la pente est de 18% sur cette partie amont. Sur les parties situées plus en aval, la perméabilité de surface diminue très sensiblement (médiane des perméabilités à 76 cm.h⁻¹), et la pente augmente jusqu'à 35%.
- Une parcelle (P_B) de 100 m² (10 m x 10 m) située en haut de versant, dans des conditions aussi semblables que possible de celles de la partie amont de la parcelle P_A : perméabilité de surface élevée pour un sol à DSL ; pente de 18%.
- Une parcelle (P_C) de 100 m² (10 m x 10 m) située en haut de versant sur un sol à drainage vertical libre (DVL), au stade I de l'évolution pédologique.

L'extension des surfaces drainées est limitée par des tôles fichées en terre sur les cotés et le sommet de chaque parcelle. La limite amont des parcelles coïncide avec la ligne naturelle du partage des eaux. Un collecteur cimenté, en forme de gouttière, affleurant la surface du sol, récupère l'écoulement superficiel et les transports solides à l'aval et sur toute la largeur de la parcelle. Ceux-ci sont dirigés dans des cuves métalliques, reliées entre elles par des partiteurs. Le relevé des volumes écoulés s'effectue tous les matins. La capacité de collecte du système est de 233 mm et les partiteurs peuvent évacuer un débit équivalent à 199 mm.h⁻¹, correspondant à la plus forte intensité enregistrée en 6 minutes à St. Laurent. (Anonyme CTFT-ORSTOM, 1979). La pluie est mesurée en clairière, à 100 m de distance des parcelles P_A et P_B et à 200 m environ de la parcelle P_C .

Les résultats recueillis sur ces parcelles seront utilisés pour préciser les mécanismes de formation de l'écoulement superficiel à l'échelle du versant en fonction des différenciations pédologiques.

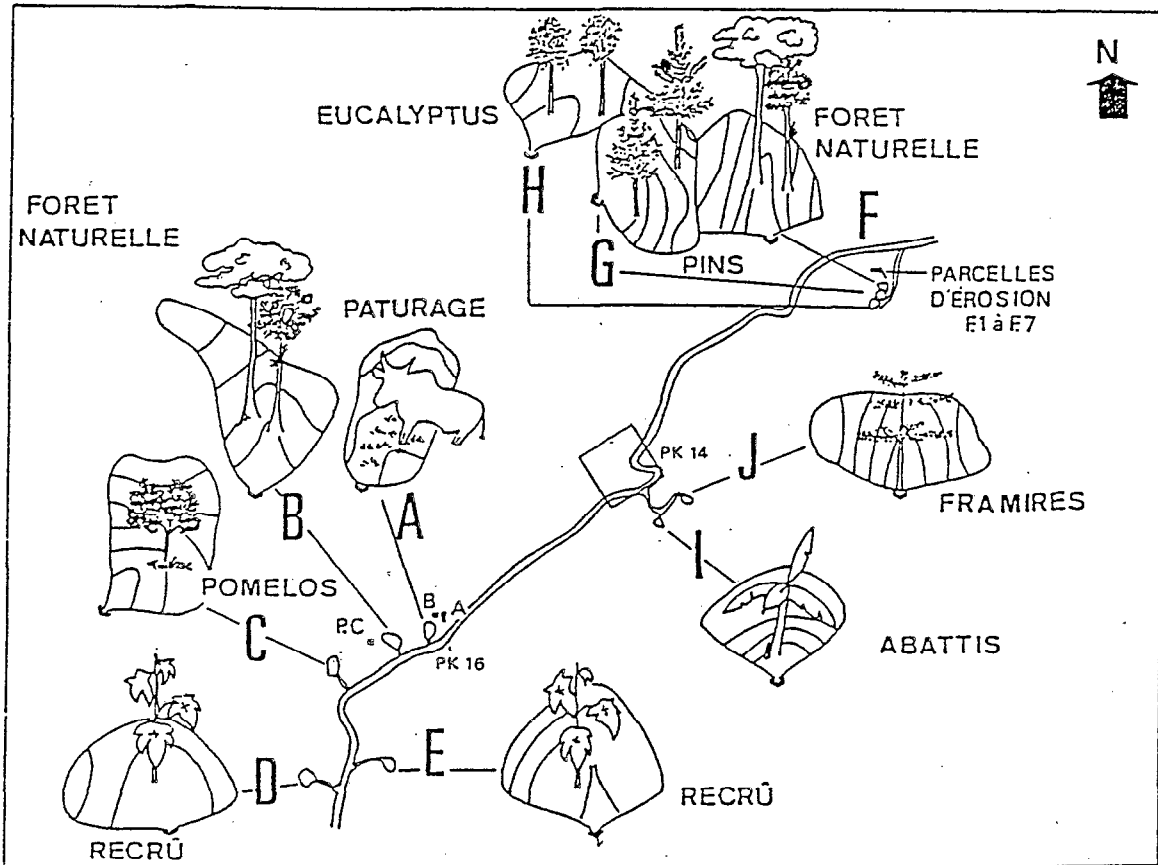


Figure 2.2.01 : Le dispositif de mesure hydrologique ECEREX

Source : Sarrailh, (1989)

2.2.2 LES PARCELLES D'ESSAI EN FOURRAGES

7 parcelles plantées en fourrages ont été installées et suivies par le CTFT à partir de 1979 (figure 2.2.02). Leur surface est de 200 m² (20 m selon la pente et 10 m de large). Elles sont implantées sur une pente de 12% et sur des sols à DSL. Un ensemble de cuves et de décanteurs permet de recueillir les écoulements superficiels et les matières solides de toutes granulométries. Les relevés sont faits après chaque crue importante.

L'objectif du dispositif est l'étude comparative des productions végétales et des effets sur l'écoulement et sur l'érosion de différents couverts herbacés. Les 7 espèces fourragères testées sont portées dans la légende de la figure 2.2.02.:

Ces parcelles sont complétées par une parcelle de 20 m x 5 m, exploitée selon le protocole de Wischmeier : la parcelle est maintenue en sol nu, et ratissée après chaque averse. Ce protocole est destiné à mesurer le coefficient d'érodibilité des sols, paramètre utilisé dans la formule empirique de calcul de l'érosion préconisée par cet auteur.

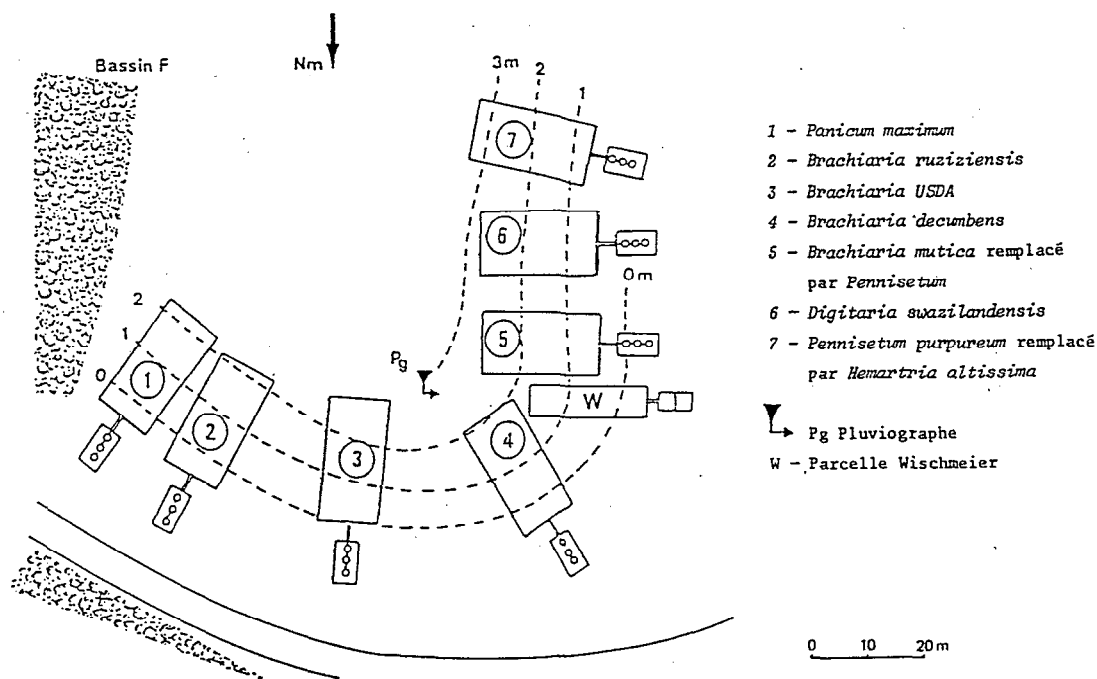


Figure 2. 2.02 : Les parcelles d'essai en fourrages et la parcelle Wischmeier

Source : Fritsch et Sarrailh, (1986)

2.2.3 LES BASSINS VERSANTS ELEMENTAIRES

Le dispositif complet est composé de 10 bassins versants élémentaires, identifiés par les lettres A à J. Ils ont été mis en service en trois temps : A, B et C en début de 1977, D, E, F, G et H au début de 1978, enfin I et J à la fin de cette même année 1978.

2.2.3.1 Caractéristiques morphométriques

Comme le suggérait la description du modelé (cf. 1.2.3), les contraintes hydrauliques ont été déterminantes dans le choix des sites des stations hydrométriques, et par conséquent pour la taille des bassins versants. Pour effectuer des mesures de débits dans de bonnes conditions, il fallait que les stations hydrométriques fussent situées en dehors des zones de bas-fonds dans lesquelles l'écoulement s'étale largement en hautes eaux, et même en eaux moyennes. Compte tenu des conditions géomorphologiques locales, cette contrainte s'est traduite par l'obligation de remonter pratiquement jusqu'au talweg d'ordre 1 pour trouver des sections de contrôle satisfaisantes. Le dispositif se trouve ainsi constitué de bassins versants élémentaires, ayant des surfaces très voisines, toutes comprises entre 1 et 2 hectares.

Les limites de ces bassins versants ont été repérées sur le terrain successivement par différents opérateurs et marquées par des jalons. Les résultats concordants ont montré, dans ce cas précis, que la délimitation visuelle sur le terrain des limites de bassin versant en forêt était peu ambiguë. Les relevés topographiques ont été faits par les hydrologues (avec boussole, niveau et Topofil), par les pédologues à l'occasion de la prospection cartographique (clisimètre, boussole et Topofil), et finalement par un ingénieur forestier du CTFT avec un théodolite auto-réducteur RDS. La contrainte commune pour les différents opérateurs était de ne pas perturber la couverture végétale des bassins versants, qui devait rester intacte pendant la phase d'étude en milieu naturel.

Les cartes tracées à partir des levés au théodolite ont été utilisées dans cette étude pour déterminer les surfaces des bassins versants (figure 2.2.03). Les surfaces ainsi obtenues sont très proches de celles établies à partir des documents provisoires antérieurs (Roche M.A., 1982), et les quelques différences minimales tiennent aux problèmes de restitution de la planimétrie sur ces bassins à fortes pentes, et non pas à une imprécision dans la position des limites de bassins versants.

La gamme des surfaces drainées aux exutoires (tableau 2.2.01) va de 1,0 ha (bassin H) à 1,6 ha (bassin B, C et E). Les plus fortes pentes de chaque versant ont été calculées à partir des courbes de niveau (équidistance 2 mètres) et figurent en ligne 2 du tableau 2.2.01 : les bassins de plus fortes pentes sont F (35 et 31%) et J (32 et 29%) alors que les pentes les plus faibles se rencontrent sur le bassin B (17% sur chaque versant).

2.2.3.2 Les sols

Le nombre et l'implantation des bassins versants ont été très largement déterminés par les conditions pédologiques particulières identifiées dans la région. Il s'agissait d'implanter un dispositif expérimental susceptible de simuler un maximum de scénarios d'aménagement vraisemblables sur l'ensemble de la gamme des situations naturelles existantes.

La typologie pédologique des bassins versants expérimentaux est la suivante :

- 1 bassin versant à Drainage Vertical Libre, représenté par le bassin C

C'est le type le plus simple au point de vue pédologique, mais dont la variabilité temporelle du comportement hydrologique est très forte. Le rendement en crue d'un tel bassin est extrêmement dépendant des conditions initiales la crue et des caractéristiques de la pluie de l'averse : c'est le plus "hortonien" des bassins ECEREX. La limitation de l'effectif à un individu pour les bassins à DVL s'explique par le fait que la mise en valeur agricole des sols à DVL est moins problématique que celle des sols à DSL, et les promoteurs du Programme ont considéré qu'il n'y avait pas lieu de multiplier ce type de bassin versant. Boulet (1981) évoque la représentativité élargie de ce bassin *"dont la couverture pédologique présente une bonne analogie, tant dans son organisation que dans sa dynamique, avec celles connues en Afrique sous les mêmes latitudes."*

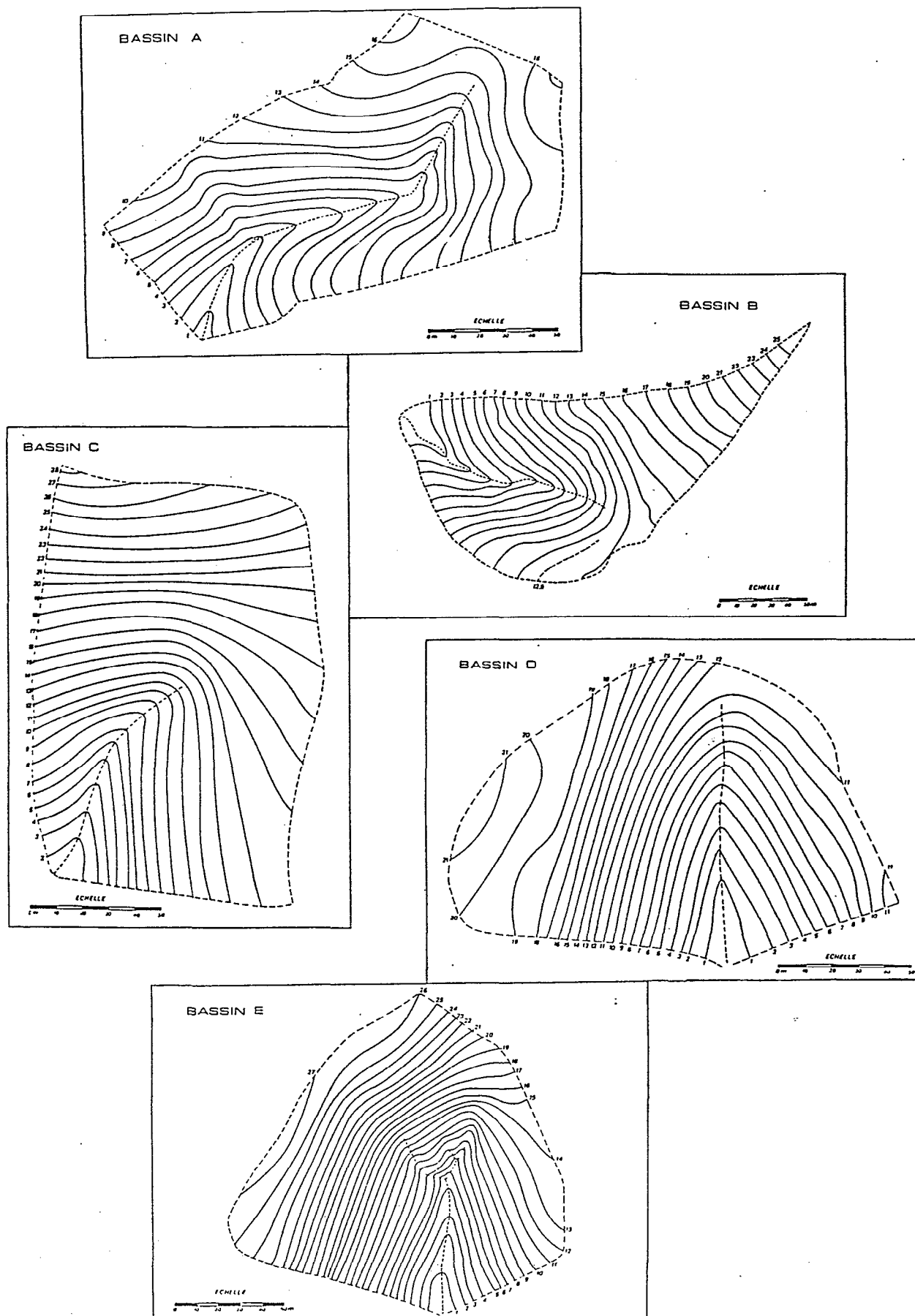


Figure 2.2.03 : Cartes hypsométriques des bassins versants

Source : CTFT - Conservation des Sols

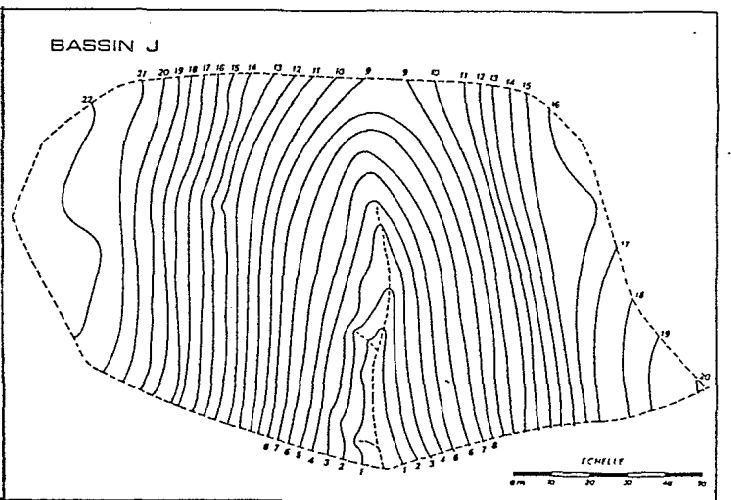
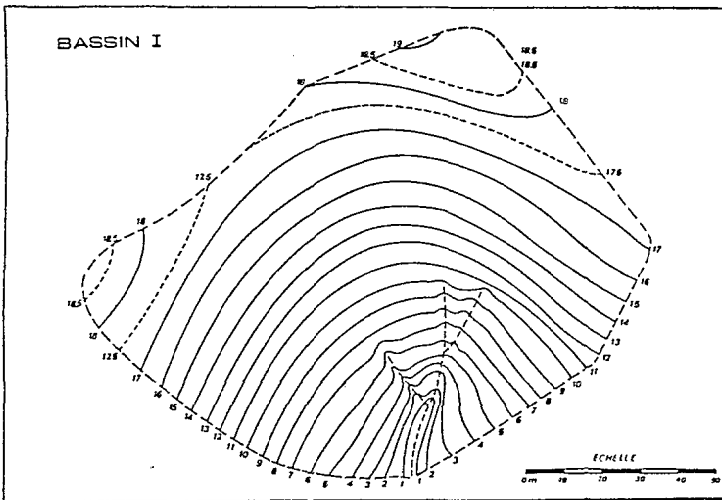
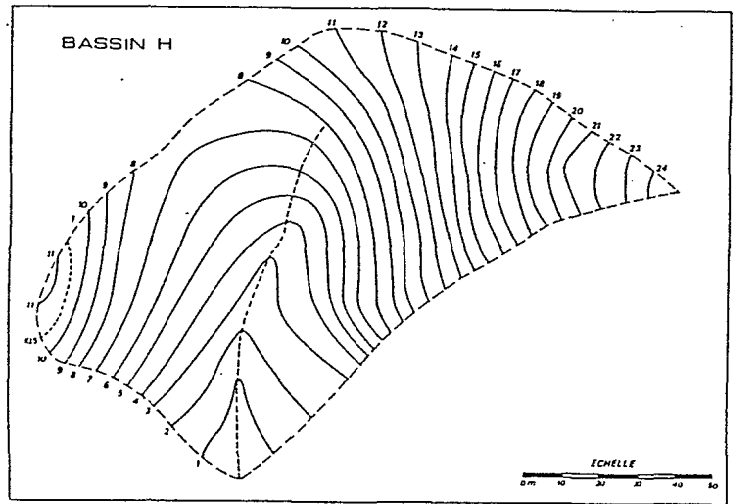
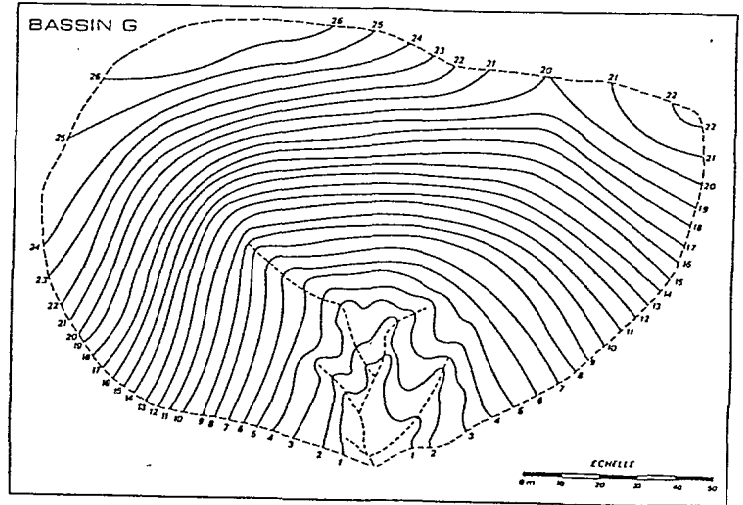
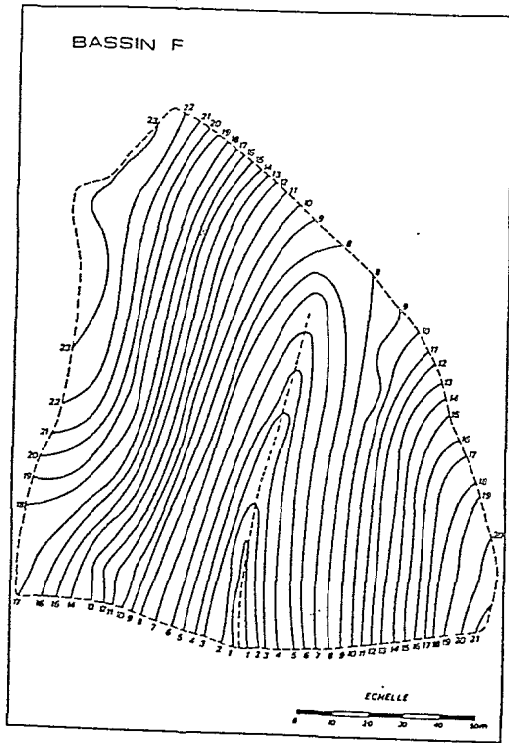


Figure 2.2.03 : Cartes hypsométriques des bassins versants

Source : CTFT - Conservation des Sols

- 5 bassins versants à dynamique de l'eau superficielle et latérale : A,F,G,H et J

Le bassin A constitue l'archétype du stade III de l'évolution pédologique. L'ensemble du bassin versant est occupé par des sols à **DSL** avec des manifestations d'hydromorphie dans l'horizon humifère sur 80 % du bassin. Il n'y a jamais de remontée de nappe phréatique en surface dans le bas-fond.

Les bassins F,G et H ont des versants dont la dynamique est comparable à celle du bassin A (**DSL** et hydromorphie de surface), avec comme caractéristique supplémentaire l'apparition d'un domaine aval affecté par un battement de nappe phréatique qui peut affleurer en saison des pluies.

Sur le bassin J, les sols à **DSL** dominent très largement (98%). Un filot de **DVL** subsiste en amont rive gauche sur une partie du bassin occupée par un filon de pegmatite.

- 4 bassins versants mixtes : B,D,E et I

Ces bassins sont mixtes, au sens où leurs couvertures sont partagées entre sols à **DSL** et à **DVL**.

Sur le bassin B la partie à Drainage Libre occupe la partie la plus amont du bassin, sur 10% de sa surface. Cette proportion de sols à **DVL** augmente à 57% sur le bassin E et à 60% sur les bassins D et I. Le domaine à **DVL** est circonscrit au haut des versants et sur chaque rive du bassin E, alors que le bassin D est composé de deux demi-bassins homogènes, entièrement en **DVL** en rive droite du talweg et entièrement en **DSL** en rive gauche. Le domaine à Drainage Vertical Libre occupe totalement la moitié amont et le fond de vallon de la moitié aval du bassin I.

Les effets de battement de nappe phréatique n'affectent pas les bas-fonds de ces bassins mixtes : sur le bassin B, le toit de la nappe a été trouvé à 6 mètres de profondeur en saison des pluies, à proximité immédiate et à l'amont de l'exutoire.

2.2.3.3 Les couvertures végétales

Les 10 bassins versants étaient entièrement occupés par la forêt. Ce couvert est primaire dans la mesure où aucune activité forestière ou agricole de quelque importance n'avait pu s'installer dans le passé sur ce site éloigné de toute rivière navigable. La piste d'accès n'a été ouverte qu'en 1976, pratiquement au début du programme d'étude. Le couvert forestier est donc homogène et indifférencié, au sens sylvigénétique du terme (cf. 1.2.5).

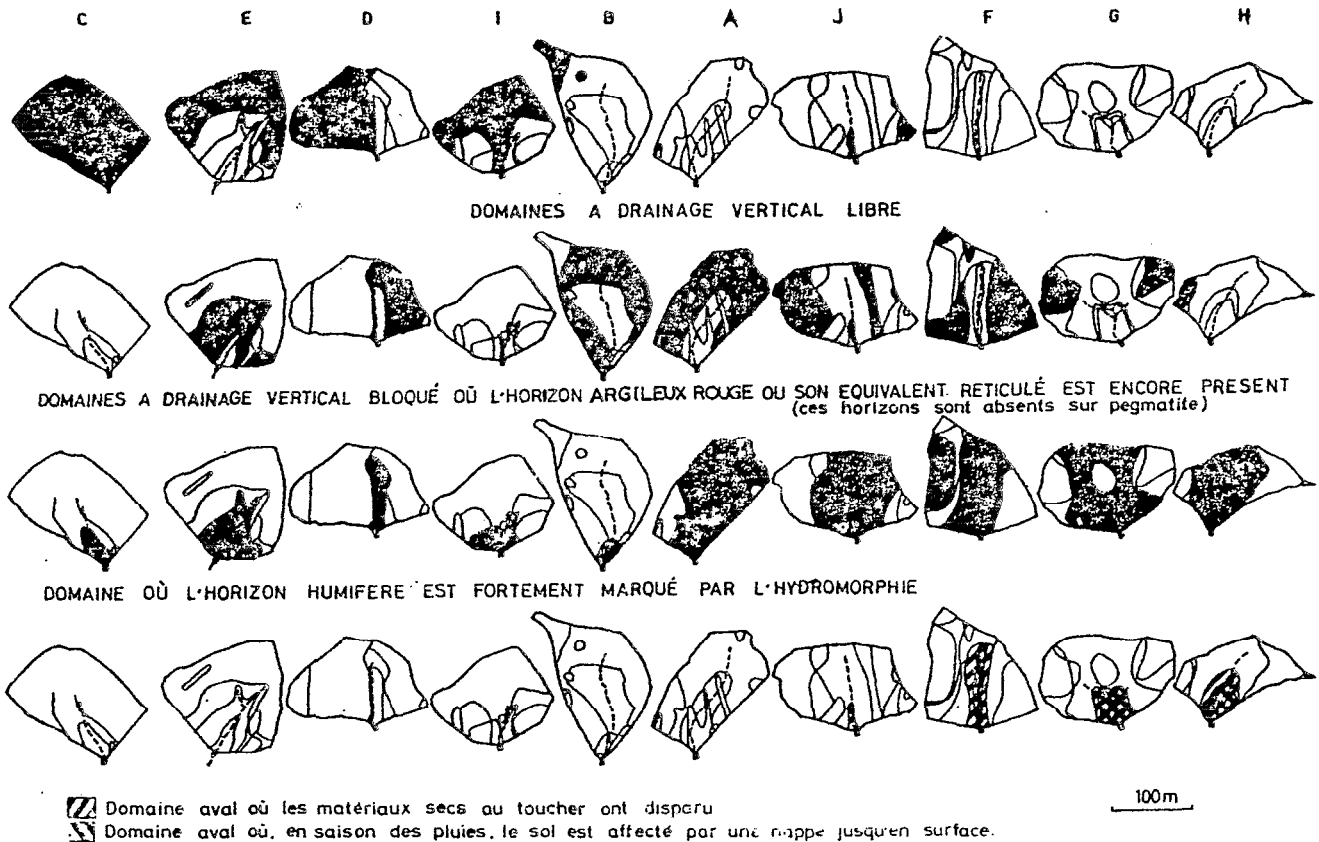


Figure 2.2.04 : Evolution de différents caractères et horizons pédologiques sur les bassins versants ECEREX

Source : d'après Boulet (1979)

Tableau 2.2.01 : Surfaces des bassins versants et extension de caractères pédologiques conditionnant le comportement hydrologique

Source : d'après Boulet (1979)

Bassin versant	:	C	I	E	D	B	A	J	G	F	H
Surface (ha)	:	1,6	1,1	1,6	1,4	1,6	1,3	1,4	1,5	1,4	1,0
Pentes maximales des versants sur chaque rive (%)	:	20-17	23-23	30-20	28-18	17-17	20-20	32-29	34-26	35-31	24-19
Surfaces à Drainage Libre (DVL)	:	99%	60%	57%	60%	10%	0%	2%	0%	0%	0%
Surfaces à nappes affleurantes	:	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	10%	4%	14%
Coefficient d'écoulement annuel sous forêt en % (année 1979)	:	11*	15	15	16	20	22*	31	49	52	57
Stades d'évolution pédologique	:	I	II	II	II	III(+II)	III	IV(+II)	V	V	V

* : Bassins déforestés en 1979. Valeurs reconstituées à partir du témoin B

2.2.3.4 Equipement hydrométrique

Chaque bassin versant comporte l'équipement de mesure suivant :

- **Un canal en maçonnerie**, de section 1 m x 1m, s'ouvrant en entonnoir à l'amont pour mieux capter l'écoulement. Ce canal débouche sur **une fosse à sédiments** de 1,5 m de profondeur.
- **Une structure de contrôle hydraulique** des débits faisant suite à la fosse à sédiments. Sur 7 bassins versants, ce contrôle est constitué par un déversoir métallique à lame mince, à ouverture en V selon un angle de 30°. Sur les 3 bassins F, G et H, le déversoir est du type *H Flume*, fréquemment utilisé par les forestiers du CTFT (Bailly et al., 1974). A charge égale, ce contrôle permet d'évacuer des débits supérieurs à ceux d'un déversoir en V et serait moins sensible à l'obstruction par des sédiments ou des débris végétaux par suite de la mise en vitesse des écoulements. Par contre, les H Flumes sont peu sensibles dans la gamme des faibles débits, et il s'est avéré à l'usage qu'ils avaient été implantés de façon malencontreuse sur les 3 bassins qui avaient des écoulements de base faibles et quasi-permanents. A partir de la deuxième année d'observations (1979), une petite lame en V de 5 cm de hauteur a été rajoutée à la base des *H Flumes*, de façon à améliorer la précision sur la mesure de ces faibles débits. Les débits maximaux contrôlables sont de 410 l.s⁻¹ pour les déversoirs en V (pour une charge H=100 cm) et de 500 l.s⁻¹ pour les *H Flumes* (H=80 cm).
- **Un limnigraphe à flotteur**, à tambour, de type OTT X, avec une réduction des hauteurs au 1/5. Les diagrammes sont changés tous les matins en saison des pluies (décembre-juillet), ce qui permet d'opter pour une période de rotation du tambour en 32 heures, soit une vitesse de déplacement du diagramme de 12 mm.h⁻¹. Pendant la saison sèche, la fréquence des relevés est hebdomadaire et impose une vitesse de défilement de 4,0 mm.h⁻¹. Cette vitesse qui se traduit au dépouillement par une imprécision sur les temps supérieure à 30 minutes est acceptable, dans la mesure où les crues sont très rares pendant la saison sèche.
- **Un pluviographe à augets basculeurs** de type Précis-Mécanique 3030, avec inscription sur tambour et entonnoir de 400 cm² (soit 0,5 mm de pluie par basculement). Les vitesses d'enregistrement sont respectivement de 15 mm.h⁻¹ en saison des pluies et de 2,3 mm.h⁻¹ en saison sèche. L'appareil est installé au centre d'une clairière artificielle, ouverte à l'aval immédiat de la station hydrométrique.

2.2.3.5 Traitement de base des données hydrologiques

Les barèmes hauteurs-débits ont été établis à partir des courbes théoriques de chaque déversoir, corrigées par des mesures de débits. Ces jaugeages ont été faits au micro-moulinet, et par capacité pour les faibles débits. Les étalonnages sont stables et figés depuis le début des observations. Les seuls changements de barèmes correspondent à la pose des V de basses eaux sur les 3 déversoirs *H Flume*, au début de 1979.

Les pluviogrammes ont été dépouillés sur un numériseur BENSON 6201, au Service Hydrologique de l'ORSTOM à Bondy. Pour chaque diagramme, les hauteurs enregistrées ont été corrigées par la valeur de la pluie cumulée recueillie au seau. Les temps des basculements peuvent être connus à 2 minutes près (0.5 mm sur le papier en saison des pluies). Les fichiers résultants ont été traités par le programme POH126, fournissant en sorties sur listing le tableau des pluies journalières, l'individualisation des averses, l'intensité maximum par averse pour différents pas de temps, la pluie horaire, l'indice d'érosivité de Wischmeier par averse (R_{USA}).

Les hauteurs d'eau ont été dépouillées à la main, avec un pas de temps variable, et reportées sur bordereaux de saisie informatique. Pour suivre fidèlement les variations du plan d'eau, l'écart entre deux points sélectionnés successifs peut descendre à 2 minutes. Les côtes sont exprimées en millimètres, et connues à 2 mm près (soit 0.4 mm sur l'enregistrement). Le traitement informatique de base (calcul des débits instantanés) a été fait sur ordinateur Mini-6 jusqu'en 1980, puis sur micro-ordinateurs HP 9815 et HP 85 pour les années 1981 à 1983.

2.2.4 LE PETIT BASSIN VERSANT

Ce "petit" bassin est l'unité de drainage la plus vaste suivie à ECEREX. Une station hydrométrique a été installée sur la Crique Délices à la fin de 1980. A ce point, la surface du bassin versant, tracé sur la carte IGN au 1/50 000 (feuille Iracoubo NE) est de 4,5 km². Ce bassin versant englobe complètement les 4 bassins élémentaires A, B, C et E (figure 2.2.05).

2.2.4.1 Les sols

Les sols du bassin versant ont été identifiés par Boulet (1986, document non publié), en fonction des stades d'évolution des interfluves. Le tableau 2.2.02 donne l'extension de ces différentes unités sur ce bassin versant. On rappelle que le stade II correspond à des versants en DVL dans leur partie supérieure, passant en DSL vers l'aval. La partie occupée par la nappe (7,4%) est une estimation par défaut et concerne la nappe de bas-fond permanente de la zone, alors que des affleurements localisés et temporaires peuvent se produire en saison des pluies dans les bassins élémentaires aux stades d'évolution III, II et même I (cas du bassin C).

Le bassin considéré dans son ensemble est très favorable aux écoulements de crue, puisque les zones au comportement imperméable occupent 75% du bassin, à savoir 7,4% de nappes affleurantes, 54,5% de sols à DSL, et arbitrairement la moitié des surfaces du stade II, soit 13,5%.

2.2.4.2 La couverture végétale

En 1981, la couverture forestière sur le bassin versant était pratiquement intacte, à l'exception des 4 bassins versants expérimentaux défrichés en 1979 et 1980 (A, C, D et E), des 4 clairières où sont assurées les mesures de pluie, de la zone d'emprise de la piste de St. Elie qui traverse ce bassin versant dans le sens de sa plus grande longueur, et d'une zone d'emprunt de matériaux pour la construction de la piste. L'ensemble de ces défrichements couvrait environ 25 ha, c'est à dire 5% du bassin. On peut donc considérer que les observations ont porté sur un bassin recouvert de forêt pendant cette année 1981.

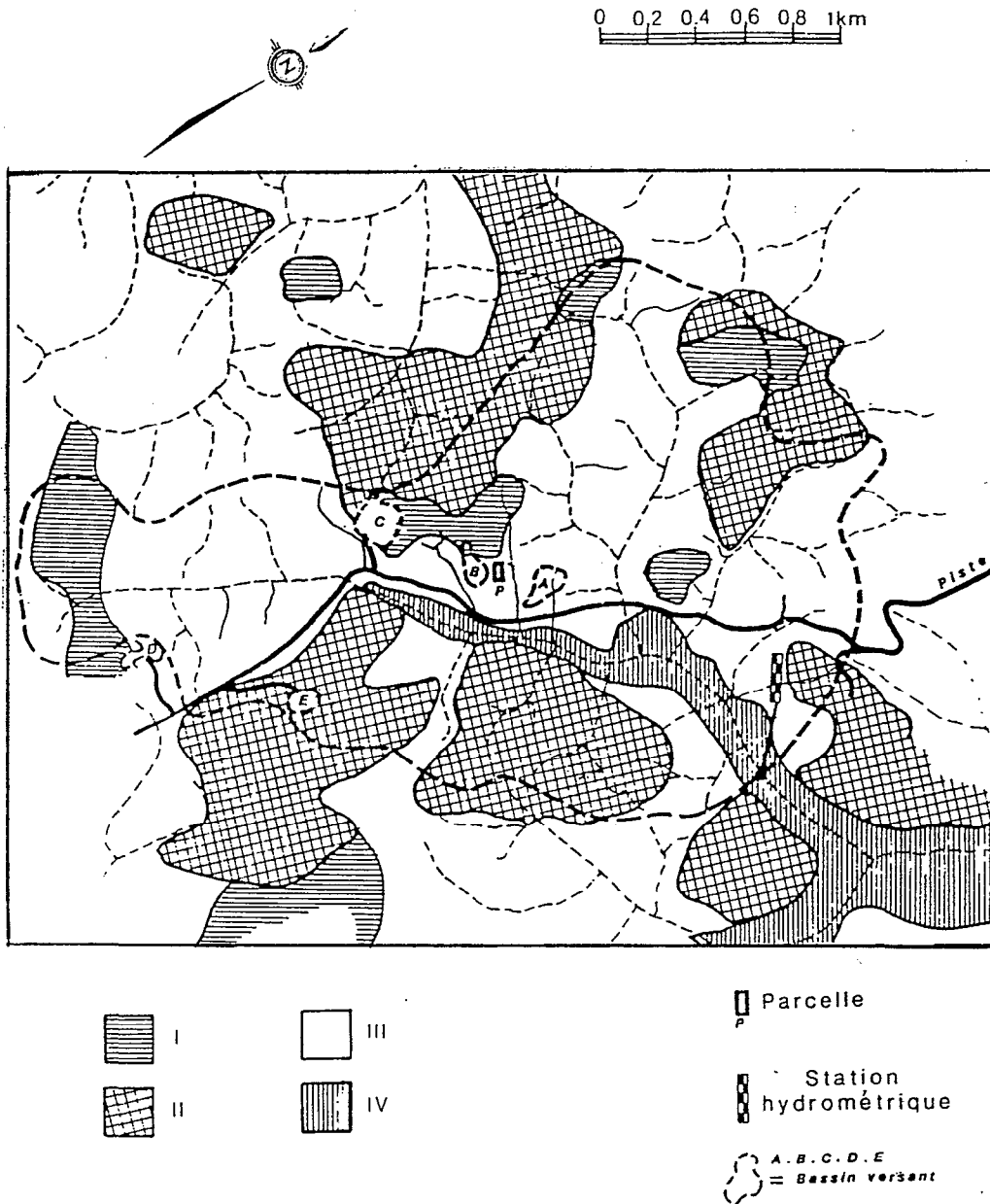


Figure 2.2.05 : Le bassin versant de la Crique Délices

Extension des différents stades d'évolution pédologique et de la zone de bas-fond. Source : Boulet (1986)

Les zones I, II et III correspondent aux stades d'évolution pédologique. La zone IV correspond à la zone de bas-fond

Tableau 2.2.02 : Répartition des différentes dynamiques de l'eau sur le bassin de la Crique Délices

Valeurs en % de la surface totale du B.V.

Stade I (DVL)	Stade II (intermédiaire)	Stade III (DSL)	Extension de la nappe
12.2%	25.9%	54.5%	7,4%

2.2.4.3 Equipement hydrométrique

La station est équipée d'un limnigraphe à flotteur (réduction au 1/5), avec inscription sur un tambour à rotation hebdomadaire.

Les jaugeages de basses eaux ont été faits à gué, au micro-moulinet. Une passerelle a été jetée en travers du lit mineur (largeur 10 m) pour permettre les jaugeages au moulinet sur perche mobile en eaux moyennes. 24 jaugeages ont été effectués entre les cotes 25 cm et 121 cm.

Les conditions hydrauliques des sites de bas-fonds sont sévères pour l'hydrométriste :

Avec un zéro d'écoulement à la cote 15 cm, l'étalonnage en eaux moyennes est satisfaisant jusqu'à la cote 124. Au dessus de cette limite, des débordements se produisent, surtout en rive droite et la largeur du lit qui est de 12 mètres passe à 110 m à la cote 135. Cette cote 135 a été atteinte ou dépassée pendant 8 crues entre 1981 et 1983.

En très basses eaux, la situation n'est pas meilleure : bien que les vitesses soient faibles, le chenal est instable, car les sédiments du fond composés de micas provenant de l'altération des filons de pegmatites, sont très mobiles. L'étalonnage de basses eaux est mouvant et susceptible de changer après chaque crue.... et celles-ci sont très fréquentes !

Pendant l'année 1981, les débordements ont été limités : le niveau s'est maintenu moins de 12 heures au-dessus de la cote de débordement $H=124$. Par ailleurs, on a mentionné plus haut que la couverture végétale n'était encore que faiblement perturbée cette année-là. Les résultats hydrologiques de la Crique Délices en 1981 représentent donc, avec la meilleure précision possible, une intégration globale du comportement hydrologique de la zone.

2.2.4.4 Traitement de base des données hydrologiques

La pluie moyenne sur ce bassin versant a été calculée par la méthode de Thiessen, à partir des relevés pluviométriques faits dans les clairières des bassins élémentaires imbriqués (A, B, C, E) ou très proches (D, I, J).

Les limnigrammes ont été dépouillés à la main, avec un pas de temps fixe en étiage (4 lectures par jour) et avec un pas variable en période de crue. La courbe d'étalonnage a été extrapolée à partir des relevés topographiques du site selon la méthode "vitesse moyenne-section mouillée".



Déversoir en V à 30° , à l'aval de la fosse à sédiments (bassin A)



Déversoir H Flume (bassin F)



La Crique Délices (surface drainée 4,5 km²)



Zone de bas-fond avec nappe phréatique affleurante

2.3 LA SEPARATION DES ECOULEMENTS SUR L'HYDROGRAMME

Marius : "... Mais ça fait quatre tiers - et dans un verre il n'y a que trois tiers. "

César : "Pauvre crétin !, ça dépend de la grandeur des tiers. "

(d'après M. Pagnol)

L'étape préliminaire d'une étude d'hydrologie analytique consiste généralement à créer des événements hydrologiques discrétisés, qui doivent être extraits de la chronique temporelle continue des débits, puis à définir et à calculer des paramètres caractéristiques de ces événements qui pourront être manipulés par des techniques d'analyse numérique ou d'interprétation graphique.

Les ambitions de cette approche événementielle se situent à deux niveaux, étroitement imbriqués :

- l'identification dans les portions d'hydrogramme ainsi définies des différents types d'écoulements précédemment décrits (Cf. 2.1), en fonction de leur mécanisme de production, de leur zone d'origine sur le bassin versant, de leur cheminement ou de leur vitesse de propagation ;
- l'individualisation d'événements élémentaires pour lesquels on puisse établir une relation significative de cause à effet entre une certaine quantité de pluie et l'écoulement.

Pour satisfaire au deuxième objectif, le processus utilisé doit mettre en rapport de la façon la moins ambiguë possible une portion d'hydrogramme de durée T1 avec une quantité de pluie tombée pendant un intervalle T2, qui puisse être considérée comme la cause directe et dominante des débits écoulés dans l'intervalle T1. Selon la terminologie généralement en usage, ces événements élémentaires sur petits bassins versants sont appelés "événements averse-crue" ou "crues".

Cet acte préliminaire de la démarche hydrologique, n'est pas anodin. Il intègre toute la problématique de la Science de l'Eau (la production et le transfert) et il est porteur de tous les concepts de l'opérateur en matière hydrologique, parfois à son insu. Il faudrait connaître la nature exacte des différents écoulements générés sur le bassin considéré pendant l'intervalle T1, les chemins empruntés par chacun d'eux pour atteindre l'exutoire et le temps de parcours dans ces cheminements, pour déterminer avec certitude les instants de début et de fin de l'intervalle pluviométrique T2. Ceci suppose d'avoir atteint le stade ultime et improbable de la connaissance hydrologique du bassin versant considéré, alors que la séparation des écoulements est l'opération préalable à cette connaissance. Dans ces conditions, les processus de séparation des écoulements peuvent facilement prendre les apparences d'une auberge espagnole de l'Hydrologie où l'on a de fortes chances de trouver seulement ce qu'on y a apporté.

La définition d'événements "averse-crue" au stade préliminaire de l'étude est particulièrement délicate dans les climats humides et l'hydrologue est placé devant l'alternative de vouloir extraire à tout prix des événements élémentaires dans une succession de crues très rapprochées, pour lesquelles la détermination de la pluie génératrice serait douteuse, et à une solution de facilité qui consisterait à créer des événements déliés de toute ambiguïté sur l'origine des précipitations, mais dont la durée et la complexité pourraient masquer les mécanismes de production de l'écoulement et stériliser définitivement toute recherche analytique sur l'échantillon de données ainsi constitué.

Le stade de sécurité ultime de cette démarche est atteint avec le concept d'année hydrologique, dont l'une des finalités est de pouvoir associer de façon indiscutable un volume écoulé avec une pluie génératrice correspondante.

Parce que les problèmes de l'individualisation d'une crue et de la décomposition des écoulements dépendent de la taille du bassin versant et de la zone climatique, des objectifs de l'étude et de l'école hydrologique de l'opérateur, les méthodes d'individualisation des crues et de séparation des écoulements sont presque aussi nombreuses que les hydrologues qui se sont trouvés confrontés avec cette problématique.

Des procédures graphiques, géochimiques, isotopiques ou numériques sont utilisées pour réaliser cette séparation des écoulements. Ces techniques de séparation sont d'autant plus difficiles à mettre en oeuvre de façon opérationnelle qu'elles tentent de serrer de plus près la réalité physique des phénomènes étudiés.

2.3.1 METHODES ANALYTIQUES OU GRAPHIQUES

Les méthodes analytiques ou graphiques sont le plus fréquemment utilisées, et l'élément déterminant de ce succès tient sans aucun doute au fait que leur mise en oeuvre ne requiert pas d'autre information que la chronique des débits instantanés.

Le premier postulat implicite de cette filière est qu'à partir d'une analyse de forme de l'hydrogramme, il est possible de déterminer l'instant de la décrue où le débit n'est plus constitué que par de l'écoulement de base.

Le second principe est d'admettre que l'on puisse alors représenter de façon acceptable la variation de cet écoulement de base, entre les points de début et de fin de crue, au moyen d'une fonction analytique, linéaire ou curviligne.

Les analyses de forme de l'hydrogramme suscitent souvent des propos désabusés chez ceux-là même qui - nécessité faisant Loi - les proposent, et leur scepticisme est proportionnel à la précision et à la finesse de leurs descriptions des mécanismes de production et de transfert des écoulements. " ... *il est douteux qu'une technique graphique quelconque puisse permettre d'isoler les composantes de l'écoulement ainsi défini ...*" (Hewlett et Hibbert, 1967).

On peut sérier les méthodes de séparation à partir des objectifs et de la personnalité de ses promoteurs, et sans prétendre être exhaustif, reconnaître quelques typologies de séparation bien caractérisées :

Traditionnelle :

La plupart des procédés s'attachent à rechercher des ruptures de pente dans une figuration de la courbe de décrue en coordonnées semi-logarithmiques : trois segments de droite s'individualisent pendant la décrue, qui marquent les périodes de contribution du ruissellement, de l'écoulement dit hypodermique et du débit de base (Roche, 1963 - figure 2.3.01). En Guyane Française, ces trois phases auraient été observées sous forêt primaire sur petits bassins versants en zone granitique (Hoepffner, 1974), tandis que sur altérites de schistes, seule une séparation très malaisée entre débit de base et autres types d'écoulements a pu être envisagée

(Hoorelbeck, 1972), (Anonyme-ORSTOM, 1963).

Subtile :

Le procédé peut faire largement appel au "sens hydrologique" de l'opérateur : ainsi, selon Rodier, (1985) cité par Chevallier et al., (1985), en Afrique Sahélienne, *"la séparation du ruissellement pur et de l'écoulement retardé s'obtient en définissant l'arrêt du ruissellement par la première cassure de la courbe de décrue en ordonnées logarithmiques. On ajoute alors 20% au temps de base ainsi obtenu, mais on contrôle que le débit d'écoulement ne dépasse pas quelques centaines de $l.s^{-1}.km^{-2}$, chiffre en rapport avec la rugosité et la perméabilité du bassin. Si la durée du corps d'averse est nettement supérieure à la moitié du temps de montée et s'il n'y a pas de traîne, on réduit le temps de base T_b de la durée du corps d'averse ayant ruisselé, diminuée de la moitié du temps de montée T_m ".*

Systématique :

Par opposition avec l'approche précédente, et ayant admis avec résignation que cette recherche analytique était par nature imparfaite et conventionnelle, mais constituait un préalable indispensable à toute manipulation des données, certains hydrologues se sont attachés à définir des méthodes privilégiant l'indépendance par rapport à l'opérateur et la possibilité d'automatisation du procédé, plutôt que sa réalité physique, au risque de perdre de l'information par rapport à l'approche de "l'expert".

Hewlett et Hibbert, (1967) admettent que le débit de base augmente linéairement à partir du début de la crue, avec une pente constante (égale à $33 l.min^{-1}.km^{-2}.heure^{-1}$) invariante dans le temps et dans l'espace, et fixent la fin de la crue à l'instant où cette droite des débits de base recoupe la partie descendante de l'hydrogramme (figure 2.3.02). Le volume écoulé est ainsi partagé en deux parties appelées "*Stormflow* ou *Quickflow*", traduit par Ecoulement Rapide de Crue - ERC (Cosandey, 1986 - figure 2.303) et *Delayed Flow* (Ecoulement Différé). Ce dernier terme comprend l'écoulement de base assuré par la vidange des nappes phréatiques, ainsi qu'une partie retardée de l'écoulement latéral, alors que l'ERC englobe tous les autres mécanismes précédemment identifiés (quand ils existent dans l'hydrogramme considéré), tels que les Précipitations Directes sur Zones Saturées, ou l'Exfiltration.

En ajoutant des critères supplémentaires destinés à lever des indéterminations qui apparaissent pendant des situations hydrologiques complexes (crues trop longues), la méthode est facilement justiciable du calcul automatique et son application systématique a été faite par les auteurs sur les relevés de 24 bassins versants représentatifs ou expérimentaux de l'Est des Etats-Unis, soit plus de 200 stations-années d'observations, puis sur ceux de 8 bassins en Afrique du Sud (Hewlett et Bosch, 1984) sur lesquels ce calcul a individualisé 1546 crues de plus de 20 mm. D'autres auteurs, tels Pearce et Mc. Kerchnar (1979) ou Hornbeck (1973), ont également utilisé ce procédé.

Dans cette recherche de l'automatisation, une démarche connexe a été proposée pour la définition objective d'un "hydrogramme standard" (Roche, 1967), qui est une approximation analytique de l'hydrogramme réel, selon laquelle la partie montante est représentée par une droite et la partie descendante par une fonction exponentielle décroissante. En considérant la figuration logarithmique de la partie descendante de l'hydrogramme, la date de fin du ruissellement est prise à l'intersection des droites épousant respectivement les zones correspondant à "*la décrue franche et au tarissement vrai*", ce point pouvant ne pas se situer sur

l'hydrogramme observé (il se situe en général "à l'intérieur" de celui-ci). Moyennant l'introduction d'un paramètre de calage propre au bassin versant, la méthode peut être automatisée (Moniod, 1969) ; toutefois ses objectifs sont avant tout l'individualisation objective et automatique d'un opérateur de transformation pluie-débit du bassin versant (recherche de l'hydrogramme-type), plutôt que l'établissement précis des bilans d'écoulement puisque ce procédé déforme légèrement l'hydrogramme observé. Il se situe donc en dehors des limites de nos préoccupations.

Toutes choses étant égales par ailleurs, il a été constaté que le point de fin de crue était toujours plus facile à situer sur des hydrogrammes enregistrés à l'exutoire de bassins versants compacts que sur ceux provenant de bassins allongés (Rodier, 1976 ; Dupraz, 1984).

Recherchée :

Dans les méthodes où la date de fin de crue et la forme de l'hydrogramme des débits de base sont déterminées de façon indépendante, la variation des débits de base pendant la crue est le plus souvent supposée linéaire. Mais après avoir fixé le point de fin par l'étude de la courbe de décrue, Dupraz (1984) avait opté pour une variation de ces débits de base selon une loi polynomiale de degré 3, tangente à l'hydrogramme aux points début et fin de crue, en minimisant les courbures par l'utilisation des fonctions splines (figure 2.03.04). L'avantage est que l'on reproduit ainsi une véritable crue de l'écoulement non-rapide dont la pointe est plus tardive que celle de l'ERC et l'auteur a vérifié que les volumes de crues calculés à partir de cette technique sont beaucoup moins sensibles à la position du point de fin de crue qu'avec l'interpolation linéaire.

Révolutionnaire :

Lambert (1968) a proposé un *hydrogramme nouveau*, découpé en tranches verticales (figure 2.3.06) qui permet d'individualiser des étapes caractéristiques du fonctionnement d'un bassin versant en crue ainsi que les volumes qui s'y rapportent à savoir : temps de rétention, temps de saturation, temps de ruissellement direct de montée, temps de ruissellement direct de décrue, temps de ressuyage, temps de tarissement.

Audacieuse :

A propos de l'étude des crues du bassin versant du Ringelbach (0,36 km²), Humbert (1985) renouant avec l'inspiration de l'hydrogramme nouveau, fait l'hypothèse suivante : "... On sait que le temps de réponse du bassin est extrêmement bref (entre 15 mn et 1 heure environ). De même, dès que les pluies ont pris fin, on observe une décroissance quasi-immédiate des débits. Ainsi, partant du fait qu'il s'agit d'un système à inertie très faible, on est tenté de faire l'hypothèse suivante : la portion située sous la seule courbe de montée de l'hydrogramme, et au dessus du débit de base (QB), est représentative d'un écoulement rapide de crue (figure 2.3.05). La partie enveloppée par la courbe de décrue (et au dessus de QB) constituerait alors un écoulement de ressuyage plus ou moins lent des formations de surface. La limite verticale de la figure 2.3.05 marque donc la fin du ruissellement direct des pluies sur les zones saturées, mais il est clair que la plage ainsi définie n'est pas le résultat de ce seul processus.....").

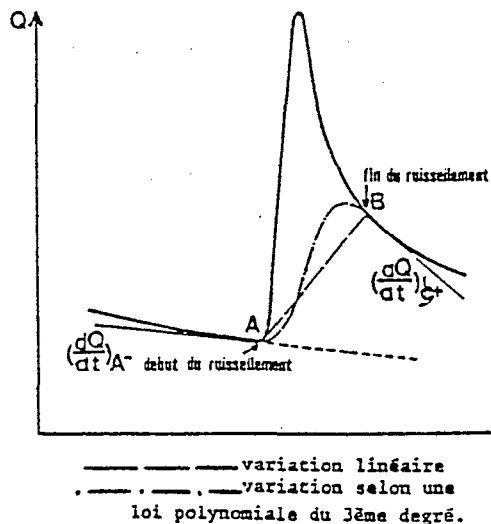


Figure 2.3.04 :
Séparation selon Dupraz (1984)

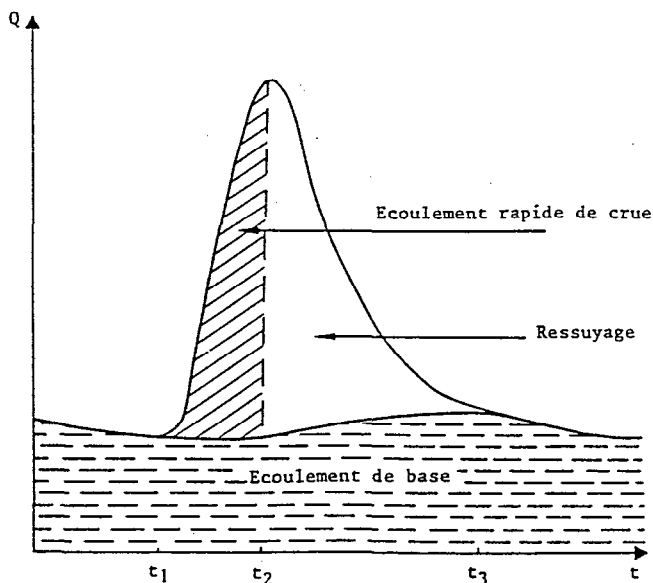


schéma de découpage des crues (Bassin du Ringelbach)

Figure 2.3.05 :
Séparation selon Humbert (1985)

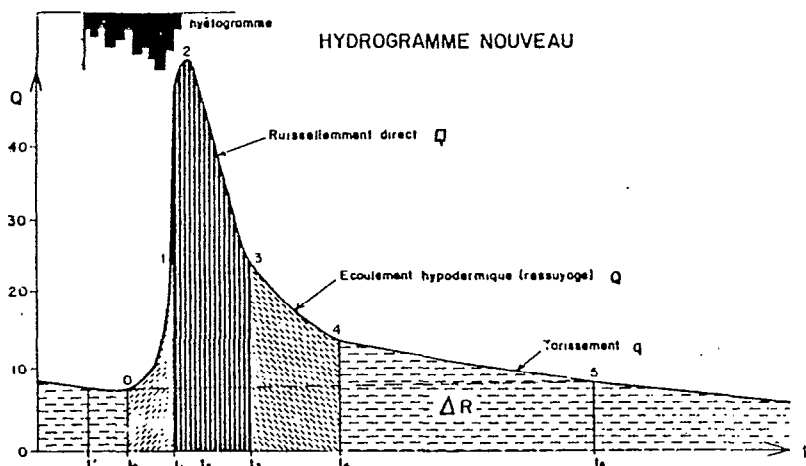
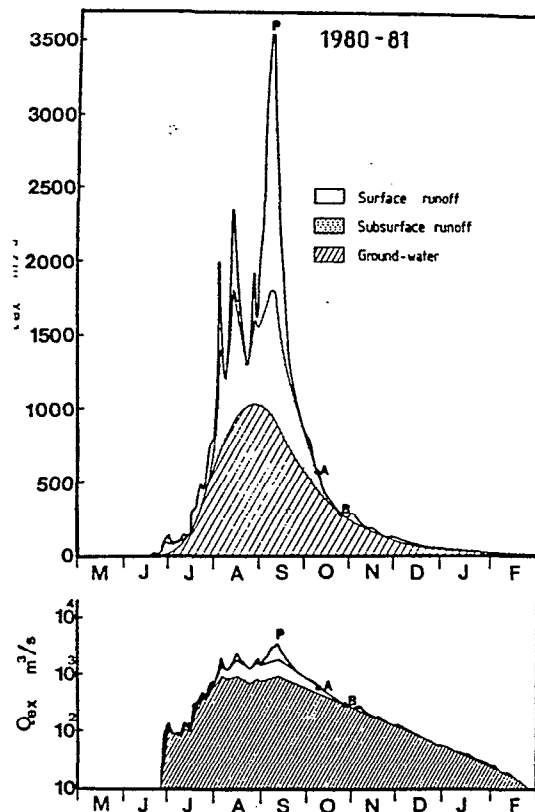


Fig. 8. — Séparation des différentes composantes de l'hydrogramme.

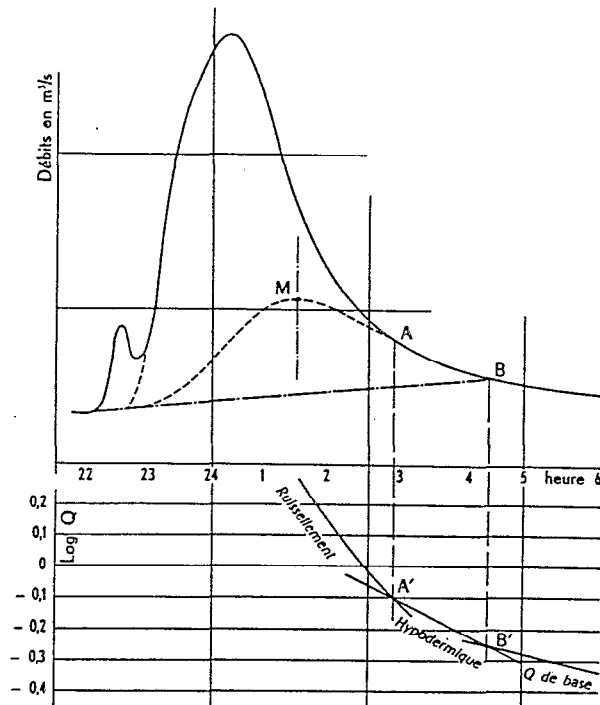
$t' - t_0$ = temps de rétention
 $t_0 - t_1$ = temps de saturation
 $t_1 - t_2$ = temps de ruissellement direct de montée de crue
 $t_2 - t_3$ = temps de ruissellement direct de décrue
 $t_3 - t_4$ = temps de ressuyage
 $t_4 - t_5$ = temps de tarissement
 $\Delta R(t_5 - t_4)$: recharge des nappes pendant $t_5 - t_4$

Figure 2.3.06 :
Séparation selon Lambert (1968)



Le Sénégal à Bakel

Figure 2.3.07 :
Séparation selon Kattan et al.(1987)



Séparation des Écoulements

Figure 2.3.01 :
Séparation selon Roche (1963)

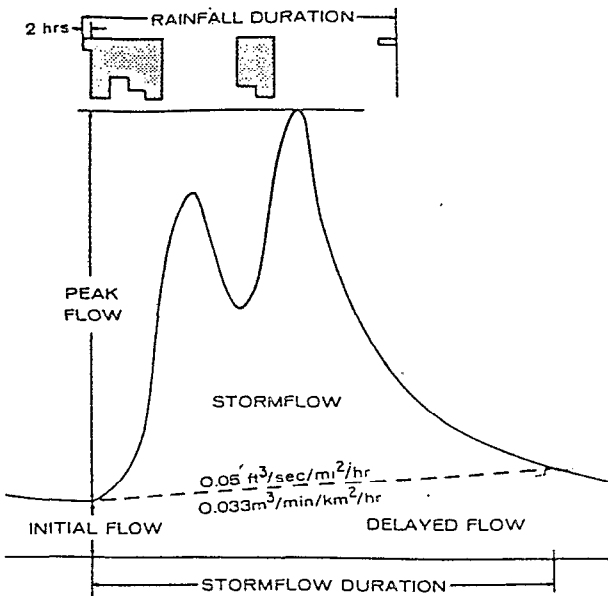


Figure 2.3.02 :
Séparation selon Hewlett et Hibbert (1967)

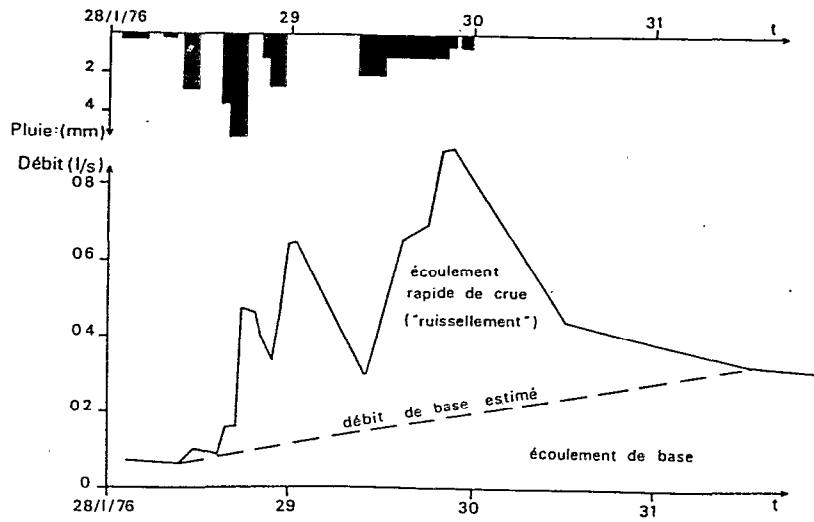


Figure 2.3.03 :
Séparation selon Cosandey (1986)

Incantatoire

Le problème de la séparation des écoulements est un concept d'hydrologie analytique associé à la problématique des fonctions de production. C'est une quête scientifique discutable, mais dont la finalité conserve un certain sens tant que la production est le phénomène causal dominant des écoulements dans le ruisseau ou dans la rivière. En changeant d'échelle vers des objets de plus grande dimension, sur lesquels le processus dominant est le transfert, une tentative de séparation des écoulements ne serait plus qu'une démarche rituelle, vidée de toute signification hydrologique. Néanmoins, le procédé est parfois utilisé sur de très grands bassins versants, comme le Sénégal à Bakel (218 000 km²). Ainsi, après séparation par la variante "traditionnelle" sur l'hydrogramme annuel, Kattan et al., (1987) peuvent affirmer que l'écoulement de surface est de $1,45.10^9$ m³, l'écoulement de sub-surface (*sic*) de $2,11.10^9$ m³ et l'écoulement de base de $6,84.10^9$ m³ (valeurs moyennes annuelles - figure 2.3.07).

2.3.2 METHODES ISOTOPIQUES OU HYDROCHIMIQUES

Par opposition aux méthodes graphiques ou analytiques qui ne sont que la matérialisation d'un concept, les procédés de séparation par analyses comparées de la composition isotopique ou hydrochimique des eaux de pluie, de nappe, du sol et de la rivière, constituent une véritable démarche expérimentale, étayée par l'échantillonnage du milieu étudié et par des résultats d'analyse en laboratoire (Fontes, 1976). A ce titre, les résultats obtenus par cette filière méritent d'être considérés avec beaucoup d'attention.

L'expérimentation de Sklash et al. (1986), déjà citée, a montré que l'écoulement par Saturation Superficielle constituait le mécanisme de production dominant des crues d'un bassin de 3.8 ha, et que l'écoulement Rapide était essentiellement composé d'"eau ancienne" déplacée par effet piston, l'eau de l'averse génératrice n'ayant jamais représenté plus de 25% des volumes à l'exutoire, pour les 4 crues individuelles étudiées (figure 2.3.08). Cependant, pas moins de 1200 échantillons d'eau provenant des pluies, des écoulements de talweg, du sol et des nappes phréatiques ont été nécessaires pour étayer ces conclusions. L'importance de l'effort à consentir détermine de fait les possibilités d'utilisation de ces méthodes en mode opérationnel.

L'approche hydrochimique, utilisant l'évolution de la concentration d'éléments dissous comme par exemple le chlore, ou le suivi d'un indicateur hydrochimique global comme la conductivité, est plus facile à mettre en oeuvre que l'approche isotopique, mais les performances de ces procédés sont généralement dégradées par le fait que le flux de ces traceurs chimiques n'est pas conservatif entre l'instant où l'eau précipitée atteint le sol et celui où elle est recueillie à l'exutoire.

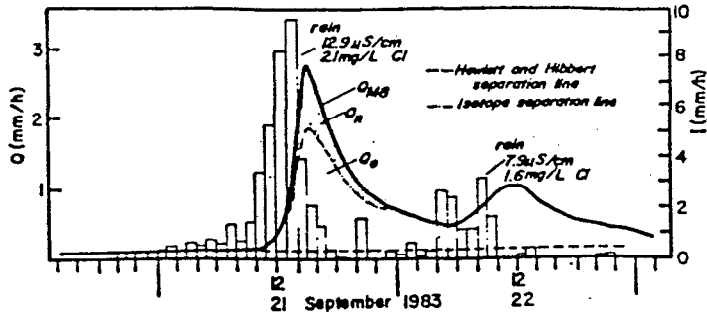
En effet, l'activité géochimique dans les sols peut produire des variations dans la composition chimique des eaux pendant leur transit dans le bassin versant, que ce soit par fixation ou par production de l'élément chimique utilisé comme traceur. Néanmoins, une grande variété de méthodes ont été utilisées pour exploiter, parfois avec succès, les possibilités de l'hydrochimie pour la séparation des écoulements.

Dans une forêt tropicale humide de Java, Bruijnzeel (1983) a utilisé un traceur naturel - la silice - pratiquement inexistant dans l'eau de pluie, dont les variations de concentration pendant quelques crues densément échantillonnées, ont été utilisées pour déterminer l'allure de l'hydrogramme des débits de base à partir de l'hydrogramme total observé. Pour mener à bien cette séparation, il faut toutefois se fixer une valeur de référence pour la concentration en silice dans l'écoulement rapide. L'auteur a procédé à la séparation avec deux valeurs plausibles de cette concentration : 3,2 mg.l⁻¹ et 5,3 mg.l⁻¹ (figure 2.3.09). La mise en oeuvre de ce procédé sur un bassin quelconque implique d'avoir réglé au préalable le problème de l'origine dominante de l'écoulement Rapide de Crue : eau "ancienne", d'origine hypodermique restée en contact prolongé avec le sol, et qui serait relativement chargée en silice ou eau "récente" de ruissellement qui serait plus légère en silice

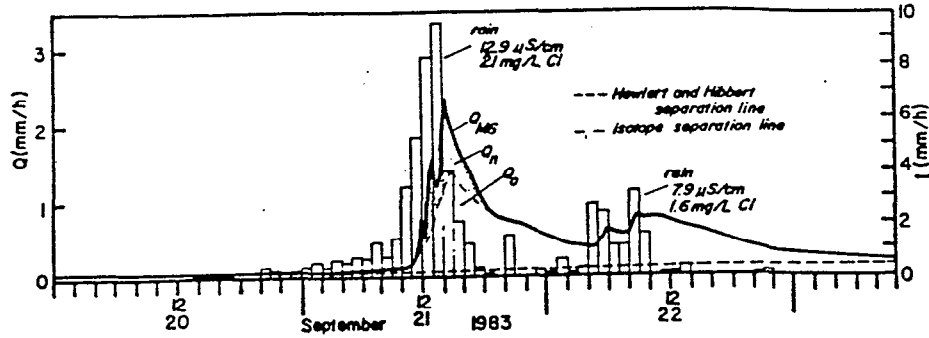
Toutes les méthodes de séparation isotopiques ou hydrochimiques convergent vers un résultat commun : **elles individualisent des "hydrogrammes souterrains" constitués d'eau ayant séjourné un certain temps dans le sol ou les nappes (et donc plus ancienne que l'eau de l'averse génératrice), qui sont TOUJOURS nettement plus abondants que ceux que l'on peut obtenir par séparation linéaire des hydrogrammes entre écoulement rapide et écoulement de base ou différé.** Ceci est vrai en particulier pour les références sélectionnées : Bruijnzeel (1983), (figure 2.3.09) ; Crouzet et al. (1970), (figures 2.3.10) ; Mérot et al. (1981), (figure 2.3.11) ; Blavoux et Mudry (1988), (figure 2.3.12). La confrontation des résultats de la séparation par les différentes méthodes isotopiques et hydrochimiques et par la méthode graphique sur le bassin versant du Maravant près d'Evian est édifiante à ce point de vue (Blavoux et Mudry (1988), figure 2.3.13).

Ces résultats interpellent très sérieusement la Recherche en hydrologie analytique sur petits bassins versants. Après avoir découvert que la production de l'eau en crue ne provenait pas "simplement" du ruissellement, les hydrologues ont modifié leur vision de l'hydrogramme en substituant à l'interprétation mécaniste de la séparation (le ruissellement de surface), une conception temporelle (*Quickflow* ou Ecoulement Rapide de Crue). Dans le même temps, les tentatives de séparation des écoulements fondées sur des mesures de terrain mettent en évidence que cet écoulement rapide est largement constitué par de l'eau ancienne, antérieure à l'averse génératrice, restée en contact prolongée avec le sol. *Translatory Flow* et Effet Piston sont sérieusement confortés et réduisent la portée du concept d'ERC.

Cette acceptation des chemins de l'eau a des conséquences très importantes si on ne considère pas seulement l'eau des ruisseaux et rivières comme un élément en soi, mais comme le vecteur du déplacement des solutions chimiques naturelles ou apportées par l'homme ou comme l'agent de transport des particules provenant de l'érosion des sols.

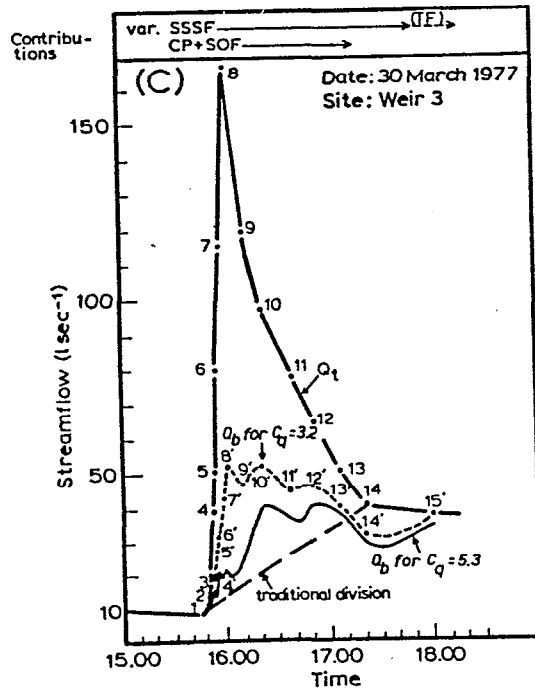


September 21-22, 1983, storm, catchment M8.



September 21-22, 1983, storm, catchment M6.

Figure 2.3.08 :
Séparation selon Sklash et al.(1986)



Variation of streamwater silica concentration with time and discharge and an attempt to separate quickflow from baseflow (storm recorded on 30 March, 1977 at W.3)

Figure 2.3.09 :
Séparation selon Bruijnzeel (1983)

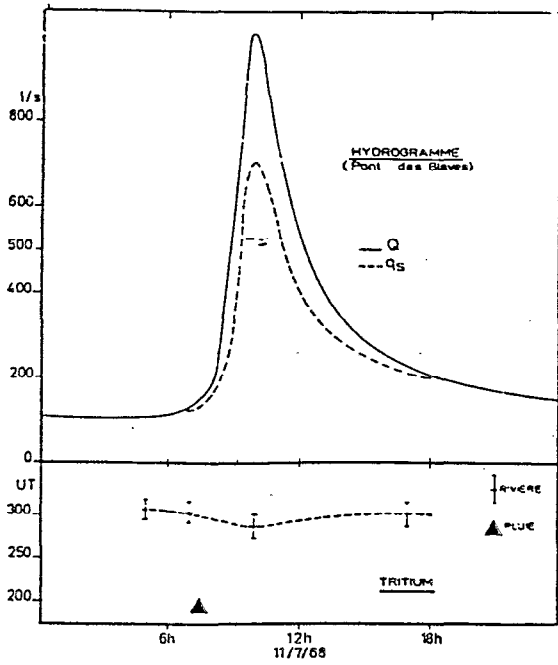
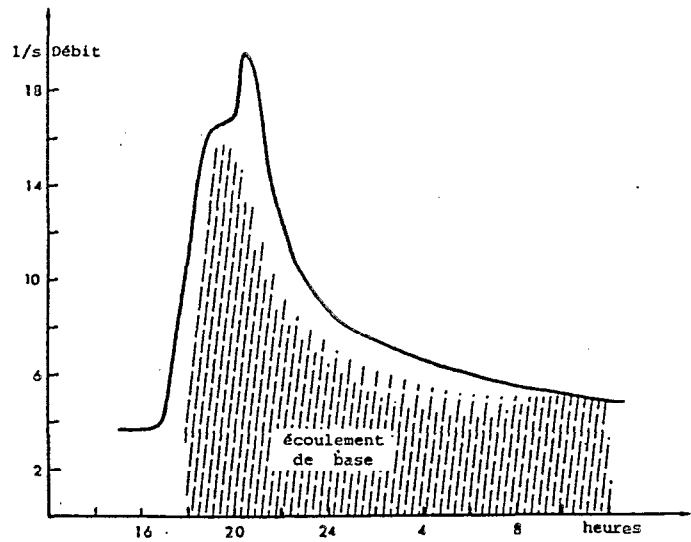
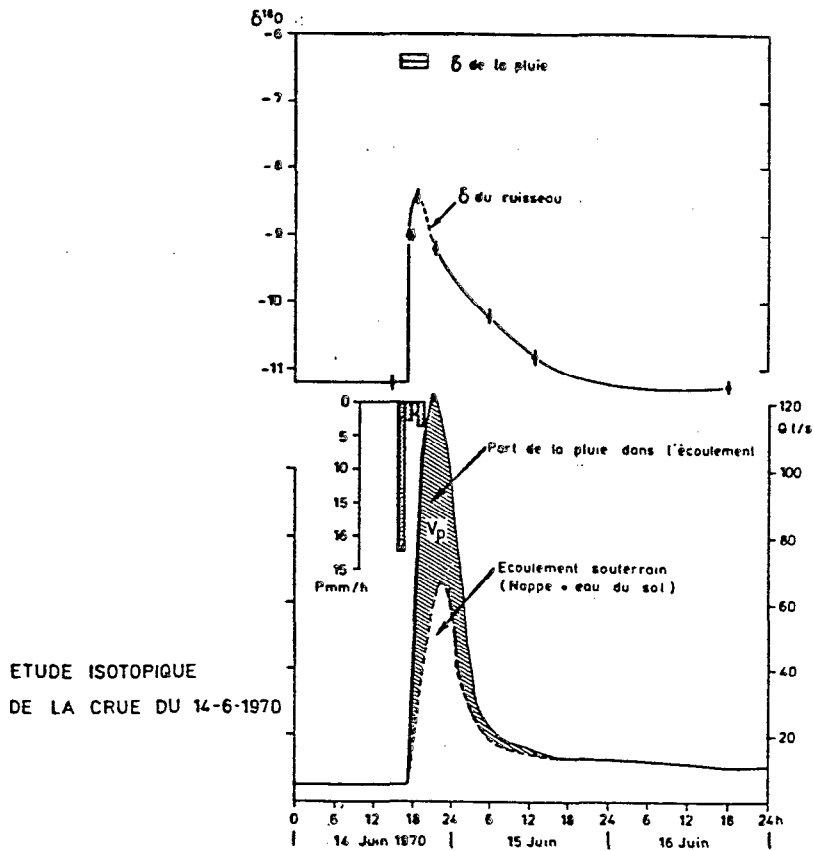


Figure 2.3.10 :
Séparation selon Couzet et al.(1970)



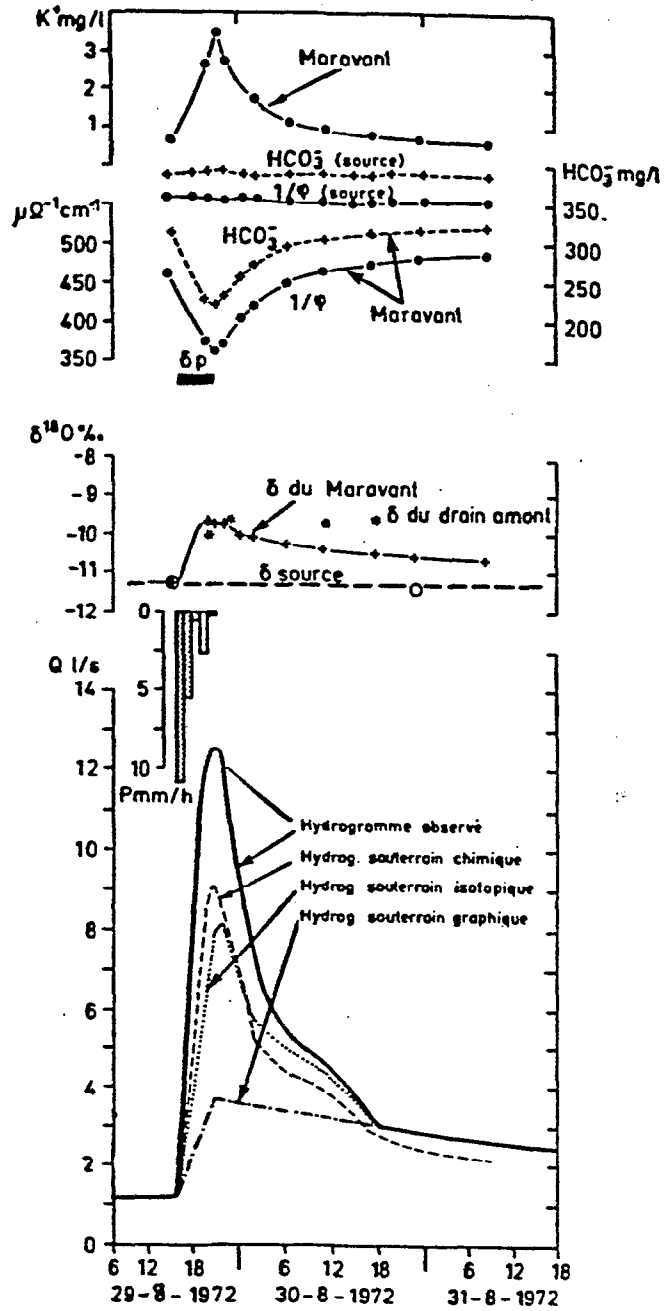
Séparation de l'écoulement de base à partir des données isotopiques.

Figure 2.3.11 :
Séparation selon Mérot et al.(1981)



ETUDE ISOTOPIQUE
DE LA CRUE DU 14-6-1970

Figure 2.3.12 :
Séparation selon Blavoux et Mudry (1988)



COMPARAISON DES HYDROGRAMMES SOUTERRAINS OBTENUS PAR LES METHODES ISOTOPIQUE CHIMIQUE ET GRAPHIQUE

Figure 2.3.13 :
Séparation selon Blavoux et Mudry (1988)

2.3.3 DISCRETISATION DES CRUES ET SEPARATION DES ECOULEMENTS A ECEREX

2.3.3.1 Discrétisation d'événements hydrologiques élémentaires

Dans le cas du programme ECEREX, et compte tenu du grand nombre de crues, dû aux caractéristiques climatiques, à la petite taille des bassins versants et à leur nombre (10 unités), l'individualisation des événements élémentaires se doit de faire appel à un processus opérationnel facile à mettre en oeuvre, qui a été défini de la manière suivante :

Toutes les manifestations d'une quelconque activité hydrologique (montée du limnigramme) ont été *a priori* prises en considération. Dans pratiquement tous les cas, cette phase de montée du plan d'eau est très nette, compte tenu de la très grande sensibilité des déversoirs pour les faibles débits (lames en V à 30 ° ou déversoirs *H Flumes* rehaussés par des petites lames en V). Par exemple, une charge de 2 cm d'eau sur un déversoir en V (très visible avec une réduction des hauteurs de 1/5) correspond à un débit de 0,05 l.s⁻¹. Il y a donc généralement peu d'équivoques pour définir les points "Début" de crue.

Le point de fin de crue a été placé à partir de l'interprétation graphique de la récession en coordonnées semi-logarithmiques, en choisissant la rupture de pente associée au débit le plus faible, lorsque le tarissement s'individualisait sous forme de plusieurs segments de droite.

Ce choix initial, fait à partir de considérations strictement hydrologiques, a ensuite été modulé en fonction de caractéristiques pluviométriques :

L'individualisation automatique des averses sur les fichiers de relevés pluviographiques au pas de temps minimum de 2 minutes a été faite à partir des critères suivants : on appelle averse toute quantité de pluie d'au moins 3 mm, séparée des autres averses par des intensités inférieures à 1 mm.h⁻¹ pendant au moins 60 minutes. Lorsque les périodes d'occurrence des averses ainsi définies empiètent sur plusieurs crues, ou s'il y a doute sur la relation de cause à effet pluie-débit, les crues élémentaires sont regroupées et constituent un seul événement, en général à pointes multiples. Ces crues dont l'analyse hydropluviométrique risque d'être particulièrement délicate, sont stockées dans des fichiers avec une variable-drapeau permettant de les ignorer dans des traitements statistiques pluie-débit, et de les prendre en compte dans l'élaboration des bilans d'écoulement. Dans d'autres cas, on a dû procéder au regroupement inverse, c'est à dire à la sommation de plusieurs averses élémentaires qui sont affectées à une seule crue.

La mise en oeuvre de ces critères a abouti à l'individualisation de 7723 événements "averses-crues" à ECEREX sur la période 77-83, tous bassins et toutes utilisations du sol confondus (tableau 2.3.01).

Les très petites crues sont largement dominantes en nombre : 41% d'entre elles ont un écoulement inférieur ou égal à 1 mm. Les seuils de 2.5, 5 et 10 mm correspondent aux proportions de 58%, 73% et 85% du nombre total des crues (figure 2.3.14).

Tableau 2.3.01 : Classement des crues répertoriées à ECEREX par tranches de hauteur en mm

Ecoulement Total de Crue - Période 1977-1983

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	: Total
<= 1	365	316	628	218	209	347	277	178	361	254	: 3153
1-2.5	143	124	179	104	105	172	153	132	105	116	: 1333
2,5-5	126	97	112	82	71	140	163	170	82	103	: 1146
5,5-7,5	52	58	35	49	40	93	76	80	34	39	: 556
7,5-10	37	15	23	26	21	47	57	74	16	32	: 348
10-15	53	39	24	20	27	63	70	76	22	38	: 432
15-20	28	24	11	20	9	37	32	39	11	23	: 234
20-25	24	10	4	10	6	18	22	20	11	14	: 139
25-30	14	6	4	8	3	16	24	30	2	10	: 117
30-40	11	11	4	4	4	18	24	24	3	15	: 118
40-50	12	3	4	4	3	13	12	15	2	5	: 73
50-60	5	1	1	2	0	3	7	7	1	2	: 29
60-70	1	2	1	1	0	1	1	3	1	0	: 11
70-80	2	3	0	1	0	1	1	0	0	3	: 11
80-90	2	1	0	0	0	1	0	0	0	0	: 4
< 90-100	2	0	0	0	0	0	1	0	0	1	: 4
>100	2	1	0	0	0	3	4	5	0	0	: 15
Total	879	711	1030	549	498	973	924	853	651	655	: 7723

Tableau 2.3.02 : Pourcentages cumulés de l'Ecoulement Total de Crue par tranches de hauteurs des crues.

Valeurs en mm - Période 1977-1983

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
<= 1	2.7	3.5	9.2	3.1	4.2	2.5	1.8	1.0	6.5	2.5
1-2.5	7.2	9.3	21.3	9.4	13.5	7.2	5.6	4.0	15.2	7.8
2,5-5	15.4	19.0	37.6	20.5	26.9	15.7	14.1	12.1	30.0	17.4
5,5-7,5	21.3	28.9	46.1	31.8	39.8	25.1	20.9	18.7	40.4	23.7
7,5-10	27.1	32.7	54.1	39.8	49.4	31.7	28.1	27.1	47.2	31.0
10-15	38.8	46.3	66.3	48.8	66.8	44.4	40.5	39.5	60.7	43.4
15-20	47.6	58.0	73.9	62.0	75.1	55.0	48.7	48.6	70.0	54.0
20-25	57.3	64.3	77.5	70.0	81.8	61.5	55.8	54.4	82.0	62.3
25-30	64.2	69.0	82.1	78.3	86.2	68.4	65.3	65.2	84.8	69.4
30-40	70.8	79.3	87.8	83.7	93.4	78.6	77.1	76.0	89.6	83.1
40-50	80.1	83.1	95.3	90.4	100.0	87.9	84.6	84.8	94.1	88.9
50-60	84.9	84.8	97.4	94.8	100.0	90.5	90.2	89.9	97.0	91.6
60-70	86.1	88.4	100.0	97.2	100.0	91.6	91.1	92.4	100.0	91.6
70-80	88.7	94.8	100.0	100.0	100.0	92.9	92.2	92.4	100.0	97.5
80-90	91.8	97.1	100.0	100.0	100.0	94.4	92.2	92.4	100.0	97.5
< 90-100	95.2	97.1	100.0	100.0	100.0	94.4	93.5	92.4	100.0	100.0
>100	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

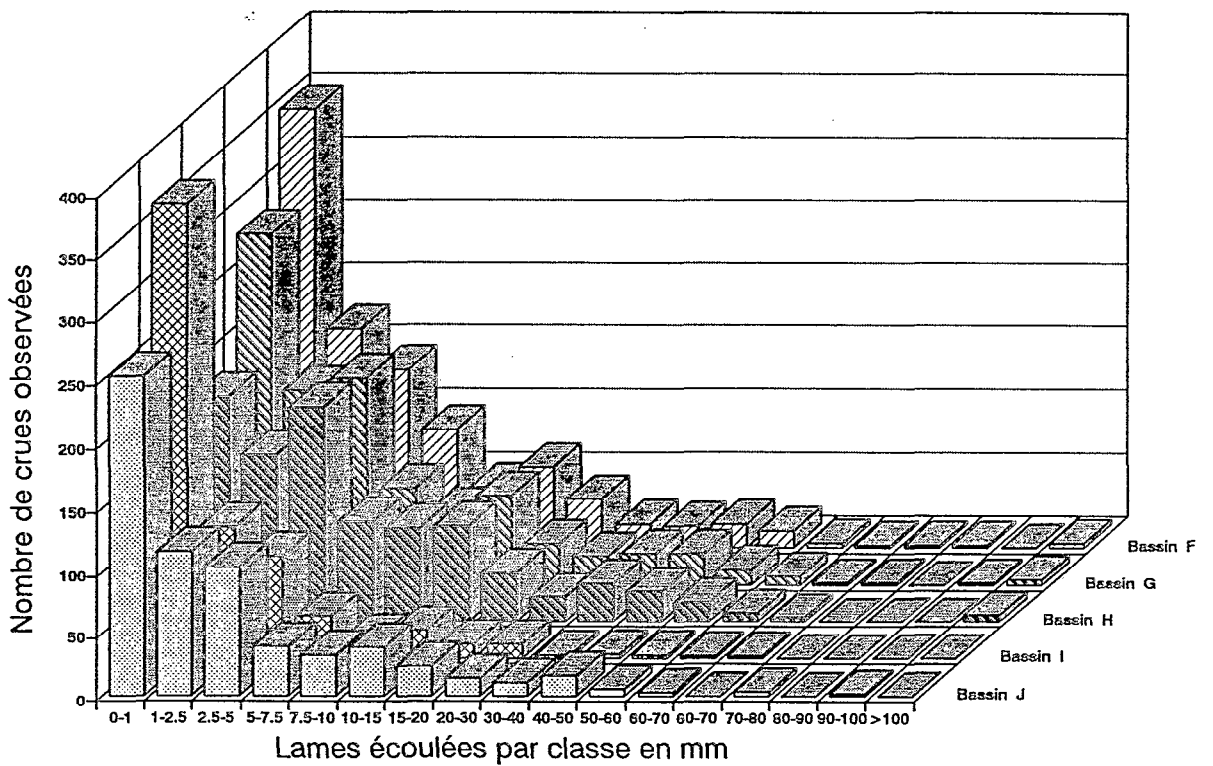
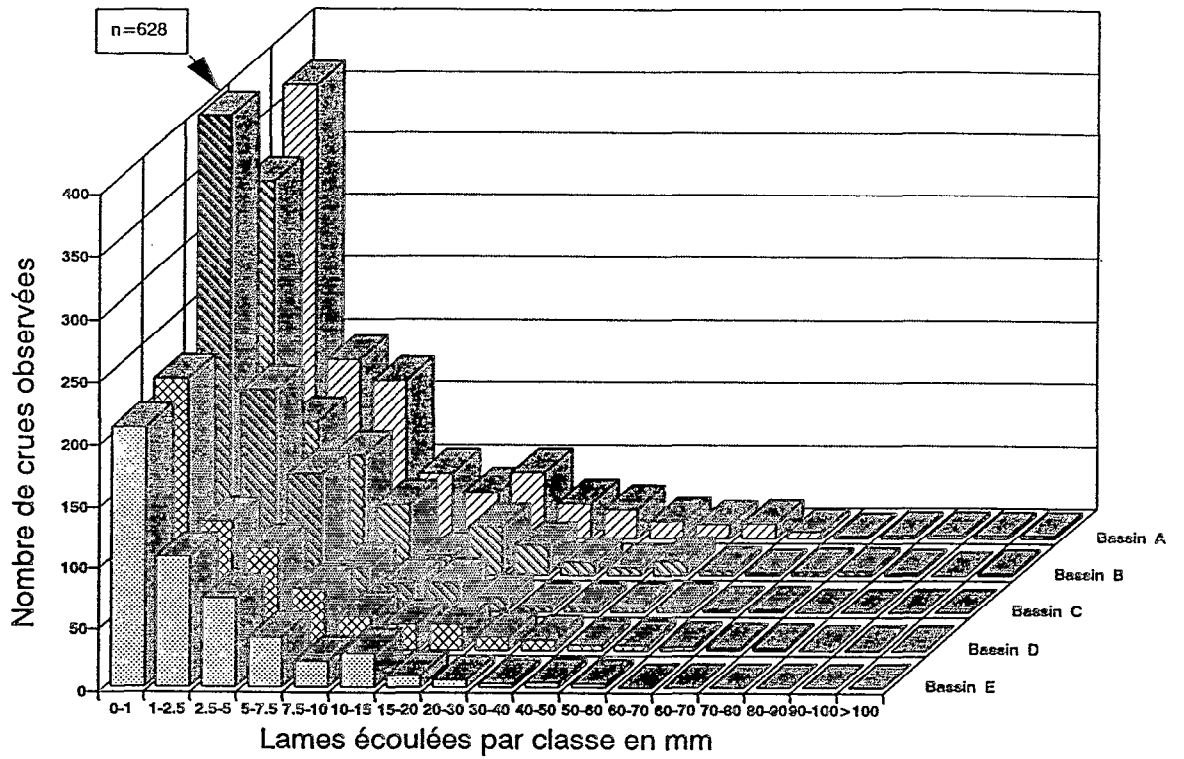


Figure 2.3.14 : Distribution fréquentielle du nombre de crues à ECEREX par tranches de hauteurs (en mm)

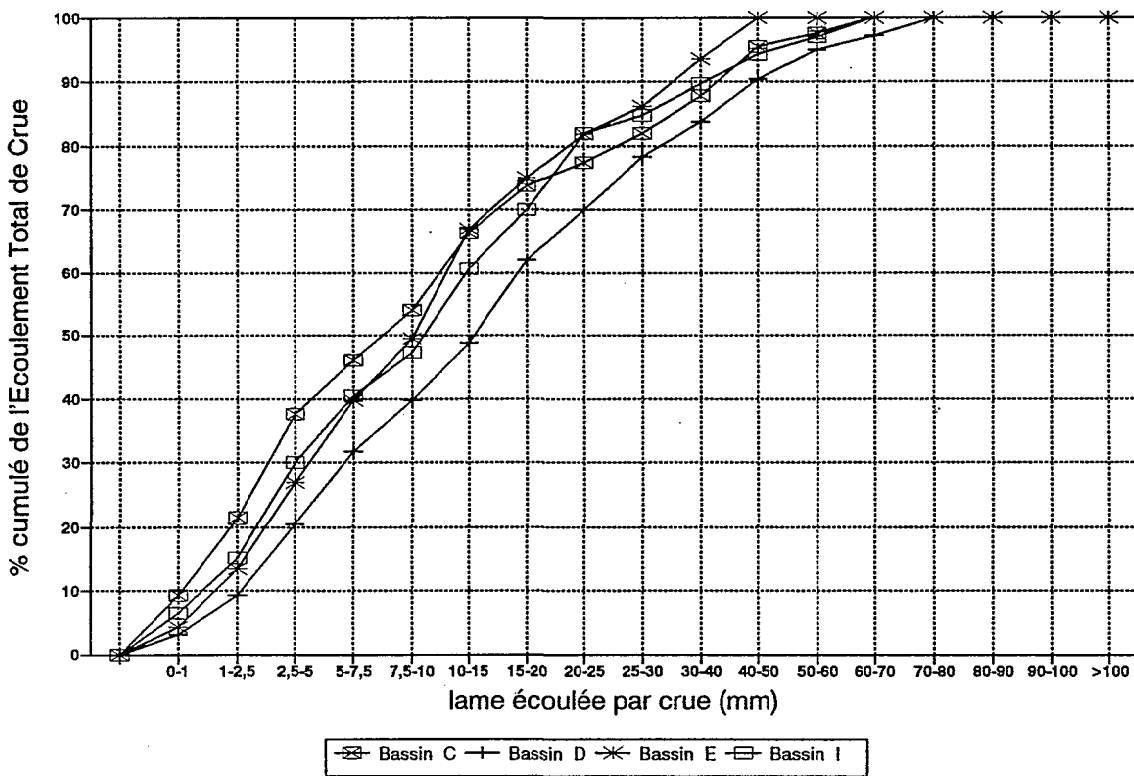
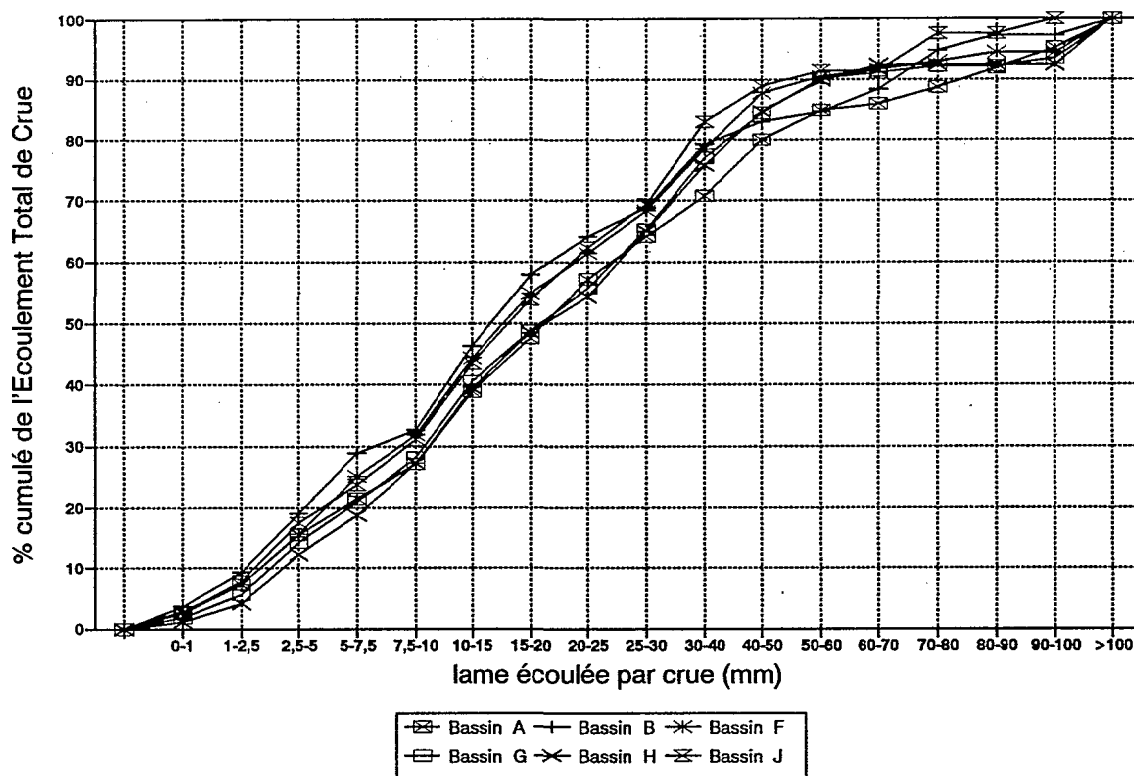


Figure 2.3.15 : Pourcentages cumulés de l'Écoulement Total de Crue par tranches de hauteur des crues (en mm)

Compte tenu de cette forte dissymétrie, la participation de ces faibles crues est loin d'être négligeable dans le volume total des crues et, par exemple, le volume cumulé des crues élémentaires de moins de 5 mm représente de 12% (H) à 19% (B) du total des crues sur les bassins à forts écoulements. Sur les bassins avec des sols à Drainage Vertical Libre, cette proportion volumique des petites crues est encore plus importante et passe de 21% (D) à 38% (C) - (tableau 2.3.02 et figure 2.3.15). Ces chiffres montrent la grande minutie qui doit être apportée à la constitution des fichiers de données de base dans cette étude.

Les événements "averses-crues" ont été numérotés séquentiellement pour chaque année calendaire. Pour faciliter l'analyse statistique, un numéro d'ordre donné se rapporte au même événement sur l'ensemble des 10 bassins. Par suite de cette convention, les numéros de crue d'un rang donné peuvent exister seulement sur certains bassins versants, voire sur un seul d'entre-eux.

2.3.3.2 Séparation des écoulements

Les commentaires inspirés par la compilation de la bibliographie nous ont convaincus, s'il en était besoin, du caractère formel des tentatives de séparation des écoulements et dissuadés de faire oeuvre d'originalité en la matière. Nous avons délibérément opté pour le procédé le plus simple, à savoir la séparation linéaire à partir des points "Début" et "Fin" de crue, avec l'engagement de nous montrer très circonspects sur l'utilisation des deux grandeurs ainsi déterminées.

Pour caractériser les termes du bilan hydrique superficiel, on utilisera la terminologie suivante :

- Ecoulement Total de Crue :

La totalité du volume de l'hydrogramme de crue écoulé entre les instants "Début" et "Fin". C'est une estimation robuste, peu sensible à la position du point de fin de crue.

- Ecoulement Rapide de Crue (ERC) :

Le volume de l'hydrogramme de crue situé "au dessus" de la droite de séparation, selon la terminologie utilisée par Cosandey (1986).

- Ecoulement Différé de Crue :

Le volume d'écoulement non rapide situé "sous" la droite de séparation. Ce terme ne sera pas analysé isolément, mais inclus dans l'écoulement de Base au niveau des bilans mensuels et annuels.

- Ecoulement de Base :

Défini dans son acceptation traditionnelle, comme la somme des écoulements qui se maintiennent hors des périodes de crue et de l'écoulement Différé de Crue.

- Ecoulement Total, ou Ecoulement Superficiel Total :

L'ensemble de l'écoulement superficiel ayant transité sur le déversoir. Ce terme sera considéré à l'échelle mensuelle ou annuelle.

Il était intéressant de comparer *a posteriori* l'échantillon des pentes des droites de séparation des hydrogrammes que nous avons obtenu avec la valeur de LA pente constante préconisée et utilisée par Hewlett et Hibbert (1967).

Ce test a été fait sur les fichiers de caractéristiques de crues du bassin B, en forêt naturelle sur la période 1977-83. En ignorant les quelques crues à pente de séparation négative, on obtient une répartition des pentes très dissymétrique avec des valeurs entre 0 et $15.10^{-3} \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}.\text{min}^{-1}$, avec un mode bien caractérisé à $1,12.10^{-3}$ et une médiane très voisine de $0,96.10^{-3}$ (figure 2.3.16). Exprimée dans les mêmes unités ($\text{m}^3.\text{min}^{-1}.\text{km}^{-2}.\text{heure}^{-1}$) et compte tenu de la surface du bassin versant (1,6 ha), la valeur de cette médiane vaut 0,25 à comparer à la valeur 0,033 de la pente constante utilisée par Hewlett.

La méthode de séparation utilisée à ECEREX aboutit donc à des pentes en moyenne 7,6 fois plus fortes que celles utilisées par Hewlett et Hibbert. Il faut sans doute y voir la manifestation d'un phénomène d'échelle, mais on peut toutefois considérer que la méthode anglo-saxonne favorise une proportion élevée des volumes d'écoulement Rapide dans l'hydrogramme de crue et une occurrence de ces débits pendant des durées très longues. Ce fait est patent sur la figure 2.3.08 de Sklash et al. sur laquelle la droite en pointillé figurant la "Hewlett and Hibbert separation line" à une pente très faible et bien inférieure à celle que l'on obtiendrait par la méthode graphique traditionnelle : l'Ecole hewlettienne qui privilégie l'importance des écoulements souterrains dans les crues se donne d'emblée les conditions de sa réussite, et il faut s'attendre à ce que des procédures analytiques cherchant à mettre en évidence la participation d'eau ancienne ou d'écoulements internes ou souterrains dans l'écoulement Rapide puissent aboutir à des résultats positifs.

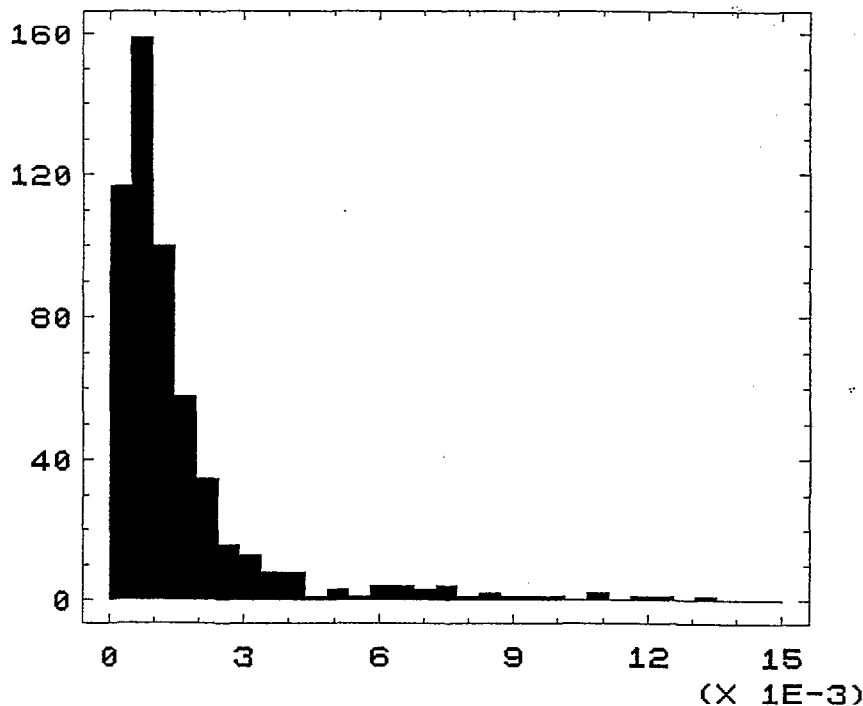


Figure 2.3.16 : Répartition fréquentielle des pentes de séparation des hydrogrammes du Bassin B
Période 1977-1983.

En abscisses : valeur de la pente en $\text{l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}.\text{min}^{-1}$ - En ordonnées : nombre de crues

2.4 UNE PERCEPTION HYDROLOGIQUE DU MILIEU FORESTIER

La finalité de cette étude est de caractériser les modifications hydrologiques induites par la disparition de la forêt, puis par son remplacement par d'autres écosystèmes ou agrosystèmes. A ce titre, si l'étude phénoménologique exhaustive et détaillée des bassins versants en milieu naturel ne constitue pas explicitement un objectif, la connaissance du milieu naturel n'en est pas pour autant une question subsidiaire, mais un préalable incontournable pour situer le milieu expérimental, pour éclairer les résultats des traitements statistiques et envisager une transposition des enseignements de l'expérimentation.

2.4.1 VARIABILITE SPATIALE A L'ECHELLE ANNUELLE

2.4.1.1 Un échantillon de données pour l'analyse hydrologique du milieu forestier

La composante expérimentale du Programme ECEREX était fortement guidée par la demande aval, c'est à dire que les promoteurs du projet et les bailleurs de fonds se montraient préoccupés de disposer au plus vite de résultats en matière d'impact du défrichement. La concession ultime à la rigueur scientifique obtenue en cette matière a été de faire accepter la nécessité d'une période de mesures en milieu naturel sur chacun des bassins expérimentaux pendant deux saisons des pluies au moins.

Tant à cause de la périodicité pluriannuelle de la mise en place des aides financières que des limitations des capacités logistiques des équipes de recherche, il n'était pas concevable que la construction des pistes d'accès, des déversoirs, des fosses à sédiments et l'installation de l'équipement hydrométrique puissent se réaliser simultanément sur les 10 bassins versants, et de fait, la mise en service des bassins s'est étalée sur deux ans. Les observations ont débuté :

- en janvier 1977 pour les bassins A, B, C,
- en janvier 1978 pour les bassins F, G, H,
- en mai 1978 pour les bassins D, E,
- en décembre 1978 pour les bassins I, J

Par ailleurs pour respecter la contrainte de l'avancement rapide du programme, les premiers défrichements ont commencé sur les bassins A et C en octobre 1978. Il n'y a donc jamais eu de période d'observations simultanées sur l'ensemble des 10 bassins versants en forêt primaire. Exprimé en stations-années, le volume d'informations hydrologiques collecté sur le milieu naturel a évolué de la manière suivante :

1977 :	2,75	stations-années	
1978 :	7,33	"	"
1979 :	8,08	"	"
1980 :	5,66	"	"
1981 :	3,50	"	"
1982 :	2,50	"	"
1983 :	2,00	"	"

Différentes caractérisations du milieu naturel ont été rédigées à partir des données disponibles de 1977 (Roche, 1978), de 1978 (Roche, 1982) et de 1979 (Fritsch, 1980).

Toutefois, la compilation directe des données observées, qui intègrent une composante de variabilité temporelle indésirable, s'avère impropre pour caractériser la variabilité spatiale de l'ensemble du dispositif expérimental. On devra donc se donner une période de référence, sur laquelle les données du milieu naturel seront homogénéisées et reconstituées. Ce choix s'est porté sur la période bi-annuelle 1978-1979 qui correspond à la plus forte densité d'information disponible. La reconstitution des différents écoulements sur les bassins non observés, non en service au début de la période, (D, E, I, J) ou déjà défrichés avant la fin de celle-ci (A, C), a été faite à l'échelle mensuelle, à partir des données du bassin-témoin du groupe concerné, c'est à dire

- B pour les bassins A, C, D, E
- et
- F pour les bassins I et J

Les valeurs des différents écoulements (Rapide de Crue, Total de Crue et Superficiel Total) ont été obtenues à partir de corrélations linéaires ajustées aux lames écoulées mensuelles. Les détails de cette opération font l'objet de l'annexe II.

Cette reconstitution par un procédé fonctionnel a forcément pour conséquence de réduire la variance des débits naturels de l'échantillon reconstitué. Ce biais reste cependant acceptable en regard des objectifs : outre le fait que les corrélations soient très significatives et que la quantité d'information agrégée par cette opération soit petite (25% en 1978 et 20 % en 1979), l'utilisation des données résultantes sera limitée à la caractérisation du milieu à l'échelle inter-annuelle, à l'exclusion de tout usage inconsidéré pour l'évaluation des effets hydrologiques des expérimentations sur les bassins versants.

Les données naturelles homogénéisées font l'objet du tableau 2.4.01. On peut en extraire un certain nombre de caractères dominants du milieu.

Tableau 2.4.01 : Caractérisation des comportements hydrologiques des 10 bassins versants ECEREX sous forêt naturelle.

(certaines valeurs ont été reconstituées par corrélation avec les bassins-témoins)

Écoulement Rapide de Crue (ERC) en 1978 et 1979 (en lame d'eau équivalente et en mm)
Coefficient moyen interannuel d'Écoulement Rapide de Crue (K_{ERC} en % de la pluie totale)

Année	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
ERC 78	494	463	138	406	332	727	656	729	239	502
ERC 79	629	564	180	484	470	1078	966	1143	371	905
m.78-79	562	513	159	445	401	902	811	936	305	703
K_{ERC} %	16,4	15,7	4,9	13,7	12,0	29,1	25,6	29,6	9,3	21,9

Écoulement Total de Crue (ETC) en 1978 et 1979 (en lame d'eau équivalente et en mm)
Coefficient moyen interannuel d'Écoulement Total de Crue (K_{ETC} en % de la pluie totale)

Année	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
ETC 78	569	540	211	448	363	876	757	838	293	542
ETC 79	731	651	267	512	490	1239	1137	1338	435	954
m.78-79	650	595	239	480	426	1058	947	1088	364	748
K_{ETC} %	19,0	18,2	7,3	14,8	12,7	34,1	29,9	34,4	11,1	23,3

Écoulement Superficiel Total (EST) en 1978 et 1979 (en lame d'eau équivalente et en mm)
Coefficient moyen interannuel d'Écoulement Superficiel Total (K_{EST} en % de la pluie totale)

Année	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
EST 78	588	562	295	490	372	1370	1190	1322	434	666
EST 79	742	667	369	531	496	1616	1551	1832	487	995
m.78-79	665	615	332	511	434	1493	1370	1577	460	831
K_{EST} %	19,4	18,8	10,2	15,7	13,0	48,1	43,2	49,8	14,0	25,8

Pluie Annuelle totale et interannuelle moyenne Pa (en mm)

Année	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Pa 78	3416	3248	3275	3317	3294	3064	3161	3102	3211	3211
Pa 79	3429	3286	3255	3196	3406	3140	3186	3228	3360	3228
m 78-79	3423	3267	3265	3257	3350	3102	3173	3165	3285	3219

2.4.1.2 La faible variabilité spatiale des précipitations

La moyenne inter-bassins des précipitations totales est de 3251 mm. Si l'existence d'un gradient pluviométrique régional - connu par ailleurs (Cf. 1.2.2) - peut être perçue entre les groupes géographiques de bassins versants, cette variabilité ne constitue qu'un bruit de fond extrêmement faible. C'est ainsi que, du nord vers le sud, cette moyenne pluviométrique aura varié dans les limites suivantes :

- 3147 mm sur le groupe F, G, H (écart à la moyenne -104 mm),
- 3252 mm sur le groupe I, J (écart à la moyenne -1 mm),
- 3318 mm sur le groupe A, B, C (écart à la moyenne +67 mm),
- 3303 mm sur le groupe D, E (écart à la moyenne +52 mm),

c'est à dire que les écarts à la moyenne des différents groupes ne dépassent pas 3%. Il est donc légitime de considérer que la pluviométrie n'est pas susceptible d'expliquer un comportement différentiel entre bassins versants, et que la variabilité hydrologique entre bassins est à mettre au compte de leurs caractéristiques physiques.

2.4.1.3 La grande variabilité spatiale des différents types d'écoulement

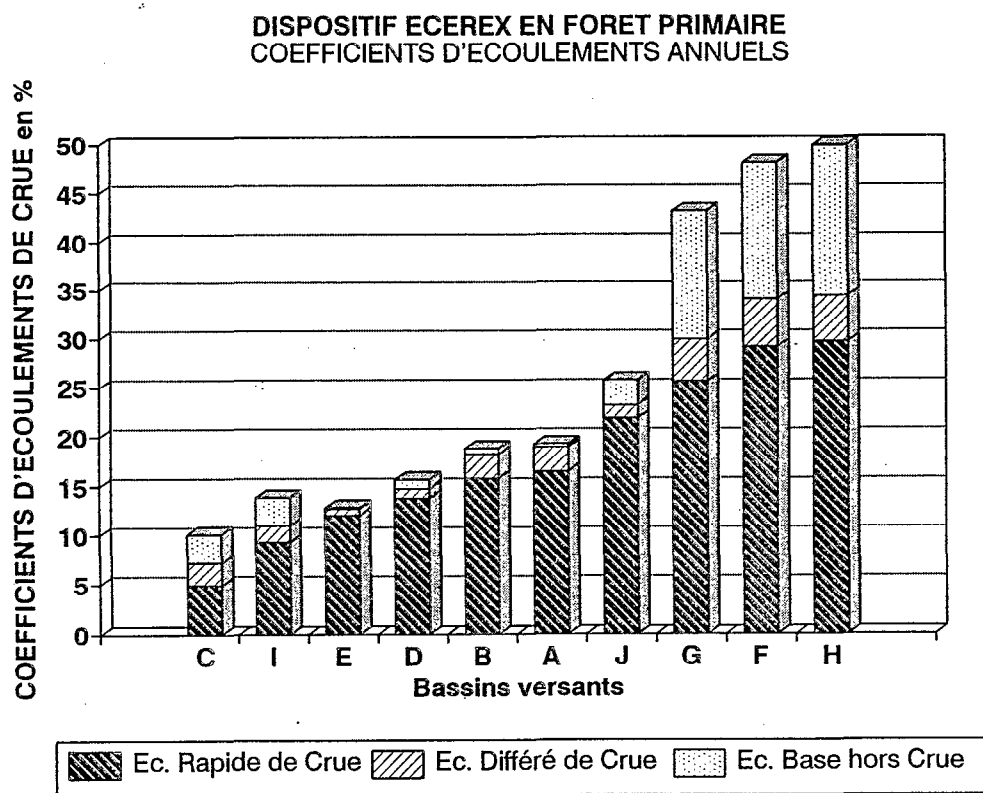
Dans les conditions de grande homogénéité pluviométrique qui viennent d'être évoquées, les coefficients d'écoulement, rapportés à la pluie totale annuelle, constituent des indicateurs hydrologiques adimensionnels commodes et suggestifs, utilisables pour la comparaison entre bassins.

Classés par ordre croissant d'écoulements de Crue, les bassins ont des coefficients d'écoulements qui couvrent la gamme suivante (figure 2.4.01 et tableaux 2.4.01 et 2.4.02) :

- de 4,9 % à 29,6 % pour l'Écoulement Rapide de Crue (variabilité relative dans un rapport 1 à 6),
- de 7,3 % à 34,4 % pour l'Écoulement Total de Crue (variabilité de 1 à 4,7),
- de 10,2 % à 49,8 % pour l'ensemble des écoulements de surface (variabilité de 1 à 4,9).

L'histogramme 2.4.01 montre que cette dispersion n'est pas provoquée par le comportement erratique d'un ou deux individus isolés qui échapperaient à une tendance centrale, mais résulte d'un continuum de situations allant de celle du bassin le moins productif (C avec 4,9 % d'ERC) à celle du bassin le plus productif (H avec 29,6 % d'ERC).

De cette variabilité hydrologique entre bassins versants se dégagent très clairement une caractéristique fondamentale de l'expérimentation ECEREX, sa richesse et ses limites : le dispositif de bassins expérimentaux ne peut prétendre à mesurer les modifications induites par N manipulations sur UN milieu hydrologique uniforme - qui s'avère ne pas exister -, mais d'étudier les effets d'UNE expérimentation donnée, sur UN des N milieux hydrologiques préalablement identifiés.



**Figure 2.4.01 : Distribution des écoulements sous forêt exprimés en pourcentage de la pluie annuelle.
Valeurs interannuelles moyennes 1978-1979 du tableau 2.4.01**

Écoulement Différé de Crue = volume de base "sous" l'Écoulement Rapide dans l'hydrogramme de crue.
Écoulement Total de Crue = Écoulement Rapide + Écoulement Différé de Crue.

ÉCOULEMENTS RAPIDES ET TYPES DE SOLS
Moyenne interannuelle 78-79 sous forêt

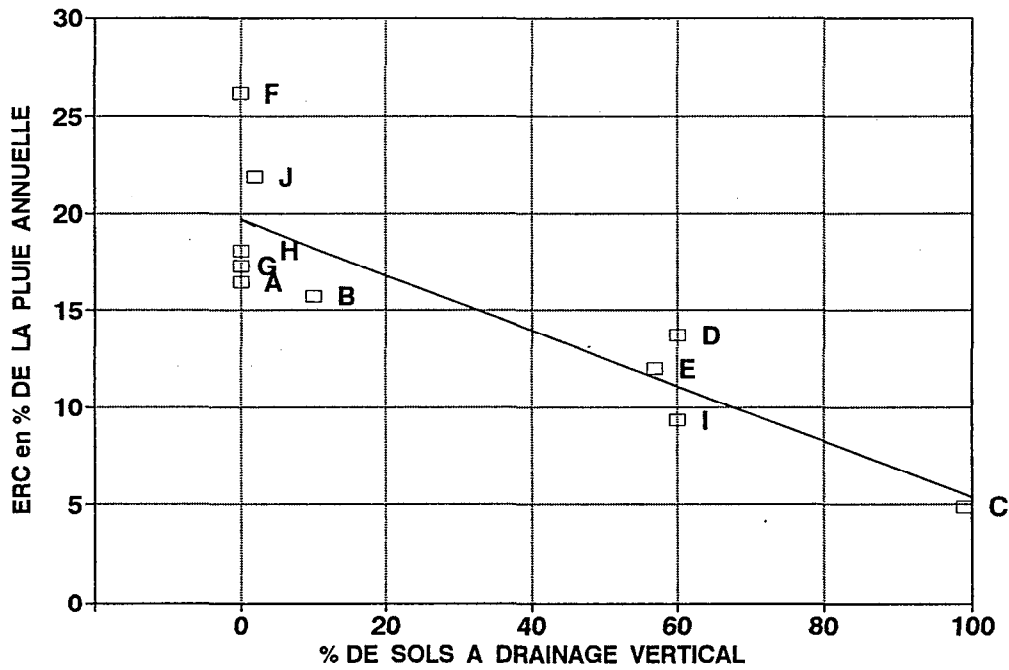


Figure 2.4.02 : Coefficients d'Écoulement Rapide annuels en fonction des types de sols

Tableau 2.4.02 : Variabilité des régimes hydrologiques des 10 bassins versants ECEREX sous forêt naturelle

Bassins	C	I	E	D	B	A	J	G	F	H
K_{erc} %	4,9	9,3	12,0	13,7	15,7	16,4	21,9	25,6	29,1	29,6
K_{etc} %	7,3	11,1	12,7	14,8	18,2	19,0	23,3	29,9	34,1	34,4
K_{est} %	10,2	14,0	13,0	15,7	18,8	19,4	25,8	43,2	48,1	49,8
DVL %	100	60	57	60	10	0	2	0	0	0
$Nappe$ %	0	0	0	0	0	0	0	10	4	14
K_{erc} - $Nappe$	4,9	9,3	12,0	13,7	15,7	16,4	21,9	17,3	26,1	18,1

Les bassins versants sont classés par coefficients d'Écoulement Rapide croissants (K_{erc})

La ligne DVL représente le pourcentage sur le bassin des sols à Dynamique Verticale Libre.

La ligne " $Nappe$ " représente le pourcentage des surfaces ordinairement occupées par la nappe en saison des pluies.

La ligne " K_{erc} - $Nappe$ " représente le coefficient d'Écoulement Rapide sur les zones du bassin autres que la nappe, (en supposant que K_{erc} soit de 100% sur les surfaces d'affleurement habituel de la nappe selon le levé pédologique).

Les variables DVL et K_{erc} - $Nappe$ sont mises en régression sur la figure 2.4.02.

2.4.1.4 La proportion dominante des écoulements de crue par rapport aux écoulements de base

On constate (tableau 2.4.03 et figure 2.4.01) que sur certains bassins versants (E, D, B, A, J), l'écoulement Total des Crues représente la quasi-totalité des débits ayant transité par le déversoir et mobilise de 90% à 98% de la ressource superficielle. Le reste de l'écoulement, identifié par le sigle ED#C (Écoulement Différé en dehors des périodes de Crues), ne constitue rien d'autre qu'une "traîne" des crues et l'écoulement tarit complètement quelques heures au plus tard après l'occurrence du "point de fin de crue".

Par contre, sur d'autres bassins, le volume des écoulements de base, tout en constituant toujours moins du tiers de l'ensemble des eaux de surface, peut-être nettement plus important. Mais cette situation recouvre deux fonctionnalités hydro-pédologiques distinctes et même opposées :

- celle du groupe F,G,H composé de bassins "impermeables", à Ecoulements Rapides importants en valeur absolue (K_{ETC} de 30 à 35 % sur sols à Dynamique Superficielle et Latérale). Dans cet ensemble, les écoulements de base proviennent de la vidange des niveaux superficiels de la nappe affleurante ou sub-affleurante sur la partie aval du bassin versant. La présence de la nappe est due à la position de ces bassins à la base du système pédologique ; ceux-ci se raccordent directement à des diverticules de la zone hydromorphe régionale (stades IV et V de l'évolution pédologique schématisée sur la figure 1.2.10). Sur ces bassins, les écoulements de base en dehors des crues individualisées représentent alors 30% de l'écoulement total et ceux-ci se maintiennent très longtemps après les périodes pluvieuses. Par exemple, les écoulements ont été observés à l'exutoire du bassin F pendant 345 jours en 1978 et 325 jours en 1979,
- la dynamique du groupe C,I sur sols à Drainage Vertical Libre est conforme au concept habituel de bassins "perméables". La proportion des écoulements de base est plus faible que dans le groupe précédent (elle est de 28% sur C et de 21% sur I) et cet écoulement provient très probablement en grande partie du réessuyage de l'eau infiltrée en amont de l'exutoire. On peut en voir pour preuve le fait que ces écoulements de base se maintiennent beaucoup moins longtemps que ceux du groupe F,G,H : à titre comparatif le bassin C a coulé pendant 189 jours en 1978, le bassin I pendant 177 jours en 1979.

Ainsi, non seulement l'occurrence d'écoulements de base peut être la manifestation de dynamiques différentes, mais on ne saurait accorder de signification hydrologique régionale précise à ces débits de base :

Pour les bassins du type F-G-H, l'existence et l'abondance des débits de base dépendent directement de l'altitude du déversoir par rapport au niveau de la nappe, et lorsqu'on s'approche des zones de bas-fond, les volumes écoulés et la durée de l'écoulement avant le tarissement sont très sensibles à ce paramètre d'implantation : il suffit de déplacer très légèrement la station hydrométrique vers l'amont ou vers l'aval pour influencer fortement sur la proportion des écoulements de base, sans modifier sensiblement la surface du bassin versant, ni sa dynamique fonctionnelle en crue. Par ailleurs, les travaux de génie civil associés à la construction de la station, et en particulier l'ouverture d'une fouille de plus de 1,5 mètres de profondeur pour la fosse à sédiments, peuvent avoir introduit un léger artefact dans la mesure, imperceptible en période de pluie, mais sensible en saison sèche, soit en bloquant la vidange naturelle de la nappe et en forçant sa remontée

en surface (phénomène de voile étanche), soit en favorisant le drainage au contact des parois des fosses à sédiments (phénomène de "renards").

En conclusion, les capacités d'expérimentation du dispositif de bassins expérimentaux ECEREX sont orientées vers l'étude des crues. S'il est toujours possible d'étudier l'évolution des écoulements de base sur un bassin donné - avant, puis après un traitement -, il ne faut pas espérer trouver dans le régime des écoulements de base d'un bassin versant ECEREX, de paramètres qui pourraient caractériser une unité naturelle, et qui seraient transposables à l'échelle régionale.

2.4.1.5 La proportion dominante des écoulements rapides dans l'Écoulement Total des Crues

On a insisté précédemment (Cf 2.3.2) sur la pauvreté de la signification des méthodes opérationnelles de séparation des écoulements dans l'hydrogramme de crue. Il serait donc paradoxal d'espérer trouver une empreinte nette du fonctionnement des bassins versants dans la répartition entre les volumes assignés par convention à l'Écoulement Rapide et à l'Écoulement Différé de crue.

On peut toutefois constater sur le tableau 2.4.04, dans lequel les bassins sont toujours classés par ordre d'Écoulements Rapides croissants, que la proportion des Écoulements Différés varie entre 33,5% (bassin C) et 6% (bassin E et J). Sur les bassins "imperméables" avec nappe (F, G, H), ces volumes sont en proportion remarquablement constante de 14%. Par contre, les proportions des écoulements différés des bassins C, I, D, E, qui représentent respectivement 33%, 16%, 7% et 6% de l'Écoulement Total de Crue, sont mal corrélées avec la présence des sols à Drainage Vertical Libre, présents dans les proportions respectives de 100%, 60%, 60% et 57%.

2.4.1.6 La durée des situations "en crue" et le nombre de crues

Dans le contexte pluviométrique guyanais, les crues sont fréquentes : il y a eu entre 112 et 146 événements observés avec ERC > 0,1 mm sur les 8 bassins observés en 1979 ; en 1978 ce nombre était sensiblement inférieur avec 87 et 88 crues sur A et C (tableau 2.4.05 et figure 2.4.03).

A l'échelle annuelle, les durées cumulées des temps de base de chaque hydrogramme ont varié de 4,6% à 9,5% selon les bassins, soit de 16 à 35 jours par an.

Compte tenu de ces durées très réduites, on peut faire l'hypothèse que les modifications, qui seront créées par l'expérimentation, sur les flux verticaux ascendants d'évaporation et de transpiration, n'auront qu'une influence DIRECTE LIMITEE sur les bilans hydrologiques, au pas de temps d'étude ou de modélisation de ces crues. Par contre, les modifications induites sur les mécanismes d'évaporation et de transpiration des végétaux pourront avoir une influence INDIRECTE marquante dans la préparation du réservoir "sol" avant l'occurrence de la crue.

Tableau 2.4.03 : Proportions relatives à l'Écoulement Total des différents types d'écoulements sous forêt
(période 1978-1979)

	C	I	E	D	B	A	J	G	F	H
ERC %	47,92	66,37	92,42	87,14	83,49	84,52	84,69	59,19	60,46	59,33
EDC %	24,15	12,78	5,87	6,86	13,35	13,23	5,39	9,94	10,39	9,64
ERC+EDC %	72,07	79,15	98,29	94,00	96,84	97,74	90,09	69,13	70,86	68,97
ED#C %	27,93	20,85	1,71	6,00	3,16	2,26	9,91	30,87	29,14	31,03
Total %	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

ERC : Écoulement Rapide de Crue

EDC : Écoulement Différé en Crue (écoulement de base "sous" l'écoulement rapide)

ED#C : Écoulement Différé en dehors des périodes de Crues (écoulement de base)

Les bassins versants sont classés par Écoulements de Crue croissants
(ordre de la figure 2.4.01).

Tableau 2.4.04 : Proportions relatives des écoulements rapportés au volume des hydrogrammes de crues.

Bassins	C	I	E	D	B	A	J	G	F	H
ERC %	66,5	83,8	94,0	92,7	86,2	86,5	94,0	85,6	85,3	86,0
EDC %	33,5	16,2	6,0	7,3	13,8	13,5	6,0	14,4	14,7	14,0
ERC+EDC	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

ERC : Écoulement Rapide de Crue

EDC : Écoulement Différé de Crue (écoulement de Base "sous" l'écoulement de crue)

Les bassins versants sont classés par Écoulements de Crue croissants
(ordre de la figure 2.4.01).

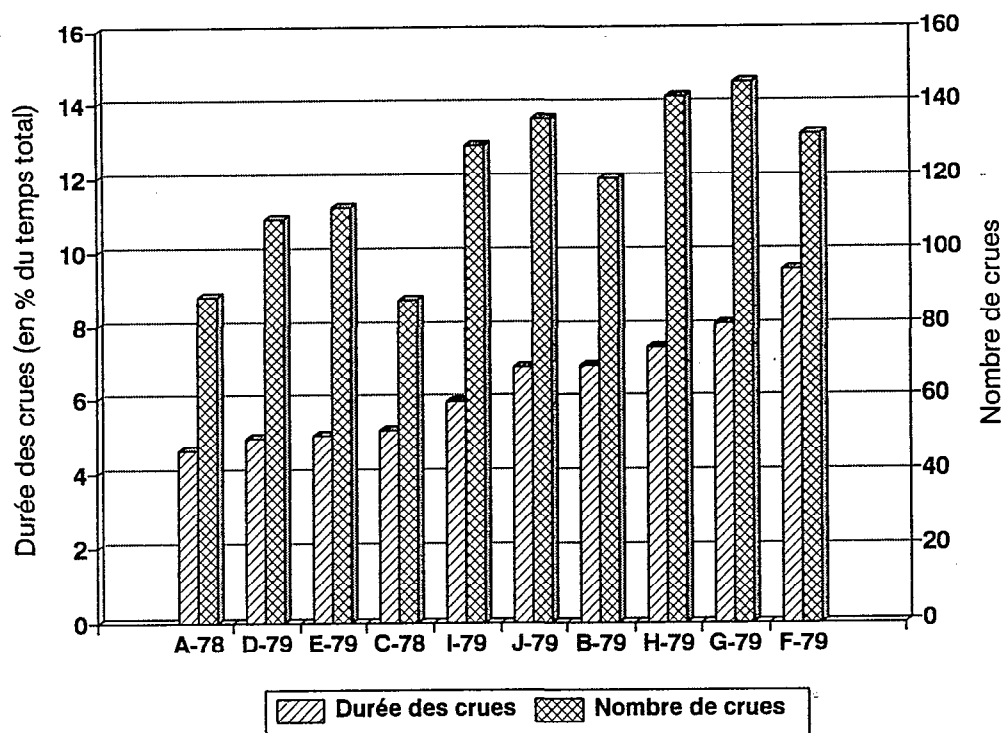


Figure 2.4.03 : Durées des crues (en % du temps total) et Nombre de crues (avec ERC > 0,1mm).

Situation sous forêt naturelle.

L'échelle correspondant au nombre de crues est l'échelle des temps multipliée par 10.

Les bassins sont classés dans l'ordre des durées croissantes

Tableau 2.4.05 : Durées cumulées des crues et nombre de crues sous forêt pendant une année
(périodes : 1978 pour A et C ; 1979 pour les autres bassins versants)

Bassins	A-78	D-79	E-79	C-78	I-79	J-79	B-79	H-79	G-79	F-79
en % du temps	4,61	4,96	5,02	5,17	5,93	6,86	6,89	7,41	8,04	9,51
en jours	16,8	18,1	18,3	18,9	21,6	25,0	25,1	27,0	29,4	34,7
Nombre de crues	88	109	112	87	129	136	120	142	146	132

- Durées des crues :
 - en % du temps sur l'année (ligne 1),
 - en équivalent-jours par an (ligne 2).

- Nombre des crues avec ERC > 0,1mm

2.4.2 DERRIERE L'HETEROGENEITE, L'ORGANISATION

La variabilité hydrologique du milieu étudié est incontestablement très forte et pourrait mettre en cause le bien-fondé de l'expérimentation ECEREX : si l'hétérogénéité du milieu est si grande, comment peut-on, d'une part être certain d'avoir échantillonné complètement ce milieu, et d'autre part quels espoirs de transposition spatiale peut-on raisonnablement nourrir à partir d'une expérimentation faite sur ces microcosmes que sont les bassins versants élémentaires ?

La figure 2.4.02 et le tableau 2.4.03 apportent des éléments de réponse à la première question. Dans ce tableau, les bassins sont classés par ordre d'écoulements de Crue croissants. La ligne DVL représente le pourcentage des sols à Drainage Vertical Libre sur chaque bassin. Une tendance $ERC=f(DVL)$ se dégage nettement pour 7 bassins sur 10. Les bassins F, G et H qui ont des Ecoulements Rapides très abondants échappent à cette tendance. On remarquera que ce sont ces bassins versants, auxquels la carte pédologique attribue une aire aval occupée par une nappe affleurante en saison des pluies. En faisant l'hypothèse que les coefficients d'écoulement rapide sont de 100% sur ces zones, on peut obtenir le coefficient d'ERC des versants par soustraction du pourcentage de surface occupée par les nappes au coefficient d'ERC du bassin considéré. Les points figurant les bassins F, G et H rejoignent ainsi la tendance générale.

La surface des nappes est bien évidemment variable à l'échelle de la saison et pendant chaque crue; l'extension, qui en est cartographiée sur le lever pédologique fait en période sèche, et utilisée ici, correspond à la zone sur laquelle la présence de la nappe se maintient suffisamment longtemps pour imprimer une marque géochimique identifiable à l'oeil dans le profil pédologique. Ce n'est en aucun cas l'extension maximale du système hydromorphe.

Toutes ces réserves faites, on peut considérer que les déterminants utilisés pour caractériser la variabilité spatiale des écoulements, à savoir les proportions de sols à Dynamique Verticale Libre ou à Dynamique Superficielle et Latérale et l'extension des caractères d'hydromorphie indicatifs de la présence d'une nappe en saison pluvieuse, sont des critères de différenciation du milieu suffisamment pertinents et robustes, pour permettre de situer chaque unité hydrologique élémentaire dans le désordre apparent du milieu naturel.

Il ne faudrait pas conclure que la caractérisation du milieu à partir de ces critères pendant la phase de prospection soit une opération simpliste. Même pour un observateur familier du milieu, l'identification visuelle, au cours d'une promenade de santé en forêt, ne permet pas de savoir si un versant est à DVL ou à DSL, et si le talweg est, ou n'est pas, affecté par des remontées de la nappe en période pluvieuse. Une prospection pédologique complète est nécessaire pour obtenir une information synthétique et finalisée, qui soit utilisable par l'hydrologue.

Il y a fort à parier qu'en l'absence de cette information, le diagnostic hydrologique à propos de la dispersion des résultats fournis par le dispositif de bassins versants, eût été que des surfaces de l'ordre de l'hectare sont insuffisantes pour échapper à ce qu'il est convenu d'appeler l'hétérogénéité, et qu'il aurait fallu équiper des bassins versants plus grands, qui auraient intégré cette hétérogénéité, et auraient constitué des objets hydrologiques où l'amalgame des complexités eût été payé de retour par la prise en compte du milieu dans sa globalité, c'est à dire par une représentativité véritable du bassin considéré (ou supposée comme telle).

2.4.3 DE L'EFFET D'ECHELLE

Expliquer les causes de la variabilité spatiale des paramètres hydrologiques ne suffit pas pour assurer la crédibilité d'une expérimentation sur des bassins versants élémentaires. Il faut encore disposer de quelque information - fût-elle qualitative - sur l'organisation de l'espace à partir de ces bassins élémentaires, pour pouvoir transposer les résultats obtenus et espérer répondre à la question de l'effet de la déforestation aux échelles kilométriques.

On peut définir un bassin représentatif comme l'unité hydrologique qui intègre l'ensemble des éléments d'un paysage. Cette définition peut paraître singulièrement mal adaptée au contexte de la forêt primaire où l'horizon visuel est limité à une dizaine de mètres ! Néanmoins la sensation dominante pour un marcheur en forêt est l'alternance de montées et de descentes, qui se succèdent rapidement sans "plateaux" marqués dans les hauts d'interfluves, et de zones plates toujours situées dans des bas-fonds entaillés par de petits lits mineurs, et encombrées de bras morts.

Les bassins élémentaires ECEREX, avec deux versants et un (ou deux) talwegs élémentaires appartiennent au premier milieu naturel précédemment décrit. Aucun d'eux n'est situé, en totalité ou en partie, dans les bas-fonds.

Les hydrologues étudiant les objets qu'ils savent mesurer, on rappelle que ce sont des contraintes d'ordre hydrométrique qui ont imposé les surfaces des bassins (Cf. 2.2.3.1), et celles-ci eussent été bien supérieures, s'il avait été possible de trouver des unités de surfaces kilométriques sur lesquelles les débits auraient pu être mesurés et les hauteurs enregistrées avec toute la précision exigée par une expérimentation destinée à détecter des changements dans les régimes hydrologiques. Rétrospectivement, il n'y a pas lieu de regretter cet état de fait, car si d'aventure on avait découvert de tels bassins versants, on se serait donné beaucoup de peine pour étudier et mesurer les caractéristiques hydrologiques de ces objets atypiques, qui en dépit de leur dimension, n'en auraient pas été pour autant, représentatifs du milieu à ECEREX.

Si l'on prend en compte une classification de l'espace à partir d'une "magnitude hydrologique" caractérisée par des sauts dimensionnels de 10^2 , la variété des dispositifs hydrométriques à ECEREX permet de comparer des données recueillies à la magnitude 10^4 m^2 sur les bassins élémentaires, avec des résultats d'ordre immédiatement inférieur, soit 10^2 m^2 (les parcelles), et immédiatement supérieur, soit 10^6 m^2 (le petit bassin versant de la Crique Délices). On reprendra ici les résultats de cette comparaison, qui ont été exposés par ailleurs (Fritsch et al., 1987).

2.4.3.1 De la parcelle au bassin versant élémentaire

La parcelle sous forêt retenue pour la comparaison est la parcelle P_A décrite en 2.2.1. L'organisation pédologique est très semblable à celle du bassin élémentaire B . Les écoulements et les pluies sont connus globalement à l'échelle de la journée. La parcelle est conçue pour collecter exclusivement de l'écoulement superficiel (ou qui se produit dans le premier centimètre). Elle draine $4 \cdot 10^2 \text{ m}^2$.

Le bassin élémentaire est le B (bassin-témoin en forêt naturelle). Il comporte 10% de sols à DVL (Drainage Vertical Libre) localisés sur les parties amont des versants. Le reste du bassin est occupé par des sols à Dynamique Superficielle et Latérale. On n'a jamais observé de remontée de la nappe à proximité de la surface dans le talweg. La surface contrôlée à l'exutoire est de $1,6 \cdot 10^4$ m².

La parcelle étant exploitée au pas de temps journalier, la forme des hydrogrammes de crue n'est pas connue, et aucune séparation des écoulements, si cette démarche avait un sens quelconque, n'est envisageable. La série des écoulements de la parcelle sera comparée aux écoulements totaux du bassin versant, cumulés à l'échelle journalière ou sur plusieurs jours consécutifs, lorsque la périodicité des relevés de la parcelle l'impose.

Les courbes des simples cumuls (figure 2.4.04) construites à l'échelle journalière montrent un parallélisme remarquable des écoulements de la parcelle et des écoulements du bassin, et cela dans des conditions pluviométriques très variables : une saison des pluies abondante (1979), une année proche de la normale (1979-80) et une année déficitaire (1980-81). Au bout de 3 ans, l'écart entre les écoulements des deux dispositifs, n'est que de 3% (1342 mm sur la parcelle et 1381 mm sur le bassin).

On peut aussi représenter l'évolution comparée des écoulements sur des graphiques de doubles cumuls. Ces cumuls annuels, qui font l'objet des figures 2.4.05, commencent à la date du 1^{er} septembre (début de la saison sèche) et finissent le 31 août (fin de la "grande saison des pluies").

Sur les figures 2.4.05b (1979-80) et 2.4.05c (1980-81), on constate une similitude de comportement des courbes au voisinage de l'origine : les doubles cumuls passent "sous" la bissectrice, et cette situation correspond à l'occurrence de la "petite saison des pluies" de décembre-janvier pendant laquelle les écoulements de la parcelle viennent à dépasser ceux du bassin versant. Toutefois, ces écarts restent très faibles (au maximum 6 mm en 1979-80 et 4 mm en 1980-81). Cette situation n'est pas visible sur la courbe 2.4.05a de l'année 1979, car les observations n'ont débuté qu'en février cette année-là.

Ensuite les courbes repassent "sur" la bissectrice, c'est à dire que les écoulements du bassin versant dépassent ceux de la parcelle. Les écarts cumulés atteignent 68 mm en 79, 12 mm en 1980 et 20 mm en 1981. Ces chiffres reflètent cette fois des écarts relatifs assez sensibles entre les 2 dispositifs, de 17% en 1979, 14% en 1980 et 15% en 1981. L'interprétation hydrologique de ces écarts se réfère à la différence fonctionnelle entre la parcelle et le bassin, c'est à dire à l'existence ou l'absence de talweg. Pendant la première phase, qui suit la saison sèche, les zones au voisinage du talweg sont plutôt favorables à l'infiltration et il y a quelques "pertes" entre les versants et l'exutoire du bassin, d'où un meilleur rendement superficiel pour la parcelle. Pendant la deuxième phase, contemporaine du coeur de la saison des pluies, les zones adjacentes au talweg, génèrent des écoulements plus abondants, en termes spécifiques, que les versants, ce qui se traduit par les écarts mentionnés plus haut, de 14% à 17% en faveur du bassin.

Le tableau 2.4.06 qui présente le bilan comparatif des 2 systèmes entre le 1-02-79 et le 31-08-81 permet d'apprécier l'identité volumique des écoulements de la parcelle avec l'Écoulement Total de Crue du bassin (les coefficients d'écoulement valant respectivement 15,4% et 15,6%).

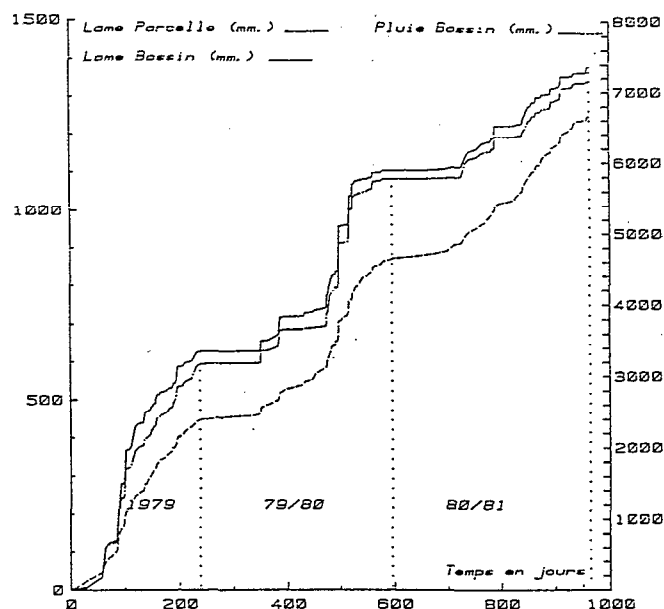


Figure 2.4.04 : Simple-cumuls des lames écoulées sur la parcelle A et le bassin B et de la pluie mesurée au bassin B (en mm)

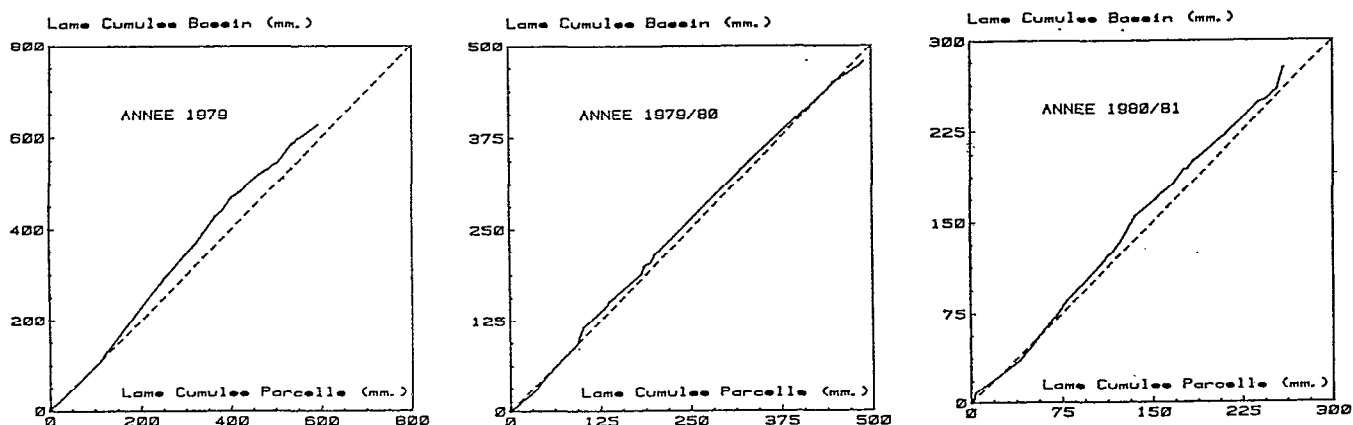


Figure 2.4.05 : Doubles-cumuls des écoulements sur la Parcelle A et le Bassin B (en mm)

Tableau 2.4.06 : Bilan hydrologique du bassin B et de la parcelle A

Période	Parcelle A			Bassin B		
	P_p	E_p	KE_p	P_B	ETC_B	$KETC_B$
02-79 à 08-79	2493	577	23,1	2567	608	23,7
09-79 à 08-80	3182	489	15,4	3090	460	14,9
09-80 à 08-81	2946	259	8,8	2836	260	9,2
02-79 à 08-81	8621	1325	15,4	8493	1328	15,6

P_p et P_B : Pluie totale sur la parcelle et sur le bassin pendant la période.

E_p et ETC_B : Ecoulement total de la parcelle et Ecoulement Total de Crue du bassin.

KE_p et $KETC_B$: Coefficients d'écoulement de E_p et ETC_B .

Ces différences illustrent l'existence d'un effet d'échelle - ténu mais sensible -, c'est à dire l'apparition de mécanismes nouveaux quand on change de magnitude, qui ne peuvent être pris en compte par l'application brutale de la règle des proportions.

Par ailleurs, un enseignement très important est fourni par l'expérimentation sur parcelle : de par sa conception, le collecteur à l'aval de la parcelle ne peut capter que de l'écoulement de surface, - du "ruissellement" -, et dès lors, il faut bien conclure que le ruissellement peut exister sous forêt, et que sur des unités du type bassin B, la majorité des écoulements de crue rejoint l'exutoire par cette voie. Est-il besoin d'affirmer que ce résultat n'a rien de surprenant et que tout observateur peut constater l'occurrence de ruissellements diffus sur les versants plusieurs fois par jour entre les mois d'avril et de juin. Tous les hydrologues spécialisés dans l'étude des milieux humides tropicaux confirment ces faits. Ce phénomène a été étudié dans les forêt humides du Queensland en Australie (Bonnell et Gilmour, 1978), et décrit par un géographe en Côte d'Ivoire (Rougerie, 1958).

Toutefois, dans la majorité des cas, ce ruissellement ne résulte pas d'une intensité de pluie dépassant la capacité d'absorption du sol, telle qu'on peut la mesurer sur un monolithe d'un m² (*Hortonian Overland Flow*) mais est constitué par de l'écoulement de saturation superficielle (*Saturation Overland Flow*) : sur les 74 crues de plus de 1mm et ayant duré moins de 24 heures qui ont été enregistrées sur la parcelle, 23% ont été provoqués par des averses d'intensité maximale en 30 minutes inférieure à 20 mm.h⁻¹, et 65% de celles-ci par des averses d'intensité maximale inférieure à 30 mm.h⁻¹, dans le même temps de 30 minutes.

2.4.3.2 Du bassin élémentaire au petit bassin versant

Le petit bassin considéré est celui de la Crique Délices décrit en 2.2.4. La surface drainée à la station de contrôle est de 4,5 km². Le bilan des écoulements, qui a pu être déterminé pour une seule année (1981), fait l'objet du tableau 2.4.07 et de la figure 2.4.06.

La comparaison globale annuelle des chiffres de la Crique Délices et du Bassin B suggère que des modifications considérables apparaissent dans les termes du bilan, lorsqu'on quitte la centaine de m² ou l'hectare pour entrer dans le domaine kilométrique méso-régional.

La comparaison du déficit d'écoulement annuel à Délices (1708 mm) avec la valeur admise pour ETR de la forêt, permet de d'évaluer la capacité de ce bassin versant à constituer un intégrateur hydrologique régional. On sait par ailleurs (Cf. 2.5.1) que le déficit d'écoulement moyen interannuel, assimilable à l'Evapotranspiration Réelle de l'écosystème forestier, est de 1470 mm dans la zone de l'étude. La valeur du déficit d'écoulement à Délices est donc assez proche de cette valeur. La différence, soit 238 mm, signifie qu'une partie du bilan (soit 7% de la pluie annuelle) serait évacuée en transit souterrain au droit de la station : la surface drainée serait trop petite pour approcher davantage les termes régionaux du bilan. Mais on peut aussi imputer cet écart à l'utilisation d'une valeur d'ETR moyenne interannuelle, utilisée avec les données d'une année déficitaire comme l'année 1981, ou bien encore aux médiocres qualités hydrométriques de la station de contrôle (Cf. 2.2.4.3).

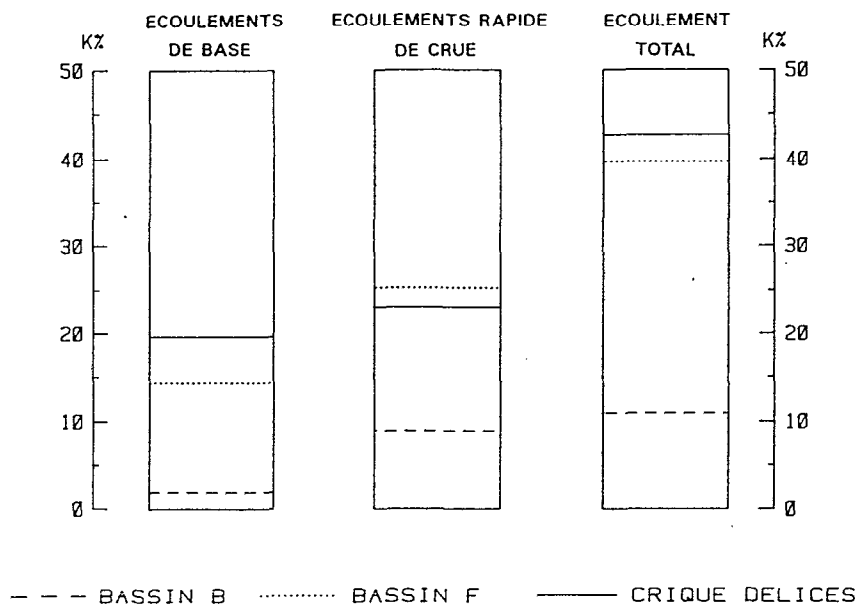


Figure 2.4.06 : Bilan hydrologique annuel de la Crique Délices et des bassins élémentaires B et F
Coefficient d'écoulement K en % de la pluie totale

	Pma	E Total	ERC	E Base
Crique Délices	2979	1271 42,7%	686 23,0%	585 19,6%
Bassin B	2952	322 10,9%	264 8,9%	58 2,0%
Bassin F	2904	1153 39,7%	735 25,3%	418 14,4%

Tableau 2.4.07 : Bilan hydrologique de la Crique Délices et des bassins élémentaires B et F

Pma : Pluie moyenne annuelle sur le bassin en mm.

E Total : Ecoulement superficiel total en mm.

ERC : Ecoulement rapide de Crue.

E Base : Ecoulement de Base pendant et en dehors des crues

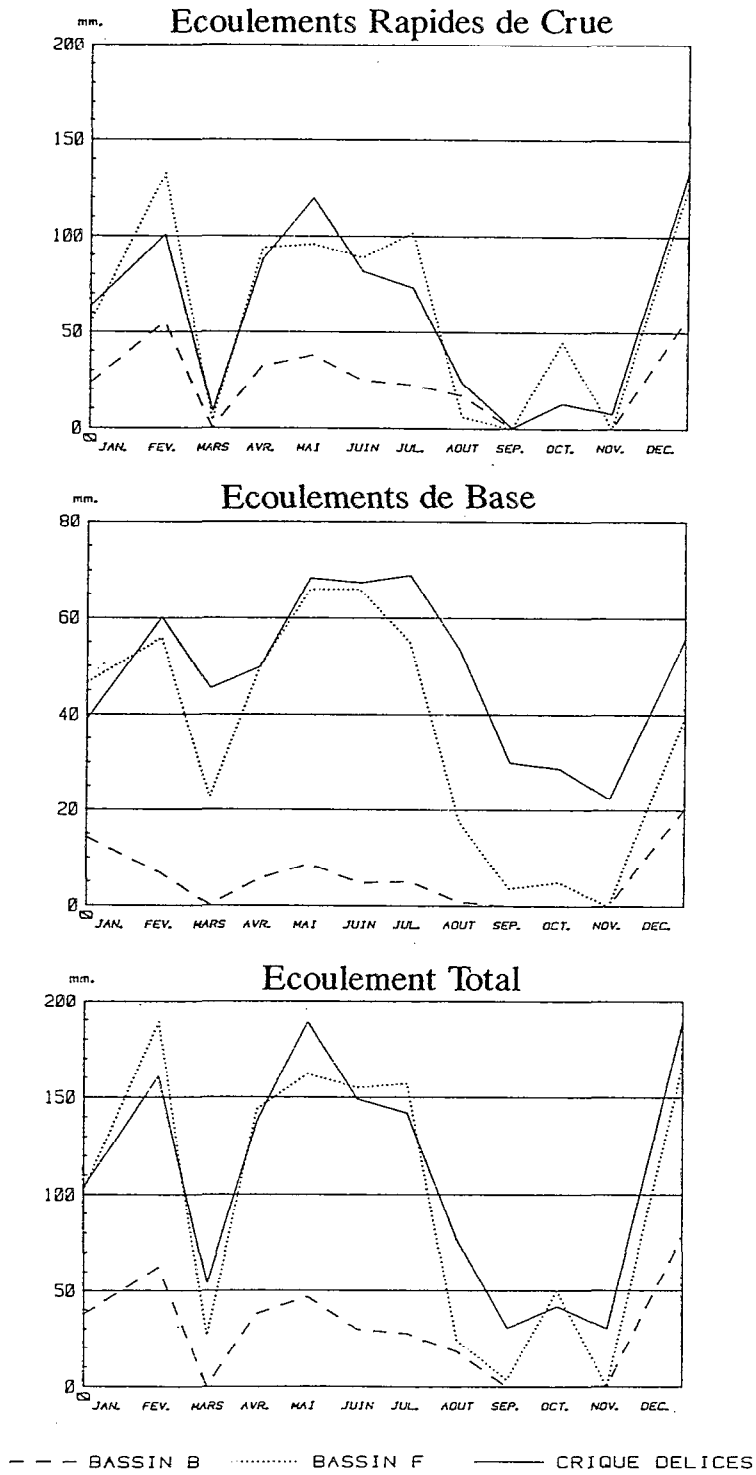


Figure 2.4.07 : Ecoulements mensuels des bassins B et F, et de la Crique Délices.

Le bassin versant de Délices peut donc être utilisé comme un modèle hydrologique acceptable à l'échelle méso-régionale. La comparaison des termes du bilan annuel de Délices avec ceux du bassin B amène aux considérations suivantes :

- L'écoulement de Base (E Base), quasi inexistant au bassin B est décuplé et passe de 2% à 20% du bilan annuel.
- Fait plus surprenant, l'écoulement Rapide de Crue augmente dans un rapport 2,6 et la participation de l'ERC au bilan du bassin de Délices est de 23% de la pluie annuelle contre moins de 9% au bassin B.

Au vu de ces chiffres, on pourrait conclure que "l'effet d'échelle" soit particulièrement important au passage de 10^4 à 10^6 m², et que des bassins élémentaires ne puissent pas être utilisés comme modèle de la dynamique de l'eau à l'échelle du petit bassin versant, dans l'acceptation ordinaire de ce concept par les hydrologues.

A cet égard, il est intéressant de considérer les écoulements de l'autre témoin en forêt naturelle, le bassin F (dernière ligne du tableau 2.4.07). A l'échelle annuelle, on constate que le régime hydrologique de ce bassin est calqué sur celui de Délices, avec pratiquement le même écoulement total (1153 mm contre 1271 mm à Délices), des Ecoulements Rapides de Crue légèrement supérieurs (25% contre 23%) et des écoulements de Base un peu moins soutenus (14% contre 20%).

La répartition mensuelle des différents écoulements des 3 bassins versants considérés (figure 2.4.07), confirme la similitude des comportements de F et de Délices par opposition au bassin B. L'écart le plus sensible entre F et Délices affecte les écoulements de base : ceux-ci "décrochent" très rapidement à partir du mois de juillet sur le bassin élémentaire pour devenir pratiquement nuls de septembre à novembre, alors que les lames d'écoulement de base sont encore de 20 à 30 mm par mois à Délices.

Le bassin F qui draine seulement 1,4 ha, constitue un contre-exemple illustrant les risques à faire appel de manière inconsidérée à une explication dimensionnelle (l'effet d'échelle) pour expliquer les écarts constatés entre le bassin B et la Crique Délices, alors que la prise en compte des mécanismes de fonctionnement des différents bassins (le régime hydrique des sols sur les versants et la présence ou l'absence de la nappe) suffisent à rendre compte de ces différences, sans faire appel à des processus nouveaux, qui feraient leur apparition quand on passe du bassin élémentaire au petit bassin versant.

A partir de l'organisation pédologique de la Crique Délices, on peut vérifier qu'une estimation assez grossière du comportement de ce bassin, faite à partir des résultats des bassins élémentaires, n'est pas complètement sans fondement. Les sols de ce bassin versant sont répartis de la façon suivante (Cf.2.2.4.1) :

- 7,4% de bas-fonds, zone de battement de nappe,
- 54,5% de sols à Dynamique Superficielle et Latérale, (même type que ceux des versants de F),
- 12,2% de sols à Drainage Vertical libre (type bassin C),
- 25,9% de sols au Stade II (passage de l'état DVL à l'état DSL le long d'un même versant).

On admet que les 25,9% de sols en type II se comportent pour moitié (les hauts de versants) comme les sols perméables de type I, l'autre moitié étant assimilée au type III. La composition des versants serait alors de 67,5% de sols donnant des écoulements rapides du même ordre que ceux du bassin F. Le coefficient d'Écoulement Rapide de ce bassin F en 81 (25,3% de la pluie), peut lui-même se décomposer comme étant de 100% sur la zone de nappe (4% de la surface du bassin) et de 22,2% sur les versants.

Le rendement de l'ERC sur les 25,1% de sols à Drainage Vertical Libre ou assimilés n'est pas connu sur bassin élémentaire en 1981, car à cette date il n'y a plus de bassin en forêt naturelle avec ce type de couverture pédologique. Rappelons toutefois que le coefficient d'ERC sous forêt du bassin C entièrement constitué de sols à DVL au stade d'évolution I, était très faible (4,2% en 1978)

Le coefficient d'ERC de la zone de nappe (7,4%) est par définition de 100% de la pluie incidente.

Le coefficient d'Écoulement Rapide de Crue de la Crique Délices devrait être voisin de :

$$(7,4\% \times 1) + (25,1\% \times 0,04) + (67,5\% \times 0,222) = 23,4\%.$$

Le chiffre effectivement mesuré en 1981 était de 23,0%. Si la précision de cette reconstitution est manifestement un effet du hasard, il faut au moins reconnaître la pertinence de l'identification des processus élémentaires et de leur mode de combinaison pour expliquer le fonctionnement du petit bassin versant.

En ce qui concerne l'évolution des Écoulements de Base il semble bien que l'effet dimensionnel soit sans conteste responsable des débits importants de la Crique en saison sèche par rapport au bassin élémentaire. Cette hypothèse est probablement en grande partie fondée, mais on rappelle que la position du déversoir à une influence très sensible sur les volumes d'écoulement de base, et sans autre argument que la connaissance du terrain, on peut affirmer qu'un faible déplacement vers l'aval de la section de contrôle, qui ferait passer la surface de 1,4 ha à seulement 2 ou 3 ha, entraînerait une augmentation très substantielle des débits en saison sèche pour un bassin versant qui serait toujours du même ordre de magnitude de 10^4 m^2 .

Le changement de nature des processus hydrologiques dominants qui accompagne les changements dimensionnels des objets étudiés est une réalité incontestable. Toutefois, cet exemple montre que le l'invocation systématique de l'effet d'échelle, pour expliquer des différences de comportement hydrologique peut n'être qu'une procédure commode pour masquer l'insuffisance de la connaissance du milieu.

En conclusion, à propos du caractère sommaire des données qui ont été présentées, on rappellera que la connaissance du milieu naturel et sa modélisation n'entraient pas dans les objectifs de ce travail, même s'il contribue à une réflexion susceptible d'orienter cette recherche, et que l'ambition de cette discussion était d'apporter des éléments permettant de "cadrer" les expérimentations qui seront faites sur des bassins versants élémentaires par rapport à un contexte spatial plus large.

2.4.4 VARIABILITE TEMPORELLE

2.4.4.1 Variabilité des précipitations

La variabilité des totaux de pluies annuelles (en années calendaires) peut être appréciée à partir de 10 ans de mesures faites à ECEREX au site Pk16-Bassin A (colonne 1 du tableau 2.4.10). Le rapport du maximum observé (4311 mm en 1984) au minimum observé (2573 mm en 1985) est de 1,68. Ce chiffre est cohérent avec la variabilité interannuelle de la pluviométrie en Guyane, et on peut le rapprocher du rapport des pluviométries de l'année décennale humide à l'année décennale sèche (coefficient K3) de la station de référence "longue durée" de Rochambeau, qui vaut 1,7.

Sur la période des observations hydrologiques intensives (1977-1983) et par rapport à l'espérance de la moyenne interannuelle en année calendaire définie en 1.2.2.2, soit 3350 mm, les premières années d'observations, dédiées principalement à l'étude du milieu naturel, sont plutôt fortes :

1977 : 3490 mm,
1979 : 3430 mm,
1978 : 3416 mm,

alors que les dernières années, réservées à l'expérimentation, sont nettement déficitaires :

1981 : 2895 mm,
1983 : 3052 mm,
1983 : 3093 mm.

Les totaux pluviométriques journaliers classés par tranche de hauteur et par année font l'objet de la figure 2.4.08 et du tableau 2.4.08, tandis que le pourcentage cumulé des apports de chaque tranche dans le total annuel est figuré en 2.4.09.

On compte en moyenne 105 jours sans pluie et 222 jours avec moins de 5 mm. Les journées à faible total dominant en nombre (162 jours entre 0 et 10 mm en moyenne), mais ne représentent que 17% de la pluie annuelle. La gamme 10-50 mm (87 occurrences en moyenne par an) correspond à la plus grande part de l'apport pluviométrique annuel (56%), alors que les pluies journalières supérieures à 50 mm (27% du total annuel) sont observées en moyenne 12 jours par an. Au niveau de la variabilité interannuelle, on remarque une bonne similitude des structures jusqu'à 10 mm par jour et des comportements différenciés pour les tranches supérieures, les courbes des années les plus abondantes (1977 sur graphique haut et 1984 sur graphique bas de la figure 2.4.092) se situant "en dessous" du faisceau moyen : les années abondantes sont dues aux apports des pluies journalières fortes plutôt qu'à l'augmentation du nombre de jours de pluie dans les tranches faibles.

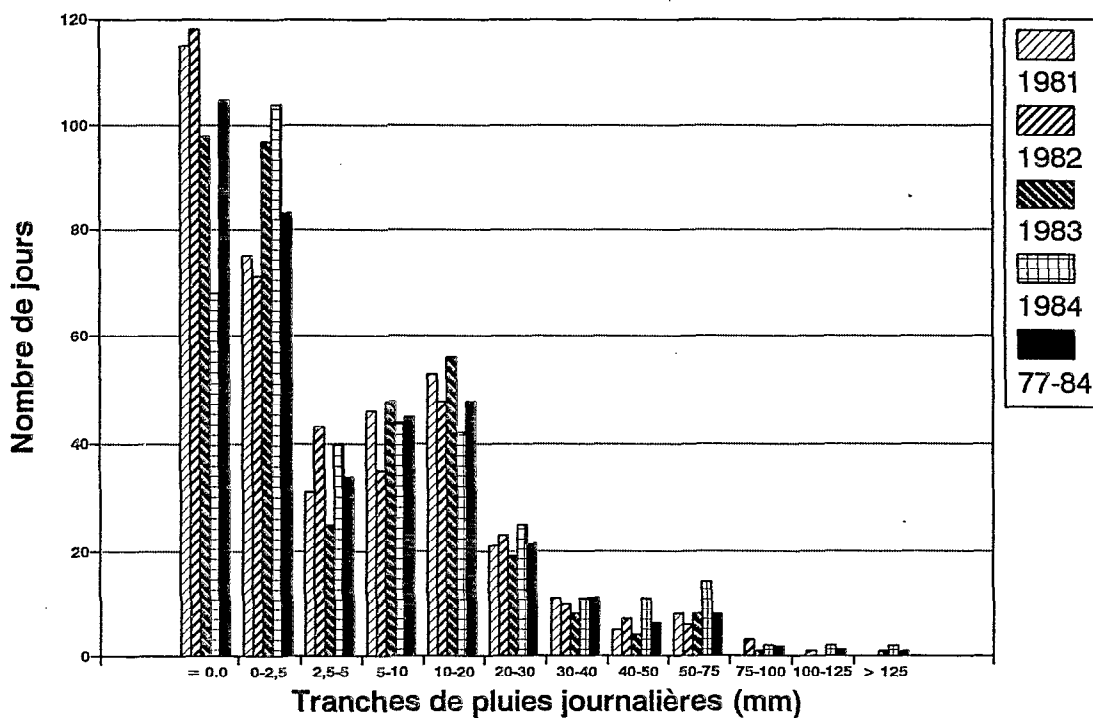
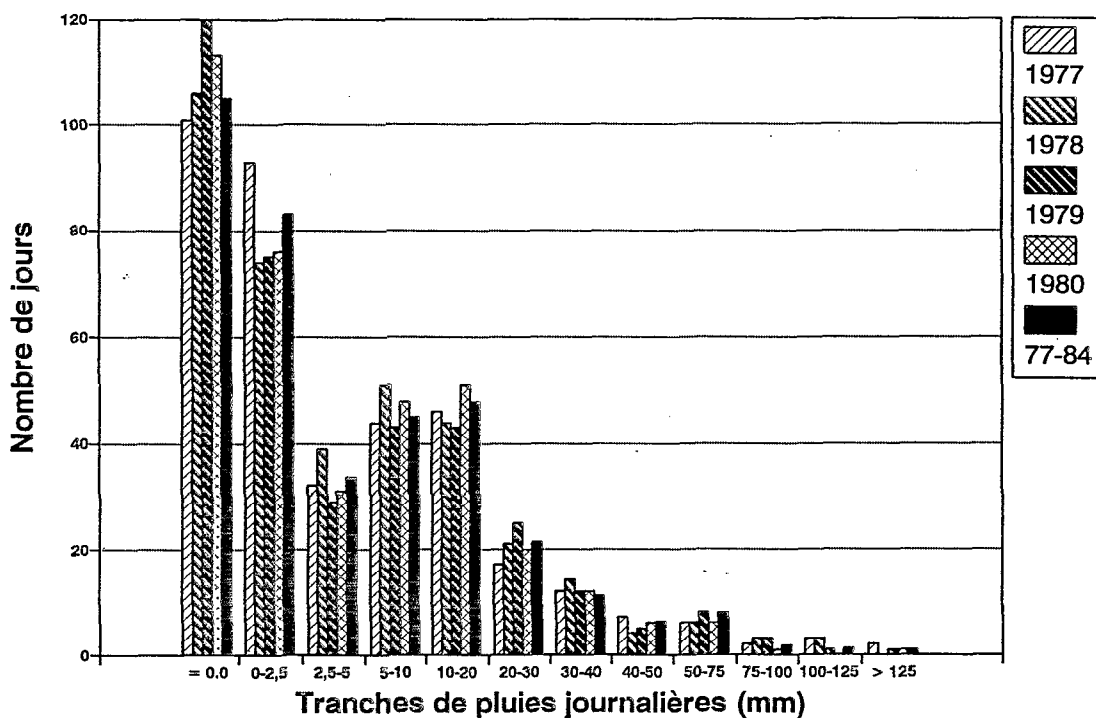


Figure 2.4.08 : Répartition des pluies journalières par tranches de hauteur et par année (Bassin A)

Tableau 2.4.08 : Nombre de jours de pluie par tranche de hauteur (mm) à ECEREX - Bassin A

	77	78	79	80	81	82	83	84	77-84
= 0,0	101	106	120	113	115	118	98	68	104,9
0,0 - 2,5	93	74	75	76	75	71	97	104	83,1
2,5 - 5,0	32	39	29	31	31	43	25	40	33,8
5 - 10	44	51	43	48	46	35	48	44	44,9
10 - 20	46	44	43	51	53	48	56	42	47,9
20 - 30	17	21	25	20	21	23	19	25	21,4
30 - 40	12	14	12	12	11	10	8	11	11,3
40 - 50	7	4	5	6	5	7	4	11	6,1
50 - 75	6	6	8	6	8	6	8	14	7,8
75 - 100	2	3	3	1	0	3	1	2	1,9
100 - 125	3	3	1	0	0	1	0	2	1,3
> 125	2	0	1	1	0	0	1	2	0,9

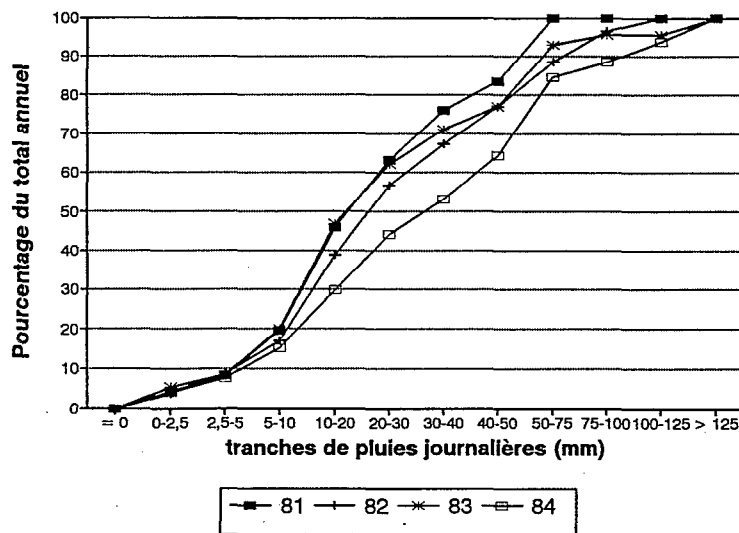
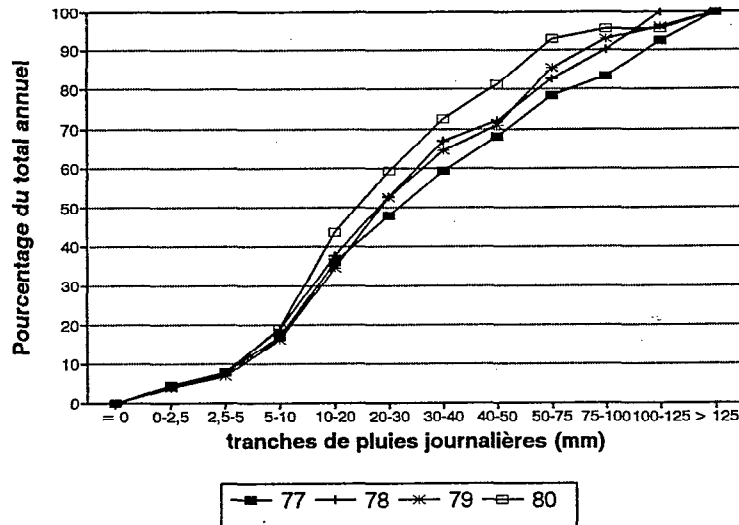


Figure 2.4.09 : Pourcentage cumulé des apports des tranches de hauteurs journalières au total pluviométrique annuel (Bassin A)

Tableau 2.4.09 : Hauteurs de pluie maximales (mm) en 1, 2, 3,... et 90 jours consécutifs à ECEREX

Bassin A - Période 1977 à 1984

	77	78	79	80	81	82	83	84	moyenne
1 jour :	135	112	134	128	71	101	141	205	128
2 jours :	263	197	161	174	96	130	168	263	181
3 jours :	358	213	163	217	130	140	198	279	212
5 jours :	390	222	275	275	140	204	260	311	259
10 jours :	509	318	373	382	242	364	449	501	392
15 jours :	542	369	563	465	336	458	608	696	505
20 jours :	618	532	597	631	382	545	755	867	616
30 jours :	869	683	750	829	470	635	949	1123	788
60 jours :	1319	789	1221	1334	820	946	1474	1351	1157
90 jours :	1631	1087	1649	1690	1205	1283	1791	1974	1539

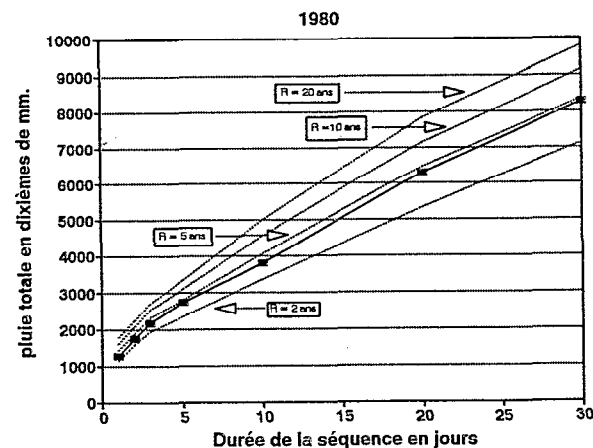
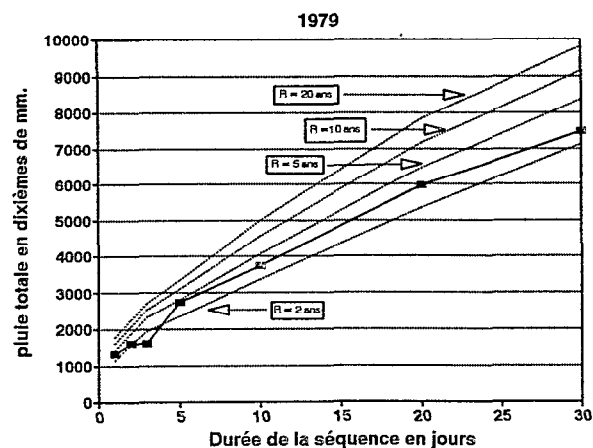
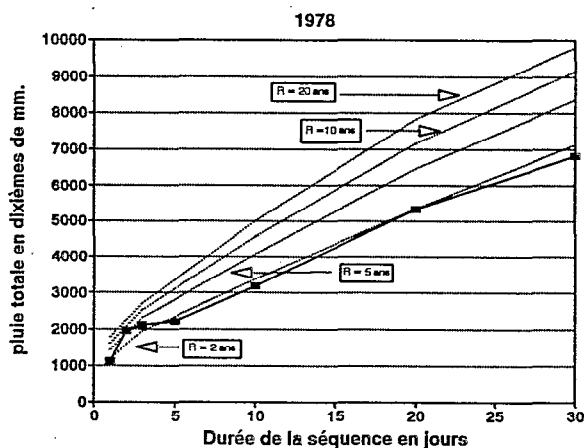
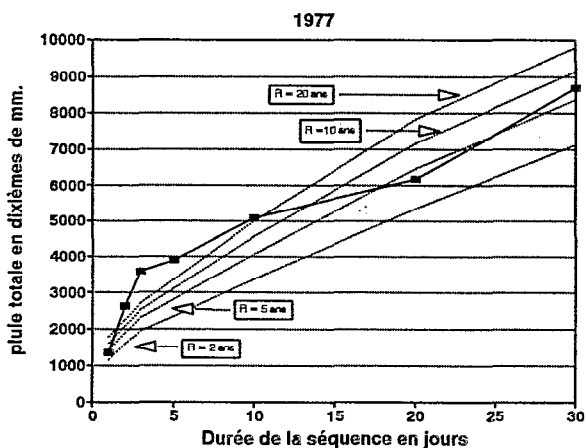


Figure 2.4.10a : Pluies maximales sur des périodes glissantes de 1, 2, 3, 5, 10, 20 et 30 jours consécutifs à ECEREX-bassin A
 En ordonnées : pluie cumulée en centaines de mm. En abscisses : durée de la séquence en jours
 On a représenté sur chaque graphique les courbes de période de retour 2, 5, 10 et 20 ans.

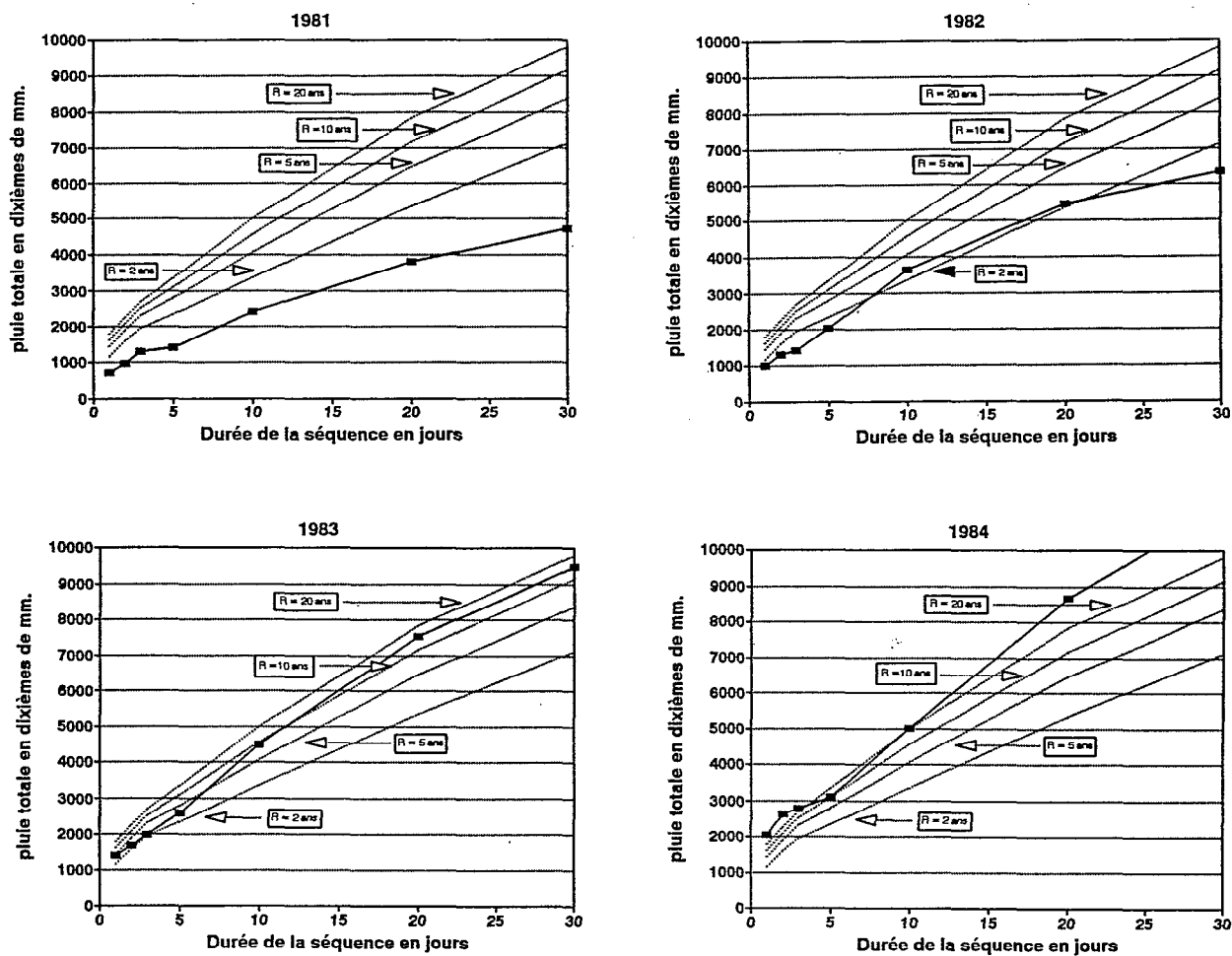


Figure 2.4.10b : Pluies maximales sur des périodes glissantes de 1, 2, 3, 5, 10, 20 et 30 jours consécutifs à ECEREX-bassin A.
 En ordonnées : pluie cumulée en centaines de mm. En abscisses : durée de la séquence en jours
 On a représenté sur chaque graphique les courbes de période de retour 2, 5, 10 et 20 ans.

Une caractérisation temporelle à l'échelle de la période pluvieuse, plus significative vis à vis du comportement des petits bassins versants, a été faite en classant les hauteurs de pluies maximales observées chaque année durant des séquences de 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20, 30, 60 et 90 jours consécutifs. Les résultats sont exprimés en millimètres de pluie par période et par an (tableau 2.4.09). Pour la figuration graphique, on a opté pour le tracé des pluies cumulées de 1 à 30 jours consécutifs, superposé avec les courbes correspondantes, de périodes de retour 2 ans, 5 ans, 10 ans et 20 ans (figure 2.4.10). Ces courbes de références ont été déduites de celles établies pour Rochambeau (figure 1.2.07), corrigées par les valeurs de corrélations avec ECEREX, soit un abattement des hauteurs de l'ordre de 0,91 (Cf. 1.2.2.2).

Les pluies maximales sur une période glissante de 90 jours, correspondant au coeur de la saison des pluies, ont varié entre 1087 mm en 1978 et 1974 mm en 1984 (rapport 1,82).

Si l'on considère les périodes inférieures à 30 jours qui font l'objet d'une représentation graphique, l'échantillon disponible est caractérisé par :

- une année déficitaire (1981),
 - les précipitations de toutes les périodes de 1 à 30 jours sont dépassées plus souvent qu'un an sur deux.
- 2 années médianes (1978 et 1982),
- 2 années fortes (1979 et 1980),
 - les récurrences de toutes les périodes de 1 à 30 jours sont comprises entre la biennale et la quinquennale humide.
- 3 années très fortes (1977, 1983 et 1984),
 - 1983 : période 10 à 30 jours plus rare que décennale,
 - 1984 : plus rare que décennale sur toutes les périodes 1-30 jours,
 - 1977 : période 2-3-5-10 jours très abondante, plus rare que vingtennale (le record de 358 mm en 3 jours à ECEREX n'a jamais été observé à la station de référence de Rochambeau).

L'observation des bassins expérimentaux en milieu naturel, qui s'est déroulée principalement de 1977 à 1979, a été associée à des conditions pluviométriques plus abondantes que la normale.

2.4.4.2 Variabilité des écoulements

Faute d'observations hydrologiques de longue durée dans la région, les éléments caractéristiques de la variabilité interannuelle en milieu naturel doivent être obtenus à partir des résultats des bassins versants témoins en forêt naturelle, B et F sur des périodes relativement courtes (respectivement 7 et 6 ans). Le tableau 2.4.10 et l'histogramme de la figure 2.4.11 présentent l'écoulement superficiel total et l'écoulement total de crues, exprimés en mm pour chacun de ces bassins versants.

Pour les écoulements de crue (ETC), qui ont la plus forte variabilité des 2 paramètres sélectionnés, la variabilité interannuelle la plus forte sur la période commune 1978-1983 se situe dans un rapport 1,45 sur F (1240 mm en 1979 et 857 mm en 1981) et de 2,17 sur B (652 mm en 1979 et 300 mm en 1981). Si l'on utilise toute l'information disponible sur B en prenant en compte l'année 1977, ce rapport passe à 2,41.

La variabilité interannuelle est plus faible sur le bassin le plus productif, ce qui n'est guère surprenant, car plus un bassin est "imperméable" et moins son comportement est influencé par la variabilité des intrants pluviométriques (abondance et répartition temporelle). Toutefois, même sur un bassin versant qui coule beaucoup, tel que F, on constate que la variation interannuelle des écoulements est d'un ordre de grandeur égal ou supérieur aux effets hydrologiques provoqués par des changements de l'occupation du sol qui sont rapportés dans la littérature.

La variabilité temporelle est un élément perturbant indésirable, capable de masquer ou de biaiser les effets hydrologiques des expérimentations, si les chiffres sont considérés de manière globale sur des périodes annuelles ou pluriannuelles.

Sur un même bassin versant, la précision avec laquelle les effets de l'expérimentation pourront être évalués est directement dépendante des performances des méthodes permettant de séparer la composante hydrologique liée à l'expérimentation, de celle provenant des intrants climatiques.

Toutefois, en regard de l'ensemble du monde tropical, on se doit de constater que ces conditions climatiques sont les meilleures possibles :

- Les rapports de variabilité temporelle des écoulements sont inférieure à 2,5, alors que la variabilité spatiale entre bassins versants atteignait 6.
- Même si la structure des pluies par tranches de hauteurs est assez variable d'une année à l'autre, on observe chaque année un échantillon suffisamment important dans les tranches centrales (pluies journalières de 10 à 75 mm) pour espérer caractériser le comportement des bassins à l'intérieur de conditions pluviométriques limites suffisamment étendues, pour évaluer ensuite avec une précision acceptable les effets des traitements au terme de périodes d'étalonnages en milieu naturel relativement courtes et fixées *a priori* (2 années). Ces conditions favorables ne pourraient être invoquées pour des régions tropicales sèches ou tropicales humides soumises à des événements rares et très violents (cyclones).

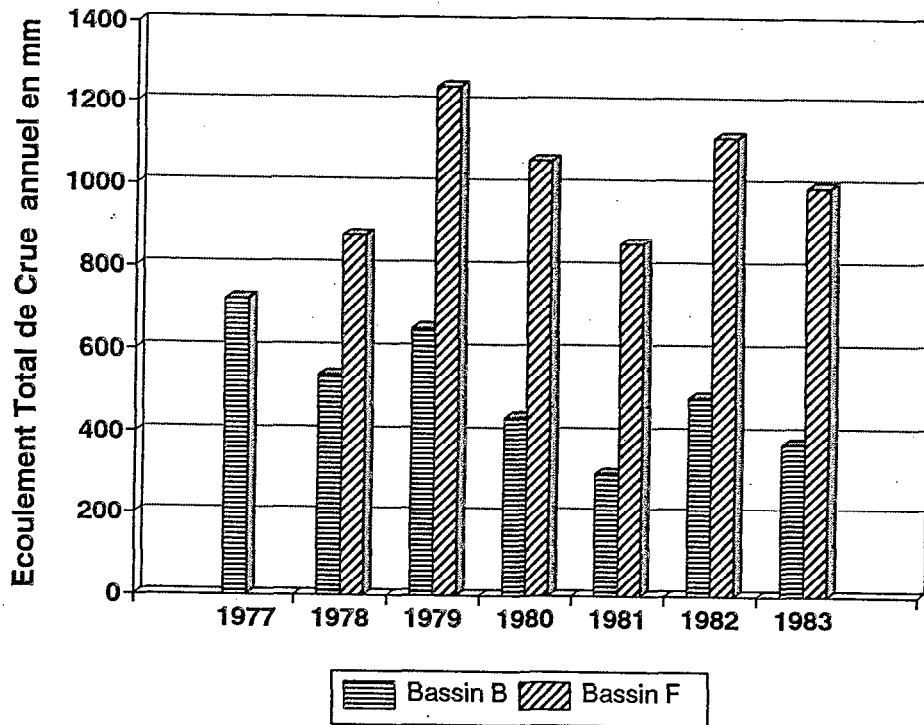


Figure 2.4.11 : Variabilité interannuelle de l'Écoulement Total de Crue (ETC) sous forêt naturelle.

Bassins B et F . Echelle des ordonnées = ETC (mm) x 1000

Tableau 2.4.10 : Lames écoulées annuelles sous forêt sur les bassins B et F

valeurs en mm sur l'année calendaire

EST : Écoulement Superficiel Total - ETC : Écoulement Total de Crue

année	Pluie A-PK16	Bassin B		Bassin F	
		EST	ETC	EST	ETC
1977	3490	743	723		
1978	3416	563	541	1371	877
1979	3430	668	652	1617	1240
1980	3163	461	437	1355	1060
1981	2895	322	300	1153	857
1982	3093	505	485	1482	1117
1983	3052	490	373	1290	996
1984	4311				
1985	2573				
1986	2803				

2.5 LA COMPOSANTE ATMOSPHERIQUE DU BILAN DE L'EAU EN FORET

2.5.1 EVAPOTRANSPIRATION ET DEFICIT D'ECOULEMENT

Pays peu peuplé, au secteur primaire déficient, la Guyane Française considérée à l'échelle synoptique, possède une couverture forestière pratiquement ininterrompue, dès que l'on a quitté la plaine côtière. Le vieux socle cristallin constitue une fondation géologique compacte sans possibilité de pertes importantes par infiltration profonde. Dans ces conditions, le Déficit d'Écoulement (DE) calculé pour de grands bassins versants, sur l'année hydrologique, et *a fortiori* sur plusieurs années, représente l'Évapotranspiration Réelle (ETR), c'est à dire l'eau consommée par l'écosystème forestier, pour autant que l'on puisse considérer que l'écoulement souterrain, par ailleurs peu développé, est négligeable devant les autres termes du bilan. Cette condition est effectivement satisfaite sur de grands bassins versants (10^4 km²). Ce mode de calcul du DE et son assimilation à l'ETR peut éventuellement être transposé à des bassins versants plus petits si les conditions géologiques à la section de contrôle des débits sont celles d'un voile étanche bloquant l'écoulement souterrain et forçant celui-ci vers la surface.

De tels bilans interannuels ont été présentés par Roche (1982a) à ces deux échelles :

- Sur des stations du réseau hydrologique drainant de 5 000 à 10 000 km², sur lesquels les débits sont bien connus, mais où la connaissance des pluies est incertaine (Cf. 1.2.1.1 et figure 1.2.01), le DE moyen obtenu sur 20 ans (1956-1976) est de 1560 mm sur les bassins du Nord du pays (correspondant à la zone ECEREX) et de 1460 mm sur les bassins du Sud.
- Sur l'ensemble de bassins représentatifs de la Crique Grégoire, la pluviométrie est très bien connue (16 pluviographes) ; par contre on pourrait invoquer l'existence d'écoulements souterrains qui échapperaient au calcul du bilan et conduiraient à une estimation par excès de l'ETR assimilée au DE. En fait le bassin de Grégoire est sur granites, les stations hydrométriques n°1 et 2 sont placées sur des seuils rocheux à l'amont de chutes et il est tout à fait improbable qu'une partie significative de l'écoulement puisse échapper au contrôle hydrologique superficiel. Sur ces bassins, le déficit d'écoulement moyen interannuel a été de 1437 mm à la station II (12,4 km²) et de 1528 mm à la station I (8,4 km²) sur la période 1968-1976.

Ces chiffres obtenus aux deux échelles des grands et des petits bassins versants sont très voisins et ont conduit Roche (1982b) à adopter la valeur de 1470 mm pour ETR interannuelle à ECEREX.

Cette valeur a été considérée comme forte et de nature à troubler la sérénité des hydrologues tirant leur expérience des zones tropicales humides Africaines. Olivry (1986) a calculé les DE moyens sur divers ensembles de bassins versants du Cameroun forestier humide. Sur le Nyong, les DE vont de 1150 à 1240 mm pour des pluviométries de 1540 à 1730 mm et sur la Sanaga, les DE sont compris 960 et 1190 mm pour des pluies de 1600 à 1900 mm. Sur de très grands bassins versants de l'Ogoué, Rodier (1964) trouve des DE compris entre 1070 et 1210 mm, pour des pluviométries de 1650 à 1960 mm. Sur le Congo et plusieurs sous-bassins, Bultot (1962) a calculé des DE compris entre 1030 et 1280 mm pour des pluviométries de 1120

à 1740 mm.

Ces DE sont effectivement toujours bien inférieurs aux valeurs de Guyane, mais il faut noter que la pluviométrie est nettement plus faible aussi. La pluie moyenne était de 3690 mm à la Crique Grégoire, de l'ordre de 2700 mm sur les bassins du réseau guyanais-zone Nord et de 2250 mm sur les bassins du réseau-zone Sud, alors qu'aucune pluie africaine citée ne dépasse 2000 mm sur de telles surfaces.

La nature du couvert végétal est primordiale dans l'importance du DE, comme l'a montré Bernard (1953), qui a calculé le déficit d'écoulement du Congo à Banama (3 800 000 km²), soit 1173 mm, alors que la pluie moyenne sur le bassin est de 1510 mm. Il fait remarquer qu'en ce point le bassin versant est composé de forêt pour 2/5 et de savanes pour 3/5, et utilisant la valeur du DE mesuré sur plusieurs bassins en savanes, il évalue l'ETR de la forêt à 1395 mm, ce qui est finalement assez proche des valeurs admises en Guyane.

En Amazonie Vénézuélienne près de San Carlos du Rio Negro, Jordan et Heuveloop (1981) ont mesuré la transpiration de la forêt par le traçage du tritium dans les plantes, couplé avec le calcul du bilan d'énergie et des données évaporatoires sur bac. Ils avancent le chiffre de 1720 mm par an pour la seule transpiration. Ces auteurs ayant par ailleurs mesuré 184 mm d'interception par le couvert forestier, évaluent l'ETR de l'écosystème forestier à 1904 mm. Cette estimation est la plus élevée que nous ayons trouvée et elle est présentée à titre de curiosité, car il est probable que le mode opératoire (méthode indirecte tirée d'un modèle, et qui résulte d'un calage) serait susceptible d'expliquer ce record qui n'a jamais été égalé ou approché dans les autres travaux.

Par ailleurs, ces auteurs ont essayé d'isoler la composante "évaporation du sol" à partir de la mesure journalière de l'humidité dans des cylindres. Pour les mois secs (septembre-novembre), l'évaporation moyenne est de l'ordre de 3 mm par mois avec un maximum journalier de 0,4 mm. Ces valeurs étant sans aucun doute plus faibles encore pour les mois pluvieux, les auteurs ont considéré que la partie évaporée par le sol était négligeable face aux autres termes du bilan. Cette conclusion n'est guère étonnante lorsque l'on sait (Ducrey et al., 1983) que l'énergie de rayonnement sous forêt à ECEREX ne représente en moyenne que 2,7% du rayonnement incident global en clairière, et que les humidités relatives annuelles sont comprises entre 90,4% (moyenne des minimums journaliers) et 99,6% (moyenne des maximums journaliers).

Leopoldo et al. (1982a) ont obtenu par la méthode du bilan hydrologique une valeur DE de 1675 mm à l'exutoire d'un petit bassin versant de 1,3 km² dans la réserve forestière Ducke près de Manaus. Sur un aussi petit bassin développé sur d'épaisses altérites de sédiments tertiaires ("formation Barreiras"), l'assimilation du DE à l'ETR paraît hasardeuse, et il est probable que ce chiffre surestime fortement l'ETR. Par contre, le DE de 1496 mm sur un bassin de 23,5 km² (bacia modelo de l'INPA) est certainement plus proche de la valeur régionale de l'ETR (Leopoldo et al, 1982b).

Dans une synthèse préparée par Bruijnzeel (1987) et présentant l'ETR de diverses forêts tropicales du monde (Amérique Centrale, Amazonie, Indonésie, Nouvelle Guinée, Australie, Afrique), l'ETR moyenne est de 1460 mm (erreur standard de la moyenne = 27 mm, n = 17). Toutefois, il faut noter que cette compilation inclut aussi quelques données que nous avons considérées comme douteuses, tel Leopoldo et al. (1982a). Parmi les fortes valeurs les plus vraisemblables de cette compilation, on peut noter Calder et al. (1986) qui trouve une ETR de 1481 mm pour une précipitation annuelle de 2851 mm (Bassin de Janlappa en Indonésie) et Gilmour (1977) qui a mesuré sur 6 ans une ETR de 1421 mm pour une pluviosité de 4037 mm dans le Queensland en Australie, ...mais sur un bassin versant très petit (26 ha).

Une mesure de l'ETP en Guyane sur évapotranspiromètres plantés en *Kikuyu grass* et en *paspalum maritimum* a été suivie pendant un an par Fougerouze (1966). Les valeurs annuelles obtenues sont de 1506 mm à Cayenne et de 1592 mm à Rochambeau dans des conditions assez semblables à celles d'ECEREX.

L'évaporation sur Bac Classe A est connue à Rochambeau Aéroport (Anonyme-Météorologie Nationale, 1977) et représente 1797 mm (tableau 2.5.01). Il est intéressant de comparer cette valeur à celle obtenue en clairière de forêt primaire, à la station météorologique de la Crique Grégoire, soit 910 mm (Hoepffner, 1974). Si l'on fait abstraction des différences d'appareillage (Bac A à Rochambeau et Colorado-ORSTOM à Grégoire), on constate que la valeur de Grégoire-clairière est à peine la moitié de celle de Rochambeau, et que l'évaporation Colorado sous forêt primaire à quelques dizaines de mètres de l'implantation précédente décroît encore dans un rapport supérieur à 10, avec une valeur annuelle de 80 mm seulement.

Tableau 2.5.01 : Evaporation mesurée sur bac à Rochambeau et à Grégoire (en mm)

Rochambeau : bac de Classe A - Grégoire : bac Colorado-ORSTOM enterré de 1m²

Durée d'ensoleillement et humidité relative à Rochambeau

	J	F	M	A	M	J	J ^t	A	S	O	N	D	Année
Rochambeau Aéroport	144	127	152	154	138	136	150	160	173	182	150	132	1798
Grégoire Clairière	61	63	70	70	62	60	76	89	98	104	87	70	910
Grégoire sous forêt	9	6	7	8	6	4	5	8	7	9	5	6	80
Insolex en heures	125	125	150	172	149	159	215	240	255	263	223	175	2251
Humidité relative moyenne en %	88	86	84	85	89	90	88	85	83	83	85	88	86
Humidité relative minimale en %	70	68	67	67	71	69	63	60	58	58	63	68	65

Ces différences mettent en évidence l'importance des conditions microclimatiques (la station météorologique de Rochambeau est située dans la savane de l'aéroport international et celle de Grégoire est dans une petite clairière, au bord du fleuve Sinnamary), et amènent à s'interroger sur la réalité des conditions bioclimatologiques du couvert forestier à 50 m de hauteur dans un flux d'alizé permanent et soutenu.

Riou (1975) a établi des coefficients de passage à l'ETP régionale à partir des données du Bac enterré de 1 m². A Brazzaville, ce coefficient se maintient à 0,92 tout au long de l'année. En utilisant par ailleurs le coefficient de passage du bac enterré vers le standard Classe A également établi par Riou (1,12 à Brazzaville), l'ETR déduit de l'évaporation bac de Rochambeau est de 1476 mm par an.

Les durées d'ensoleillement à Rochambeau sont élevées (2250 heures par an), si on les compare à celles du Cameroun humide présentées par Olivry (1986), qui fait remarquer que "l'ensemble des régions étudiées a un nombre moyen d'heures d'ensoleillement effectif inférieur à 1750 heures par an, avec moins de 1500 heures par an sur le bassin du Ntem et dans les régions côtières de Kribi à la frontière nigériane".

Le vent moyen annuel est de 3,2 m.s⁻¹ à Rochambeau et de 2,6 m.s⁻¹ à St. Laurent du Maroni. Les vents s'affaiblissent sensiblement vers l'intérieur et la moyenne annuelle se stabilise à 1,4 m.s⁻¹ à Maripasoula et à St. Georges de l'Oyapock (Perrot, 1975). Ces valeurs sont bien supérieures à celles du Cameroun (Olivry, 1986), où le vent moyen annuel aux stations côtières de Douala et Kribi serait inférieur à 1 m.s⁻¹, pour diminuer encore à l'intérieur (0,8 m.s⁻¹ à Edéa). Cette situation aérologique, qui permet les apports d'énergie par advection, se conjugue avec les conditions radiatives favorables pour constituer un environnement propice à une forte évaporation.

Parallèlement à la méthode des bilans hydrologiques, il existe un grand nombre de formules de calcul de l'ETP ou de l'ETR.

La formule de Penman est souvent utilisée en milieu tropical humide, et, lorsque des recoupements peuvent être faits avec des bilans hydrologiques, les chiffres obtenus par ces deux approches sont très voisins. Ainsi peut-on comparer l'ETP Penman à Grégoire (1565 mm) avec le DE (1470 mm) du bilan hydrologique (Roche, 1982a).

Cette formule est jugée la plus adéquate au Congo par Bultot (1962), en Guyane par Guillobez et Godon (1984) - qui ont calculé l'ETP moyenne à Rochambeau (1690 mm) et à St. Laurent du Maroni (1670 mm) - et au Surinam par Wan der Weert et Kamerling (1974). Ces derniers ont estimé l'ETR des jacinthes d'eau cultivées dans un bac flottant au milieu d'une population indigène des mêmes plantes sur la retenue du barrage de Brokopondo. La consommation réelle des plantes pouvait dépasser 10 mm par jour, et sur l'ensemble de la période de suivi, l'ETR des jacinthes a été équivalent à 1,4 fois l'Evapotranspiration Penman, ce qui montre que cette formule ne donne pas forcément une limite supérieure de l'ETR.

Villa Nova et al. (1976) ont calculé l'évapotranspiration Penman de l'Amazonie brésilienne à partir des données disponibles de 19 stations climatologiques, soit 4 mm par jour. Les valeurs les plus fortes sont situées sur la côte, par exemple 4,5 mm par jour à Macapa, soit 1643 mm par an.

Toujours par la formule de Penman, l'Evapotranspiration calculée à la réserve forestière Ducke (26 km de Manaus) est de 1573 mm (Goes Ribeiro et Villa Nova, 1979).

Certains auteurs estiment que l'évaluation de l'ETR par d'autres formules est plus performante. Ainsi, Obiukwu Duru (1984) a vérifié qu'au Nigéria, l'utilisation d'une formule de type Blaney-Morin (1942) est mieux corrélée avec l'évaporation sur bac de classe A que ne l'est l'ETP Penmann.

La formule de Thornthwaite compte aussi des adeptes. Par comparaison avec les résultats des lysimètres, Fougerouze (1966) considère que le calcul de l'évaporation par la formule de Thornthwaite est un bon estimateur de l'ETP annuelle en Guyane, mais que celle-ci sous-estime l'ETP en période sèche et préconise d'utiliser la formule de Bouchet (ou du Piche corrigé) pour suivre les variations aux échelles mensuelle ou décadaire.

Finkelstein (1982) a calculé l'ETP-Thornthwaite à ECEREX pour l'année 1981, soit 1517 mm, à partir de mesures bioclimatologiques à proximité du site ARBOCEL. Toujours à ECEREX, Guehl (1984), qui a étudié la dynamique de l'eau dans les sols, considère que la formule de Thornthwaite est effectivement un bon estimateur de l'ETR annuel, mais constate que la méthode, qui ne prend en compte que la composante thermique du climat, tamponne exagérément les variations mensuelles. En suivant Fougerouze (1966), il a opté pour la valeur de l'ETP annuelle calculée selon Thornthwaite (soit 1515 mm), modulée mensuellement comme le veut la formule de Bouchet.

A Manaus, l'ETP Thornthwaite est estimée à 1536 mm par an et l'ETR, calculée avec une réserve de sol de 125 mm, est de 1508 mm pour une pluie annuelle de 2478 mm (Goes Ribeiro et Villa Nova, 1979).

Tableau 2.5.02 : Définition de l'ETR au pas de temps mensuel.

	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Année
(1) ETP Penman modulée Bouchet	142	75	173	101	91	86	109	146	194	191	154	103	1565
(2) Pluie à ECEREX	293	200	288	416	513	372	247	154	64	93	124	373	3137
(3) Bilan (2)-(1)	+151	+125	+115	+315	+422	+286	+138	+8	-130	-98	-30	+270	
(4) ETR	142	75	173	101	91	86	109	146	163	159	122	103	1470

(1) : valeur annuelle de l'ETP Penman (Roche, 1982a) modulée mensuellement par la formule de Bouchet à ECEREX (Guehl, 1984)

(2) : pluie moyenne à ECEREX (Cf tableau 1.2.01)

(4) : ETR annuelle par la méthode des bilans hydrologiques (Roche, 1982a).
Le déficit annuel ETR-ETP, soit 95 mm, a été réparti sur les 3 mois de septembre, octobre et novembre. Pour les autres mois on a ETR=ETP.

Dans l'optique d'une modélisation hydrologique des bassins versants, il est nécessaire de définir une modulation de l'ETR aux pas de temps mensuels ou plus courts.

Pour l'ETP, on a opté pour la valeur annuelle selon la formule de Penman utilisée par Roche (1565 mm). Cette valeur a été modulée mensuellement en utilisant les coefficients calculés par Guehl (tableau 2.5.02).

Pour l'ETR, on retiendra la valeur annuelle de 1470 mm qui résulte d'une estimation robuste que rien ne permet d'infirmer dans l'état de la connaissance du milieu en Guyane.

En comparant les pluies mensuelles à ECEREX (tirées du tableau 1.2.01) avec les ETP mensuelles Penman, on constate qu'il existe un déficit hydrique pendant 3 mois (septembre, octobre et novembre). On a donc admis que $ETR = ETP$ de décembre à août et on a réparti le déficit annuel $ETP - ETR$, soit 95 mm, de façon uniforme entre les trois mois déficitaires. Cette série apparaît en dernière ligne du tableau 2.5.02.

Le procédé qui associe des données provenant à la fois d'observations et de calculs, établies sur des périodes différentes, a un aspect culinaire incontestable. Mais la véritable interrogation est ailleurs : quelle est la pertinence d'une ETR moyenne interannuelle qui estompe l'effet du "petit été de mars", et surtout comment se module spatialement cette valeur régionale ? Il est en effet paradoxal d'affecter la même valeur d'ETR à tous les bassins versants, alors que l'on a vu que la capacité de rétention des sols, la distribution des racines, la structure du peuplement forestier, les comportements hydrologiques et toute "l'économie de l'eau" étaient très variables.

2.5.2 L'INTERCEPTION

La disparition de l'interception de la pluie par le couvert végétal est le premier phénomène directement perceptible après la suppression de la forêt. Il est donc capital pour l'expérimentation ECEREX de fixer l'ordre de grandeur de ce paramètre dans le bilan hydrologique.

La hauteur de pluie interceptée par le feuillage (I_{tf}) est généralement connue par soustraction de la pluie mesurée sous forêt, dite précipitation interne (P_{if}), à la pluie incidente totale (P_{ia}) mesurée dans une clairière proche ou au sommet d'une tour. La précipitation interne est connue par la moyenne sur un nombre variable de pluviomètres disposés sous forêt. Les pluviomètres sont placés aléatoirement ou selon une maille régulière et peuvent être fixes pendant toute la durée de la mesure ou déplacés périodiquement pour mieux échantillonner le champ de variation de la précipitation interne. La périodicité des relevés peut être très variable selon les objectifs de l'expérience (bilan global ou étude phénoménologique), et celle-ci va de l'échelle de l'averse au cumul mensuel. Compte tenu de l'hétérogénéité de la précipitation interne, celle-ci est d'autant mieux connue que le nombre de pluviomètres est grand. Cette règle souffre d'une limitation pratique, car dès que le nombre dépasse l'ordre de 30, le temps requis pour le relevé des appareils devient prohibitif et les précipitations, qui ne manqueront pas de se produire en climat humide pendant cette phase de relevé, remettent en question le gain de précision obtenu par le grand nombre de capteurs. On peut remarquer que dans la plupart des expérimentations, qui ont été menées avec un grand nombre de pluviomètres (> 25), les relevés sont faits à cadences hebdomadaire ou bimensuelle, ce qui permet d'attendre une période de temps sec

pour les relevés. C'est en partie pour pallier à cette limitation que certains auteurs ont utilisé des surfaces réceptrices de grandes dimensions, en matière plastique, parfois connectées à des enregistreurs pluviographiques ou débitométriques et qui permettaient également de s'affranchir de la micro-hétérogénéité du phénomène.

Quelques tentatives originales ont été faites pour mesurer l'interception par d'autres principes. Hancock et Crowther (1979) ont équipé des branches avec des jauges de contraintes capables de mesurer la charge additionnelle de l'eau interceptée. Mais la méthode ne dispense pas d'un étalonnage ... par pluviomètres, et il reste l'épineux problème du passage de l'arbre à la forêt. Olszyska et Crowther (1981) ont proposé d'utiliser l'absorption du rayonnement Gamma pour estimer la quantité d'eau retenue par la végétation. Cette technique a également été utilisée par Calder et Wright (1986).

Le nombre d'études d'interception est impressionnant. Dans une synthèse de ces travaux, Bruijnzeel (1987) en compte plus de 100 ! - dont 70 concernent des peuplements "naturels". Il faut cependant noter que la majorité des cas étudiés concerne les forêts de zone tempérées, souvent à peuplements monospécifiques (feuillus, conifères ou vergers). Ces travaux ont permis l'ébauche et le perfectionnement de la méthodologie, et à ce titre, ils sont d'un immense intérêt pour les zones tropicales.

Sans la moindre chance d'être exhaustif, on peut citer les compilations de Helvey et Patric (1965) avec une synthèse portant sur une trentaine d'expériences dans l'Est des USA et celle postérieure et plus complète de Zinke (1967), ainsi que Leyton et al. (1967) ; Rutter et al. (1971) ; Bultot et al. (1976) ; Huttel (1972) ; Girard (1974) ; Rutter et al. (1975) ; Calder et Rosier (1976) ; Calder (1977) ; Gash et Morton (1978) ; Schulze et al. (1978) ; Gash et al. (1980) ; Pearce et Rowe (1981) ; Rowe (1983) ; Caldeiros de Miranda et Butler (1986) ; Dolman (1987).

En ciblant les travaux portant sur la forêt primaire tropicale humide, de préférence sud-américaine, on relève les travaux de Franken et al. (1982a) au Brésil sur le bassin-représentatif de l'INPA près de Manaus, qui ont mené une campagne de mesure entre septembre 1976 et septembre 1977 avec 20 pluviomètres de 100 cm² sous forêt, relevés 1 fois par semaine pendant 1 an, associés avec 1 pluviographe de 200 cm² en clairière. Les résultats sont $P_{ia} = 2570$ mm, $P_{if} = 2062$ mm (80,2%) et $I_{tf} = 508$ mm (19,8%).

Sur le même site, Franken et al. (1982b) ont renouvelé l'expérience pendant 1 an (04-1980 à 04-1981) avec 30 pluviomètres de 100 cm² sous forêt et 3 pluviomètres en clairière pour la mesure de la pluie incidente, avec des relevés à périodicité hebdomadaire. L'expérimentation s'est également attachée à la mesure de l'écoulement le long des troncs (Elt) sur 37 arbres. Le résultat global annuel s'exprime par $P_{ia} = 1706$ mm, $P_{if} = 1338$ mm (78,4%), $I_{tf} = 362$ mm (21,3%) et $E_{lt} = 6$ mm (0,3%). Toutes ces valeurs sont très proches de celles de la première expérimentation de Franken et al (1982a). Les auteurs proposent une formulation analytique de l'interception à l'échelle hebdomadaire, de la forme $P_{if} = 0,82 P_{ia} - 2,44$ (Pif et Pia en mm).

En Amazonie Vénézuélienne, Jordan et Heuvelop (1981) ont mesuré l'interception pendant 2 ans avec 4 gouttières de PVC de 6 m de long (soit 3,5 m² de surface réceptrice) et l'écoulement le long des troncs sur 38 arbres. Pour une pluie incidente annuelle de 3664 mm, ces auteurs obtiennent une valeur Pif = 3188 mm (87%), et des valeurs étonnamment faibles de Itf = 184 mm (5%), et fortes de Elt = 292 mm (8%). Selon Franken et al. (1982b) la valeur élevée de Elt, jugée irrecevable, provient du mode d'extrapolation des 38 valeurs d'écoulement le long des troncs, bien adapté à des peuplements monospécifiques des forêts tempérées, mais qui ne convient pas pour des peuplements diversifiés de la forêt primaire. En ce qui concerne la valeur de l'interception (184 mm) qui nous paraît singulièrement faible, il est tentant d'incriminer le caractère non conventionnel du dispositif de mesure utilisé.

Jackson (1975) a analysé en détails les résultats de mesures d'interception faites antérieurement en forêt primaire dans le nord de la Tanzanie (Jackson, 1971). D'avril à septembre 1969, la précipitation interne sous forêt (Pif) mesurée avec 20 pluviomètres, a représenté 16,3% (soit 137 mm) sur un total incident (Pia) de 839 mm. Il a mis en évidence des différences d'interception statistiquement significatives entre le jour et la nuit et en fonction de l'intensité pour conclure : " *il est difficile d'échapper à la conclusion qu'il y a peu d'intérêt à utiliser des modèles très complexes... et qu'un modèle logarithmique simple prenant en compte l'ensemble du jeu de données n'est pas moins valable qu'un autre.*" (Jackson, 1975). Le modèle d'interception est proposé à l'échelle de la pluie de l'averse P sous la forme :

$$Itf = 0,5419.Ln(P)+0,85.$$

L'écoulement le long des troncs a également été mesuré pendant cette expérimentation et ce terme a représenté de l'ordre de 1% de la pluie incidente totale.

Cette très faible importance de l'écoulement le long des troncs (Elt) est une conclusion assez générale en forêt tropicale humide, mais l'appréciation de cette quantité n'est pas simple, car au-delà de la difficulté à mesurer cet écoulement sur des arbres isolés, l'extrapolation de ces valeurs ponctuelles à l'ensemble de la forêt reste toujours imprécise et sujette à contestation.

En Guyane Française, l'interception a été mesurée à la Crique Grégoire (1974-75) et à ECEREX (1981-82).

Les résultats globaux de la première campagne de mesure ont été cités par Roche (1982a). Les mesures ont été faites pendant 1 an au moyen de 32 pluviomètres fixes, répartis aléatoirement selon 3 amas comportant respectivement 13, 13 et 6 pluviomètres. Roche considère que l'interception annuelle de la forêt est de 15%, soit 470 mm pour une pluie annuelle de 3060 mm. L'écoulement le long des troncs est resté inférieur à 1%.

Ducrey et Finkelstein (1983) ont mesuré l'interception à ECEREX sur le bassin versant F à l'aide de 21 pluviomètres, dont 10 sont restés fixes et 11 ont été déplacés 7 fois sur les mailles d'un quadrillage de 10 m x 10 m. Les relevés journaliers se sont poursuivis de janvier 1981 à octobre 1982.

A partir d'un échantillon limité aux journées à une seule averse, ces auteurs ont établi une relation linéaire, donnant la précipitation interne en fonction de la pluie incidente, à savoir :

$$P_{if} = 0,909.P_{ia} - 0,16 \quad (r^2=0,993 \quad n=135)$$

Les tentatives de prise en compte de l'intensité maximum sur 30 minutes, de l'intensité moyenne sur toute la durée de l'averse et la durée de l'averse n'ont pas amélioré cette estimation. 6 sites sur 10 ont conservé un rapport "précipitation interne/précipitation incidente" jugé constant pendant la durée des mesures alors que ce rapport a évolué de façon très différente sur les autres sites, avec par exemple une valeur ponctuelle passant de 150% à 50% en deux mois. N'ayant pu mettre en évidence de variations cyclique ou saisonnière pour un site donné, les auteurs considèrent pleinement justifiée la méthode des pluviomètres mobiles et estiment avoir échantillonné la précipitation interne sur 147 sites différents. Cette démarche a permis de préciser la variabilité de la précipitation interne qui a oscillé selon les sites entre 10% et 160 % de la pluie incidente (figure 2.5.1).

En utilisant l'ensemble de l'information, Ducrey et Finkelstein estiment la précipitation interne à 92,8 % de la précipitation incidente totale. L'écoulement le long des troncs, mesuré sur 15 arbres, a été estimé à 0,6 % de la pluie incidente en utilisant les données de l'inventaire forestier exhaustif du bassin versant par espèces et par classes de diamètres (CTFT, 1977).

La proportion de la pluie incidente interceptée par le feuillage est donc de 6,6 %.

L'écart entre les rapports d'interception obtenus par Ducrey et Finkelstein (6,6%) et par Roche (15%) tous deux relatifs au même écosystème forestier amazonien de Guyane amènent à s'interroger sur cette différence : variabilité interannuelle de l'interception, hétérogénéité de la forêt ou artefact de mesure ?

A propos d'une influence de la variabilité interannuelle, on notera que l'expérimentation de Grégoire a porté pour l'essentiel sur l'année 1974 (mars 1974 à février 1975). La pluie incidente en clairière a été de 3051 mm au pluviographe (P16) et de 2960 mm au pluviomètre associé de la station météo. Ces valeurs correspondent à une pluie annuelle déficitaire, la moyenne expérimentale 1968-76 étant 3690 mm. En raisonnant en termes de systèmes hydrologiques, on peut établir une analogie entre le couvert forestier et le complexe physique du bassin versant, qui répondent au signal de la pluie en retenant une certaine quantité d'eau et en délivrant respectivement en sortie la précipitation interne et l'écoulement superficiel. Si pour une année donnée, l'abondance et la répartition des pluies aboutissent à des écoulements élevés par suite de fréquents dépassements de la capacité d'absorption et de régulation du bassin versant, on peut penser qu'il en sera de même pour la voûte forestière et que, dans ces conditions, celle-ci produira un fort pourcentage de précipitation interne. Or, l'année 1974 s'individualise nettement comme celle du plus faible coefficient d'écoulement de toute la période 1970-1976. Par analogie, on peut penser que l'interception, dont la période de mesure porte essentiellement sur l'année 1974, aurait été plutôt forte, et que la valeur de 15% mesurée cette année-là serait au dessus de la moyenne.

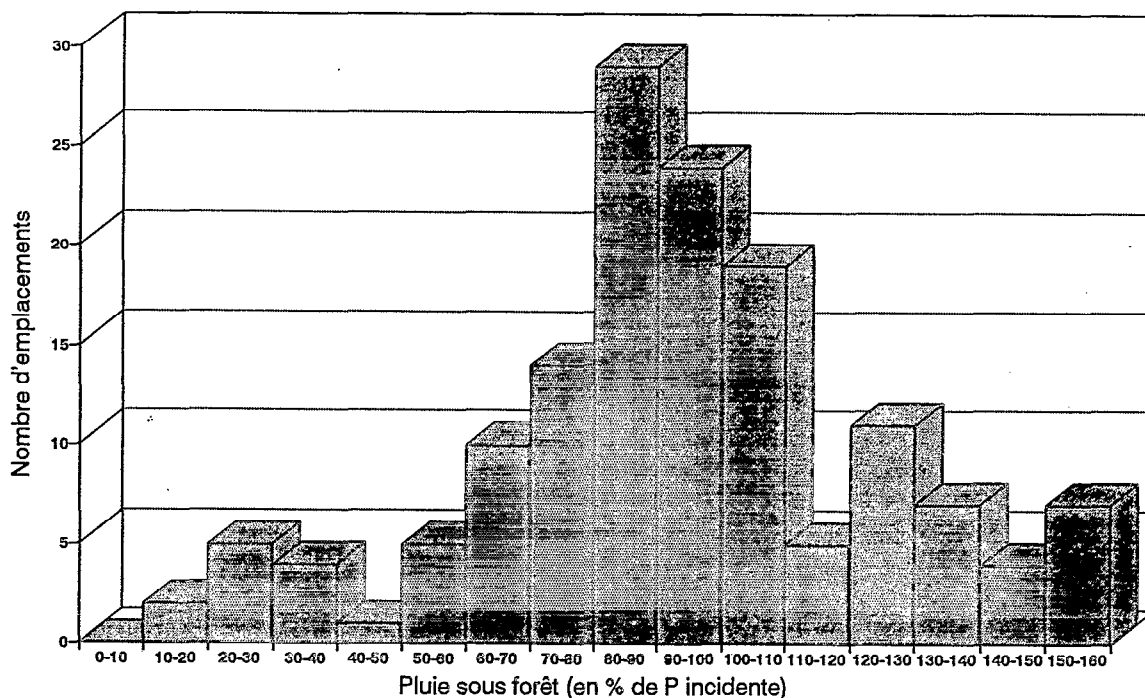


Figure 2.5.01 : Répartition fréquentielle de la précipitation interne exprimée en % de la pluie incidente pour les 147 sites échantillonnés

source : Ducrey et Finkelstein (1983)

Il est déconcertant de constater qu'on aboutit à des conclusions similaires à propos de la période de mesure de Ducrey et Finkelstein (1981-1982). Que l'on considère les pluies totales, les moyennes pluviométriques glissantes des périodes pluvieuses (Cf. 2.4.4.1) ou les écoulements des bassins versants (Cf. 2.4.4.2), il faut convenir que l'année 1981 est la plus déficitaire de la période étudiée à ECEREX et que l'année 1982 est faible à médiane selon le critère considéré. L'espérance de l'interception moyenne serait ainsi inférieure aux 6,6% mesurés par Ducrey et Finkelstein.

On peut tenter d'imputer cette différence aux caractéristiques du couvert forestier et donc de l'architecture de la forêt. On a vu que la phytomasse du bassin F était parmi les plus faibles des 10 bassins (Cf. 1.2.5) - ce qui constitue un indice allant à l'encontre du sens souhaité -, mais à lui seul ce critère est inadapté pour conclure, lorsque l'on sait que 90% de cette phytomasse sont constitués par les troncs des gros arbres dont la masse n'est pas forcément corrélée avec le taux de couverture et l'épaisseur du couvert !.

Dans un aboutissement coutumier des investigations sur le milieu naturel, mais qui n'en demeure pas moins frustrant, il reste à conclure que la démarche préalable de mesure des paramètres du milieu est imprécise et que la simple confrontation des différentes sources d'informations pose problème.

La voie d'une piètre consolation généralement empruntée par les chercheurs consiste donc à quantifier leur degré d'impuissance, c'est à dire dans le cas présent, à évaluer l'imprécision avec laquelle l'interception est connue.

Sur les données des forêts Appalachiennes, et en faisant l'hypothèse implicite d'une répartition normale des précipitations internes, Helvey et Patric (1965) avaient calculé le nombre de pluviomètres (de 8" de diamètre) nécessaires pour obtenir la précipitation interne moyenne avec une erreur-type inférieure à 5%. Pour la saison végétative, ce nombre variait entre 46 pluviomètres pour des précipitations internes inférieures à 0,5 mm, et 13 pluviomètres pour des précipitations supérieures à 1,5 mm.

Nous avons repris les valeurs des précipitations internes aux 32 pluviomètres de Grégoire (tableau 2.5.03). De mars 1974 à février 1975, la moyenne des précipitations internes est de 2582 mm. Pendant cette même période, la pluie incidente a été de 3051 mm au pluviographe P16 de la clairière météo et de 2960 mm au pluviomètre associé, soit une différence de 3% conforme aux performances des équipements de mesure. Selon la référence choisie pour la précipitation interne, l'interception est de 469 mm (15,4%) ou de 377 mm (12,7%).

La régression de la précipitation interne moyenne journalière en fonction de la pluie incidente fait l'objet de la figure 2.5.02. A défaut de meilleure information, cette relation permet de calculer la précipitation interne à l'échelle journalière :

$$P_{if} = 0,945 P_{ia} - 0,99 \quad (r^2=0,99 \quad n=252)$$

En considérant que la pluie au sol en un point donné résultait d'un filtrage aléatoire de la précipitation incidente par le couvert forestier, nous avons étudié la fonction de répartition de la précipitation interne en termes de probabilité. Un modèle gaussien-logarithmique ($m=3,3397$, $\sigma=0,115$) a été ajusté à la distribution des 32 précipitations internes (figure 2.5.03)

Selon ce schéma, la probabilité de recevoir en un site moins de pluie qu'en plein découvert est de 0,75. Il y a une probabilité 0,01 d'observer une pluie de 4700 mm soit 157 % de la pluie incidente. Il est tout à fait cohérent que Ducrey et Finkelstein aient pu observer de telles "gouttières" sur leur échantillon. Par contre la distribution ECEREX comporte beaucoup plus de sites abrités qu'à Grégoire, où la probabilité d'une interception de 50% est de l'ordre de 0,01, alors qu'à ECEREX les rapports d'interception de la pluie incidente inférieurs ou égaux à 50% ont une fréquence expérimentale 8 fois supérieure (12 sites sur 147). Ces taux d'interception très faibles, inexistant à Grégoire, expliquent la faible interception globale obtenue à ECEREX.

D'une façon générale, la dispersion des coefficients ponctuels d'interception est plus large à ECEREX qu'à Grégoire. Cette situation ne signifie pas forcément que l'échantillonnage du milieu est plus serré à ECEREX, mais pourrait provenir de la courte durée des observations sur les sites mobiles. Pour un site donné, la variation au jour le jour du coefficient de précipitation interne est erratique, mais la représentation du rapport de la précipitation interne cumulée avec la pluie incidente cumulée depuis l'origine des observations permet de constater qu'il faut attendre un certain temps (de l'ordre de 100 jours), pour voir s'établir une relative stationnarité de l'interception et la "véritable" caractéristique de la précipitation interne à ce site : rapport d'interception stable ou évoluant progressivement sauf accident de type chablis. On a figuré le comportement du site le moins arrosé (P12), du site le plus arrosé (P29) et d'un site intermédiaire proche de la précipitation interne moyenne (figure 2.5.04).

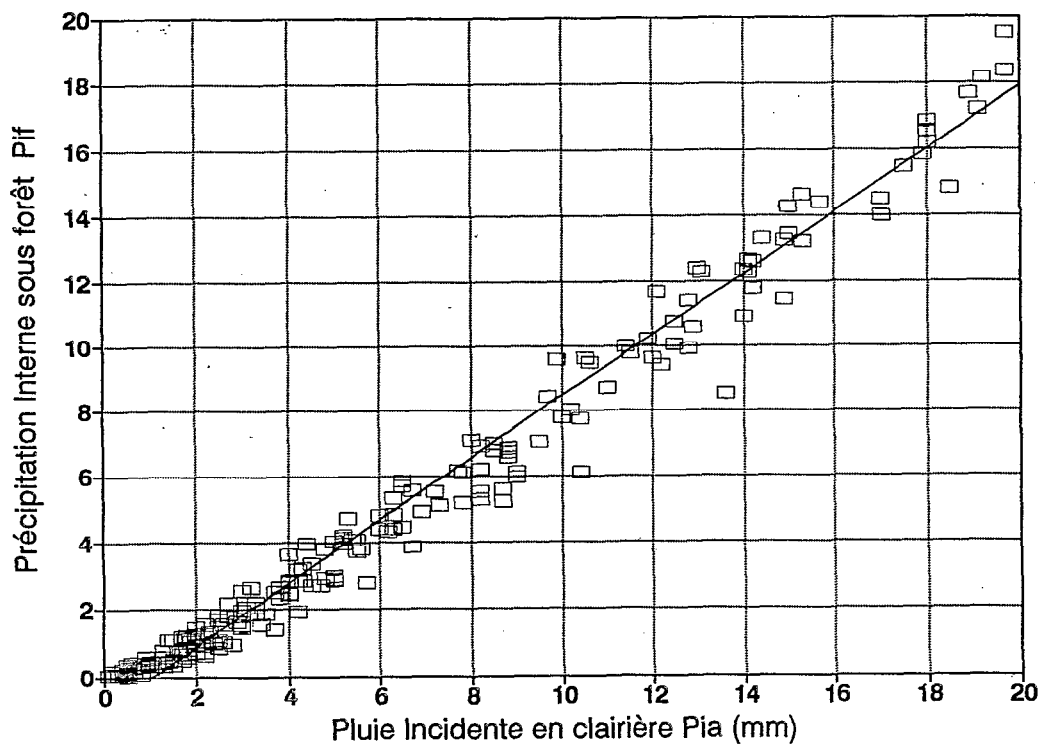
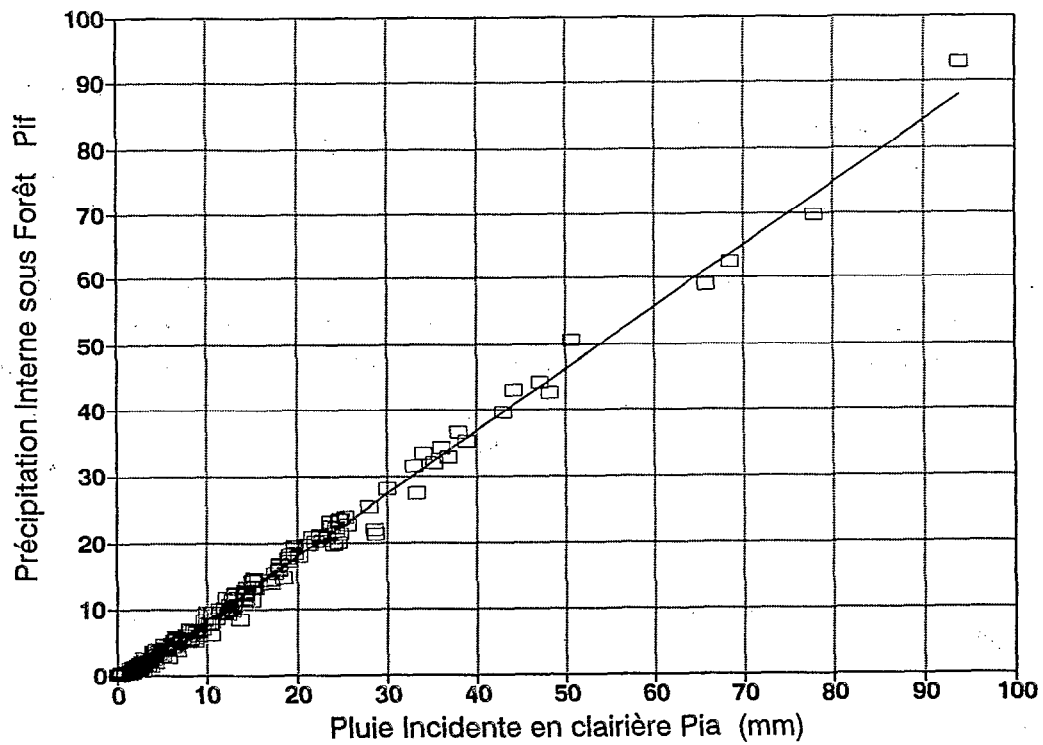


Figure 2.5.02 : Régression entre Précipitation Incidente en clairière (Pia) et Précipitation Interne sous Forêt (Pif)

Crîque Grégoire - mars 1974 à février 1975 - valeurs en mm

$$Pif = 0,945 Pia - 0,99 \quad (n = 252)$$

Pia = pluie journalière au pluviomètre de la clairière météorologique

Pif = moyenne journalière des 32 pluviomètres sous forêt

n° pluvio.	P. annuelle	Pxx/P Clair
P12	1523	0.51
P15	1547	0.52
P20	1584	0.54
P25	1754	0.59
P17	1918	0.65
P03	1981	0.67
P02	2028	0.69
P04	2076	0.70
P23	2123	0.72
P06	2152	0.73
P28	2184	0.74
P05	2272	0.77
P01	2341	0.79
P16	2390	0.81
P10	2529	0.85
P30	2564	0.87
P07	2571	0.87
P26	2588	0.87
P27	2603	0.88
P21	2647	0.89
P13	2676	0.90
P31	2686	0.91
P11	2687	0.91
P09	2735	0.92
P18	2817	0.95
P08	3070	1.04
P19	3279	1.11
P24	3645	1.23
P32	3796	1.28
P14	3861	1.30
P22	3883	1.31
P29	4121	1.39
P. interne	2582	0,87
P. Clairière	2960	1,00

**Tableau 2.5.03 : Précipitation interne des 32 sites étudiés à Grégoire
Précipitation interne moyenne, et pluie incidente au pluviomètre en clairière.
Rapport de la pluie au site Pxx et de la pluie incidente.**

Période de mars 1974 à février 1975. valeurs en mm

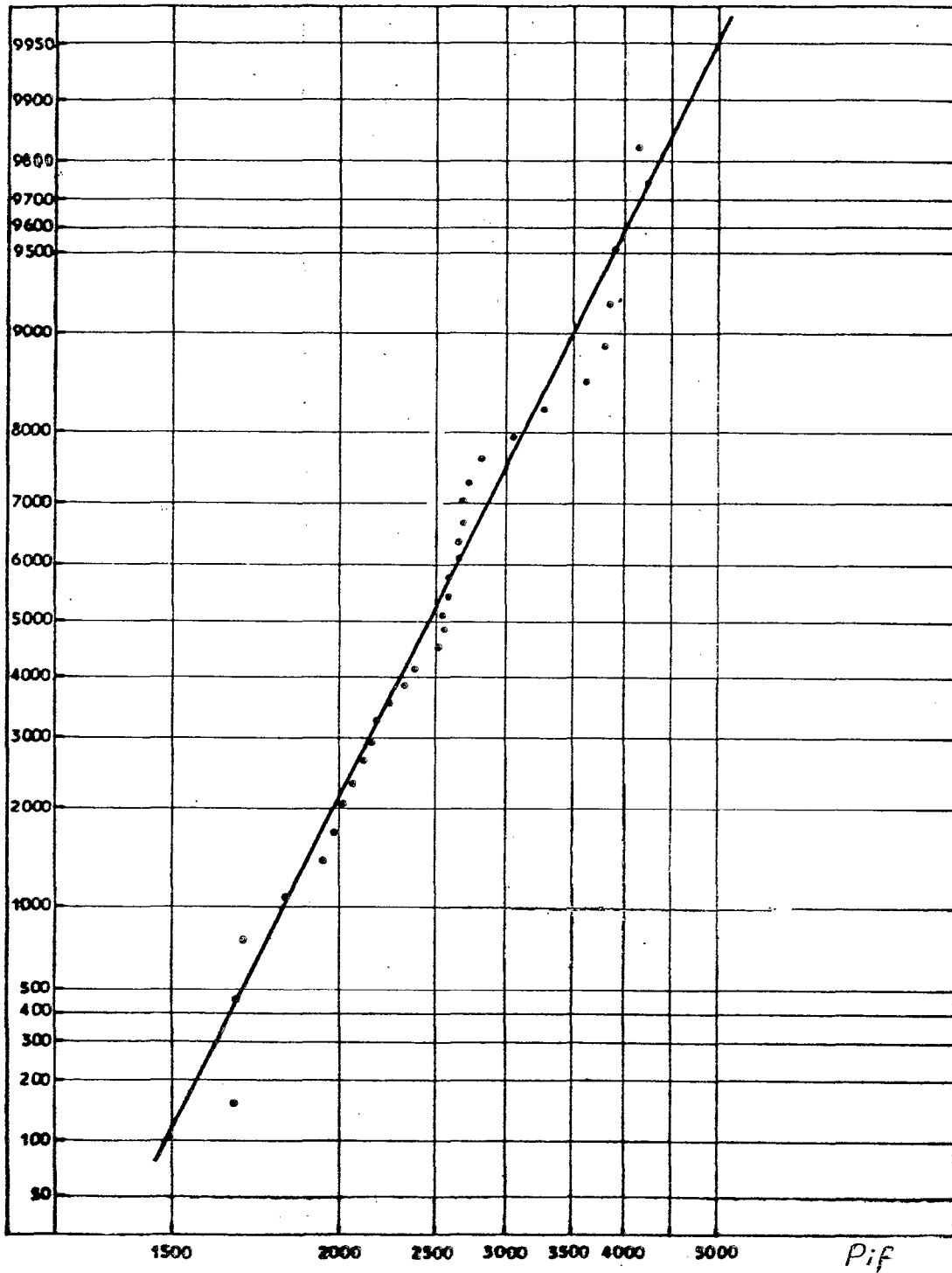
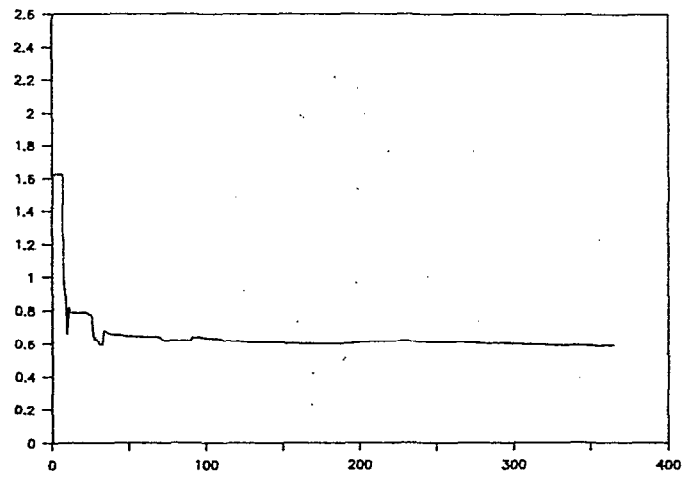
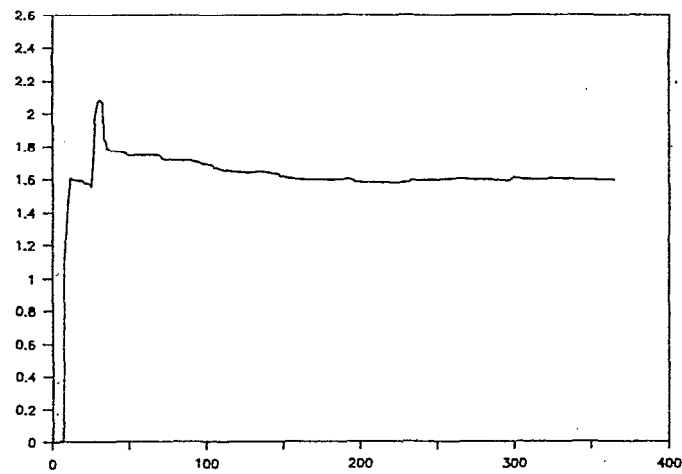


Figure 2.5.03 : Répartition spatiale de la précipitation interne à Grégoire
 Distribution de Gauss pour la variable $\text{Log}(P_{if})$ - $m = 3,397$ (2496 mm) - $\sigma = 0,115$

P12



P29



P04

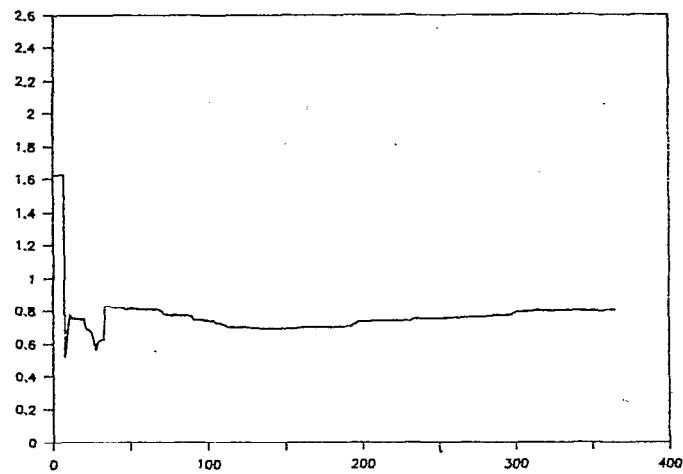


Figure 2.5.04 : Evolution de la précipitation interne ponctuelle en fonction du temps

en abscisses : temps en jours depuis l'origine des observations

en ordonnées : rapport de la précipitation interne cumulée, à la pluie incidente cumulée.

$$\text{Pour le rang } j, Y(j) = [\sum P_{if}(r), r=1,j] / [\sum P_{ia}(r), r=1,j]$$

On a étudié la variation de la précipitation interne moyenne $Pif(n,p)$ et de l'interception $Itr(n,p)$ en fonction du nombre n de pluviomètres, en effectuant l'inversion de la fonction de distribution pour p tirages au hasard dans l'intervalle $]0,1[$. On a pris $p = 200$ et le calcul a été fait pour $n = 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 75, 100, 250, 500$ et 1000 pluviomètres. On a calculé expérimentalement l'erreur relative commise sur la précipitation interne et sur l'interception au seuil $0,1$ (en admettant que la pluie incidente totale était connue sans erreur). Les résultats de cette simulation font l'objet du tableau 2.5.04 et du graphique 2.5.05. On en tire les valeurs suivantes (tableau 2.5.05) :

Tableau 2.5.05 : Erreur relative sur la précipitation interne et sur l'interception, en fonction du nombre de pluviomètres, au risque $0,1$

nombre de pluviomètres	erreur sur précipitation interne (%)	erreur sur interception (%)
10	14,5	97
20	10,8	70
30	8,9	58
50	6,8	45
100	4,7	32

Ainsi, la précipitation interne à Grégoire est connue au risque $0,1$ avec une précision meilleure que 9% , ce qui induit une imprécision de 55% pour la hauteur interceptée. Ces estimations sont valables si les pluviomètres sont restés à poste pendant un an et il n'est donc difficile de s'en servir pour tester les résultats de Ducrey et Finkelstein. En étant sévère, et en ne prenant en compte que les 10 pluviomètres fixes qui ont un rapport moyen précipitation interne/précipitation incidente de $0,89$, on peut dire que l'estimation de ce coefficient au risque $0,1$ est compris entre $0,76$ et 1 , alors que ce rapport moyen à Grégoire ($0,85$) est dans l'intervalle $0,77-0,92$. C'est dire que les 2 estimations ne seraient pas différentes. Cette conclusion consensuelle n'est pas complètement satisfaisante, puisqu'elle ne peut utiliser l'information des pluviomètres mobiles.

Tableau 2.5.04 : Moyenne et écart-type de la précipitation interne en fonction du nombre de pluviomètres, calculée par inversion de la fonction de distribution de la précipitation interne, sur une période fictive de 200 ans

nombre de pluviomètres	moyenne mm	écart-type mm
5	2582	299
10	2564	210
15	2596	193
20	2586	152
30	2582	126
40	2583	119
50	2589	110
75	2591	90
100	2589	74
250	2583	45
500	2588	33
1000	2586	22

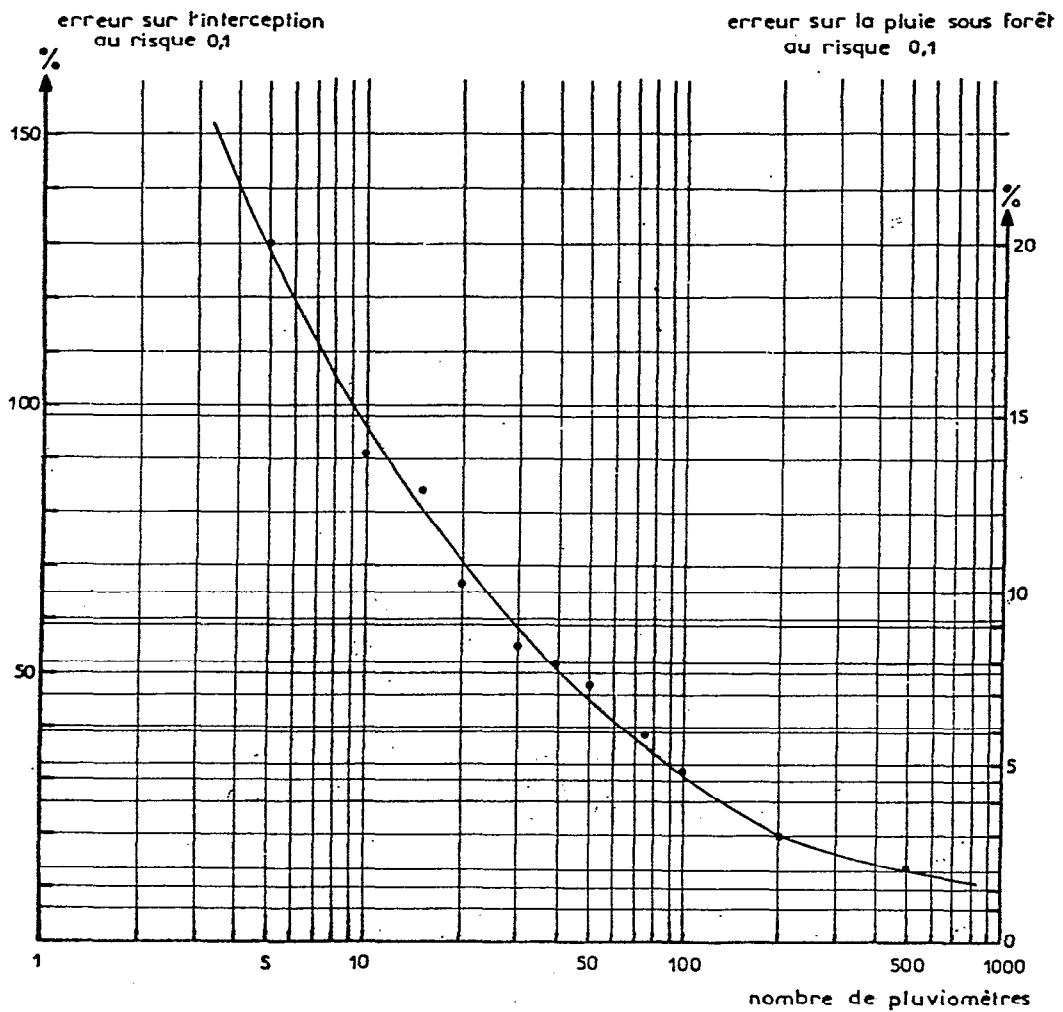


Figure 2.5.05 : Précision de l'estimation de la précipitation interne et de l'interception au risque 0,1, en fonction du nombre de pluviomètres

TROISIEME PARTIE :

PROTOCOLE EXPERIMENTAL ET METHODES D'EVALUATION

DES EFFETS PROVOQUES PAR L'EXPERIMENTATION

La troisième partie présente le protocole des expérimentations, telles qu'elles ont été mises en oeuvre sur les bassins, et les procédés utilisés pour calculer les écoulements qui auraient été observés sur les bassins traités, sous forêt et dans les conditions climatiques de l'*Epoque* des traitements.

- Le chapitre 3.1 décrit les protocoles des différentes interventions effectuées sur les 8 bassins voués à l'expérimentation (justification du scénario retenu, modalités d'exécution et dates des diverses interventions).
- Le chapitre 3.2 évoque la problématique de l'expérimentation hydrologique sur bassin versant. Les résultats livrés par l'expérimentation résultent de la confrontation des données observées, et de données calculées, avec une certaine incertitude, par un modèle hydrologique. Un point bibliographique est consacré à la méthode utilisant l'information d'un bassin témoin pour la reconstitution des écoulements naturels du bassin expérimental : *paired watershed technique*, ou méthode des *bassins appariés* avec calage d'algorithmes entre bassin témoin et bassin expérimental en *Epoque Verte*.
- Le chapitre 3.3 est consacré à l'étude des algorithmes permettant de reconstituer pendant les *Epoque Rouges et Jaune*, les écoulements qui auraient été ceux des bassins traités dans les conditions *Vertes* originelles. L'information utilisée est constituée par les écoulements, individualisés à l'échelle de la crue élémentaire, et appariés crue par crue, entre bassins témoins et bassins traités. Ces séries ont été mises en régressions linéaire ou bilinéaire (correction par l'écart pluviométrique entre bassins). La précision des résultats fournis par ces "modèles" à différentes échelles de temps (période annuelle ou événement élémentaire), a été contrôlée par la procédure des calages et validations croisés.

3.1 JUSTIFICATION ET DESCRIPTION DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL

3.1.1 LE "DEFRICHEMENT PAPETIER"

Ce sont les perspectives d'exploitation de la forêt pour alimenter une industrie de pâte à papier qui sont à l'origine de l'expérimentation ECEREX. Le protocole prévoyait donc, dans un premier temps, de procéder à une exploitation forestière selon les méthodes et dans les conditions effectivement utilisées dans cette filière papetière, et dans un deuxième temps de répondre à la question du devenir des espaces après exploitation, et en particulier des possibilités techniques d'y implanter des aménagements productifs ou conservatifs, selon des spéculations économiques vraisemblables dans le contexte de la Guyane française de la fin des années 70.

Pour ce qui concerne les conditions de la déforestation, le consortium ARBOCEL avait fourni à la Recherche un modèle de ce que serait une exploitation de la forêt par cette société. En effet, désireux d'évaluer les caractéristiques du gisement que leur concédait le permis d'exploitation, les techniciens du Groupement, sous le contrôle scientifique du CTFT, avaient procédé en 1976 à une simulation d'exploitation, en bordure Nord de la Piste de St. Elie sur une surface de 10 hectares, dite parcelle ARBOCEL. Les conditions de cette exploitation, bien identifiées (Guiraud, 1979), seront reproduites le plus fidèlement possible sur les bassins versants. On peut en rappeler sommairement les phases successives :

- Un inventaire forestier préalable et exhaustif est réalisé : il met en évidence la présence de 240 tiges de plus de 20 cm de diamètre à l'hectare, représentant 150 espèces d'arbres. Les 21 espèces les plus fréquentes constituent 75 % de l'effectif total.
- Tous les individus de plus de 20 cm de diamètre sont coupés à la scie à chaîne, à l'exception des arbres du genre *Licania* (nom vernaculaire "gaulette"), dont le bois contient trop de silice pour être utilisable. Les troncs sont façonnés en grumes.
- Des pistes de débardage sont ouvertes par un buteur à chenilles léger (type Caterpillar D4). L'extension moyenne de ces pistes de débardage sur la parcelle ARBOCEL était de 240 m par hectare. Les grumes sont halées sur les pistes par un débusqueur articulé à pneus (Skidder ou "Timber-Jack") vers les sommets d'interfluves où elles sont stockées sur parc en attendant leur chargement sur les camions-grumiers.

Le protocole d'évaluation ARBOCEL s'arrête à ce stade. Il semble que l'on soit là en présence d'un modèle d'exploitation de la forêt associant la fabrication de pâte à papier et la production de bois d'oeuvre.

Dans l'expérimentation ECEREX, on appellera cette phase "exploitation forestière" ou "*EXPLOITATION*".

- Au terme de cette phase, tous les bois jugés économiquement utilisables ont été récupérés, mais la coupe ainsi réalisée n'est pas une coupe rase au sens forestier des pays tempérés, et le terrain reste très encombré et s'avère impropre à toute spéculation économique ultérieure, y compris le recrû naturel de la forêt : restent sur pied 36 *tiges de Licania* par hectare (équivalent à $30 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$), sans intérêt économique, mais créant les conditions de repousse d'une forêt largement enrichie avec ces espèces. Les houppiers, très développés en forêt tropicale, sont laissés sur place, ainsi qu'une grande quantité de bois oubliés ou brisés, représentant $60 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ pour un volume débardé de $192 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ (cubages bruts sur écorce). Tout le système racinaire, du moins celui des arbres abattus à la scie à chaîne, est en place. Pour implanter des aménagements agricoles, sylvicoles ou pastoraux selon les standards définis par les organismes de recherche ou de développement (DDA, ONF, CTFT, IRFA, INRA, etc), une phase supplémentaire est requise, que nous appellerons dans la suite "DEFRICHEMENT".
- Le défrichage est réalisé par des chenillards lourds du type Caterpillar D8 ou D9, équipés à l'avant d'une lame forestière tranchante et d'un éperon (lame K/G Rome) permettant de trancher les troncs à la base et d'une barre d'appui pour basculer les grès arbres restés sur pied. A l'arrière, le tracteur est équipé de puissantes griffes hydrauliques permettant de dessoucher. Dans un deuxième passage, un râteau andaineur type Fleco est utilisé pour rassembler les bois et les racines en lignes parallèles aux courbes de niveaux. Dès que le temps le permet, ces andains sont brûlés. Le terrain est alors complètement dégagé et se présente avec un sol complètement nu, en terre meuble et sans racines.

3.1.2 LES AMENAGEMENTS

La figure 3.1.01 présente un synoptique de l'expérimentation ECEREX

3.1.2.1 Le recrû naturel

L'"aménagement" élémentaire consiste à ne rien faire, c'est à dire à laisser la forêt repousser spontanément après exploitation, sans intervention humaine, ce qui serait probablement le destin de la plus grande partie des surfaces déforestées. Néanmoins, les protocoles adoptés pour l'étude du recrû naturel prévoyaient d'effectuer un défrichage postérieur à l'exploitation, pour uniformiser les conditions initiales entre bassins versants, et tester ainsi le recrû dans les conditions les plus sévères d'une coupe rase, l'objectif des forestiers et des écophysiologistes étant d'étudier l'évolution différentielle d'un recrû brûlé et d'un recrû non brûlé.

Les bassins D et E, voisins géographiques et parents proches au plan hydro-pédologique, ont été voués à ces 2 spéculations (recrû naturel après défrichage, brûlé pour E et non brûlé pour D).

En fait, une succession de contretemps malencontreux avec les entrepreneurs chargés de l'exploitation et du défrichage, ont donné à l'expérimentation une physionomie un peu différente de celle qui avait été idéalement programmée :

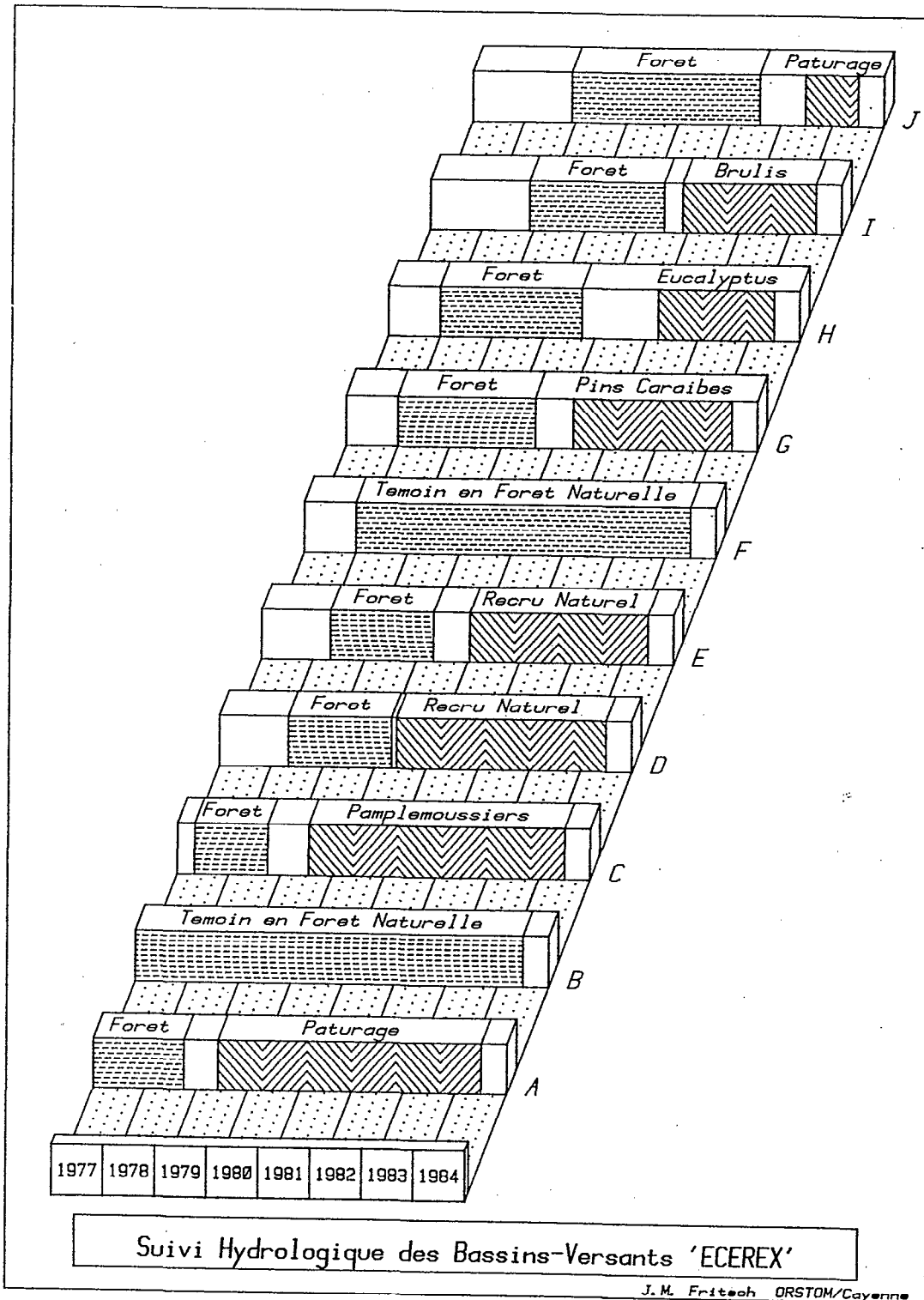


Figure 3.1.01 : Diagramme synoptique de l'expérimentation ECEREX

- le bassin D n'a pu être débardé au débusqueur à pneus, et l'exploitation et le défrichage ont été menés simultanément avec un boteur à chenilles Komatsu D85. Sur ce bassin, il n'y a donc pas eu d'utilisation d'engins à pneus réputés pour leur impact traumatisant sur le milieu.

Le calendrier des interventions s'établit comme suit :

- mai 1978 : début des observations hydrologiques en forêt naturelle,
 - mai 1980 : abattage des gros arbres,
 - septembre 1980 : exploitation et défrichage au chenillard.
- Sur le bassin E, la phase d'exploitation s'est déroulée comme prévu, mais le défrichage agricole postérieur n'a pu être réalisé (faillite de l'entreprise). Le bassin est donc resté en l'état post-exploitation, très encombré, avec sur les versants les entailles des pistes de débardage qui n'ont pas été lissées par les engins de défrichage. Il en résulte une topographie bouleversée (une piste forme une banquette en milieu de versant rive droite et une autre traverse le talweg en léger remblai dans la partie supérieure du bassin versant). Ce scénario peut être assimilé à une exploitation forestière intensive pour la production de bois d'oeuvre.

Les principales interventions se sont déroulées aux dates suivantes :

- mai 1978 : début des observations en forêt naturelle,
- mai 1980 : abattage des gros arbres,
- janvier 1981 : exploitation au débusqueur.

3.1.2.2 La sylviculture d'essences à croissance rapide

Cette spéculation est fondamentale pour la crédibilité d'un projet d'exploitation papetière intensive et menée sur de grandes surfaces, et qui ne pourrait indéfiniment s'exercer aux dépens de la forêt naturelle : à terme, la matière première devra être recherchée dans ces plantations à croissance rapide, constituées de résineux et d'eucalyptus adaptés au climat tropical humide, en l'occurrence le pin caraïbe (*Pinus caraiëba*, var. *hondurensis*) et un eucalyptus en provenance de Malaisie (*E. urophylla* prov. Flores)

Pour cette expérimentation, le choix s'est porté sur les bassins adjacents G et H, très proches au point de vue fonctionnel, et possédant les conditions édaphiques les plus sévères de tout le dispositif (sols à dynamique hydrique superficielle très marquée, traces d'hydromorphie dans les horizons de surface sur pratiquement tout le versant, nappes affleurantes dans les fonds). Par ailleurs, cette expérimentation a été mise à profit pour tester l'impact de l'utilisation des engins lourds en saison des pluies. Si ce scénario pouvait paraître excessif dans la Guyane des années 70, lorsque les exploitants faisaient provision de grumes sur parc pendant les périodes sèches, on peut supposer qu'une très grosse entreprise comme celle du projet papetier, serait amenée à faire travailler son équipement de chantier durant le maximum de jours dans l'année, y compris en saison des pluies. L'utilisation d'engins lourds en période pluvieuse étant réputée très dommageable pour l'environnement, le test de ce mode d'exploitation avait été inclus dans le protocole ECEREX.

En pratique, ce scénario s'est révélé très difficile à mettre en oeuvre, particulièrement sur ces bassins à nappe phréatique affleurante. Si le débusqueur à pneus a pu remplir sa mission en allant chercher les grumes du bas-fond au câble, les chenillards défricheurs ont rencontré d'énormes difficultés. Sur le bassin G traité en premier, le défrichage a pu être mené tant bien que mal, l'un des engins restant sur la pente pour servir d'appui et permettre à l'autre tracteur de se débarrasser. Par contre, le traitement du bassin H, plus avancé dans la saison, n'a pu être achevé selon le protocole prévu, et les engins sont restés sur les versants. Il a subsisté une zone très bouleversée en forme de croissant, en saillie tout autour du talweg, composée de terre, de racines, de souches et de troncs. Cet obstacle ne s'est résorbé que très lentement, tout au long de l'expérimentation. On aura maintes fois l'occasion d'évoquer cette particularité dans le défrichage pour expliquer un comportement différencié de ce bassin H avec le bassin G.

Le calendrier des interventions s'établit comme suit :

- janvier 1978 : début des observations en forêt naturelle,
- juillet 1980 : abattage des arbres de plus de 40 cm de diamètre,
- décembre-janvier 81 : exploitation ; débardage au tracteur à pneus,
- février-mars 1981 : défrichage (Caterpillar D8-lame Rome et D6-râteau Fleco),
- mars-mai 1981 : creusement de trous (0,2 m x 0,2 m x 0,2 m) pour recevoir les plants en Fertil-Pot : 1600 trous sur le bassin G (mars-avril), et 1300 trous sur le bassin H (avril-mai).

La plantation des pins sur le bassin G a été faite en mai 1981 mais, pour cause de destruction des semis, celle des eucalyptus a dû être différée de près d'un an (nécessité d'attendre la fin de la saison sèche pour la plantation), et ceux-ci n'ont été introduits sur le bassin H qu'en février 1982.

3.1.2.3. Les pâturages

Le développement d'un élevage bovin semi-extensif, destiné à assurer l'auto-subsistance de la Guyane, voire d'en faire un pays exportateur sur le marché protégé des Antilles françaises, constituait un des objectifs du Plan Vert. Pour les technocrates du développement, la possibilité d'implanter des pâturages pérennes dans les traces des engins d'exploitation et de défrichage permettait tout à la fois d'assurer la viabilité de cette filière élevage et constituait une justification rétrospective de la suppression de la forêt.

Compte tenu des surfaces projetées en pâturages, cette preuve devait être faite sur les sols minces à dynamique superficielle et latérale, de loin les plus fréquents en Guyane, et qui seraient forcément sollicités par ce type d'aménagement. Les bassins A et J, qui satisfont bien à cette condition pédologique, ont été retenus pour ces spéculations.

Le bassin A a permis de tester la prairie pâturée avec le fourrage *Digitaria swazilandensis*, bouturé à la main. La charge animale, composée de 5 à 10 taurillons âgés de 9 mois et pesant en moyenne 210 kg à leur arrivée, aura varié entre 1200 et 3300 kg (Béreau et al., 1986). Le pâturage, débordant légèrement des limites topographiques du bassin, occupe 2 hectares et a été divisé en 5 parcelles clôturées, permettant d'assurer la rotation du bétail, avec une périodicité de l'ordre de 5 jours par parcelle.

Les différentes étapes de l'expérimentation correspondent aux dates suivantes :

- janvier 1977 : début des observations en forêt naturelle,
- août 1978 : abattage des arbres de plus de 40 cm de diamètre,
- novembre 1978 : exploitation (débusqueur à pneus) et défrichage (chenillard),
- mai 1979 : plantation du pâturage,
- janvier 1980 : introduction des animaux sur le bassin.

Le bassin J avait été promis à un essai de prairie fauchée, dans l'hypothèse de rendements agronomique et économique améliorés par rapport à la prairie pâturée. Ce bassin, mis en service dans les derniers jours de l'année 1979, a été défriché en décembre 1982 et la plantation du fourrage sélectionné (*Brachiaria decumbens*) n'a pu commencer qu'en juin 1983. A cette date, l'avenir d'une filière bovine à grande échelle en Guyane semblait compromis, et l'intérêt économique d'une spéculation de fourrages coupés paraissait hors de propos. Par ailleurs, la productivité des différentes espèces fourragères était alors bien connue à partir de l'expérimentation sur parcelles (Sarrailh, 1983). C'est pourquoi l'objectif de l'aménagement a été rectifié par le CTFT, et transformé en sylviculture d'essence à vitesse de croissance intermédiaire, en l'occurrence le framiré africain (*Terminalia ivorensis*). Cette modification, faite en juin 1984, se situe en dehors de la période prise en compte par nos données.

Le calendrier des interventions sur le bassin J s'établit comme suit :

- décembre 1978 : début des observations en forêt naturelle,
- août 1978 : abattage des arbres de plus de 40 cm de diamètre,
- décembre 1982 : exploitation et défrichage simultanés,
au boteur à chenilles, équipé d'une lame droite,
sortie des grumes du bassin versant par le chenillard,
- juin 1983 : plantation de *Brachiaria decumbens* en rive droite.

3.1.2.4 L'arboriculture fruitière

Nécessitant peu de main d'oeuvre et fournissant une production susceptible d'être transformée localement (conserves, jus de fruit) avec des installations de dimension modeste, l'arboriculture fruitière d'agrumes a souvent été considérée comme une option bien adaptée à un développement agricole de la Guyane. Le succès agronomique de la filière étant subordonné au choix de sols profonds et bien drainant, le bassin C présentait toutes les conditions favorables pour ce type d'essai. Il était prévu à l'origine de le transformer en verger de citrons verts, mais par manque de plants en quantité suffisante sur le marché local, c'est finalement le pomelo (pamplemousse à chair rose) qui a été retenu. Une couverture herbacée de *Brachiaria USDA*, a été implantée par bouturage, entre les plants d'agrumes.

Les principales interventions sur ce bassin C ont eu lieu aux dates suivantes :

- janvier 1977 : début des observations en forêt naturelle,
- août 1978 : abattage des arbres de plus de 40 cm de diamètre,
- novembre 1978 : exploitation (débusqueur à pneus) et défrichement (chenillard),
- mai-juin 1979 : creusement de 480 trous de 0,8 m d'arête (maillage 7 m x 5 m),
- juillet 1979 : plantations des pomelos,
- décembre 1979 : bouturage de *Brachiaria USDA* entre les plants de pomelos.

3.1.2.5 L'agriculture traditionnelle sur brûlis

Cette spéculation est aux antipodes des scénarios d'une réhabilitation d'espaces transformés par l'exploitation mécanisée de la forêt, et ne devait pas initialement être prise en compte dans les aménagements testés. Elle représente une option des "conservationnistes" du programme qui souhaitent inclure une référence alternative en matière d'utilisation de la forêt et d'en comparer les impacts et la productivité avec ceux des aménagements mécanisés. En particulier, cette expérience devait quantifier l'impact minimum et inévitable sur les écoulements et l'érosion, produit par la transformation de l'écosystème forestier en agrosystème productif.

L'unité expérimentale retenue est le bassin I, la mieux pourvue (après C) en sols à drainage vertical libre (60% de la surface). C'était donc se placer dans un contexte favorable à la réussite agronomique de l'expérimentation et, il faut en être conscient, sur un bassin versant aux potentialités d'écoulements de crue très faibles et sur lequel les risques d'érosion étaient donc réduits. Le protocole de réalisation d'un "abattis" traditionnel prévoit l'abattage à la tronçonneuse (voire à la hache) avec brûlis sur place. Ce procédé maintient la litière et le système racinaire dans leur état originel. La plantation a lieu en début de saison des pluies, après le brûlis. Expression d'un système de culture vivrière et familiale, l'abattis traditionnel est caractérisé par une grande diversité des espèces cultivées associant plantes couvrantes et variétés plutôt érosives (pastèques, melons, bananes, manioc, maïs, ananas, etc).

Les dates importantes de l'expérimentation sur le bassin I sont :

- décembre 1978 : début des observations en forêt naturelle,
- juillet 1981 : abattage à la tronçonneuse,
- octobre 1981 : brûlis,
- novembre 1981 : plantation après les premières pluies.

La typologie des aménagements réalisés fait l'objet du tableau suivant :

Tableau 3.3.1 : Synoptique des scénarios expérimentaux testés sur les bassins versants ECEREX

BV	Aménagement réalisé	occurrence d'une période en sol nu	type d'intervention (1) (2)	époque d'intervention
A	prairie pâturée	oui	P + C	SS
B	témoin en forêt naturelle			
C	verger de pomelos sous prairie	oui	P + C	SS
D	recrû naturel après défrichement agricole	oui	C + C	SS
E	recrû naturel après exploitation forestière intensive		P	SP
F	témoin en forêt naturelle			
G	plantation de pins	oui	P + C	SP
H	plantation d'eucalyptus	oui	P + C	SP
I	culture itinérante sur brûlis (abattis traditionnel)		manuel	SS
J	prairie à faucher, puis plantation de framirés	oui	C + C	SP

Type d'intervention :

(1) pour l'exploitation forestière avec débusqueur à pneus : P avec tracteur à chenilles : C
 (2) pour le défrichement avec débusqueur à pneus : P avec tracteur à chenilles : C

Epoque des interventions : SS : Saison Sèche SP : Saison des Pluies

On peut considérer que 6 bassins expérimentaux sur 8 ont eu à un moment de leur histoire une absence complète de couverture végétale, et un état assimilable au sol nu. Cette convergence de l'expérimentation fera l'objet d'une étude spécifique en quatrième partie.

L'époque des interventions, définie comme "saison sèche - SS" (septembre à novembre) ou "saison des pluies - SP" (janvier à mars) introduit un facteur d'hétérogénéité supplémentaire dans l'expérimentation.



Chenillard équipé d'une lame forestière ROME



Chenillard équipé d'un rateau andaineur FLECO (cliché Sarrailh)



*Bassin après exploitation forestière au débardeur à pneus
(Bassin H - vue vers l'aval, dans l'axe du talweg)*

3.2 PRINCIPES ET METHODES DE L'HYDROLOGIE EXPERIMENTALE

3.2.1 DE L'USAGE DU BASSIN EXPERIMENTAL

Le bassin expérimental est une réponse de l'hydrologue, qui se veut pragmatique et concrète, à la question : "*Quels sont les effets sur le régime des eaux de telle ou telle action ou activité de l'homme sur le milieu ?*". C'est l'application du principe de la Science Expérimentale - ou presque -, puisque l'opérateur ne peut agir que sur un domaine limité du système étudié et qu'aucune expérience n'est jamais reproductible (Bocquillon, 1987). L'expérimentation permet de modifier une partie du complexe physique et vivant du bassin versant, sans pouvoir influencer ou contrôler d'aucune manière les entrées du système, c'est à dire les apports par précipitations. De plus, cette expérimentation n'est pas reproductible à cause du caractère aléatoire des intrants, et du caractère destructif et irréversible de manipulations telles que la déforestation, qui ne sont pas renouvelables à une échelle de temps humaine. Et chaque système hydrologique étant unique, il est pratiquement impossible de répéter la même expérimentation. Le seul contre-exemple bien connu est le bassin expérimental de Coweeta 13 aux USA (16 ha), étudié en forêt de 1936 à 1939, coupé à blanc en hiver 1939-40, laissé en recrû naturel et recoupé 23 ans plus tard en hiver 1963-64 (Swank et Helvey, 1970).

La démarche scientifique, accomplie et idéale, d'une expérimentation hydrologique sur bassin versant passe par les 4 étapes suivantes :

Etape I : La connaissance de l'objet hydrologique étudié

Cette phase doit aboutir à une compréhension des processus de toutes natures (climatiques, géomorphologiques, pédologiques, biologiques, hydrogéologiques et hydrologiques) qui règlent le fonctionnement hydrologique du bassin versant dans l'état originel. D'autre part, pour tirer pleinement partie des résultats de l'expérimentation, il est hautement souhaitable de pouvoir replacer l'objet étudié dans l'ensemble régional, c'est à dire de disposer d'éléments quant à la représentativité du bassin versant. Ainsi, dans une étape préalable, les méthodes d'approche d'une problématique de bassin expérimental bien posée, s'identifient à celles utilisées sur les bassins représentatifs (identification de processus et possibilité de transposer les résultats).

Etape II : La maîtrise d'un traitement expérimental bien identifié

C'est le temps fort de l'expérimentation, qui constitue souvent le pôle d'ancrage des préoccupations des hydrologues, et qui nous a effectivement beaucoup absorbé dans le Programme ECEREX. A ce stade, il y a antinomie entre un bassin expérimental de grande surface, qui est censé être un estimateur hydrologique plus représentatif qu'un bassin plus petit, et la possibilité de contrôler l'amplitude, la nature, l'époque et l'homogénéité du traitement.

Les bassins expérimentaux de plusieurs dizaines ou plusieurs centaines d'hectares ne sont pas des objets à finalité purement scientifique, car sur de telles unités, l'exploitation forestière est guidée par des considérations économiques. Aussi n'est-il pas étonnant de constater que dans la grande compilation de Bosch et Hewlett (1982), plus de la moitié des 94 bassins expérimentaux répertoriés ont été traités partiellement, dans des proportions parfois très faibles de quelques dizaines de pour cent, voire de quelques pour cent de leur surface. De telles conditions ne facilitent pas le diagnostic. A ECEREX, en contrepartie de la petite taille des bassins versants, les manipulations destructives et la mise en place des aménagements étaient contrôlées par les promoteurs du programme et, dans l'ensemble, ont pu être conduites comme prévu initialement... si l'on excepte quelques contretemps, liés à ce qu'il est convenu d'appeler "la spécificité des conditions locales" et qui ont été rapportées précédemment (Cf. §3.1.2).

Etape III : La mesure précise des écoulements

Il y a évidemment une contrainte forte à connaître avec une précision suffisante et constante les paramètres hydrologiques pendant et après les manipulations. De plus, cette connaissance doit être équivalente en nature et en qualité à celle du milieu pré-expérimental, et en particulier toute dérive des méthodes en hydrométrie et en traitement des données de base est susceptible de masquer ou de biaiser l'effet expérimental provoqué. A ce propos, une très longue durée de la période de calage, en principe garante de la précision du prédicteur hydrologique ajusté à la situation originelle du bassin versant, peut s'avérer être une arme à double tranchant : ainsi Green (1970), qui disposait de 40 années de données pour le calage d'un bassin versant de 20 km² en Pays de Galles, n'a finalement retenu que 15 années, le reste de l'échantillon étant biaisé par suite d'un changement du type de déversoir à la station de contrôle.

Etape IV : La reconstitution du fonctionnement hydrologique du système original

Il ne suffit pas de mesurer avec précision les paramètres hydrologiques du bassin expérimental pour porter un diagnostic serein sur les effets de l'expérimentation. Il faut pouvoir comparer les valeurs enregistrées en phases expérimentales à celles que l'on aurait observées dans les mêmes conditions climatiques en l'absence de tout traitement. **Toute opération sur bassin expérimental débouche sur la confrontation des résultats acquis dans une pratique hydrologique "objective" et incontestable, attachée à l'expérimentation, avec les produits d'une hydrologie "fiction" qui doit être à même d'assurer la prédiction attendue avec une précision suffisante pour mettre en évidence les effets produits par le traitement.** Cette constatation triviale n'est pas toujours clairement formulée, et bon nombre de résultats contradictoires ou non concluants sont probablement induits par une piètre qualité de la prédiction hydrologique utilisée. S'il est admis qu'il n'existe pas de modèle hydrologique universel, on conçoit qu'un prédicteur de qualité doive être ajusté "sur mesures" à chaque bassin versant étudié, ce qui conforte l'importance des activités et des produits dérivés de l'étape I.

3.2.2 METHODES D'INVESTIGATION

3.2.2.1 Les méthodes avec un seul bassin versant

L'information collectée, qui comporte obligatoirement les 2 termes pluies et débits, porte exclusivement sur le bassin étudié et couvre une période pendant laquelle les conditions d'occupation du sol ont changé. Cette approche est souvent celle des bassins expérimentaux "malgré eux", dont l'étude est imposée à l'hydrologue, plutôt que librement choisie par lui. L'interprétation de ces résultats s'apparente à une analyse de tendance cherchant à mettre en évidence des dérives dans les bilans pluies-débits (Liebscher, 1980) ou dans les fonctions de production à l'échelle de l'averse (Camus et al., 1976). Outre le cas des transformations continues et progressives de l'espace rural, cette approche est souvent pratiquée pour étudier l'impact d'une calamité naturelle inattendue : maladie ou prédateur des arbres, feu de forêt, etc. (Langford, 1976 ; Baker, 1984).

L'interprétation des résultats à partir de cette approche est sans conteste très délicate, quand on sait qu'un important contingent de la Confrérie des hydrologues étudie les dérives existantes dans les séries hydrologiques... pour les imputer à l'évolution des séries climatiques. Mais cette approche n'est pas la moins nécessaire, car c'est la seule qui soit applicable sur de grands ou de très grands bassins versants, pour évaluer les effets anthropiques à ces échelles. Les contraintes majeures sont de mettre au point un modèle hydrologique susceptible de fonctionner dans des conditions climatiques actuelles ou futures, qui ont pu ne jamais avoir été observées en phase de calage, et l'impossibilité de valider les prédictions faites à partir de ce modèle.

3.2.2.2 Les méthodes comparatives à plusieurs bassins versants

Pour la clarté de l'exposé, on peut subdiviser les méthodes avec bassin témoin en 2 groupes :

Avec bassin témoin ou bassin(s) comparatif(s), sans phase préalable de calage

C'est la méthode du "fait accompli", qui consiste à sauter l'étape I et éventuellement l'étape II et à étudier les écoulements d'écosystèmes différents que l'on présume être implantés sur les mêmes systèmes hydrologiques. Les bassins choisis sont déclarés hydrologiquement semblables au vu de divers paramètres physiographiques (surfaces, pentes, sols,...) et le traitement sur le bassin expérimental commence dès le début de la période d'étude. Toutes les différences de comportement entre bassins, mesurées pendant l'expérimentation, sont imputées au traitement ou aux différences d'occupation du sol (Adamson, 1974 ; Pathak et al, 1984 ; Bailly et al., 1974). L'évidence de la très forte variabilité spatiale naturelle des bassins versants à ECEREX tempère la fermeté des conclusions obtenues par cette filière. Pour en améliorer les performances, certains auteurs multiplient le nombre des bassins dans une même situation de couverture végétale ou de traitement, et constituent ainsi un échantillon dans chaque catégorie pour intégrer l'hétérogénéité spatiale. L'interprétation des résultats de tels montages est à base statistique (comparaisons de moyennes, analyses de variance, etc). Outre le fait que la méthode d'analyse puisse paraître d'une indigence disproportionnée (pour un hydrologue !), avec les efforts et les coûts de suivis hydrométriques

effectués pendant plusieurs années, et sur de nombreux bassins, elle débouche souvent sur l'indétermination statistique, c'est à dire qu'elle ne permet pas de conclure à l'existence de changements significatifs pour un risque raisonnable, généralement de l'ordre de 5% ou 10% (Singh et al., 1974 ; Heede, 1987).

Les Helvètes peuvent être tenus pour les précurseurs en matière d'études analytiques comparatives de l'occupation des sols, sur bassins versants, sans calage, qui ont été entreprises dans leur pays dès 1900 (Engler, 1919).

- Avec témoin et avec phase de calage préalable à l'expérimentation

Dans cette variante, on conserve un bassin dans l'état originel tout au long de l'expérience. Celui ci sert de base pour construire le prédicteur du comportement du bassin expérimental. Les 2 bassins sont choisis les plus proches possible, en parenté hydrologique et en distance, et dans certaines conditions, l'exploitation des résultats ne requiert pas absolument de disposer de données pluviométriques, les intrants étant réputés identiques dans les 2 systèmes. Cette particularité s'applique également au sous-groupe précédent (hydrologie comparative sans calage). L'étape I d'étude simultanée du bassin expérimental et du témoin permet d'établir des modèles du comportement relatif du bassin expérimental avec le témoin dans les différents compartiments hydrologiques (apports annuels, débits de pointe, étiages,...). Ce modèle est appliqué pendant l'expérimentation pour la prédiction du comportement du bassin en l'absence de traitement. Le Nouveau Monde revendique la paternité de la méthode du témoin avec calage en 1911, avec les incontournables Bates et Henry (1928) qui ont mis en évidence des modifications de l'écoulement après déforestation d'un bassin versant de 81 ha dans l'Etat du Colorado (Wagon Wheel Gap Experiment). Ce procédé du bassin témoin avec calage a été systématisé sous le vocable de *Paired Watershed Technique*, que nous traduirons par *méthode des bassins appariés*.

La durée minimale requise pour la période de calage a fait l'objet de beaucoup de discussions et de recommandations (par ex. Kovner et Evans, 1954). Cette durée augmente avec l'irrégularité interannuelle et les contrastes saisonniers, et dépend du degré de "parenté fonctionnelle" du témoin avec le bassin expérimental. Une compilation des expérimentations pratiquées montre que des critères plus circonstanciels ont souvent présidé à la durée du calage : la pression du Développement (comme ce fut le cas à ECEREX), l'opportunité de disposer d'une longue série de données sur un bassin manipulé, etc. On constate que dans l'ensemble les périodes de calage sont de durées très variables et généralement assez longues.

Les expérimentations suivantes situent l'étendue de la gamme des périodes de calage :

- 6 mois (soit seulement 9 événements averse-crue) - Est de l'Etat du Texas, USA, (Blackburn et al, 1986)
- 1 an Etat de Georgie, USA, (Hewlett et al., 1984)
- 17 mois Turquie, près d'Istanbul, (Balci et al. 1986)
- 2 ans Forêt humide du Queensland, Australie, (Bonnel et al., 1983)
- 2 ans Colombie Britannique, Canada, (Feller et Kimmins, 1984)
- 3 ans Sud Ouest de l'Australie, (Ruprecht et Schofield, 1989)
- 5 ans Végétation de "chaparral", Arizona, USA, (Davis, 1984)
- 7 ans Région tropicale de montagne avec cyclones, Taïwan, (Hsia et Koh, 1983)
- 7 ans Nord de Québec, Canada, (Plamondon et Ouellet, 1980)
- 8 ans Etat de New Hampshire, USA, (Hornbeck, 1973)
- 9 ans Ouest de l'Etat d'Oregon, USA, (Harr et McCorison, 1979)
- 10 ans Est de l'Etat d'Arizona, USA, (Rich, 1972)
- 12 ans Est du Transvaal, Afrique du Sud, (Van Lill et al., 1980)
- 20 ans Marais forestier en Finlande, (Seuna, 1980)
- 30 ans White River National Forest, Etat du Colorado, USA, (Bethlamy, 1974)

L'esprit des méthodes d'analyse des données en hydrologie expérimentale a sensiblement évolué au cours des dernières décennies. Au symposium *Forest Hydrology* de 1965, Hibbert qui présente une revue des expérimentations menées jusqu'alors dans le Monde, qualifie l'approche utilisée dans la plupart d'entre elles de "*Calibrate, Cut and Publish method*". En tentant la première synthèse générale en matière d'hydrologie forestière, Hibbert (1967) constate que ces méthodes qui privilégient l'aspect statistique ou numérique, débouchent sur des conclusions qui sont certes objectives, mais trop lapidaires, pour que l'on puisse espérer préciser la nature des processus hydrologiques recouverts par les chiffres. L'augmentation du nombre des expérimentations ne fait qu'augmenter la dispersion des résultats, et n'apporte pas les éclaircissements ou explications qui permettraient d'ébaucher un Ordre dans la problématique "hydrologie et occupation du sol".

L'Ere *Calibrate, Cut and Publish* est déclarée définitivement close en 1970 au symposium AISH de Wellington (N.Z.) "Colloque sur les résultats des recherches sur les bassins représentatifs et expérimentaux" (Pereira, 1973). S'il faut attendre quelque temps pour que cette résolution soit suivie d'effets dans la littérature, l'hydrologie des bassins expérimentaux est devenue une hydrologie de processus en phase de calage ET en phase d'expérimentation, au même titre que sa cousine sur bassins représentatifs, comme le prouve le degré de raffinement atteint dans certains travaux récents : par exemple, modélisation hydrologique préalable à l'exploitation, utilisant l'information hydrogéologique et géomorphologique fournie par des modèles numériques de terrain (Moore et al, 1986 ; Burch et al., 1987), ou mise en évidence d'une lente remontée de la nappe après défrichement, qui s'est traduite par une extension des aires participantes pendant 5 années, et par un accroissement continu des écoulements (Ruprecht et Schofield, 1989). L'intérêt de cette approche apparaît clairement, quand on sait que cette conclusion va à l'encontre du sens commun généralement invoqué, "les écoulements de crue augmentent surtout l'année qui suit le traitement, et cette augmentation se résorbe les années suivantes".

3.2.3 LES RESULTATS

Comme on pouvait s'y attendre, la compilation des résultats acquis au cours des expérimentations de déforestation, plantations sylvicoles et autres modifications de l'utilisation du sol, sera ressentie comme tout à fait décevante par le béotien qui aurait imaginé trouver là, la formule ou l'abaque d'une Equation Universelle des effets de la déforestation sur l'écoulement. Pourtant, plusieurs essais, qui se sont avérés plutôt décevants, ont été menés dans ce sens, en pays Anglo-Saxons. C'est tout à l'honneur de leurs auteurs que d'avoir accepté de ne pas conclure, plutôt que de succomber à la tentation de tracer des courbes dans les semis de points, étayée par la justification déterministe "*moins il y a de couvert végétal, et plus ça doit couler*".

La plus ancienne revue (Hibbert, 1967) prend en compte les résultats de 39 expérimentations sur bassins versants, principalement en Amérique du Nord (il y a aussi 1 bassin au Japon, 2 au Kenya, 2 en Afrique du Sud). Les conclusions sont que, dans le cas général, la déforestation augmente l'écoulement superficiel. Mais cela n'est pas toujours vrai (on peut constater une augmentation, mais celle-ci n'est pas toujours statistiquement significative), et les ordres de grandeur ont été très variables selon les sites :

"response to treatment is highly variable and, for the most part, unpredictable".

Dans les cas où une augmentation a été constatée (en général, note l'auteur, dans les régions bien arrosées), ce gain d'écoulement cumulé sur la première année qui suit une coupe forestière complète du bassin versant, a varié entre 3 mm et 450 mm.

La synthèse plus récente de Bosch et Hewlett (1982) analyse les résultats de 94 bassins versants. L'échantillon se compose des 39 bassins déjà utilisés par Hibbert, et outre des informations relatives au sous-continent nord-américain, la compilation inclut 8 bassins supplémentaires en Afrique du Sud, 2 en Nouvelle Zélande, 3 au Japon, 3 à Madagascar, 5 en Australie.

La conclusion est sobre :

"No experiments in deliberately reducing cover caused reductions in yield, nor have any deliberate increases in cover caused increases in yield"

"Il n'y a pas eu d'expérimentations dans lesquelles une réduction délibérée du couvert végétal ait provoqué une réduction de l'écoulement, ni d'expérimentations où une augmentation du taux de couverture ait provoqué une augmentation de l'écoulement"

...ou presque, car

"...the only results that partly contradict this conclusions is that of a study by Langford (1976)..."

On peut trouver bien d'autres situations que celle décrite par Langford (1976), dans lesquelles la déforestation a été suivie d'une réduction significative des écoulements, au cours de la première ou des premières années après un défrichement effectué avec des engins lourds. L'expérience ECEREX ne laisse aucun doute quant à l'impact des défrichements mal "finis" qui aboutissent à un véritable terrassement du bassin versant, et à une topographie bouleversée avec une capacité de rétention superficielle capable de retenir tout ou partie des petites crues. Il est tout à fait concevable que l'écoulement de crue d'un tel bassin soit finalement plus faible que celui du bassin primitif, la couverture végétale n'étant alors qu'un facteur explicatif de deuxième ordre. L'originalité de l'expérimentation de Langford tenait au fait que l'influence du facteur sol était éliminé, la déforestation ayant été provoquée par un incendie.

L'accroissement des écoulements avec la réduction du couvert végétal peut s'exprimer avec des valeurs relatives considérables, tout en mettant en oeuvre des quantités d'eau très faibles. Ainsi, Baker (1984) rapporte une augmentation de 157% de l'écoulement sur un bassin de 147 ha (Central Arizona, USA) après traitement par herbicide d'une association de pins-genévriers ; mais les valeurs absolues des écoulements annuels avant et après traitement, exprimées en valeurs moyennes sur une longue période, sont respectivement de 2,8 mm et de 7,2 mm.

3.3 MISE EN OEUVRE DE LA METHODE DES BASSINS APPARIES

3.3.1 RAPPEL DES OBJECTIFS

L'expérimentation ECEREX doit permettre de conclure à l'absence ou à la présence de modifications significatives de la réponse hydrologique par rapport à l'état forestier originel, et si cette réponse est positive, à quantifier ces changements.

Le protocole avait prévu une phase initiale de 2 ans au moins, qu'on appellera dans la suite *Epoque Verte*, durant laquelle les observations hydrologiques portaient sur le milieu forestier naturel. Ensuite, la couverture végétale des bassins versants a fait l'objet de diverses manipulations : défrichement en *Epoque Rouge* et implantation ultérieure d'aménagements agricoles, sylvicoles ou pastoraux en *Epoque Jaune*. On compare les écoulements effectivement mesurés pendant les *Epoques Rouge et Jaune* de l'expérimentation, avec les écoulements qui auraient été observés dans le même temps si le bassin considéré avait conservé sa couverture forestière originelle.

Outre la qualité intrinsèque des données hydrologiques collectées sur les bassins défrichés (précision de la mesure), la sûreté du diagnostic dépend de la justesse de la prédiction des écoulements "naturels" reconstitués, qui sont utilisés comme référence pour la comparaison. Ainsi, l'objectivité du fait expérimental ne permet pas pour autant de s'affranchir d'une démarche plus spéculative, qui comporte par nature même une certaine imprécision. Le diagnostic de l'impact hydrologique ne sera jamais certain, mais conditionnel à un intervalle de confiance donné.

La présentation hydrologique du milieu naturel a mis en évidence l'existence de fortes variabilités spatiales (rapport de 1 à 6) et interannuelles (1 à 2,4) pour les écoulements en milieu naturel. Cette situation laisse présager de la finesse des procédés de prédiction qui est nécessaire pour conclure valablement, lorsque l'on sait par la littérature que les transformations de la couverture végétale et de l'utilisation du sol modifient les indicateurs hydrologiques originels selon un ordre de grandeur de quelques dizaines de pour-cent.

La difficulté du problème croît à mesure que se réduit le pas de temps sur lequel on souhaite faire le pronostic : l'expérience prouve que le recours à des procédés numériques complexes permet d'obtenir des reconstitutions globales annuelles ou mensuelles avec une précision acceptable pour satisfaire à notre propos (Chevallier, 1988), mais qu'il en est en général tout autrement lorsque l'on descend à l'échelle de la journée ou de la crue élémentaire, et l'on peut remarquer que, dans la quasi-totalité des cas exposés dans la littérature, les effets hydrologiques de l'utilisation des sols sont analysés à l'échelle annuelle, voire pluriannuelle.

L'interprétation des données des bassins expérimentaux passe par la recherche d'un compromis entre la précision des écoulements naturels reconstitués permettant d'apprécier les effets du défrichement de manière statistiquement significative, et la durée de la période sur laquelle on sera en mesure d'affiner ce diagnostic (que l'on souhaite évidemment la plus réduite possible).

Par différence avec l'état originel de forêt primaire, qui correspond à un indice de couvert végétal stationnaire (exception faite des chablis), la plupart des expérimentations introduisent une modification continue du milieu (arboriculture, sylviculture, recrû, etc.). L'analyse des résultats, globalisée sur l'ensemble de l'*Epoque Jaune*, risque de masquer certains effets transitoires, et d'aboutir ainsi à des conclusions peu significatives au plan écologique.

La prédiction hydrologique d'un bassin versant peut s'envisager d'au moins deux façons :

- **Ajuster le fonctionnement du bassin $Q = f(t)$ à un modèle mathématique pertinent** sur une période de calage (*Epoque Verte*) en utilisant les données pluviométriques $P = f(t)$ comme variables temporelles d'entrée. A ECEREX, l'occurrence d'une centaine de crues par an et par bassin ou davantage, avec des temps de montée souvent inférieurs à 30 minutes permet d'apprécier l'ampleur et la complexité de cette approche, et la nécessité de travailler à des pas de temps très réduits (5 ou 10 minutes).
- **Utiliser un modèle hydrologique naturel, c'est à dire l'information d'un bassin témoin** : les variables hydrologiques du calage ne sont plus constituées par les précipitations, mais par des caractéristiques hydrologiques discrétisées et appariées entre le futur bassin expérimental et le bassin témoin. Ces données peuvent être brutes comme le débit instantané sur chacun des bassins au même instant t , ou plus synthétiques comme par exemple la lame écoulée, les temps de base ou les débits de pointe d'une même crue.

Cette méthode des bassins appariés est la plus contraignante en phase de terrain, puisqu'elle implique l'exploitation simultanée d'au moins deux dispositifs hydrologiques. D'autre part, pour que ce procédé ait quelque chance d'être fécond, plusieurs conditions doivent être satisfaites :

1. Le bassin témoin doit avoir une analogie fonctionnelle certaine avec le bassin expérimental, pour que les relations de dépendance établies avec le témoin en période de calage restent stables pendant la phase d'expérimentation, durant laquelle l'abondance et la répartition des intrants pluviométriques seront probablement bien différentes (loi de la contrariété maximale). Selon la description des fonctionnements qui a été faite préalablement, cette condition de similitude fonctionnelle ne pourra être parfaitement satisfaite sur tous les bassins versants à ECEREX.
2. Le témoin doit conserver ses caractéristiques originelles de couvert végétal pendant toute la durée de l'expérimentation, ce qui implique d'être en mesure de "sanctuariser" ce bassin versant. Cette contrainte a pu être satisfaite à ECEREX - parfois non sans mal! - mais elle peut s'avérer une condition irréalisable dans certains contextes socio-économiques, surtout si le bassin témoin est vaste.

3. Les intrants pluviométriques doivent être aussi semblables que possible entre le témoin et le bassin expérimental. Cette contrainte est généralement satisfaite sur le site ECEREX qui ne comporte pas de barrière orographique ou d'effets d'exposition différentielle entre bassins versants. Le coeur de la saison des pluies correspond à la situation d'une Zone Inter-tropicale de Convergence active, engendrant des pluies de mousson homogènes sur de grandes surfaces. Par contre, les pluies tardives de juillet et août, associées à des phénomènes de convection locale, pourront être source d'un comportement différentiel entre bassins appariés et dégrader la précision du calage du modèle naturel.

3.3.2 CONSTITUTION DES COUPLES "BASSIN EXPERIMENTAL - BASSIN TEMOIN"

L'expérimentation ECEREX dispose de deux bassins versants (B et F) qui ont conservé en permanence leur couvert forestier naturel, et qui sont à même de jouer le rôle de bassin témoin. On rappelle que les sols sont très majoritairement à dynamique latérale sur ces 2 bassins versants et que la différenciation tient au fait que B possède 10% de sols à drainage vertical en tête de bassin et aucune manifestation de phénomène de nappe phréatique proche de la surface, alors que les sols à drainage vertical sont totalement absents sur le bassin F, dont la partie aval est occupée par une nappe affleurante en saison pluvieuse avec une zone d'emprise estimée à 4% de la surface totale, selon les critères de la reconnaissance pédologique.

Outre la proximité géographique de nature à satisfaire le critère de similitude des pluies, le bassin forestier B s'impose sans équivoque comme le seul témoin possible - le meilleur ou le moins mauvais selon le bassin considéré - pour le groupe expérimental le plus méridional constitué par les bassins A, C, E et D.

Les critères pédologiques et hydrologiques (voir tableau 2.4.02) laissent augurer que B sera un excellent témoin pour A (les coefficients d'Écoulement Total de Crue moyens annuels K_{ETC} sont respectivement 18,2% pour B et 19 % pour A). Cette situation est a priori moins favorable pour les bassins D et E composés pour 60% de sol à drainage vertical, ce qui conduit à des K_{ETC} respectifs de 14,8% et 12,7%. Enfin, il faut s'attendre à ce que B constitue un très mauvais modèle hydrologique pour le bassin C qui est entièrement situé sur sols à drainage vertical, qui lui confèrent un K_{ETC} de 7,3% seulement.

L'inexistence d'un bassin témoin sur sols à drainage vertical à ECEREX est une concession des promoteurs à l'aspect pragmatique et finalisé du programme : on savait que les contraintes agronomiques au défrichement des sols à drainage vertical étaient faibles ; d'où la décision de faire porter l'effort de comparaison sur les unités naturelles à haut risque, c'est à dire sur les sols à dynamique latérale.

Pour le groupe Nord, le bassin F constitue un modèle fonctionnel très sûr pour le binôme G et H : ces bassins sont au même stade d'évolution pédologique (stade III - dynamique latérale) et ont en commun l'existence d'une nappe dans la partie aval.

Le rattachement d'un témoin aux bassins I et J est une opération moins évidente qui mérite discussion. Au point de vue géographique, on peut considérer que ces bassins appartiennent au groupe nord FGH, ce qui plaide en faveur du bassin F pour témoin (Roche, 1979). Par contre les caractéristiques fonctionnelles et l'examen des indicateurs hydrologiques établis en milieu forestier amènent à relativiser ce choix :

- les écoulements modestes du bassin I (K_{ETC} de 11,1%, dus à la présence de sols à drainage vertical en proportion de 60%) classent ce bassin au rang 2 des potentialités d'écoulement dans le tableau 2.4.02, et laissent peu d'arguments pour retenir F comme témoin ($K_{ETC} = 34,1\%$), classé au rang 9. Par analogie avec le groupe DE, on peut considérer que la fonction du moins mauvais témoin pourrait revenir au bassin B ;
- le bassin J ($K_{ETC} = 23,3\%$ - rang 7) occupe une position hydrologique intermédiaire entre B ($K_{ETC} = 18,2\%$ - rang 5) et F ($K_{ETC} = 34,1\%$ - rang 9) et le choix du meilleur témoin ne s'impose pas clairement.

Pour résoudre ce dilemme, les 2 possibilités de témoin B et F seront testées, et l'on retiendra l'association la plus satisfaisante au vu des résultats numériques.

L'information hydrologique a été synthétisée à l'échelle de la crue selon les canons usuels de l'hydrologie analytique. Chaque événement est répertorié par un numéro d'ordre qui est le même sur l'ensemble du dispositif des 10 bassins pour une crue générée au même moment. Cette disposition facilite l'extraction des fichiers de variables appariés sur le bassin expérimental et le témoin, et permet d'ignorer les événements qui n'ont pas existé simultanément sur les 2 bassins versants considérés. Le "fichier des caractéristiques de crue" comporte pour chaque événement :

- la date et l'heure de début de la crue,
- les débits instantanés en début et en fin de crue,
- le débit de pointe,
- les volumes d'écoulement total et d'écoulement rapide de la crue, convertis en lames équivalentes,
- le temps de base et le temps de montée de l'hydrogramme.

Au moment de la constitution de ces fichiers, aucun logiciel de fusion des données hydrologiques et pluviométriques n'était disponible, et les données pluviométriques ainsi que des informations relatives aux transports solides ont été fusionnées manuellement dans ce fichier:

- la hauteur de pluie et l'indice de Wischmeyer de (ou des) averse(s) génératrice(s),
- les poids exportés en suspension pendant la crue,
- la concentration maximum des matières en suspension pendant la crue, lorsque celle-ci a été échantillonnée.

Le critère adopté pour la séparation des averses est le suivant : on appelle averse toute hauteur de pluie d'au moins 3 mm, séparée de l'averse précédente par une période d'au moins 1 heure, pendant laquelle il est tombé moins de 1 mm.

La pluviométrie a été entièrement traitée par le Service Hydrologique de l'ORSTOM en Métropole (dépouillement au numériseur et traitement par la chaîne pluviométrique POH sur MINI6 ou IBM 370 du CIRCE). Les résultats étaient envoyés à Cayenne sous forme de listings.

Plusieurs filières ont successivement été utilisées pour le traitement des données hydrométriques (hauteurs d'eau et débits instantanés) : Informatique du CIRCE à Paris pour les années 1977 à 1980, puis micro-calculateur HP9815, ordinateur HP85, et finalement ordinateur IBM-XT à Cayenne pour les années suivantes. La plupart des données des fichiers de caractéristiques de crues ont donc été élaborées manuellement, retranscrites sur bordereaux et saisies au pavé numérique. L'ensemble de l'information représente 7723 crues individuelles réparties de la façon suivante (tableau 3.3.01) :

Tableau 3.3.01 : Nombre de crues par bassin versant et par an

Années	Bassins Versants										total
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1977	64	97	73								234
1978	88	123	100	80	71	118	100	95	22		797
1979	218	129	226	112	117	189	155	152	148	105	1551
1980	139	96	181	101	78	188	164	155	124	104	1330
1981	114	89	139	123	100	149	178	171	110	89	1262
1982	152	112	167	92	88	195	192	173	147	106	1424
1983	104	65	144	41	44	184	135	107	108	193	1125
total	879	711	1030	549	498	1023	924	853	659	597	7723

Les durées d'observation des bassins expérimentaux en milieu naturel ont varié entre 21 mois (comportant 2 saisons des pluies) sur les bassins A et C, et 67 mois sur le bassin J.

Pour chacun des futurs bassins expérimentaux, l'*Epoque Verte* a été divisée en deux parties - dites *périodes I et II* - de durées sensiblement égales (tableau 3.3.02). Dans une première étape, la période I est utilisée pour calculer les paramètres des régressions entre un bassin témoin et un bassin expérimental (opération de calage) et la période II est mise à profit pour vérifier la robustesse de ces modèles, par comparaison avec les données réellement observées (opération de validation). Dans une seconde étape, les rôles respectifs de chaque période sont permutés, et la période II est utilisée pour le calage et la période I pour la validation.

**Tableau 3.3.02 : Découpage de l'Epoque Verte en périodes I et II
pour calage et validation des régressions sur bassins versants appariés.**

		date début		date fin	
		jj/mm/an	décade	jj/mm/an	décade
Bassin A	Période I	01/01/77	1	31/12/77	36
	Période II	01/01/78	37	30/09/78	63
Bassin C	Période I	01/05/77	13	31/12/77	36
	Période II	01/01/78	37	30/09/78	63
Bassin D	Période I	01/06/78	52	31/05/79	87
	Période II	01/06/79	88	31/05/80	123
Bassin E	Période I	01/06/78	52	31/05/79	87
	Période II	01/06/79	88	31/05/80	123
Bassin G	Période I	01/01/78	37	30/04/79	84
	Période II	01/05/79	85	30/06/80	126
Bassin H	Période I	01/01/78	37	30/04/79	84
	Période II	01/05/79	85	30/06/80	126
Bassin I	Période I	01/01/79	73	30/04/80	120
	Période II	01/05/80	121	30/06/81	162
Bassin J	Période I	01/01/79	73	31/12/80	144
	Période II	01/01/81	145	31/07/82	201

Le rang des décades commence à 1 le 01/01/1977

3.3.3 LES REGRESSIONS ETABLIES SUR LES ECOULEMENTS DES CRUES INDIVIDUELLES

La variable "Ecoulement Total des Crues - ETC" qui a été considérée comme moins subjective que l'Ecoulement Rapide de Crue, a été sélectionnée pour étudier la consistance des relations entre bassins témoins et bassins expérimentaux et évaluer les performances de l'approche par la méthode des bassins appariés. Dans la suite, on utilisera la notation X_T pour désigner la paire formée par le bassin expérimental "X" et le bassin Témoin "T".

3.3.3.1 Corrélations linéaires à une variable

Dans un premier temps, des relations linéaires à une variable $L_{ETC}X = f(L_{ETC}T)$ ont été ajustées entre lames du témoin T et du bassin expérimental X. Les paramètres de cet ajustement font l'objet du tableau 3.3.03. Les valeurs élevées prises par les coefficients de corrélation doivent être relativisées, en regard de la répartition très dissymétrique de la population des lames écoulées (il y a beaucoup de très petites crues).

Tableau 3.3.03 : Paramètres des corrélations linéaires $L_{ETC}X = L_{ETC}T \cdot a + b$ (etc en 1/10 de mm)

Paramètres calculés sur période I

	a	b	n	r ²
A _B	1,315	-15,9	61	0,948
C _B	0,496	-1,83	58	0,875
D _B	0,688	+5,09	127	0,798
E _B	0,565	+6,26	130	0,847
G _F	1,010	-7,52	168	0,930
H _F	1,164	-13,6	157	0,943
I _F	0,446	-6,36	158	0,843
J _F	0,730	-1,16	231	0,844

Paramètres calculés sur période II

	a	b	n	r ²
A _B	1,130	-6,54	60	0,917
C _B	0,264	+4,99	68	0,833
D _B	0,804	-0,76	66	0,815
E _B	0,560	+9,91	72	0,823
G _F	1,003	-5,70	170	0,966
H _F	1,019	+5,00	169	0,957
I _F	0,399	-6,61	146	0,819
J _F	0,615	+3,11	176	0,744

La figure 3.3.01 présente la répartition des points des corrélations en période I et II dans deux cas extrêmes :

- la combinaison G_F, la plus performante,
- La combinaison C_B, pour laquelle la dispersion s'avère la moins satisfaisante, tant au plan du nombre de points qu'à celui de leur répartition. Sur ce bassin perméable, il y a peu de crues et les volumes écoulés sont petits : les points sont concentrés au voisinage de l'origine.

Sur ces figures sont tracées en pointillé, les estimations de la moyenne conditionnelle des Y et d'un Y quelconque pour un intervalle de confiance à 90 %

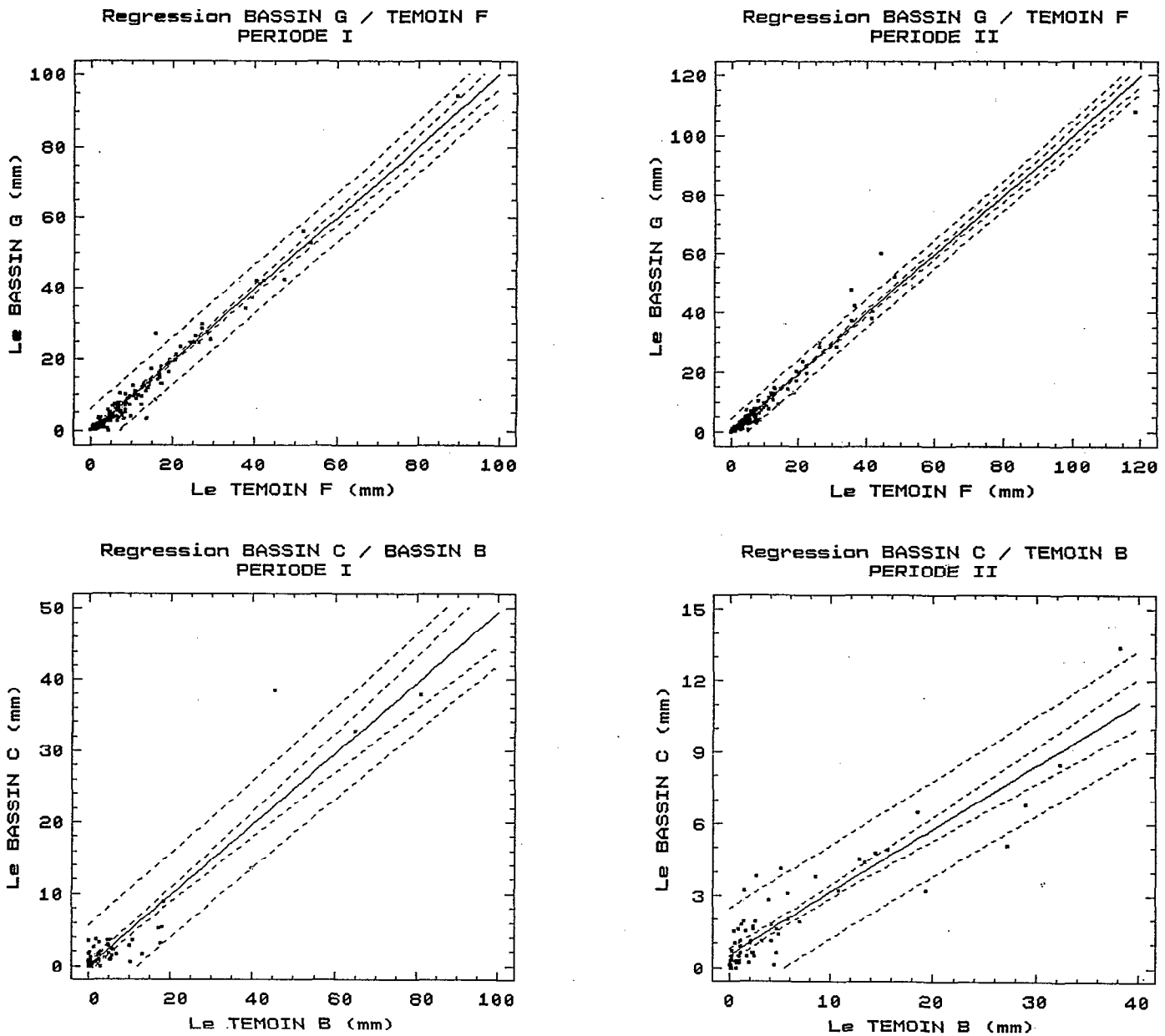


Figure 3.3.01 : Régressions entre Ecoulements Totaux de Crue du témoin et du bassin expérimental, effectuées crue par crue, sur les périodes I et II de l'Epoque Verte

"Echantillonnage" de 2 cas types :

corrélation serrée : bassin G avec Témoin F (en haut)

corrélation plus lâche : bassin C avec témoin B (en bas)

Tableau 3.3.04 : Validation des corrélations linéaires entre lames écoulées par crue (en mm) sur les bassins appariés

CALAGE SUR PERIODE II

VALIDATION SUR PERIODE I

BASSIN EXPERIMENTAL	C _B	I _B	I _F	E _B	D _B	A _B	J _B	J _F	G _F	H _F
Σ L _{ETC} observée	212	531	531	564	649	827	1548	1548	1564	1774
Couples pris en compte dans les régressions										
Σ L _{ETC} observée	210	518	517	559	641	827	1487	1501	1484	1664
Σ L _{ETC} calculée	146	507	462	601	663	755	1389	1359	1505	1723
Eglo										
Précision globale en % sur toute la période	-30,3	-2,1	-10,7	7,5	3,6	-8,6	-6,6	-9,5	1,4	3,5
Em										
Ecart absolu moyen en % par crue (toutes crues)	74,1	76,0	101,1	245,5	192,0	81,5	312,2	201,5	43,6	81,6
nombre d'événements (n)	58	138	158	130	127	61	190	231	168	157
Em1										
Ecart absolu moyen en % par crue (crues > 1mm)	39,4	52,5	50,4	52,0	76,4	35,5	64,1	60,4	25,6	38,3
nombre d'événements (n')	27	76	79	71	68	41	111	141	130	130

CALAGE SUR PERIODE I

VALIDATION SUR PERIODE II

BASSIN EXPERIMENTAL	C _B	I _B	I _F	E _B	D _B	A _B	J _B	J _F	G _F	H _F
Σ L _{ETC} observée	126	406	406	331	369	362	1119	1119	1120	1308
Couples pris en compte dans les régressions										
Σ L _{ETC} observée	125	371	386	326	331	360	1008	1099	1119	1304
Σ L _{ETC} calculée	159	303	462	302	322	378	1030	1220	1110	1198
Eglo										
Précision globale en % sur toute la période	27,7	-18,4	19,6	-7,3	-3,0	4,8	2,2	10,9	-0,8	-8,1
Em										
Ecart absolu moyen en % par crue (toutes crues)	98,0	121,5	177,3	104,8	146,6	67,7	252,9	172,9	50,7	79,4
nombre d'événements (n)	68	101	146	72	66	60	148	176	170	169
Em1										
Ecart absolu moyen en % par crue (crues > 1mm)	57,7	33,6	61,3	46,2	50,3	50	53,9	79,9	25,6	42,7
nombre d'événements (n')	32	39	52	43	38	38	76	119	110	116

Régression linéaire à une variable : $L_{ETC} = a \cdot L_{ETC}^T + b$

L_{ETC} = Ecoulement Total de Crue sur le bassin expérimental

L_{ETC}^T = Ecoulement Total de Crue sur le bassin témoin

Les résultats obtenus en validation à partir des 20 régressions ainsi calculées (10 régressions sur chacune des périodes I et II, soit 6 régressions relatives aux bassins expérimentaux A_B , C_B , D_B , E_B , G_F , H_F et 2 régressions pour chacun des bassins I_B , I_F et J_B , J_F , (pour lesquels on a testé 2 témoins possibles B et F) font l'objet du tableau 3.3.04 et des figures 3.3.02 à 3.3.04.

On a calculé pour chaque paire :

- 1) La somme des lames effectivement écoulées en crue sur le bassin versant considéré, (tableau 3.3.04, ligne 1).
- 2) La somme des lames écoulées observées, prises en compte dans la régression ΣL_{ETC} obs. (tableau 3.3.04, ligne 2).

Cette valeur est inférieure ou égale à la précédente parce qu'il peut exister des événements qui se sont produits sur le bassin expérimental et qui n'ont pas leur correspondant sur le témoin. Une autre cause conjoncturelle de divergence peut provenir d'une courte lacune d'observation sur le témoin (cas des bassins G_F et H_F en période I).

L'utilisation directe et exclusive d'une relation qui serait hypothétiquement fonctionnelle sur un couple X_T pour reconstituer les écoulements de crue du bassin expérimental aboutirait donc en général à sous-estimer ces écoulements. Toutefois dans le cas qui nous occupe, et sauf lacune d'observation sur le témoin, ces écarts restent généralement très modestes et sont inférieurs à 2% sur les bassins C, E, D, A, G et H, mais ils atteignent 5% et 6,5% pendant la totalité de l'*Epoque Verte* sur les couples I_B et J_B (tableau 3.3.05), ce qui justifie l'application d'une correction du même ordre de grandeur si ces associations sont utilisées pour la reconstitution des écoulements en *Epoques Rouge et Jaune*.

Tableau 3.3.05 : Ecarts en % entre la somme des écoulements totaux de crue pris en compte dans les régressions entre témoin et bassin expérimental et les écoulements effectivement observés (ΣL_{ETC} obs.) sur le bassin expérimental.

	Périodes			
	I	II	I+II	
C_B	-0,9	-0,8	-0,9	
I_B	-2,5	-8,6	-5,1	
I_F	-2,6	-4,9	-3,6	
E_B	-0,9	-1,5	-1,1	
D_B	-1,2	-10,3	-4,5	(lacune sur le témoin en période II)
A_B	0,0	-0,6	-0,2	
J_B	-3,9	-9,9	-6,5	
J_F	-3,0	-1,8	-2,5	
G_F	-5,0	-0,1	-3,2	(lacune sur le témoin en période I)
H_F	-6,0	-0,3	-3,7	(lacune sur le témoin en période I)

- 3) La somme des lames calculées par la régression ΣL_{ETC} cal.
(tableau 3.3.04, ligne 3).
- 4) L'écart global de la reconstitution des volumes écoulés (*Eglo*) sur l'ensemble de la période, exprimé par l'écart entre la somme des lames calculées et la somme des lames observées, rapporté à la somme observée et exprimé en %,

$$Eglo = (\Sigma L_{ETC} \text{ cal.} - \Sigma L_{ETC} \text{ obs.}) / (\Sigma L_{ETC} \text{ obs.}) * 100$$
 (tableau 3.3.04, ligne 4).

Les valeurs absolues de *Eglo* pour chacune des périodes I et II sont portées sous forme d'histogramme sur la figure 3.3.02.

On constate que :

- La précision de la reconstitution varie entre 1% (bassin G_F) et 30% (bassin C_B). Six bassins réalisent des scores meilleurs que 10 % dans chacune des périodes I et II, à savoir :

G_F : +1,4 et -0,8%,
 D_F : +3,6 et -3,0%,
 J_B : -6,6 et +2,2%,
 H_F : +3,5 et -8,1%,
 A_B : -8,6 et +4,8%,
 E_B : +7,5 et -7,3%.

- Les valeurs des écarts sont symétriques sur les 2 périodes dans la plupart des cas ; le procédé paraît robuste ;

- Ce simple modèle linéaire paraît en mesure de mettre en évidence des modifications globales du comportement hydrologique d'amplitude supérieure à 10%, sauf sur les bassins C et I.

- Selon le critère *Eglo*, le meilleur bassin témoin pour I est B : l'utilisation du couple I_B conduit à des écarts absolus dans la reconstitution des volumes de -2,1% et -18,4%, alors que ces mêmes valeurs sont de -10,7% et +19,6% avec I_F . Pour le bassin J, c'est également la formule J_B qui vient en tête avec des écarts de -6,6% et +2,2%, contre -9,5% et +10,9% avec la solution J_F .

- 5) **La moyenne des valeurs absolues des écarts par crue entre lame observée et lame calculée Em .**

$$Em = 1/n * \Sigma (| L_{ETC} \text{ cal.} - L_{ETC} \text{ obs.} | / (L_{ETC} \text{ obs.}) * 100)$$

(tableau 3.3.04, ligne 5 et figure 3.3.03) :

Le nombre d'événements n pris en compte dans ce calcul est porté en ligne 6.

A cette échelle de temps, la situation est beaucoup moins encourageante que précédemment ! L'écart moyen peut dépasser 200% et n'est jamais meilleur que 45-50% (bassin GP). Ces caractéristiques condamnent toute perspective d'utilisation de cette relation autrement qu'à l'échelle globale, c'est à dire au mieux sur une année. Il faut toutefois relativiser ces chiffres en considérant le biais introduit par les petites crues dans le calcul de Em : la reconstitution d'une crue observée de 1 mm par une valeur calculée de 3 mm conduit à un écart de 200%.

- 6) **La moyenne des valeurs absolues des écarts par crue entre lame observée et lame calculée $Em1$, calculée comme Em sur les crues avec $L_{ETC} > 1$ mm**
(tableau 3.3.04, ligne 7 et figure 3.3.04)

- L'écart moyen se réduit alors très fortement sur tous les bassins et se stabilise dans une gamme 40%-60%. Le nombre n' des crues prises en compte diminue aussi très nettement (ligne 8).

3.3.3.3 Relation linéaire corrigée par l'écart pluviométrique entre les bassins

La démarche la plus immédiate vers l'amélioration de ces relations est d'introduire la variabilité de la pluie des averses du témoin (PaT) et du bassin expérimental (Pa). On a essayé un certain nombre d'algorithmes destinés à rendre compte de cet écart entre Pa et PaT. C'est finalement la simple différence (PaT-Pa), qui donne les résultats les moins mauvais et qui empêche les estimations de diverger sur certaines crues (tableau 3.3.06).

Le tableau 3.3.07 (construit selon le même gabarit que le tableau 3.3.04 relatif aux régressions linéaires simples) présente les résultats obtenus dans cette tentative.

La figure 3.3.02 montre qu'en terme d'écart global $Eglo$ de la reconstitution des volumes sur l'ensemble des 2 périodes, l'avancée du modèle prenant en compte la différence pluviométrique n'est pas décisive : les résultats sont meilleurs 10 fois sur 20, et dans ces cas, les gains de précision obtenus ne sont pas toujours très convaincants :

- Les résultats les plus honorables sont obtenus sur les bassins A_B et E_B pour lesquels la régression à 2 variables améliore la reconstitution de façon concomitante sur les 2 périodes, en faisant passer la moyenne des $|Eglo|$ calculée sur les périodes I et II de 6,7% à 2,3% sur le couple A_B et de 7,4% à 3,3% sur le couple E_B .

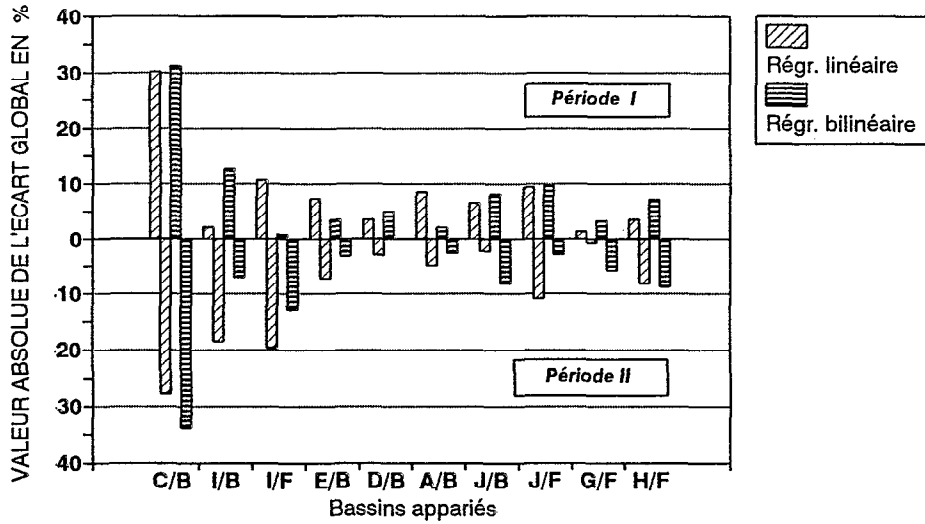


Figure 3.3.02 : Validation du calcul des Ecoulements Totaux de Crue à partir des crues du bassin témoin.

Valeurs absolues de la précision des reconstitutions globales des volumes écoulés E_{glo} (en % de la valeur observée).

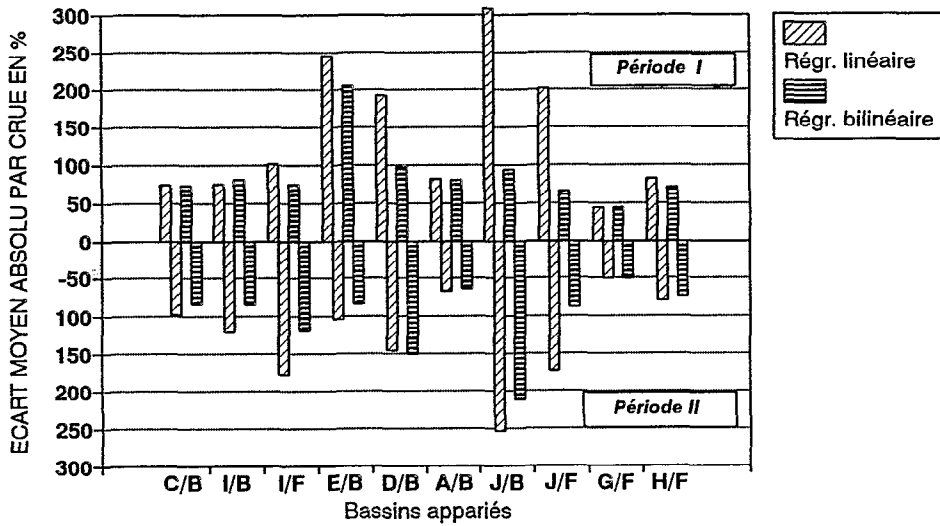


Figure 3.3.03 : Validation du calcul des Ecoulements Totaux de Crue à partir des crues du bassin témoin

Moyenne de l'écart absolu par crue (E_m), calculé sur toutes les crues (en % de la valeur observée)

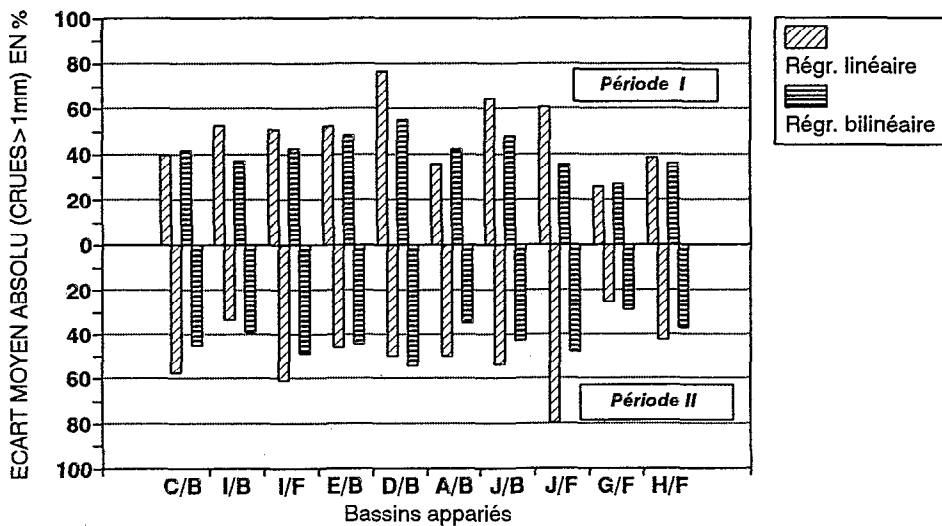


Figure 3.3.04 : Validation du calcul des Ecoulements Totaux de Crue à partir des crues du bassin témoin

Moyenne de l'écart absolu par crue (E_{m1}), calculé sur les crues avec ETC > 1 mm (en % de la valeur observée)

- La régression à une variable reste systématiquement plus satisfaisante sur les 2 périodes pour les couples G_F, H_F et C_B et J_B .
- Le bassin C reste le point noir du dispositif avec un écart global qui se maintient autour de 30%.

Les écarts moyens par crue Em se trouvent diminués par rapport à ceux obtenus avec la régression simple dans 16 cas sur 20 (figure 3.3.03). Toutefois la dispersion reste élevée : l'écart moyen est compris entre 50% et 100% dans 15 cas sur 20 et supérieure à 100% dans 4 cas. Le couple G_F reste le meilleur prédicteur avec une moyenne de Em sur les 2 périodes égale à 47%.

Ce constat reste valable pour les crues de plus de 1 mm pour lesquelles l'ajustement prenant en compte l'écart pluviométrique est meilleur dans 13 cas sur 20. La dispersion de l'écart moyen EmI se resserre et s'homogénéise sur tous les bassins dans une gamme de 25 à 50%, dont on peut cependant craindre qu'elle soit encore trop large pour apprécier significativement les effets du défrichement et des aménagements (figure 3.3.04).

Tableau 3.3.06 : Paramètres des corrélations bilinéaires

$$LETC = LETC \text{ Témoin} * a + (P \text{ Témoin} - P \text{ bassin}) * b + c \quad (\text{etc en 1/10 de mm})$$

(avec prise en compte de l'écart pluviométrique entre bassins versants)

Paramètres calculés sur période I

	a	b	c	n	r ²
A_B	1,312	-0,069	-16,7	61	0,946
C_B	0,499	-0,175	-0,88	58	0,877
D_B	0,752	-0,402	+0,36	127	0,927
E_B	0,566	-0,232	+4,68	130	0,892
G_F	0,981	-0,499	-9,25	168	0,957
H_F	1,078	-0,255	-7,76	157	0,956
I_F	0,434	0,192	-8,36	158	0,880
J_F	0,772	-0,592	-4,47	231	0,945

Paramètres calculés sur période II

	a	b	c	n	r ²
A_B	1,206	-0,422	-8,76	60	0,943
C_B	0,277	-0,127	+4,26	68	0,870
D_B	0,763	-0,481	+0,25	66	0,919
E_B	0,525	-0,217	+8,95	72	0,836
G_F	1,003	-0,182	-5,69	170	0,966
H_F	0,994	-0,605	+4,20	169	0,962
I_F	0,423	-0,262	-10,1	146	0,912
J_F	0,756	-0,519	-11,6	176	0,906

Tableau 3.3.07 : Validation des corrélations bilinéaires entre lames écoulées par crue (en mm) sur les bassins appariés

CALAGE SUR PERIODE II

VALIDATION SUR PERIODE I

BASSIN EXPERIMENTAL	C _B	I _B	I _F	E _B	D _B	A _B	J _B	J _F	G _F	H _F
Σ L _{ETC} observée	212	531	531	564	649	827	1448	1548	1564	1774
Couples pris en compte dans les régressions										
Σ L _{ETC} observée	210	518	517	560	641	827	1487	1501	1484	1664
Σ L _{ETC} calculée	144	584	513	579	673	845	1367	1356	1532	1783
Eglo										
Précision globale en % sur toute la période	-31,2	12,7	-0,8	3,5	5,0	2,1	-8,1	-9,7	3,2	7,1
Em										
Ecart absolu moyen en % par crue (toutes crues)	73,9	81,2	75,9	205,0	98,9	79,9	94,2	65,9	42,9	71,1
nombre d'événements (n)	58	138	158	130	127	61	190	231	168	157
Em1										
Ecart absolu moyen en % par crue (crues > 1mm)	41,7	37,0	42,5	48,2	55,0	42,1	47,7	35,1	26,7	36,0
nombre d'événements (n')	27	76	79	71	68	41	111	141	130	130

CALAGE SUR PERIODE I

VALIDATION SUR PERIODE II

BASSIN EXPERIMENTAL	C _B	I _B	I _F	E _B	D _B	A _B	J _B	J _F	G _F	H _F
Σ L _{ETC} observée	126	406	406	331	369	362	1119	1119	1120	1308
Couples pris en compte dans les régressions										
Σ L _{ETC} observée	125	371	386	326	331	360	1075	1099	1119	1304
Σ L _{ETC} calculée	165	349	436	316	331	369	1089	1069	1053	1189
Eglo										
Précision globale en % sur toute la période	33,9	-7,1	12,9	-3,1	-0,1	2,5	8,1	-2,8	-5,9	-8,8
Em										
Ecart absolu moyen en % par crue (toutes crues)	84,5	85,5	119,7	84,5	151,1	64,5	211,8	88,4	51,3	74,9
nombre d'événements (n)	68	101	146	72	66	60	148	176	170	169
Em1										
Ecart absolu moyen en % par crue (crues > 1mm)	45,0	39,2	49,0	44,7	54,5	35,0	43,1	48,0	29,0	37,3
nombre d'événements (n')	32	39	52	43	38	38	76	119	110	116

Régression bilinéaire : $L_{ETC} = a * L_{ETC}^T + b * (P_a^T - P_a) + c$ L_{ETC} = Ecoulement total de la crue sur le bassin expérimentalL_{ETC}^T = Ecoulement total de la crue sur le bassin témoinP_a = Pluie de l'averse génératrice sur le bassin expérimentalP_a^T = Pluie de l'averse génératrice sur le bassin témoin

3.3.4 LES REGRESSIONS SUR LES ECOULEMENTS A L'ECHELLE DECADEIRE

La précision des méthodes de reconstitution des écoulements à partir des crues individuelles paraît suffisante pour envisager de détecter des modifications hydrologiques au niveau global sur l'ensemble d'une période donnée : exception faite du bassin C, les écoulements de crue reconstitués sur les périodes I et II approchent les valeurs observées avec des écarts inférieurs à 10%.

Par contre, les perspectives sont moins prometteuses pour un suivi à l'échelle des événements individuels, puisque l'écart moyen de la reconstitution des crues de plus de 1 mm est de l'ordre de 50%.

Si la connaissance des processus de genèse des écoulements, qui requiert le maintien de l'analyse à l'échelle des crues élémentaires, n'est pas un objectif du programme ECEREX, la seule perspective d'une approche globale sur une période de l'ordre de l'année est trop limitante pour étudier les situations non-stationnaires (par exemple recrû forestier naturel) ou associées à des modes d'occupation du sol de courte durée (sol nu). Une analyse par régressions au pas de temps mensuel, qui aboutirait à constituer des séries comportant seulement 4 ou 5 couples x-y, en *Epoques Rouge ou Jaune* est inadaptée à l'étude de ces périodes transitoires. On a donc opté pour l'échelle de temps décadaire, qui devrait lisser suffisamment la variabilité des phénomènes mesurés, sans en masquer exagérément l'évolution temporelle. Cette approche décadaire donnant de bons résultats en agro-climatologie et en agronomie, on peut penser qu'il en sera de même pour l'expérimentation hydrologique ECEREX menée à l'échelle spatiale de l'agronomie.

Ces séries décadaires ont été constituées par sommation des données provenant des caractéristiques de crues individuelles précédemment utilisées dans l'analyse par corrélation. L'information décadaire a été traitée comme celle des crues individuelles, à savoir corrélations linéaires entre les cumuls des Ecoulements Totaux de Crue (ETC) du témoin et du bassin expérimental, calculées sur les mêmes périodes I et II de l'*Epoque Verte*, jouant alternativement les rôles de calage et de validation.

Comme pour l'étude des crues individuelles, il a été procédé à un ajustement à une variable, puis à l'utilisation de l'écart pluviométrique entre le témoin et le bassin expérimental comme variable explicative supplémentaire.

Un traitement particulier a été réservé au couple C_B dont les corrélations restent les plus lâches de tout le dispositif. Cette situation s'explique par le concept trivial - mais non sans fondement - qu'en conditions pluviométriques très abondantes les sols perméables finissent par se saturer et par donner une réponse hydrologique qui rejoint celle des sols imperméables, c'est à dire que pendant une saison hydrologique, les comportements des sols à drainage vertical (100% de C) et des sols à dynamique latérale (90% du témoin B) ne sont pas parallèles, et l'ensemble des points correspondant à une année hydrologique s'ajuste mal à une relation linéaire. On a donc essayé des ajustements du type $C = f(B^\alpha)$, avec $\alpha > 1$. Cette tentative s'est avérée fructueuse, et les meilleurs résultats ont été obtenus avec une valeur $\alpha = 1,7$. Ces essais ont également été faits sur les autres bassins ayant une partie importante de leur couverture pédologique en sols à drainage vertical : les critères s'améliorent avec $\alpha = 1,3$ sur la paire I_B .

En revanche aucune amélioration n'a pu être obtenue sur D_B et E_B avec une quelconque valeur α supérieure à 1. D'autre part, l'utilisation d'une fonction puissance, fructueuse sur les séries décennales, n'a donné aucun résultat significatif dans les corrélations à l'échelle des crues individuelles.

Les performances de ces différentes tentatives ont été évaluées avec les mêmes paramètres que ceux précédemment décrits dans l'analyse par crue, c'est à dire (tableaux 3.3.08 et 3.3.09) :

- **L'écart global de la reconstitution des volumes écoulés (E_{glo}) sur l'ensemble de la période**

$$E_{glo} = (\Sigma L_{ETC} \text{ cal.} - \Sigma L_{ETC} \text{ obs.}) / (\Sigma L_{ETC} \text{ obs.}) * 100.$$
- **La moyenne des valeurs absolues des écarts par décennie (E_m) entre lame observée et lame calculée, calculée sur toutes les décennales,**

$$E_m = 1/n * \Sigma (| L_{ETC} \text{ cal.} - L_{ETC} \text{ obs.} | / (L_{ETC} \text{ obs.}) * 100)$$
- **La moyenne des valeurs absolues des écarts par décennie (E_{m15}) calculée sur les décennales durant lesquelles les écoulements ΣL_{ETC} du témoin sont restés en deçà de 15 mm.**
 Ce seuil a été retenu, car les écoulements décennales de moins de 15 mm ne participent que faiblement à l'écoulement total. Ainsi, sur les bassins témoins B et F les écoulements des décennales de moins de 15 mm ont représenté seulement 10% de l'écoulement de la période 1977-1983 (figure 3.3.05).

La précision des résultats fournis par les modèles décennales peut être évaluée :

- **au niveau global des volumes écoulés pendant la période (figure 3.3.06)**

Les reconstitutions décennales sont moins précises que celles faites crue par crue dans les cas où l'analogie fonctionnelle entre bassin témoin et bassin expérimental est bonne à très bonne. C'est le cas pour les associations G_F , H_F , A_B , E_B , D_B .

Par contre, les reconstitutions décennales sont meilleures que celles obtenues à partir des crues individuelles avec les appariements du type C_B peu justifiés au plan fonctionnel. Dans ce cas précis, la valeur absolue des E_{glo} calculés par le modèle décennal est de 4,5% (8,5% en période I et -0,4% en période II avec le modèle corrigé par la pluie), alors que la reconstitution crue par crue n'avait permis d'approcher cette valeur qu'à 29% près.

- Au niveau de l'écart moyen par décade (figures 3.3.07 et 3.3.08)

Calculé sur l'ensemble des décades, le critère de l'écart moyen Em donne des résultats un peu décevants en regard des espérances placées dans l'approche décadaire : Em dépasse 50% pour 18 ajustements sur 36 (avec et sans correction par la pluie). Les écarts moyens sont particulièrement forts sur les couples I_B , D_B et J_B .

Cependant, en considérant seulement les décades ayant produit plus de 15 mm d'écoulement sur le témoin, la moyenne des $Em15$ de périodes I et II se situe dans une gamme de 12 à 37%, qui permet d'envisager l'utilisation des séries décadaires reconstituées autrement que de façon globale. Les meilleures valeurs des $Em15$ moyens obtenues sont:

G_F	: 17% (corrélation sans correction par la pluie)
J_B	: 17% (corrélation avec correction par la pluie)
E_B et D_B	: 18% (corrélation avec correction par la pluie)
A_B	: 20% (corrélation sans correction par la pluie)
H_F	: 25% (corrélation avec correction par la pluie)
I_B	: 26% (corrélation avec correction par la pluie, $\alpha = 1,3$)
C_B	: 31% (corrélation avec correction par la pluie, $\alpha = 1,7$)

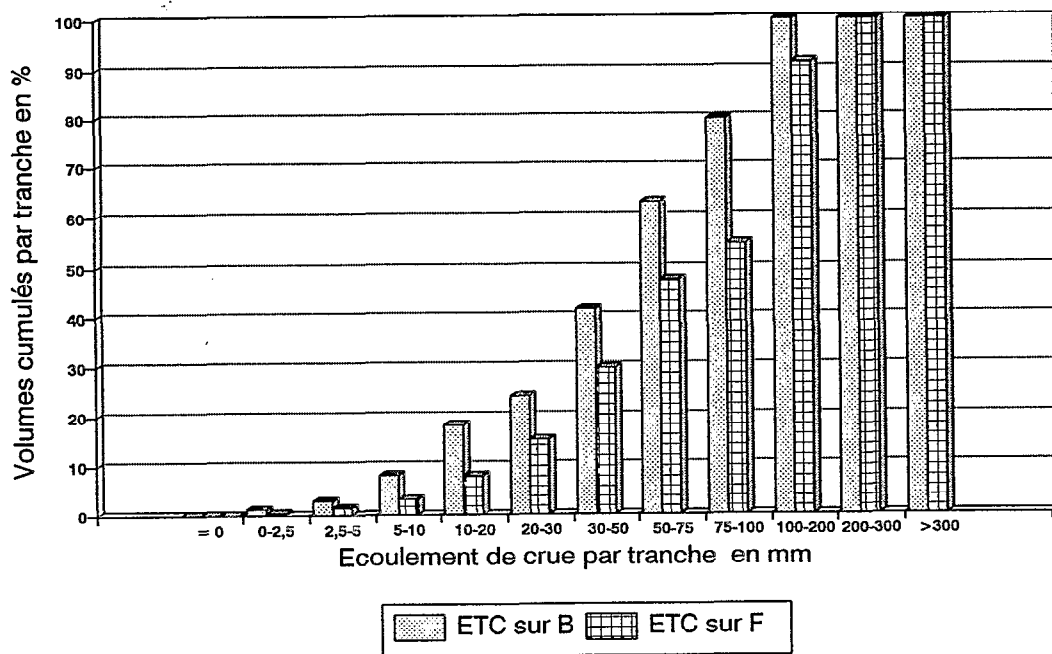
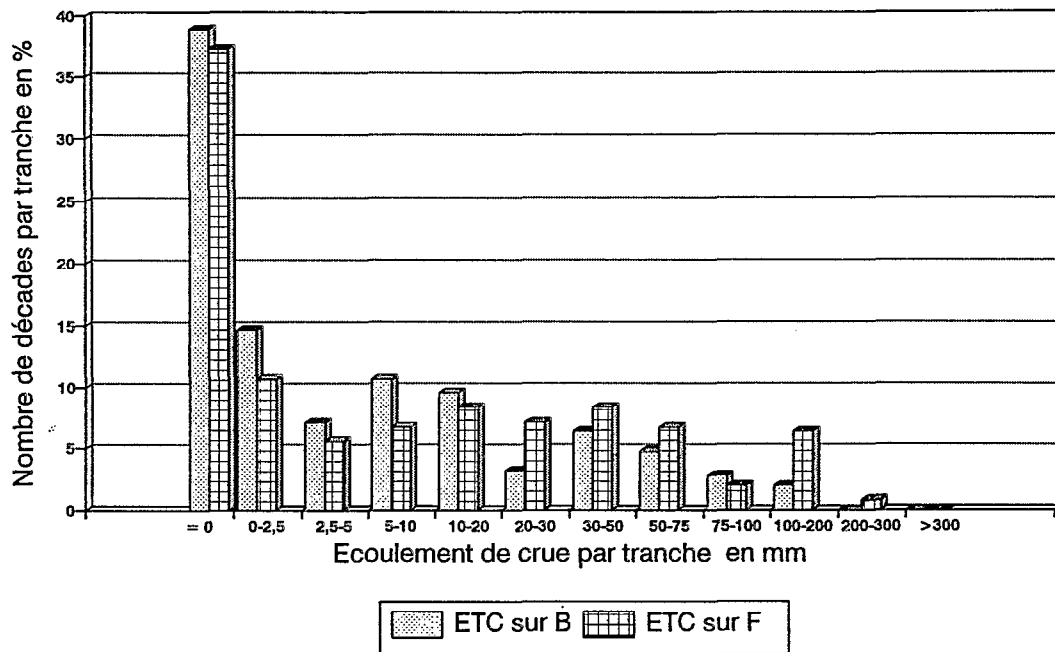


Figure 3.3.05 : Répartition des volumes décadaires d'Ecoulement Total de Crue par classes de hauteur (valeurs des classes en mm)

- en haut : pourcentage du nombre de décades par classe
- en bas : volumes cumulés par classe en %

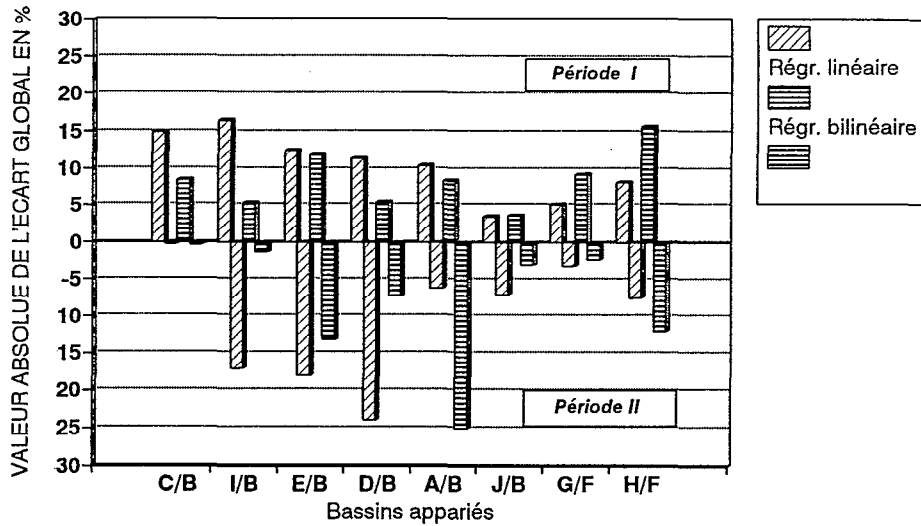


Figure 3.3.06 : Validation du calcul par décade des Ecoulements Totaux de Crue à partir du témoin
Valeurs absolues de la précision des reconstitutions globales des volumes écoulés E_{glo} (en % de la valeur observée)

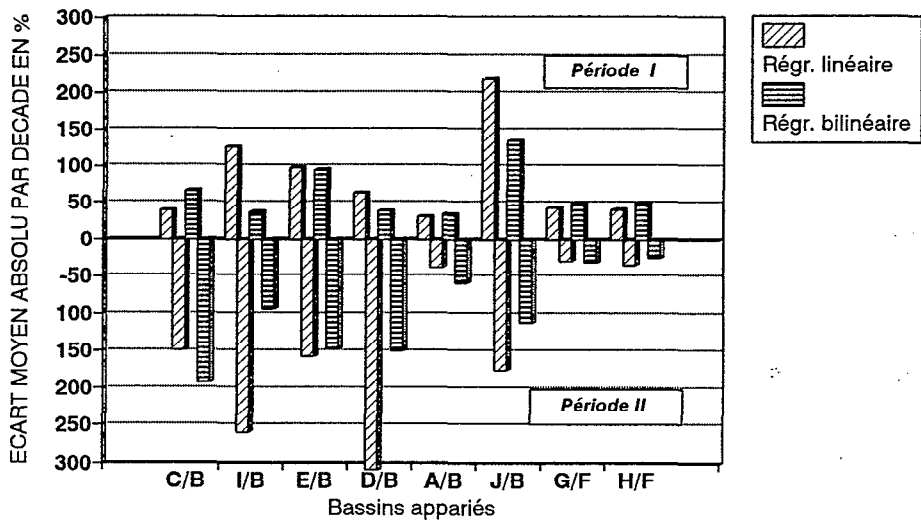


Figure 3.3.07 : Validation du calcul par décade des Ecoulements Totaux de Crue à partir du témoin
Moyenne de l'écart absolu par décade (E_m), calculé sur toutes les décades (en % de la valeur observée)

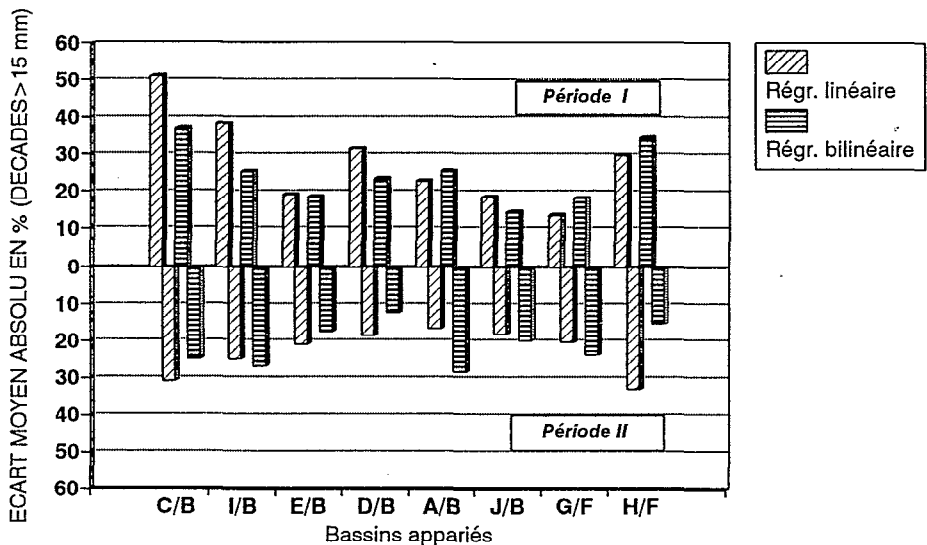


Figure 3.3.08 : Validation du calcul par décade des Ecoulements Totaux de Crue à partir du témoin
Moyenne de l'écart absolu par décade (E_{m15}), pour les décades avec ETC > 15 mm (en % de la valeur observée)

**Tableau 3.3.08 : Validation des corrélations linéaires entre lames écoulées par décades (en mm)
sur les bassins appariés**

CALAGE SUR PERIODE II VALIDATION SUR PERIODE I

BASSIN EXPERIMENTAL	C _B	I _B	E _B	D _B	A _B	J _B	G _F	H _F
Σ L _{ETC} observée	212	531	564	649	827	1548	1497	1691
Σ L _{ETC} calculée	243	619	493	575	740	1493	1574	1829
Eglo								
Précision globale en % sur toute la période	14,9	16,5	-12,5	-11,5	-10,5	-3,5	5,1	8,2
Em								
Ecart absolu moyen en % (toutes décades)	39,4	126,2	97,7	63,8	31,3	219,4	42,7	40,5
nombre de décades (n1)	18	31	27	27	24	44	37	37
Em15								
Ecart absolu moyen en % (décades avec ETC >15 mm)	51,1	38,4	19,2	31,5	22,9	18,4	13,8	29,8
nombre de décades (n1')	8	14	15	15	10	16	23	23

CALAGE SUR PERIODE I VALIDATION SUR PERIODE II

BASSIN EXPERIMENTAL	C _B	I _B	E _B	D _B	A _B	J _B	G _F	H _F
Σ L _{ETC} observée	126	391	268	292	363	1116	1119	1307
Σ L _{ETC} calculée	126	324	316	362	385	1196	1083	1209
Eglo								
Précision globale en % sur toute la période	-0,3	-17,1	18,0	23,9	6,2	7,1	-3,2	-7,5
Em								
Ecart absolu moyen en % (toutes décades)	148,9	259,1	157,4	540,1	38,6	176,4	29,7	35,0
nombre de décades (n1)	21	27	21	21	21	42	30	30
Em15								
Ecart absolu moyen en % (décades avec ETC >15 mm)	30,6	24,8	21,0	18,6	16,5	18,1	20,2	32,9
nombre de décades (n1')	8	8	6	6	8	18	20	20

Régression à une variable : $L_{ETC} = a * L_{ETCT}^{\alpha} + b$

L_{ETC} = Ecoulement Total de Crue pendant la décade sur le bassin expérimental

L_{ETCT} = Ecoulement Total de Crue pendant la décade sur le bassin témoin

α = 1.7 pour C_B , 1.3 pour I_B , 1.0 pour les autres bassins versants

**Tableau 3.3.09 : Validation des corrélations bilinéaires entre lames écoulées par décades (en mm)
sur les bassins appariés**

CALAGE SUR PERIODE II VALIDATION SUR PERIODE I

BASSIN EXPERIMENTAL	C _B	I _B	E _B	D _B	A _B	J _B	G _F	H _F
Σ L _{ETC} observée (couples)	212	531	564	649	827	1548	1497	1691
Σ L _{ETC} calculée	230	560	496	614	758	1492	1635	1958
Eglo								
Précision globale en % sur toute la période	8,5	5,4	-11,9	-5,5	-8,4	-3,6	9,2	15,8
Em								
Ecart absolu moyen en % (toutes décades)	67,1	37,1	94,7	38,0	33,9	134,9	50,9	50,6
nombre de décades (n1)	18	31	27	27	24	44	37	37
Em15								
Ecart absolu moyen en % (décades avec ETC >15 mm)	37,2	25,4	18,6	23,5	25,7	14,6	18,2	34,5
nombre de décades (n1')	8	14	15	15	10	16	23	23

CALAGE SUR PERIODE I VALIDATION SUR PERIODE II

BASSIN EXPERIMENTAL	C _B	I _B	E _B	D _B	A _B	J _B	G _F	H _F
Σ L _{ETC} observée (couples)	126	391	268	292	363	1116	1119	1307
Σ L _{ETC} calculée	126	386	303	314	453	1151	1094	1149
Eglo								
Précision globale en % sur toute la période	-0,4	-1,3	13,1	7,3	25,0	3,1	-2,3	-12,1
Em								
Ecart absolu moyen en % (toutes décades)	192,1	93,6	146,3	150,1	59,5	111,6	32,1	25,0
nombre de décades (n1)	21	27	21	21	21	42	30	30
Em15								
Ecart absolu moyen en % (décades avec ETC >15 mm)	24,9	26,7	17,5	12,2	28,3	19,9	23,7	15,2
nombre de décades (n1')	8	8	6	6	8	18	20	20

Régression à 2 variables : $L_{ETC} = a \cdot L_{ETC}^T{}^\alpha + b \cdot (P_a - P_a) + c$

L_{ETC} = Ecoulement total de la décade sur le bassin expérimental

L_{ETC}^T = Ecoulement total de la décade sur le bassin témoin

P_a = Pluie de des crues pendant la décade sur le bassin expérimental

P_a^T = Pluie de des crues pendant la décade sur le bassin témoin

α = 1.7 pour C_B , 1.3 pour I_B , 1.0 pour les autres bassins versants

3.3.5 CHOIX DE L'OPERATEUR DE RECONSTITUTION DES ECOULEMENTS DE CRUE EN CONDITIONS D'*Epoque Verte*

Dans la gamme des corrélations qui ont été testées (crue par crue ou par décade, avec 1 ou 2 variables explicatives), l'opérateur qui sera utilisé pour la reconstitution globale des volumes écoulés a été retenu en fonction des meilleurs résultats donnés par le critère *Eglo* (Ecart relatif sur le volume global).

Les corrélations crue par crue se sont avérées les plus précises pour 5 bassins (A_B , D_B , E_B , G_F , H_F). Pour 2 bassins I et J, les corrélations décadaires ont été retenues, à savoir la combinaison I_B à 2 variables qui reconstitue au mieux les volumes (moyenne des $|Eglo|$ de 8%), et la combinaison J_B qui donne des valeurs *Eglo* symétriques et de faible amplitude (-3,6% en période I et 3,1% en période II).

Les paramètres du modèle adopté ont ensuite été recalculés, à partir de la totalité des données de l'*Epoque Verte* (Périodes I + II). Les résultats de ces ajustements font l'objet du tableau 3.3.10. La figure 3.3.09 présente les régressions entre valeurs observées et valeurs calculées avec l'opérateur choisi.

Tableau 3.3.10 : Valeur des paramètres des corrélations (par décade ou par crue) pour la reconstitution globale des écoulements de crue, calculées sur l'*Epoque Verte* - (James en 1/10 de mm)

Bassin	Type de corrélation	Equation	n	r ²
Bassin A_B	C (2)	$L_A = L_B * 1,285 - (P_B - P_A) * 0,214 - 15,3$	n = 121	r ² = 0,945
Bassin D_B	C (2)	$L_D = L_B * 0,761 - (P_B - P_D) * 0,427 + 0,059$	n = 193	r ² = 0,923
Bassin E_B	C (2)	$L_E = L_B * 0,550 - (P_B - P_E) * 0,222 + 6,320$	n = 202	r ² = 0,878
Bassin G_F	C (1)	$L_G = L_F * 1,009 - 7,791$	n = 337	r ² = 0,969
Bassin H_F	C (1)	$L_H = L_F * 1,086 - 2,579$	n = 326	r ² = 0,945
Bassin I_B	D* (2)	$L_I = L_B^{1,3} * 0,090 - (P_B - P_I) * 0,192 + 10,42$	n = 56	r ² = 0,958
Bassin J_B	D (2)	$L_J = L_B * 1,147 - (P_B - P_J) * 0,318 + 55,04$	n = 82	r ² = 0,943
Bassin C_B	D* (2)	$L_C = L_B^{1,7} * 0,0039 - (P_B - P_C) * 0,111 + 27,47$	n = 28	r ² = 0,936

* : modèle avec changement de variable ($L_{t\text{témoin}}^\alpha$)

C : corrélation par crue

D : Corrélation par décade

(1) : avec 1 variable explicative

(2) : avec 2 variables explicatives

Les corrélations décadaires seront utilisées pour suivre l'évolution des écoulements tout au long de l'expérimentation. Pour les bassins I_B , J_B et C_B , les paramètres de cette estimation également utilisée pour la reconstitution globale des volumes, ont été présentés dans le tableau 3.3.10. Pour les autres bassins, les paramètres de la meilleure corrélation décadaire ont été recalculés sur toute l'*Epoque Verte*. On obtient ainsi les résultats reportés dans les figures 3.3.10 a&b et le tableau 3.3.11 :

Tableau 3.3.11 : Valeur des paramètres des corrélations sur les écoulements de crue par décade, en *Epoque Verte* - (lames en 1/10 de mm)

Bassin	Type de corrélation	Equation		
Bassin A_B	D (1)	$L_A = L_B * 1,268 - 49,6$	$n = 38$	$r^2 = 0,961$
Bassin D_B	D (2)	$L_D = L_B * 0,729 - (P_B - P_D) * 0,263 + 11,3$	$n = 47$	$r^2 = 0,926$
Bassin E_B	D (2)	$L_E = L_B * 0,530 - (P_B - P_E) * 0,125 + 31,6$	$n = 47$	$r^2 = 0,904$
Bassin G_F	D (1)	$L_G = L_F * 0,995 - 47,3$	$n = 64$	$r^2 = 0,986$
Bassin H_F	D (2)	$L_H = L_F * 1,067 - (P_F - P_H) * 0,368 - 7,35$	$n = 60$	$r^2 = 0,975$

D : Corrélation par décade (1) : avec 1 variable explicative (2) : avec 2 variables explicatives

Après avoir vérifié expérimentalement la précision des volumes reconstitués en utilisant les corrélations croisées en calage-validation sur les périodes I et II, on a calculé la précision statistique de la reconstitution fournie par l'opérateur appliqué à l'ensemble de l'*Epoque Verte*.

Dans le cas d'une régression linéaire simple $y_i = f(x_i)$, on a :

variance des moyennes conditionnelles (\bar{y}/x_i) pour un x_i donné, notée $\sigma^2 \bar{y}/x_i$

$$\sigma^2 \bar{y}/x_i = Se^2 * (1/n + ((x_i - \bar{x})^2 / \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2))$$

avec $Se^2 = (n/n-2) * \text{var}(y) * (1-r^2)$ r = coefficient de corrélation

variance d'une estimation pour un x_i donné :

$$Se^2 + \sigma^2 \bar{y}/x_i$$

Soient n valeurs indépendantes y_i de y , dont les estimations \hat{y}_i sont données par la droite de régression ; on a :

$$\text{var}(\Sigma \hat{y}_i) = \Sigma \text{var}(\hat{y}_i) = n * \text{se}^2 + \Sigma_{i=1}^n \sigma^2 \bar{y}/x_i$$

Les modules Fortran SIMREG (corrélation linéaire à une variable) et MULTIPLE (corrélation à 2 variables), du Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM ont été utilisés pour calculer aux bornes de l'intervalle de confiance à 90%, les valeurs des volumes reconstitués par sommation des reconstitutions unitaires, à la crue ou à la décade.

Tableau 3.3.12 : Précision de la reconstitution des volumes écoulés pendant toute l'Epoque Verte, dans l'intervalle de confiance à 90 %

bassin	ΣLe Epoque Verte et écart E pour $C=90\%$	précision $E/\Sigma Le * 100$
A _B	1202 mm +/- 89 mm	7,4%
C _B	350 mm +/- 42 mm	12,0%
D _B	1001 mm +/- 53 mm	5,3%
E _B	885 mm +/- 50 mm	5,6%
G _F	2582 mm +/- 66 mm	2,6%
H _F	2970 mm +/- 96 mm	3,2%
I _B	921 mm +/- 59 mm	6,4%
J _B	2648 mm +/- 114 mm	4,3%

Ces valeurs sont cohérentes et nettement supérieures aux précisions expérimentales obtenues en calage-validation des périodes I et II, ce qui est statistiquement satisfaisant (on avait peu de chances avec les 2 essais de validation croisée de se situer en dehors de l'intervalle de confiance à 90%). Ces seuils de précision permettront de vérifier si les effets hydrologiques constatés en *Epoques Rouge* et *Jaune* sont bien significatifs.

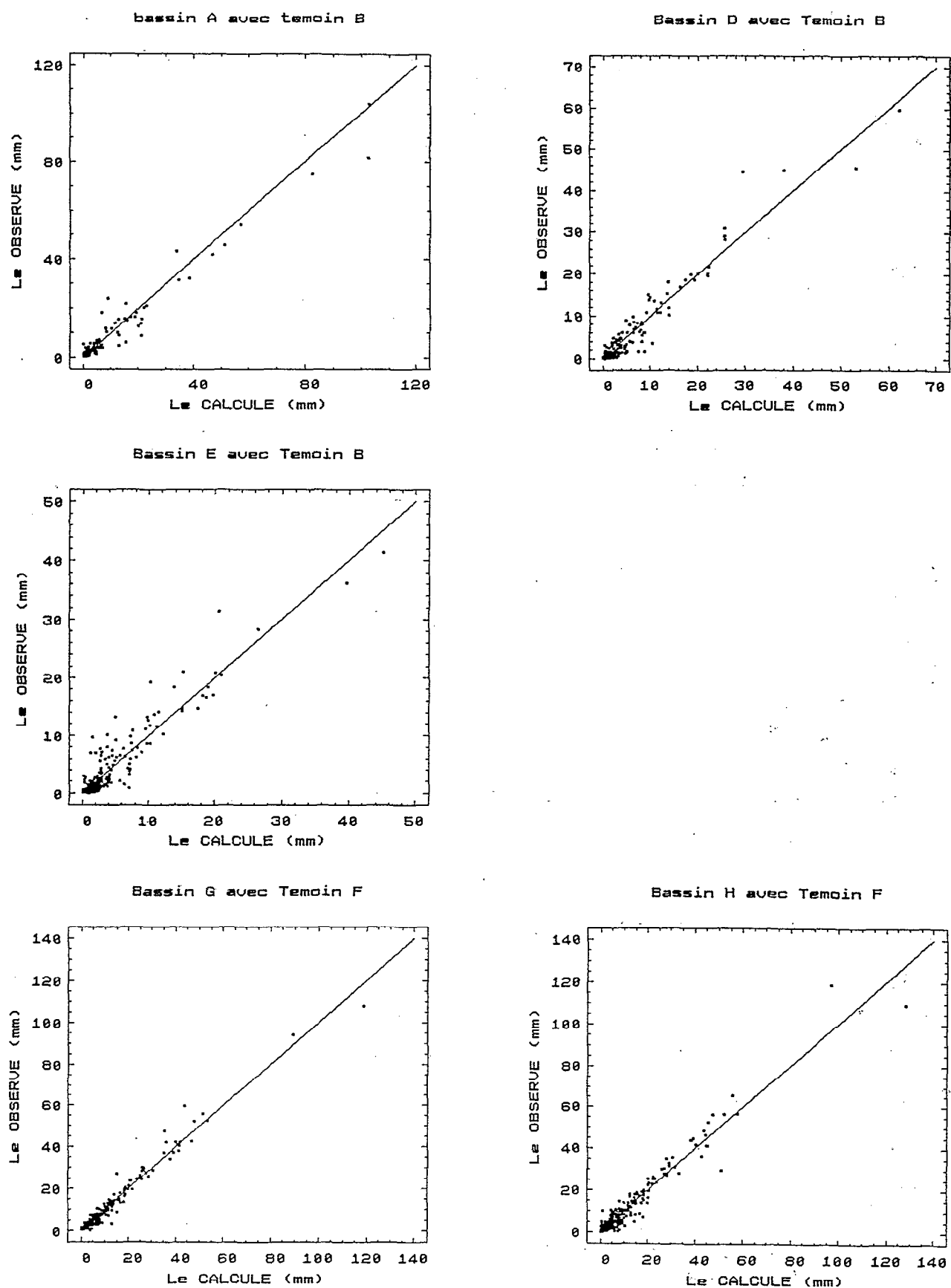


Figure 3.3.09 : Régressions entre Ecoulements Totaux de Crue calculés à partir du témoin (CRUE PAR CRUE), et écoulements observés sur les bassins expérimentaux, pendant l'Epoque Verte

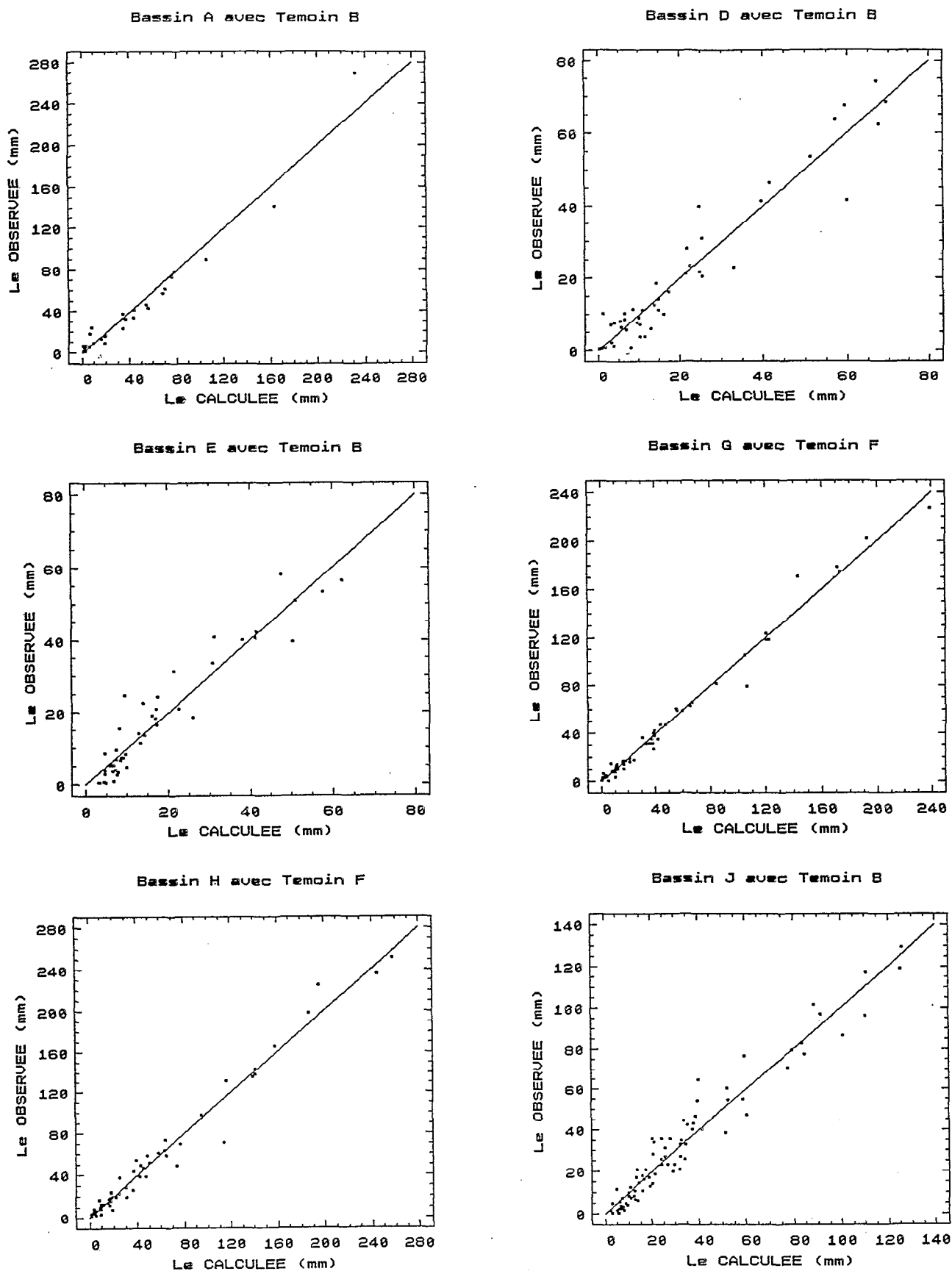


Figure 3.3.10a : Régressions entre Ecoulements Totaux de Crue calculés à partir du témoin (PARDECADE), et écoulements observés sur les bassins expérimentaux, pendant l'Epoque Verte

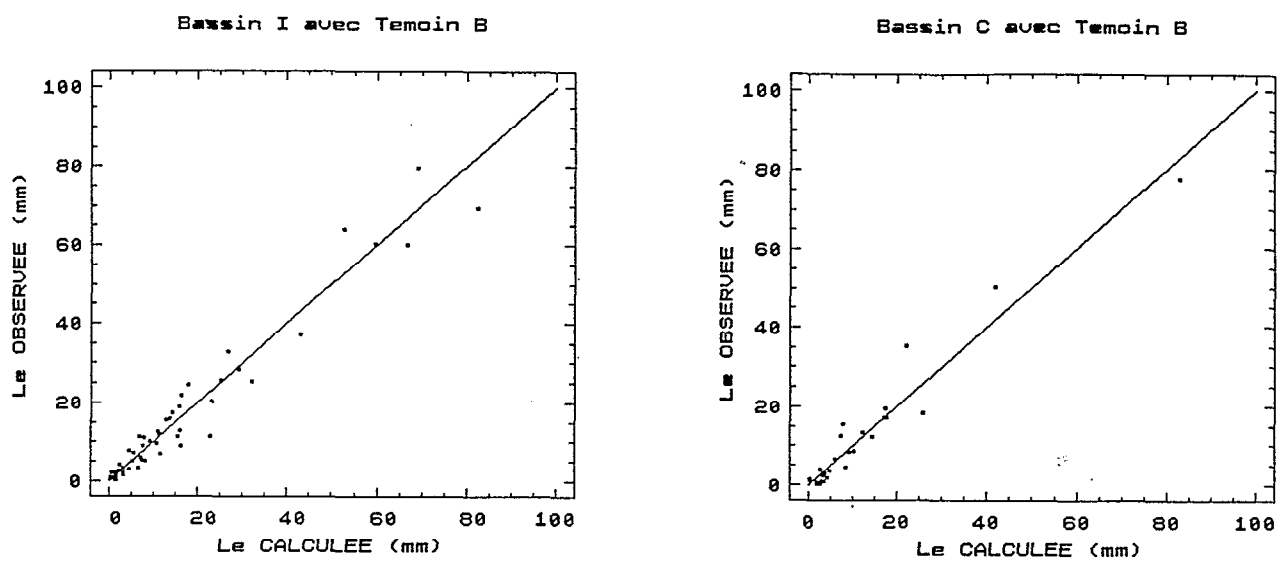


Figure 3.3.10b : Régressions entre Ecoulements Totaux de Crue calculés à partir du témoin (PARDECADE), et écoulements observés sur les bassins expérimentaux, pendant l'Epoque Verte

QUATRIEME PARTIE :

HYDROLOGIE DES BASSINS EN SOL NU

Six bassins versants ont fait l'objet d'un défrichement agricole à la lame, associé avec l'extraction des souches et des racines. Ce traitement a eu pour effet de mettre le sol de ces bassins entièrement à nu. La **quatrième partie** traite de l'hydrologie des bassins dans cette situation, pendant ce qu'il a été convenu d'appeler l'*Epoque Rouge*.

- Après caractérisation temporelle de l'*Epoque Rouge*, qui englobe pratiquement toute l'année qui suit le défrichement (chapitre 4.1), le chapitre 4.2 met en évidence une augmentation généralisée de l'écoulement de crue sur tous les bassins. Ces gains sont en général forts, mais très variables d'un bassin à l'autre ; aucune règle permettant de structurer cette variabilité ne s'impose clairement.
- Le chapitre 4.3 est consacré à la question de l'homogénéité de la réponse hydrologique des bassins pendant l'*Epoque Rouge*. En utilisant différents critères (doubles cumuls et méthode des ellipses de Bois), on met en évidence l'existence d'une période de réajustement après le passage des engins, de durée variable selon les bassins, pendant laquelle les comportements hydrologiques sont très hétérogènes. On est ainsi amené à définir sur chaque bassin une *Epoque Rouge stabilisée*, qui ne prend pas en compte cette période initiale de l'*Epoque Rouge*.
- Dans le chapitre 4.4, on étudie l'augmentation de l'écoulement des bassins en sol nu pendant l'*Epoque Rouge stabilisée*. Le gain d'écoulement est estimé par différents procédés (doubles cumuls, régressions établies à l'échelle des crues individuelles, ou moyennées par décades). Ils mettent en évidence que les gains relatifs des bassins s'organisent dans ordre inverse de l'abondance de leurs écoulements naturels.
- Le chapitre 4.5 aborde la question des processus qui sont à l'origine des augmentations de l'écoulement. L'eau supplémentaire, arrivant au sol après suppression de l'interception, ne peut expliquer qu'une faible proportion des gains. Pour sa plus grande part, l'augmentation des écoulements est due à une modification de la fonction de production des bassins versants, (les nouvelles caractéristiques physiques des bassins), plutôt que par des entrées additionnelles de pluie dans le système.

La fin de ce chapitre est consacrée à l'étude de l'évolution des débits de pointe. Par rapport au milieu forestier, ceux-ci sont en augmentation très forte sur tous les bassins versants. Une discussion sur la signification statistique de ces conclusions termine ce chapitre.

4.1 LES BASSINS VERSANTS L'ANNEE DU DEFRIQUEMENT : L'EPOQUE ROUGE

L'existence d'une situation en sol nu après le défrichage agricole, qui s'est réalisée sur 6 bassins expérimentaux, représente un point de convergence de l'expérimentation, appelé *Epoque Rouge*, à partir de laquelle la couverture végétale des bassins se reconstitue de manière différentielle, selon que l'évolution a été spontanée (recrû naturel sur D), qu'un changement brutal a été provoqué par le gestionnaire (plantation d'espèces fourragères (sur A, J et C), ou qu'une contrariété légère a été exercée pour limiter le recrû des espèces arbustives naturelles (nettoyage à la machette) dans les spéculations de sylviculture (bassins G et H).

La persistance d'un état de surface assimilable au sol nu est donc objectivement variable en durée selon les bassins, mais le choix d'une période de référence pour étudier cette situation, en caractériser globalement les comportements hydrologiques et faire des comparaisons entre bassins, constitue une démarche subjective et toujours discutable, dont les conséquences sont considérables au niveau des conclusions : les ordres de grandeur des modifications dans les termes du bilan hydrologique seront bien différents, si l'on choisit de limiter l'*Epoque Rouge* à une période très pluvieuse, de courte durée après le défrichage (la phase paroxysmique des impacts), ou si les impacts sont globalisés sur une période plus longue (annuelle ou multi-annuelle) qui intègre un tamponnement des effets aigus dans la phase de récupération de l'écosystème.

Pour permettre les comparaisons entre expériences et, suivant en cela Hibbert (1967), il est de tradition de rapporter les modifications de l'écoulement à la première année post-traitement (commençant le mois du traitement et finissant 12 mois après, ou à défaut à la fin du cycle végétatif), puis d'assurer le suivi annuellement et de comparer entre elles les deuxièmes années, troisièmes années, etc. après le traitement.

Telle a été notre démarche initiale, sachant qu'à ECEREX, les défrichements n'ont pas été faits à la même saison, ni durant la même année, éléments constituant une cause d'hétérogénéité supplémentaire pour la comparaison directe des résultats entre bassins versants.

Dans un premier temps, on a fixé les limites de l'*Epoque Rouge* en fonction de critères agronomiques, en s'appuyant sur l'historique des manipulations subies par les bassins versants :

- Le **début** de la période a été fixé au début de la saison des pluies qui a suivi le passage des engins (soit décembre pour A, C, et D) lorsque le défrichage avait été réalisé en saison sèche. Pour les bassins défrichés en saison des pluies le début de la période coïncide avec le passage des engins sur le bassin (soit janvier pour G, H, et J)
- En fonction des conditions expérimentales, la **fin** de l'*Epoque Rouge* a été fixée comme suit :
 - fin juillet pour
 - A (2 mois après la plantation du pâturage),
 - C (1 mois après la plantation des pomelos),
 - D (après 1 an de recrû naturel),
 - J (1 mois après la plantation du pâturage),
 - fin décembre pour G et H pour lesquels on considère que l'entretien des plantations contrarie suffisamment le recrû pendant les 6 premiers mois pour que les conditions du "sol nu" puissent se maintenir.

Ces dates font l'objet du tableau 4.1.01 :

Tableau 4.1.01 : Périodes de références pour l'état en "sol nu" (*Epoque Rouge*)

	date début		date fin	
	jj/mm/an	décade	jj/mm/an	décade
Bassin A	01/12/78	70	31/07/79	93
Bassin C	01/12/78	70	31/07/79	93
Bassin D	01/12/80	142	31/07/81	159
Bassin G	01/01/81	145	31/12/81	180
Bassin H	01/01/81	145	31/12/81	180
Bassin J	01/01/83	217	31/07/83	237

4.2 L'AUGMENTATION DES VOLUMES DE CRUE EN *Epoque Rouge*

Reconstitution des volumes par corrélation

La comparaison porte sur les Ecoulements Totaux de Crue (ETC) effectivement mesurés en *Epoque Rouge*, et les écoulements naturels reconstitués à partir des corrélations préalablement sélectionnées du tableau 3.3.10.

Les volumes observés et reconstitués sont reportés dans le tableau 4.2.01. On constate que :

- Les effets du défrichement sur l'écoulement total des crues, considérés sur l'ensemble de l'*Epoque Rouge*, sont importants et significatifs sur tous les bassins versants :
 - . effets importants : L'écoulement des crues aura augmenté de 63 % (Bassin H) à 104 % (Bassin D) par rapport au milieu naturel (tableau 4.2.01, colonne 5). Exprimées en lame équivalente, les augmentations sont comprises entre 244 mm au bassin D et 762 mm au bassin A (tableau 4.2.01, colonne 4).
 - . effets significatifs : La valeur des écoulements reconstitués aux bornes de l'intervalle de confiance 5 %-95 %, ne remet pas en cause le diagnostic, ni les ordres de grandeur de celui-ci.

Reconstitution des volumes par les pentes des doubles-masses

Il est intéressant de confronter ces résultats, obtenus à l'aide des modèles corrélatifs par crue ou par décade, avec les informations fournies par l'interprétation des courbes de doubles cumuls des écoulements de crue des bassins expérimentaux (cumulés sur l'axe Y) avec ceux du témoin correspondant (cumulés sur l'axe X). On a calculé le rapport des pentes de ces courbes de doubles cumuls dans la dernière colonne du tableau 4.2.01, c'est à dire :

$$(\Sigma LeX / \Sigma LeT)_{E. Rouge} / (\Sigma LeX / \Sigma LeT)_{E. Verte},$$

avec LeX et LeT = lames écoulées sur le bassin expérimental et le bassin témoin, respectivement.

La représentation graphique des cumuls fait l'objet des figures 4.2.01 à 4.2.03, sur lesquelles les cumuls sont discrétisés à l'échelle décadaire.

Les résultats sont tout à fait concordants entre les 2 approches pour 3 bassins versants (A, G et H).

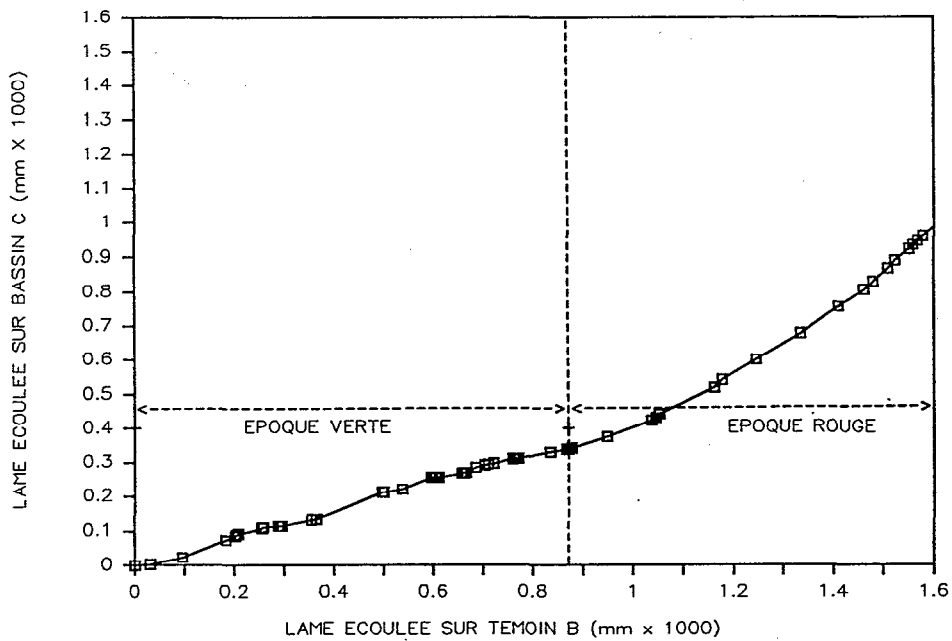
**Tableau 4.2.01 : Ecoulements Totaux de Crue (ETC) observés sur sol nu
et reconstitués sous forêt pendant l'Epoque Rouge**

Ecoulements Totaux de Crue						
Bassin versant	ΣLe observés sur sol nu (mm)	ΣLe calculés sous forêt (mm)	augmentation calculée (mm)	Rapport ΣLe sol nu / ΣLe forêt	Rapport des pentes des courbes de doubles cumuls	
C	682	E05 414	304	1,65	2,31	
		Em 378		1,80		
		E95 342		1,99		
D	479	E05 256	244	1,87	2,73	
		Em 235		2,04		
		E95 214		2,24		
A	1611	E05 904	762	1,78	1,96	
		Em 849		1,90		
		E95 793		2,03		
J	1037	E05 749	384	1,39	1,98	
		Em 653		1,59		
		E95 558		1,86		
G	1388	E05 801	621	1,73	1,79	
		Em 767		1,81		
		E95 732		1,90		
H	1453	E05 943	560	1,54	1,63	
		Em 893		1,63		
		E95 843		1,72		

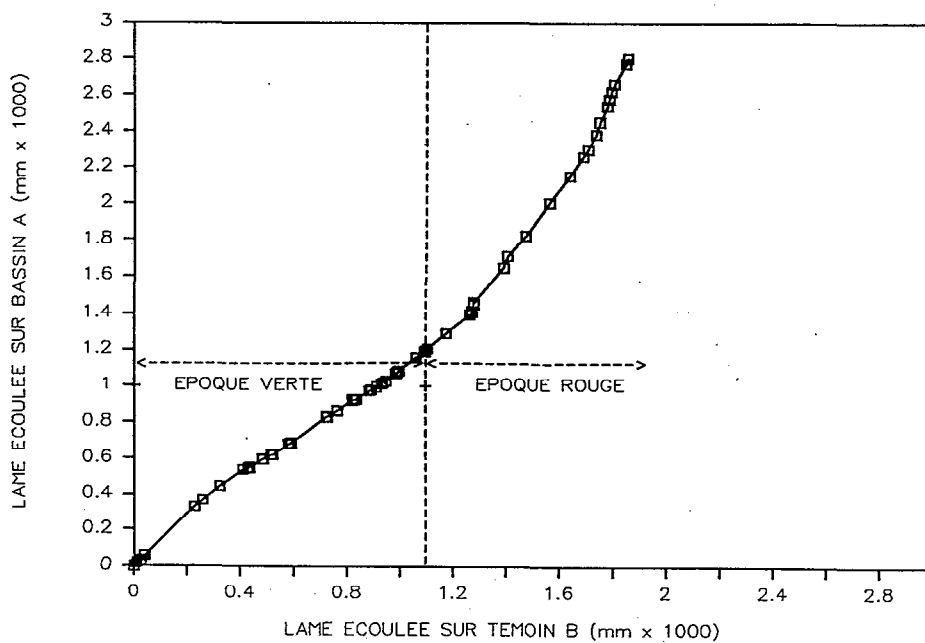
ΣLe calculés : somme sur l'Epoque Rouge des lames écoulées par crue ou par décade reconstituées par les régressions 3.3.10.

Em, E05 et E95 : Valeur moyenne et valeurs aux bornes de l'intervalle de confiance à 90% des ΣLe , calculées sous forêt.

Le "rapport des pentes des courbes de doubles cumuls" (dernière colonne) est la valeur brute tirée des fichiers par décades ($\Sigma Le_X / \Sigma Le_T$) E.Rouge / ($\Sigma Le_X / \Sigma Le_T$) E.Verter, avec Le_X et Le_T = lames écoulées sur le bassin expérimental et le témoin, respectivement.

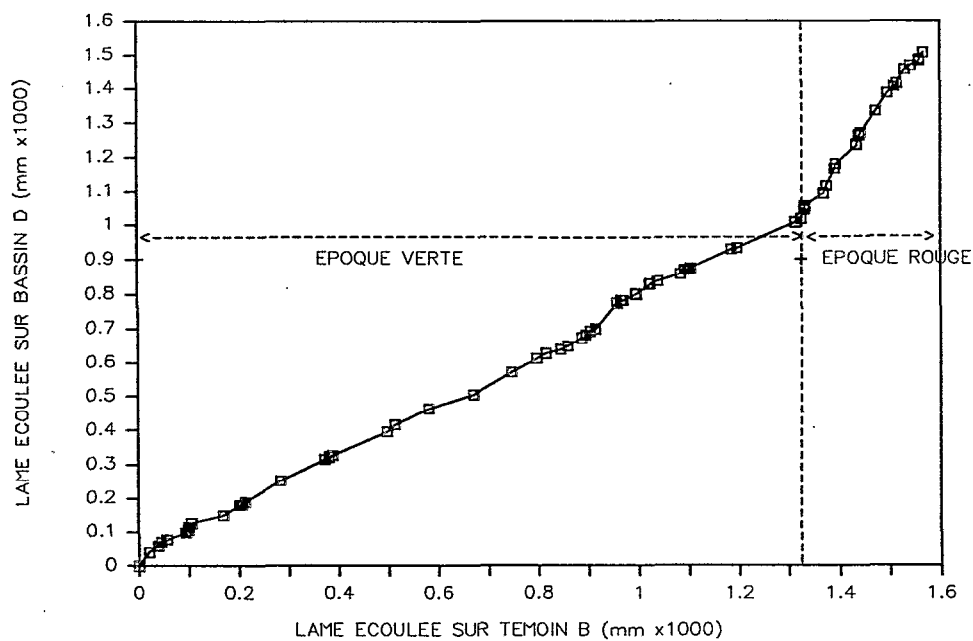


Bassin A avec témoin B

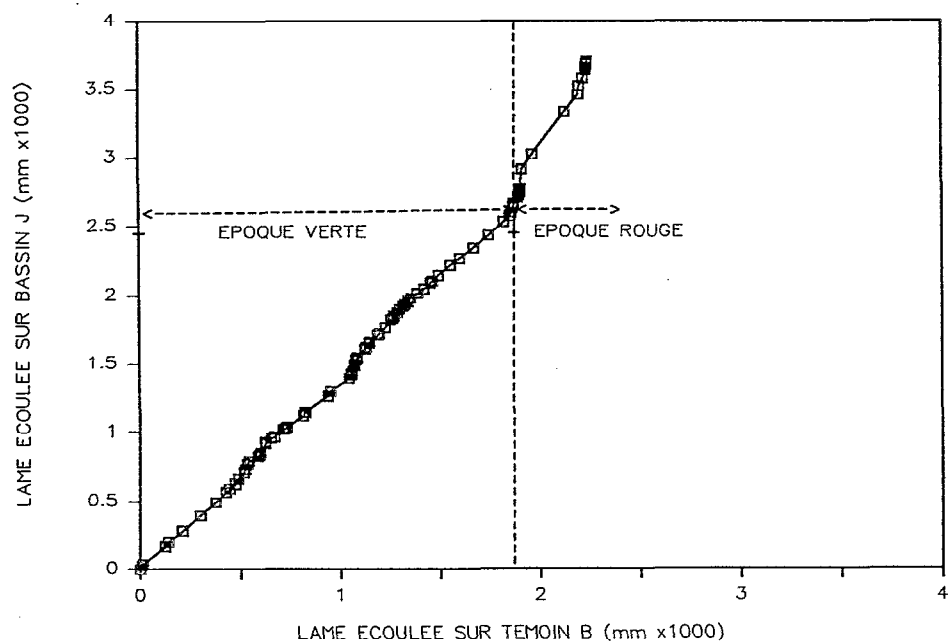


Bassin C avec témoin B

Figure 4.2.01 : Doubles cumuls des Ecoulements Totaux de Crue (ETC), discrétisés par décades, depuis l'origine des observations (*Epoque Verte*), jusqu'à la fin de la période en sol nu (*Epoque Rouge*).

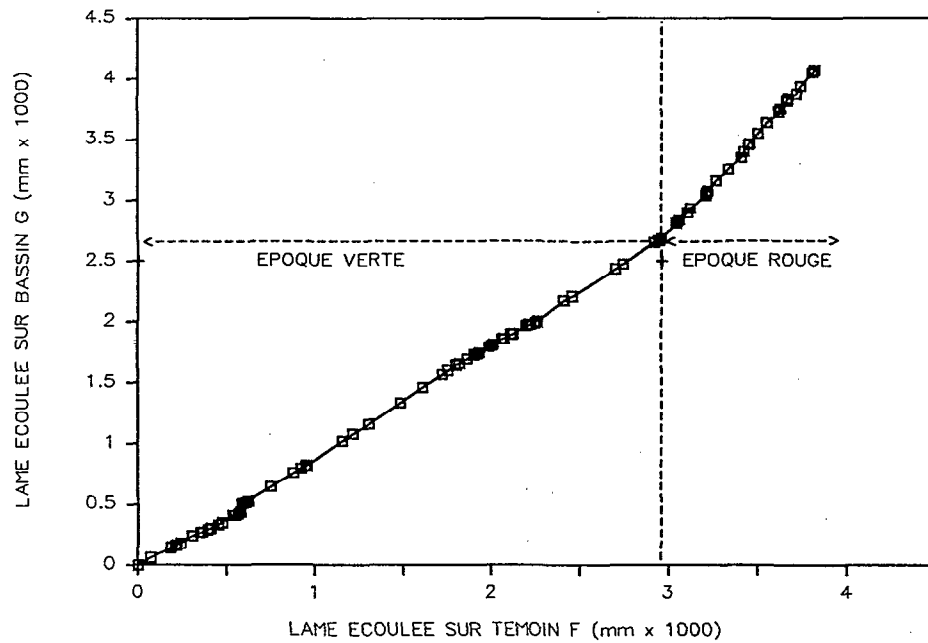


Bassin D avec témoin B

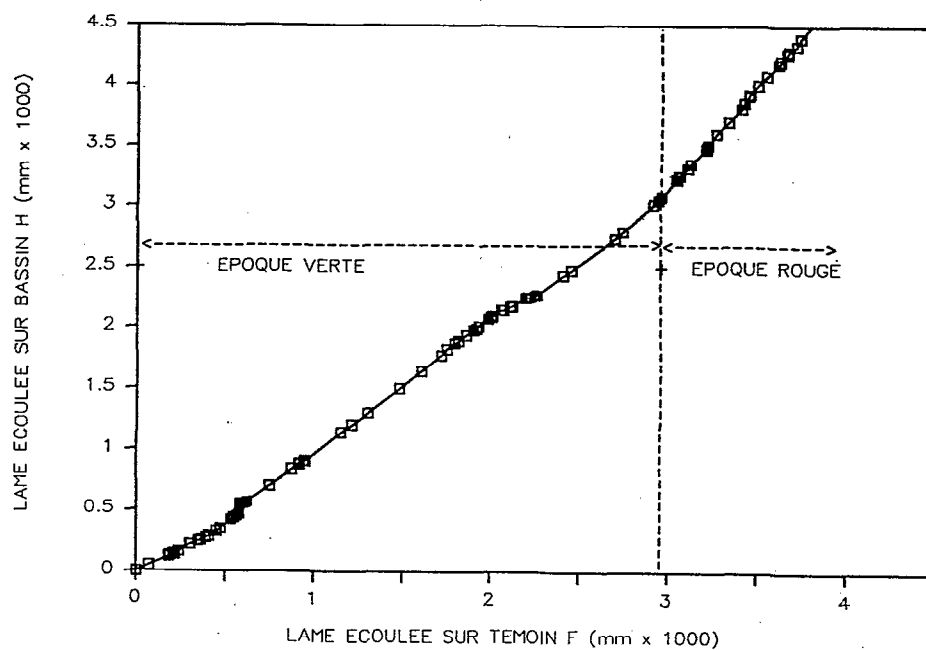


Bassin J avec témoin B

Figure 4.2.02 : Doubles cumuls des Ecoulements Totaux de Crue (ETC), discrétisés par décades, depuis l'origine des observations (Epoque Verte), jusqu'à la fin de la période en sol nu (Epoque Rouge).



Bassin G avec témoin F



Bassin H avec témoin F

Figure 4.2.03 : Doubles cumuls des Ecoulements Totaux de Crue (ETC), discrétisés par décades, depuis l'origine des observations (Epoque Verte), jusqu'à la fin de la période en sol nu (Epoque Rouge).

La valeur absolue de l'augmentation d'écoulement du bassin A, soit 762 mm en un an, constitue très probablement le record mondial en la matière. A notre connaissance, la plus forte valeur, homologuée par Bosch et Hewlett (1982), était celle du bassin 17 de Coweeta en Caroline du Nord, USA (Swank et Douglass, 1974), complètement défriché en 1941 et replanté en pins, sur lequel la plantation a amené une réduction d'écoulement de 662 mm par rapport au sol nu, pendant une année donnée. La surface de ce bassin (14 ha) est supérieure à celle du bassin A, mais l'augmentation calculée à Coweeta porte sur l'écoulement total annuel, alors qu'à ECEREX, ce chiffre ne concerne que l'écoulement des crues. Le bronze revient sans doute au bassin versant M7 (4,1 ha) de Tawhai State Forest (N.O. de South Island en Nouvelle Zélande), sur lequel un accroissement annuel de 650 mm a été constaté après déforestation totale (Pearce et al., 1980).

Pour les 2 bassins C et D à dynamique verticale sur 100% et 60% de la surface, les pentes de doubles cumuls conduisent à des augmentations de l'écoulement supérieures à celles obtenues par régression (respectivement 2,31 au lieu de 1,80 sur C, et 2,73 au lieu de 2,04 sur D). Le même constat peut être fait à propos du bassin J (gain relatif de 1,59 avec la régression et de 2,0 avec les doubles cumuls). Les modèles par corrélation calés sur l'ensemble des années de l'*Epoque Verte* prédisent des écoulements trop importants sur l'*Epoque Rouge*, surtout constituée par des mois pluvieux. Cette dérive paraît sensible lorsque l'analogie fonctionnelle entre bassin expérimental et bassin témoin est médiocre (cas de C_B et de D_B) ou lorsque le modèle de reconstitution utilisé n'a pas une finesse suffisante (utilisation du modèle décadaire pour J_B).

Des interprétations antérieures (Fritsch, 1986), élaborées à partir des courbes de doubles cumuls faits sur l'*Ecoulement Rapide de Crue* (*), et sur des *Epoques Verte et Rouge* légèrement différentes, avaient conclu à des rapports d'augmentation égaux ou supérieurs à ceux qui viennent d'être annoncés sur 4 bassins (3,3 pour C, 2,7 pour D, 2,5 pour A, et 1,8 pour G), et inférieurs pour les 2 bassins J et H (soit respectivement 1,8 et 1,5).

Ces divergences dans les résultats nous amènent à penser que l'*Epoque Rouge*, dont la définition satisfait aux critères agronomiques, naturalistes et bibliographiques, est porteuse d'une hétérogénéité fonctionnelle importante, et que les résultats globalisés sur cette période représentent sur chaque bassin une intégration de plusieurs dynamiques successives, et de ce fait ceux-ci sont difficilement comparables entre eux. En particulier, la méthode des doubles cumuls, bien adaptée pour déceler les modifications que l'on cherche à mettre en évidence, peut donner des résultats assez dépendants de la subjectivité de l'expérimentateur, selon le choix des périodes sur lesquelles les pentes des doubles cumuls sont comparées.

(*) Le volume de l'hydrogramme situé "au dessus" de la droite de séparation des écoulements, appelé alors "ruissellement", grandeur remplacée dans cette étude par l'*Ecoulement Total de Crue*, dont la détermination est plus robuste

4.3 RECHERCHE D'UNE PERIODE HOMOGENE EN *Epoque Rouge*

Pour mettre en évidence le degré d'homogénéité des données en *Epoque Rouge*, on utilisera la méthode des ellipses de Bois (1976, 1987), qui fournit un test statistique permettant de contrôler l'homogénéité d'une série chronologique, et d'accepter ou de rejeter cette hypothèse avec un risque choisi.

La méthode consiste à cumuler les résidus e_k , ($k = 1, n$) de la régression linéaire entre 2 séries chronologiques de n couples de variables, soit dans le cas présent, l'Écoulement Total de Crue du bassin expérimental (LeX) et du bassin témoin (LeT). Le tracé du cumul des e_k en fonction de k , noté Z_k , est une courbe partant du point (0,0) et aboutissant à (n,0). Si les 2 séries sont homogènes, les résidus sont distribués aléatoirement autour de la droite de régression et le tracé de la courbe Z_k oscille autour de l'axe des abscisses. Par contre, s'il existe 2 populations distinctes dans une série, les résidus ne sont plus distribués aléatoirement avec k , mais seront par exemple plutôt négatifs au début et plutôt positifs à la fin de la série. La courbe prend alors l'aspect d'un triangle.

L'ellipse de Bois visualise la courbe de contrôle associée à un seuil de confiance C donné. L'ordonnée Y_k en chaque point est défini par :

$$Y_k = t^*(S^2[Z_k])^{0.5}$$

avec $t =$ variable centrée réduite de Gauss de probabilité au dépassement $(1-C)/2$,
et $S^2[Z_k] =$ variance de Z_k .

Dans l'hypothèse où les populations des 2 variables sont normales, et que les observations sont indépendantes et les séries homogènes, Bois (1976) a montré qu'une assez bonne estimation de la variance de Z_k ($S^2[Z_k]$) était fournie par l'expression :

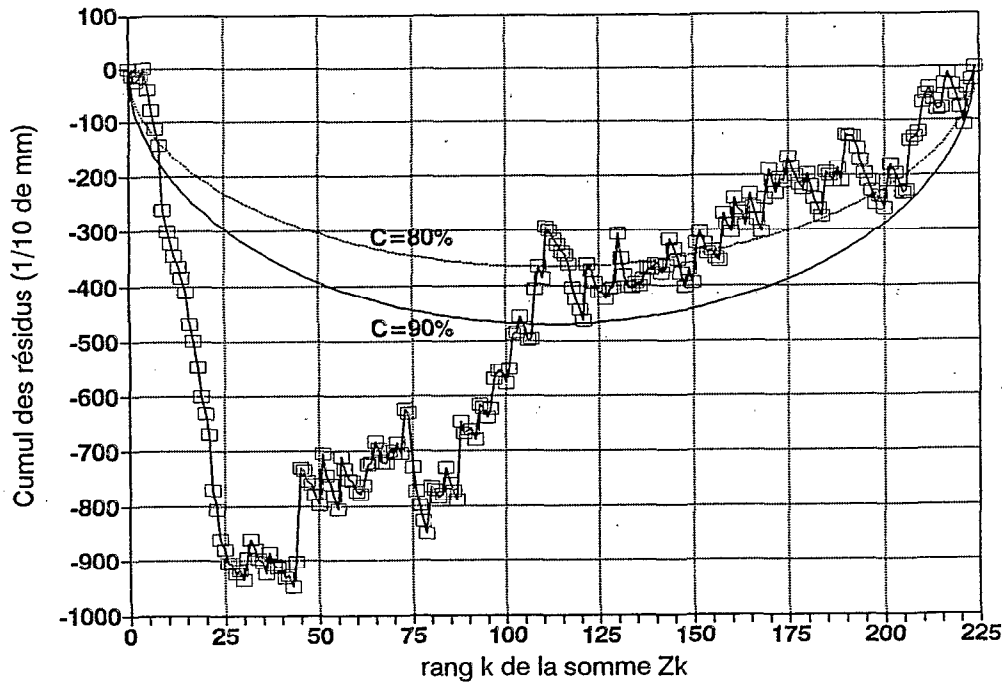
$$S^2[Z_k] = S^2y * (1-r^2) * k(n-k)(n-1)/n^2$$

avec $S^2y =$ variance de la série Y_k , $k=1, n$,
et $r =$ coefficient de corrélation linéaire $y = f(x)$

Un certain nombre de points peuvent sortir d'une ellipse sans que l'on puisse pour autant rejeter l'hypothèse d'homogénéité de la série étudiée. Bois (1987) a vérifié expérimentalement la fréquence de sortie des Z_k sur des séries homogènes générées stochastiquement ; selon ces résultats, on peut rejeter l'hypothèse d'homogénéité avec un risque de première espèce $(1-C)$, si on trouve plus de $(1-C)*n$ points en dehors de l'ellipse.

On a appliqué ce procédé sur les 6 bassins versants de l'*Epoque Rouge*. Les résultats font l'objet des figures 4.3.01 à 4.3.05, sur lesquelles ont été tracées les ellipses au seuils de 80% et de 90%.

Ellipse de BOIS : Bassin A en sol nu
 Décembre 1978 -> Juillet 1979



Ellipse de BOIS : Bassin A en Sol Nu
 Mars 1979 à Juillet 1979

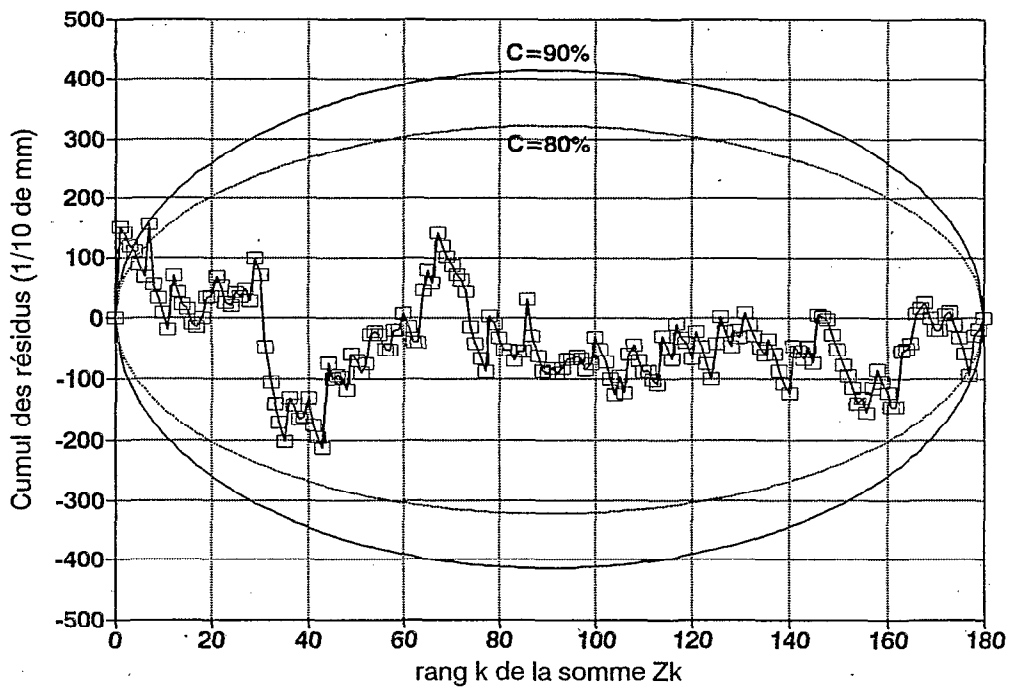
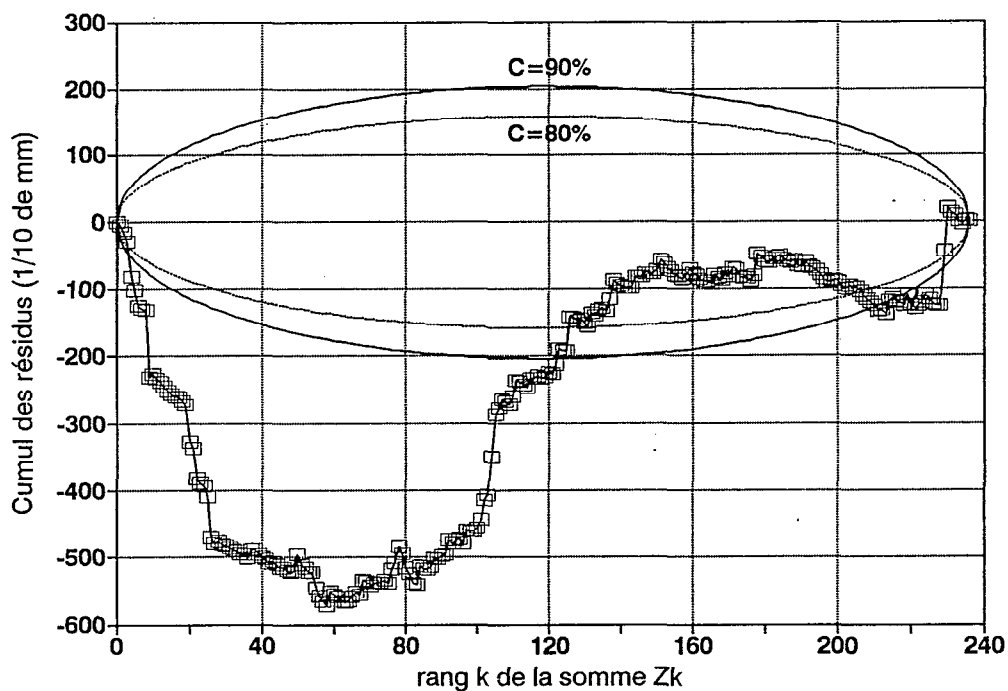


Figure 4.3.01 : Cumul des résidus de la corrélation par crue entre Ecoulement Total de Crue du bassin A et du témoin B, et tracé des ellipses de Bois pour les seuils C de 80% et 90%

En haut, figure 4.3.01a : sur totalité de l'Epoque Rouge

En bas, figure 4.3.01b : début mars à fin juillet

Ellipse de BOIS : Bassin C en Sol Nu
 Décembre 1978 à Juillet 1979



Ellipse de BOIS : Bassin C en Sol Nu
 Avril 1979 à Juillet 1979

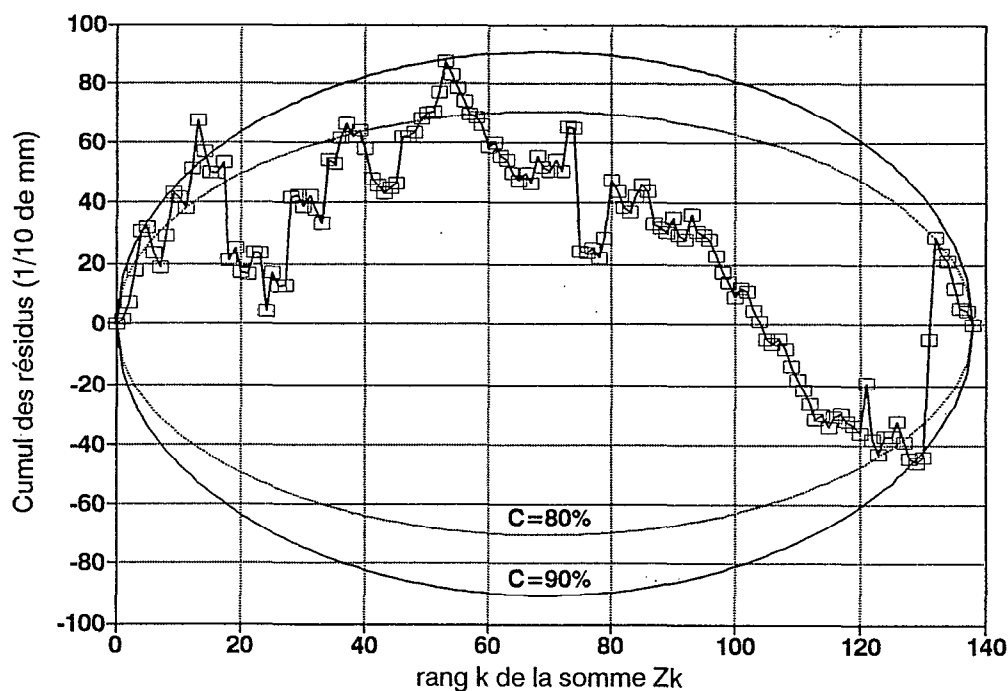


Figure 4.3.02 : Cumul des résidus de la corrélation par crue entre Ecoulement Total de Crue du bassin C et du témoin B, et tracé des ellipses de Bois pour les seuils C de 80% et 90%

En haut, figure 4.3.02a : sur totalité de l'Epoque Rouge

En bas, figure 4.3.02b : avril à fin juillet

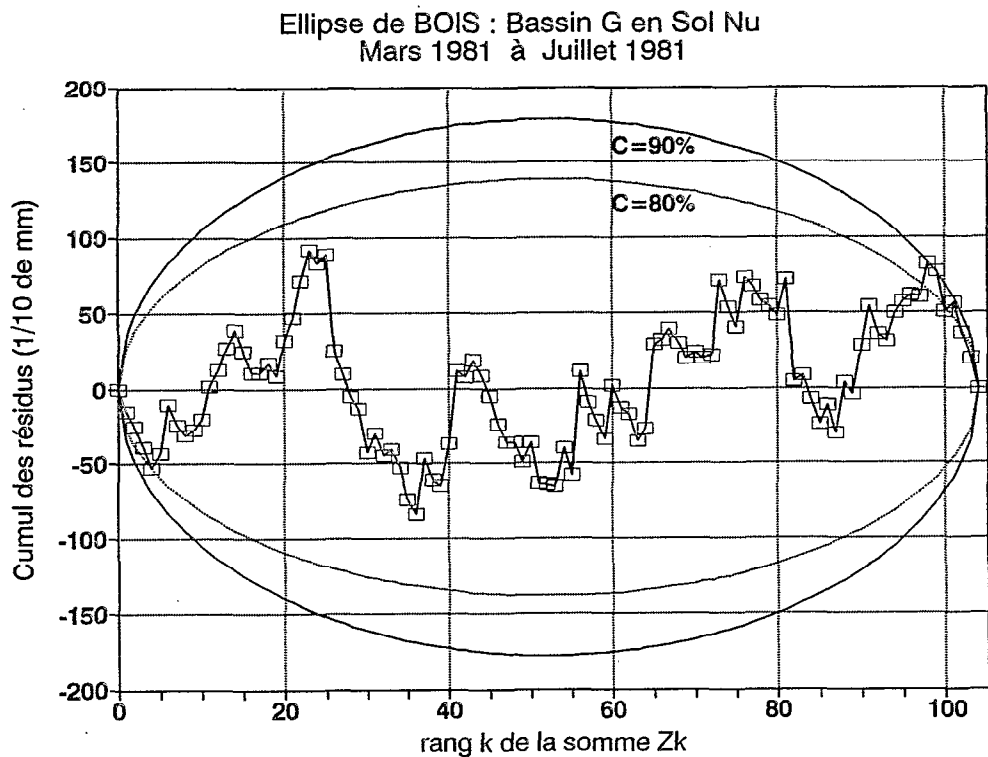
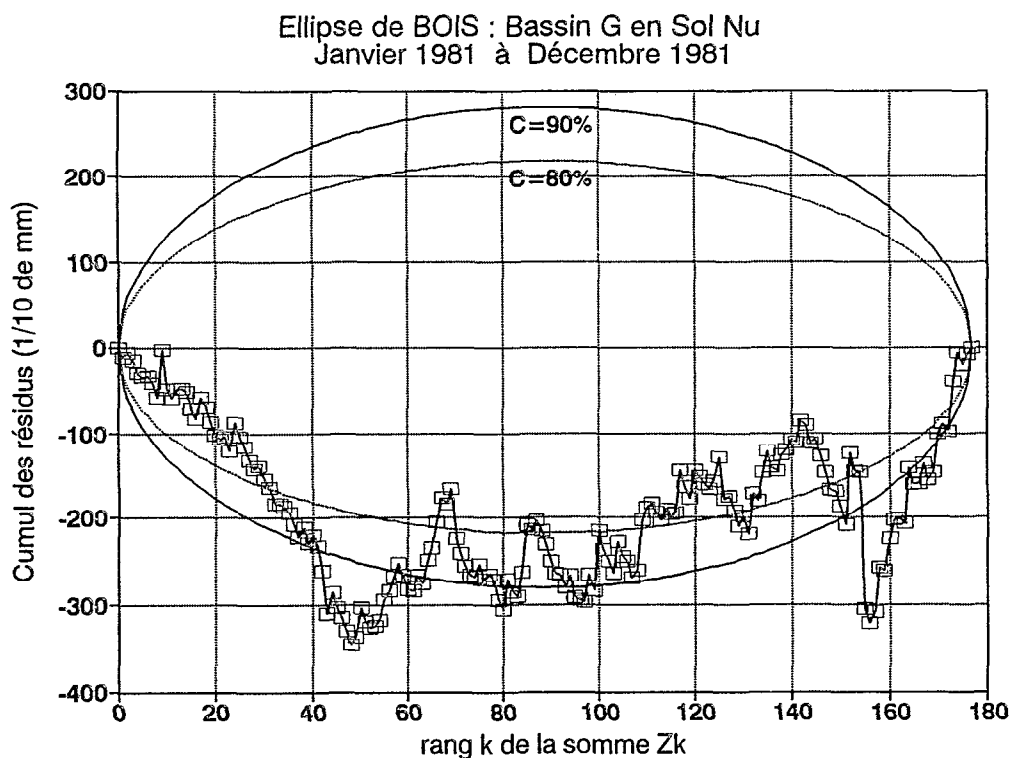


Figure 4.3.03 : Cumul des résidus de la corrélation par crue entre Ecoulement Total de Crue du bassin G et du témoin F, et tracé des ellipses de Bois pour les seuils C de 80% et 90%

En haut, figure 4.3.03a : sur totalité de l'*Epoque Rouge*

En bas, figure 4.3.03b : de mars à juillet

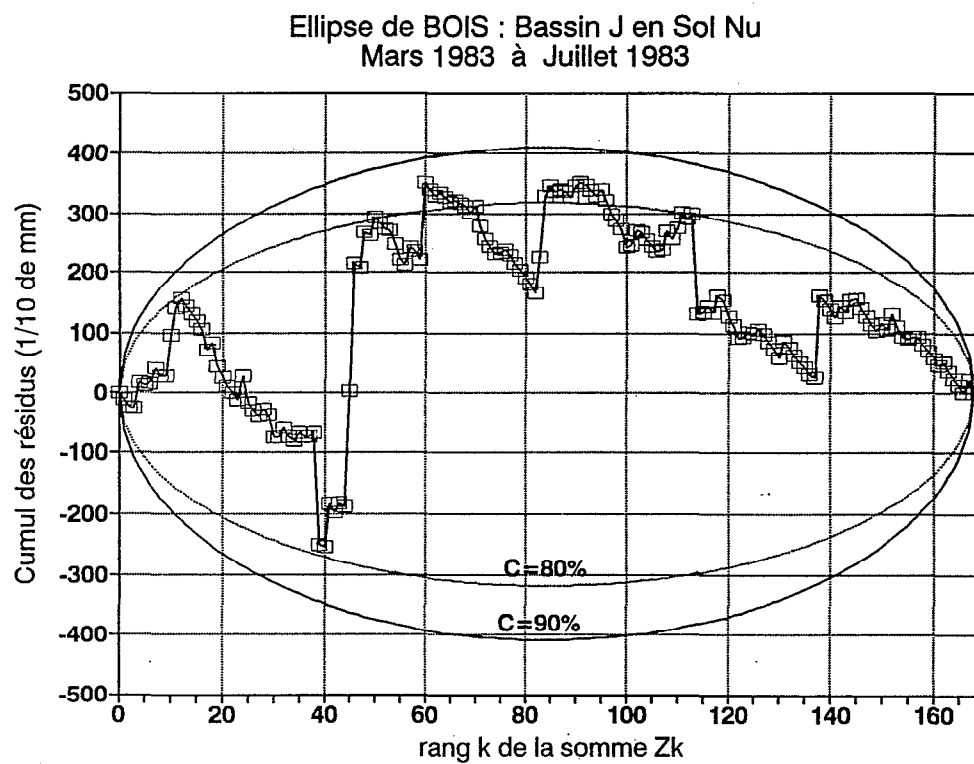
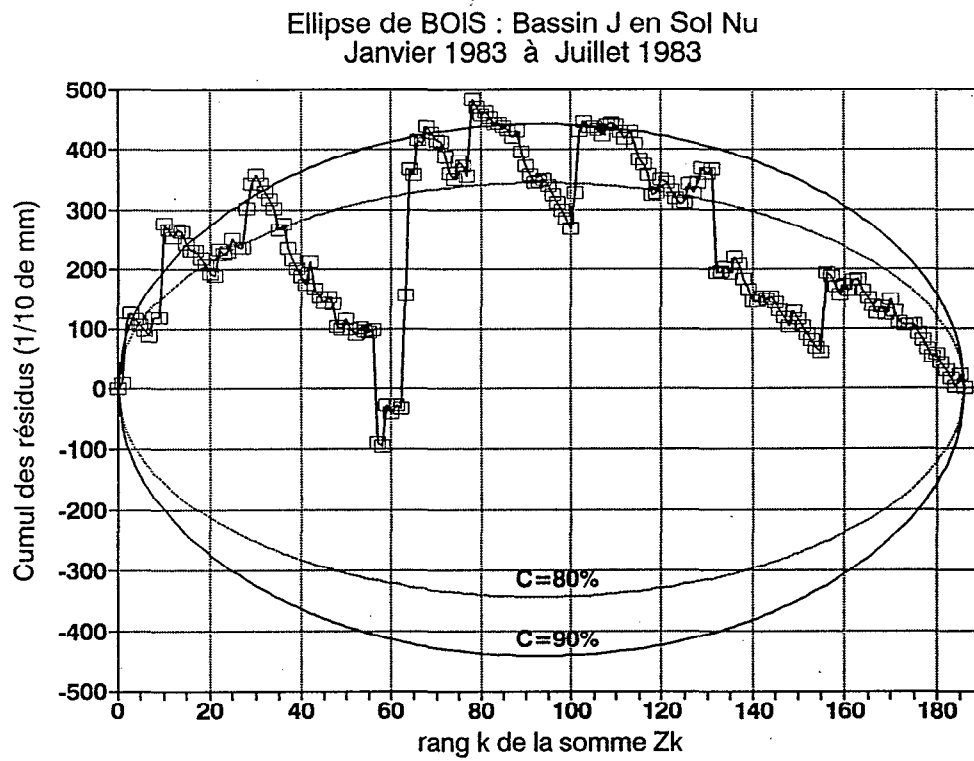


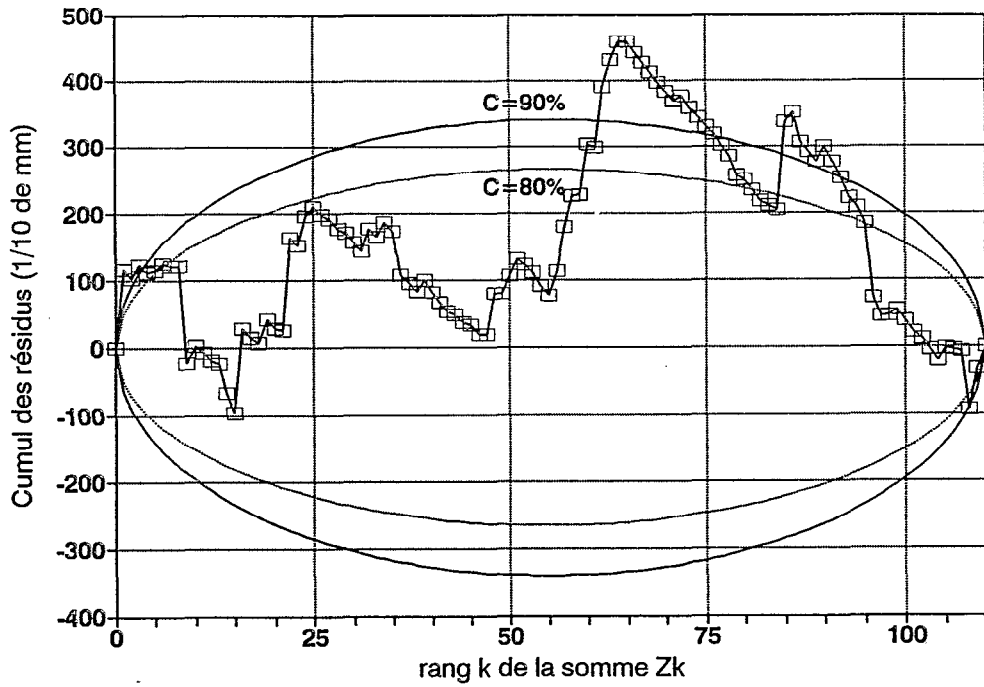
Figure 4.3.04 : Cumul des résidus de la corrélation par crue entre Ecoulement Total de Crue du bassin J et du témoin F, et tracé

des ellipses de Bois pour les seuils C de 80% et 90%

En haut, figure 4.3.04a : bassin F sur totalité de l'Epoque Rouge

En bas, figure 4.3.04b : bassin J de début mars à fin juillet

Ellipse de BOIS : Bassin D en Sol Nu
 Décembre 1980 à Juillet 1981



Ellipse de BOIS : Bassin H en Sol NU
 Janvier 1981 à Décembre 1981

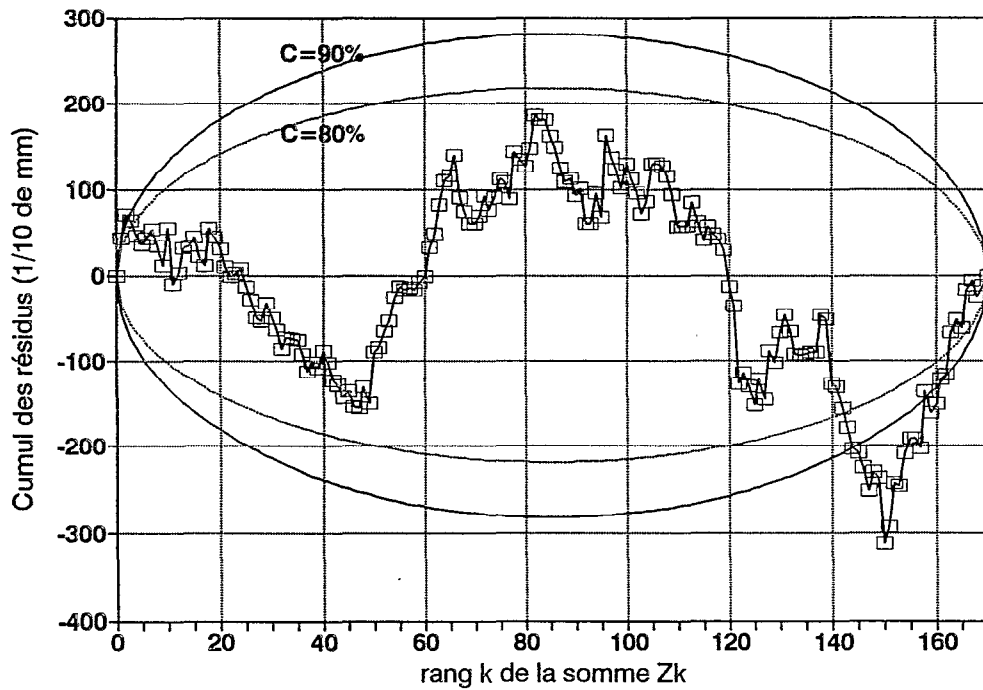


Figure 4.3.05 : Cumul des résidus de la corrélation par crue entre Ecoulement Total de Crue des bassins D et H et des témoins B

et F, et tracé des ellipses de Bois pour les seuils C de 80% et 90%

En haut, figure 4.3.05a : bassin D sur totalité de l'Epoque Rouge

En bas, figure 4.3.05b : bassin H sur totalité de l'Epoque Rouge

- Le cas du bassin A est particulièrement démonstratif : le cumul des résidus est systématiquement négatif pendant tout le début de l'*Epoque Rouge* (jusqu'à la crue de rang n°45 qui survient le 1° mars), et la position de la courbe en dehors des ellipses permet de rejeter l'hypothèse d'homogénéité des 2 séries étudiées (figure 4.3.01a). Après avoir recalculé la corrélation entre témoin B et bassin A sur la période de mars à juillet, une nouvelle courbe du cumul des résidus est construite (figure 4.3.01b). Celle-ci est située à l'intérieur des ellipses : le test ne permet pas d'infirmer l'hypothèse d'homogénéité de la période mars-juillet, même avec un risque statistique important (20%).
- Le phénomène se répète sur le bassin C, pour lequel le test permet de rejeter l'hypothèse d'homogénéité de la série des écoulements du bassin défriché (figure 4.3.02a). Dans ce cas, il a fallu supprimer toutes les crues survenues avant le 11 avril pour obtenir un test satisfaisant (= qui ne permette pas de rejeter l'hypothèse d'homogénéité). Le cumul des résidus n'est pas centré sur l'axe des X, ce qui est l'indice qu'une dérive résiduelle subsiste dans la série, **mais notre propos n'est pas de constituer à tout prix une série parfaitement stationnaire** à partir de données caractérisant un milieu que l'on sait être en évolution continue. Tout perfectionnisme en la matière serait illusoire et amènerait à prendre en compte des séries très réduites, puisque le terme de l'*Epoque Rouge* est impérativement fixé par le début de la mise en place des aménagements, dont les premiers effets peuvent être perçus sous forme d'oscillations des cumuls Z_k en fin d'*Epoque* (visibles par exemple sur le bassin C - figure 4.3.02b) à partir de la crue de rang n° 130, et qui correspondent à la date du creusement des 480 trous, de 0,5 m³ chacun, pour la plantations des pomelos. D'autre part, on a pu constater que les corrélations à la crue sous forêt naturelle étaient peu serrées avec les associations du type C_B qui comportent une dérive saisonnière intrinsèque : les bassins perméables coulent peu ou pas du tout en début de période humide, alors que le comportement du témoin est beaucoup plus stable. **Notre ambition se limite à nettoyer, si cela se justifie, l'information caractérisant l'*Epoque Rouge* de la plus grande part d'un bruit qui correspond à un réajustement hydro-pédologique des bassins versants après la phase d'intervention mécanisée.** En comparant les couples respectifs de figures a et b, on peut considérer que cet objectif a été atteint.
- Toutes ces observations, relatives aux bassins A et C, s'appliquent au bassin G (figures 4.3.03a et 4.3.03b). L'homogénéité doit être clairement rejetée sur la période janvier-décembre, alors que cette hypothèse est acceptable pour la période de mars à juillet, commençant 2 mois après l'exploitation forestière faite par le débusqueur à pneus et pratiquement dès la fin du défrichement agricole effectué avec les tracteurs à chenilles.
- Sur le bassin D qui comporte 60% de sols à drainage libre, perméables, on retrouve le type de difficulté précédemment décrite sur C, à savoir corrélation lâche avec le témoin et dérive hydrologique "fonctionnelle" du couple D_B , masquant partiellement le phénomène que l'on cherche à identifier (la dérive du système physique "bassin versant"). Le défrichement de ce bassin en fin de saison des pluies introduit une hétérogénéité expérimentale supplémentaire et spécifique à ce bassin : même contrarié par la saison sèche, le recrû a commencé à se développer dès la fin du défrichement (juillet de l'année précédente) et les conditions de début d'*Epoque Rouge* sont moins typées que sur les autres bassins défrichés entre novembre et février.

Le test de Bois ne permet pas d'accepter l'hypothèse d'homogénéité de la série sur l'*Epoque Rouge* dans son ensemble (26 points hors des ellipses correspondant à $C = 90\%$ et 40 points à $C = 80\%$, pour $n = 110$ points - figure 4.3.05). En supprimant les crues du mois de décembre, le critère permet de ne pas rejeter l'hypothèse d'homogénéité, mais l'aspect peu satisfaisant de la courbe des cumuls subsiste. L'interprétation la plus recevable de ce comportement est de considérer que la stabilisation était atteinte dès la fin du mois de décembre sur ce bassin D.

- Pour le bassin J, on relève sur l'ensemble de l'*Epoque Rouge* la possibilité d'accepter l'existence d'une hétérogénéité, significative seulement au risque de 20%, soit une situation beaucoup moins exemplaire que sur A, C et G (figure 4.3.04a). Lorsqu'on réduit la durée de la période testée, par exemple mars-juillet, le tracé s'améliore très légèrement et le test ne permet pas de mettre en doute l'homogénéité de cette période, même avec un risque élevé de 20% (figure 4.3.04b).
- Pour rendre compte des résultats assez peu concluants obtenus sur ces 2 bassins D et J, on peut là aussi faire appel à des arguments en rapport avec la sensibilité de la méthode, ou bien considérer que ceux-ci reflètent une structure particulière de ces 2 jeux de données D et J, qui serait différente de celles des bassins A, C et G. En allant dans ce sens, il est troublant de constater que les bassins D et J ont subi un avatar commun et spécifique dans leur scénario expérimental : la phase d'*exploitation forestière*, c'est-à-dire le débardage des grumes en dehors du bassin versant, qui est normalement faite par un tracteur articulé à pneus après ouverture de pistes au boteur léger à chenilles (avec une extension considérable de ces pistes, de $240 \text{ m}\cdot\text{ha}^{-1}$), n'a pas eu lieu. Pour des raisons conjoncturelles, cette phase d'exploitation a été contemporaine du *défrichement agricole*, et réalisée avec l'engin défricheur à chenilles. Cette variante s'est traduite par une différence visible dans le paysage entre les 2 groupes expérimentaux au terme de l'opération : l'engin à pneus est très traumatisant pour le sol et laisse le bassin traité dans un état très éloigné de la stabilisation relative que l'on a mise en évidence. Sur les unités traitées uniquement à la chenille, l'état de surface - au sens large du terme - postérieur au traitement est beaucoup plus proche du climax terminal d'un bassin laissé en sol nu. Dans ce dernier cas, le changement d'état se produit entre des conditions initiales et finales moins différenciées qu'avec l'utilisation du débusqueur à pneus, et le signal analysé est plus "mou", ce qui **pourrait expliquer** le comportement particulier de ces deux bassins vis à vis de la méthode de Bois.
- Enfin, aucune rupture spectaculaire n'est perceptible sur le bassin H (figure 4.3.05). Quelques points extérieurs aux ellipses en partie droite correspondent aux crues de la fin de l'*Epoque Rouge* (décembre 1981). Par ailleurs, la corrélation de ce bassin avec le témoin F est excellente, de même que l'analogie fonctionnelle avec le bassin G, et aucun argument hydrologique ou statistique ne permettrait de justifier une réponse très différenciée de H par rapport à G après un traitement identique. En l'occurrence, l'explication doit faire appel aux conditions de défrichement de ce bassin en saison des pluies : une large bande enserrant le talweg (zone de nappe affleurante) n'a pas pu être traitée par les engins de défrichement et la zone du talweg est restée encombrée de terre, de troncs et de souches. Ce barrage qui s'est dissous peu à peu, a filtré la réponse hydrologique du bassin versant, en étalant dans le temps son réajustement et constitue sans aucun doute la cause de la disparité de H avec son jumeau parfait G. Ce fait sera manifeste dans l'étude des débits de pointe et des transports solides. Pour les comparaisons inter-bassins, on retiendra la même période sur H que sur G (mars-juillet).

On a donc identifié, plus ou moins clairement selon les bassins, une période de transition après le passage des engins de débardage et de défrichement qu'il convient de ne pas prendre en compte, si l'on souhaite faire des comparaisons entre bassins. Dans nos conditions expérimentales, et selon les bassins versants considérés, cette période correspond à :

- décembre, janvier, février sur A, J et G, et H par analogie,
- décembre, janvier, février, mars et la première décade d'avril sur C,
- août à décembre sur D.

Le passage à l'état déclaré stabilisé est "spontané", aucune manipulation importante, si ce n'est le brûlis des andains préalablement lessivés par les pluies, n'ayant été faite sur les bassins versants pendant cette période de changement d'état. Sur les bassins versants traités avec les engins à pneus (A, C, G, H), on constate que **la période initiale de l'Epoque Rouge correspond à un rendement hydrologique inférieur à la tendance générale de la période (les résidus sont négatifs)**. Il y a donc une évolution des caractéristiques physiques des bassins versants, qui se concrétise par une fonction de production hydrologique en augmentation au terme de la période.

Pour caractériser ces processus, qui s'exercent durant cette période initiale de l'*Epoque Rouge*, on peut invoquer les hypothèses non exclusives suivantes :

- Il s'agit de la **réduction de la macro-rugosité du bassin** (due aux dépressions créées par le dessouchage et aux andains), sous l'action combinée de l'énergie cinétique des pluies et des écoulements de surface, qui façonnent un bassin versant plus lisse, sur lequel la "productivité hydrologique" augmente et s'homogénéise. On peut remarquer sur les courbes de Bois bien caractérisées des bassins A, C, G, que les cumuls des écarts (Le observés-Le calculés) sont constamment négatifs en début d'*Epoque Rouge*, ce qui est l'indice que cette période est hydrologiquement moins productive, que ne le prédit le modèle moyen sur la période (rétention superficielle des écoulements dans les dépressions).
- Il s'agit d'une **modification des caractéristiques hydro-pédologiques des bassins versants**, par exemple :
 - . un changement de régime des bas-fonds consécutif à une remontée de la nappe et à l'extension des zones contributives, phénomène constaté par Ruprecht et Schofield (1989). Toutefois, dans le cas cité, le phénomène est lent, de l'ordre de plusieurs années,
 - .. l'apparition d'états de surface propres aux sols exposés aux actions météoriques (destruction de l'horizon superficiel microagrégé, glaçage, formation de pellicules de battance, etc), et donc du passage d'un système hydro-pédologique commandé par la dynamique interne, à un système dans lequel les états de surface joueraient un rôle significatif, aboutissant à un bassin plus "ruisselant".

Les hauteurs précipitées importantes pendant ce temps de latence (tableau 4.3.01) fournissent quelques arguments pour éclairer ces hypothèses :

Une pluviométrie de l'ordre de 1000 mm aura permis au changement de s'établir sur les bassins où la dynamique de l'eau est latérale, et les écoulements sont abondants (A et G). Ce chiffre est de 1700 mm sur C (100% de sols perméables, à dynamique verticale). Les valeurs sont plus faibles sur les bassins D (de type C à 60%) et J (de type A) avec respectivement 1026 mm et 573 mm de pluie sur la période, mais ces bassins défrichés uniquement avec des engins à chenilles, se sont révélés peu sensibles à l'analyse par le test de Bois.

Tableau 4.3.01 : Pluie totale sur les bassins défrichés, entre l'arrivée des engins et le début de la période considérée comme homogène et identifiée par les tests de Bois

bassin	période de réajustement	pluie pendant la période (mm)
C	1-12-78 au 10-04-79	1693
D	1-07-80 au 31-12-81	1026
A	1-12-78 au 28-02-79	1052
J	1-12-82 au 28-02-83	573
G	1-12-80 au 28-02-81	1039
H	1-12-80 au 28-02-81	1077

4.4 L'AUGMENTATION DES VOLUMES DE CRUE PENDANT l'Epoque Rouge stabilisée

Le tableau 4.4.01 présente les Ecoulements Totaux de Crue observés sur les bassins expérimentaux (ΣLe) et les témoins correspondants (ΣLeT), totalisés uniquement sur la période stabilisée de l'Epoque Rouge, telle qu'elle a été définie plus haut. On a calculé le rapport $R_I = \Sigma Le / \Sigma LeT$ des mêmes variables sur l'Epoque Verte. Le gain d'écoulement relatif R d'un bassin donné en période rouge stabilisée, par rapport à son écoulement originel dans les mêmes conditions pluviométriques, est égal à R_I/R_0 , valeur portée en dernière colonne du tableau 4.4.01.

Comme au paragraphe 4.2, on a également procédé aux reconstitutions des écoulements sous forêt à l'aide des équations de régressions avec les témoins du tableau 3.3.10.

Les résultats (tableau 4.4.2) sont pratiquement identiques dans 3 cas :

- Bassin A 634 mm par corrélation au lieu de 627 mm par doubles cumuls
- Bassin G 403 mm par corrélation au lieu de 414 mm par doubles cumuls
- Bassin H 474 mm par corrélation au lieu de 475 mm par doubles cumuls

Sur ces bassins, les estimations des gains relatifs d'écoulement entre sol nu et forêt sont conservées, quelle que soit la méthode utilisée pour reconstituer les écoulements sous forêt.

Tableau 4.4.01 : Ecoulements cumulés observés et gains relatifs calculés après défrichement, par comparaison des pentes des doubles cumuls en *Epoque Verte* et en *Epoque Rouge stabilisée*.

Bassin	Limites de la période stabilisée en <i>Epoque Rouge</i>	<i>Epoque Rouge</i> Période stabilisée			<i>Epoque Verte</i>	$R = R_1/R_0$
		R_1			R_0	
		ΣLe mm	ΣLeT mm	$\Sigma Le/\Sigma LeT$	$\Sigma Le/\Sigma LeT$	
C	11-04 -> 31-07-79	342	295	1,16	0,39	2,99
D	1-01 -> 31-07-81	450	235	1,91	0,77	2,49
A	1-03 -> 31-07-79	1341	578	2,32	1,09	2,14
J	1-03 -> 31-07-83	954	340	2,81	1,42	1,97
G	1-03 -> 31-07-81	772	456	1,69	0,91	1,87
H	1-03 -> 31-07-81	787	456	1,73	1,04	1,66

ΣLe : cumul des Ecoulements Totaux de Crue du bassin expérimental

ΣLeT : cumul des Ecoulements Totaux de Crue du bassin témoin correspondant

Des différences plus sensibles apparaissent sur les 3 autres bassins :

- Bassin C 139 mm reconstitués par corrélation au lieu de 114 mm par doubles cumuls
- Bassin D 230 mm reconstitués par corrélation au lieu de 181 mm par doubles cumuls
- Bassin J 591 mm reconstitués par corrélation au lieu de 483 mm par doubles cumuls

Les gains relatifs d'écoulement "sol nu / forêt" sont modifiés comme suit :

- Bassin C $R = 2,46$ par corrélation au lieu de 2,99 par doubles cumuls
- Bassin D $R = 1,96$ par corrélation au lieu de 2,49 par doubles cumuls
- Bassin J $R = 1,61$ par corrélation au lieu de 1,97 par doubles cumuls

On choisira l'estimation obtenue à partir des doubles cumuls, qui est la méthode la plus "transparente", et dont on estime, après s'être donné des assurances sur la stabilité de la période d'utilisation, qu'elle reconstitue mieux la variabilité de la série temporelle qu'un calcul fait à partir d'une corrélation calée sur une période antérieure moyenne.

Ces estimations sont reportées dans le tableau synthétique général 4.4.03, qui comprend 2 parties :

- a) Le rappel du classement des bassins versants en milieu naturel par ordre de coefficients d'Écoulement Totaux de Crue K_{ETC} croissants, calculés sur la période 1978-1979.
- b) Les estimations des gains d'écoulements relatifs et absolus en *Epoque Rouge stabilisée*.

On constate que :

- **L'écoulement est toujours beaucoup plus important après défrichement qu'en forêt naturelle. Les augmentations varient entre 200% et 70% (rapports $R = 2,99$ du bassin C à $R = 1,66$ du bassin H, tableau 4.4.03b, ligne 1 et figure 4.4.01).**
- **L'accroissement est variable selon les bassins, ce qui n'a *a priori* rien d'étonnant : les périodes étudiées n'ont pas la même durée et ne correspondent pas aux mêmes années, et la pluviométrie a varié entre 1445 et 2349 mm selon les bassins (tableau 4.4.03b, ligne 2). Toutefois en dépit de cette hétérogénéité, on constate que l'augmentation de l'écoulement après défrichement est inversement proportionnelle aux écoulements en milieu naturel, les bassins les moins productifs réalisant les gains les plus élevés (figure 4.4.01).**
- **Les coefficients d'écoulement de crue (rapportés à la pluie totale de la période stabilisée) atteignent des valeurs très élevées pour 4 bassins versants sur 6, de 46% à 57% (tableau 4.4.03b, ligne 4 et figure 4.4.02))**

La comparaison directe des gains (L_+ , exprimés en lame équivalente, tableau 4.4.02b, ligne 7) entre bassins versants, serait sans fondement, Par contre cette comparaison est possible en rapportant l'écoulement supplémentaire à la pluie de la période (tableau 4.4.03b, ligne 8). Elle montre que :

- **Les écoulements supplémentaires sur les bassins où les sols à drainage vertical sont dominants (D et C) et dont les accroissements rapportés à la situation originelle sont les plus forts, restent modestes en valeur absolue, soit respectivement 12,2% et 15,7% de la pluie incidente, et les plus faibles de tout le dispositif.**
- **Les bassins à sols à dynamique latérale, qui présentaient déjà des écoulements très soutenus en milieu naturel voient leurs apports augmenter fortement dans des proportions qui représentent de 20% à 30% de la pluie incidente.**

Un commentaire s'impose à propos de l'écart constaté entre les bassins G et H. De caractéristiques pédologiques semblables, et avec des algorithmes de reconstitution de débits d'*Epoque Verte* (doubles cumuls et corrélations) d'excellente qualité, l'écart entre les accroissements relatifs R des 2 bassins (respectivement 1,87 et 1,66) aurait de quoi surprendre. Il s'agit sans aucun doute d'une signature hydrologique du défrichement incomplet de la zone de bas-fond du bassin, dont il a déjà été fait mention à propos de l'analyse des ellipses de Bois. L'effet de ce traitement inachevé aura permis de soustraire à l'écoulement de crue environ 5% de la pluie (l'augmentation ayant mobilisé 24,8% de la pluie sur G et 19,3% de celle-ci sur H). Si par chance, cet effet a pu être mis en évidence sur la paire GH, la portée opérationnelle de cette variante de défrichement envisagée comme un procédé de conservation des eaux et sols pour réduire les écoulements de crue reste bien limitée.

Tableau 4.4.02 : Effets du défrichement globalisés sur l'Epoque Rouge stabilisée
estimation des débits en forêt par corrélation

bassin	$\Sigma 1$ ΣLe observé	$\Sigma 2$ ΣLe calculé	$R = \Sigma 1 / \Sigma 2$
C	342	139	2,46
D	450	230	1,96
A	1341	634	2,12
J	954	591	1,61
G	772	403	1,92
H	787	474	1,66

Tableau 4.4.03 : Tableau synthétique des effets du défrichement globalisés sur l'Epoque Rouge stabilisée
(estimations par les pentes des doubles cumuls)

Situation en forêt naturelle (classement par coefficients d'écoulement de crue croissants)

Bassin	C	D	A	J	G	H
K_{ETC} sous forêt (1978-79) en %	7,3	14,8	19,0	23,3	29,9	34,4

Situation en Epoque Rouge stabilisée (périodes et durées variables selon bassin versant)

Bassin	C	D	A	J	G	H
Gain d'écoulement relatif/forêt (R)	2,99	2,49	2,14	1,97	1,87	1,66
Pluie totale sur la période (P mm)	1448	2207	2349	2071	1445	1620
Écoulement Total de Crue (ETC) observé (L_{SNU} mm)	342	450	1341	954	772	787
K_{ETC} observé (L_{SNU}/P %)	23,6	20,4	57,1	46,1	53,4	48,6
Écoulement Total de Crue (ETC) calculé comme sous forêt (L_{FOR} mm)	114	181	627	483	414	475
K_{ETC} calculé comme sous forêt (L_{FOR}/P %)	7,9	8,2	26,7	23,3	28,7	29,3
Gain d'écoulement absolu par rapport à la forêt (L_+ mm)	228	269	714	471	358	312
part du gain rapporté à la pluie (L_+/P %)	15,7	12,2	30,4	22,7	24,8	19,3

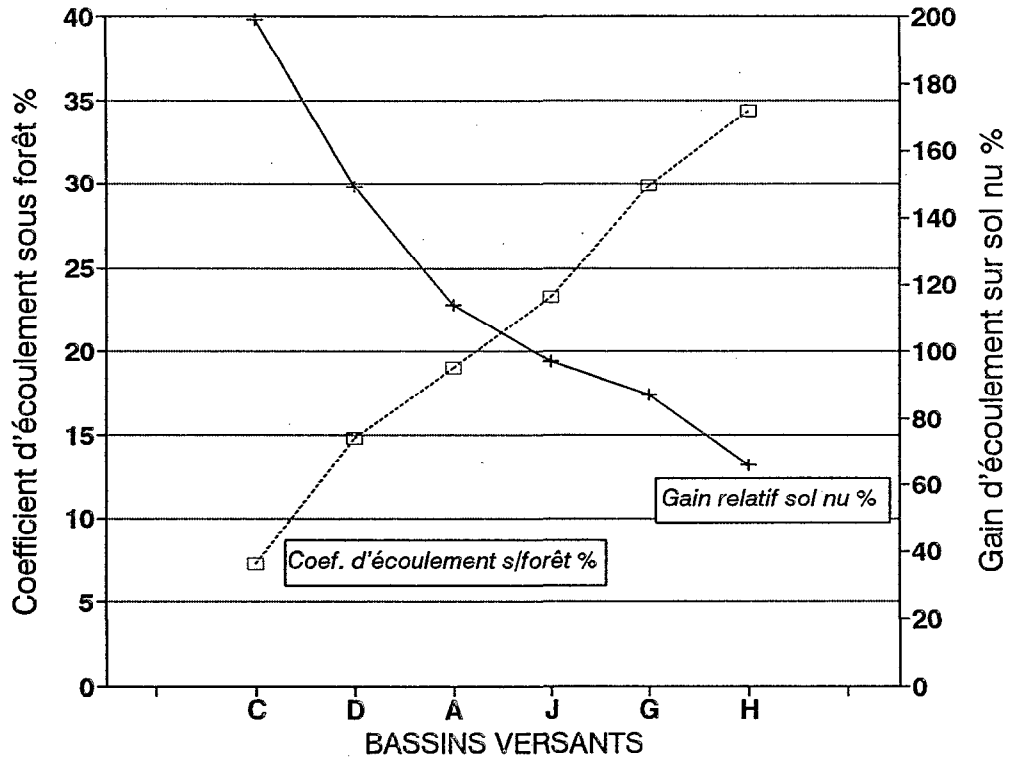


Figure 4.4.01 : Augmentation relative de l'Écoulement Total de Crue (ETC) en *Epoque Rouge stabilisée*, rapportée à l'écoulement sous forêt dans les mêmes conditions, et exprimée en %.
Coefficients d'Écoulement de Crue (K_{ETC}) des bassins en forêt primaire (valeurs de l'*Epoque Verte* en %)

Augmentation d'écoulement due au défrichement (Epoque Rouge Stabilisée)

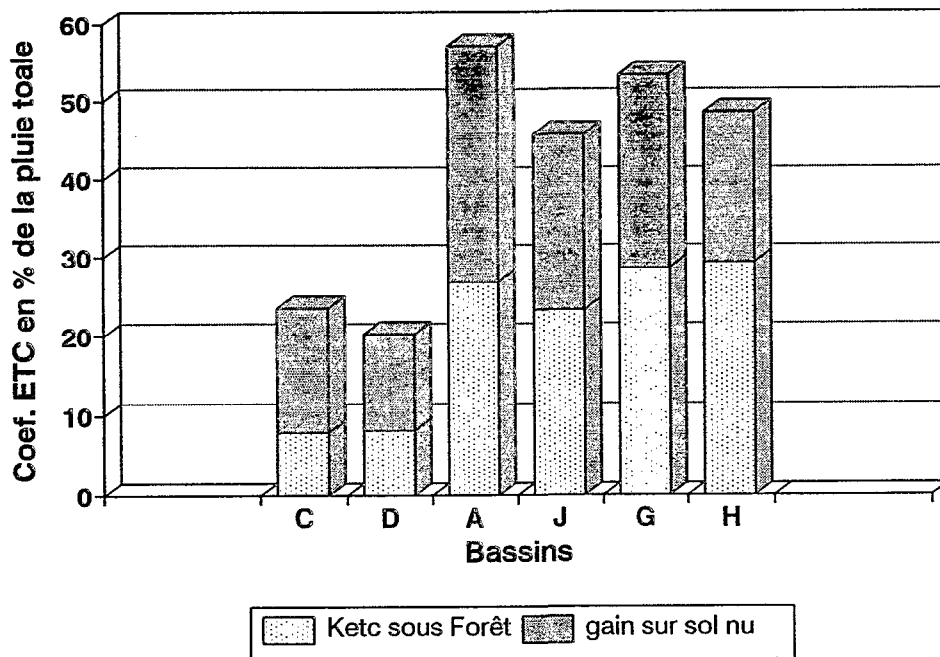


Figure 4.4.02 : Coefficients d'écoulement en crue (K_{ETC}), observés en *Epoque Rouge stabilisée*.
L'augmentation imputable au défrichement est figurée grisé



*A proximité du talweg, après défrichage agricole (bassin J)
Plan rapproché. La machette en bas à gauche donne l'échelle*



Bassin en sol nu. Les andains sont en cours de brûlis (Bassin G, 27-03-1981)



Aménagement en prairie broutée (Bassin A)

4.5 ASPECTS ET CAUSES DE L'AUGMENTATION DES ECOULEMENTS DE CRUE

4.5.1 LA PART RESPECTIVE DES APPORTS ET DE LA PRODUCTION

En considérant le bilan de l'eau sur les bassins versants pendant que les bassins sont en eau (pendant les crues), les processus suivants, susceptibles de participer à l'augmentation de l'écoulement, peuvent être identifiés :

a) Augmentation des apports dans le système

- 1) Apport d'eau supplémentaire au sol, par suite de la suppression de l'interception des pluies par la voûte forestière.
- 2) Disponibilité hydrique supplémentaire par diminution du retour dans l'atmosphère sous forme de vapeur, l'évaporation d'un sol nu étant inférieure à la consommation de la forêt par transpiration.

b) Renforcement de la fonction de production

- 3) Diminution de l'ETR entre les périodes de crue, ce qui a pour effet d'épuiser moins vite le "réservoir sol" (pris au sens large, c'est à dire y compris la nappe), créant ainsi des conditions initiales, en début de crue, plus favorables à l'écoulement superficiel .
- 4) Dégradation des caractéristiques physiques de la partie supérieure du profil pédologique, conduisant à l'augmentation des écoulements rapides (apparition des processus "états de surface", qui étaient peu importants en forêt).

Les mécanismes de type 4 sont contemporains des phases de crue, alors que ceux de type 3 en sont asynchrones.

Notre propos est de montrer la prédominance des mécanismes de type *b* dans l'augmentation de l'écoulement. Pour cela on procédera à l'estimation des diverses composantes, en faisant toujours une estimation par excès des mécanismes de type *a*, lorsque notre connaissance de l'une ou l'autre de ces composantes sera par trop imprécise.

Les éléments du calcul, portant sur l'ensemble de l'*Epoque Rouge stabilisée* font l'objet du tableau 4.5.1, et appellent les remarques suivantes :

1. A propos de l'influence de l'interception

- La part de l'interception globale IT de la période (item 3) a été calculée à partir des précipitations internes journalières P_{if} , estimées par l'équation établie en 2.5.2 ($P_{if} = 0,945 * P_{ia} - 0,99$, avec P_{ia} = pluie journalière incidente totale en mm). Ainsi qu'on l'avait alors noté, ce choix conduit à prendre l'estimation la plus forte des 2 mesures d'interception effectuées en forêt guyanaise.

On constate que pour la période testée (la saison pluvieuse), l'interception a retenu de 10,5 % à 13,6 % de la précipitation incidente selon les bassins versants (item 4).

- L'augmentation d'écoulement est supérieure à l'eau disponible produite par la suppression de l'interception dans 5 cas sur 6 (item 5). Dans un cas seulement l'assertion inverse est vérifiée (bassin D), encore que les 2 valeurs soient très proches. Ceci suffit pour conclure que **l'arrivée au sol des pluies préalablement interceptées n'est pas un phénomène susceptible à lui seul d'expliquer l'augmentation de l'écoulement des crues**, sans que l'on puisse pour autant préciser l'importance de ce terme dans le bilan. Pour estimer l'ordre de grandeur de cette contribution, il faut faire des hypothèses sur la valeur du coefficient d'écoulement de cette pluie supplémentaire ; on en fera 2 :

- *Hypothèse 1* : l'augmentation de la pluviométrie s'accompagne ordinairement d'un accroissement du coefficient d'écoulement des crues. Ce parallélisme dans les augmentations est le moins marqué en saison humide, lorsque la valeur de ce coefficient se stabilise à un niveau traduisant des pertes constantes sur le bassin. *L'Epoque Rouge stabilisée* étant en pleine saison des pluies, on peut considérer que l'eau supplémentaire provenant du défaut d'interception s'écoulerait avec le même coefficient d'écoulement que celui correspondant aux conditions de la forêt primaire (item 6). C'est donc une hypothèse basse, qui pourrait minorer légèrement l'importance de ces pluies "nouvelles", dues à la suppression de l'interception, dans la genèse des écoulements supplémentaires.

- *Hypothèse 2* : on affecte à la pluie supplémentaire le coefficient d'écoulement effectivement mesuré pendant *L'Epoque Rouge stabilisée* (item 7). Ce coefficient intègre l'ensemble des phénomènes post-défrichement, en particulier tous les effets de type *b*, liés aux conditions pédologiques. Cette hypothèse 2 privilégie donc exagérément l'importance dans l'écoulement des pluies qui étaient interceptées sous forêt, mais représente une limite supérieure de sécurité de cette estimation.

- Dans l'hypothèse 1, on constate que la suppression de l'interception représente de 6 % à 19 % des écoulements supplémentaires observés selon les bassins (item 8). Ces chiffres passent de 18 % à 32 % avec l'hypothèse "butoir" n° 2 (item 9).

Tableau 4.5.01 : La part des apports et de la production dans l'augmentation de l'Écoulement Total de Crue
en Époque Rouge stabilisée

BASSIN	:	:	C	D	A	J	G	H
Époque Rouge stabilisée	:	:	:11-04 ->:01-01 ->:01-03 ->:01-03 ->:01-03 ->:01-03 ->	:	:	:	:	:
	:	:	:31-07-79:31-07-81:31-07-79:31-07-83:31-07-81:31-07-81	:	:	:	:	:
Augmentation d'écoulement au défrichement (1)	:	:	228	269	714	471	358	312
PART DUE A LA SUPPRESSION DE L'INTERCEPTION								
Pluie totale	mm (2)	:	1448	2207	2349	2071	1445	1620
Interception calculée IT	mm (3)	:	171	278	247	243	196	207
Interception calculée	(%) (4)	:	11,8	12,6	10,5	11,7	13,6	12,8
Augmentation > Interception	(5)	:	oui		oui	oui	oui	oui
Ketc "Forêt" reconstitué	(%) (6)	:	7,9	8,2	26,7	23,3	28,7	29,3
Ketc "sol nu" observé	(%) (7)	:	23,6	20,4	57,1	46,1	53,4	48,6
Écoulement produit par l'eau interceptée	mm (8) : Hyp.1	:	14	23	66	57	56	61
	(%)	:	(5,9)	(8,5)	(9,2)	(12,0)	(15,7)	(19,4)
	mm (9) : Hyp.2	:	40	57	141	112	105	101
	(%)	:	(17,7)	(21,1)	(19,8)	(23,8)	(29,2)	(32,2)
PART DUE AUX MODIFICATIONS DES FLUX EVAPORATOIRES PENDANT LES CRUES								
Durée des crues en heures	(10)	:	480	435	807	451	483	457
en % du temps sur la période	(11)	:	17,9	9,0	22,0	12,3	13,2	12,4
<u>ETR pendant toute la période</u>								
Bassin sous forêt	mm (12)	:	454	777	560	560	560	560
<u>IR pendant toute la période (ETR-IT)</u>								
Bassin sous forêt	mm (13)	:	283	499	313	317	364	353
<u>Evaporation pendant la durée des crues mm</u>								
IR Bassin sous forêt	(14)	:	51	45	69	39	48	44
E Bassin défriché (estimé à 0,5 IR forêt)	(15)	:	25	22	34	19	24	22
Eau disponible	(16)	:	25	22	34	19	24	22
Écoulement produit par la diminution de l'ETR	mm (17) : Hyp.1	:	2	2	9	5	7	6
	(%)	:	(0,9)	(0,7)	(1,3)	(1,0)	(1,9)	(2,1)
	mm (18) : Hyp.2	:	6	5	20	9	13	11
	(%)	:	(2,6)	(1,7)	(2,8)	(1,9)	(3,6)	(3,4)
PART DES FLUX VERTICAUX DANS L'AUGMENTATION DE L'ÉCOULEMENT								
	(%) (19) : Hyp.1	:	6,8	9,2	10,5	13,0	17,6	21,5
	(%) (20) : Hyp.2	:	20,3	22,8	22,5	25,7	32,8	35,7

2. A propos de l'évapotranspiration et de l'évaporation

- Pour évaluer l'importance des flux évaporatoires pendant les crues, on doit d'abord considérer que ces crues rapportées à l'ensemble de l'*Epoque rouge stabilisée*, ne se produisent qu'une faible partie du temps, et cela bien qu'on se situe en saison des pluies. On a calculé cette durée par la somme des temps de base des hydrogrammes de toutes les crues de la période. Cette situation en crue a été constatée de 9% à 22% du temps selon les bassins versants (items 10 et 11).

Les modifications dans les flux évaporatoires peuvent être estimées comme suit :

- L'évaporation du sol nu, ou faiblement végétalisé (premier recrû), remplace la transpiration de la forêt (item 13). Celle-ci est égale à l'évapotranspiration réelle - *ETR* (item 12) diminuée de l'interception (item 3). Pour le calcul de l'*ETR* en *Epoque Rouge stabilisée*, on a utilisé la répartition mensuelle définie en 2.5.1 (tableau 2.5.02). La transpiration *TR* est ensuite calculée pour la durée des situations "en crue" (item 14). On constate que ces valeurs sont extrêmement faibles - de 39 mm à 69 mm -, en regard des gains d'écoulement constatés. De ce fait, les modifications dans ces flux évaporatoires après défrichement ne peuvent pas constituer un terme sensible dans un bilan apport-consommation établi à l'échelle de temps des crues. Cette constatation n'a aucun caractère général, et elle est évidemment liée à la petite taille des bassins versants ECEREX et à la courte durée des situations "en crue" provoquée par une réponse quasi impulsionnelle des bassins aux averses.
- Pour la valeur de l'évaporation *E* des bassins défrichés, (item 15), on a pris une valeur égale à 50% de la transpiration *TR* de l'item 14. La contribution des "apports" par modification de l'évaporation est faible et représente de 0,7% à 2,1% des écoulements supplémentaires dans l'hypothèse 1 (item 17), et de 1,7% à 3,4% de ceux-ci dans l'hypothèse 2 (item 18).
- La modification des flux verticaux de précipitations et d'évaporation provoque donc un effet sur l'écoulement qui peut être mis en évidence, mais ce processus ne peut générer qu'une faible part de l'augmentation des écoulements de crues des bassins défrichés : selon les bassins versants, cette proportion varie entre 6,8% et 21,5% (hypothèse 1 - item 19) et ne saurait dépasser les limites de 20,3% à 35,7% données par l'hypothèse 2 - item 20.

A l'échelle des bassins versants étudiés, les causes essentielles de l'augmentation de l'écoulement ne sont pas directement créées par la suppression de l'écosystème végétal forestier, mais par les conditions de cette suppression (ouverture des pistes de débardage, défrichement mécanisé, dessouchage), dégradant considérablement les propriétés physiques des sols, et par l'évolution postérieure des horizons pédologiques superficiels (impacts mécanique des pluies, déstructuration des agrégats par rupture du cycle de production de la matière organique).

Les causes indirectes, c'est à dire les modifications de l'économie de l'eau en dehors des périodes de crue, interfèrent avec les causes directes et sont à considérer avec attention. Le remplacement de la transpiration de la forêt par l'évaporation du sol nu ou l'évapotranspiration d'un jeune recru se traduit par une plus faible consommation dans la zone non saturée et dans la zone saturée proche de la surface, et par une extension rémanente plus durable des aires contributives aval après les épisodes pluvieux. Ce phénomène de nouvel équilibre de la nappe après défrichement qui conditionne l'augmentation de l'écoulement rapide après défrichement, a pu être mis en évidence sur un petit bassin de 94 ha bien instrumenté du Sud-Ouest de l'Australie (Ruprecht et Schofield, 1989). Dans ce cas précis, ce nouvel équilibre, qui s'est traduit par une augmentation de la surface d'affleurement de la nappe phréatique, a mis plusieurs années à parvenir à son nouveau climax et, contrairement aux observations habituelles, l'écoulement n'a cessé d'augmenter sur ce bassin versant pendant les 7 années qui ont suivi le défrichement.

L'expérimentation ECEREX n'ayant pas été conçue comme une étude de processus, on ne dispose pas d'éléments (tels que des relevés piézométriques à de petits pas de temps), qui permettraient de vérifier l'existence d'une telle variation des surfaces contributives, et qui pourrait être mise en relation avec les gains d'écoulement constatés.

Si l'on analyse la participation des flux verticaux (pluie et ETR) dans l'écoulement, en fonction du type hydro-pédologique des bassins (items 19 et 20), on constate que l'importance de ces processus est croissante avec l'écoulement naturel des bassins.

En d'autres termes, l'augmentation de la fonction de production ("l'effet sol"), est proportionnellement plus importante sur les bassins à drainage vertical que sur les bassins à dynamique latérale. Ces derniers sont naturellement proches du plus fort rendement hydrologique possible et les impacts de l'expérimentation font moins dériver la fonction de production que sur les bassins à drainage libre.

Sur ces bassins perméables, une suppression idéalisée de la forêt sans aucun impact défavorable sur les sols se traduirait par un accroissement des volumes de crue par rapport au milieu naturel pouvant être inférieur à 10%. Cette constatation éclaire les conclusions de bon nombre d'études menées dans des zones humides océaniques (Monts Appalaches, Ouest des USA et du Canada, etc), sur des bassins où les écoulements de crue sous forêt sont faibles, et sur lesquels une ou plusieurs conditions atténuantes sont réalisées : coupe claire, coupe sombre sur une partie seulement du bassin versant, exportation des grumes au câble (Skyline), moins dommageable pour le sol que les débusqueurs à pneus, pas de dessouchage. A la lumière de nos résultats, on peut concevoir que, dans un tel environnement, des conclusions très définitives aient pu être émises sur le fait que les effets de la déforestation sur l'écoulement sont faibles, voire indétectables et le plus souvent statistiquement non significatifs (Hewlett, 1982 "*ordinary forest cover manipulations have minor effects on storm flows*" ; Hewlett et Helvey, 1970 ; Hornbeck, 1973 ; Harr et al., 1975).

On doit noter que certains travaux portant sur l'impact de la couverture végétale ont été conduits en "système inverse" à partir de protocoles expérimentaux de reforestation (Hewlett et Bosch, 1985, Van Lill et al. 1980), la phase préalable de calage entre le témoin et le bassin expérimental se faisant dans des conditions semblables de couvert végétal entre les 2 bassins, mais sur un milieu non forestier. Dans les études de synthèse, les résultats expérimentaux obtenus en système inverse sont généralement regroupés avec ceux des protocoles de déforestation et analysés de manière indifférenciée. Or, la reforestation ne donne pas lieu à de profonds bouleversements de la couverture pédologique, et par conséquent l'étude du système inverse élimine les effets de sol qui sont responsables de 80% à 90% de l'augmentation sur les bassins à drainage vertical. On conçoit que si le modèle hydrologique de reconstitution des écoulements dans les conditions originelles, utilisé pour la comparaison, n'est pas extrêmement performant (mieux que 10% sur la reconstitution des volumes de crue), les effets provoqués par l'augmentation du couvert végétal puissent ne pas être perçus.

4.5.2 LE NOMBRE DES CRUES

Le phénomène le plus directement perceptible à l'observateur est l'augmentation du nombre des crues sur les bassins versants après le défrichement, l'événement "crue" étant identifié comme toute remontée perceptible du niveau limnigraphique, au dessus d'un niveau stable, correspondant en général à la situation "à sec" ou à un débit de suintement sur les bassins à nappe phréatique (Cf. paragraphe 2.3.3.1).

En milieu naturel, l'occurrence de crues est en général la plus fréquente sur les bassins-témoins ; c'était un des critères utilisés pour la détermination de cette fonction de bassin témoin. Ainsi, pendant son *Epoque Verte*, on a enregistré 77 crues sur le bassin A (n_1), et 121 crues sur le témoin B (n_0) dans le même temps, soit un rapport n_1/n_0 de 0,64. En *Epoque Rouge stabilisée*, soit pendant 5 mois seulement, ces chiffres sont respectivement passés à 180 sur A (n_1) et à 104 sur le témoin B (n_0), soit $n_1/n_0 = 1,73$. L'augmentation relative du nombre de crues sur le bassin A entre l'état forestier et l'état défriché est donc de 2,72 ($1,73/0,64$).

On a tracé les doubles cumuls du nombre de crues par décades, pour les bassins expérimentaux et les témoins appariés, de l'origine des observations jusqu'à la fin de l'*Epoque Rouge* (figures 4.5.01 et 4.5.02). Pour chaque bassin, on a figuré la partie du cumul correspondant à l'*Epoque Verte* et à l'*Epoque Rouge stabilisée*. Les rapports des pentes des doubles cumuls du nombre de crues ont été calculés et font l'objet du tableau 4.5.02. Les quotients du nombre des crues en milieu transformé et en milieu naturel auront varié entre 1,42 et 2,94, soit une gamme d'augmentation de 42% à 192%. (Cf. ci dessous).

Bassin	C	D	A	J	G	H
Augmentation relative du nombre de crues en Epoque Rouge Stabilisée	2,94	1,72	2,72	2,67	1,46	1,42

Tableau 4.5.02 : Décompte du nombre de crues en *Epoques Verte et Rouge stabilisée* et valeur des pentes des doubles cumuls du nombre de crues (figures 4.5.01 et 4.5.02)

:TEMOIN B: BV A : BV C			
NOMBRE DE CRUES OBSERVEES	: N ₀	: N ₁	: N ₂
<i>en Epoque Verte</i>	: 121	: 77	: 86
<i>en Epoque Rouge stabilisée</i>	: 104	: 180	: 138
RAPPORT N ₁ /N ₀ ET N ₂ /N ₀	: :	: N ₁ /N ₀	: N ₂ /N ₀
<i>en Epoque Verte</i>	: :	: 0,64	: 0,71
<i>en Epoque Rouge stabilisée</i>	: :	: 1,73	: 2,09
AUGMENTATION DU NOMBRE DE CRUES PAR RAPPORT A L'EPOQUE VERTE	: :	: R ₁	: R ₂
<i>en Epoque Rouge stabilisée</i>	: :	: 2,72	: 2,94

:TEMOIN F: BV G : BV H			
NOMBRE DE CRUES OBSERVEES	: N ₀	: N ₁	: N ₂
<i>en Epoque Verte</i>	: 431	: 352	: 346
<i>en Epoque Rouge stabilisée</i>	: 87	: 104	: 99
RAPPORT N ₁ /N ₀ ET N ₂ /N ₀	: :	: N ₁ /N ₀	: N ₂ /N ₀
<i>en Epoque Verte</i>	: :	: 0,82	: 0,80
<i>en Epoque Rouge stabilisée</i>	: :	: 1,20	: 1,14
AUGMENTATION DU NOMBRE DE CRUES PAR RAPPORT A L'EPOQUE VERTE	: :	: R ₁	: R ₂
<i>en Epoque Rouge stabilisée</i>	: :	: 1,46	: 1,42

:TEMOIN B: BV D : BV J			
NOMBRE DE CRUES OBSERVEES	: N ₀	: N ₁	: N ₂
<i>en Epoque Verte</i>	: 258	: 222	: 452
<i>en Epoque Rouge stabilisée</i>	: 71	: 105	: 171
RAPPORT N ₁ /N ₀ ET N ₂ /N ₀	: :	: N ₁ /N ₀	: N ₂ /N ₀
<i>en Epoque Verte</i>	: :	: 0,86	: 1,07
<i>en Epoque Rouge stabilisée</i>	: :	: 1,48	: 2,85
AUGMENTATION DU NOMBRE DE CRUES PAR RAPPORT A L'EPOQUE VERTE	: :	: R ₁	: R ₂
<i>en Epoque Rouge stabilisée</i>	: :	: 1,72	: 2,67

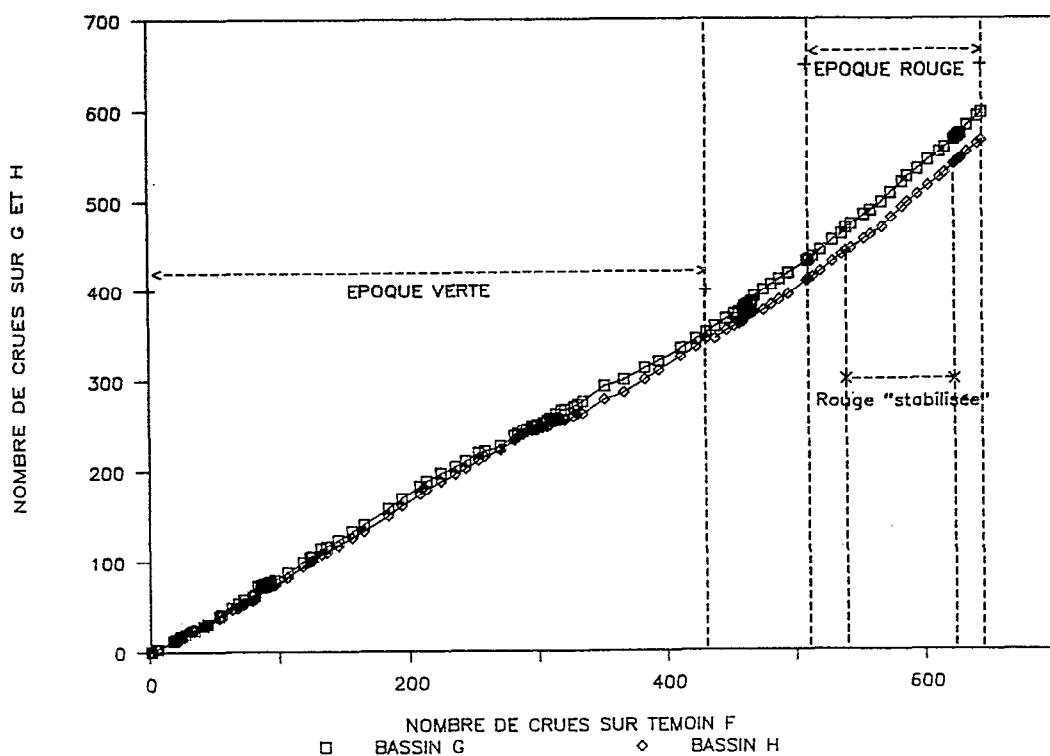
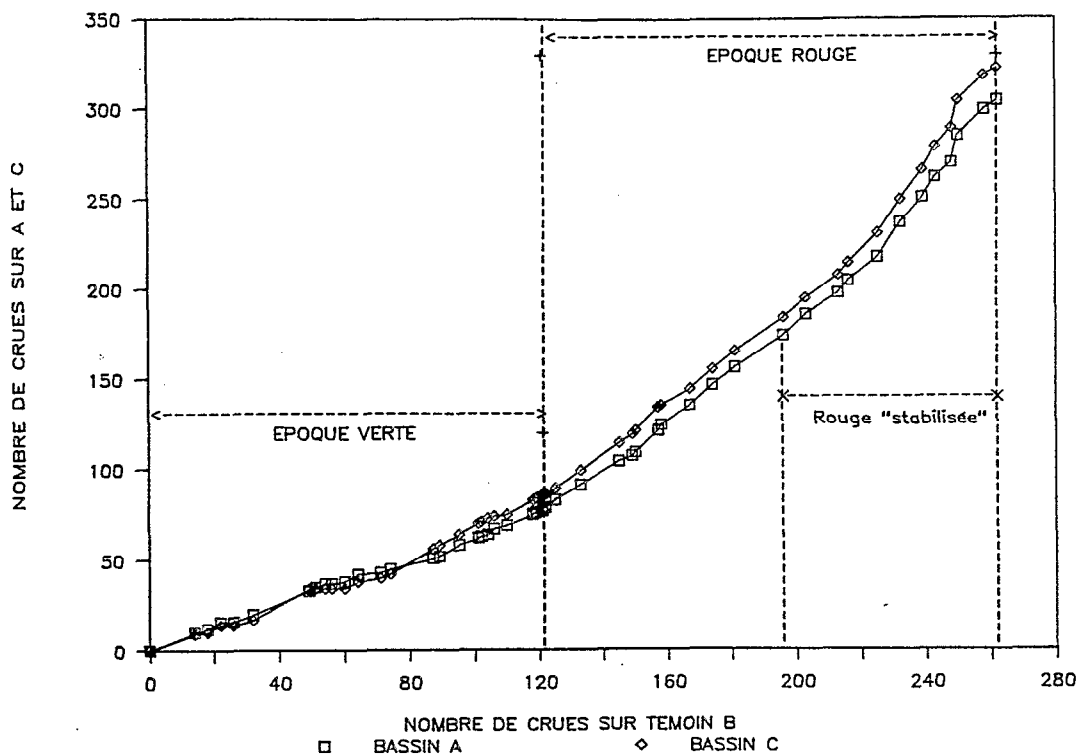


Figure 4.5.01 : Doubles cumuls du nombre de crues, discrétisés par décades,
 depuis l'origine des observations (*Epoque verte*), jusqu'à la fin de la période en sol nu (*Epoque Rouge*)
 La période utilisée pour l'analyse de l'augmentation du nombre des crues est l'*Epoque Rouge stabilisée*

Les échelles graphiques peuvent être différentes en X et en Y

En haut : Bassins A et C avec B

En bas : Bassins G et H avec F

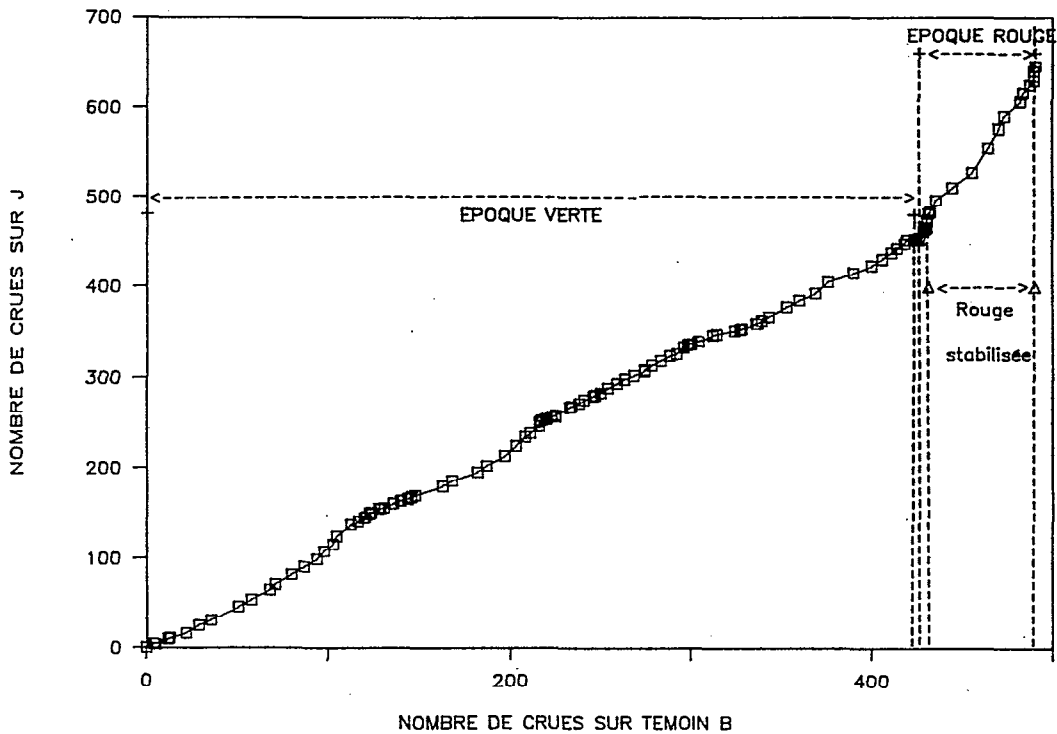
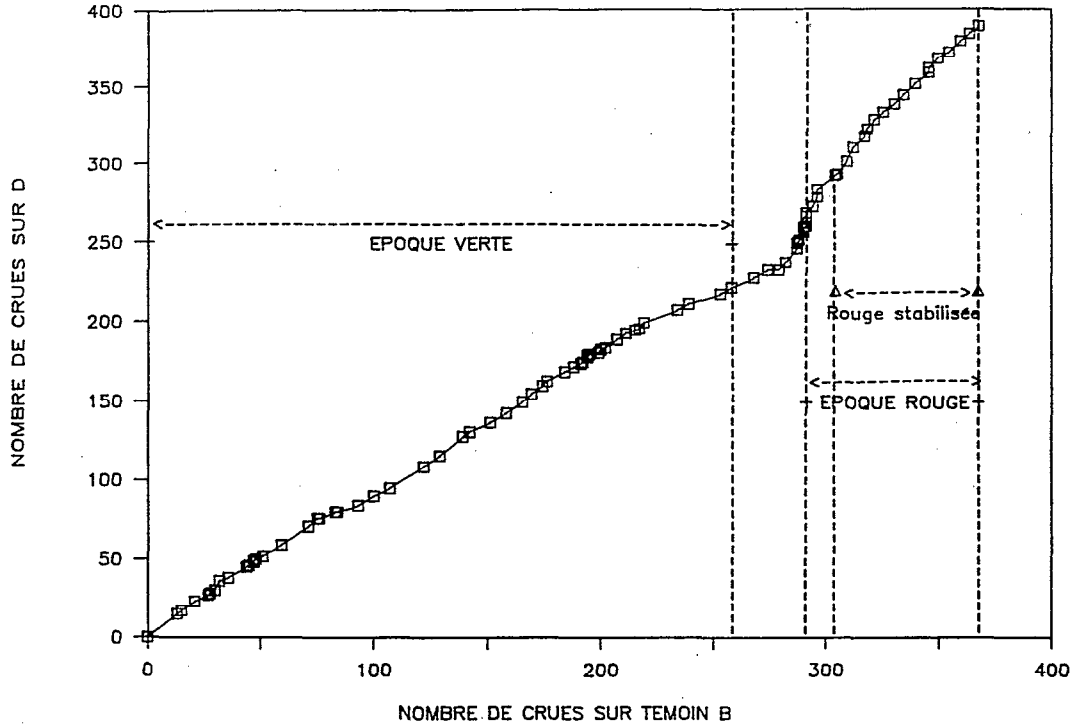


Figure 4.5.02 : Doubles cumuls du nombre de crues, discrétisés par décades, depuis l'origine des observations (Epoque verte), jusqu'à la fin de la période en sol nu (Epoque Rouge)
 La période utilisée pour l'analyse de l'augmentation du nombre des crues est l'Epoque Rouge stabilisée

Les échelles graphiques peuvent être différentes en X et en Y

En haut : Bassin D avec B

En bas : Bassin J avec B

La prudence est de rigueur dans la comparaison de ces chiffres entre bassins versants : les *Epoques Rouges* ne sont pas contemporaines sur tous les bassins, et, si la considération des volumes écoulés, sommés sur la période, seuls pris en compte jusqu'ici, lisse les disparités interannuelles causées par les changements de structure et de répartition temporelle des averses, l'occurrence et le nombre de crues sont directement contrôlés par cette répartition.

Ainsi, on peut considérer, qu'à l'exception du bassin D, l'augmentation du nombre de crues varie dans le même sens que l'augmentation de l'écoulement constaté précédemment (Cf. tableau 4.4.02), mais on doit également noter que les faibles augmentations du nombre de crue (D : 1,7, G : 1,5 et H : 1,4) correspondent à l'année 1981, c'est à dire à une saison des pluies modérée, alors que les valeurs fortes (A : 2,7 et C : 2,9) ont été obtenues pendant la saison des pluies de 1979, bien arrosée.

L'enseignement le plus important de ce décompte du nombre des crues est que l'augmentation de l'écoulement après défrichement n'est pas simplement due à l'augmentation de la production hydrologique des événements averse-crue existant en milieu naturel, mais qu'une part importante des apports supplémentaires est générée à l'occasion de crues nouvelles, qui font leur apparition sur les bassins défrichés.

On a essayé de vérifier si cette augmentation du nombre des crues était uniformément répartie sur toute la population, ou si elle touchait davantage les faibles ou les fortes crues. Pour cela, on a classé les crues en 6 classes de hauteur, de façon à maintenir un effectif à peu près constant dans chaque classe, à savoir :

- les très petites crues (moins de 1 mm de lame écoulée totale),
- les petites crues (classes 1-2,5, 2,5-5 et 5-10 mm),
- les crues moyennes (classe 10-30 mm),
- les fortes crues (supérieures à 30 mm).

Le nombre théorique de crues sous forêt (n_f) dans chaque classe de hauteur a été reconstitué avec les pentes des doubles cumuls des bassins appariés en Epoque Verte et à partir du nombre de crues observées alors sur le témoin. Le nombre de crues nouvelles (n_n) après défrichement a été obtenu en soustrayant ce nombre du total de crues observées (n_o). On a également calculé la part de chaque tranche par rapport aux volumes des Ecoulements Totaux de Crue écoulés pendant l'Epoque rouge stabilisée (en %). Le tableau 4.5.03 regroupe ces résultats, qui sont représentés graphiquement sur les figures 4.5.03 à 4.5.05.

Considérant les très petites crues (< 1 mm), l'augmentation est très forte dans cette tranche pour les bassins A, C et J, dans une classe peu représentée en milieu naturel. L'augmentation est plus modérée sur D et elle est même inversée sur les bassins G et H, sur lesquels la reconstitution prédit davantage de très petites crues en forêt, qu'on en observe effectivement après défrichement. Ces crues, si elles sont révélatrices de la "sensibilité hydrologique" du bassin, ont peu participé à l'écoulement total de la période - entre 1,5% et 4% -, sauf sur le bassin C où elles ont représenté près de 8% de l'écoulement.

On observe le plus grand nombre de crues nouvelles dans la classe 10-30 mm sur A et C, dans une tranche qui représente de 40 à 50% des volumes écoulés (figure 4.5.03). Par contre, sur G et H, les crues nouvelles sont les plus nombreuses dans la classe 5-10 mm (figure 4.5.04).

Les spectres du nombre de crues par tranches de hauteur sont assez semblables sur ces 2 bassins entre 0 et 10 mm, mais on peut remarquer que le nombre de crues de la classe 10-30 mm sur H défriché est inférieur au nombre prédit sous forêt (alors que ce nombre est "normalement" en augmentation sur G). Compte tenu de la simultanéité des observations de G et de H (et donc de la similitude des entrées), il serait tentant d'expliquer cette originalité par le défrichement particulier de H, et de l'effet tampon du bas-fond, et même d'en tirer des conclusions sur les qualités "conservationnistes" du mode de défrichement. Mais on comprend mal, que cette réduction ne se soit pas exercée de la même manière dans les tranches inférieures, de 1 à 10 mm.

Tableau 4.5.03 : Nombres de crues par tranches de hauteur (mm), observés après défrichement et calculés comme sous forêt, pendant l'Epoque Rouge stabilisée.

Participation de chaque tranche dans l'Écoulement Total de Crue, en %.

BASSIN A		<1	1-2,5	2,5-5	5-10	10-30	>30
nb crues observées	n_o	57	24	31	24	37	7
nb crues calculées s/forêt	n_f	15	9	21	9	13	5
gain en nombre de crues	n_n	42	15	10	15	25	3
Part de la tranche dans le volume écoulé total (en %)		1,9	3,0	8,0	12,3	48,9	25,9

BASSIN C		<1	1-2,5	2,5-5	5-10	10-30	>30
nb crues observées	n_o	79	26	16	9	8	0
nb crues calculées s/forêt	n_f	21	7	15	4	1	1
gain en nombre de crues	n_n	58	19	1	5	7	-1
Part de la tranche dans le volume écoulé total (en %)		7,8	12,4	17,2	19,5	43,1	

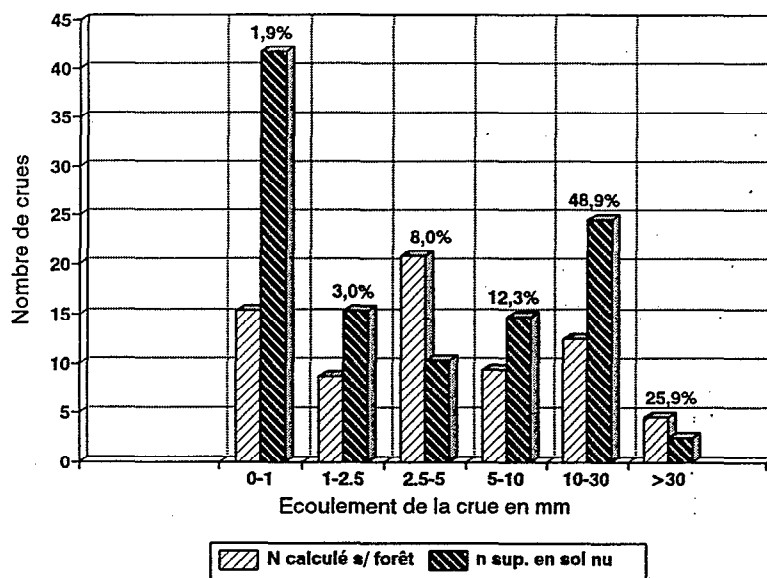
BASSIN G		<1	1-2,5	2,5-5	5-10	10-30	>30
nb crues observées	n_o	21	20	20	20	18	5
nb crues calculées s/forêt	n_f	28	11	14	4	14	2
gain en nombre de crues	n_n	-7	9	6	16	4	3
Part de la tranche dans le volume écoulé total (en %)		1,3	4,1	8,6	19,3	41,3	25,3

BASSIN H		<1	1-2,5	2,5-5	5-10	10-30	>30
nb crues observées	n_o	34	22	19	20	4	0
nb crues calculées s/forêt	n_f	37	14	13	4	6	0
gain en nombre de crues	n_n	-3	8	6	16	-2	0
Part de la tranche dans le volume écoulé total (en %)		4,1	10,0	19,3	45,4	21,0	

BASSIN D		<1	1-2,5	2,5-5	5-10	10-30	>30
nb crues observées	n_o	44	19	14	18	8	2
nb crues calculées s/forêt	n_f	30	15	3	10	4	1
gain en nombre de crues	n_n	14	4	11	8	4	2
Part de la tranche dans le volume écoulé total (en %)		3,4	6,5	11,6	27,4	34,5	16,6

BASSIN J		<1	1-2,5	2,5-5	5-10	10-30	>30
nb crues observées	n_o	79	27	33	8	15	9
nb crues calculées s/forêt	n_f	22	11	7	9	11	5
gain en nombre de crues	n_n	57	16	26	-1	4	4
Part de la tranche dans le volume écoulé total (en %)		2,9	3,9	5,9	13,2	33,7	40,4

BASSIN A



BASSIN C

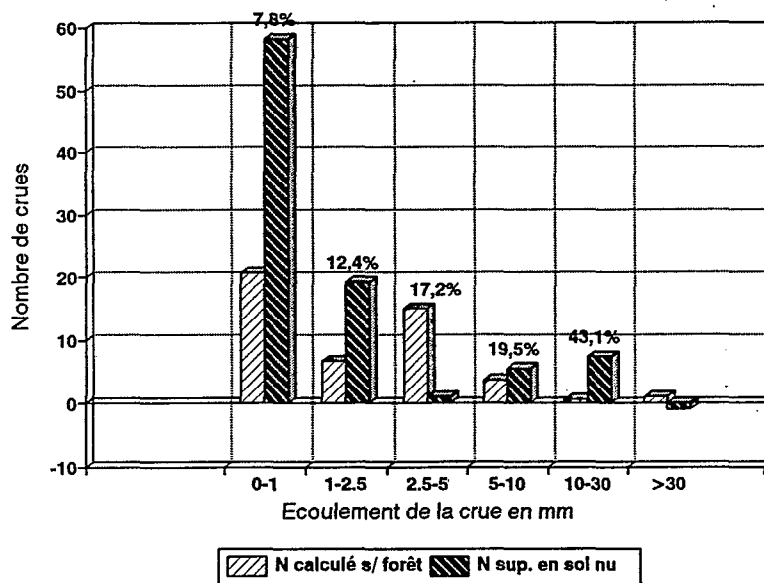


Figure 4.5.03 : Nombre de crues en *Epoque Rouge stabilisée* (sur axe Y) par tranches de hauteur en mm sur A et C (sur axe X)

Les **histogrammes clairs** représentent le nombre de crues que l'on aurait observé pendant la période, si le bassin était encore en forêt naturelle (n_f).

Les **histogrammes foncés** représentent le nombre de crues supplémentaires, générées par le défrichement (n_n).

Le nombre de crues effectivement observées dans la tranche (n_o) est égal à la somme $n_f + n_n$.

Les valeurs en regard de chaque histogramme représentent la proportion de la tranche dans l'écoulement total.

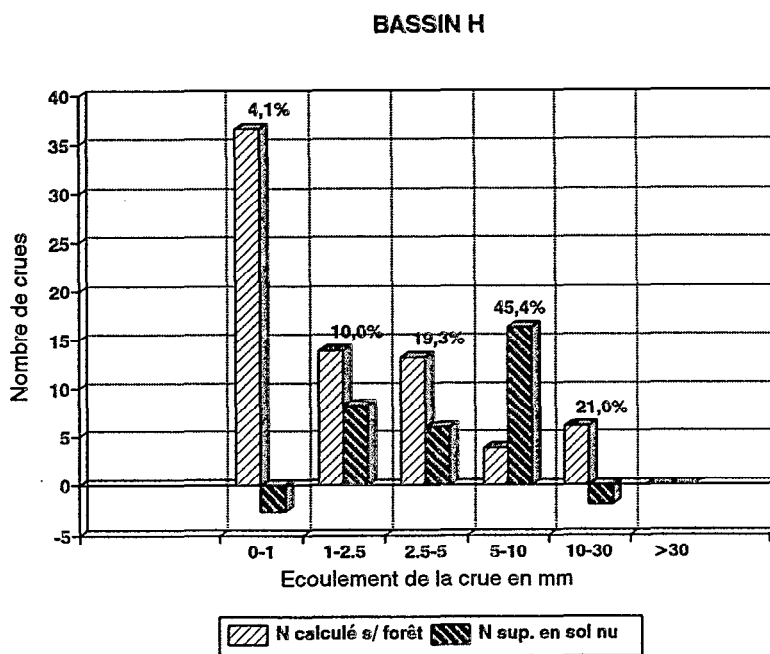
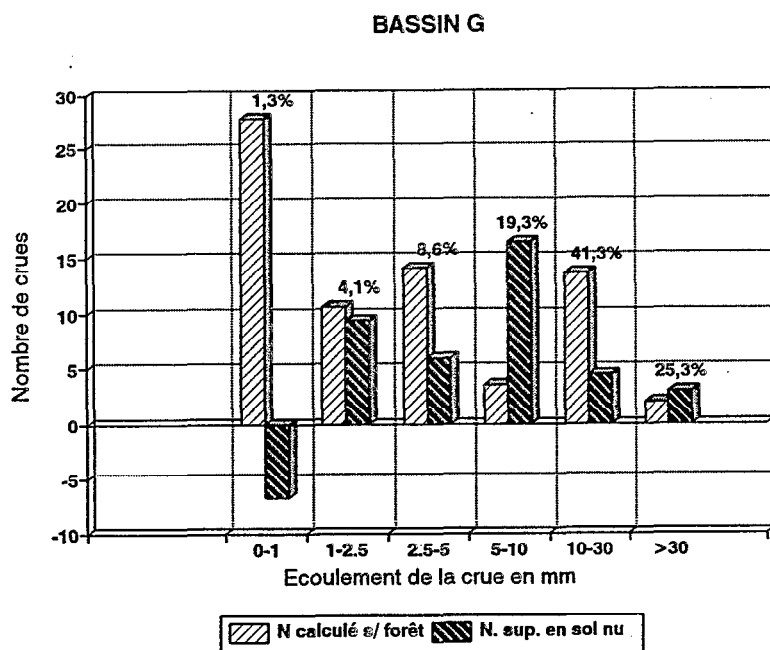


Figure 4.5.04 : Nombre de crues en *Epoque Rouge stabilisée* (sur axe Y) par tranches de hauteur en mm sur G et H (sur axe X)

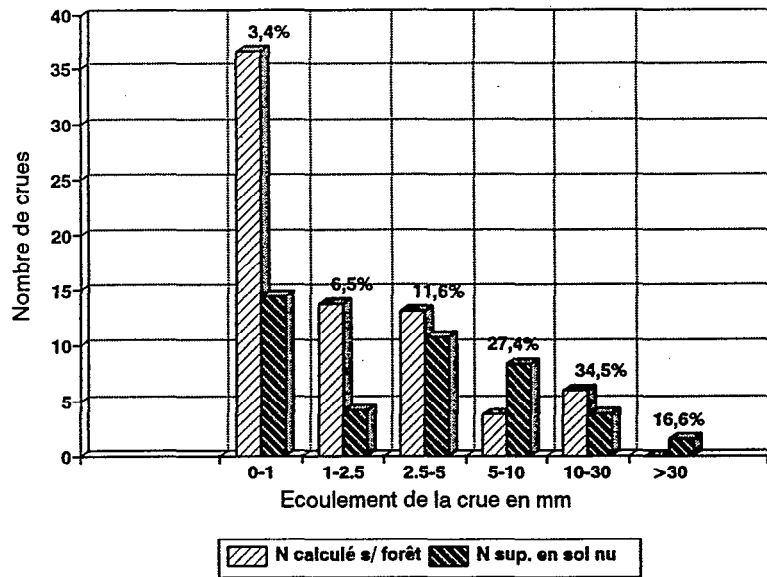
Les histogrammes clairs représentent le nombre de crues que l'on aurait observé pendant la période, si le bassin était encore en forêt naturelle (n_f).

Les histogrammes foncés représentent le nombre de crues supplémentaires, générées par le défrichement (n_d).

Le nombre de crues effectivement observées dans la tranche (n_o) est égal à la somme $n_f + n_d$.

Les valeurs en regard de chaque histogramme représentent la proportion de la tranche dans l'écoulement total

BASSIN D



BASSIN J

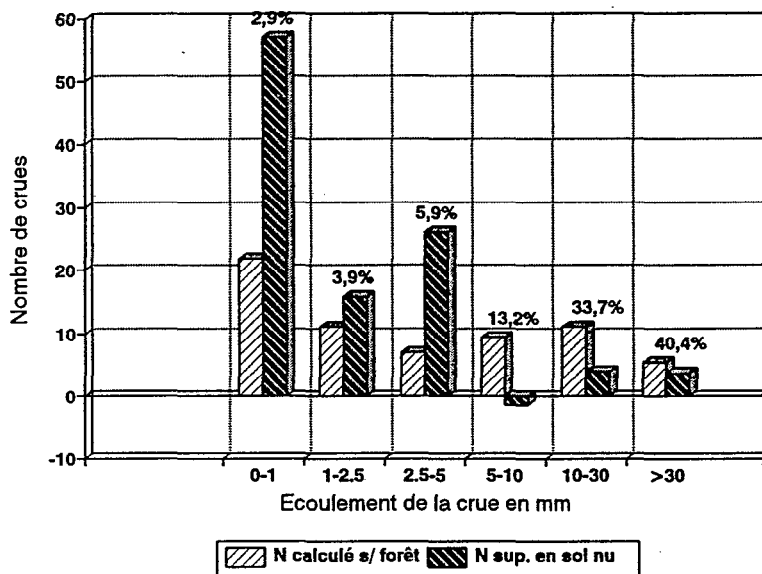


Figure 4.5.05 : Nombre de crues en *Epoque Rouge stabilisée* (sur axe Y) par tranches de hauteur en mm sur D et J (sur axe X)

Les **histogrammes clairs** représentent le nombre de crues que l'on aurait observé pendant la période, si le bassin était encore en forêt naturelle (n_f).

Les **histogrammes foncés** représentent le nombre de crues supplémentaires, générées par le défrichement (n_n).

Le nombre de crues effectivement observées dans la tranche (n_o) est égal à la somme $n_f + n_n$.

Les valeurs en regard de chaque histogramme représentent la proportion de la tranche dans l'écoulement total

4.5.3 LES DEBITS DE POINTE

Pour l'étude des débits de pointe, toutes les valeurs ont été converties en débits spécifiques, c'est-à-dire en $l.s^{-1}.ha^{-1}$. Elles sont donc directement comparables entre bassins versants, à ceci près que les *Epoques Vertes* et *Rouges stabilisées* ne sont rigoureusement identiques que sur les paires G_F et H_F . Pour les paires A_B et C_B , les *Epoques Rouges stabilisées* sont semblables, mais l'*Epoque Verte* est plus courte sur C (début en mai 1977) que sur A (début en janvier 1977). Enfin, les *Epoques Vertes* incluent 2 saisons des pluies sur tous les bassins, sauf J, pour lequel ce nombre est de 4 saisons.

Ces réserves étant formulées, on peut considérer l'inventaire des crues, dressé dans les tableaux 4.5.04 (*Epoques Vertes*) et 4.5.05 (*Epoques Rouges stabilisées*), qui comporte les 5 plus fortes valeurs observées pendant l'*Epoque* considérée, ainsi qu'une répartition fréquentielle des débits par classes.

Tableau 4.5.04 : Débits de pointe en *Epoque Verte*, en $l.s^{-1}.ha^{-1}$

Bassin versant	C	D	A	J	G	H
5 plus fortes crues						
1	73,9	168	177	143	244	288
2	47,4	124	167	113	156	169
3	43,9	111	116	97,1	126	157
4	41,6	86,6	93,8	97,1	111	153
5	35,2	85,2	89,9	94,9	107	146
Nombre de crues						
$\geq 100 l.s^{-1}.ha^{-1}$	0	3	3	2	8	19
$\geq 75 l.s^{-1}.ha^{-1}$	0	6	8	16	18	28
$\geq 50 l.s^{-1}.ha^{-1}$	1	17	21	42	43	53
$\geq 25 l.s^{-1}.ha^{-1}$	7	42	32	87	73	87
$\geq 10 l.s^{-1}.ha^{-1}$	24	73	49	158	141	155

Sous forêt, les débits de pointe ont varié entre 73,9 et 288 $l.s^{-1}.ha^{-1}$. Le classement des bassins dans l'ordre des plus fortes crues est conforme à celui des écoulements en milieu naturel, sauf pour J sur lequel la crue maximale est plus faible que prévue. Ceci tient au non-recouvrement des périodes de référence, la plus forte crue s'étant produite sur les autres bassins en 1977 ou 1978, avant la mise en service de J.

La comparaison directe des valeurs de ces 2 tableaux ne fournit pas d'indice susceptible d'étayer un diagnostic des effets expérimentaux, et la mise en évidence d'une dérive des débits de pointe, avant et après défrichement, s'annonce comme un exercice difficile.

Tableau 4.5.05 : Débits de pointe en *Epoque Rouge stabilisée*, en $l.s^{-1}.ha^{-1}$

Bassin versant	C	D	A	J	G	H
5 plus fortes crues						
1	69,6	120	178	152	144	157
2	67,7	106	178	127	135	127
3	63,4	51,1	167	119	126	117
4	59,0	46,5	156	115	125	100
5	53,6	42,5	153	109	94,7	98,4
Nombre de crues						
$\geq 100 l.s^{-1}.ha^{-1}$	0	2	13	6	4	3
$\geq 75 l.s^{-1}.ha^{-1}$	0	2	21	8	8	8
$\geq 50 l.s^{-1}.ha^{-1}$	3	3	30	27	12	9
$\geq 25 l.s^{-1}.ha^{-1}$	14	13	53	59	25	22
$\geq 10 l.s^{-1}.ha^{-1}$	31	30	79	90	46	38

De fait, la compilation des travaux publiés sur ce thème confirme cette impression : on a pu constater à quel point l'augmentation des volumes écoulés après défrichement était parfois difficile à mettre en évidence, ce qui s'est traduit par une conclusion générique de la forme "la déforestation augmente les écoulements de crue, à moins que celle-ci ne soit sans effet ; il n'y a jamais - ou presque - de diminution". Un pareil consensus n'a pu être dégagé à propos de l'augmentation des débits de pointe car, dans un nombre de cas non négligeable, les auteurs sont arrivés à la conclusion assez surprenante que la réduction du couvert végétal était associée à une **diminution des débits de pointe**. Par exemple, Harr et McCorison (1979) qui observé une réduction des pointes de crues de 32 %, significative au risque de 1 %, à l'exutoire d'un bassin de 10,2 ha (Etat d'Oregon, USA) après coupe à blanc et débardage au câble (procédé perturbant moins le sol que des engins roulants, et peu susceptible de créer obstacles et dépressions pour piéger l'écoulement).

Les analyses débouchant sur l'**indétermination statistique** sont nombreuses : Sopper et Lynch (1970) constatent qu'après défrichement complet de 8,6 ha sur un bassin de 43 ha (Etat de Pennsylvanie, USA), les débits de pointes auraient augmenté de plus de 50 % pour 8 crues sur 20, alors que sur le reste de l'échantillon l'augmentation n'est pas significative ou se traduit par une des pointes plus faibles qu'avant le traitement. Golding (1987) conclut qu'une coupe à blanc sur 20 % de la surface d'un bassin de 299 ha (Colombie Britannique, Canada) est sans effet sur les crues pluviales d'été. Ce diagnostic est également fait par Miller (1984), Hewlett et Bosch (1985), etc. Hornbeck (1973) note qu'il n'y a pas d'augmentation des pointes des crues de printemps sur un bassin déforesté de 42 ha (Etat du New Hampshire, USA) : la droite de régression des pointes du témoin avec celles du bassin est la même avant et après traitement. A ce propos, Hornbeck constate que "il est évident que le défrichement augmente la variance", et met en cause le manque de sensibilité et de robustesse de la méthode. Et de fait, sur un échantillon limité aux crues d'été, comportant une forte crue qui a pour effet de "tirer la droite de corrélation vers le haut", les pentes des droites de régression sont dans un rapport 2,7.

Des augmentations des débits de pointe consécutives à la suppression du couvert avec ou sans travail du sol, sont fréquemment rapportées : Pearce et al. (1980) notent des gains de 55 à 65% sur les petites crues et de 30% sur les crues moyennes et fortes (supérieures à $10 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$), sur un bassin de 4 ha déforesté et débardé avec des engins à pneus (Ouest de South Island, Nouvelle Zélande). Baker (1984) considère que l'augmentation de la plus forte crue est de 25%, après traitement herbicide d'une formation de pins-génévriers sur un bassin de 147 ha (Etat d'Arizona, USA). Troendle et King (1985), après une période de calage de 12 ans en forêt, et coupe à blanc de 40% de la surface d'un bassin de 289 ha (Etat du Colorado, USA), concluent à une augmentation des débits de pointe de 20% en moyenne, sur la période de 28 ans postérieure au traitement. Selon Blackburn et al. (1986), l'augmentation des pointes a été significative après défrichement mécanisé sur 6 bassins versants de 2 à 3 ha (Etat du Texas, USA). Bolin et Ward (1987), sans être en mesure de préciser la récurrence de l'événement, constatent l'occurrence d'une pointe de $85,8 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ après un incendie qui a ravagé 60% de la couverture forestière de résineux d'un bassin versant de 45 km^2 (Etat du Nouveau Mexique, USA), alors que la plus forte valeur enregistrée sous forêt durant les 7 années précédentes était 150 fois plus faible ($0,54 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$).

Pour les adeptes d'une certaine sensibilité des Sciences Hydrologiques, la controverse sur l'influence des débits de pointe serait aujourd'hui close et l'utilisation du sol n'aurait pas d'effet **significatif** (qui puisse être décelé), sur les pointes de crue. Cette "règle" est l'aboutissement d'études portant sur un grand nombre d'expérimentations, faites à des échelles de surface très différentes, et selon des modes opératoires diversifiés (exploitation forestière partielle ou totale, occurrence ou non d'un défrichement postérieur, utilisation ou non d'engins lourds, modification du couvert par plantations sylvicoles, par destruction chimique, pathologique ou incendie de la forêt, en forêt de feuillus ou de conifères, etc), et dans des contextes climatiques allant de l'océanique froid à l'équatorial pur.

L'idée que l'utilisation du sol ne constitue pas un discriminant significatif entre bassins versants pour la prédiction des débits de pointe est exprimée, par exemple par Hewlett et Helvey (1970), Hewlett (1982), Hewlett et Bosch (1985). A partir d'une conception Hortonnienne des processus hydrologiques, Cordery et Pilgrim (1983) aboutissent au même type de conclusion : ceux-ci ont étudié les pertes par averse (*loss rate*, ou différence entre le hyétoگرامme observé et le hyétoگرامme de la pluie nette) sur 53 bassins versants situés en Australie humide, couvrant des surfaces de 5 ha à $15\,000 \text{ km}^2$. Ils ont constaté que la moyenne de ces pertes s'établit à $2,5 \text{ mm.h}^{-1}$, avec un écart-type de $1,23 \text{ mm.h}^{-1}$, et que cette perte est indépendante de l'occupation du sol, définie selon 5 catégories appelées "forêt dense, forêt moyenne, forêt éparse, pins, herbages".

Pour étudier la variation des débits de pointe après défrichement à ECEREX, on a sélectionné toutes les crues dépassant un seuil donné sur le témoin, soit $10 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$. Sur ces séries, 2 traitements ont été réalisés :

- Calcul de régressions linéaires entre les débits de pointe du témoin et du bassin expérimental pour les crues sélectionnées, sur l'*Epoque Verte*, puis sur l'*Epoque Rouge stabilisée* (figures 4.5.06 et 4.5.07).
- Tracé des courbes de doubles cumuls entre débits de pointe du témoin et du bassin expérimental, pour les crues sélectionnées, sur l'*Epoque Verte* et sur l'*Epoque Rouge stabilisée* (figures 4.5.08 et 4.5.09).

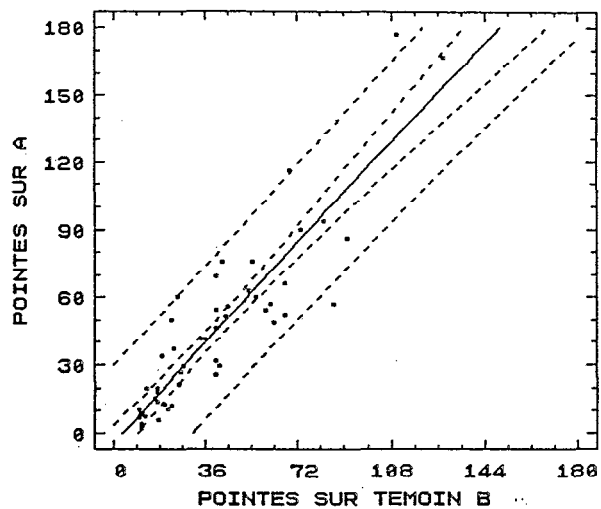
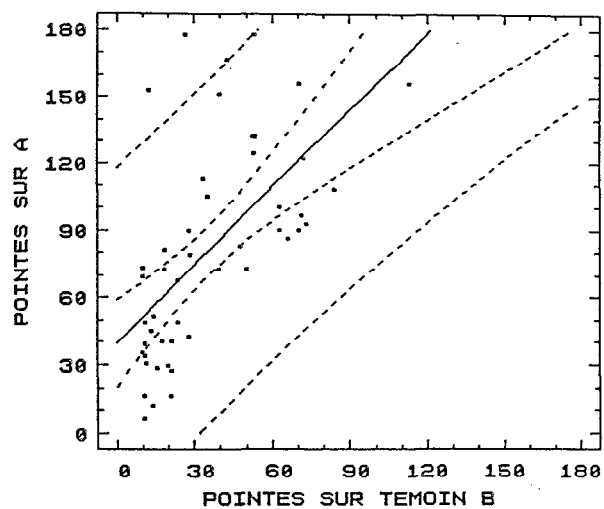
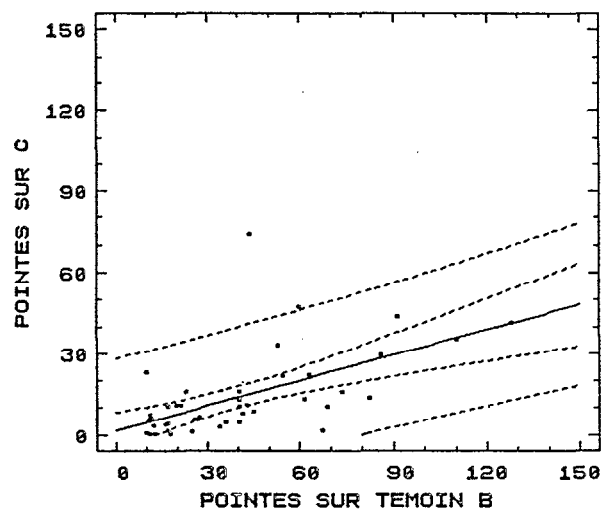
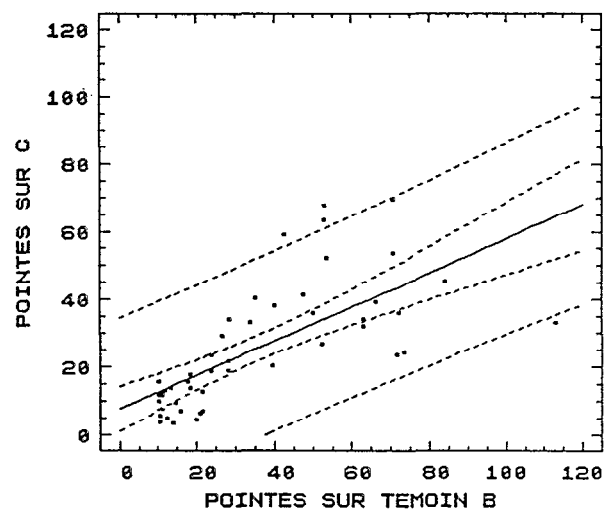
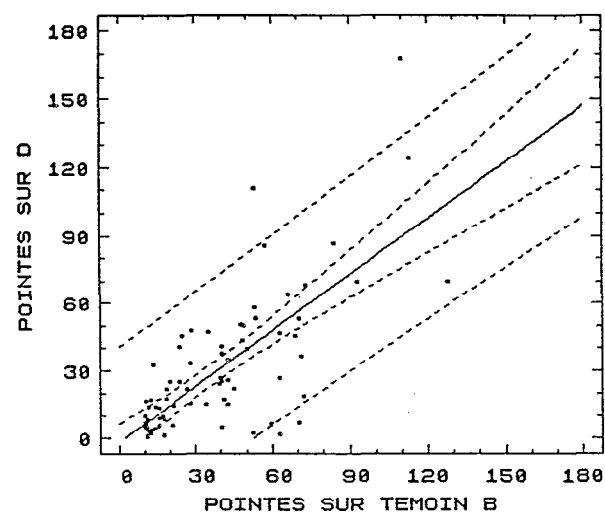
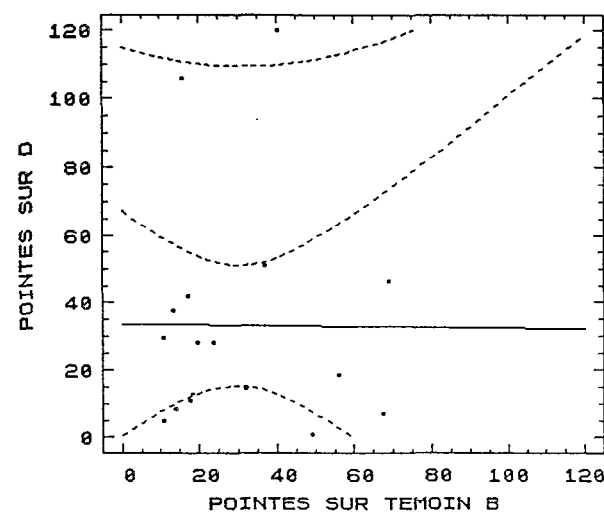
Les corrélations entre débits de pointe des bassins appariés sont beaucoup moins serrées que celles précédemment obtenues sur les volumes de crues (Cf.3.3 et tableau 4.5.06) : on peut penser que les régressions d'*Epoque Verte* de A_B , G_F et H_F , avec respectivement 81%, 94% et 91% de la variance expliquée, constituent des modèles permettant de reconstituer les crues "*Vertes*" en *Epoque Rouge* avec une précision acceptable. Par contre, pour D_B , la proportion de la variance expliquée par le modèle est médiocre (53%) et, rapportée à nos ambitions, celle-ci est dérisoire pour J_F (41%) et pour C_B (34%). Pour chaque bassin versant, on a également présenté en regard des régressions d'*Epoque Verte* les régressions correspondantes en *Epoque rouge stabilisée* (figures 4.5.06 et 4.5.07, colonne gauche et droite, respectivement). Cette figuration montre le comportement erratique des débits de pointe après défrichement, et laisse prévoir qu'une comparaison au niveau des paramètres de ces régressions (par exemple, comparaison statistique des pentes entre les 2 *Epoques*) ne peut aboutir qu'à l'indétermination statistique : hormis les régressions des paires G_F et H_F qui expliquent 90% et 73% de la variance, les régressions de tous les autres bassins ont des variances expliquées inférieures à 50% : 49% (C_B), 37% (A_B), 9% (J_B) et 0% (D_B)

Tableau 4.5.06 : Paramètres des corrélations entre débits de pointe (en $l.s^{-1}.ha^{-1}$) sur les bassins appariés, en *Epoque Verte*

	a	b	n	r^2
A_B	1,235	-4,55	50	0,812
C_B	0,311	+1,56	43	0,339
D_B	0,830	-1,94	77	0,535
G_F	0,829	-2,87	183	0,937
H_F	1,021	-4,64	180	0,914
J_F	0,485	+4,59	223	0,415

L'examen des courbes de doubles cumuls confirme ces faits, et fournit des éléments susceptibles d'expliquer la médiocrité de certaines corrélations :

- Sur le bassin A, on constate que l'*Epoque Rouge*, déclarée *stabilisée* par les tests de Bois appliqués aux lames écoulées par crue, n'est pas homogène au plan des débits de pointe. Sans être exagérément déterministe, on peut constater que la courbe des doubles cumuls est constituée par la juxtaposition de 2 tronçons distincts, de part et d'autre d'un point correspondant à la crue du 16 mai. Cette date correspond au bouturage du pâturage, commencé le 10-05-79. Pourtant, cette intervention, qui ne fait appel à aucun moyen mécanique, ne semble pas en mesure de provoquer des répercussions intenses dans l'hydrologie du bassin. Elle consiste en un léger grattage à la fourche destiné à incorporer l'engrais au sol, suivi par l'enfouissement des stolons de *Digitaria swazilandensis* dans des fentes ouvertes à la machette et rebouchées d'un coup de talon. Néanmoins, il faut constater que ce "jardinage" a eu des effets considérables dans la résorption de la rugosité du bassin et a provoqué une augmentation très sensible de la pente des doubles cumuls par rapport à la période précédente (cette pente passe de 1,9 à 3,9). On rappelle que la période initiale de cette *Epoque Rouge stabilisée* constituait déjà un état lissé et stabilisé du bassin, comparé à celui qui prévalait immédiatement après le défrichement mécanisé (Cf 4.3).

DEBITS DE POINTE A et B - EPOQUE VERTE
valeurs en l/s/haDEBITS DE POINTES A et B - E. ROUGE STAB
valeurs en l/s/haDEBITS DE POINTE C et B - EPOQUE VERTE
valeurs en l/s/haDEBITS DE POINTES C et B - E. ROUGE STAB
valeurs en l/s/haDEBITS DE POINTE D et B - EPOQUE VERTE
valeurs en l/s/haDEBITS DE POINTES D et B - E. ROUGE STAB
valeurs en l/s/haFigure 4.5.06 : Régressions entre débits de pointe sur les bassins appariés (Crues > à 10 l.s⁻¹.ha⁻¹ sur témoin)

Epoque Verte à gauche, Epoque Rouge stabilisée à droite. Echelles X/Y en rapport 1/1

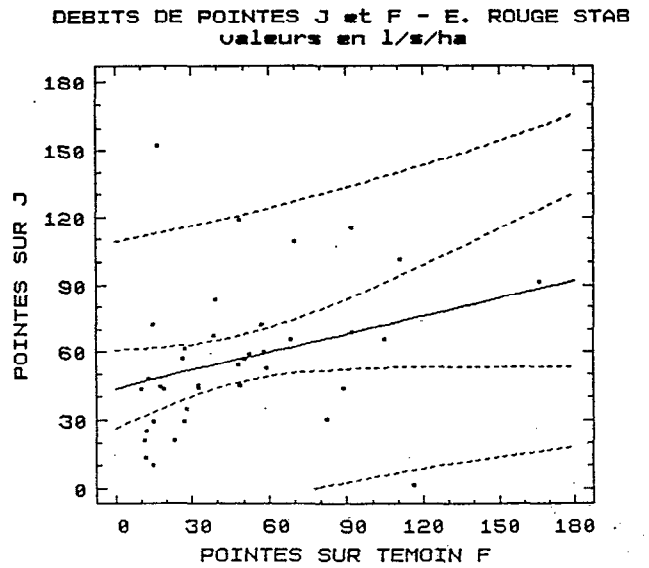
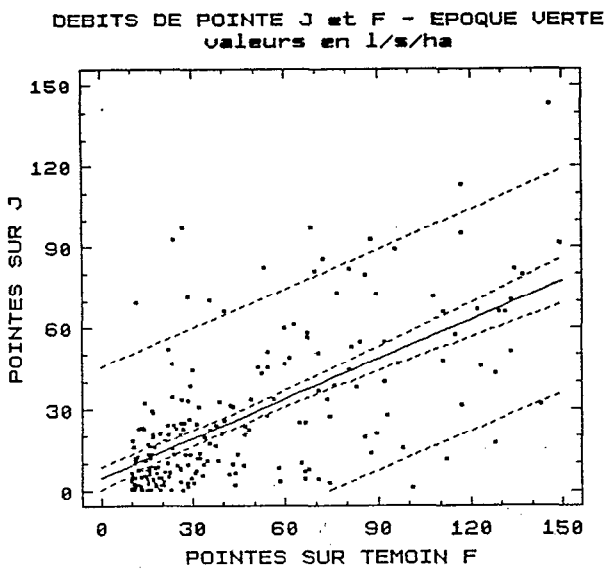
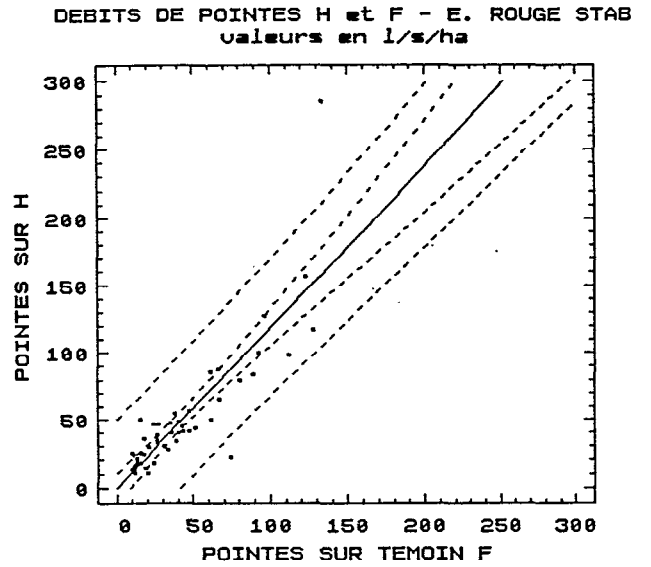
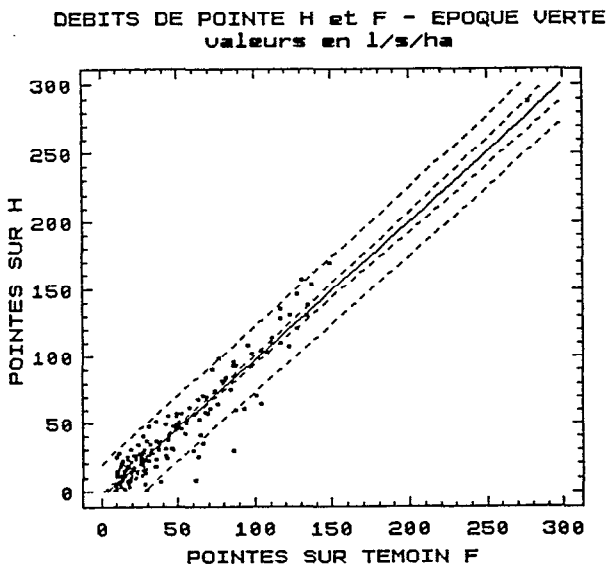
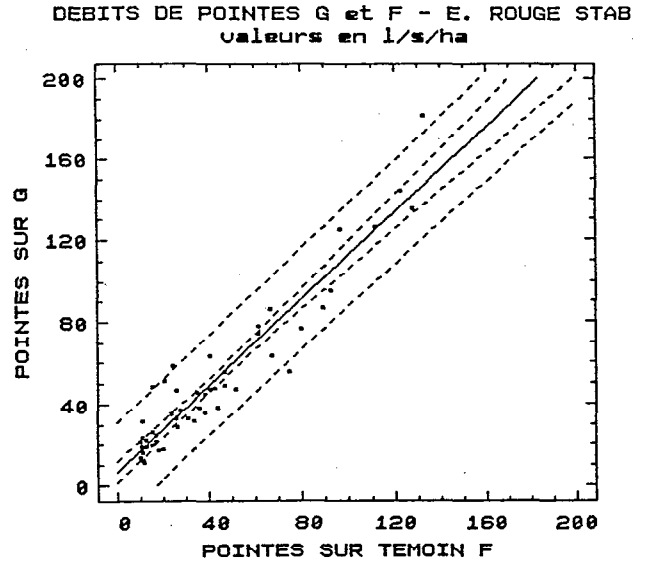
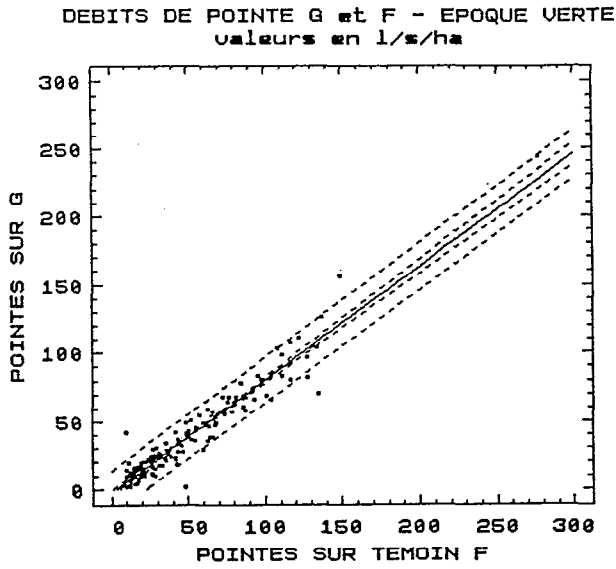


Figure 4.5.07 : Régressions entre débits de pointe sur les bassins appariés (Crues > à 10 l.s⁻¹.ha⁻¹ sur témoin)

Epoque Verte à gauche, Epoque Rouge stabilisée à droite. Echelles X/Y en rapport 1/1

- Sur le bassin C, cette dualité de l'*Epoque Rouge stabilisée* est également visible, bien que moins nette que sur A. La crue du 2-06 peut être prise comme charnière et correspond au début du creusement des trous pour la plantation des pomelos, qui a eu lieu du 30-05 au 22-06.
- La courbe de doubles cumuls de D_B montre un comportement peu orthodoxe, par le fait que des pointes importantes sur B en fin de saison des pluies n'ont pas été répercutées sur D. En anticipant sur la cinquième partie, cette réduction d'écoulement ne peut pas être imputée à un effet du recrû, car l'écoulement du bassin reste en accroissement marqué par rapport à la situation en forêt pendant les années suivantes. Cette divergence résulte du fait que B est un témoin très médiocre pour D, et que des crues tardives et isolées en fin de saison des pluies sur B n'ont pas lieu sur le bassin D.
- La régularité des courbes de doubles cumuls de G_F et H_F , avant et après défrichement, est conforme à l'appariement heureux de ces bassins et à la qualité des corrélations obtenues.

Les pentes des doubles cumuls en *Epoque Verte* et *Rouge stabilisée*, ainsi que le rapport de ces pentes qui représente l'accroissement constaté des débits de pointe, font l'objet du tableau 4.5.07.

Selon cette analyse, les débits de pointe auraient augmenté sur tous les bassins versants. Rapportées aux débits naturels, ces augmentations s'étagent dans une gamme allant de 17% sur H à 166% sur C et on constate que ce gain est d'autant plus élevé que les crues étaient modestes en milieu naturel (Cf. données du tableau 4.5.04)

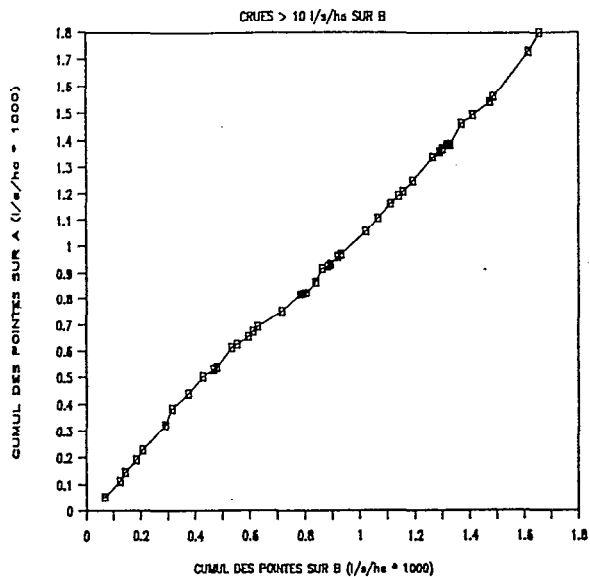
Si l'on procède à la décomposition de l'*Epoque Rouge stabilisée* des bassins A et C en 2 phases comme on en a évoqué la possibilité précédemment, on met en évidence des augmentations relatives des débits de pointes sur de courtes périodes qui sont considérables : 221% sur C et 251% sur A (dernière ligne du tableau 4.5.07).

Tableau 4.5.07 : Pentes des courbes de doubles cumuls des débits de pointe sur les bassins appariés, en *Epoque Verte* et *Rouge stabilisée*

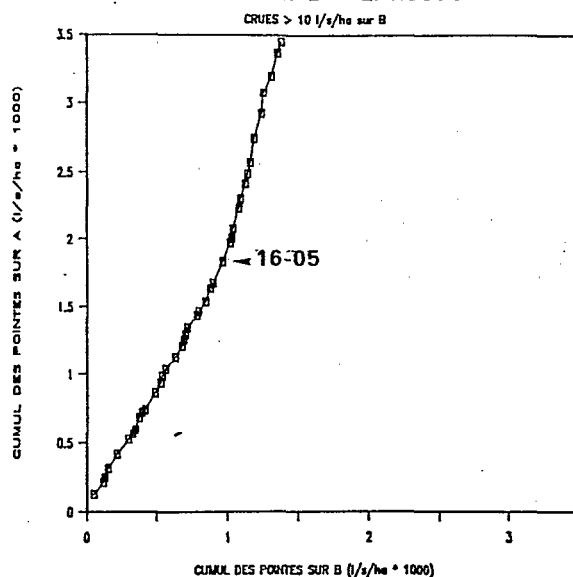
Valeurs des rapports des pentes de ces deux périodes
(débits de pointe supérieurs à $10 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ sur le témoin)

Bassins versants	C	D	A	J	G	H
Pentes des courbes de doubles cumuls						
Epoque Verte	0,35	0,78	1,12	0,59	0,76	0,92
Epoque Rouge stabilisée	0,93	1,11	2,50	1,20	1,18	1,07
Augmentation relative	2,66	1,42	2,23	2,03	1,55	1,17
phases a et b en	(a)	(b)	(a)	(b)		
Epoque Rouge stabilisée	0,81	1,13	1,90	3,93		
Augmentation relative	2,31	3,21	1,70	3,51		

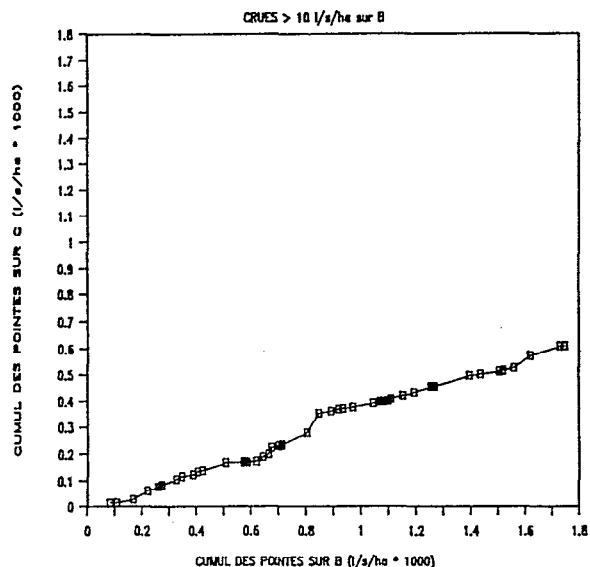
POINTES SUR A et B – EPOQUE VERTE



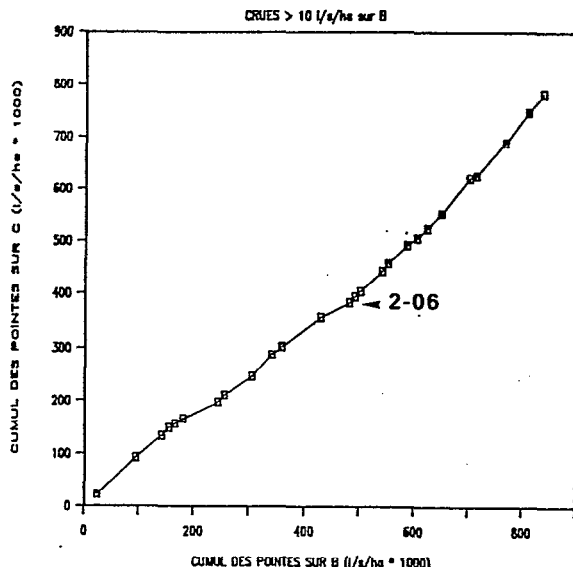
POINTES SUR A ET B – E. ROUGE STAB.



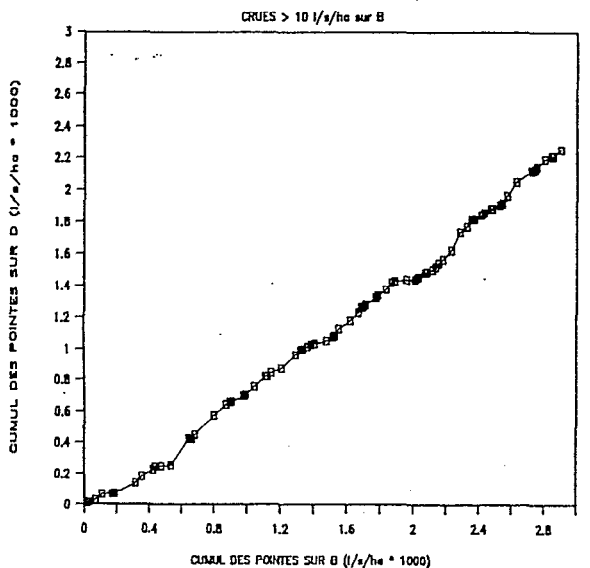
POINTES SUR C ET B – EPOQUE VERTE



POINTES SUR C ET B – E. ROUGE STAB.



POINTES SUR D et B – EPOQUE VERTE



POINTES SUR D ET B – E. ROUGE STAB.

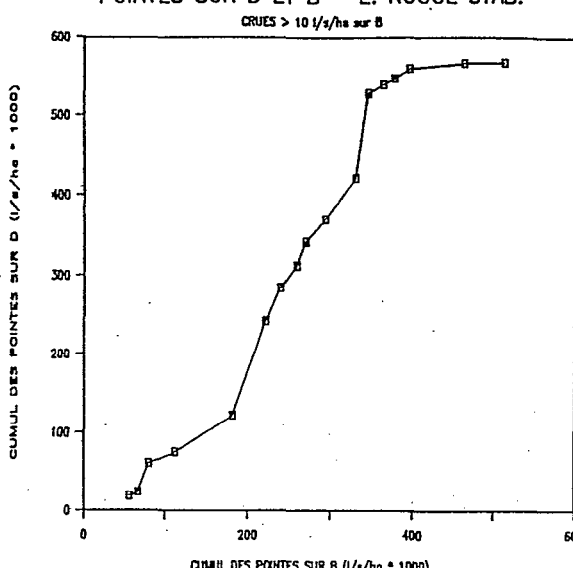
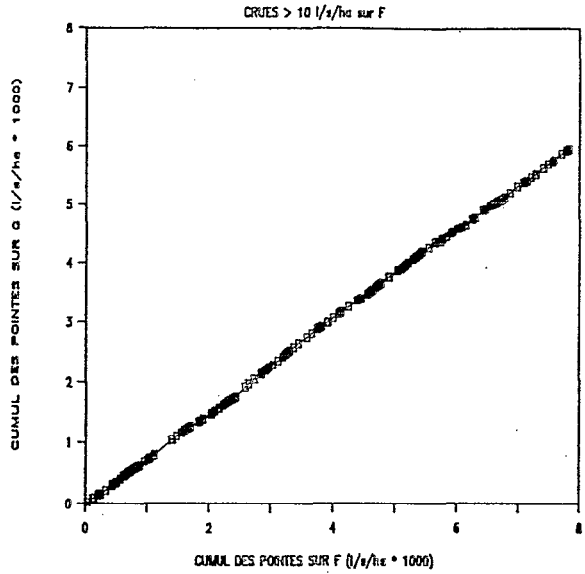


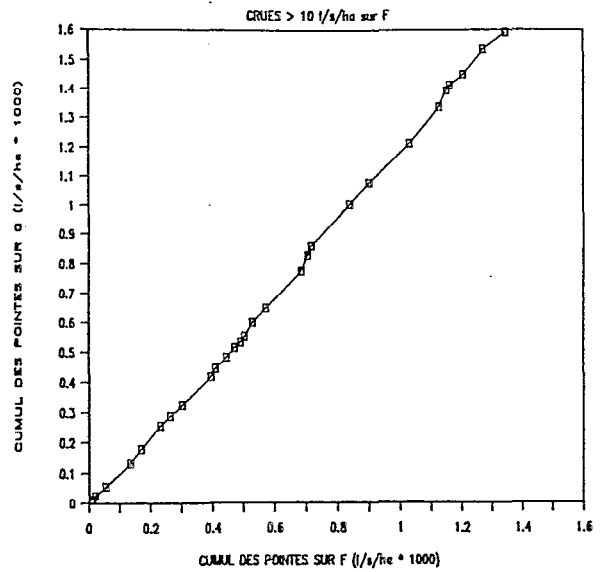
Figure 4.5.08 : Doubles cumuls des débits de pointe sur les bassins appariés

N.B. : Pour la comparaison visuelle des pentes, les échelles en X et en Y sont dans un rapport 1/1 sur toutes les figures

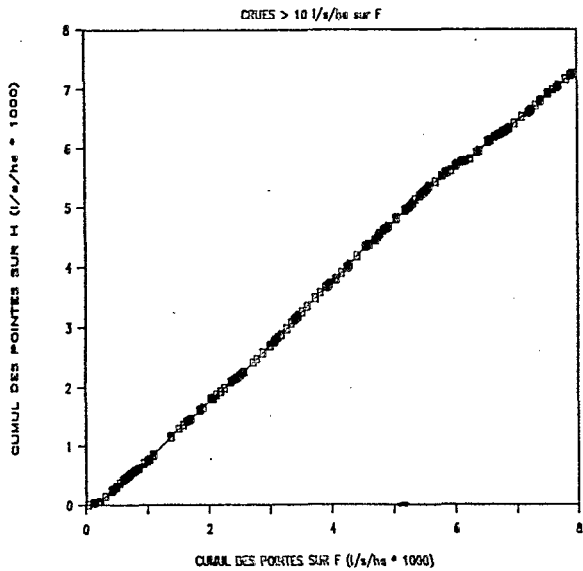
POINTES SUR G ET F – EPOQUE VERTE



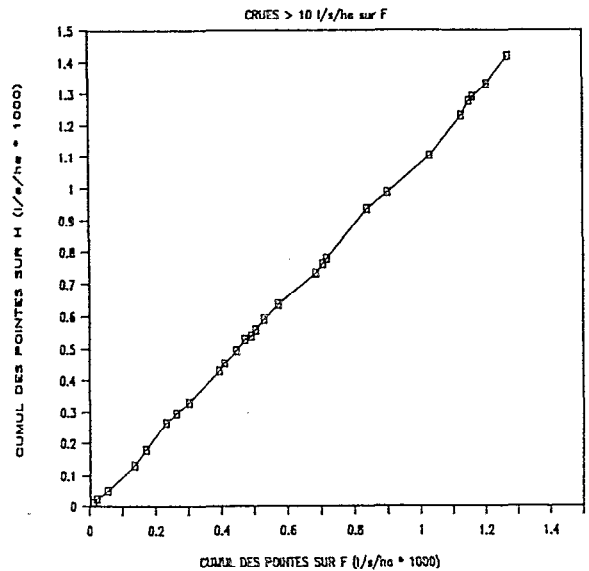
POINTES SUR G ET F – E. ROUGE STAB.



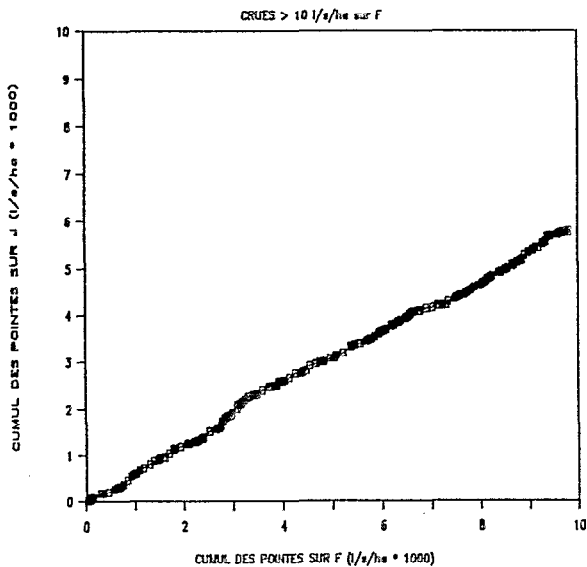
POINTES SUR H et F – EPOQUE VERTE



POINTES SUR H ET F – E. ROUGE STAB.



POINTES SUR J et F – EPOQUE VERTE



POINTES SUR J ET F – E. ROUGE STAB.

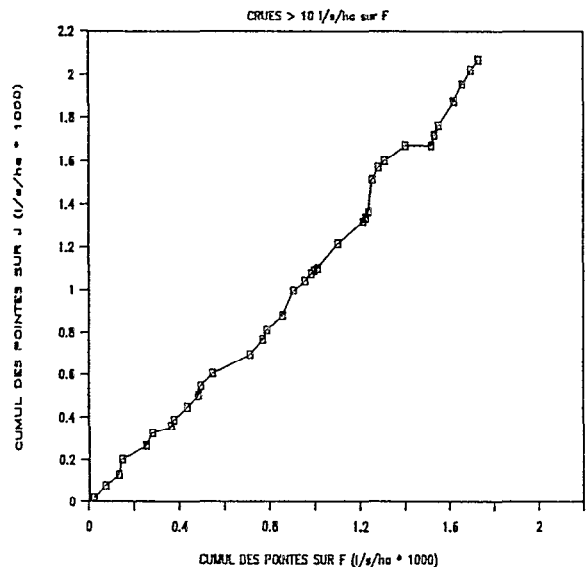


Figure 4.5.09 : Doubles cumuls des débits de pointe sur les bassins appariés

N.B. : Pour la comparaison visuelle des pentes, les échelles en X et en Y sont dans un rapport 1/1 sur toutes les figures

On peut confronter les résultats obtenus par l'interprétation des pentes des doubles cumuls avec ceux fournis par les régressions, selon la même démarche que celle déjà utilisée pour l'étude des volumes de crues.

Les débits de pointe des bassins défrichés ont été reconstitués comme sous forêt, à partir des pointes enregistrées sur le témoin, et en utilisant les régressions des figures 4.5.06 et 4.5.07 comme prédicteur. On a calculé pour chaque crue l'augmentation provoquée par le défrichement, exprimée en % par rapport au milieu naturel :

$$\text{gain} = (Q_{\text{sol nu obs.}} - Q_{\text{forêt cal.}}) / Q_{\text{forêt cal.}} * 100$$

Les résultats sont présentés sur les figures 4.5.10 et 4.5.11, et synthétisés dans les tableaux 4.5.08 et 4.5.09.

Pour tester la signification statistique de l'augmentation des pointes de crue après défrichement, cette augmentation a été calculée pour deux prédictions du débit sous forêt :

- augmentation par rapport à la moyenne de la prédiction (tableau 4.5.08),
- augmentation par rapport à la prédiction Q_{95} , correspondant à la fréquence au non-dépassement $F = 0,95$ - (tableau 4.5.09).

Le problème étant de savoir si l'augmentation était significative, et les augmentations calculées à partir de la moyenne étant toujours positives, seule la "prédiction haute" des pointes en forêt, susceptible de remettre le diagnostic en question, a été calculée (tableau 4.5.09), par la formule :

$$\bar{Q}_{95} = \bar{Q} + t * \sigma_{y/x_i}$$

avec \bar{Q} = moyenne de la prédiction
 t = valeur de t pour $F = 0,95$ (1,645 pour $n > 120$)
 σ^2_{y/x_i} = variance des moyennes conditionnelles (y/x_i) pour un x_i donné.

$$\sigma^2_{\bar{y}/x_i} = \text{Se}^2 * (1/n + ((x_i - \bar{x})^2 / \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2))$$

avec $\text{Se}^2 = (n/n-2) * \text{var}(y) * (1-r^2)$ r = coefficient de corrélation

Résultats et discussion :

Augmentation des débits de pointe, rapportée à la prédiction de la moyenne

Si l'on considère les gains des débits de pointe, crue par crue, par rapport à la prédiction de la moyenne en forêt, représentés par le symbole "+" sur les figures 4.5.10 à 4.5.11, et qui sont reportés dans le tableau 4.5.08, on constate que :

- Pour un bassin versant donné, le nombre de crues pour lesquelles on enregistre des gains positifs est largement supérieur à celui pour lesquelles ce nombre est négatif. A l'exception du bassin D, dont on a évoqué la médiocrité de la corrélation, les gains positifs affectent de 92% à 98% des crues des bassins A, C, G et J et 79% des crues de H.
- Ce nombre augmente encore si l'on s'attache aux crues moyennes et fortes, en l'occurrence aux crues observées supérieures à $20 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ (*). Les crues avec des gains positifs constituent pratiquement 100% de l'échantillon sur 4 bassins. Ces proportions sont de 89% sur le bassin D et de 77% sur le bassin H (dernière colonne du tableau 4.5.07a).
- Les gains peuvent prendre des valeurs très élevées, dépassant souvent 100%. Sur certains bassins, des prédictions isolées ont dépassé 1000%. Ces points n'ont pas été représenté sur les graphiques pour des raisons de lisibilité de l'échelle des Y. La moyenne de ces gains, portée en colonne 2 du tableau 4.5.08, est toujours positive et oscille entre 44,6% (H) et 224% (A).

Augmentation des débits de pointe rapportée à la "prédiction haute" du débit sous forêt (Q_{95})

Les gains calculés à partir de Q_{95} sont figurés sur les graphiques par des carrés blancs, et font l'objet du tableau 4.5.09.

- Par rapport à l'estimation précédente, la proportion des crues avec un gain positif diminue très nettement. Elle avoisine 60% sur A et G, 35% sur C et J, 18% sur H et 12% sur J.
- Le même décompte limité aux seules fortes crues fait augmenter sensiblement ces proportions : les pointes supérieures à $20 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ qui seraient plus fortes après défrichement que sous forêt dépassent 60% de l'effectif sur A, C et G, 40% sur J, et constituent environ 20% des pointes sur D et H.
- La moyenne des gains, calculée sur toutes les crues, est négative pour 4 bassins versants, et seuls les bassins A et G satisfont à ce critère. Cette moyenne, calculée sur les crues de plus de $20 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$, est positive pour 4 bassins sur 6, à savoir A, C, G, et J.

(*) N.B. : les valeurs portées sur les figures 4.5.10 et 4.5.11 représentent les crues calculées sous forêt

En combinant les estimations, rapportées à la moyenne et à Q_{95} , on peut conclure avec un risque inférieur à 5 %, que les débits de pointe augmentent significativement sur 4 bassins (A,D,G et J), ou 2 bassins (A et G), selon que l'on considère l'ensemble des crues, ou seulement les crues de plus de $20 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$

La méthode affecte les gains les plus élevés aux petites crues en forêt naturelle, mais il faut être conscient que la formule de calcul du gain, dans laquelle le débit en forêt naturelle est situé au dénominateur, favorise l'occurrence de gains élevés dans cette zone des petits débits. Par ailleurs, comme on peut le constater sur les figures 4.5.10 et 4.5.11, ce domaine des petites crues est aussi celui où les prédictions faites à partir de Q_{95} sont le plus souvent négatives.

En considérant uniquement les crues moyennes et fortes en forêt (supérieures à $20 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$), les moyennes des augmentations calculées par corrélation sont très peu différentes de celles obtenues à partir des pentes des doubles cumuls (tableau 4.5.10). Cette convergence des estimations s'explique par le fait que les doubles cumuls sont peu influencés par des décalages importants portant sur les faibles valeurs. Seul le bassin D échappe à ce regroupement, pour des raisons explicitées précédemment.

Par ailleurs, on constate sur le tableau 4.5.10 que le classement des augmentations moyennes est conforme à "l'ordre hydrologique naturel" des bassins versants : **les gains sont proportionnellement plus élevés sur les bassins qui avaient les crues les plus faibles.**

On ne peut manquer d'interpréter les différences de comportement des bassins G et H et de les relier aux conditions particulières du défrichement du bassin H. Ces bassins, qui présentaient des crues tout à fait comparables sous forêt (Cf. tableau 4.5.04), accusent des augmentations nettement différentes : de 41 % à 55 % selon l'estimation choisie pour G, et de 16 % à 17 % pour H.

Enfin, on peut dire que, si l'on a bien constaté une augmentation importante des pointes de crues après défrichement à ECEREX, (d'au moins 100 % sur les bassins sans nappe de bas-fond (C,A,J), et de 50 % dans les conditions normales sur les bassins avec nappe (G)), la plus grande prudence s'impose pour généraliser ces résultats à des bassins plus grands. En effet sur des bassins de plusieurs dizaines de km^2 et au delà, sur lesquels le terme de crue prend une signification économique, le transfert et la propagation des ondes dans le réseau hydrographique sont déterminants dans l'amplitude de la pointe. Or ces paramètres sont réduits à leur expression la plus élémentaire à ECEREX, et l'on touche véritablement là, une limite de l'expérimentation, dictée par l'échelle.

En guise de conclusion, il nous semble que l'énoncé de règles du type "*l'augmentation des pointes n'est pas significative après défrichement*", peut-être interprété à tort par des profanes de la chose hydrologique, comme "*la modification du couvert végétal n'a pas d'effet déterminant sur les crues*", et que, par conséquent, toute intervention sur la couverture végétale (défrichement ou reforestation) serait sans effet sur les crues. En réalité cette conclusion est un euphémisme pour dire "*malgré son immense savoir et l'impressionnante panoplie de méthodes dont il dispose, l'hydrologue n'est pas capable dans certains cas, de faire une prédiction suffisamment précise pour mettre en évidence les changements, dont il a une forte présomption*".

Les résultats publiés par Hewlett et Helvey (1970), qui n'avaient pas mis en évidence une quelconque modification, significative au seuil de 0,95, de l'amplitude des pointes de crues après coupe à blanc d'un bassin forestier des Monts Appalaches, fournissent une illustration de ce malentendu. En utilisant le même jeu de données, mais après un changement de variable et avec une autre méthode d'estimation, Bethlahmy (1972) met en évidence une augmentation des pointes de 8,6% la première année après le traitement, significative au même seuil de probabilité. Dans sa réponse, Hewlett (1972) précise que si la méthode utilisée n'avait pas permis de conclure à un changement (ce qui serait un diagnostic "hydrologique"), cela ne signifiait point que ce changement était inexistant, mais que le procédé d'analyse n'avait pas permis de le mettre en évidence. Il donne comme exemple *"si l'on veut prouver expérimentalement qu'un fil métallique s'allonge lorsqu'on le chauffe, il faut être capable de mesurer sa longueur avec une précision suffisante"*. On pourrait ajouter qu'en choisissant cet exemple, Hewlett sous-entend implicitement que l'augmentation est petite (ce qui est effectivement le cas sur le bassin étudié), mais même si celle-ci était de 100%, la mesure du fil avec une chaîne d'arpenteur ne permettrait pas davantage de mettre le phénomène en évidence, et amènerait à conclure que l'augmentation des pointes n'est pas significative sur les bassins C, D, J et H, comme le suggèrent les chiffres de la colonne 2 du tableau 4.5.09.

A l'inverse, la reforestation ne doit pas être présentée comme une arme absolue pour la protection contre les crues, car il y aurait effectivement un risque pour les hydrologues de perdre leur crédibilité auprès des pouvoirs publics et de l'opinion en général, lorsque des crues dévastatrices continuent de se produire après plantations sylvicoles et mises en défens de bassins versants (Brooks, 1985, cité par Bruinijzel, 1986).

Tableau 4.5.08 : Augmentation des débits de pointe en *Epoque Rouge stabilisée*, par rapport à la forêt naturelle

Estimation des gains* par rapport à la prédiction de la valeur centrale du débit de pointe en forêt

bassin	toutes crues				crues observées > 20 l.s ⁻¹ .ha ⁻¹			
	moyenne : des gains :	nombre : de crues :	nombre et % de crues avec gain positif	%	moyenne : des gains :	nombre : de crues :	nombre et % de crues avec gain positif	%
	en % :	n :	n'	%	en % :	n :	n'	%
C	151	26	25	96 %	179	15	15	100 %
D	111	17	8	47 %	247	9	8	89 %
A	224	40	39	98 %	230	39	39	100 %
J	163	36	33	92 %	180	33	32	97 %
G	96,1	28	27	96 %	88,6	23	22	96 %
H	44,6	28	22	79 %	29,6	22	17	77 %

Tableau 4.5.09 : Augmentation des débits de pointe en *Epoque Rouge stabilisée*, par rapport à la forêt naturelleEstimation des gains* par rapport à la prédiction "haute" des débits de pointe en forêt (Q₉₅),
correspondant à la fréquence au non-dépassement F = 0,95

bassin	toutes crues				crues observées > 20 l.s ⁻¹ .ha ⁻¹			
	moyenne : des gains :	nombre : de crues :	nombre et % de crues avec gain positif	%	moyenne : des gains :	nombre : de crues :	nombre et % de crues avec gain positif	%
	en % :	n :	n'	%	en % :	n :	n'	%
C	-15,4	26	9	35 %	14,4	15	9	60 %
D	-39,6	17	2	12 %	-1,1	9	2	22 %
A	34,1	40	25	63 %	36,7	39	25	64 %
J	-4,7	36	13	36 %	2,3	33	13	39 %
G	11,0	28	16	57 %	18,5	23	16	70 %
H	-25,1	28	5	18 %	-18,4	22	5	23 %

Tableau 4.5.10 : Augmentation moyenne des débits de pointes en *Epoque Rouge stabilisée*.

Comparaison des estimations par régression et par doubles cumuls

bassin	augmentation moyenne des débits de pointe après défrichement en %			
	selon les pentes des doubles cumuls		selon les régressions (crues > 20 l.s ⁻¹ .ha ⁻¹ en forêt naturelle)	
	%		% n crues	
C	166	126	3	
D	42	8	7	
A	123	116	26	
J	100	96	20	
G	55	41	17	
H	17	16	19	

(*) gain = (Q_{sol nu obs.} - Q_{forêt cal.}) / Q_{forêt cal.} * 100

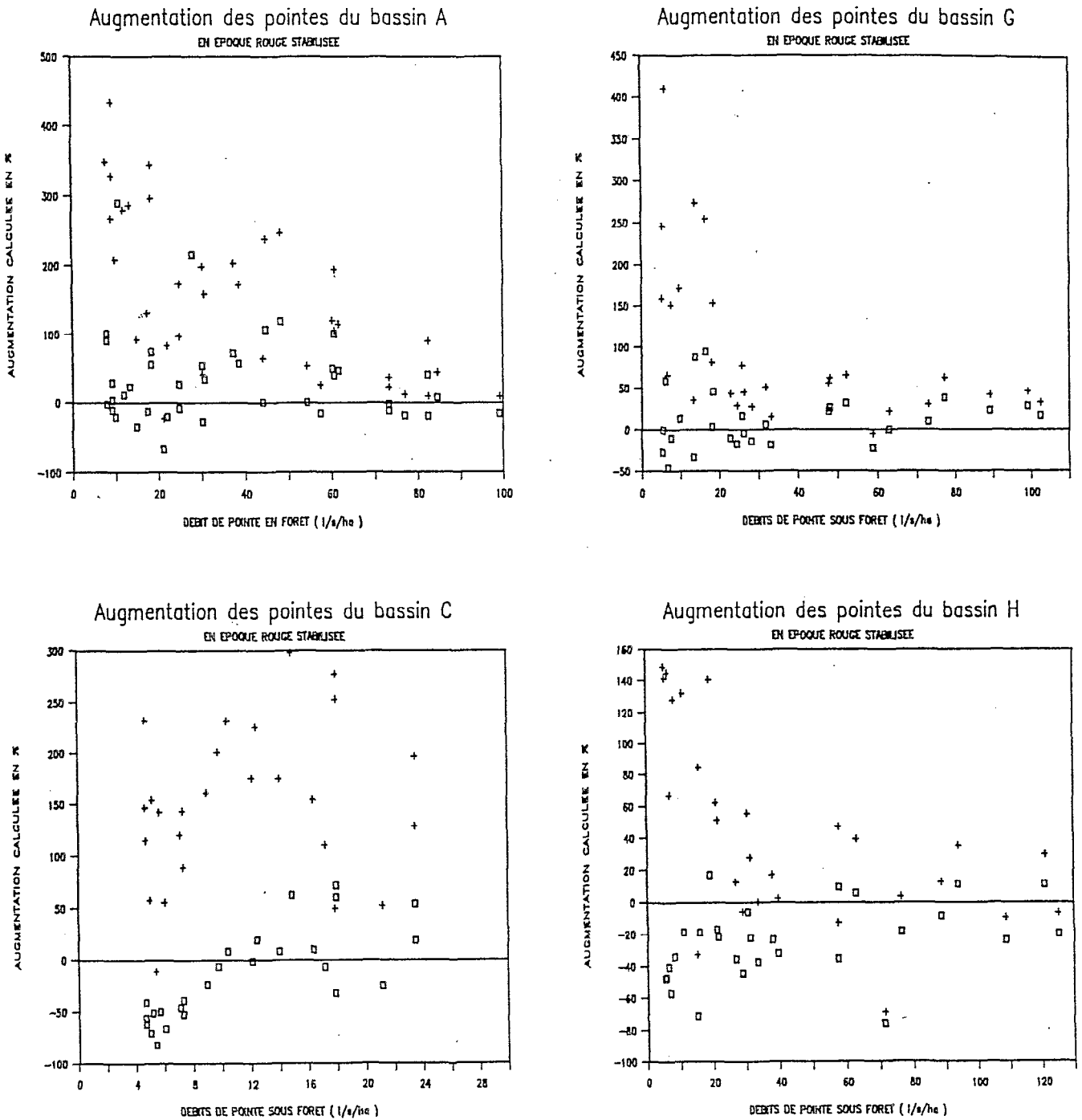


Figure 4.5.10 : Augmentation des débits de pointe en *Epoque Rouge stabilisée*,
à partir des corrélations entre bassins appariés
valeurs en %, rapportées au débit sous forêt

"+" : estimation par rapport à la prédiction de la valeur centrale des débits sous forêt

"□ blanc" : estimation par rapport à la prédiction Q_{0.95} (débit de la fréquence au non-dépassement F=0,95)

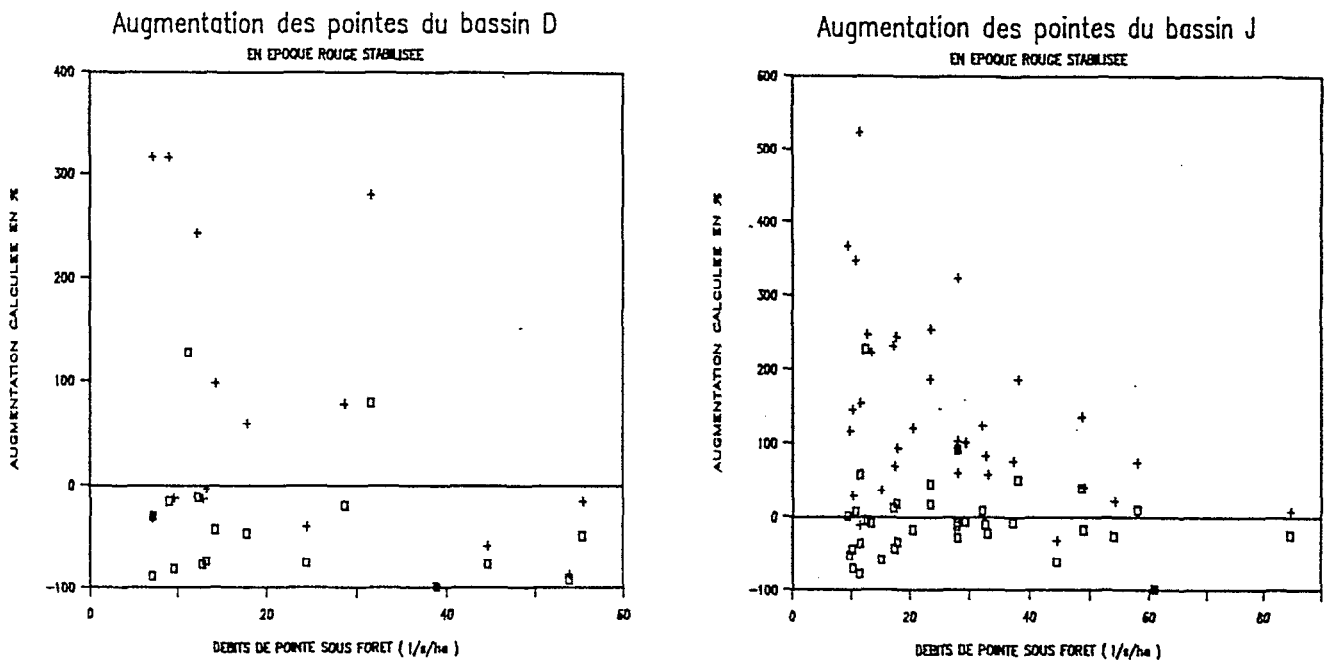


Figure 4.5.11 : Augmentation des débits de pointe en *Epoque Rouge stabilisée*,
à partir des corrélations entre bassins appariés
valeurs en %, rapportées au débit sous forêt

"+" : estimation par rapport à la prédiction de la valeur centrale des débits sous forêt

"■ blanc" : estimation par rapport à la prédiction Q_{95} (débit de la fréquence au non-dépassement $F=0,95$)

CINQUIEME PARTIE :

HYDROLOGIE DES BASSINS VERSANTS AMENAGES

La **cinquième partie** est consacrée à l'étude hydrologique des bassins aménagés pendant l'*Epoque Jaune*. Pour chacun des bassins, on traite successivement des modifications provoquées par l'expérimentation sur l'écoulement de crue et sur les débits de pointe.

Chaque bassin fait l'objet d'un chapitre, selon la structure suivante:

- Chapitre 5.1 : la prairie pâturée implantée sur le bassin A.
- Chapitre 5.2 : le recrû forestier naturel sur les bassins D et E.
- Chapitre 5.3 : la sylviculture à croissance rapide sur les bassins G (pins) et H (eucalyptus).
- Chapitre 5.4 : la culture itinérante sur brûlis (abattis traditionnel) sur le bassin I.
- Chapitre 5.5 : le verger de pomelos, en association avec une prairie sur le bassin C.

- Le chapitre 5.6 comporte une comparaison des différents aménagements, au plan hydrologique, et une synthèse prenant en considération l'ensemble des résultats des *Epoques Rouge et Jaune*.

5.1 UNE PRAIRIE PATUREE : LE BASSIN A

Le pâturage est une spéculation préoccupante pour le développement agricole de la Guyane, mais également dans le contexte plus général de l'utilisation de l'espace gagné aux dépens de la forêt tropicale humide dans la plupart des pays. C'est particulièrement le cas au Brésil, où une grande part des défrichements est vouée au ranching extensif. La durée de vie de ces pâturages est limitée à quelques années. Indépendamment des jugements très sévères qui ont pu être portés à l'encontre du bien-fondé socio-économique de ce choix, cette pratique est particulièrement affligeante au plan de l'utilisation désordonnée d'un écosystème qui est pratiquement non renouvelable à une échelle de temps humaine.

Par opposition au ranching, l'aménagement testé au bassin A est une spéculation pastorale intensive, puisqu'il y a plantation de stolons de l'espèce fourragère (en l'occurrence *Digitaria swazilandensis*), apport initial et périodique d'engrais, entretien léger pour éliminer les espèces adventices, rotation du bétail dans des parcs clôturés dans lesquels les animaux séjournent de 5 à 9 jours. La productivité végétale et animale de ce système, étudiée en détail pendant 2 ans, d'octobre 1982 à octobre 1984 (Béreau et al., 1983) est bien supérieure à celle d'un élevage extensif : la production végétale moyenne a varié selon les sites d'échantillonnages entre 13 et 23 tonnes de matière sèche par an, et le gain de poids moyen des animaux a été de 0,335 kg par jour. La charge animale étant constituée de 8 à 10 jeunes taurillons Zébu pesant environ 240 kg à leur arrivée, la production du système est de l'ordre de 1100 kg de poids vif, par hectare et par an.

On peut comparer ces chiffres avec la charge animale moyenne de l'Amazonie brésilienne. Myers (1982) donne le chiffre de 1,3 animal par hectare, mais Fearnside (1979) considère que ce chiffre représente l'optimum de la première année. Dès la seconde année, la productivité fourragère est en déclin très sensible, et au bout de 5 ans celle-ci est pratiquement nulle, l'espèce fourragère étant complètement concurrencée par des espèces adventices, moins exigeantes en éléments nutritifs. Toujours selon Fearnside (1979), la potentialité du pâturage amazonien calculée sur 3 ans ne serait que de 0,28 tête par hectare et par an. A partir d'un modèle transformant les données de phytomasses fourragères mesurées sur des placettes en accroissement de poids vif, cet auteur aboutit à une productivité de :

- 450 kg d'accroissement de poids vif par an en année 1,
- 215 kg d'accroissement de poids vif par an en année 2,
- 165 kg d'accroissement de poids vif par an en moyenne sur les années 3,4 et 5,
- et une valeur non significativement différente de zéro les années suivantes.

Il faut quatre à cinq ans pour que les veaux atteignent le poids d'abattage de 330 kg à 350 kg (Barcellos, 1974). La productivité finale de cet élevage extensif itinérant est donc de deux vaches pour un hectare de forêt primaire, après quoi le système ne peut perdurer qu'au prix de nouveaux défrichements !

Les inconvénients du pâturage semi-intensif sont ceux inhérents à une monoculture à forts intrants agrochimiques et financiers, mais dans le contexte économique de la Guyane (coût initial des défrichements très élevé, de l'ordre de 30 000 francs par hectare en 1981 sur les bassins G et H, coûts élevés des services comparés à ceux des pays environnants), on est en droit de considérer que le développement agricole ou pastoral de la Guyane sera intensif ou semi-intensif, ou il ne sera pas ; et, dans ces conditions, la pérennité du pâturage apparaît comme un préalable à la viabilité de cette filière.

Au plan hydrologique, l'expérimentation "pâturage" menée sur le bassin A est doublement intéressante :

- Parmi les 8 essais conduits sur les bassins expérimentaux en *Période Jaune*, c'est le seul qui puisse être considéré comme un système stabilisé au plan de la couverture végétale. Planté en mai 1979, ce pâturage paraît, "à l'oeil", avoir atteint son taux de couverture optimum au début de la saison des pluies suivante (décembre 1979), et l'on dispose ainsi de 4 années d'observations (1980-83) qui constituent l'*Epoque Jaune* de ce bassin, permettant de comparer les écoulements de la forêt naturelle avec ceux d'une prairie.
- Par ailleurs, ayant enregistré sur ce bassin un "record" pour l'augmentation de l'écoulement après défrichement (762 mm en *Epoque Rouge*), il est intéressant de vérifier si cette réponse hydrologique s'amortit avec le développement du pâturage.

5.1.1 LES ECOULEMENTS

Comme pour les *Epoques Verte et Rouge*, ce sont les Ecoulements Totaux de Crues, qui feront l'objet des estimations et des discussions.

Les reconstitutions des écoulements en condition de forêt naturelle ont été faites selon 3 procédés :

- reconstitution par corrélation avec le témoin B, des volumes écoulés, crue par crue (régression A_B du tableau 3.3.10),
- reconstitution par corrélation avec le témoin B, des volumes écoulés, cumulés par décade (régression A_B du tableau 3.3.11),
- reconstitution par comparaison des pentes des doubles cumuls, en *Epoque Verte* et en *Epoque Jaune*.

Globalisées sur la totalité de l'*Epoque Jaune*, ces différentes estimations apparaissent dans les dernières lignes du tableau 5.1.01.

Tableau 5.1.01 : Ecoulements Totaux de Crue du bassin A en *Epoque Jaune* (1980-83)
 Comparaison des écoulements observés et des écoulements calculés en forêt naturelle,
 selon différentes estimations.

Période	Ecoulements de Crue observés sous pâturage (LeP mm)	Ecoulements de crue calculés sous forêt (LeF mm)	gain calculé (mm)	LeP / LeF	
1980	755	Cor. Crue	476	279	1,59
		Cor. Dec.	473	282	1,60
		Dble Cum.	474	281	1,59
1981	464	Cor. Crue	285	179	1,63
		Cor. Dec.	289	175	1,61
		Dble Cum.	325	139	1,43
1982	739	Cor. Crue	504	235	1,47
		Cor. Dec.	539	200	1,37
		Dble Cum.	527	212	1,40
1983	642	Cor. Crue	507	135	1,27
		Cor. Dec.	487	155	1,32
		Dble Cum.	473	169	1,36
1980-81	1219	Cor. Crue	761	458	1,60
		Cor. Dec.	762	457	1,60
		Dble Cum.	799	420	1,53
1980-83	2600	Cor. Crue	1772	828	1,47
		Cor. Dec.	1788	812	1,45
		Dble Cum.	1799	801	1,45

L'écoulement Total de Crue, mesuré à l'exutoire du bassin, a été de 2600 mm entre janvier 1980 et décembre 1983, et dans le même temps, l'écoulement reconstitué sous forêt naturelle a varié selon les estimations entre 1772 mm et 1799 mm. Le pâturage induit un écoulement de crue en augmentation très sensible par rapport à celui de la forêt naturelle, de 801 mm à 828 mm, soit une augmentation relative de 45% à 47%, selon les estimations.

Les valeurs de l'écoulement sous forêt aux bornes de l'intervalle de confiance à 95%, calculées à partir des paramètres de la corrélation établie crue par crue en *Epoque Verte* (Cf. 3.3.5) sont respectivement de 1860 mm et de 1684 mm. On en conclut que les estimations ne sont pas significativement différentes, mais que toutes les augmentations constatées sont largement différentes de zéro au seuil choisi. Les valeurs d'accroissement aux bornes de l'intervalle à 90% seraient ainsi respectivement de 740 mm et de 916 mm, et les valeurs relatives de l'augmentation comprises entre 40% et 54%.

L'écoulement du pâturage est en réduction très sensible par rapport à celui du sol nu : l'accroissement relatif constaté sur l'année 1979 était de 90% ou de 100% selon l'estimation retenue (Cf. tableau 4.2.01).

On peut essayer de suivre l'évolution de la réponse hydrologique du bassin au cours des 4 années, et en particulier vérifier si cette *Epoque* peut-être considérée comme homogène au point de vue hydrologique, ou s'il est possible de mettre en évidence, à l'aide d'un critère donné, plusieurs périodes différentes. Pour ce faire, on a choisi le procédé des ellipses de Bois, déjà utilisé en *Epoque Rouge* (Cf. § 4.3).

La courbe des doubles cumuls, correspondant à l'ensemble de l'*Epoque Jaune*, montre une légère diminution de pente au cours de la période (figure 5.1.01). Le cumul des résidus construit à partir de la régression avec le témoin sur la même base de temps (figure 5.1.02) permet de rejeter l'hypothèse d'homogénéité (figure 5.1.03) : le début de la série voit l'occurrence de crues plus abondantes que ne le voudrait la prédiction moyenne sur toute l'*Epoque* (les résidus sont toujours positifs et le cumul est croissant). Par contre, on peut considérer que les 2 premières années de l'*Epoque Jaune* constituent une série homogène selon le test, avec un risque inférieur à 10% (17 points sur 237 situés en dehors de l'ellipse correspondant à $C = 90\%$ - figure 5.1.04).

Cette conclusion permet d'affiner l'interprétation des résultats du tableau 5.01.1 : le rapport des augmentations qui varie de 53% à 60% selon les estimations sur la période 1980-81, est en réduction assez sensible les années suivantes, et passe dans la gamme 37-47% en 1982 et 27-36% en 1983. Il y a donc une évolution hydrologique vers une diminution des écoulements de crue, et cela malgré l'augmentation de la charge animale, qui est passée de 8 à 10 unités.

Cette pression des animaux n'aura pas empêché le réajustement du complexe sol-végétation vers de nouvelles conditions, allant dans le sens d'une réduction continue de la réponse hydrologique du bassin. Sans aucun doute, la bonne gestion du pâturage, et en particulier la rotation des animaux dans les parcs, a été déterminante dans ce résultat. Comme par ailleurs, l'observation macroscopique du sol laisse apparaître quelques traces de l'impact des animaux (tassements localisés, "pieds de vaches",...), on peut penser que la réponse hydrologique d'une prairie non-pâturée serait inférieure à celle constatée sur le bassin A, et pourrait peut-être approcher celle de la forêt.

5.1.2 LES DEBITS DE POINTE

Le tableau 5.1.02 présente un inventaire des crues observées sur le bassin A transformé en pâturage. On peut constater que la plus forte pointe enregistrée sur ce bassin pendant toute la période d'observation ($187 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$) se situe en *Epoque Jaune* (le 27-04-1980).

On constate également que les débits spécifiques de cet échantillon des pointes de crue sont du même ordre de grandeur qu'en *Epoque Rouge Stabilisée* (Cf. tableau 4.5.05), et bien supérieures à celui de l'*Epoque Verte* (Cf. tableau 4.5.04). Cette comparaison n'a qu'une valeur indicative, puisque les durées associées à ces différents échantillons sont de 4 ans pour l'*Epoque Jaune*, 2 ans pour l'*Epoque verte* et 5 mois pour l'*Epoque Rouge stabilisée*. Le nombre des crues supérieures à $10 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$, qui est un indicateur de l'activité hydrologique du bassin moins biaisé par l'occurrence de valeurs extrêmes, est de 140 crues sur 4 ans en *Epoque Jaune* et de 49 crues sur 2 ans en *Epoque Verte*.

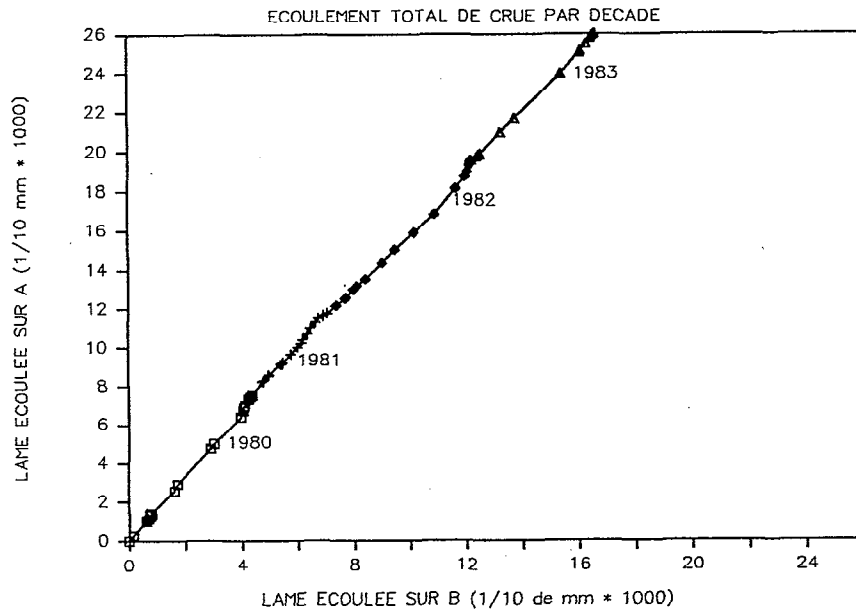


Figure 5.1.01 : Doubles cumuls des Ecoulements Totaux de Crue (ETC) du témoin B et du bassin A, discrétisés par décade, en *Epoque Jaune*. (janvier 1980 - décembre 1983)

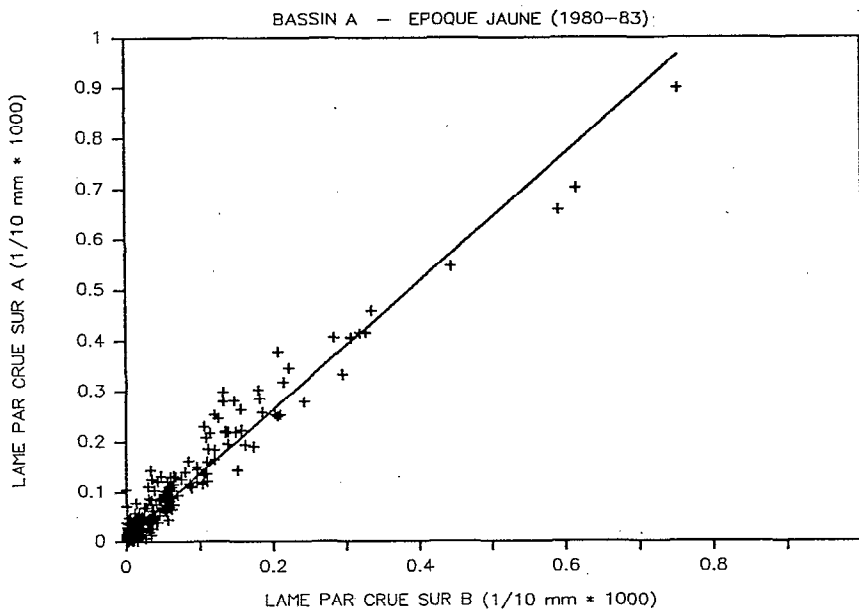


Figure 5.1.02 : Régression crue par crue des Ecoulements Totaux de Crue (ETC) du témoin B et du bassin A en *Epoque Jaune*. (janvier 1980 - décembre 1983)

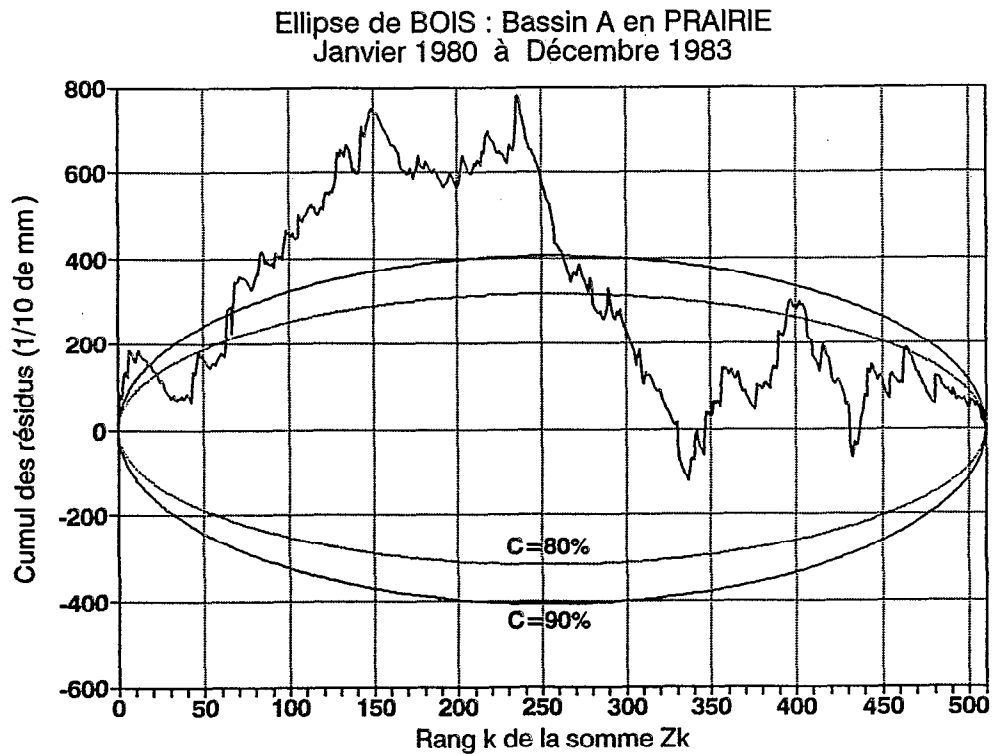


Figure 5.1.03 : Cumul des résidus de la corrélation par crue entre Ecoulement Total de Crue du bassin A et du témoin B sur l'ensemble de l'Epoque Jaune (janvier 1980 à décembre 1983).
Tracé des ellipses de Bois pour les seuils C de 80% et 90%

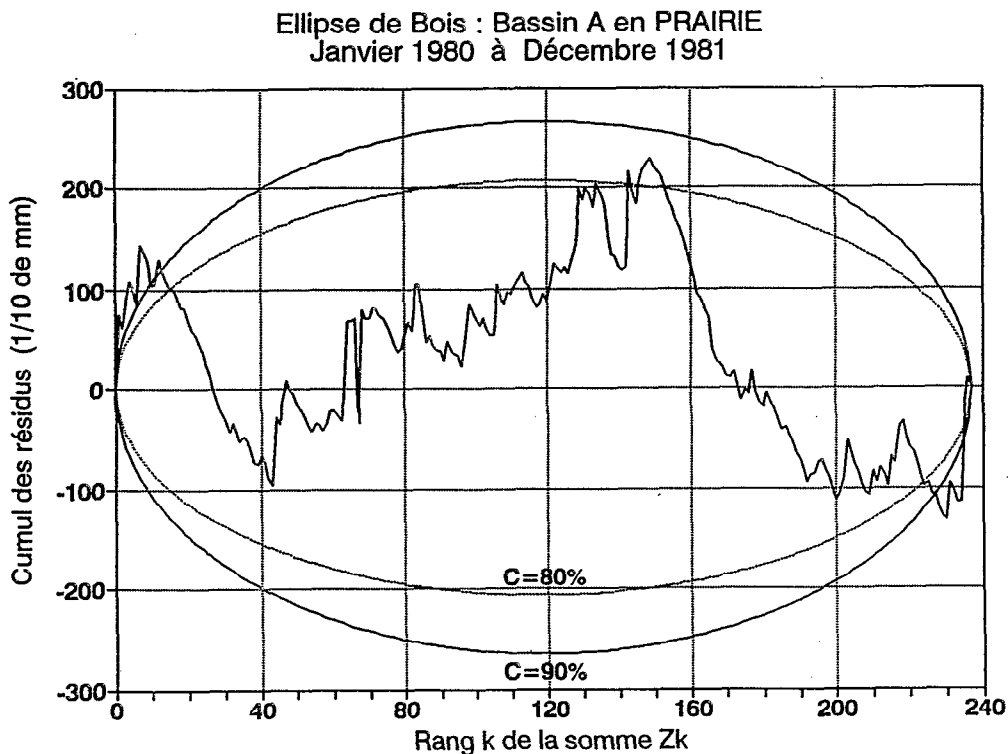


Figure 5.1.04 : Cumul des résidus de la corrélation par crue entre Ecoulement Total de Crue du bassin A et du témoin B sur la période janvier 1980 à décembre 1981.
Tracé des ellipses de Bois pour les seuils C de 80% et 90%

Toutes ces observations constituent autant d'indices du fait que les crues sont fortes et nombreuses sur le pâturage. L'objet de ce paragraphe est de comparer l'importance des débits de pointe du pâturage avec ceux d'une forêt ou d'un sol nu, "toutes choses étant égales par ailleurs", c'est à dire à conditions de pluviométrie, immédiate et antérieure, égales.

Tableau 5.1.02 : Débits de pointe du bassin A en *Epoque Jaune*, en $l.s^{-1}.ha^{-1}$

Bassin versant	A
5 plus fortes crues	
1	187
2	176
3	169
4	167
5	143
Nombre de crues	
$\geq 100 l.s^{-1}.ha^{-1}$	14
$\geq 75 l.s^{-1}.ha^{-1}$	28
$\geq 50 l.s^{-1}.ha^{-1}$	51
$\geq 25 l.s^{-1}.ha^{-1}$	85
$\geq 10 l.s^{-1}.ha^{-1}$	140

Les doubles cumuls des pointes du témoin B et du bassin A (crues de plus de $20 l.s^{-1}.ha^{-1}$ sur B) sont figurés en 5.1.05. La pente est très stable sur toute la période, avec une valeur de 1,97. Cette valeur, rapportée à la pente du double cumul en *Epoque Verte*, soit 1,12 (Cf. tableau 4.5.07), indique que l'accroissement moyen des pointes en *Epoque Jaune* a été de 76%.

La deuxième méthode d'évaluation des modifications des débits de pointe consiste à reconstituer les pointes sous forêt par régression. L'algorithme est le même que celui déjà utilisé en *Epoque Rouge stabilisée* (régression linéaire du tableau 4.5.06). Comme dans le cas qui vient d'être évoqué, on a tout d'abord calculé la valeur centrale de la prédiction de la pointe sous forêt sur le bassin A, et le gain de la pointe, par rapport à la situation originelle, exprimé en % :

$$\text{gain} = (Q_{\text{pâturage obs.}} - Q_{\text{forêt cal.}}) / Q_{\text{forêt cal.}} * 100$$

Ce calcul a été fait pour toutes les crues ayant dépassé $10 l.s^{-1}.ha^{-1}$ sur le témoin. Ces résultats sont représentés graphiquement par le symbole "+" sur la figure 5.1.06. Pour la lisibilité du graphique, l'échelle des ordonnées a été tronquée à 300% (cinq petites crues, de moins de $20 l.s^{-1}.ha^{-1}$ sous forêt, présentent des gains supérieurs à 300%)

Tableau 5.1.03 : Augmentation des débits de pointe du bassin A par rapport à la forêt naturelle en *Epoque Jaune*

Estimation des gains* par rapport à la prédiction de la valeur centrale du débit de pointe en forêt

bassin	toutes crues				crues observées > 20 l.s ⁻¹ .ha ⁻¹			
	moyenne : des gains:	nombre : de crues :	nombre et % de crues avec gain positif	%	moyenne : des gains:	nombre : de crues :	nombre et % de crues avec gain positif	%
	en % :	n :	n'	%	en % :	n :	n'	%
A	106	: 93	: 87	94 %	115	: 82	: 80	98 %

Le tableau 5.1.03 présente de gauche à droite :

- la moyenne des gains individuels, calculés sur toutes les crues, soit 106 %,
- le nombre de crues pour lesquelles le gain est positif, soit 87 événements sur 93 (94 %),
- la moyenne des gains individuels, calculés sur les crues observées de plus de 20 l.s⁻¹.ha⁻¹, soit 115 %,
- le nombre de crues de plus de 20 l.s⁻¹.ha⁻¹, pour lesquelles le gain est positif, soit 80 événements sur 82 (98 %).

Selon ces chiffres, les pointes de crues sont plus fortes sur le pâturage qu'en forêt naturelle. Cette proposition est quasiment toujours vérifiée sur les crues observées moyennes et fortes (supérieures à 20 l.s⁻¹.ha⁻¹), et les débits de pointes du pâturage seraient plus que doublés par rapport à ceux de la forêt primaire (gain moyen 115%).

Le même procédé d'estimation portant sur le sol nu de l'*Epoque Rouge stabilisée* avait amené à admettre une augmentation moyenne des débits de pointe de 230 % (tableau 4.5.08). L'installation du pâturage est donc associée à une diminution très nette des pointes de crue par rapport au sol nu; celles-ci restent toutefois bien supérieures à celles qui sont générées dans l'écosystème naturel.

Pour tester la signification statistique de ces assertions, on a calculé les gains, non plus rapportés à la prédiction de la valeur centrale de la reconstitution de la pointe en forêt, mais à celle de la moyenne conditionnelle "haute" au seuil de probabilité de 95 % (Q₉₅). Les points répondant à cette condition sont représentés graphiquement par le symbole "■ blanc" sur la figure 5.1.06.

Les résultats du calcul font l'objet du tableau 5.1.04 qui comporte :

- la moyenne des gains individuels, calculés sur toutes les crues, qui est négative (-9,4 %),
- le nombre de crues pour lesquelles le gain est positif, soit 35 événements sur 93 (38 %),
- la moyenne des gains individuels, calculés sur les crues observées de plus de 20 l.s⁻¹.ha⁻¹, négative, voisine de zéro (-2 %),
- le nombre de crues de plus de 20 l.s⁻¹.ha⁻¹, pour lesquelles le gain est positif, soit 35 événements sur 82 (43 %).

(*) gain = (Q sol nu obs. - Q forêt cal.) / Q forêt cal * 100

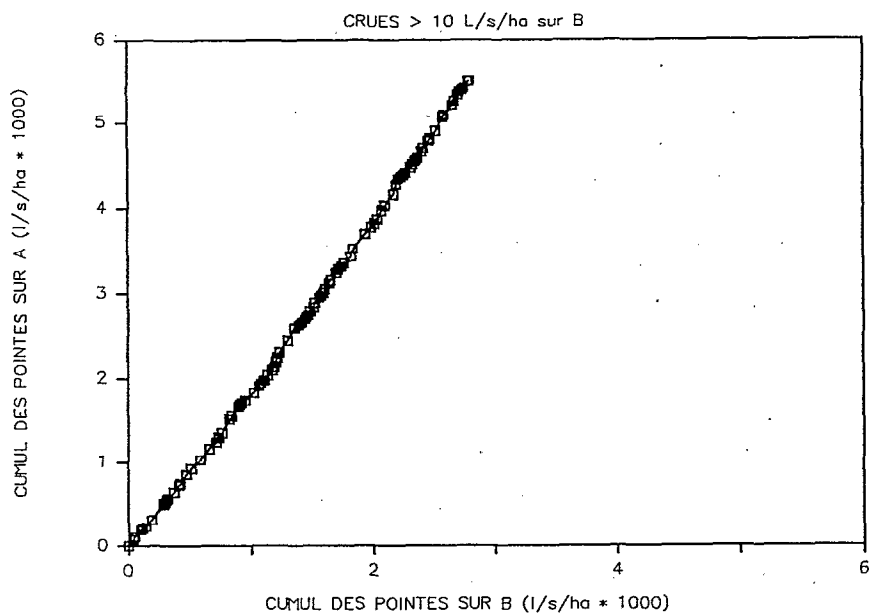


Figure 5.1.05 : Doubles cumuls des débits de pointe du témoin B et du bassin A en *Epoque Jaune*.

crues de plus de $20 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ sur le témoin - valeur de la pente = 1,97

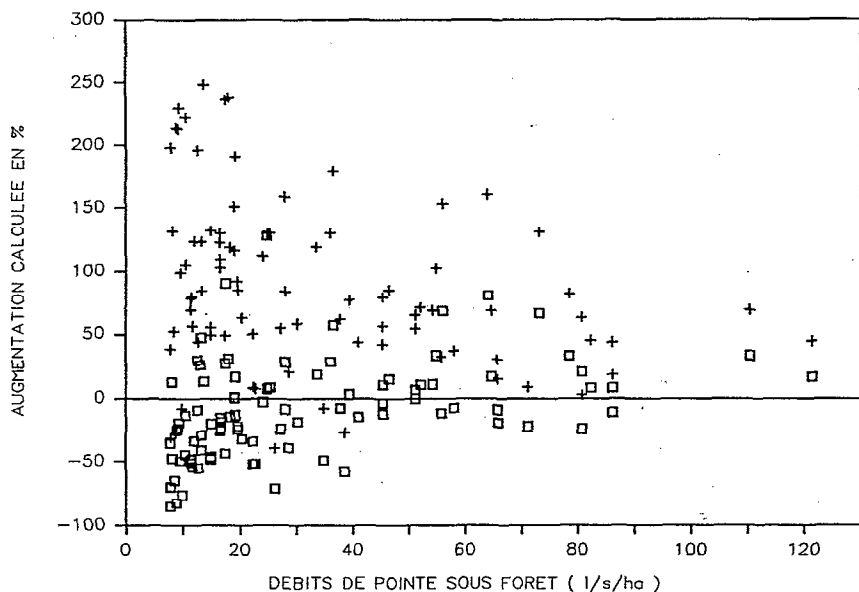


Figure 5.1.06 : Augmentation des débits de pointe sur le bassin A en *Epoque Jaune*,

à partir des corrélations avec le témoin B

valeurs en %, rapportées au débit sous forêt

"+" : estimation par rapport à la prédiction de la valeur centrale des débits sous forêt

"■ blanc" : estimation par rapport à la prédiction Q95 (débit de la fréquence au non-dépassement $F=0,95$)

Tableau 5.1.04 : Augmentation des débits de pointe du bassin A par rapport à la forêt naturelle en *Epoque Jaune*

Estimation des gains* par rapport à la prédiction "haute" des débits de pointe en forêt (Q₉₅),
correspondant à la fréquence au non-dépassement F = 0,95

bassin	toutes crues				crues observées > 20 l.s ⁻¹ .ha ⁻¹			
	moyenne :	nombre :	nombre et % de crues		moyenne :	nombre :	nombre et % de crues	
	des gains :	de crues :	avec gain positif		des gains :	de crues :	avec gain positif	
	en % :	n :	n' %		en % :	n :	n' %	
A	-9,4	93	35	38 %	-2.0	82	35	43 %

Au vu de ces résultats, et comme on l'avait déjà constaté à propos de l'étude des pointes en *Epoque Rouge*, on conçoit que l'utilisation "sauvage" d'un test statistique peu sensible et "globalisant" pourrait amener à conclure qu'il n'y a pas d'augmentation significative des pointes de crue entre un pâturage et une forêt primaire, et la compilation des études similaires a montré qu'une telle attitude ne relevait pas de la pure fiction. On doit remarquer tout de même (figure 5.1.06) que même si le diagnostic est indécis pour les petites crues, la plupart des symboles "■" signalent des augmentations positives au seuil de 95 % pour les fortes crues.

Rapportée à la prédiction centrale des pointes en forêt, la moyenne des gains calculée sur les crues, qui auraient dépassé 20 l.s⁻¹.ha⁻¹ en forêt (figurées sur 5.1.06), est de 72%. Ce résultat est très voisin de celui donné par le rapport des pentes (*Epoque jaune / Epoque Verte*), qui est de 76%.

La sensibilité limitée de la régression utilisée pour la reconstitution des pointes en forêt n'a pas permis de mettre en évidence l'amortissement des pointes ou tout autre phénomène transitoire durant l'*Epoque Jaune*, comme cela avait été le cas pour les écoulements (même en limitant les objectifs aux valeurs centrales de l'estimation). La rectitude des doubles cumuls (figure 5.1.05) confirme le comportement indifférencié du bassin pâturage sur la période étudiée, vis-à-vis des débits de pointe.

Tableau 5.1.05 : Augmentation moyenne des débits de pointe du bassin A en *Epoque Jaune*

Comparaison des estimations par régression et par doubles cumuls

bassin	augmentation moyenne des débits de pointe après défrichement en %	
	selon les pentes des doubles cumuls	selon les régressions crues > 20 l.s ⁻¹ .ha ⁻¹ en forêt naturelle
	%	% n crues
A	76	72 49

(*) gain = (Q sol nu obs. - Q forêt cal.) / Q forêt cal * 100

5.2 LE RECRU NATUREL : LES BASSINS D ET E

le recrû "naturel" (c'est à dire spontané, et non perturbé par l'action de l'homme), après exploitation papetière de la forêt primaire serait un scénario peu crédible dans beaucoup de régions intertropicales, où la pression foncière est très forte et où les axes de pénétration créés par l'exploitation sont aussitôt utilisés par des groupes agro-forestiers ou des individus isolés pour servir de tête de pont aux fronts pionniers. En Guyane, les conditions démographique et économiques rendent ce scénario du recrû naturel plus vraisemblable. Il est tout à fait plausible que si des dizaines de milliers d'hectares avaient été déforestés chaque année, comme cela avait été prévu au départ, une part importante de ces surfaces n'aurait pas fait l'objet d'une utilisation secondaire, et la repousse faiblement perturbée aurait été le lot d'une grande partie de ces espaces.

Le suivi hydrologique du recrû naturel sur bassin versant s'inscrit dans cette logique, mais, en préambule, l'hydrologue se doit de recommander que l'on considère les résultats de cette expérimentation avec une "intelligence" toute particulière. Il est manifeste que les conditions éco-physiologiques d'une trouée de 100 ou 200 mètres de diamètre, entourée de forêt primaire avec des houppiers de 50 à 60 mètres de haut, n'ont rien à voir avec celles d'un défrichement de plusieurs dizaines de milliers d'hectare d'un seul tenant, et que, par conséquent, la composition floristique du recrû et l'architecture de l'écosystème secondaire en vraie grandeur puissent être fort éloignées de la simulation sur bassin élémentaire. Les bouleversements écologiques ne peuvent pas être reproduits en modèle réduit, puisque leur extension en est précisément l'attribut dominant.

L'étude de la dynamique du recrû en Guyane, et à ECEREX en particulier, a fait l'objet d'un grand nombre de travaux : sur l'hectare central de la parcelle ARBOCEL (de Foresta, 1981 ; de Foresta, 1983 ; Sarrailh, 1983), le long de la trouée de la piste de St. Elie (Prévost, 1983) et sur toute la zone du projet ECEREX (Charles-Dominique, 1983).

En termes de caractéristiques hydro-pédologiques, les 2 bassins versants retenus, en l'occurrence D et E, sont les plus complexes du dispositif ECEREX (Cf. §.2.2.3.2).

Les sols du bassin D sont à drainage vertical en rive droite (60% de la surface du bassin), alors que le versant rive gauche est occupé par des sols à dynamique superficielle. Si le bassin D est mixte (juxtaposition de deux caractères différents), le bassin E est un objet pédologique hybride, qui selon la théorie de l'évolution des couvertures pédologiques se situe au stade II de l'évolution (Cf. figure 1.2.10). Ce stade correspond à la transformation d'une couverture de sols à drainage vertical en sols à dynamique latérale, qui se propage à partir des talwegs et qui remonte les interfluves. Le résultat en est que la partie amont peu ou pas touchée par la transformation est à drainage libre (57% du bassin), tandis que les parties basses sont le domaine des écoulements latéraux, internes et/ou superficiels. Globalement, les comportements des bassins sont très proches : sur la période d'évaluation commune du dispositif ECEREX en forêt naturelle (1978-1979), l'écoulement de crue a représenté 12,7% de la pluie sur E et 14,8% de celle-ci sur D. Les 2 bassins versants ont également des "sensibilités" hydrologiques comparables : en 1979, on dénombre 112 crues sur D et 117 crues sur E ; en 1978, ces mêmes chiffres sont de 80 crues sur D et de 71 crues sur E (Cf. tableau 3.3.01).

Initialement, deux types de recrûs devaient être testés, le recrû naturel brûlé et le recrû naturel non brûlé, après des traitements identiques et simultanés sur les 2 bassins versants consistant en une exploitation papetière suivie d'un défrichement agricole. L'historique de l'expérimentation permet de constater que ce protocole n'a pu être suivi (Cf. §3.1.2.1). L'abattage des arbres a commencé en mai 1980 sur D et E ; puis, par suite de l'indisponibilité du débusqueur, la sortie des grumes et le défrichement consécutif ont été faits sur le bassin D en septembre avec un seul et même engin à chenilles (Komatsu D85). Pour tenter de respecter le protocole initialement prévu, l'exploitation du bassin E a été différée et les arbres abattus sont restés sur place jusqu'en décembre, date à laquelle l'exploitation au débusqueur a été menée, après qu'un chenillard léger ait ouvert les pistes de halage. Mais, par suite de difficultés de l'entreprise adjudicataire du marché, c'est le défrichement agricole qui n'a pu être réalisé et le bassin est resté en l'état. Ce scénario correspond à une coupe papetière "simple", ou à une exploitation intensive de la forêt pour la production de grumes. Avec le recul, on peut penser que ce protocole inachevé pourrait être assez représentatif de la réalité d'une exploitation papetière en vraie grandeur. Après la sortie des grumes, ce bassin versant n'a plus subi aucune intervention.

Le bassin D était destiné à la simulation d'un recrû non brûlé, mais le feu, probablement allumé par des chasseurs, a ravagé la partie basse du bassin en septembre 1980. Là encore, il y a fort à parier que cette pratique serait assez fréquente en situation réelle.

5.2.1 LES ECOULEMENTS DE CRUE DU BASSIN D

Comme pour le bassin A, les 3 modes de prédiction des écoulements naturels ont été utilisés : corrélation par crue (Cf. tableau 3.3.10), corrélation par décennie (Cf. tableau 3.3.11) et pentes des doubles cumuls (figure 5.2.01). La reconstitution des écoulements totaux de crues sous forêt, et les gains d'écoulement superficiel par rapport à la forêt naturelle font l'objet du tableau 5.2.01.

Sur ce bassin D, le terme de l'*Epoque Rouge* se situe fin juillet 1981 (Cf. tableau 4.1.01). La période d'août à décembre, c'est à dire la saison sèche et le début de la saison des pluies, marque le début de l'*Epoque Jaune* sur ce bassin. Pendant cette période initiale peu arrosée, le total des écoulements observés est de 99 mm, ce qui représente un gain de 29 mm par rapport à la forêt naturelle selon les estimations par corrélation, ou de 49 mm selon les pentes des doubles cumuls. On enregistre donc des augmentations d'écoulement assez importantes immédiatement après le défrichement, comprises entre 40 % et 98 % selon l'estimateur choisi.

L'évolution ultérieure a été estimée globalement sur la période bi-annuelle 1982-83 (année N+2 et année N+3 après défrichement). Sur cette base de temps, les augmentations de l'écoulement total des crues par rapport à la forêt varient de 24 % (reconstitution crue par crue), à 34 % (doubles cumuls) et à 40 % (reconstitution par décennie).

On constate effectivement une réduction des effets hydrologiques à partir de la deuxième année, mais l'écoulement produit par un jeune recrû de 2 à 3 ans, après défrichement mécanisé reste encore bien supérieur à celui de la forêt naturelle.

Tableau 5.2.01 : Ecoulements Totaux de Crue du bassin D en *Epoque Jaune* (1980-83).
 Comparaison des écoulements observés et des écoulements calculés en forêt naturelle,
 selon différentes estimations.

Période	Ecoulements de Crue observés sous recrû (LeR mm)	Ecoulements de crue calculés sous forêt (LeF mm)	gain calculé (mm)	LeR / LeF	
1981 Août-déc.	99	Cor. Crue	70	29	1,40
		Cor. Dec.	71	28	1,39
		Dble Cum.	50	49	1,98
1982	525	Cor. Crue	398	127	1,32
		Cor. Dec.	369	156	1,42
		Dble Cum.	373	152	1,41
1983	421	Cor. Crue	362	59	1,16
		Cor. Dec.	309	112	1,36
		Dble Cum.	335	86	1,26
1982-83	946	Cor. Crue	760	192	1,24
		Cor. Dec.	678	268	1,40
		Dble Cum.	708	238	1,34

Au delà de la précision relative de ce diagnostic (le gain est compris entre 24% à 40%), deux faits s'imposent :

- En décomposant année par année les résultats fournis par chacune des 3 estimations, chaque méthode laisse apparaître une réduction sensible des excédents d'écoulement, quand on passe de l'année N+2 à l'année N+3 après le défrichement. Ainsi, toujours par comparaison avec la situation originelle du bassin versant, l'écoulement supplémentaire provoqué par l'expérimentation s'est réduit dans les proportions suivantes :
 - de 32% en 1982 à 16% en 1983 (corrélation par crue),
 - de 42% en 1982 à 36% en 1983 (corrélation par décade),
 - de 41% en 1982 à 26% en 1983 (pentes des doubles cumuls).
- On rappelle que ces gains, calculés avec les mêmes estimateurs calés en *Epoque Verte*, avaient été particulièrement élevés en *Epoque Rouge* sur ce bassin (année N+1 après défrichement), à savoir :
 - +170% par doubles cumuls et +104% par corrélation en *Epoque Rouge* (tableau 4.2.01),
 - +149% par doubles cumuls et +96% par corrélation en *Epoque Rouge stabilisée* (tableau 4.4.01),

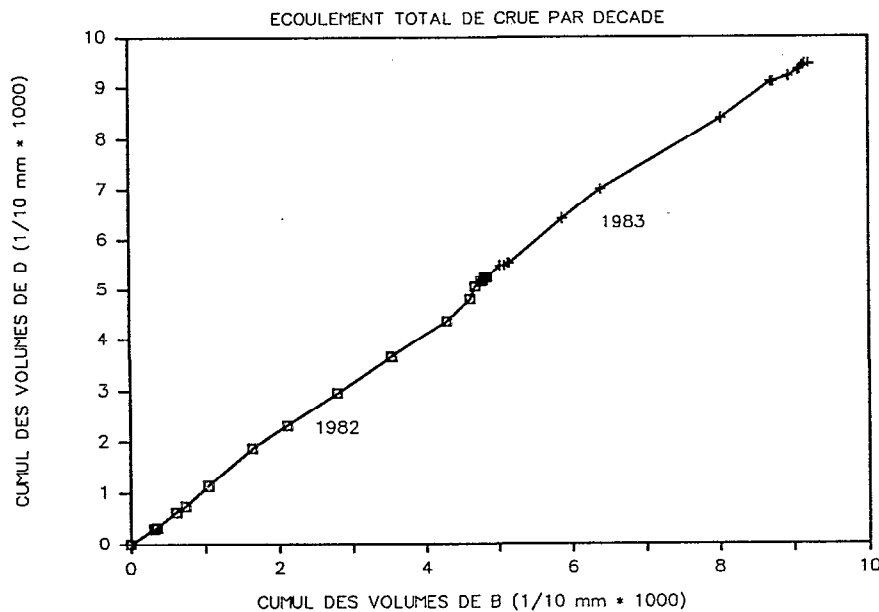


Figure 5.2.01 : Doubles cumuls des Ecoulements Totaux de Crue (ETC) du témoin B et du bassin D, discrétisés par décade, en *Epoque Jaune*. (janvier 1982 - décembre 1983)

On constate donc que les écoulements supplémentaires provoqués par l'expérimentation se résorbent très sensiblement au cours des 3 premières années qui suivent le défrichement. En prenant la moyenne entre les différentes estimations, on peut considérer que le gain est divisé approximativement par un facteur 2 lorsque l'on passe de l'année N+1 à l'année N+2, puis à nouveau par un facteur 2 entre l'année N+2 et l'année N+3.

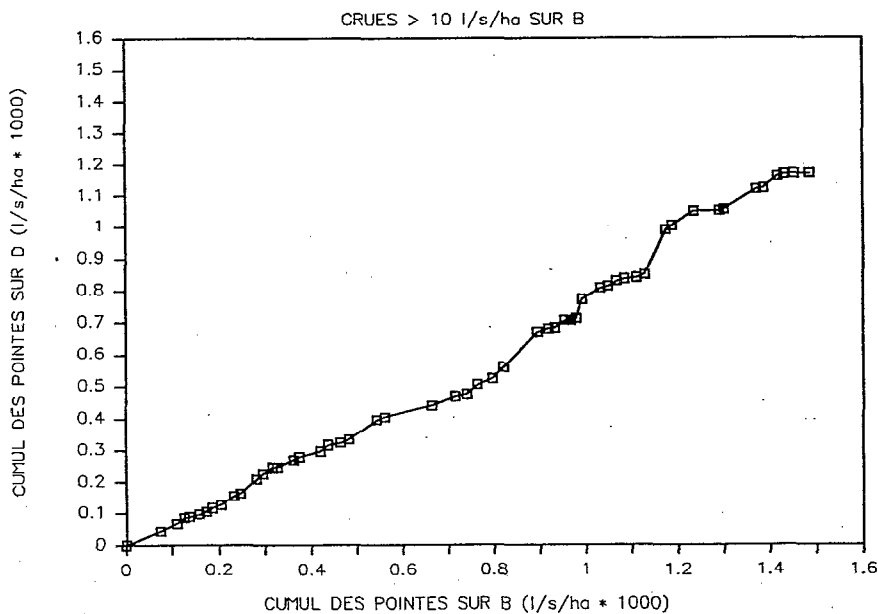
Le bassin D présentant des écoulements de crue faibles (15% de la pluie en forêt naturelle), ces facteurs adimensionnels de croissance s'appliquent à des lames écoulées modestes : +244 mm en *Epoque Rouge*, +127 mm en 1982 (année N+2) et +59 mm en 1983 (année N+3, estimation par corrélation crue par crue pour les 3 cas cités)

5.2.2 LES DÉBITS DE POINTE DU BASSIN D

L'inventaire des débits maximums instantanés et du nombre de crues en *Epoque Jaune* fait l'objet du tableau 5.2.02. Ces débits ne sont pas exceptionnels pour ce bassin, et à rang égal, ils sont inférieurs à ceux que l'on avait pu observer en *Epoque Verte* (Cf. tableau 4.5.04)

Tableau 5.2.02 : Débits de pointe du bassin D en *Epoque Jaune*, en $l.s^{-1}.ha^{-1}$

Bassin versant	D
5 plus fortes crues	
1	140
2	120
3	111
4	64,2
5	62,4
Nombre de crues	
$\geq 100 l.s^{-1}.ha^{-1}$	3
$\geq 75 l.s^{-1}.ha^{-1}$	3
$\geq 50 l.s^{-1}.ha^{-1}$	6
$\geq 25 l.s^{-1}.ha^{-1}$	18
$\geq 10 l.s^{-1}.ha^{-1}$	39

Figure 5.2.02 : Doubles cumuls des débits de pointe du témoin B et du bassin D en *Epoque Jaune*.

crues de plus de $20 l.s^{-1}.ha^{-1}$ sur le témoin - valeur de la pente = 0,787

Le tracé perturbé de la courbe des doubles cumuls des débits de pointe sur D et B (crues de plus de $20 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ sur le témoin) met en évidence les faiblesses de l'appariement D_B qui avaient déjà été évoquées à propos de l'étude des pointes en *Epoque Rouge* (Cf. doubles cumuls des *Epoques Verte et Rouge* en figure 4.5.08). Si l'on considère la valeur de la pente moyenne sur l'*Epoque Jaune* (0,79), et que l'on rapporte celle-ci à la valeur de l'*Epoque Verte* (0,78), on conclut qu'il n'y a pas de différence entre les maximums instantanés de la forêt naturelle et du recrû, au cours des années N+2 et N+3 après défrichement..., à moins que les performances du procédé soient insuffisantes pour mettre ce changement en évidence.

L'autre option d'évaluation consiste à reconstituer les pointes à partir de la régression par crues appariées (tableau 4.5.06 et figure 4.5.06), en suivant le même cheminement que celui adopté en *Epoque Rouge*, et explicitée au § 4.5.3, à savoir :

- calcul des augmentations par rapport à la prédiction de la valeur centrale des pointes en forêt,
- calcul des augmentations par rapport à la prédiction de la valeur Q_{95} des pointes en forêt.

Les résultats font l'objet des tableaux 5.2.03 (référence à la valeur centrale) et 5.2.04 (référence à la valeur Q_{95}) et de la figure 5.2.03.

Tableau 5.2.03 : Augmentation des débits de pointe du bassin D par rapport à la forêt naturelle en *Epoque Jaune*

Estimation des gains* par rapport à la prédiction de la valeur centrale du débit de pointe en forêt

bassin	toutes crues				crues observées > $20 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$			
	moyenne :	nombre :	nombre et % de crues		moyenne :	nombre :	nombre et % de crues	
	des gains :	de crues :	avec gain positif		des gains :	de crues :	avec gain positif	
	en % :	n :	n' %		en % :	n :	n' %	
D	5	52	21 40 %		71	19	14 74 %	

Tableau 5.2.04 : Augmentation des débits de pointe du bassin D par rapport à la forêt naturelle en *Epoque Jaune*

Estimation des gains* par rapport à la prédiction "haute" des débits de pointe en forêt (Q_{95}), correspondant à la fréquence au non-dépassement $F = 0,95$

bassin	toutes crues				crues observées > $20 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$			
	moyenne :	nombre :	nombre et % de crues		moyenne :	nombre :	nombre et % de crues	
	des gains :	de crues :	avec gain positif		des gains :	de crues :	avec gain positif	
	en % :	n :	n' %		en % :	n :	n' %	
D	-64,5	52	3 6 %		-201	19	3 16 %	

(*) gain = $(Q_{\text{sol nu obs.}} - Q_{\text{forêt cal.}}) / Q_{\text{forêt cal.}} * 100$

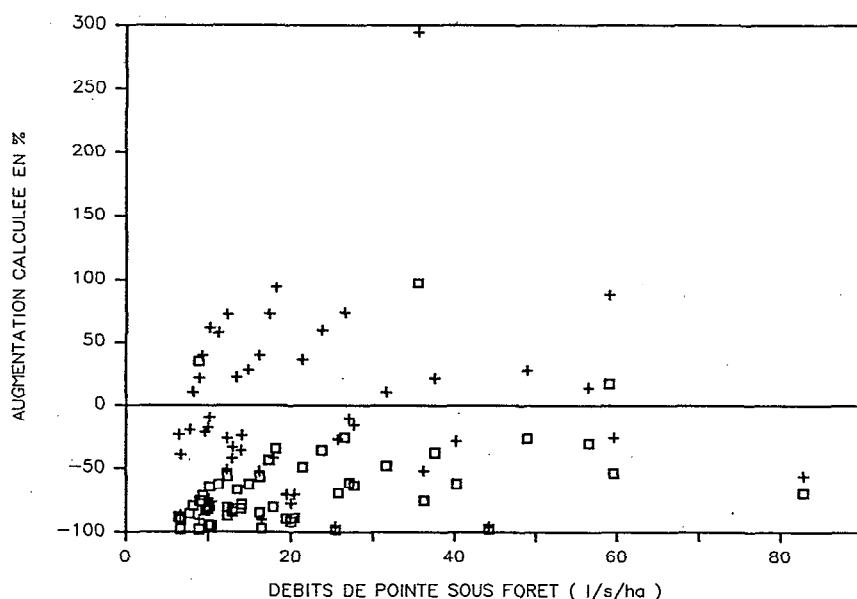


Figure 5.2.03 : Augmentation des débits de pointe sur le bassin D en *Epoque Jaune*,
à partir des corrélations avec le témoin B
valeurs en %, rapportées au débit sous forêt

"+" : estimation par rapport à la prédiction de la valeur centrale des débits sous forêt

"■ blanc" : estimation par rapport à la prédiction Q95 (débit de la fréquence au non-dépassement F=0,95)

La figure 5.2.03 montre que la distribution des gains, calculés crue par crue par rapport à la moyenne de la prédiction sous forêt, est pratiquement symétrique à la valeur zéro (symbole "+"), et de fait, selon le décompte du tableau 5.2.03, la moyenne des gains n'est que de +5%, et seulement 40% de ceux-ci sont positifs. Ces chiffres confortent les résultats obtenus par les doubles cumuls, à savoir qu'en moyenne les conditions d'un jeune recrû n'exercent pas de majoration significative sur les pointes de crue.

Toutefois, la prise en compte des seules crues moyennes et fortes (supérieures à $20 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$) amène à un gain moyen de 71%, qui s'applique à 74% des crues sélectionnées (tableau 5.2.03). En notre âme et conscience d'hydrologue, il nous serait difficile d'affirmer au gestionnaire d'un ouvrage situé à l'aval d'un bassin versant en recrû qu'il n'y aurait plus aucun risque, à partir de la deuxième année, d'avoir la crue de projet majorée, par rapport à la prévision qui en avait été faite en forêt naturelle ! Cette prudence est d'autant plus fondée quand on sait que la plus forte crue observée en *Epoque Jaune* sur ce bassin ($140 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$) correspond à un gain calculé de 294% par rapport à la forêt. Cette pointe est celle d'une crue complexe et très longue (temps de base de 1130 minutes, ce qui est exceptionnel à ECEREX), provoquée par une épisode pluvieux de 104 mm (90 mm sur le témoin). De telles conditions ont certainement épuisé la capacité de tamponnement du recrû et "bénéficié" de la péjoration des caractéristiques pédologiques provoquée par les engins, dont il a maintes fois été question en quatrième partie. Il est donc prudent d'admettre, que lorsqu'un milieu naturel a été fortement

traumatisé, il en reste toujours quelque chose, et qu'un retour au calme en conditions moyennes n'est pas forcément synonyme d'une récupération complète de l'écosystème.

Le calcul des gains par rapport à la prédiction de Q_{95} ne remet pas en cause toutes ces considérations : la moyenne des gains est largement négative (tableau 5.2.04), et cela quel que soit l'échantillon (toutes crues, ou crues observées de plus de $20 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$). Les augmentations avec Q_{95} ne sont significatives pour 3 crues seulement... dont la crue de $140 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ précédemment évoquée qui serait 1,97 fois plus forte qu'en forêt naturelle.

5.2.3 LES ECOULEMENTS DE CRUE DU BASSIN E

Par différence avec les bassins étudiés précédemment, le bassin E n'a pas connu d'*Epoque Rouge*, puisque le sol n'a jamais été mis à nu par un défrichement agricole. Dans le dispositif ECEREX, c'est le bassin versant qui a conservé le plus fort taux de couverture après manipulation, que celle-ci soit composée de phytomasse vivante ou de débris. Ce taux de couverture est bien plus élevé par exemple, que celui du bassin I voué à l'agriculture traditionnelle et qui a été nettoyé par le brûlis, ce qui n'a jamais été le cas sur E. Le traitement de ce bassin versant n'en a pas moins été sévère, puisque l'abattage à la scie à chaîne, normalement réservé aux arbres de plus de 40 cm de diamètre, a touché beaucoup de tiges de diamètres inférieurs pour faciliter le débardage ultérieur (Sarrahil, comm. personnelle).

Cette coupe a eu lieu en mai 1980, puis le bassin est resté en l'état jusqu'en janvier 1981. La période de juin à décembre 1980 est assez peu arrosée, mais il sera intéressant de vérifier si un quelconque changement du comportement hydrologique est décelable dans cette situation.

L'intervention suivante (exploitation au débusqueur à pneus, en janvier 1981) a été menée de manière particulièrement ferme et, selon notre appréciation, les pistes de débardage ont été ouvertes sans souci particulier de minimiser l'impact de l'opération, mais plutôt avec l'objectif de faciliter au maximum le confort de l'exploitant. Néanmoins, la caractéristique essentielle de cette expérimentation sur le bassin E vis à vis des traitements mécanisés de tous les autres bassins, est que les souches et tout le système racinaire sont restés en place.

Les effets du traitement, estimés par les 3 prédicteurs habituels, sont présentés dans le tableau 5.2.05, c'est à dire :

- reconstitution des écoulements sous forêt par corrélation crue par crue (voir paramètres dans le tableau 3.3.10),
- reconstitution des écoulements sous forêt par corrélation par décade (voir paramètres dans le tableau 3.3.11),
- reconstitution des écoulements sous forêt par pentes des doubles cumuls (figure 5.2.04)

Tableau 5.2.05 : Ecoulements Totaux de Crue du bassin E en *Epoque Jaune* (1980-83)

Comparaison des écoulements observés et des écoulements calculés en forêt naturelle, selon différentes estimations.

Période	Écoulements de Crue observés sous recrû (LeR mm)	Écoulements de crue calculés sous forêt (LeF mm)	gain calculé (mm)	LeR / LeF
1980 juin-déc.	96	Cor. Crue 92	4	1,04
		Cor. Dec. 99	-3	0,97
		Dble Cum. 92	4	1,04
1981	294	Cor. Crue 234	60	1,26
		Cor. Dec. 252	42	1,17
		Dble Cum. 202	92	1,46
1982	314	Cor. Crue 308	6	1,02
		Cor. Dec. 305	9	1,03
		Dble Cum. 328	-14	0,96
1983	275	Cor. Crue 292	-17	0,94
		Cor. Dec. 277	-2	0,99
		Dble Cum. 294	-19	0,94
1982-83	589	Cor. Crue 600	-11	0,98
		Cor. Dec. 582	7	1,01
		Dble Cum. 622	-33	0,95

En considérant la période initiale de l'expérimentation (de juin à décembre 1980), aucune différence significative avec l'écoulement en forêt ne peut être mise en évidence, et cela quel que soit le mode de prédiction utilisé. En particulier, la valeur de la pente des doubles cumuls des écoulements de crue du bassin avec le témoin B pendant cette période ($E/B = 0,71$) est tout à fait comparable à celle de la *Epoque Verte* ($E/B = 0,68$). **L'abattage de la plupart des arbres n'a donc pas eu de conséquences hydrologiques sensibles pendant cette période peu humide** (pendant laquelle le volume de la plus forte de crue n'est que de 22 mm, et 3 crues seulement dépassent 10 mm).

Pendant l'année qui suit l'exploitation (1981), les écoulements sont en augmentation par rapport à la situation *Verte* et, selon la valeur adoptée pour la reconstitution des débits sous forêt, les gains calculés vont de 42 mm (soit +17%) à 92 mm (soit +46%). Pour la prédiction faite à partir de la corrélation crue par crue, on a calculé les valeurs de l'écoulement de l'année 1981 aux bornes de l'intervalle de confiance à 90%. Ces valeurs limites sont de 234 mm +/- 19 mm : le gain calculé est bien significativement différent de zéro (valeur centrale = 60 mm, valeur basse de l'intervalle 90% = 41 mm).

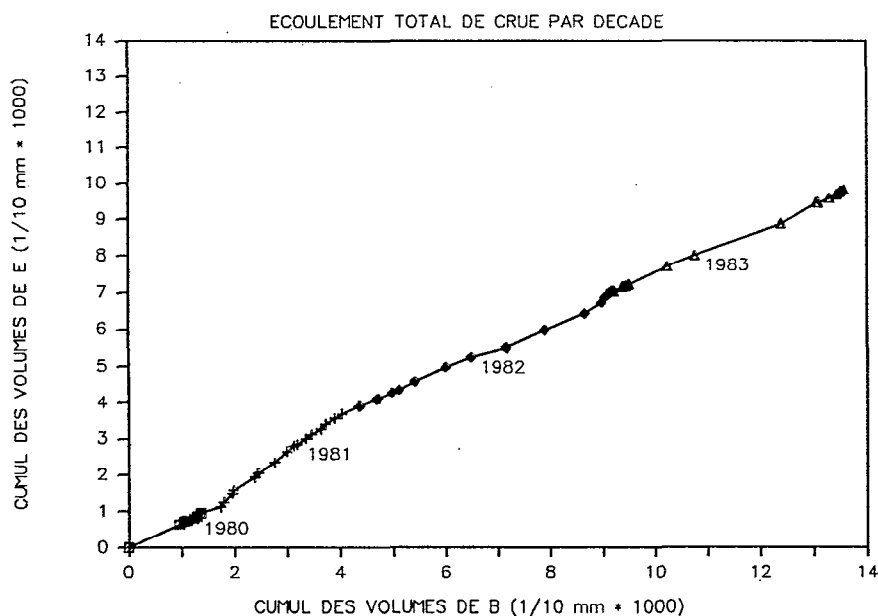


Figure 5.2.04 : Doubles cumuls des Ecoulements Totaux de Crue (ETC) du témoin B et du bassin E, discrétisés par décade, en *Epoque Jaune*. (juin 1980 - décembre 1983)

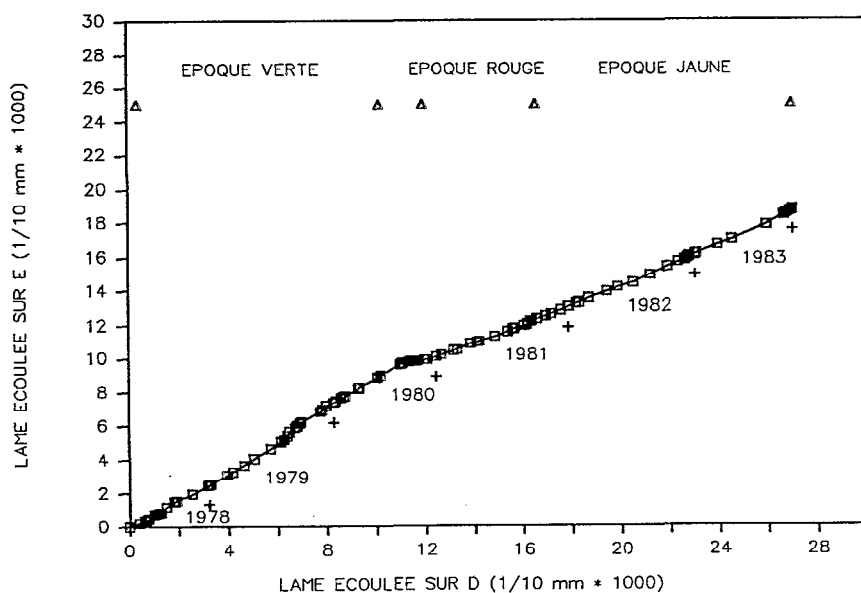


Figure 5.2.05 : Doubles cumuls des Ecoulements Totaux de Crue (ETC) du bassin D et du bassin E, discrétisés par décade, sur toute la durée de l'expérimentation (juin 1978 - décembre 1983)

Cette augmentation des écoulements s'estompe les années suivantes (1982 et 1983), au point qu'en 1983 les écoulements observés sont inférieurs aux écoulements calculés sous forêt naturelle, et cela avec chacun des prédicteurs (tableau 5.2.05). Sur l'ensemble de la période 1982-1983 (année N+2 et année N+3 après traitement), les rapports des écoulements de crue du recrû et de la forêt oscillent entre 0,95 et 1,01, ce qui représente des écarts absolus compris entre -33 mm et +7 mm sur un total écoulé de 589 mm. On retrouve là une situation typique, maintes fois décrite dans la littérature, à savoir que les effets de l'exploitation forestière *stricto sensu* sur la production hydrologique sont limités et peu rémanents. ("*ordinary forest cover manipulations have minor effects on storm flows*" : Hewlett, 1982). Dans le cas du bassin E, cette assertion a d'autant plus de poids, qu'on a mis en évidence que les bassins versants les moins productifs en forêt naturelle étaient les plus sensibles aux manipulations, et qu'ils réalisaient des gains relatifs très élevés, même si les écoulements supplémentaires générés par le traitement étaient modestes en valeur absolue (Cf. comportement et gains relatifs après défrichement des bassins C et D, à fort pourcentage de sols à drainage vertical, tableaux 4.2.01, 4.4.03).

5.2.4 COMPARAISON DES ECOULEMENTS DE D ET E

Le bassin D constitue une référence comparative précieuse pour ce bassin E, car en milieu forestier naturel, les conditions hydro-pédologiques créent une convergence du comportement hydrologique de ces 2 bassins. Or l'étude des écoulements de ce bassin D avait abouti à la conclusion que l'écoulement d'un jeune recrû était bien supérieur à celui de la forêt naturelle en années N+2 et N+3 (en l'occurrence de +24% à +40%, Cf. § 5.2.1).

La courbe des doubles cumuls des écoulements de crue de D (en abscisses) avec les lames écoulées respectives de E (en ordonnées) sur toute la période 1978-1983 met en évidence le parallélisme des comportements des 2 bassins en *Epoque Verte* (figure 5.3.05). Dans cette situation originelle, le rapport des écoulements E/D est égal à 0,88. Ce rapport passe à 0,52 pendant l'*Epoque Rouge* du bassin D, puis à 0,62 pendant la période 1981-1982 de l'*Epoque Jaune* de ce même bassin.

En exploitant le caractère de proche parenté hydro-pédologique de ces 2 bassins, et en admettant que les comportements relatifs originels de ces deux bassins eussent été inchangés si les traitements avaient été semblables, il est possible d'estimer l'effet différentiel entre D et E, imputable au traitement. L'aboutissement de cette démarche est la suivante :

Epoque Rouge du bassin D (décembre 1980 - juillet 1981)

- lame observée sur D (1) :	489 mm
- lame observée sur E (2) :	252 mm
- lame calculée sur E si même traitement que D (3) :	430 mm (= (1) * 0,88)
- effet différentiel des traitements (4) = (3)-(2) :	-178 mm (-41 %, = (4)/(3)*100)

Epoque Jaune du bassin D (période janvier 1982 - décembre 1983)

- lame observée sur D (1) :	947 mm
- lame observée sur E (2) :	589 mm
- lame calculée sur E si même traitement que D (3) :	833 mm (= (1) * 0,88)
- effet différentiel des traitements (4) = (3)-(2) :	-244 mm (-29 %, = (4)/(3)*100)

Selon ces estimations, en prenant le traitement du bassin D comme modèle, le protocole expérimental appliqué au bassin E s'est traduit par des écoulements bien inférieurs : -41% en *Epoque Rouge* et un déficit persistant de -29% au cours des années N+2 et N+3 après traitement. Comparé au bassin D, le comportement du bassin E est toujours resté plus proche de l'état naturel, et après 3 ans, l'écart entre les 2 unités est loin d'être résorbé.

Ces différences tiennent évidemment à celles des protocoles expérimentaux : le bassin D a été exploité, puis défriché dans les conditions les plus favorables de ce scénario (traitement avec engin à chenilles uniquement, et en saison sèche). Le bassin E a subi une exploitation forestière "dure", avec débardage au débusqueur articulé, en petite saison des pluies. Pourtant, en intensité comme en durée, le bassin E apparaît beaucoup moins traumatisé au plan hydrologique. C'est évidemment le facteur sol qui est déterminant dans cette différenciation. Le sol du bassin E a été tassé localement sur les pistes de halage et aux points de manoeuvre (soit sur environ 10% de la surface du bassin), mais par contre les souches n'ont pas été arrachées, et sur la plus grande partie du bassin versant, les caractéristiques hydrodynamiques des sols ont été faiblement dégradées. D'autre part, en terme de couverture végétale, les houppiers et les petits arbres abattus ont protégé le sol, la strate intermédiaire (palmiers) est restée vivante, et le recrû s'est développé à partir d'une situation fort éloignée au plan éco-physiologique de l'état "zéro" du bassin D.

Il va sans dire que cette appréciation du moindre mal concerne strictement la production hydrologique, et n'a aucune connotation particulière vis-à-vis de la composition floristique ou de la qualité architecturale du recrû forestier de ce bassin versant.

5.2.5 LES DEBITS DE POINTE DU BASSIN E

L'inventaire des plus forts débits de pointe enregistrés sur le bassin E en *Epoque Jaune* (de janvier 1981 à décembre 1983) s'établit comme suit (tableau 5.2.06) :

Tableau 5.2.06 : Débits de pointe du bassin E en *Epoque Jaune*, en $l.s^{-1}.ha^{-1}$

Bassin versant	E
5 plus fortes crues	
1	94,8
2	61,2
3	57,5
4	52,1
5	50,8
Nombre de crues	
$\geq 100 l.s^{-1}.ha^{-1}$	0
$\geq 75 l.s^{-1}.ha^{-1}$	1
$\geq 50 l.s^{-1}.ha^{-1}$	5
$\geq 25 l.s^{-1}.ha^{-1}$	21
$\geq 10 l.s^{-1}.ha^{-1}$	51

La corrélation entre débits de pointe du bassin expérimental et du témoin B est peu satisfaisante lorsque le bassin expérimental possède un fort pourcentage de sols à drainage vertical. La raison de cette dispersion tient à l'assimilation implicite entre "dynamique verticale" et "fonctionnement hortonien" : en règle générale, ces bassins ont des débits de pointe bien inférieurs à ceux du témoin, mais au terme d'épisodes pluvieux particulièrement abondants, ces débits peuvent atteindre des niveaux comparables, voire supérieurs à ceux des bassins à dynamique latérale du type B. Ce fait que nous avons déjà évoqué à propos de l'étude des pointes du bassin D (Cf. § 5.2.2), se renouvelle sur le bassin E. En l'occurrence, la corrélation des débits de pointe de ce bassin E avec le témoin en *Epoque Verte* explique à peine 63 % de la variance des pointes sur E ; l'expression analytique en est :

$$Q_{\max}E = 0,644 * Q_{\max}B - 3,58 \quad n = 78 \quad r^2 = 0,628 \quad (Q_{\max} \text{ en l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1})$$

C'est donc un prédicteur assez médiocre que nous serons contraint d'utiliser pour l'étude des pointes de crue du bassin E en *Epoque Jaune*.

L'évolution des débits de pointe, calculée à partir de cette régression d'*Epoque Verte*, est présentée dans les tableaux ci-après :

- tableau 5.2.07 : calcul des modifications par rapport à la prédiction de la valeur centrale du débit naturel,
- tableau 5.2.08 : calcul des modifications par rapport à la prédiction Q_{95} du débit naturel.

L'étude des écoulements précédemment conduite ayant mis en évidence l'existence de 2 périodes fonctionnelles distinctes en *Epoque Jaune*, cette différenciation a été maintenue pour l'étude des débits de pointe. On a donc conduit séparément l'analyse des données de l'année 1981, qui suit l'exploitation mécanisée, de celles de la période 1982-1983.

Les figures 5.2.06 et 5.2.07 présentent la répartition des modifications des débits de pointe pendant ces 2 périodes, calculées respectivement par rapport à la moyenne de la prédiction des pointes en forêt, et par rapport à l'espérance de la prédiction "haute" du débit en forêt (Q_{95}), correspondant à la fréquence au non-dépassement $F = 0,95$.

Tableau 5.2.07 : Augmentation des débits de pointe du bassin E par rapport à la forêt naturelle en *Epoque Jaune*

Estimation des gains* par rapport à la prédiction de la valeur centrale du débit de pointe en forêt

bassin E	toutes crues				crues observées > 20 l.s ⁻¹ .ha ⁻¹			
	moyenne :		nombre et % de crues		moyenne :		nombre et % de crues	
	des gains:	de crues :	avec gain positif	%	des gains:	de crues :	avec gain positif	%
	en % :	n	n'	%	en % :	n	n'	%
1981	20,2	20	10	50 %	60,0	10	8	80 %
1982-83	-29,2	46	11	24 %	17,0	15	10	67 %

(*) gain = (Q sol nu obs. - Q forêt cal.) / Q forêt cal * 100

- **En 1981,**

50% de l'ensemble des crues du bassin expérimental ont eu des débits de pointe plus élevés que la prédiction de la moyenne en forêt naturelle (tableau 5.2.07). Cette proportion passe à 80% en réduisant le dénombrement aux crues moyennes et fortes (pointes de plus de 20 l.s.⁻¹ha⁻¹), mais l'échantillon est alors réduit à 8 événements seulement. Dans les deux cas, la moyenne des gains calculés est largement positive : +20% (toutes crues) et +60% (crues > 20 l.s.⁻¹ha⁻¹). Ces résultats et leur représentation graphique (figure 5.2.06) suggèrent que l'exploitation forestière intensive menée sur ce bassin est loin d'être sans effets sur les débits de pointe, et que dans certaines conditions, ces débits peuvent dépasser leurs valeurs naturelles de 50 à 100%.

L'utilisation de la référence Q₉₅ (tableau 5.2.08) conduit à un diagnostic sévère, rançon d'une tentative de mise en évidence d'un phénomène hydrologique moins accentué que sur les autres bassins, et que l'on est contraint d'estimer avec un algorithme peu précis : la moyenne des gains est inférieure à zéro, aussi bien sur l'échantillon total (-42,7%) que sur l'échantillon tronqué (-18,5%) ; 4 crues seulement ont des débits plus élevés qu'en forêt et les gains sont faibles, compris entre 0 et 20% (figure 5.2.06).

- **En 1982-1983,**

une appréciation assez claire de la situation est fournie par la figure 5.2.07. Pour la majorité des crues, les débits de pointe sous recrû seraient plus faibles que sous forêt : 11 crues seulement sur 46 (soit 24%) ont vu leur débit maximum augmenté, et la moyenne générale des gains (-66,3%) est inférieure à zéro (tableau 5.2.07). La quasi-totalité des crues avec gain positif, soit 10 événements sur 11, correspondent à des pointes ayant dépassé 20 l.s.⁻¹ha⁻¹, mais il faut noter que sur cet échantillon tronqué, le gain moyen est faible (+17%).

En référence à Q₉₅, le diagnostic est libre de toute ambiguïté : il n'y a pas un seul cas avec un gain effectif du débit de pointe.

Tableau 5.2.08 : Augmentation des débits de pointe du bassin E par rapport à la forêt naturelle en *Epoque Jaune*

Estimation des gains* par rapport à la prédiction "haute" des débits de pointe en forêt (Q₉₅),
correspondant à la fréquence au non-dépassement F = 0,95

bassin E	toutes crues				crues observées > 20 l.s. ⁻¹ .ha ⁻¹			
	moyenne :	nombre :	nombre et % de crues :		moyenne :	nombre :	nombre et % de crues :	
	des gains :	de crues :	avec gain positif :		des gains :	de crues :	avec gain positif :	
	en % :	n :	n' :	% :	en % :	n :	n' :	% :
1981	-42,7	20	4	20 %	-18,5	10	4	40 %
1982-83	-66,3	46	4	9 %	-38,1	15	0	0 %

(*) gain = (Q sol nu obs. - Q forêt cal.) / Q forêt cal * 100

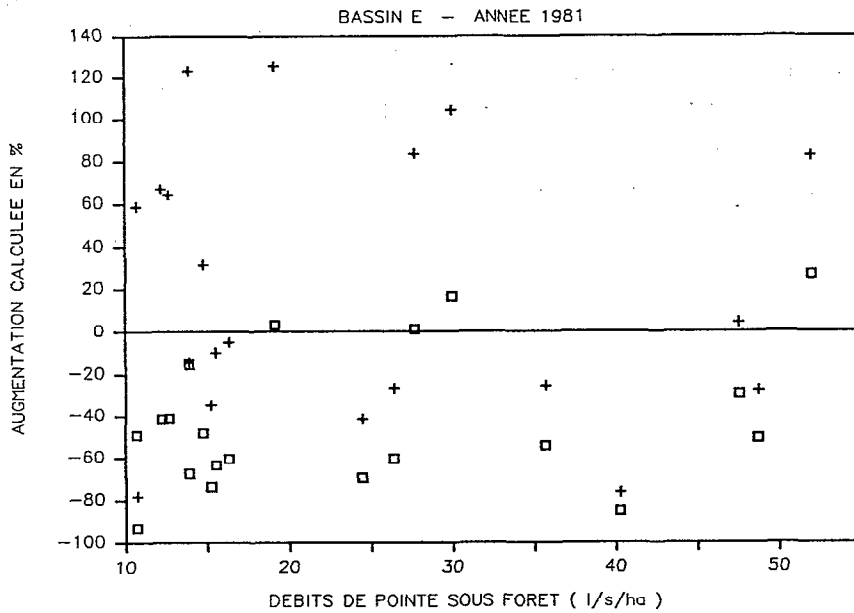


Figure 5.2.06 : Augmentation des débits de pointe sur le bassin E en *Epoque Jaune*, année 1981, à partir des corrélations avec le témoin B
valeurs en %, rapportées au débit sous forêt

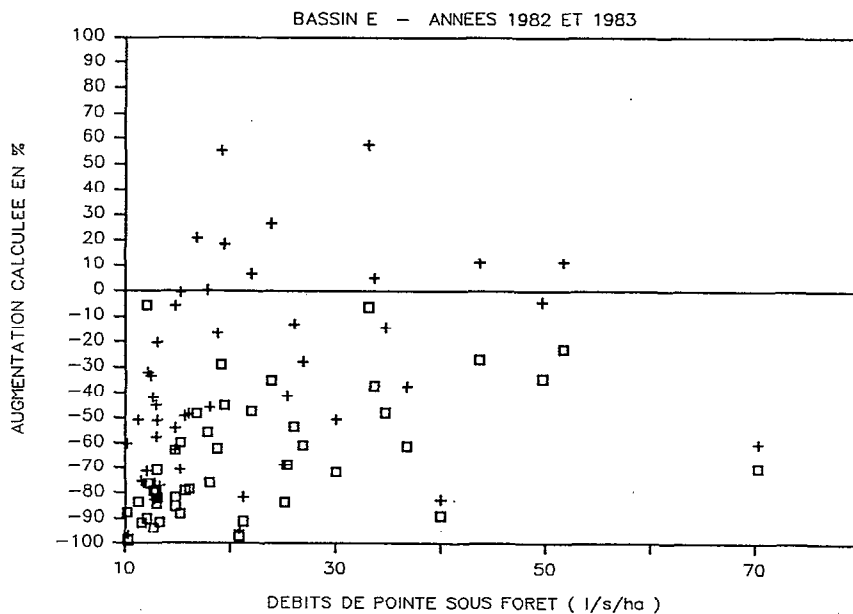


Figure 5.2.07 : Augmentation des débits de pointe sur le bassin E en *Epoque Jaune*, années 1982-1983, à partir des corrélations avec le témoin B
valeurs en %, rapportées au débit sous forêt

"+" : estimation par rapport à la prédiction de la valeur centrale des débits sous forêt

"■ blanc" : estimation par rapport à la prédiction Q_{95} (débit de la fréquence au non-dépassement $F=0,95$)

Les résultats de cette période 1982-1983 nous renvoient vers un contexte de "déjà-vu", à l'occasion de la revue bibliographique relative à l'effet de la couverture végétale sur les débits de pointe (Cf. § 4.5.3). Dans un nombre important d'expérimentations menées sur bassins élémentaires ou petits bassins versants, l'alliance de la stricte rigueur anglo-saxonne et de la sécheresse implacable des tests statistiques avait amené à conclure que les débits de pointe n'étaient pas influencés à la hausse de façon significative et durable par l'exploitation forestière. Nos résultats expérimentaux nous amènent à souscrire à ces conclusions, avec un certain risque. Ce risque, représenté par les symboles "+" correspondant à des valeurs positives de gain sur la figure 5.2.07, est minime ; on constate que ces points sont peu nombreux, et que les gains sont modestes, ceux-ci restant inférieurs à 10% pour les crues moyennes et fortes.

Dés lors, on ne craindra pas d'affirmer que dans nos conditions expérimentales, les débits de pointe d'un bassin en recrû naturel pendant les années N+2 et N+3 après exploitation, ne sont pas significativement différents de ceux qui prévalaient en couverture de forêt primaire. On rappelle que l'exploitation de ce bassin a consisté à couper à la scie à chaîne la plupart des "arbres" (tiges de plus de 10 cm de diamètre), puis à façonner *in situ* les troncs de plus de 40 cm de diamètre en grumes. Ces grumes ont été exportées vers la périphérie du bassin par un tracteur à pneus, alors que le reste de la biomasse et les débris étaient abandonnés sur place.

La courbe des doubles cumuls des débits de pointe du bassin E et du témoin B (figure 5.2.08) met en évidence les différences de comportements du bassin expérimental entre l'année 1981 et les années 1982-83.

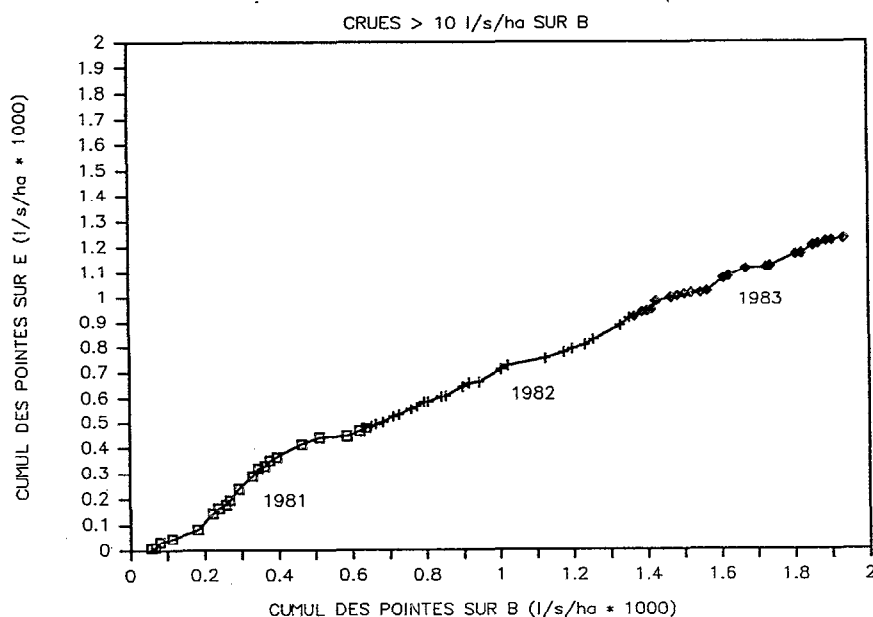


Figure 5.2.08 : Doubles cumuls des débits de pointe du témoin B et du bassin E en *Epoque Jaune*.

crues de plus de $20 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ sur le témoin - valeur de la pente en 1982-83 = 0,58

5.3 LA SYLVICULTURE A CROISSANCE RAPIDE : LES BASSINS G ET H

La sylviculture d'essences à croissance rapide est un objectif indissociable de la pérennité d'une filière papetière d'envergure. Il est en effet inconcevable d'implanter un tel complexe en puisant indéfiniment dans la ressource naturelle primaire. Par ailleurs, outre le fait que l'apport de résineux est généralement requis pour la fabrication de la pâte à papier, l'exploitation de plantations mono-spécifiques dans lesquelles tous les bois présentent les mêmes caractéristiques, en dimension et en propriétés mécaniques, s'avère à la longue plus rentable que celle d'un milieu naturel, diversifié à l'extrême. Les considérations éthiques et les impératifs techniques se rejoignent ainsi pour justifier ce scénario de la sylviculture d'essences à croissance rapide.

Pour atteindre ces objectifs en situation réelle, il faut considérer que ces plantations couvriraient des zones étendues, et qu'elles seraient donc amenées à utiliser largement le domaine pédologique à dynamique superficielle et latérale, qui est le plus largement représenté dans la région. D'autre part, il paraissait pertinent de réserver les lambeaux de sols à dynamique verticale et à potentialités agronomiques favorables aux spéculations à fort revenu (arboriculture fruitière par exemple). Dans l'esprit des promoteurs du Projet, la sylviculture devait donc être testée dans les conditions pédologiques les plus sévères, c'est à dire sur des bassins à dynamique latérale très marquée et à nappe affleurante. De surcroît, pour se placer dans les conditions les plus rudes possibles, il avait été convenu que l'exploitation et le défrichement seraient faits en saison des pluies.

Les espèces sylvicoles testées ont été le pin caraïbe (*Pinus caraiïbea*, variété *hondurensis*) sur le bassin G et un Eucalyptus de Malaisie bien adapté aux climats humides et dont la productivité était prometteuse (*E. urophylla*, provenance Flores).

Les bassins G et H, appariés avec le témoin F, ont été voués à cette expérimentation. Les écoulements de ces 2 bassins en *Epoque Verte* étaient très proches, et les plus élevés parmi les 8 bassins expérimentaux (Cf. § 2.4.1.3, figure 2.4.01 et tableau 2.4.02) : les coefficients interannuels d'écoulement des crues de G (29,9%) et de H (34,4%) encadrent la valeur correspondante du témoin F (34,1%). On a constaté que les appariements G_F et H_F étaient excellents, et que les régressions calées en milieu naturel sur les volumes écoulés et les débits de pointe constituaient les prédicteurs les plus sensibles et les plus précis du dispositif ECEREX. Cette gémellité fonctionnelle de F, G et H aurait permis de comparer avec précision le comportement de 2 bassins versants pour lesquels la différence essentielle eut été l'espèce sylvicole plantée, à savoir pin et eucalyptus. Les contraintes de l'expérimentation ont introduit involontairement 2 différenciations qui ont fait perdre le degré de liberté dont on disposait pour cette analyse :

- En phase de défrichement (saison des pluies), la partie basse du bassin n'a pu être traitée "proprement" par le chenillard. A cause de la nappe, il était impossible au tracteur de s'approcher à moins d'une vingtaine de mètres du ruisseau et de reprendre les troncs, les racines et les volumes de terres qui avaient été poussés plus bas au cours des manoeuvres antérieures. En conséquence, la zone du talweg du bassin H s'est trouvée enserrée par un barrage filtrant dont les effets seront tout à fait sensibles dans les régimes hydrologiques *Rouge et Jaune* de H comparés à ceux de G. Cette variante dans le défrichement n'est pas exceptionnelle et on la trouve décrite dans maints scénarios d'exploitation forestière en régions tropicales humides. Par exemple, Pearce et al. (1980) font remarquer que "une zone de protection des

rives, non coupée de 20 m de largeur de chaque côté du ruisseau, n'a pas été exploitée. Cette zone non déboisée occupe 25% du bassin versant". Sur H, la zone non traitée par le chenillard représente 19% de la surface totale du bassin. En fait, en dehors de toutes considérations de protection de l'environnement, nous avons pu constater qu'il était techniquement très difficile et économiquement non rentable d'engager des engins de 25 tonnes dans les bas-fonds en saison des pluies.

- Comme prévu, la plantation des pins a suivi de peu le défrichement (mise en terre de 1600 Fertil-Pot, du 20 au 26 mai 1981). Par contre, les semis d'eucalyptus ayant été ravagés par des prédateurs (fourmis), la mise en route immédiate d'un nouveau cycle de semis aurait amené à faire la plantation sur le bassin en saison sèche. Il a donc fallu attendre jusqu'à la saison des pluies suivante, en l'occurrence jusqu'en février 1982, pour commencer la plantation.

Il est évidemment prématuré de prétendre caractériser définitivement les aménagements sylvicoles avec les données de 1982 et 1983, qui représentent les années 2 et 3 après la plantation des pins, et les années 1 et 2 après la plantation des eucalyptus. On s'emploiera néanmoins à déceler, sur cette période, l'amorce d'un effet de ces plantations sur l'écoulement et les pointes de crue.

Un recensement exhaustif des peuplements des bassins G et H a été fait en février 1982 (Ayphassorho, 1983). La situation des plantations était alors la suivante :

- Bassin G - peuplement de *Pinus carai-bea*, âgés de 21 mois.

1585 plants vivants et 124 plants morts ont été dénombrés. La hauteur moyenne des arbres était de 1,54 m (écart-type = 0,52). Ces chiffres peuvent être mis en rapport avec les croissances de la même variété à la station CTFT de Paracou, sur sols à drainage vertical, et donc dans les meilleures conditions possibles. Au même âge, la taille moyenne des plants à Paracou était de 1,70 m, soit à peine 10% de plus qu'à ECEREX-G.

- Bassin H - peuplement d'*Eucalyptus urophylla*, âgés de 11 mois.

On a compté 914 plants vivants et 41 morts. La hauteur moyenne des arbres était de 2,39 m (écart-type 0,96), contre 3,39 m à Paracou (+42% par rapport à ECEREX).

La croissance des pins apparaît donc satisfaisante compte tenu des conditions, ce qui n'est pas le cas des eucalyptus. De façon générale, la croissance des arbres est très irrégulière, et les zones à forte croissance correspondent aux lignes d'andains (accumulation des terres et des cendres du brûlis des débris ligneux), et les zones à croissance ralentie et à forte mortalité coïncident avec les zones de décapage.

5.3.1 LES ECOULEMENTS DE CRUE DES BASSINS G ET H

5.3.1.1 Situation en 1982 et 1983

L'étude hydrologique de l'*Epoque Jaune* des bassins G et H sera menée simultanément, pour les raisons de grande similitude qui persistent néanmoins entre les 2 expérimentations. La reconstitution des écoulements totaux de crues sous forêt, et les gains d'écoulement superficiel par rapport à la forêt primaire font l'objet des tableaux 5.3.01 (bassin G) et 5.3.02 (bassin H). Les 3 modes de prédiction des écoulements naturels ont été utilisés : corrélation par crue (Cf. tableau 3.3.10), corrélation par décade (Cf. tableau 3.3.11) et pentes des doubles cumuls dont les tracés en *Epoque Jaune* font l'objet des figures 5.3.01 (bassin G) et 5.3.02 (bassin H).

Tableau 5.3.01 : Ecoulements Totaux de Crue du bassin G en *Epoque Jaune* (1982-83)

Comparaison des écoulements observés et des écoulements calculés en forêt naturelle, selon différentes estimations.

Période	Écoulements de Crue observés (Pin caraïbe) (LeP mm)	Écoulements de crue calculés sous forêt (LeF mm)	gain calculé (mm)	LeP / LeF
1982	1484	Cor. Crue 918	566	1,62
		Cor. Dec. 943	540	1,57
		Dble Cum. 939	545	1,58
1983	1195	Cor. Crue 898	297	1,33
		Cor. Dec. 911	284	1,31
		Dble Cum. 904	291	1,32
1982-83	2679	Cor. Crue 1816	863	1,48
		Cor. Dec. 1854	825	1,44
		Dble Cum. 1843	836	1,45

Tableau 5.3.02 : Ecoulements Totaux de Crue du bassin H en *Epoque Jaune* (1982-83)

Comparaison des écoulements observés et des écoulements calculés en forêt naturelle, selon différentes estimations.

Période	Écoulements de Crue observés (Eucalyptus) (LeE mm)	Écoulements de crue calculés sous forêt (LeF mm)	gain calculé (mm)	LeE / LeF
1982	1691	Cor. Crue 1151	540	1,47
		Cor. Dec. 1162	529	1,46
		Dble Cum. 1170	521	1,45
1983	1159	Cor. Crue 1031	128	1,12
		Cor. Dec. 1038	121	1,12
		Dble Cum. 1009	150	1,15
1982-83	2850	Cor. Crue 2182	668	1,31
		Cor. Dec. 2200	650	1,30
		Dble Cum. 2179	671	1,31

Sur ces 2 tableaux, on constate que les calculs aboutissent à des résultats très voisins, quelle que soit l'estimation utilisée, tant sur la période bi-annuelle que année par année.

- Les écoulements du bassin G

En 1982, les écoulements du bassin G sont forts et dépassent la valeur prédite en milieu naturel de 60%. On rappelle que selon l'estimation faite sur l'année de l'*Epoque Rouge*, le gain relatif était de +80% (Cf. tableau 4.2.01). Il y a donc une réduction légère en année N+2. La couverture végétale d'un pin d'un an est insignifiante et l'influence des pins est probablement infime dans cette évolution. Par contre, une couverture végétale basse bien fournie avait envahi le bassin versant, au point qu'un éclaircissement de cette végétation qui compromettrait le développement des plantations, avait dû être fait autour des plants en octobre 1982.

En 1983, le retour vers des conditions initiales se poursuit et s'accroît : les écoulements dépassent le niveau d'origine de 32% seulement.

- Les écoulements du bassin H

En 1982, les écoulements observés dépassent de 46% ceux de la forêt naturelle. Comme pour le bassin G, ce gain correspond à une réduction sensible par rapport à l'*Epoque Rouge*, pendant laquelle les écoulements du bassin défriché avaient dépassé de 60% les écoulements de l'écosystème forestier (tableau 4.2.01). Toute influence significative de la plantation doit être écartée dans ce bilan, les eucalyptus ayant été mis en terre en février.

En 1983 le retour aux conditions initiales est presque accompli, puisque les écoulements du bassin aménagé dépassent les écoulements naturels de 13% seulement. Cette faible valeur (moyenne des 3 prédictions) est néanmoins significative, compte tenu de la précision de la corrélation H_F calculée en *Epoque Verte*. Les valeurs aux bornes de l'intervalle de confiance à 90% de la lame écoulée reconstituée crue par crue en 1983 sont de 1109 mm et de 953 mm, associées à des gains respectifs sur la période de 50 mm (+5%) et de 206 mm (+22%). L'effet des eucalyptus est sans doute encore minime, comparé à celui du couvert herbeux et des taillis qui ont colonisé le bassin versant.

- Comportement différentiel des bassins G et H

Deux causes doivent être invoquées pour expliquer l'existence de gains plus élevés sur G que sur H :

1. la différence "naturelle" entre bassins :

On a constaté qu'en conditions initiales le bassin H avait des écoulements légèrement plus abondants que G : les coefficients d'écoulement Total des Crues K_{ETC} sur l'*Epoque Verte* étaient respectivement de 29,9% sur G et de 34,4% sur H (Cf. §2.4.1.3, tableau 2.4.02). Or, on a mis en évidence dans l'étude de l'*Epoque Rouge* que les gains relatifs après défrichage étaient d'autant plus élevés que les bassins coulaient moins en conditions naturelles (Cf. figure 4.4.01). Une certaine part de l'écart entre G et H doit être imputée à ce phénomène

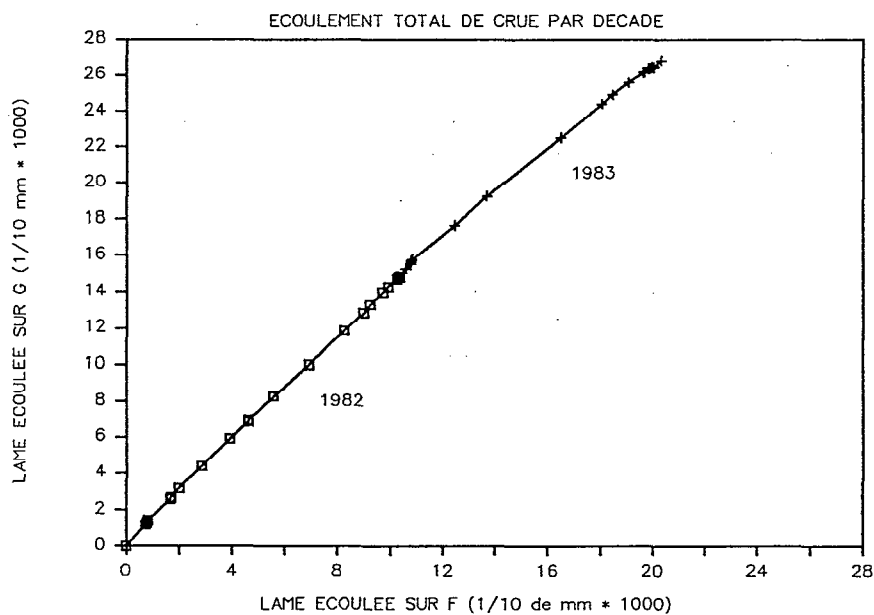


Figure 5.3.01 : Doubles cumuls des Ecoulements Totaux de Crue (ETC) du témoin F et du bassin G, discrétisés par décade, en *Epoque Jaune*. (janvier 1982 - décembre 1983)

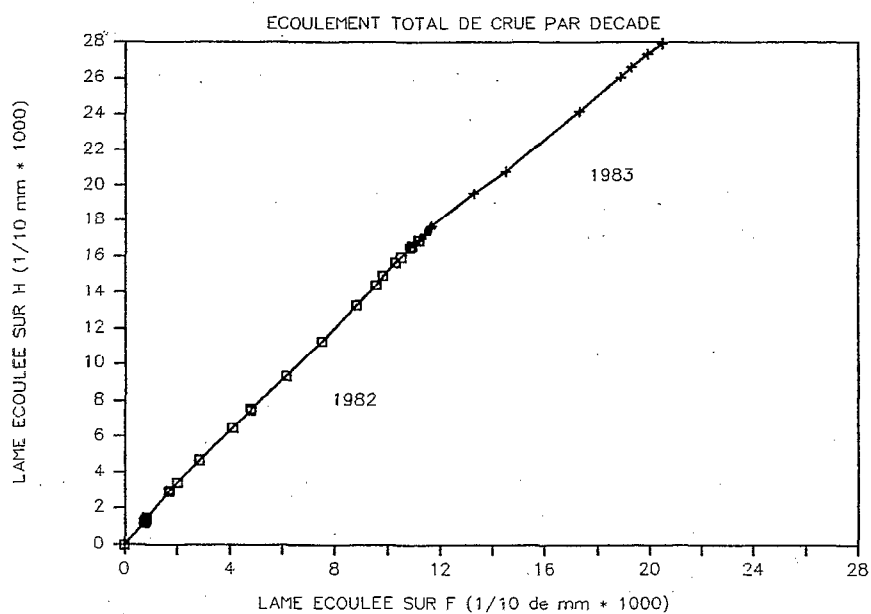


Figure 5.3.02 : Doubles cumuls des Ecoulements Totaux de Crue (ETC) du témoin F et du bassin H, discrétisés par décade, en *Epoque Jaune*. (janvier 1982 - décembre 1983)

2. Les conditions du défrichement du bassin H :

le protocole particulier de défrichement a favorisé les pertes par stockage superficiel et par infiltration, et a façonné un bassin versant dont la réponse hydrologique était plus émoussée que sur G. Ce facteur est probablement décisif dans l'écart permanent qui séparent les gains d'écoulement de ces 2 bassins pendant la période d'expérimentation.

L'année 1983 (N+3 après défrichement) est une époque déterminante dans le retour vers des conditions initiales : si l'on affecte la valeur 1 à l'augmentation relative des écoulements en *Epoque Rouge* (qui étaient de +80% sur G et +60% sur H), l'évolution des gains est la suivante :

année	1981	1982	1983
bassin G	1	0,75	0,40
bassin H	1	0,77	0,22
gain effectif			
bassin G	+622 mm	+550 mm	+290 mm
bassin H	+560 mm	+530 mm	+130 mm

5.3.1.2 Situation en 1987

Le suivi hydrologique intensif des bassins versants ECEREX s'est terminé en 1984, comme cela était initialement prévu dans la programmation scientifique et budgétaire. Après cette échéance, un certain nombre de bassins ont été réactivés à partir de 1986 par le CTFT qui assure la veille sur les bassins aménagés. Dans ce contexte, les bassins F, G et H ont été suivis pendant la saison pluvieuse 1986-1987 dans les mêmes conditions d'exploitation que pendant la phase intensive (limnigraphes au 1/5 et à grande vitesse de déroulement). En termes de mode d'acquisition et de précision de la collecte, les données de cette période sont donc homogènes avec celles de la période antérieure et peuvent être comparées sans biais avec celles-ci. Les données de décembre 1986 à juillet 1987 ont été dépouillées, mises en forme (élaboration des informations à l'échelle de la crue) et interprétées par Chauvin (1987). On reprendra ici l'information des volumes écoulés par crue, qui donne l'opportunité de vérifier le régime hydrologique d'une plantation de pins âgés de 6 ans et d'une plantation d'eucalyptus âgés de 5 ans.

En octobre 1986, l'état des 2 peuplements était le suivant :

	Bassin G (pins)	Bassin H (eucalyptus)
février 1982		
Nombre d'individus vivants	1585	914
octobre 1986		
Nombre d'individus vivants	1341	779
diamètre moyen (cm)	11	8

On constate que les eucalyptus n'ont pas récupéré le retard de croissance constaté en octobre 1982. Bien au contraire, ce peuplement est caractérisé par un taux de mortalité élevé (25% depuis la plantation) et un développement médiocre (Cf. le très faible diamètre moyen).

La saison des pluies de 1987 est d'une indigence exceptionnelle. Avec seulement 2394 mm, la pluviosité de la période de septembre 1986 à octobre 1987 est de loin la plus faible des 10 années de relevés dont on dispose à ECEREX (Cf. tableau 1.2.01). On rappelle que notre estimation de la pluviométrie annuelle moyenne de longue durée à ECEREX est de 3350 mm (Cf. §1.2.2.2). L'effet sur la structure des écoulements est très sensible, puisqu'on a dénombré seulement 64 crues de plus de 1 mm sur le témoin F cette année-là, alors que ce chiffre a toujours dépassé 100, sauf en 1981 où il était de 90.

On a reconstitué les écoulements des bassins G et H comme sous forêt en utilisant les paramètres de la régression de l'*Epoque Verte*. La confrontation des ces volumes avec les débits observés fait l'objet du tableau 5.3.03.

Tableau 5.3.03: Ecoulements Totaux de Crue des bassins G et H en *Epoque Jaune* (1987)

Comparaison des écoulements observés et des écoulements calculés en forêt naturelle, par corrélation, crue par crue.

Période décembre 86 juillet 87	Écoulements de crues observés (LeO mm)	Écoulements de crue calculés sous forêt (LeF mm)	gain calculé (mm)	LeO / LeF
bassin G pins	429	Cor. Crue 481	-52	0,88
bassin H eucalyptus	513	Cor. Crue 559	-46	0,92
bassin F témoin	529			

Ce tableau appelle les commentaires suivants :

- Les volumes d'Écoulements Totaux de Crue sont extrêmement faibles. La lame écoulée sur F (529 mm) est à comparer avec celles de la période 1978-1983, comprises entre 857 mm et 1240 mm (tableau 2.4.10). S'il y a effectivement quelques lacunes d'observation dans cette série de 1987, celles-ci ne sont pas de nature à remettre en cause l'ordre de grandeur de ces chiffres.
- Sur les 2 bassins versants, la somme des écoulements calculés est supérieure à celles des écoulements observés, c'est à dire que les écoulements de crue des plantations seraient inférieurs à ceux de la forêt naturelle. Les limites de l'intervalle de confiance à 90% étant de 481 mm +/- 24 pour G et de 559 mm +/- 34 pour H, ces déficits (-52 mm pour G) et (-46 mm pour H) sont donc significativement différents de zéro au risque 0,1.

- Cette conclusion, commune aux 2 bassins expérimentaux, est assez troublante, et elle pourrait s'expliquer par un biais affectant l'hydrométrie du témoin pendant cette année 1987. Aucun indice d'une telle distorsion n'a pu être mis en évidence : la pente de la régression entre la pluie de l'averse et le volume de la crue, calculée sur 1987, est moyenne comparée à celles établies année par année de 1978 à 1983. De la même manière, la pente des doubles cumuls entre la pluie des averses et les volumes de crue de ce bassin F ne présente aucune singularité en 1987 (Thauvin, 1987).

Il faut donc conclure que, pour le moins, les écoulements de crue d'un peuplement de *Pinus caribea* âgés de 6 ans et d'une plantation d'*Eucalyptus urophylla* âgés de 5 ans, ne sont pas différents de ceux qui sont générés dans l'écosystème forestier primaire.

Cette assertion doit cependant être émaillée de trois commentaires :

- La saison des pluies en 1987 est exceptionnellement faible. La corrélation entre bassin témoin et bassin expérimental a été calée en *Epoque Verte* dans des conditions bien différentes, que l'on peut qualifier de moyennes (en 1978) ou de plutôt pluvieuses (en 1979, Cf tableau 2.4.10). Or, le fonctionnement d'un modèle dans des conditions trop éloignées de celles qui ont présidé au calage peut aboutir à des résultats pour le moins imprévisibles.

On a représenté sur la figure 5.3.03 les écarts entre lames écoulées observées et lames écoulées calculées par crue, comme sous forêt pour les bassins G et H en 1987. Ces écarts (en Y) sont rapportés au volume de la crue correspondante sur le témoin F (en X). On constate que pour les petites crues la répartition fréquentielle des écarts est grossièrement symétrique par rapport au gain zéro, alors que les 2 plus fortes crues ont des gains, certes modérés, mais positifs et de l'ordre de 10%. Il est indéniable que si de tels événements avaient été plus nombreux, comme c'est le cas en année normale, ils auraient pu modifier le signe du bilan global et le sens de nos conclusions.

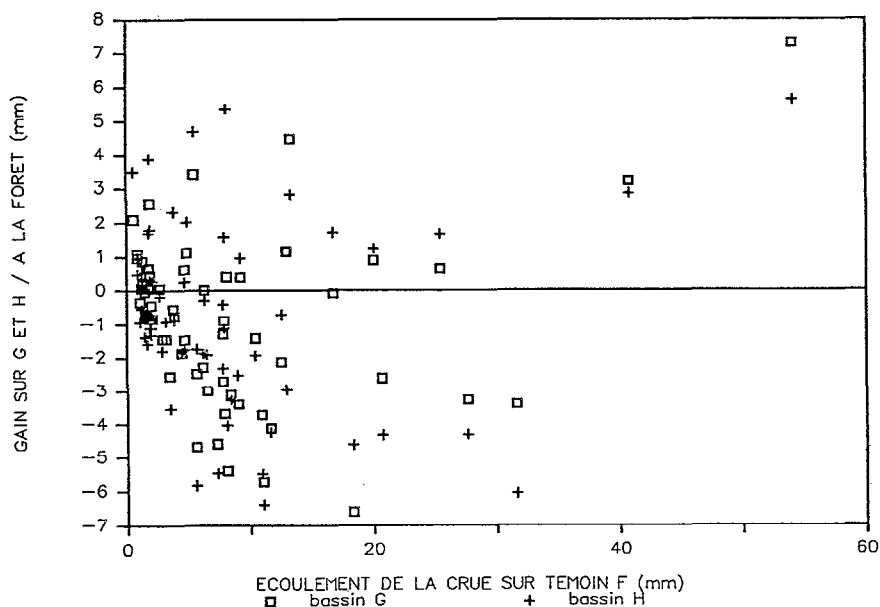


Figure 5.3.03 : Ecarts entre l'écoulement observé et l'écoulement reconstitué sous forêt sur G et H, en fonction du volume de la crue sur F. - valeurs en mm - décembre 1986 à juillet 1987

- Les bassins aménagés en sylviculture ont une végétation basse très fournie, beaucoup plus dense qu'en forêt naturelle où cette strate est très clairsemée. S'il est incontestable que l'indice de couverture des eucalyptus est bien inférieur à celui du couvert forestier, il n'est pas certain que la capacité d'interception de l'écosystème sylvicole dans son ensemble soit inférieur à celui de la forêt naturelle.

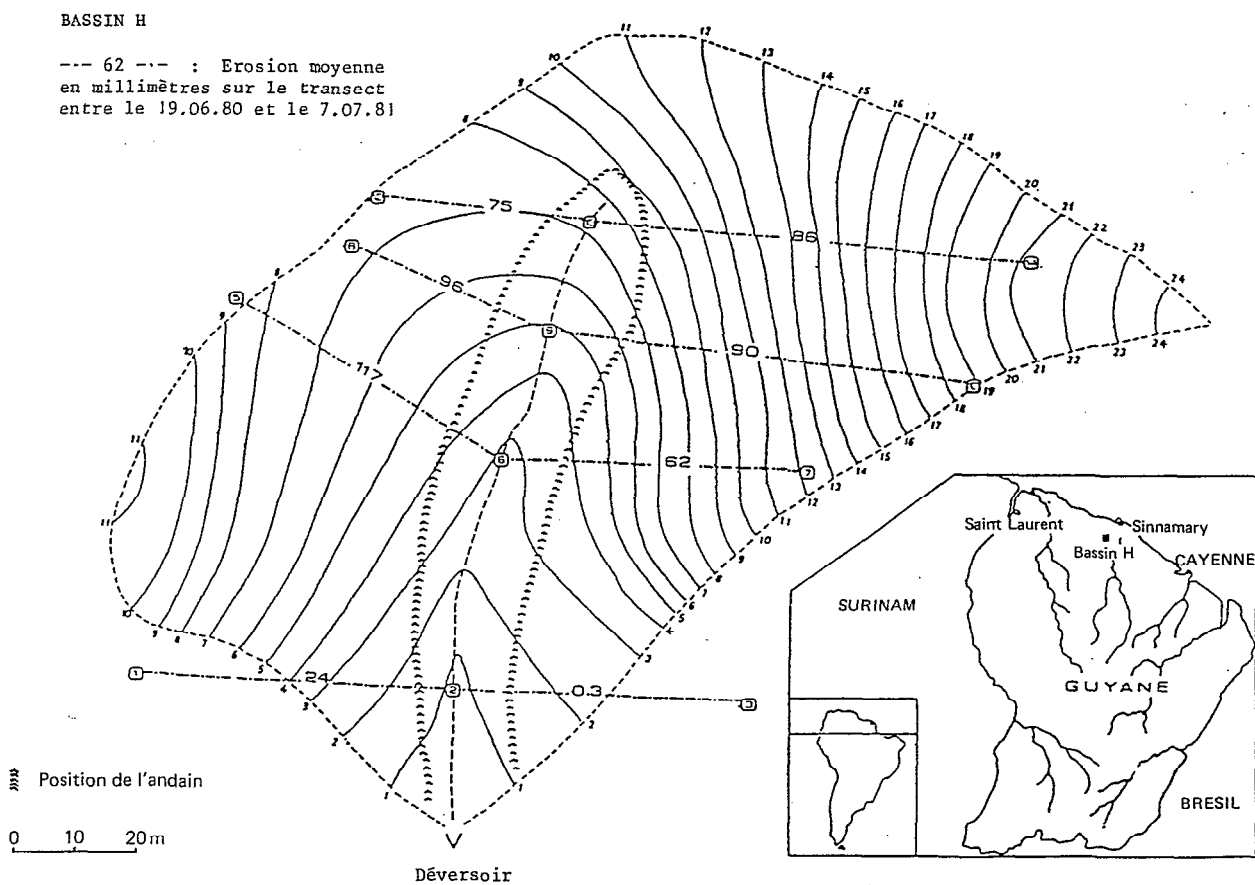


Figure 5.3.04 : Bassin H - érosion moyenne (en mm) par transect en Epoque Rouge

- Mis à part toutes les considérations relatives au couvert végétal, le "complexe physique" du bassin versant aménagé, 6 années après le défrichement, est assez éloigné de celui du bassin originel. L'étude de l'érosion (Fritsch et Sarrailh, 1986) apporte des informations permettant de quantifier ce changement sur le bassin H. Le volume de terre colluvionné des versants vers le bas-fond a été estimé par diverses mesures topographiques. Il représente 656 m^3 prélevés sur 8100 m^2 de versants, soit un décapage moyen de 8,4 cm avec des maximums en hauts de versants compris entre 15 et 30 cm. Ces colluvions se sont étalées dans le bas-fond où ils sont restés piégés, puisque moins de 6 tonnes de terre sur les 1200 tonnes colluvionnées ont transité au-delà du déversoir sous forme de suspensions et de charriages. Rapportée à la zone d'accumulation des colluvions (1900 m^2), l'épaisseur moyenne des dépôts est de 35 cm, mais représente près de 80 cm au droit du talweg. En fait l'expérimentation a transformé un talweg bien incisé, au profil en travers en forme de V, en un vallon en berceau. Cette géométrie nouvelle n'est certainement pas sans influence sur les processus hydrologiques du bassin-versant.

5.3.2 LES DEBITS DE POINTE DES BASSINS G ET H

Les débits maximums instantanés enregistrés en *Epoque Jaune* sont forts, et à rang égal, plus élevés que ceux de la saison pluvieuse *Rouge stabilisée* (Cf. tableau 5.3.03). Les plus fortes pointes restent cependant celles de l'*Epoque Verte*, avec respectivement $244 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ sur G et $288 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ sur H.

Tableau 5.3.03 : Débits de pointe des bassins G et H en *Epoque Jaune*, en $\text{l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$

Bassin versant	G	H
5 plus fortes crues		
1	158	175
2	149	172
3	143	138
4	130	129
5	101	127
Nombre de crues		
$\geq 100 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$	5	12
$\geq 75 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$	19	21
$\geq 50 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$	33	38
$\geq 25 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$	67	74
$\geq 10 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$	118	122

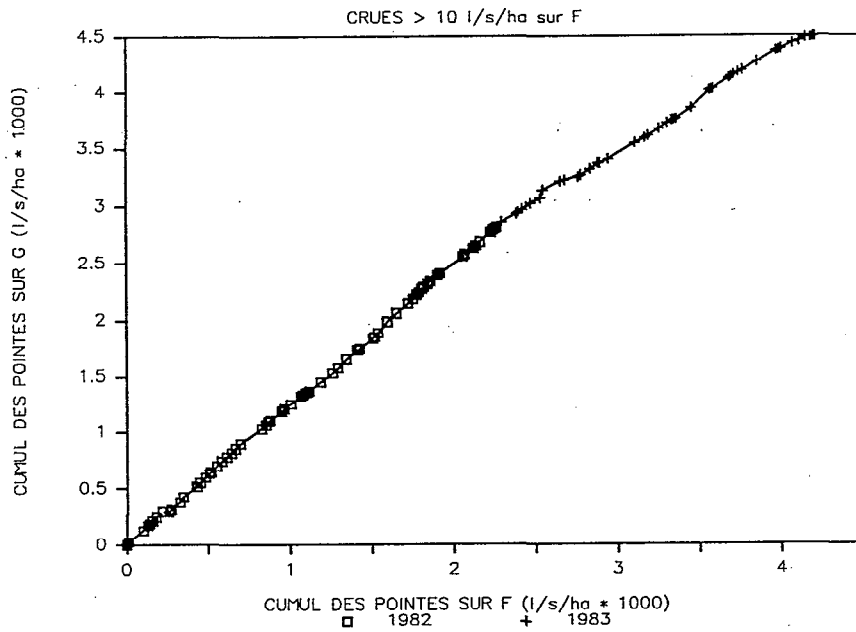


Figure 5.3.05 : Doubles cumuls des débits de pointe du témoin F et du bassin G en *Epoque Jaune*.
 crues de plus de $20 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$ sur le témoin

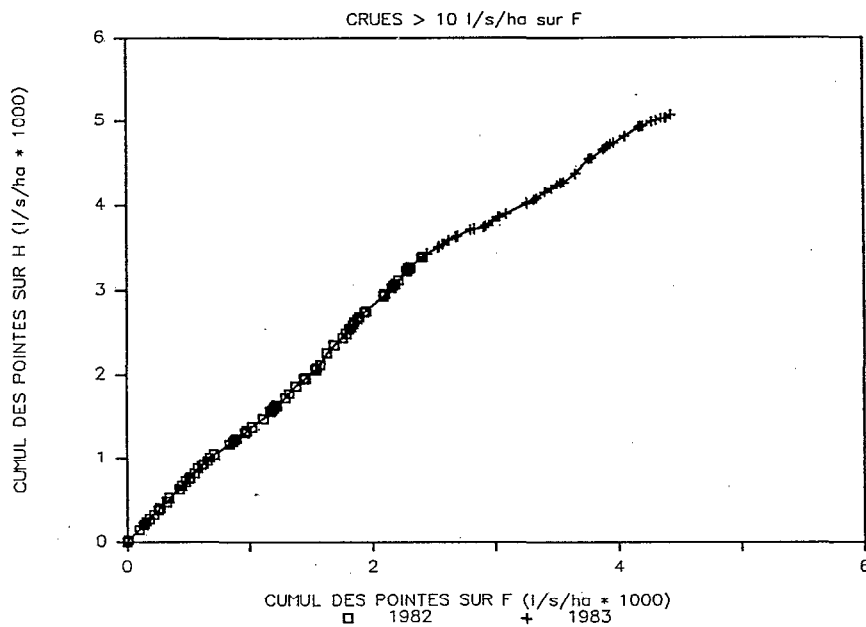


Figure 5.3.06 : Doubles cumuls des débits de pointe du témoin F et du bassin H en *Epoque Jaune*.
 crues de plus de $20 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$ sur le témoin

De la même façon que pour le paramètre "écoulement de crue", les régressions entre débits de pointes du témoin F et des bassins expérimentaux G et H en *Epoque Verte* sont les meilleures du dispositif ECEREX (Cf. tableau 4.5.06 et figure 4.5.07) et l'analyse de l'évolution des débits de pointe par ce procédé promet d'être consistante.

On a également utilisé les doubles cumuls des débits de pointe des crues appariées ayant dépassé $10 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ sur le témoin (figures 5.3.05 - bassin G et 5.3.06 - bassin H). Aussi bien sur G que sur H, on constate un infléchissement des tracés, qui détermine 2 domaines correspondant assez bien aux 2 années 1982 et 1983. En rapportant les pentes des cumuls de chaque année *Jaune* avec celles de l'*Epoque Verte* (Cf. tableau 4.5.07), on aboutit aux résultats suivants (tableau 5.3.04) :

Tableau 5.3.04 : Augmentation des débits de pointe sur les bassin G et H en *Epoque Jaune* (1982 et 1983), estimée par les pentes des doubles cumuls
doubles cumuls des crues $> 10 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ sur le témoin F

pentés des doubles cumuls	bassin G	bassin H
<i>Epoque Verte</i> (R_0)	0,76	0,92
<i>Epoque Jaune</i>		
1982 (R_1)	1,24	1,41
$R_{1982} = R_1/R_0$	1,63	1,53
1983 (R_2)	0,86	0,83
$R_{1983} = R_2/R_0$	1,13	0,90
<i>Epoque Rouge stabilisée</i> ($R_{\text{Rouge stab.}}$)	1,55	1,17

Sur les 2 bassins versants, les débits de pointe ont diminué quand on passe de l'année N+2 à l'année N+3 après défrichement. Exprimées en proportion du débit naturel, les pointes sur G sont passées de 1,63 en 1982 à 1,13 en 1983. Sur H, ces mêmes valeurs sont respectivement de 1,53 en 1982 et 0,90 en 1983. Dans ce dernier cas, l'estimation prédit des débits sur le bassin aménagé inférieurs à ceux du bassin en forêt naturelle.

D'autre part, en comparant ces valeurs d'*Epoque Jaune* avec les gains calculés en *Epoque Rouge stabilisée* (dernière ligne du tableau 5.3.03), on constate que sur G les pointes sont du même ordre de grandeur en année N+1 (1,55) et en année N+2 (1,63), alors que sur H les pointes étaient nettement plus faibles en année N+1 (1,17) qu'en année N+2 (1,53). Cette première année aura été nécessaire pour dissoudre le barrage laissé par le défrichement dans les fonds.

L'autre approche du problème des débits de pointe consiste à utiliser les reconstitutions des débits naturels par les régressions. Les résultats obtenus selon cette estimation font l'objet des tableaux suivants :

- tableaux 5.3.05 et 5.3.06 : calcul des gains sur G et H respectivement, par rapport à la prédiction Q_m de la moyenne du débit en forêt.
- tableaux 5.3.07 et 5.3.08 : calcul des gains sur G et H respectivement, par rapport à la prédiction Q_{95} du débit en forêt.

- L'évolution des débits de pointe sur G

En 1982, comparés à la moyenne Q_m , les débits de pointe sont largement plus élevés qu'en milieu naturel, que ce soit en considérant toutes les crues (moyenne des gains = +97,5%) ou seulement les crues ayant dépassé le seuil de $20 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ (moyenne des gains = +99,2%). Les gains sont positifs pour pratiquement tous les individus composant l'échantillon. L'utilisation de la référence sévère Q_{95} met en évidence la haute signification de ces gains, et par exemple, ceux-ci sont positifs pour 86% des crues de plus de $20 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ (tableau 5.3.06). Ces considérations sont mises en évidence sur la représentation graphique (figure 5.3.07). Comme la méthode des doubles cumuls, cette filière d'estimation ne met pas en évidence une réduction des débits de pointe entre 1981 (année N+1) et 1982 (année N+2). On peut vérifier par exemple (tableau 4.5.08), que la moyenne des gains en 1981 (calculée sur toutes les crues, et rapportée à Q_m) est de +96,1% (+97,5% en 1982).

Tableau 5.3.05 : Augmentation des débits de pointe sur G par rapport à la forêt naturelle en *Epoque Jaune*

Estimation des gains* par rapport à la prédiction de la valeur centrale du débit de pointe en forêt

bassin G	toutes crues				crues observées > $20 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$			
	moyenne :	nombre :	nombre et % de crues		moyenne :	nombre :	nombre et % de crues	
	des gains:	de crues :	avec gain positif	%	des gains:	de crues :	avec gain positif	%
	en % :	n :	n'	%	en % :	n :	n'	%
1982	97,5	64	62	97 %	99,2	49	49	100 %
1983	20,7	43	27	63 %	43,0	24	20	83 %

Tableau 5.3.06 : Augmentation des débits de pointe sur G par rapport à la forêt naturelle en *Epoque Jaune*

Estimation des gains* par rapport à la prédiction "haute" des débits de pointe en forêt (Q_{95}), correspondant à la fréquence au non-dépassement $F = 0,95$

bassin G	toutes crues				crues observées > $20 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$			
	moyenne :	nombre :	nombre et % de crues		moyenne :	nombre :	nombre et % de crues	
	des gains:	de crues :	avec gain positif	%	des gains:	de crues :	avec gain positif	%
	en % :	n :	n'	%	en % :	n :	n'	%
1982	4,0	64	42	66 %	16,0	49	42	86 %
1983	-28,0	43	6	14 %	-2,4	24	6	25 %

En 1983, la situation a nettement évolué, et les débits de pointe sont en diminution très sensible, tout en restant supérieurs aux valeurs naturelles, passant du niveau +97,5% au niveau +20,7% (toutes crues). En tronquant l'échantillon au seuil de $20 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$, ces chiffres sont de +99,2% (1982) et de +43,0% (1983).

(*) gain = $(Q_{\text{sol nu obs.}} - Q_{\text{forêt cal.}}) / Q_{\text{forêt cal.}} * 100$

Estimée avec Q_{95} , la signification du diagnostic peut-être mise en doute : la moyenne des gains est négative, et seulement 25% des crues observées de plus de $20 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ ont des gains positifs. On constate toutefois sur la figuration graphique (figure 5.3.08) que la prédiction avec Q_{95} reste positive ou très proche de zéro pour la plupart des pointes de plus de $50 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ en forêt naturelle.

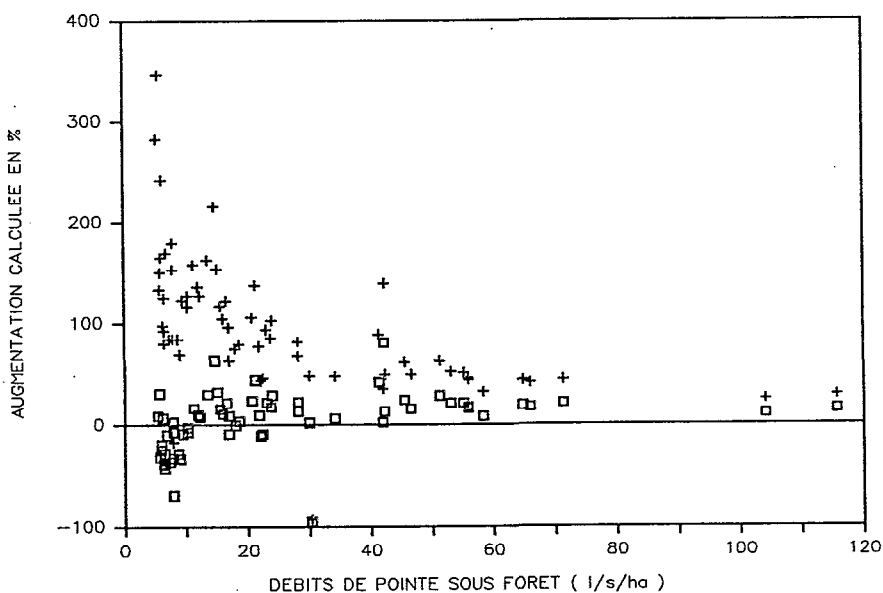


Figure 5.3.07 : Augmentation des débits de pointe sur le bassin G en *Epoque Jaune*, année 1982, à partir des corrélations avec le témoin F - valeurs en %, rapportées au débit sous forêt

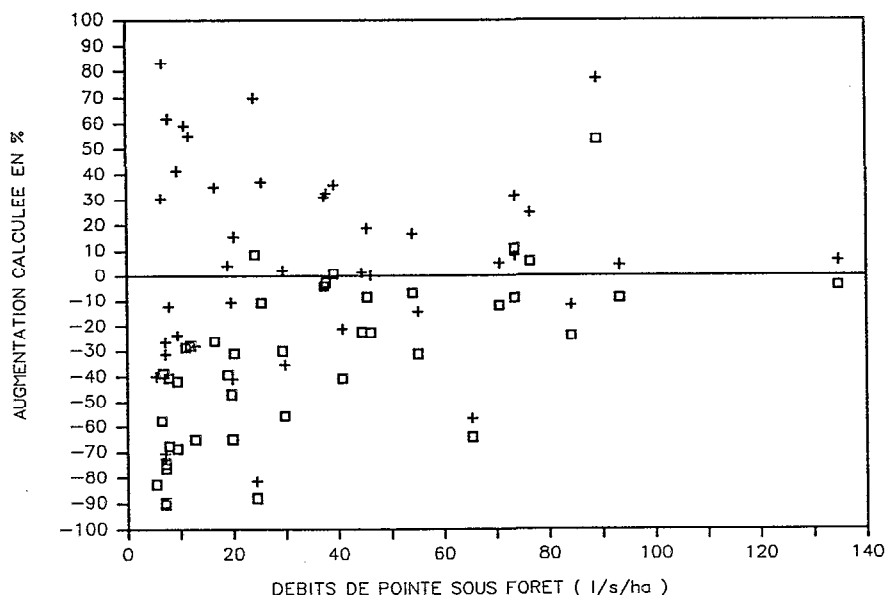


Figure 5.3.08 : Augmentation des débits de pointe sur le bassin G en *Epoque Jaune*, année 1983, à partir des corrélations avec le témoin F - valeurs en %, rapportées au débit sous forêt

"+" : estimation par rapport à la prédiction de la valeur centrale des débits sous forêt

"■ blanc" : estimation par rapport à la prédiction Q_{95} (débit de la fréquence au non-dépassement $F=0.95$)

- L'évolution des débits de pointe sur H

En 1982, les débits sont plus élevés que la prédiction Q_m en milieu naturel pour toutes les crues (tableau 5.3.07). Ce gain est surtout marqué sur les petites crues (figure 5.3.09) : la moyenne des gains est de 98,4% sur l'ensemble de l'échantillon, mais cette valeur n'est plus que de 12,3% sur l'échantillon tronqué à $20 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$.

Rapporté à la valeur Q_{95} , le diagnostic est sérieusement mis à mal puisque la moyenne des gains est négative sur les 2 échantillons (toutes crues et crues dépassant $20 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$). Toutefois, on note que 44% des crues moyennes et fortes conservent des gains positifs en 1982 (tableau 5.3.08).

En accord avec l'estimation par les doubles cumuls, on constate une augmentation des pointes de crues en année $N+2$ (1982) par rapport à l'année $N+1$ (1981) : la moyenne des gains est de +44,6% en 1981 et les gains ne sont positifs dans 79% des cas, alors qu'en 1982, la moyenne est de +98,4%, et 100% des crues ont des gains positifs.

En 1983, les débits de pointe du bassin en eucalyptus deviennent inférieurs à ceux du bassin en forêt naturelle, ou pour le moins, que les écarts entre les 2 systèmes ne sont pas significatifs (figure 5.3.10). La moyenne des gains est largement négative par rapport à Q_m , et a fortiori par rapport à Q_{95} .

Tableau 5.3.07 : Augmentation des débits de pointe sur H par rapport à la forêt naturelle en *Epoque Jaune*

Estimation des gains* par rapport à la prédiction de la valeur centrale du débit de pointe en forêt

bassin H	toutes crues				crues observées > $20 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$			
	moyenne :	nombre :	nombre et % de crues		moyenne :	nombre :	nombre et % de crues	
	des gains :	de crues :	avec gain positif		des gains :	de crues :	avec gain positif	
	en % :	n :	n' :	% :	en % :	n :	n' :	% :
1982	98,4	68	68	100 %	12,3	54	54	100 %
1983	-11,6	43	15	35 %	-21,7	23	11	48 %

Tableau 5.3.08 : Augmentation des débits de pointe sur H par rapport à la forêt naturelle en *Epoque Jaune*

Estimation des gains* par rapport à la prédiction "haute" des débits de pointe en forêt (Q_{95}),
correspondant à la fréquence au non-dépassement $F = 0,95$

bassin H	toutes crues				crues observées > $20 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$			
	moyenne :	nombre :	nombre et % de crues		moyenne :	nombre :	nombre et % de crues	
	des gains :	de crues :	avec gain positif		des gains :	de crues :	avec gain positif	
	en % :	n :	n' :	% :	en % :	n :	n' :	% :
1982	-9,5	68	24	35 %	-11,9	54	24	44 %
1983	-48,8	43	1	2 %	-91,3	23	1	4 %

(*) gain = $(Q_{\text{sol nu obs.}} - Q_{\text{forêt cal.}}) / Q_{\text{forêt cal.}} * 100$

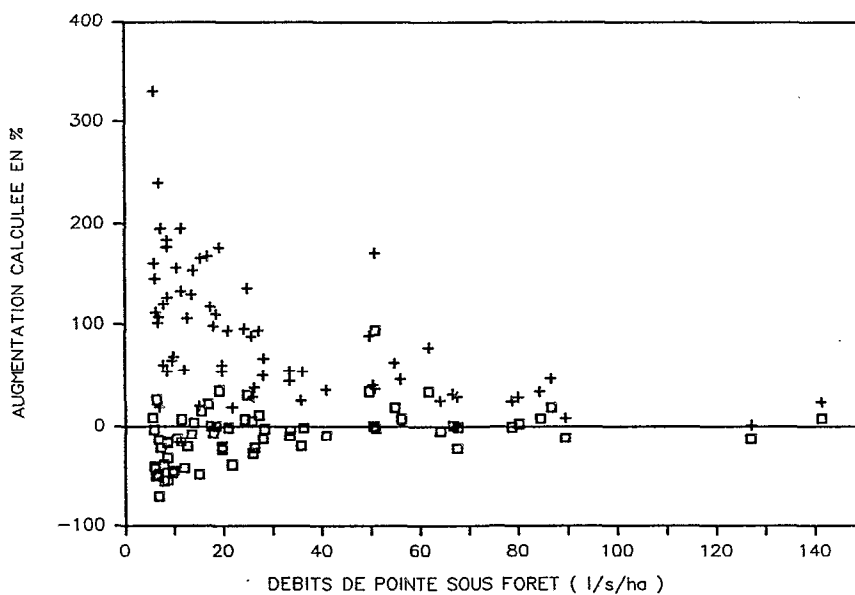


Figure 5.3.09 : Augmentation des débits de pointe sur le bassin H en *Epoque Jaune*, année 1982,
à partir des corrélations avec le témoin F
valeurs en %, rapportées au débit sous forêt

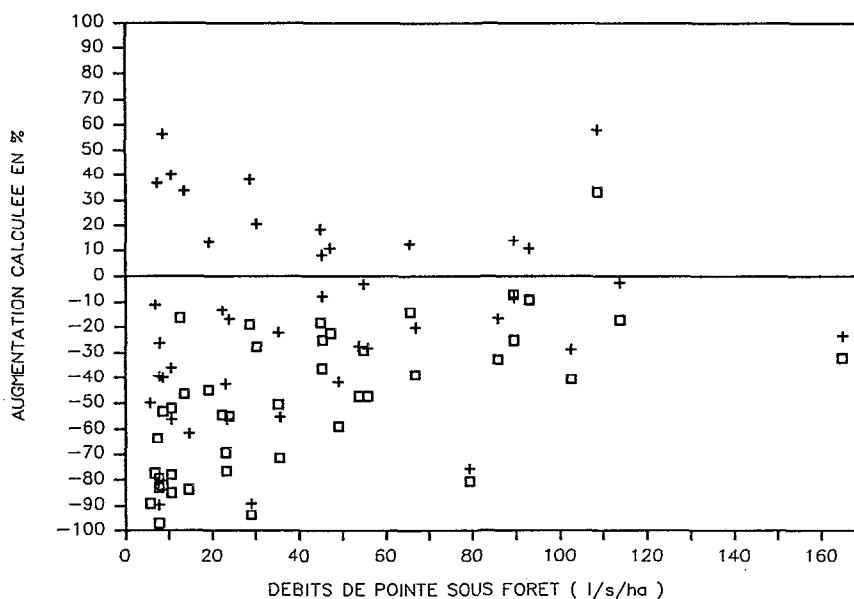


Figure 5.3.10 : Augmentation des débits de pointe sur le bassin H en *Epoque Jaune*, année 1983,
à partir des corrélations avec le témoin F
valeurs en %, rapportées au débit sous forêt

+ : estimation par rapport à la prédiction de la valeur centrale des débits sous forêt

□ : estimation par rapport à la prédiction Q95 (débit de la fréquence au non-dépassement F=0,95)



*Aménagement en sylviculture de pins caraïbes (Bassin G)
En haut : après plantation (fin 1981) - En bas : en 1989 (Cliché Sarrailh)*



Aménagement en verger de pomelo - Bassin C, 1987 (Cliché Sarrailh)



Aménagement en sylviculture d'eucalyptus - Bassin H, 1986

5.4 LA CULTURE ITINERANTE SUR BRÛLIS : LE BASSIN I

Le bassin I a fait l'objet d'un essai en agriculture traditionnelle. Il s'agit d'une culture sur brûlis, largement pratiquée par les diverses populations vivant en forêt amazonienne, avec de nombreuses variantes. Ce système est connu en Guyane sous l'appellation vernaculaire d'*abattis*. Les caractères principaux de cette utilisation de l'espace sont les suivants :

- L'*abattis* est ouvert en forêt primaire ou dans un recru âgé de plusieurs décennies.
- L'exploitation se limite à l'abattage des arbres et au brûlis sur place. Cette abattage est fait à la tronçonneuse ou même à la hache. Le travail du sol est entièrement manuel et réduit au minimum.
- La production de l'*abattis* est essentiellement à finalité vivrière et à usage familial. Toutefois, l'abondance relative d'un certain nombre de produits au moment de la récolte (par exemple manioc, maïs, pastèques, etc) peut fournir une rente à l'agriculteur, et de fait, une part importante des produits vendus sur le marché local provient des *abattis*.
- C'est une culture itinérante, car la durée d'utilisation typique d'un *abattis* est d'environ 2 ans, après quoi le site est abandonné et évolue sous l'effet du recru naturel.

Ces caractères suffisent à montrer que l'essai "*abattis*" s'inscrit dans une problématique alternative, et non associée au Plan papetier. Au plan hydrologique, c'est une tentative intéressante qui devrait fournir l'ordre de grandeur de l'impact minimum d'une déforestation et d'une utilisation des sols à finalité agricole. Cette expérimentation a été conduite sur le bassin I.

Les observations sur le bassin I ont commencé en décembre 1978. Le bassin est resté en forêt naturelle jusqu'en juin 1981. La coupe a été faite en juillet, le brûlis en octobre et la plantation en novembre de la même année. L'*Epoque Verte* comporte donc 3 saisons des pluies, et l'*Epoque Jaune*, qui la suit immédiatement; 2 années complètes (1982 et 1983).

Le bassin I est composé pour sa plus grande part de sols à drainage vertical (60%). C'est un bassin versant dont les écoulements de crue sont peu abondants (11,1% de la pluie sur la période comparative 1978-79, Cf. tableau 2.4.02). Dans l'ensemble du dispositif, ce bassin se classe au deuxième rang par ordre d'écoulements croissants.

Ces caractères se traduisent par deux conséquences contradictoires quant à l'évaluation des effets hydrologiques :

- On peut s'attendre à ce que les effets des modifications du couvert végétal soient importants en termes relatifs, l'étude de l'*Epoque Rouge* ayant mis en évidence que les bassins développaient des réactions hydrologiques dont l'intensité était inversement proportionnelle à l'abondance de leurs écoulements en conditions originelles. Cette caractéristique constitue donc une disposition favorable pour déceler d'éventuels changements de régime hydrologique.
- Mais par ailleurs, compte tenu des caractéristiques du témoin utilisé (B), sur lequel les sols à dynamique superficielle et latérale sont prédominants (90% du bassin), la prédiction des écoulements en milieu naturel de ce bassin I est moins précise que sur des bassins à dynamique superficielle. En effet, au cours des procédures de calage et de validation croisées (Cf. §3.3) la reconstitution des volumes écoulés sur ce bassin s'est avérée plus performante avec les régressions à l'échelle décennales qu'avec les régressions établies crue par crue, ce qui dénote le caractère peu fonctionnel de l'appariement I_p . Cette situation ne s'est reproduite que sur le bassin C, composé à 100% de sols à drainage vertical. **Il est donc prévisible que des modifications fortes puissent aussi être peu significatives, même pour un risque statistique important (par exemple 0,1).**

5.4.1 LES ECOULEMENTS DE CRUE

Le tableau 5.4.01 présente les effets provoqués par l'expérimentation sur le régime hydrologique, en années N+1 et N+2 après la coupe et sur l'ensemble de l'*Epoque Jaune*, selon les 3 modes d'estimation utilisés dans cette étude (corrélations crue par crue, réputée peu fiable pour ce bassin, corrélations par décennie et doubles cumuls).

La figure 5.4.01 présente la courbe des doubles cumuls des écoulements de crue du bassin I avec le témoin B en *Epoque Jaune*. Ce tracé montre un comportement peu différencié sur l'ensemble de la période, avec toutefois une pente légèrement plus forte en 1983 (1,01) qu'en 1982 (0,89). Rapportée à la pente moyenne en *Epoque Verte* (0,70), cette interprétation conduit à admettre que par rapport à la forêt naturelle, les écoulements sont en augmentation relative de 1,25 en 1982 et de 1,42 en 1983 (troisième estimation du tableau 5.4.01).

La prédiction par régression décennale donne des valeurs d'augmentation relative qui sont inférieures aux précédentes, égales à 1,23 en 1982 et à 1,30 en 1983. La valeur globale sur l'*Epoque Jaune* est de 1,26 ce qui représente un écoulement supplémentaire de 181 mm par rapport aux 689 mm d'écoulement de ce bassin en conditions de forêt naturelle.

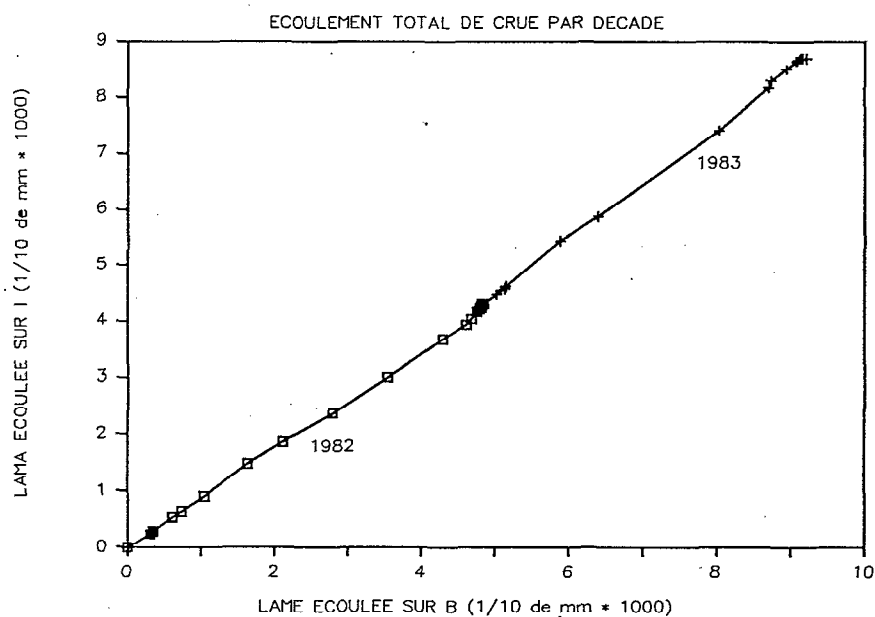


Figure 5.4.01 : Doubles cumuls des Écoulements Totaux de Crue (ETC) du témoin B et du bassin I, discrétisés par décennie, en *Epoque Jaune*. (janvier 1982 - décembre 1983)

Tableau 5.4.01 : Écoulements Totaux de Crue du bassin I en *Epoque Jaune* (1982-83)

Comparaison des écoulements observés et des écoulements calculés en forêt naturelle, selon différentes estimations.

Période	Écoulements de Crue observés (Brûlis) (LeBr mm)	Écoulements de crue calculés sous forêt (LeFo mm)	gain calculé (mm)	LeBr / LeFo	
1982	430	Cor. Crue	337	93	1,28
		Cor. Dec.	351	79	1,23
		Dble Cum.	345	85	1,25
1983	440	Cor. Crue	275	165	1,60
		Cor. Dec.	338	102	1,30
		Dble Cum.	309	131	1,42
1982-83	870	Cor. Crue	612	258	1,42
		Cor. Dec.	689	181	1,26
		Dble Cum.	654	216	1,33

Les chiffres de ce tableau 5.4.01 amènent à formuler les commentaires suivants :

- **Par rapport à la forêt primaire, l'écoulement supplémentaire d'un abattis en croissance et en production est faible : +26% ou +33% selon les estimations les plus probables.**
- **Ce gain est significativement supérieur à zéro** : les valeurs aux bornes de l'intervalle de confiance à 90% de la lame calculée par régression décadaire sont de 627 mm et de 751 mm (écoulement observé = 870 mm).
- Selon toutes les prédictions, l'écoulement est plus important en année N+2 qu'en année N+1. Toutefois, les méthodes de reconstitution étant peu précises, la signification statistique de cette différence peut être mise en doute. Ainsi, selon la prédiction par régression décadaire, on obtient les valeurs suivantes aux bornes de l'intervalle de confiance à 90% :

1982	écoulements calculés = 351 mm ± 34	gains relatifs correspondants = 1,12 et 1,36
1983	écoulements calculés = 338 mm ± 60	gains relatifs correspondants = 1,11 et 1,58

Comparée aux différents types d'exploitation mécanisée, l'agriculture traditionnelle sur brûlis est réputée être une technologie douce. Il est donc tout à fait intéressant de vérifier si la signature hydrologique d'un abattis est en accord avec cette constatation. Pour n'être pas biaisée, cette comparaison doit être faite avec des bassins versants aux caractéristiques hydro-pédologiques les plus proches possible. En l'occurrence, les bassins D et E, à couvertures pédologiques mixtes, et avec des coefficients d'Écoulement Total de Crue en 1978-79 qui sont respectivement de 14,8% et de 12,7% (11,1% sur D), constituent un support acceptable pour une telle comparaison. Cependant, une source d'hétérogénéité est introduite par le fait que les expérimentations sont décalées d'un an entre les 2 ensembles (coupe en 1980 sur D et E et en 1981 sur D)

Comparaison avec le bassin E :

On peut comparer sur les bassins E et I, les années N+1 et N+2 après l'abattage, c'est à dire la période *Jaune* de I (1982-83) avec les années 1981 et 1982 de E. On rappelle que ce bassin E a subi une exploitation forestière intense, mais a conservé une couverture végétale "sans valeur économique" (exportation de tous les bois à valeur commerciale par un tracteur à pneus, en décembre 1980).

En prenant la moyenne des trois prévisions faites sur le bassin E en 1981 et 1982 (tableau 5.2.05), on aboutit à un gain moyen de +12% (écoulements observés 608 mm, écoulements calculés 543 mm). Cette perturbation reste bien inférieure à celle provoquée par l'aménagement "abattis" (+26% ou +33%). Les conséquences hydrologiques de la mise à nu complète du sol sur l'abattis, même en absence de toute intervention mécanisée, sont plus sensibles et plus durables que celles provoquées par une exploitation forestière intensive et peu "finie".

Comparaison avec le bassin D :

Par différence avec E, le bassin D a subi un défrichement complet, mais l'état "sol nu" a été réalisé avec des procédés peu comparables à ceux de l'abattis (défrichement mécanisé avec dessouchage), et on rappelle que ce bassin D avait été inclus dans l'échantillon des bassins étudiés en *Epoque Rouge*, période pendant laquelle les écoulements avaient dépassé ceux du milieu naturel dans des proportions allant de +96% et +170% selon les estimations (Cf. §4.2 et 4.4). En ne prenant pas en compte cette période de paroxysme, on peut comparer la situation d'un défrichement mécanisé laissé en recrû naturel, avec le bassin en abattis. La comparaison portera sur la période bi-annuelle N+2 et N+3 après défrichement pour le bassin D, et sur la période N+1 et N+2 après la coupe sur l'abattis. Ce choix identifie une période de comparaison identique sur les 2 bassins versants (les années 1982 et 1983).

Sur D, les écoulements observés étaient de 946 mm et la moyenne des écoulements calculés sous forêt par les 3 estimations de 715 mm (tableau 5.2.01), c'est à dire que, sur cette période 1982-83, les écoulements du bassin en recrû ont dépassé les écoulements naturels de +32%. Ce gain est tout à fait comparable à celui constaté sur l'abattis (+26% ou +33% selon les estimations les plus probables).

Les modifications de l'écoulement naturel provoqués par l'aménagement "abattis traditionnel" sont donc comparables à celles d'un recrû naturel à partir de la deuxième année suivant le défrichement mécanisé. Cette identité des chiffres, qui est un fait, ne doit pas être interprétée dans un sens écologique excessivement rassurant : pendant l'*Epoque Rouge*, les très forts écoulements du bassin D ont permis l'exportation de matières en suspension et en solution, et ont été accompagnés de remaniements de terre par colluvionnement sur le bassin. Bien qu'on puisse le souhaiter, il est peu probable que la convergence des comportements hydrologiques corresponde à une similitude en matière de caractéristiques physico-chimiques, de qualité agronomique des sols, ou de composition floristique du recrû.

5.4.2 LES DEBITS DE POINTE

A cause d'une proportion dominante de sols à drainage vertical, les débits maximum de crue du bassin I sont modestes. Sur l'ensemble de la période d'étude (1979-1983), le seuil de $75 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ n'a jamais été atteint (tableau 5.4.02), alors que les ordres de grandeur sont supérieurs à $250 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ sur les bassins à dynamique superficielle et à nappe affleurante du type F,G,H. Sur ce tableau, on peut constater également une similitude remarquable dans la répartition des crues par tranches entre l'*Epoque Verte* et l'*Epoque Jaune*.

Tableau 5.4.02 : Débits de pointe du bassins I en *Epoque Jaune*, en $\text{l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$

Bassin versant	Epoque Verte	Epoque Jaune
5 plus fortes crues		
1	74,2	72,7
2	72,5	56,3
3	72,5	51,7
4	56,0	50,6
5	53,6	48,5
Nombre de crues		
$\geq 75 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$	0	0
$\geq 50 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$	4	4
$\geq 25 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$	27	26
$\geq 10 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$	67	65

Selon l'exploitation des courbes de doubles cumuls des débits de pointe du témoin B avec ceux du bassin I (échantillon limité aux crues ayant dépassé $10 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ sur B), les débits de pointe auraient augmenté en moyenne de 26% sur l'abattis pendant l'*Epoque Jaune* par rapport à la forêt naturelle (tableau 5.4.03 et figure 5.4.02).

Il existe une tendance à la réduction des pointes entre 1982 (gain +28%) et 1983 (gain +23%), mais cette différence est trop faible pour être très significative.

Une étude des débits de pointe par régression avec les données du témoin B a été également été menée. La répartition des points et l'expression analytique de la corrélation utilisée pour la reconstitution des pointes sous forêt, font l'objet de la figure 5.4.03. On constate que cette corrélation n'explique que 63% de la variance des pointes du bassin I, ce qui laisse augurer que seules des modifications intenses pourront être tenues comme statistiquement significatives en utilisant cet estimateur.

Les résultats font l'objet des tableaux 5.4.04 et 5.4.05 et de la figuration graphique 5.4.04 et appellent les commentaires suivants :

Tableau 5.4.03 : Augmentation des débits de pointe sur le bassin I en *Epoque Jaune* (1982 et 1983), estimée par les pentes des doubles cumuls (crues > 10 l.s⁻¹.ha⁻¹ sur le témoin B)

pentes des doubles cumuls		$R = R_1/R_0$	
<i>Epoque Verte</i> (R_0)		0,65	
<i>Epoque Jaune</i>			
1982 (R_1)		0,83	1,28
1983 (R_1)		0,80	1,23
-----		-----	
1982-1983 (R_1)		0,82	1,26

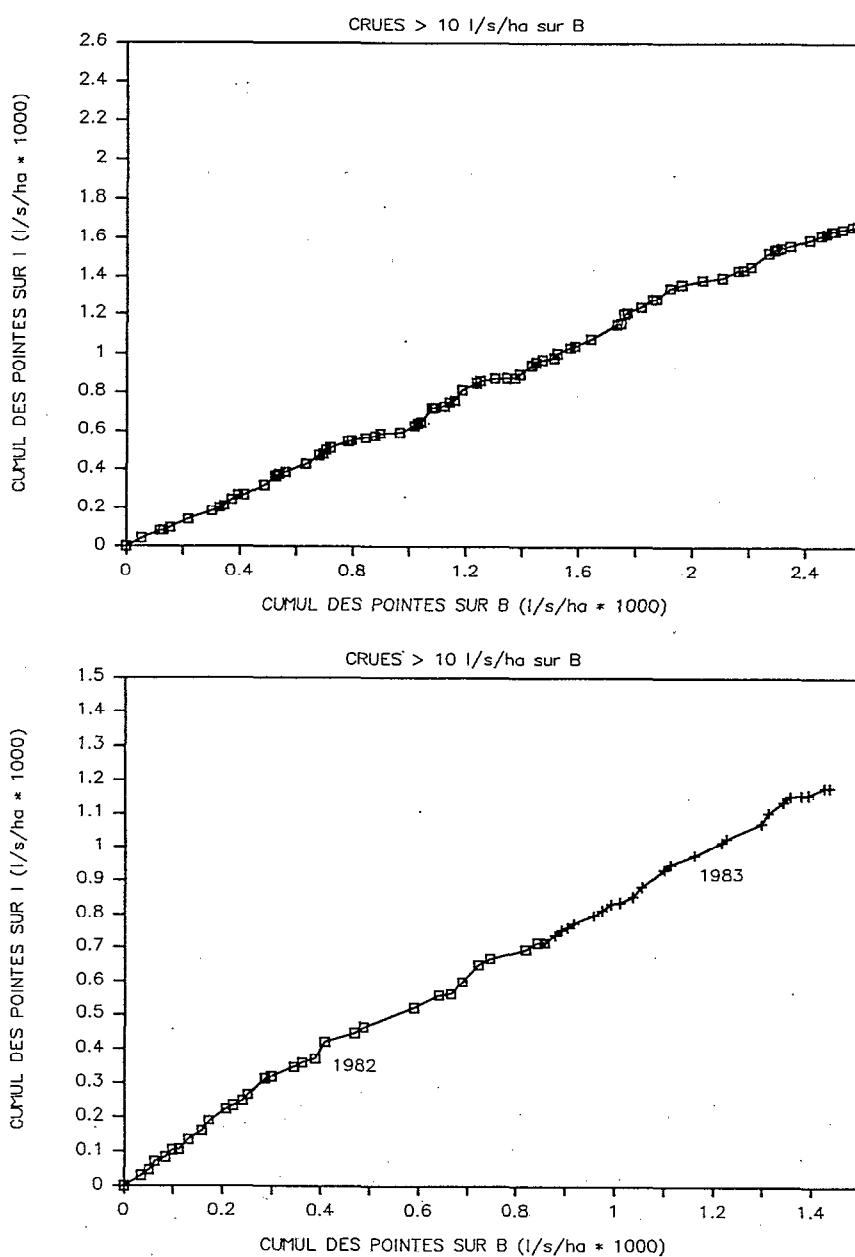


Figure 5.4.02 : Doubles cumuls des débits de pointe du témoin B et du bassin I

En haut : en *Epoque Verte* - En bas : en *Epoque Jaune*

DEBITS DE POINTE SUR I ET B EPOQUE VERTE

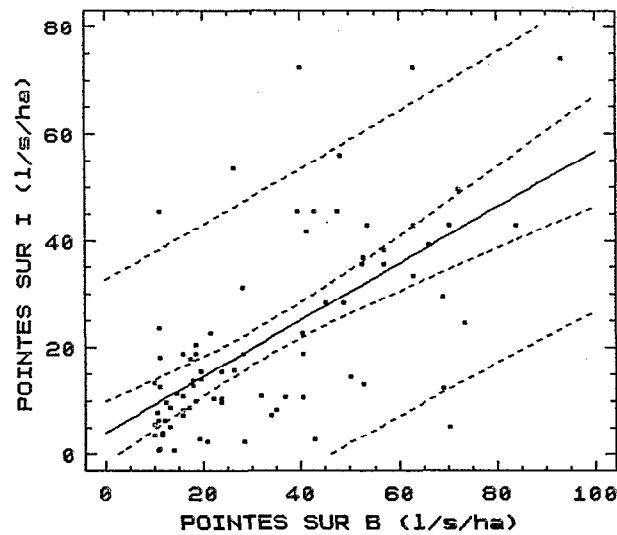


Figure 5.4.03 : Régression des débits de pointe du témoin B avec les débits correspondants du bassin I en *Epoque verte*. (crues > 10 l.s⁻¹.ha⁻¹ sur le témoin B)

Tableau 5.4.04 : Augmentation des débits de pointe sur I par rapport à la forêt naturelle en *Epoque Jaune*

Estimation des gains* par rapport à la prédiction de la valeur centrale du débit de pointe en forêt

bassin I	toutes crues				crues observées > 20 l.s ⁻¹ .ha ⁻¹			
	moyenne :		nombre et % de crues		moyenne :		nombre et % de crues	
	des gains :	de crues :	avec gain positif	%	des gains :	de crues :	avec gain positif	%
	en % :	n :	n'	%	en % :	n :	n'	%
1982	33,7	23	19	83 %	71,0	17	13	76 %
1983	15,0	30	14	47 %	49,9	10	7	70 %
1982-83	25,6	53	33	62 %	63,2	27	20	74 %

Tableau 5.4.05: Augmentation des débits de pointe sur I par rapport à la forêt naturelle en *Epoque Jaune*

Estimation des gains* par rapport à la prédiction "haute" des débits de pointe en forêt (Q₉₅), correspondant à la fréquence au non-dépassement F = 0,95

bassin I	toutes crues				crues observées > 20 l.s ⁻¹ .ha ⁻¹			
	moyenne :		nombre et % de crues		moyenne :		nombre et % de crues	
	des gains :	de crues :	avec gain positif	%	des gains :	de crues :	avec gain positif	%
	en % :	n :	n'	%	en % :	n :	n'	%
1982	-45,4	30	3	10 %	-26,6	17	3	18 %
1983	-53,6	23	1	4 %	-31,5	10	1	10 %
1982-83	-49,0	53	4	8 %	-28,4	27	4	15 %

(*) gain = (Q sol nu obs. - Q forêt cal.) / Q forêt cal * 100

- Estimation par rapport à la prédiction de la moyenne Q_m des débits en forêt (tableau 5.4.04)

La moyenne des augmentations des débits de pointe est largement supérieure à zéro, année par année et sur l'ensemble de l'*Epoque Jaune*. L'augmentation est effective pour la majorité des événements : elle touche 62% de l'ensemble des crues (gain moyen +25,6%) et +74% des crues $> 20 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ (gain moyen +63,2%).

- Estimation par rapport à la prédiction Q_{95} des débits en forêt (tableau 5.4.05)

Quels que soient la période ou l'échantillon considérés, la moyenne des gains calculés par rapport à Q_{95} est négative. Les événements pour lesquels l'augmentation reste positive sont très peu nombreux (8% d'entre eux en considérant toutes les crues et 15% pour les crues $> 20 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$). Comme il fallait s'y attendre au vu de la dispersion de la régression $Q_{\max(I)} = f(Q_{\max(B)})$, le verdict statistique est que l'augmentation des débits de pointe sur un brûlis traditionnel n'est pas significativement différent de zéro au risque 0,05. En considérant la figure 5.4.04, on peut considérer que l'on ne prendrait pas un grand risque scientifique ou économique en se conformant à ce diagnostic, car l'augmentation des pointes est effectivement faible (moins de 20%) pour les plus fortes crues de l'*Epoque Jaune* ($> 30 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$).

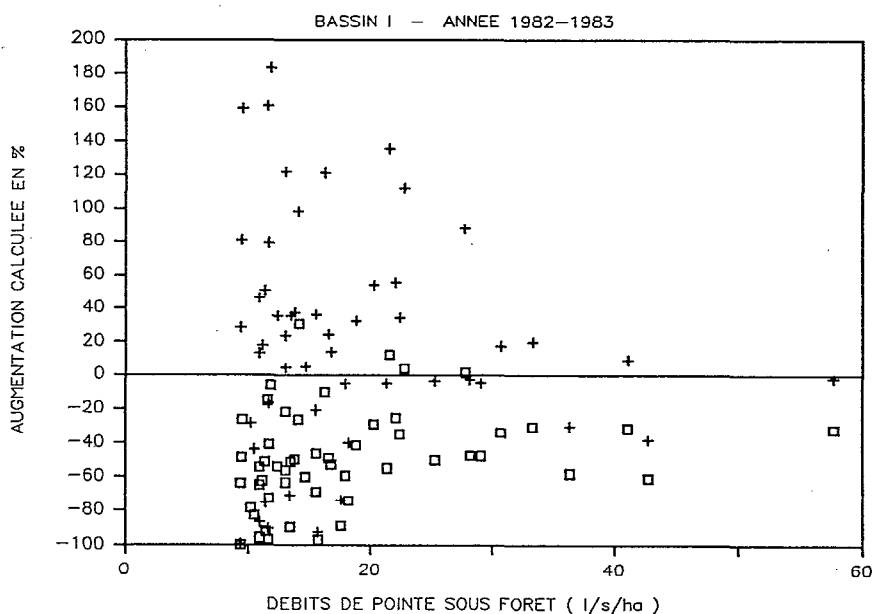


Figure 5.4.04 : Augmentation des débits de pointe sur le bassin I en *Epoque Jaune*, (années 1982 et 1983), à partir des corrélations avec le témoin B

valeurs en %, rapportées au débit sous forêt

"+" : estimation par rapport à la prédiction de la valeur centrale des débits sous forêt

"■ blanc" : estimation par rapport à la prédiction Q_{95} (débit de la fréquence au non-dépassement $F=0,95$)

5.5 UN VERGER DE POMELOS : LE BASSIN C

L'arboriculture fruitière est une spéculation bien adaptée à un développement agricole de la Guyane, et qui se devait de figurer parmi les scénarios testés à ECEREX. C'est un aménagement qui requiert peu de main d'oeuvre en phase de production, et les produits de la culture peuvent être assez facilement transformés sur place (jus de fruits). De plus, les fruits à forte valeur ajoutée comme les citrons verts pourraient être exportés sur la Métropole grâce aux tarifs réduits du fret aérien dans le sens Guyane-France, dans lequel les avions-cargos repartent à charge réduite. C'est d'ailleurs le citron vert qui avait été retenu pour l'expérimentation à ECEREX ; mais, au moment de la plantation, il n'a pas été possible de disposer des 500 pieds nécessaires pour réaliser l'aménagement, et c'est finalement un pomelo à chair rose, dont les plants ont été fournis par l'IRFA, qui a été utilisé.

L'aménagement "arboriculture fruitière" est très éloigné dans sa conception d'autres spéculations testées à ECEREX, comme par exemple la sylviculture. Tout laissait à penser en effet, que les reboisements s'étendraient sur de grandes surfaces, et qu'ils empiéteraient donc largement sur les mauvais sols à dynamique superficielle et latérale. Il était donc important de tester cette expérimentation dans les conditions les plus sévères. Par contre, l'extension des vergers serait bien plus limitée, et il y avait tout intérêt à se donner le maximum de chances de succès en utilisant les sols profonds et bien drainants à dynamique verticale. Les vergers étiques, dont les racines sont aux prises avec la nappe phréatique ou les horizons hydromorphes des sols à dynamique superficielle et latérale, sont suffisamment répandus en Guyane pour justifier ce choix.

L'implantation du verger a commencé par le creusement de 480 trous de 0,8 m x 0,8 m x 0,8 m, selon un maillage régulier de 7 m x 5 m (du 30 mai au 22 juin 1979). Les déblais de chaque trou ont été mélangés avec 1,5 kg de scories phosphato-potassiques PK 12-12. La plantation des jeunes arbres a été faite du 27 juin au 10 juillet.

Sur initiative du gestionnaire de l'aménagement, un couvert herbeux de *Brachiaria USDA* a été mis en place entre les arbres à partir du 18 décembre 1979. Cette espèce fourragère s'est particulièrement bien développée sur ces sols à drainage vertical, et pendant les premières années, l'aménagement testé est constitué par un couvert herbeux dense, dans lequel l'influence des arbres se renforce progressivement. Pour limiter le développement du *Brachiaria*, celui-ci est traité périodiquement au gyrobroyeur attelé.

La problématique hydrologique du bassin C a largement été évoquée en Troisième Partie (§3.3.3) : ce bassin comporte 100% de sols à drainage vertical, et le témoin B utilisé pour l'appariement n'en compte que 10%. En validations croisées durant l'*Epoque Verte*, les reconstitutions par corrélation linéaire ou bilinéaire des volumes annuels n'avaient pas permis d'approcher les valeurs observées à mieux que 30%. L'approche globalisante au pas décadaire s'est révélée plus performante (10% sur les volumes), mais la moyenne des écarts par décade reste forte, de l'ordre de 30%. Les prédictions des volumes écoulés en forêt naturelle seront donc affectées d'une forte variance, et la signification des modifications sera facilement mise en cause.

5.5.1 LES ECOULEMENTS DE CRUE

Les estimations des effets de l'aménagement font l'objet du tableau 5.5.01. Le calcul crue par crue étant trop imprécis pour ce bassin, on a utilisé deux modes de prédiction seulement pour les écoulements sous forêt, la régression par décade et la courbe des doubles cumuls. Cette courbe des doubles cumuls présente une forme en S peu habituelle (figure 5.5.01), et selon laquelle il y aurait 3 phases successives en *Epoque Jaune* sur ce bassin : une période de forte augmentation des écoulements la première année (1980), suivie par une période correspondant approximativement aux années 1981 et 1982, pendant laquelle le tracé s'infléchit, ce qui correspond à une réduction de l'augmentation. Puis, de façon originale sur le dispositif ECEREX, l'année 1983 est marquée par une nouvelle augmentation de la pente et une recrudescence des écoulements.

Les calculs faits à partir de la régression par décades confirment cette tendance. Il faut noter toutefois que les 2 estimations sont très différentes et, par exemple en 1980, le gain d'écoulement sur la forêt naturelle calculé par corrélation est de +73%, alors que selon les doubles cumuls le gain serait de +172%. Cette divergence des résultats avait déjà été constatée en *Epoque Rouge*, durant laquelle les mêmes estimations avaient abouti à des gains respectifs de +80% et de +131% (dernière ligne du tableau 5.5.01).

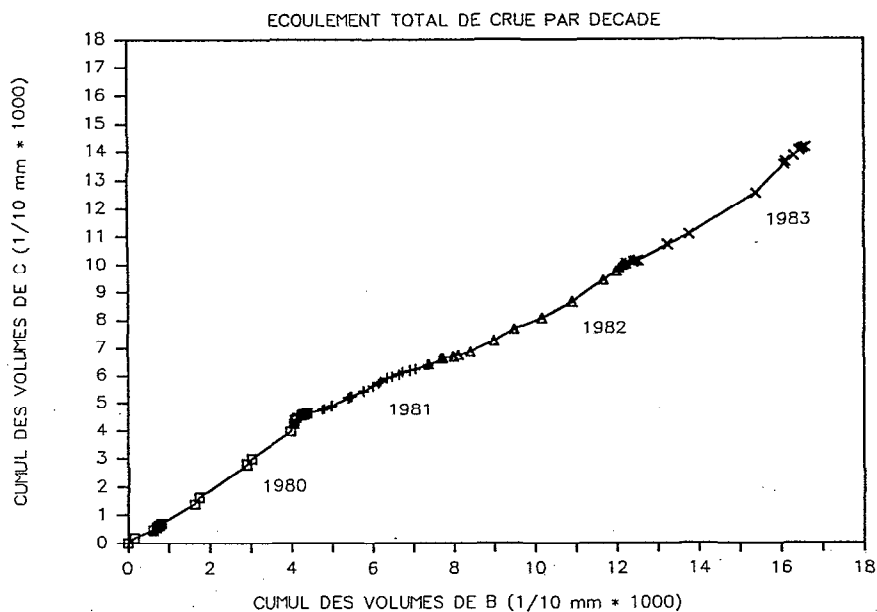


Figure 5.5.01 : Doubles cumuls des Ecoulements Totaux de Crue (ETC) du témoin B et du bassin C, discrétisés par décade, en *Epoque Jaune*. (janvier 1980 - décembre 1983)

Tableau 5.5.01 : Ecoulements Totaux de Crue du bassin C en *Epoque Jaune* (1980 - 1983)
 Comparaison des écoulements observés et des écoulements calculés en forêt naturelle,
 selon différentes estimations.

Période	Écoulements de Crue observés (Verger) (LeVg mm)	Écoulements de crue calculés sous forêt (LeFo mm)	gain calculé (mm)	LeVg / LeFo
1980	463	Cor. Dec. 267	196	1,73
		Dble Cum. 170	293	2,72
1981	176	Cor. Dec. 151	25	1,17
		Dble Cum. 116	60	1,52
1982	364	Cor. Dec. 223	141	1,63
		Dble Cum. 188	176	1,94
1981-82	540	Cor. Dec. 374	166	1,44
		Dble Cum. 304	236	1,78
1983	409	Cor. Dec. 281	128	1,46
		Dble Cum. 169	240	2,42
<i>Epoque Rouge</i>	682	Cor. Dec. 378	304	1,80
		Dble Cum. 295	387	2,31

L'évolution des gains d'écoulement avec le temps obtenue à partir de la régression décadaire est la suivante :

1980	+73%
1981	+17%
1982	+63%
1983	+46%

Hormis le cas particulier de 1981, on peut considérer qu'il y a une diminution continue des gains avec le temps. Cette année 1981 est effectivement très particulière comme en témoigne la très faible lame écoulée (176 mm). Il est bien certain que la régression décadaire calée sur une période plutôt humide (1977 et 1978) et sur un bassin témoin qui ne présente pas les analogies fonctionnelles requises constitue un très mauvais modèle en conditions déficitaires et que la prédiction de l'année 1981 est peu fiable. Plus encore, si l'on calcule les valeurs de la prédiction de l'écoulement en forêt aux bornes de l'intervalle de confiance [5%, 95%], on constate que les gains calculés en 1980, 1982 et 1983 ne sont pas significativement différents (tableau 5.5.02 et figure 5.5.02). On ne peut que constater une tendance générale des gains à se réduire avec le temps, sans pouvoir affiner davantage le diagnostic.

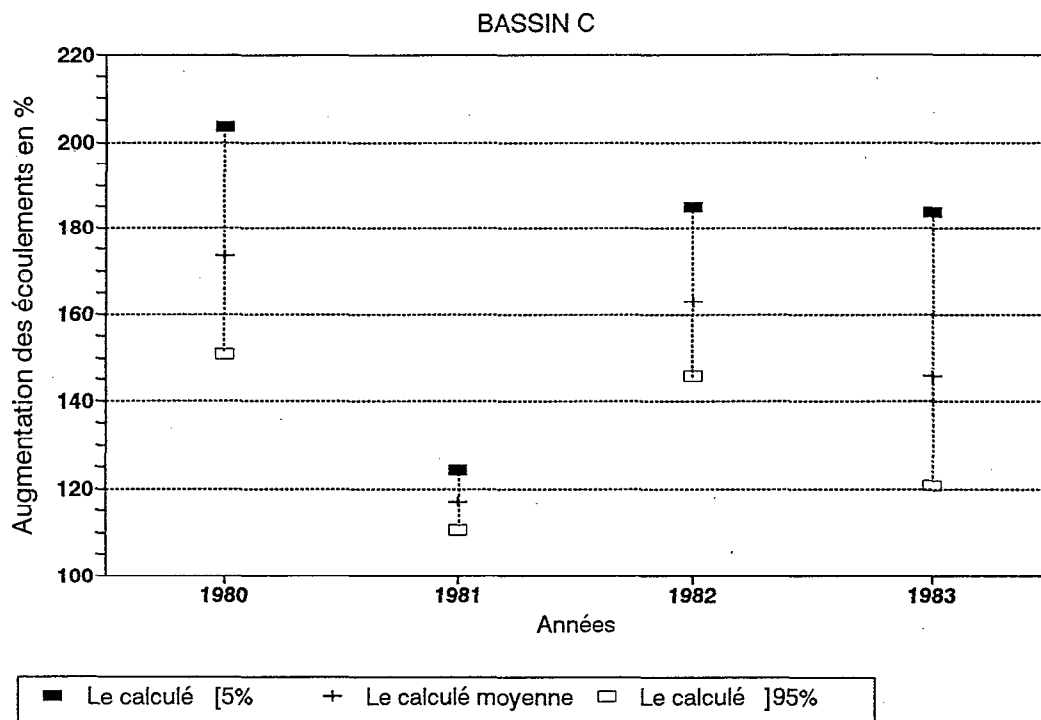


Figure 5.5.02 : Gains d'écoulements annuels par rapport à la forêt primaire sur le bassin C .
 Rapports de l'écoulement total de crue observé et des écoulements sous forêt calculés par régression
 (valeurs moyenne et valeurs aux bornes [5%, 95%])

Tableau 5.5.02 : Lames écoulées annuelles sur le bassin C et gains calculés par rapport à la forêt primaire.

	Le obs.	Le cal. gain		Le cal. gain		Le cal. gain	
	mm	moyen	moyen	5%	5%	95%	95%
	mm	mm		mm	mm	mm	mm
1980	463	267	1,73	227	2,04	307	1,51
1981	176	150	1,17	141	1,24	159	1,11
1982	364	223	1,63	197	1,85	249	1,46
1983	409	280	1,46	222	1,84	338	1,21

5.5.2 LES DEBITS DE POINTE

Selon la courbes des doubles cumuls (figure 5.5.03 et tableau 5.5.04), l'évolution des débits de pointe est tout à fait parallèle avec celle des lames écoulées : les débits maximum sont fortement augmentés en 1980 (+173%), puis une réduction s'amorce en 1981 (+51%), suivie par une nouvelle augmentation en 1982 et 1983 (+93% et +142%).

L'estimation de l'évolution des débits de pointe par régression a été faite séparément pour les années 1980, 1981-82 et 1983 (figure 5.5.04 et tableaux 5.5.05 et 5.5.06).

- Les débits sont en augmentation très sensible en 1980 : par rapport à la prédiction de la valeur centrale des pointes sous forêt Q_m , la plupart des crues sont en augmentation de plus de 100% (moyenne des gains = +129%). On peut noter que cette estimation n'est pas biaisée par des gains élevés qui affecteraient seulement les fortes crues, puisque la prédiction est de +161% sur une sélection limitée aux événements observés de plus de $20 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ (seuil correspondant à des crues fortes pour ce bassin) La moyenne des gains estimés par rapport à Q_{95} est faiblement négative (-14,7%), mais le tiers des crues conserve encore un gain positif avec cette estimation assez sévère.
- En 1981, et surtout en 1982, la réduction des gains est très sensible avec des gains moyens par rapport à Q_m de 23,3% et de 2,3%. La plupart des fortes crues conserve des gains positifs (100% d'entre elles en 1981 et 75% en 1982), mais le gain moyen est en réduction très sensible par rapport à l'année 1980 (respectivement +47,6% et +15,6%). Rapporté à Q_{95} , plus aucun débit de pointe n'est en augmentation significative .
- En 1983, l'augmentation annoncée par la courbe des doubles cumuls est également prise en compte par la régression. Mais, selon cette dernière estimation, le gain moyen "toute crues" est beaucoup plus modeste qu'avec les doubles cumuls : +71,8% au lieu de +142%. On peut noter toutefois que les 2 estimations sont convergentes en limitant le calcul par régression aux crues observées de plus de $20 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ (les gains valent respectivement +141% et +142%).

Que ce soit pour l'analyse des volumes écoulés ou celle des débits maximum de crue, le bassin C est un cas difficile : outre le problème purement hydrologique du piètre prédicteur utilisé, l'aménagement lui-même est très complexe. L'occupation du sol est une prairie, qui se transforme peu à peu en verger. Cette prairie, très touffue la plupart du temps, était rasée à intervalles de temps variables, en fonction de la disponibilité du gyrobroyeur.

En terme de recherche finalisée pour le développement, cette indétermination est cependant peu gênante, car les sols à drainage vertical présentent peu de contraintes agronomiques,...et malheureusement, ils sont peu fréquents en Guyane. D'autre part, il faut considérer que les gains relatifs importants qui affectent les lames écoulées et les débits de pointe correspondent à des grandeurs qui restent bien inférieures à celles des bassins développés en partie ou en totalité sur des couverture pédologiques à dynamique superficielle et latérale.

Tableau 5.5.03 : Débits de pointe du bassin C en *Epoque Jaune*, en $l.s^{-1}.ha^{-1}$

Bassin versant	C
5 plus fortes crues	
1	109
2	91,3
3	76,4
4	52,8
5	52,4
Nombre de crues	
$\geq 100 l.s^{-1}.ha^{-1}$	1
$\geq 75 l.s^{-1}.ha^{-1}$	2
$\geq 50 l.s^{-1}.ha^{-1}$	6
$\geq 25 l.s^{-1}.ha^{-1}$	25
$\geq 10 l.s^{-1}.ha^{-1}$	60

Tableau 5.5.04 : Augmentation des débits de pointe sur le bassin C en *Epoque Jaune* (1980 - 1983), estimée par les pentes des doubles cumuls (crues $> 10 l.s^{-1}.ha^{-1}$ sur le témoin B)

R, R ₀ et R ₁ = pentes des doubles cumuls			R = R ₁ /R ₀
<i>Epoque Verte</i>	(R ₀)	0,39	
<i>Epoque Jaune</i>	1980 (R ₁)	1,06	2,73
<i>Epoque Jaune</i>	1981 (R ₁)	0,59	1,51
	1982 (R ₁)	0,75	1,93
	1981-82 (R ₁)	0,69	1,77
<i>Epoque Jaune</i>	1983 (R ₁)	0,94	2,42

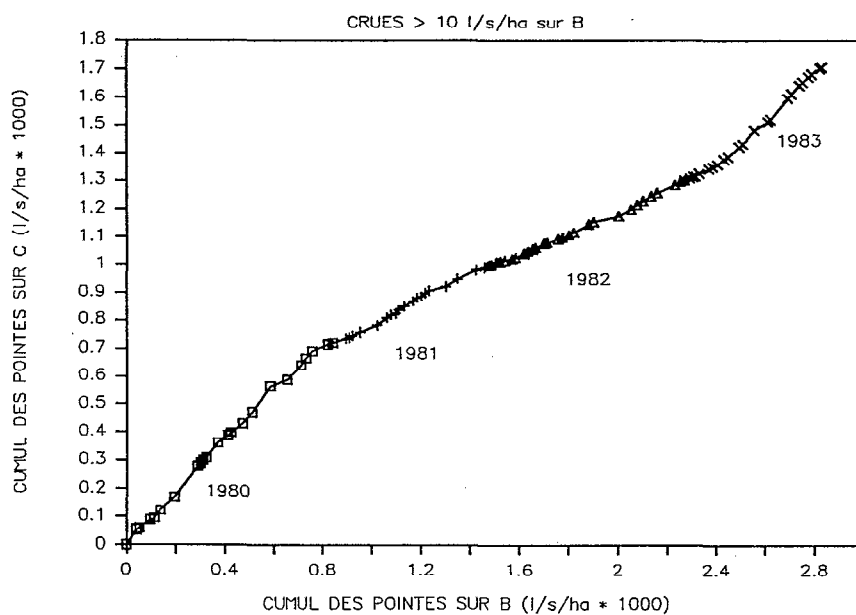
Figure 5.5.03 : Doubles cumuls des débits de pointe du témoin B et du bassin C en *Epoque Jaune*

Tableau 5.5.05 : Augmentation des débits de pointe sur C par rapport à la forêt naturelle en *Epoque Jaune*

Estimation des gains* par rapport à la prédiction de la valeur centrale du débit de pointe en forêt

bassin C	toutes crues				crues observées > 20 l.s ⁻¹ .ha ⁻¹			
	moyenne : des gains:	nombre : de crues :	nombre et % de crues avec gain positif	%	moyenne : des gains:	nombre : de crues :	nombre et % de crues avec gain positif	%
	en % :	n :	n'	%	en % :	n :	n'	%
1980	129 :	22 :	21	95 %	161 :	15 :	15	100 %
	:	:			:	:		
1981	23,3 :	20 :	13	65 %	47,6 :	4 :	4	100 %
1982	2,3 :	27 :	15	56 %	15,6 :	3 :	4	75 %
1981-82	11,3 :	47 :	28	60 %	31,2 :	8 :	7	88 %
	:	:			:	:		
1983	71,8 :	22 :	18	82 %	141 :	7 :	7	100 %

Tableau 5.5.06 : Augmentation des débits de pointe sur C par rapport à la forêt naturelle en *Epoque Jaune*Estimation des gains* par rapport à la prédiction "haute" des débits de pointe en forêt (Q₉₅),
correspondant à la fréquence au non-dépassement F = 0,95

bassin C	toutes crues				crues observées > 20 l.s ⁻¹ .ha ⁻¹			
	moyenne : des gains:	nombre : de crues :	nombre et % de crues avec gain positif	%	moyenne : des gains:	nombre : de crues :	nombre et % de crues avec gain positif	%
	en % :	n :	n'	%	en % :	n :	n'	%
1980	-14,7 :	22 :	7	32 %	-10,4 :	15 :	7	47 %
	:	:			:	:		
1981	-60,6 :	20 :	0	0 %	-32,7 :	4 :	0	0 %
1982	-67,3 :	27 :	0	0 %	-42,2 :	3 :	0	0 %
1981-82	-64,5 :	47 :	0	0 %	-37,5 :	8 :	0	0 %
	:	:			:	:		
1983	-46,2 :	22 :	2	9 %	-0,7 :	7 :	2	29 %

(*) gain = (Q sol nu obs. - Q forêt cal.) / Q forêt cal * 100

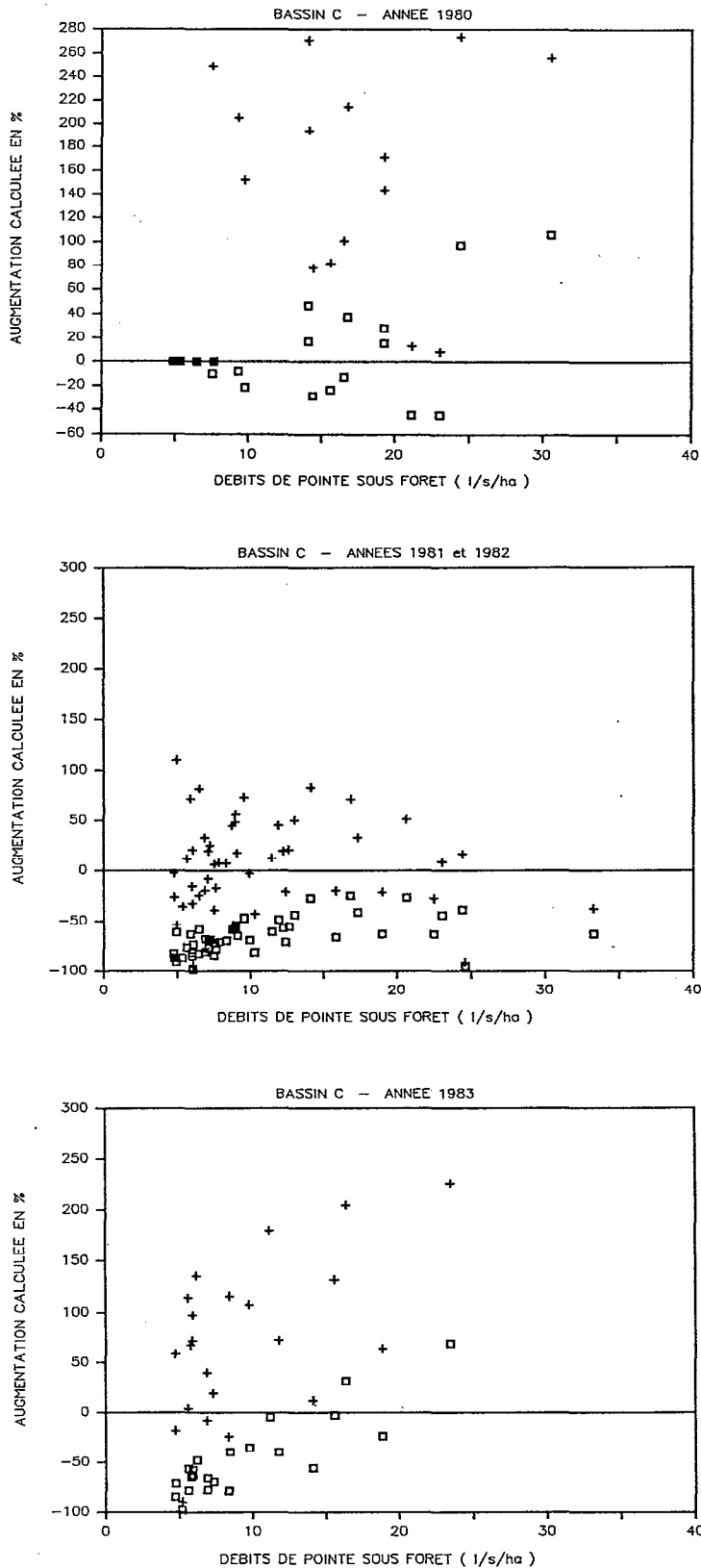


Figure 5.5.04 : Augmentation des débits de pointe sur le bassin C en *Epoque Jaune*, (années 1980, 1981-82 et 1983), à partir des corrélations avec le témoin B
valeurs en %, rapportées au débit sous forêt

"+" : estimation par rapport à la prédiction de la valeur centrale des débits sous forêt

"■ blanc" : estimation par rapport à la prédiction Q_{95} (débit de la fréquence au non-dépassement $F=0,95$)

5.6 CONCLUSION A L'ETUDE DES BASSINS AMENAGES

Cette analyse systématique des résultats par bassin ou par groupe de bassins a montré à quel point l'évaluation des effets hydrologiques provoqués par les aménagements pouvait être délicate. Par rapport à la période en sol nu pendant laquelle une *Epoque Rouge stabilisée*, considérée comme stationnaire, a pu être mise en évidence, les aménagements suivis en *Epoque Jaune* constituent des écosystèmes en évolution permanente. La seule exception notable est la prairie pâturée de *Digitaria swazilandensis* du bassin A qui aurait pu être considéré comme un aménagement stabilisé et non évolutif. Néanmoins, les résultats par année et les tests d'homogénéité (ellipses de Bois) ont conduit à scinder l'*Epoque Jaune* de ce bassin en 2 périodes constituées par les années *Jaunes 1 et 2*, et les années *Jaunes 3 et 4* (Cf. §5.1.1 et figures 5.1.03 et 5.1.04).

Dans le dessein d'une présentation comparative des résultats en *Epoques Rouge et Jaune*, on est confronté au problème de la variabilité interannuelle : ni la période en sol nu, ni les différentes *Epoques Jaunes* ne sont contemporaines sur les différents bassins expérimentaux et celles-ci ont des durées différentes. Or, la variabilité des écoulements est forte d'une année sur l'autre, et on rappelle que, par exemple, les écoulements du témoin B ont varié entre 652 mm en 1979 et 300 mm en 1981 (Cf. §2.4.4.2). Une comparaison interannuelle des gains calculés exprimés en lame d'eau est donc dépourvue de sens. La comparaison portera donc sur les gains relatifs, exprimés en % de l'écoulement de l'écosystème naturel.

Par ailleurs, plusieurs méthodes (en général 3), ont été utilisées précédemment pour reconstituer les écoulements naturels des bassins aménagés. Pour une présentation synthétique, on peut choisir comme référence soit la moyenne des gains calculés par les 3 procédés, soit n'en retenir qu'un seul supposé être le meilleur. Le premier choix offre l'avantage du lissage, mais conduit à créer une nouvelle série de résultats numériques. La deuxième solution, que nous avons adoptée, permet au lecteur de retrouver les résultats déjà cités et de situer ceux-ci sur les figures et dans les tableaux correspondants des *Epoques Rouge et Jaune*.

Si, pour un même bassin et pour une année donnée, les gains obtenus par différents modes de calculs peuvent différer sensiblement, on a constaté que les différentes prédictions du gain évoluaient dans le temps de manière quasi parallèle. Dans un récapitulatif temporel aussi peu biaisé que possible, il importe donc, pour un bassin donné, de se tenir à un seul et même procédé de calcul pendant toute la période d'expérimentation.

On a retenu le gain calculé avec la prédiction qui s'était avérée la plus performante pendant les tests de calage et de validation croisés (Cf. 3.3), c'est à dire la régression linéaire crue par crue pour G et H, la régression bilinéaire crue par crue pour A, D, et E et la régression par décade pour C, I et J (tableau 3.3.10).

L'ensemble des résultats concernant l'évolution des écoulements des bassins expérimentaux est repris dans le tableau 5.6.01. Les bassins y sont présentés dans l'ordre des écoulements croissants en milieu naturel, c'est à dire que la consistance des prédictions s'améliore en allant vers le bas du tableau. Pour tous les bassins, les prédictions sont significativement différentes entre elles d'une année sur l'autre au risque 0,1, sauf pour C, dont les gains calculés en années *Jaunes 1, 3 et 4* ne diffèrent pas significativement, et pour I.

5.6.1 EFFETS DES EXPERIMENTATIONS SUR LES VOLUMES ECOULES

Tableau 5.6.01 : Augmentation des Ecoulements Totaux de Crue sur les bassins expérimentaux ECEREX,
en pourcentage des écoulements sous forêt primaire.
(débits naturels reconstitués par corrélation)

Bassin aménagement réalisé	Epoque Rouge	E.Rouge stab.	Année Jaune 1	Année Jaune 2	Année Jaune 3	Année Jaune 4	Année Jaune 6
C défrichement puis verger + prairie	+75%	+146%	+73%	+17%	+63%	+46%	:
I abattis traditionnel	--	--	+23%	+30%			:
E exploitation intensive puis recrû	--	--	+4%*	+26%	+2%	-6%	:
D défrichement puis recrû	+104%	+96%	+40%**	+32%	+16%		:
A défrichement puis prairie pâturée	+90%	+112%	+59%	+63%	+47%	+27%	:
J défrichement puis fourrage/framirés	+59%	+61%					:
G défrichement puis pins caraïbes	+81%	+92%	+62%	+33%			: -12%
H défrichement puis eucalyptus	+63%	+66%	+47%	+12%			: -8%

* : juin à décembre

** : août à décembre

- 1 La préparation du terrain selon le protocole dit du "défrichement agricole" (mise à nu du sol à la lame forestière montée sur un boteur à chenilles avec arrachage des souches) s'est traduite sur tous les bassins par une augmentation considérable de l'écoulement par rapport au milieu naturel (de 60 % à 100 % selon les estimations les plus consistantes).
- 2 Les augmentations les plus fortes en termes de gains relatifs affectent les bassins aux écoulements naturels les plus faibles. Gains relatifs et potentialités d'écoulements évoluent en sens contraire (Cf. figure 4.4.01).
- 3 Exprimé en volume ou en lame d'eau équivalente, le gain d'écoulement résulte de la combinaison de 2 facteurs : le gain relatif (caractéristique "interne" liant le bassin et le témoin apparié) et la valeur de l'écoulement pour l'année considérée (variabilité climatique d'origine "externe"). Cette combinaison a abouti à des valeurs d'écoulement supplémentaire en *Epoque Rouge* qui ont varié entre 244 mm (sur le bassin D en 1981) et 762 mm (sur le bassin A en 1979), cette dernière valeur constituant le plus fort gain jamais signalé dans la littérature. En restant dans cette logique, on peut noter qu'il eut été possible de "mieux faire" : le défrichement du bassin G en 1979 (écoulement total de crue de 1138 mm cette année là) dont le gain relatif calculé en *Epoque Rouge* est de 81 %, aurait amené un écoulement supplémentaire de 910 mm !
- 4 A l'exception du bassin C pour lequel l'évolution temporelle des gains est peu fiable, les gains d'écoulements ont une tendance générale à la baisse, lorsqu'on avance en *Epoque Jaune*, quel que soit le bassin (c'est à dire le type pédologique), ou l'aménagement considéré.

- 5 Le retour à des valeurs d'écoulement proches de celles de l'écosystème forestier est réalisé 7 années après le défrichement, sur les plantations de pins et d'eucalyptus. Sur le recrû naturel après défrichement agricole (bassin D), une évolution semblable est prévisible, mais non encore atteinte 4 ans après le traitement (+16 % en année *Jaune 3*).
- 6 Sur les bassins en sylviculture (G et H), les écoulements seraient même inférieurs de façon significative (au risque 0,05) à ceux de la forêt naturelle. Toutefois, ces résultats ayant été acquis pendant une année particulièrement déficitaire, il serait hasardeux de les interpréter dans un sens exclusivement sylvicole, puisque la méthode de prédiction est appliquée dans des conditions largement différentes de celles utilisées pour son calage. Quand bien même cela ne serait pas le cas, les modifications au niveau topographie-sol interfèrent avec la nature floristique des plantations pour expliquer le nouvel équilibre.
- 7 Une considération particulière doit être accordée aux deux expérimentations qui n'ont pas modifié radicalement le complexe pédologique, en l'occurrence les scénarios de la culture itinérante sur brûlis (bassin I) et de l'exploitation forestière simple (bassin E). Dans le premier cas, l'ensemble de la couverture végétale a été détruite par le feu et le sol a été mis à nu ; mais cet état est resté très fugitif, puisque la plantation de l'abattis a immédiatement succédé au brûlis. Bien entendu, aucun engin à roues ou à chenilles n'a été utilisé pour cet aménagement. Sur E, il s'agit d'une coupe forestière sévère, débardée au tracteur à pneus, sans ménagements particuliers. Ce scénario aboutit à un bassin moins dégagé que l'abattis, et dont les sols ont subi des dégradations très violentes mais aussi très localisées. Même en admettant une extension des pistes de débardage bien supérieure à la valeur moyenne de 240 m.ha⁻¹ relevée à ARBOCEL, leur emprise représente moins de 15% de la surface totale du bassin. Le point commun des expérimentations I et E est que ces bassins ont été préservés du véritable terrassement infligé aux horizons pédologiques les plus superficiels (et en particulier à l'horizon humifère) par le défrichement à la lame, et du bouleversement des couches pédologiques profondes causé par le déracinement des souches. Ces deux bassins ayant des typologies pédologiques proches (60% de sols à dynamique verticale et 40% à dynamique superficielle), une comparaison directe des gains des 2 bassins versants est possible.

On constate que les deux expérimentations ont eu un effet décelable sur l'écoulement, qui se traduit par des gains annuels maximums de 23 % à 30%. Ces chiffres constituent l'ordre de grandeur de l'impact hydrologique provoqué par une réduction significative du couvert végétal, dont les impacts sur les sols et les répercussions associées sur l'écoulement sont faibles, sinon réduites au minimum. Il est probable que des méthodes de débardage plus douces (par transporteur sur câble) entraîneraient une révision de ces chiffres à la baisse. Le bassin E retrouve son niveau d'écoulement naturel dès la troisième année qui suit l'exploitation (+2%) et cet équilibre se maintient l'année suivante (-6%). On manque d'éléments pour qualifier l'évolution hydrologique de l'abattis après la deuxième année, mais il est clair qu'une réponse hydrologique déclinante accompagne le recrû forestier qui envahit un abattis abandonné.

- 8 La prairie (bassin A) présente un comportement spécifique : on constate bien une évolution continue des écoulements à la baisse, mais les gains se maintiennent à un niveau nettement plus élevé qu'en forêt naturelle, même après 4 années *Jaunes* (+27%). Toutes les spéculations testées à ECEREX, sauf celle du bassin A, incluent l'arbre, d'une manière ou d'une autre. Il est donc naturel d'imputer cette différence au couvert végétal, et peut-être à son utilisation (présence permanente de 8 à 10 jeunes bovins).

Les résultats obtenus sur les parcelles d'essai de 200 m² décrites en 2.2.2 (Sarrailh, 1983), montrent que l'on est dans les meilleures conditions possibles pour un pâturage puisque *Digitaria swazilandensis* planté sur le bassin A est une espèce avec laquelle les écoulements superficiels sont plutôt faibles (32% de la pluie totale sur la période 1979-1982). Seule une parcelle plantée en *Brachiaria decumbens* a ruisselé légèrement moins (29%), alors qu'avec *Brachiaria USDA* (planté entre les pieds de pomelos du bassin C), l'écoulement représentait 43% de la pluie, et que ce coefficient d'écoulement interannuel, mesuré dans les mêmes conditions et sur la même période, est monté à 50% avec *Panicum maximum* (l'herbe de Guinée) et à 61% avec *Brachiaria ruziziensis*.

5.6.2 EFFETS DES EXPERIMENTATIONS SUR LES DEBITS DE POINTE

La revue bibliographique traitant des effets sur les débits maximums instantanés de crue provoqués par des modifications de l'utilisation du sol a mis en évidence la difficulté à prédire ces effets. La dispersion naturelle des débits de pointe entre bassins appariés, beaucoup plus forte que pour les écoulements, et le fait que des modifications mineures dans les protocoles pouvaient avoir des conséquences très importantes sur ce paramètre, figurent en bonne place dans ces difficultés et dans les appréciations controversées qui ont pu être faites de ce phénomène.

Comme pour les lames écoulées, il a fallu opter pour un seul et même procédé d'estimation pour toute la période expérimentale. En l'occurrence, c'est le gain obtenu à partir des courbes de doubles cumuls des pointes ayant dépassé 10 l.s⁻¹.ha⁻¹ sur le bassin témoin qui a été retenu comme référence et porté dans le tableau 5.6.02. Ces chiffres représentent une tendance moyenne, relative à l'ensemble des crues d'une période considérée, et les gains pour une crue donnée peuvent être bien supérieurs à cette tendance moyenne. On renvoie le lecteur au chapitre correspondant pour la discussion relative à la signification statistique des gains affichés pour chaque bassin.

Les observations faites au paragraphe 5.6.1 sur la consistance des résultats sont a fortiori valables pour les débits de pointe : la prédiction est assez déficiente pour le bassin C, puis elle s'améliore nettement au fur et à mesure que l'on descend dans le tableau. Cette situation est à l'image de la qualité des régressions entre pointes des bassins appariés représentées sur les figures 4.5.6, 4.5.07 et 5.4.03 (bassin D).

Tableau 5.6.02 : Augmentation des débits maximums instantanés sur les bassins expérimentaux ECEREX, en pourcentage des débits correspondant sous forêt primaire.
(débits naturels reconstitués par les pentes des doubles cumuls)

Bassin aménagement réalisé	Epoque Rouge stab	Année Jaune 1	Année Jaune 2	Année Jaune 3	Année Jaune 4
C défrichement puis verger + pâturage	+166%	+173%	+51%	+93%	+142%
I abattis traditionnel	--	<--- +26% --->			
E exploitation intensive puis recrû	--	+13%	<---- # 0 ---->		
D défrichement puis recrû	+42%	<----- # 0 ----->			
A défrichement puis prairie pâturée	+123%	<----- +76% ----->			
J défrichement puis fourrage/framirés	+103%				
G défrichement puis pins caraïbes	+55%	+63%	+13%		
H défrichement puis eucalyptus	+17%	+53%	-10%		

- 1 Les débits de pointe subissent une augmentation sur tous les bassins versants pendant l'*Epoque Rouge stabilisée*. On retrouve quelques éléments de la "règle" qui s'est vérifiée pour les écoulements, à savoir que les gains diminuent quand les potentialités naturelles d'écoulement du bassin augmentent : les gains se réduisent quand on passe du bassin A, aux bassins J, G et H. Par contre, même en ne tenant pas compte du résultat peu orthodoxe de C, on constate que le bassin D ne suit pas cette évolution. Il faut peut-être invoquer le biais introduit par le non-synchronisme des *Epoques Rouges* et du rang des années *Jaunes* sur les différents bassins et constater que les gains sont plus faibles sur le groupe D, G et H traité en 1981 (respectivement +42%, +55% et +17%) que sur A et C traités en 1979 (+123% et +166%).
- 2 Le paramètre "débit de pointe" est très facilement influencé par les conditions du défrichement. Ainsi, les gains moyens diffèrent significativement sur G (+55%) et H (+17%) par suite d'un défrichement incomplet de la zone du talweg du bassin H.
- 3 Le plus faible impact (+13%) a été observé sur le bassin en exploitation forestière (E). On peut relativiser ce chiffre en notant que l'année *Jaune 1* de ce bassin est 1981, pendant laquelle on a enregistré des gains faibles sur les autres bassins (voir alinéa 1 ci dessus). Mais par ailleurs, il n'est pas certain que l'exploitation puisse provoquer des crues beaucoup plus fortes : certes, les pistes de débardage constituent autant de collecteurs capables d'accroître la torrencialité du bassin versant, mais le parterre est extrêmement encombré de débris végétaux susceptibles de contrarier cet effet.
- 4 Les débits de pointe des 2 recrûs établis sur une exploitation suivie d'un défrichement (D) et sur une exploitation simple (E) sont équivalents à ceux de la forêt primaire, à partir de la deuxième année après le traitement (correspondant à l'année *Jaune 1* pour D et *Jaune 2* pour E).

- 5 Les gains sont modestes sur l'abattis traditionnel testé sur le bassin I (+26%), et en tous cas sans commune mesure avec certaines valeurs enregistrées au cours des phases de préparation mécanisée du sol en *Epoque Rouge*. Mais on ne peut pas dire que cet aménagement soit sans effet sur les débits de pointe.
- 6 La réduction des pointes avec le temps est très perceptible sur les bassins plantés en pins et en eucalyptus à partir de l'année *Jaune 2*.
- 7 Comme on l'avait mis en évidence pour l'écoulement, le bassin A en pâturage présente un comportement original et clairement mis en évidence aussi bien par les doubles cumuls que par corrélation des débits avec le bassin témoin apparié. Le gain est bien stabilisé sur toute l'*Epoque Jaune* avec une valeur forte de +76%. Ce chiffre constitue l'ordre de grandeur des fortes crues (dépassant $100 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ en forêt naturelle), mais des gains doubles, et significatifs au risque 0,05 ont affecté les crues moyennes (50 à $80 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$) de ce bassin (Cf. figure 5.1.06).

La prairie pâturée est donc une spéculation qui favorise le plus nettement "l'activité hydrologique" d'un bassin versant, à la fois en termes d'abondance des écoulements et d'occurrence de crues fortes.

Pour chacun des bassins versants, il existe un algorithme de reconstitution des écoulements décennaux en *Epoque Verte*. On a utilisé ce modèle pour figurer les écarts entre lames décennales observées et lames reconstituées sous forêt, sur l'ensemble des *Epoques Verte, Rouge et Jaune*. Cette figuration analogique globale (figures 5.5.05 à 5.5.11) fournit 2 types d'informations :

- Sur l'*Epoque Verte*, elle caractérise la précision de l'opérateur utilisé par la reconstitution ;
- sur les *Epoques Rouge et Jaune*, elle donne un aperçu de l'évolution hydrologique des bassins. Sans prétendre à la rigueur d'un test statistique, cette représentation analogique permet cependant de percevoir les périodes et les bassins pour lesquels les gains calculés sont significatifs.

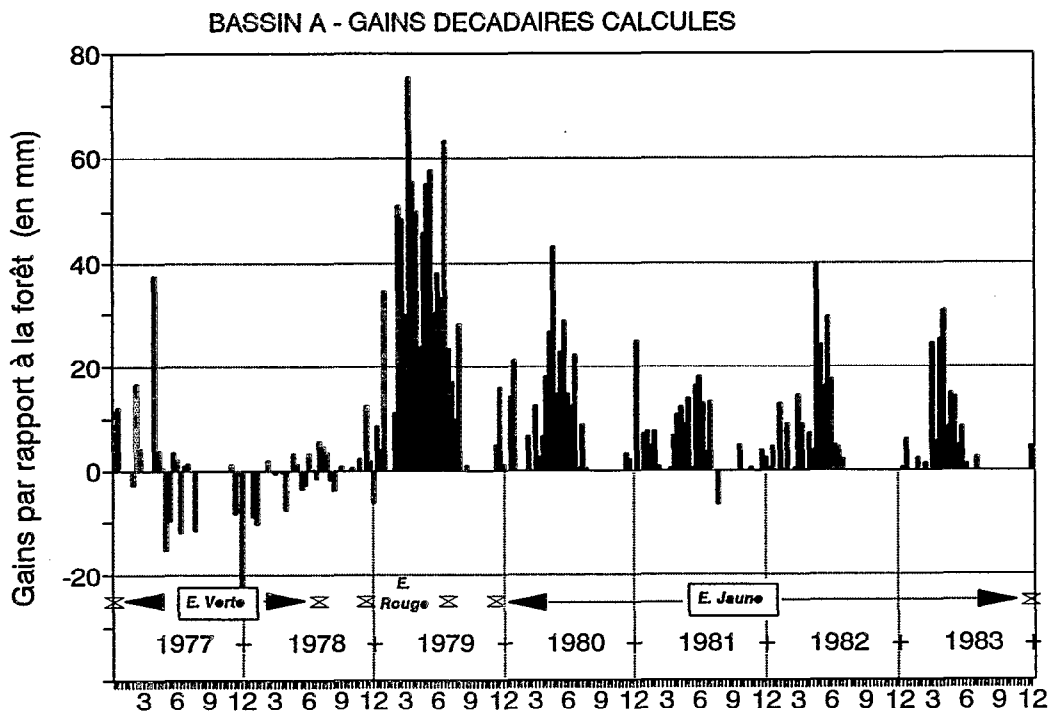


Figure 5.5.05 : Bassin A - Ecart entre lame écoulee observée et lame calculée, par décennie, (en mm)

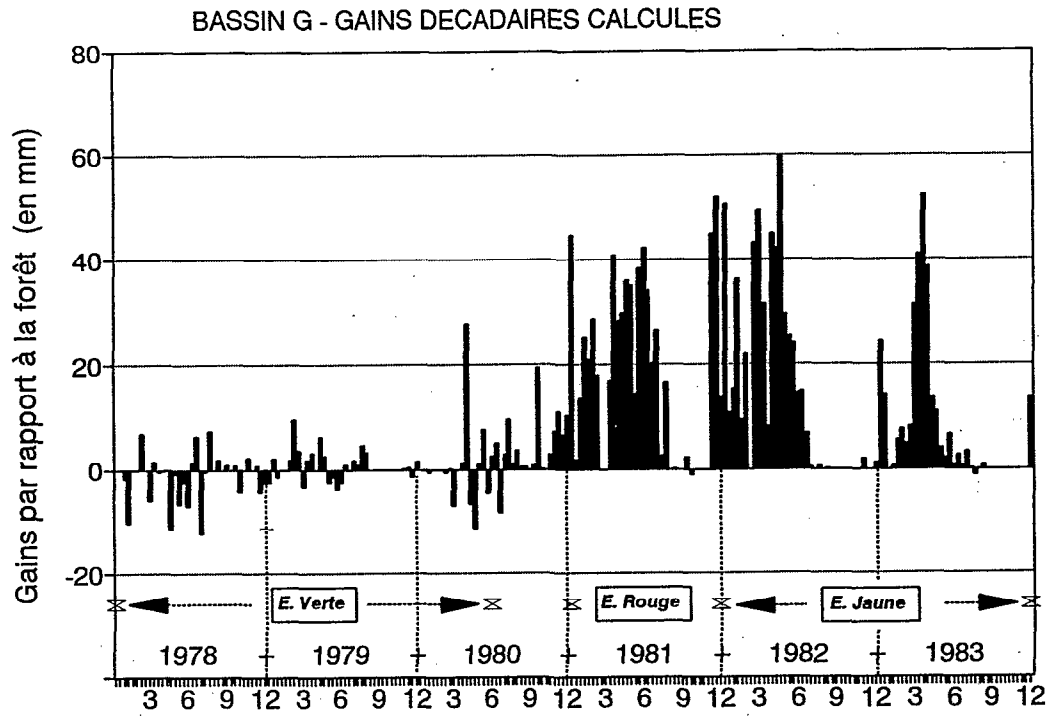


Figure 5.5.06 : Bassin G - Ecart entre lame écoulee observée et lame calculée, par décade, (en mm)

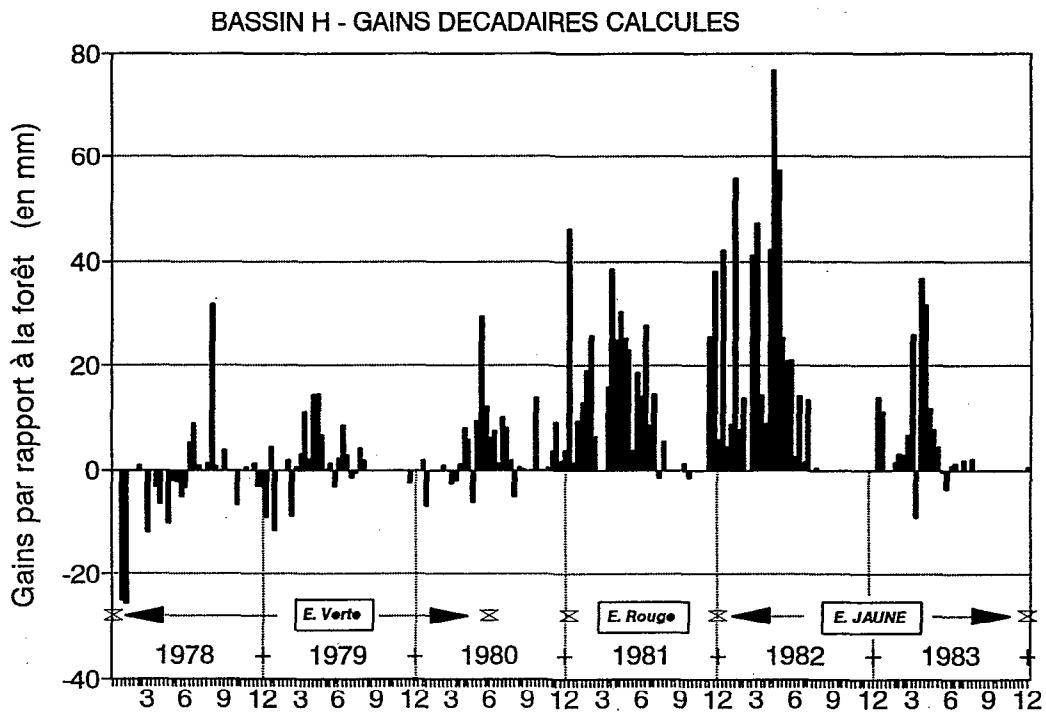


Figure 5.5.07 : Bassin H - Ecart entre lame écoulee observée et lame calculée, par décade, (en mm)

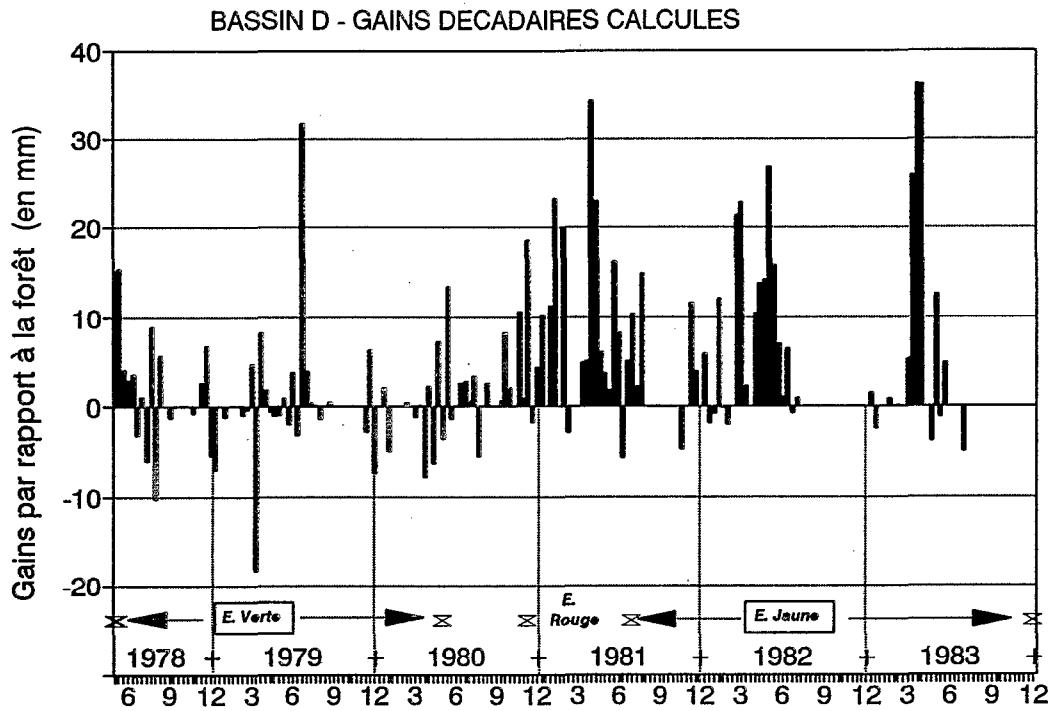


Figure 5.5.08 : Bassin D - Ecart entre lame écoulee observée et lame calculée, par décade, (en mm)

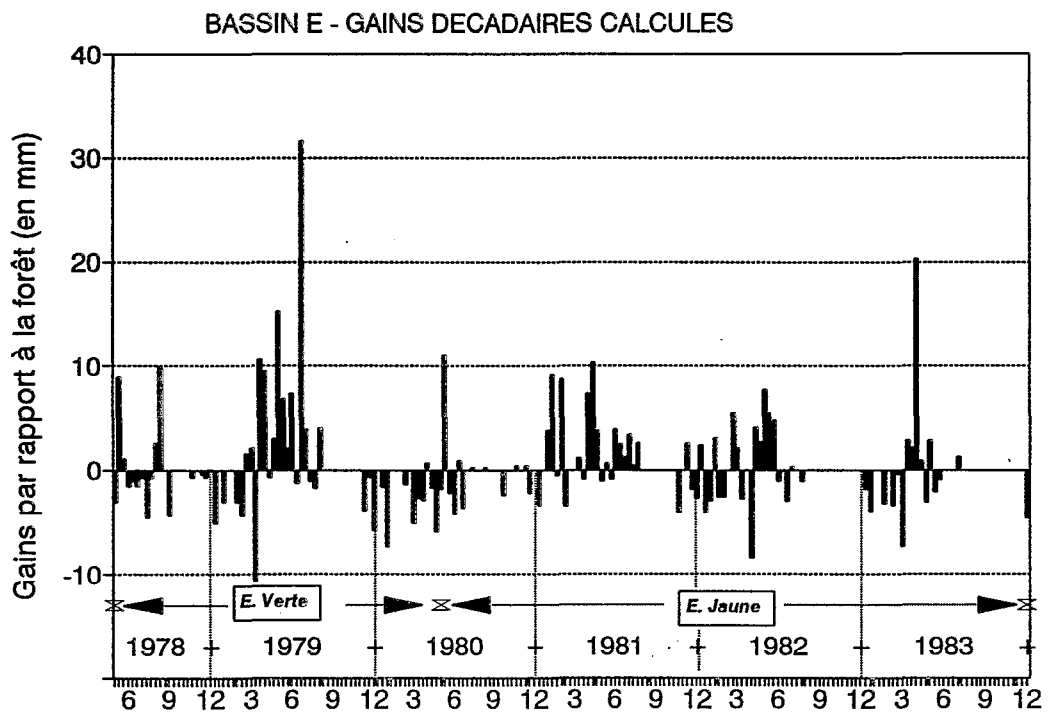


Figure 5.5.09 : Bassin E - Ecart entre lame écoulee observée et lame calculée, par décade, (en mm)

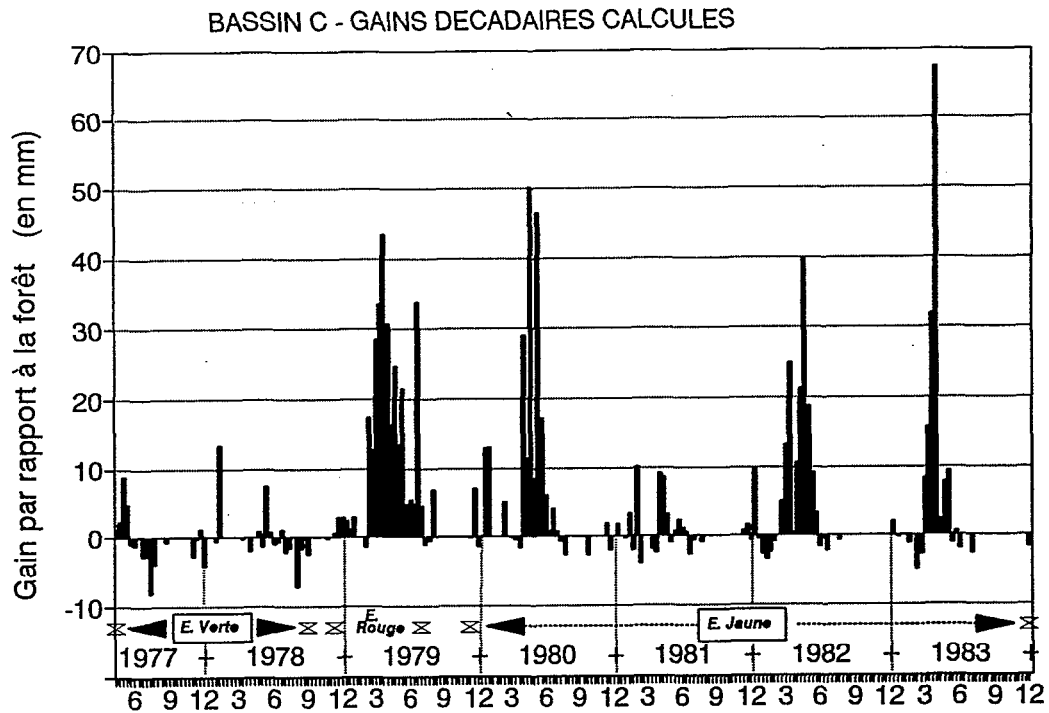


Figure 5.5.10 : Bassin C - Ecarts entre lame éoulée observée et lame calculée, par décade, (en mm)

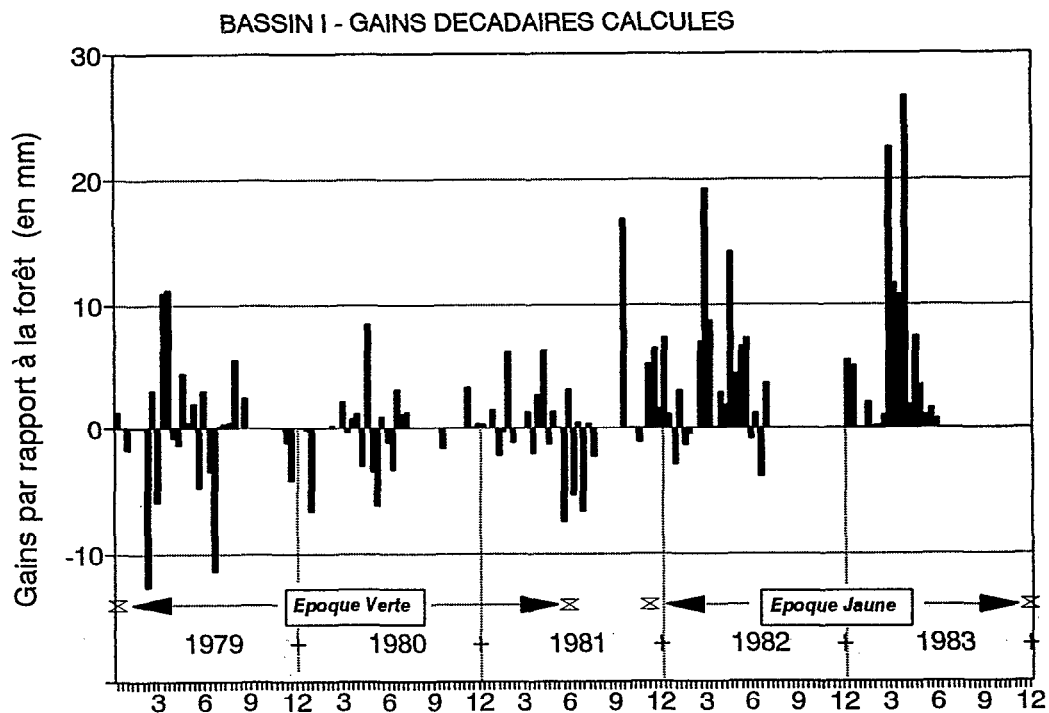


Figure 5.5.11 : Bassin I - Ecarts entre lame éoulée observée et lame calculée, par décade, (en mm)

SIXIEME PARTIE :

CONCLUSIONS

Cette dernière partie de conclusions présente un bilan scientifique de l'expérimentation, les résultats hydrologiques, et les directions prospectives d'une hydrologie forestière en milieu tropical humide.

- Pour terminer, il nous a paru indispensable de réfléchir à la signification de cette étude expérimentale longue et lourde, faite sur un modèle réduit du scénario du défrichement papetier et du développement agricole en Guyane. Cette réflexion porte sur la signification dimensionnelle de l'étude et, en suite logique, sur sa signification hydrologique (pages 329 à 332). On rappelle également les performances et les limitations de la méthodologie utilisée (page 333).

- On trouvera ensuite les enseignements majeurs, tirés de cette étude :
 - La nécessité de prendre en compte la variabilité hydrologique du milieu naturel, préalablement à toute spéculation sur les effets induits par des changements d'utilisation du sol (page 334).
 - Une vision affinée du protocole expérimental (pages 335-337).
 - Des résultats numériques, quantifiant les changements hydrologiques provoqués par l'expérimentation, mis en rapport avec les 2 considérations précédentes (pages 338-339).

- Enfin les perspectives d'une recherche en hydrologie forestière sont ébauchées (pages 340-341).

ECEREX : TOUT UN PROGRAMME !

Parmi les aspects en liaison directe avec la présente étude, le thème "botanique et physiologie végétale" tient une place importante. Des moyens humains considérables ont été engagés dans ce domaine, et un très grand nombre de travaux publiés sur la statique et la dynamique de l'écosystème forestier (composition floristique, phytomasse, accroissement, production de litière, dynamique des chablis, régénération en forêt primaire, etc). Les résultats de bioclimatologie, en particulier ceux provenant des mesures d'interception de la pluie par la voûte forestière, et les estimations de l'évapotranspiration potentielle, ont également été utilisés dans la présente étude hydrologique. L'approche pédologique, fondée sur l'analyse structurale des couvertures pédologiques, s'est avérée particulièrement pertinente pour caractériser le milieu naturel, comprendre son organisation spatiale et expliquer la diversité des comportements hydrologiques dans le modelé des schistes de Bonidoro. Les rapports étroits de cette discipline avec nos préoccupations seront repris et explicités plus loin.

Les études hydrologiques et le volet associé du suivi de l'érosion, ont bénéficié d'investissements importants et d'un effort soutenu pendant 8 ans pour assurer l'exploitation régulière et rigoureuse du dispositif. Les infrastructures des bassins versants expérimentaux et des aménagements ont constitué, *littéralement*, la partie la plus en vue du programme ; pour un observateur distant, la composante "bassin versant" était dominante dans le programme, et elle aura sans nul doute contribué largement à la "visibilité" d'ECEREX.

LA SIGNIFICATION DIMENSIONNELLE DE L'EXPERIMENTATION ECEREX

Le dispositif expérimental principal était composé de 10 bassins versants, d'une superficie unitaire comprise entre 1 et 2 hectares, et d'installations complémentaires constituées par des parcelles de 100 à 400 m². Un petit bassin versant de 4,5 km² a fait l'objet d'un suivi pendant un an. Les aménagements ont été réalisés sur des surfaces de l'ordre de l'hectare, avec des possibilités de recoupement et de contrôle aux échelles inférieure de 10⁻² ha (les parcelles) et supérieure de 10² ha (le petit bassin versant).

Le fait qu'ECEREX soit un **modèle réduit** du phénomène que l'on prétend étudier (qui est le défrichement papetier d'un permis de 300 000 ha) nous amène à faire quelques commentaires à propos de "*l'effet d'échelle*", pour prévenir toute extrapolation inconsidérée des résultats à partir de la règle de trois, sans pour autant tomber dans l'excès inverse, qui serait de vider cette entreprise de toute signification.

La modélisation fonctionnelle d'un système physique ou biologique à une magnitude espace-temps donnée, selon des lois établies à partir de mesures faites à des ordres de magnitude très inférieurs, sur un objet déclaré similaire, nous paraît un concept erroné(*). On peut concevoir qu'il existe dans les coffres d'un Grand Architecte, un très long rouleau sur lequel serait inscrite l'Equation Universelle de l'Ordre des Choses Vivantes et Inertes entre le Proton et la Galaxie (il faut tout de même se limiter). Cette Equation se présente comme une combinaison de termes (en nombre fini ?), chacun d'entre eux prenant en compte un mécanisme ou un processus fonctionnel (aujourd'hui identifié ou encore inconnu). L'Equation est la même, quelle que soit la dimension de l'Objet qu'elle prétend décrire, mais chaque terme est affecté d'un paramètre de pondération, qui est fonction de cette dimension. La somme des paramètres est égale à 1, et chaque paramètre varie dans l'intervalle ouvert]0,1[, puisque dans un système dimensionnel donné, aucun processus n'est jamais seul en cause, ni totalement absent, mais qu'il peut être dominant, moyen ou infiniment petit. On peut imaginer un

* C'est là notre "intime conviction"

chercheur comblé, ayant le milieu naturel pour objet d'étude, qui aurait réussi à mettre au point un modèle déterministe parfait (sans résidus) pour un certain processus. Notre homme sera incontestablement un Savant respectable, si l'algorithme qu'il maîtrise est responsable de 80% ou de 90% de la variance de l'objet étudié. Son crédit sera sérieusement entamé s'il s'aventure dans un univers dimensionnel où ces lois n'expliqueraient plus que 20% de cette variance, et toute sa Science ne serait virtuellement plus d'aucune utilité, à une dimension où cette pondération serait de 10^{-3} .

Il nous paraît clair, que si l'objectif d'une recherche est la connaissance d'un système identifié à une certaine dimension et que, pour des raisons diverses, (impératifs météorologiques ou contraintes financières), on est amené à étudier un modèle réduit à une dimension très éloignée, le retour à l'objectif initial risque de s'avérer sans fondements, même si la recherche sur le modèle réduit a été couronnée de succès, ce qui ne serait déjà pas si mal !

Dans le cadre général de l'étude du biosystème "forêt tropicale humide" et de sa transformation par l'homme sur de grandes étendues, certains objectifs sont manifestement hors de portée d'une expérimentation sur bassins élémentaires, comme par exemple l'étude des conditions d'établissement du recrû naturel et de sa composition floristique sur un hectare. Un hectare de forêt primaire, défriché sans ménagements par des engins, représente sans nul doute un traumatisme spectaculaire infligé à l'environnement, mais revient à se brûler accidentellement au troisième degré avec une pointe métallique chauffée à blanc : c'est une expérience douloureuse pour le sujet, mais qui ne met en aucun cas sa vie en danger. On sait qu'il en va tout autrement dans le cas de brûlures beaucoup plus superficielles, mais affectant plus de 30% de la surface de peau du sujet. C'est la raison pour laquelle le programme ECEREX dans ses aspects les plus largement écologiques, associait des études "diffuses" menées sur l'ensemble de la zone, et des études "captives" conduites sur les bassins expérimentaux.

L'hectare, c'est le domaine dimensionnel privilégié de l'expérimentation agronomique, et c'est sur cette base que doivent être analysés les motivations et les résultats acquis sur les bassins versants ECEREX. Cette dimension reste voisine, quoique légèrement inférieure à celle des expérimentations fines de recherche forestière (coupes et plantations), qui intéressent généralement des domaines compris entre 10 et 100 hectares.

La méthode du modèle réduit constitue généralement l'alternative la moins mauvaise et la plus sensée. A la question posée de l'évaluation des impacts d'une catastrophe écologique, il serait inconcevable de proposer de provoquer celle-ci pour en étudier scientifiquement les effets. Le Candide ne manquerait pas de rétorquer qu'il existe suffisamment d'endroits où la modification radicale et en vraie grandeur des écosystèmes est une réalité, et qu'il serait donc malheureusement possible d'étudier directement le phénomène à son échelle propre. Bien entendu, les faits s'accordent mal avec ces considérations de bon sens élémentaire.

- Une première raison, conjoncturelle au cas de la Guyane, est qu'en 1976, il n'existait pas de grandes surfaces défrichées mécaniquement et vouées aux aménagements prévus par le Plan Vert. Il fallait donc simuler ces conditions dans une expérimentation pour pouvoir les étudier.
- Mais la véritable raison, qui justifie le recours au modèle réduit expérimental, tient au fait que les acteurs de la recherche ne contrôlent absolument plus les traitements sur des bassins versants, dès que les surfaces excèdent quelques hectares, ou quelques dizaines d'hectares dans le meilleur des cas. L'historique des suivis hydrologiques de systèmes en vraie grandeur (sur des surfaces allant de quelques km² à quelques dizaines de km²) est généralement édifiant à ce sujet. Des scénarios du type *"coupe à blanc de 15% du bassin la première année, sous-solage de cette surface l'année suivante, éclaircissement sur 25% en rive gauche la troisième année, abattage sélectif des résineux la quatrième année, avec dans le même temps plantation de maïs irrigué dans les bas-fonds sur 15% de la surface"* sont la norme plutôt que l'exception. La "vérité dimensionnelle" est souvent acquise au prix d'une dégradation du phénomène dont on prétend étudier les effets, et conduit facilement à des conclusions peu explicites.

Par ailleurs, on a constaté que, si une expérimentation bien identifiée était une condition nécessaire pour aboutir à des conclusions significatives, la précision du calage du modèle utilisé comme référence était un terme tout aussi important. Que ce modèle de référence soit constitué par un bassin témoin apparié ou par le bassin lui-même à une *Epoque* antérieure, le maintien d'un couvert végétal stationnaire pendant la période de calage, et éventuellement pendant l'expérimentation (sur le témoin apparié), est une entreprise d'autant plus difficile à réaliser que le bassin est grand, et cette tentative est en général vouée à l'échec lorsque les bassins étudiés drainent plus de quelques km².

Au terme de suivis en vraie grandeur, une profonde frustration guette en général l'hydrologue qui cherche à mettre en évidence les effets provoqués par des modifications du couvert végétal sur les termes du bilan. Telle est bien la leçon explicitement suggérée par les compilations de résultats qu'il nous a été donné de consulter.

Enfin, si la Connaissance n'a pas de prix, la Recherche a tout de même un budget, et des seuils financiers critiques sont rapidement atteints dès que l'on augmente quelque peu la taille du modèle réduit : il aura fallu planter 500 jeunes arbres fruitiers pour aménager le bassin C, ce qui représente déjà un investissement important et des frais d'entretien élevés pour une opération de recherche. L'aménagement d'un verger de 10 hectares aurait multiplié les coûts par 10. En simplifiant un peu, cela revient à dire que l'expérimentation ECEREX aurait alors été limitée à un seul bassin versant, sans que, pour autant, un saut dimensionnel majeur ait pu être accompli.

LA SIGNIFICATION HYDROLOGIQUE D'ECEREX

Ce sont des talwegs d'ordre 1 qui ont été instrumentés à ECEREX, et l'étude hydrologique s'exerce donc sur des bassins versants élémentaires. Il se trouve que dans le contexte naturel de l'étude, le bassin élémentaire est un véritable "bonsaï" du petit bassin versant de taille kilométrique, dont on peut identifier les attributs essentiels : des versants, qui peuvent avoir des dynamiques différentes, un bas-fond éventuellement occupé par une nappe affleurante, un lit de ruisseau à écoulement intermittent. On est bien en présence d'une unité

hydrologique complète capable d'intégrer une dynamique de fonctionnement du type "aires contributives à surface variable". A ECEREX, le bassin versant élémentaire d'un hectare est une unité hydrologique fonctionnelle complète et non pas une parcelle de terrain extraite à l'emporte-pièce dans le paysage.

Cet ajustement entre surface drainée et unité fonctionnelle est une caractéristique d'un modelé, qui résulte de l'évolution géochimique d'une formation d'altération des schistes de Bonidoro. Dans ce modelé, les unités de paysage, s'il est permis d'utiliser ce terme en forêt primaire, sont constituées par la juxtaposition d'alvéoles qui s'emboîtent dans des interfluves étroits et peu élevés (modelé dit "en demi-banane" par analogie au modelé en "demi-orange" identifié sur granites). Dès que la surface drainée dépasse quelques hectares, les talwegs rejoignent des zones plates, inondées pendant les périodes pluvieuses, et le suivi précis des flux hydrologiques devient très difficile à assurer. Cette contrainte a été déterminante dans l'implantation "amont" des sections de contrôle. Toutefois, un test de reconstitution des écoulements du petit bassin versant de 4,5 km² à partir d'une combinaison fonctionnelle des résultats obtenus à l'échelle de l'hectare, s'est révélé positif, c'est à dire que les Ecoulements Rapides de Crue (ERC) observés et reconstitués aux niveaux annuels, voire mensuels, sont très proches. On peut donc être assuré que, pour ce paramètre ERC, il n'existe pas de processus dominant à l'échelle du km², dont la pondération serait insignifiante à celle de l'hectare, et qui n'aurait évidemment pas pu être pris en compte dans l'étude sur bassins élémentaires.

Si ces bassins élémentaires ont des comportements très différents, ils ont en commun une caractéristique essentielle : les écoulements sont intermittents et ils cessent complètement ou se réduisent à des suintements quelques heures ou quelques dizaines d'heures après la pluie. Le dispositif ECEREX est bien adapté à l'étude de l'écoulement de crue (Ecoulement Total de Crue, pris en considération dans notre travail, ou Ecoulement Rapide de Crue pour les adeptes du déterminisme de la séparation des écoulements).

De par leur dimension et leur instrumentation, les bassins ECEREX se prêtent mal à l'établissement de bilans hydriques pour l'étude comparative de la consommation d'eau de l'écosystème forestier et des aménagements agricoles et sylvicoles. En conditions *Vertes*, les bassins ont des déficits d'écoulement très élevés compris entre 2979 mm, soit 91% de la pluie (bassin C, 1978) et 1694 mm, soit 55% de la pluie (bassin F, 1978). Le partage de ce déficit entre flux verticaux ascendant (évapotranspiration) et descendant (infiltration) ne peut être fait que sur la base d'hypothèses, qui sont hautement probables, mais qui ne peuvent être validées sur le dispositif ECEREX. Parmi ces hypothèses, figure l'utilisation d'une valeur moyenne interannuelle pour l'évapotranspiration réelle de l'écosystème forestier, et commune à tous les bassins. Cette estimation est acceptable, faute de mieux, pour le milieu naturel ; mais on voit mal comment mesurer, ou estimer, à l'échelle de l'hectare et pendant toute une année, la consommation d'eau d'un recru forestier ou d'une plantation de jeunes pins, situés dans une clairière de 100 m de rayon et ceinturée par une forêt primaire de 50 m de hauteur. L'autre solution qui serait de mesurer les quantités d'eau infiltrées à l'échelle du bassin versant, avec une précision suffisante pour permettre des comparaisons entre bassins, ou entre *Epoques* sur un même bassin, n'est certainement pas une entreprise plus aisée.

PERFORMANCES ET LIMITATIONS DE LA METHODOLOGIE UTILISEE

Deux sources d'informations distinctes doivent être confrontées pour évaluer les effets provoqués par une modification des caractéristiques du bassin versant (par exemple, suppression ou modification de la couverture végétale) :

- les débits réellement observés sur le bassin expérimental, après l'application du traitement,
- les débits que l'on aurait observés dans les mêmes conditions climatiques, si le système n'avait pas été modifié.

Le résultat recherché est obtenu par différence entre ces deux termes. L'erreur relative d'une différence étant égale à la somme des erreurs relatives, un suivi hydrométrique (honorables) donnant les apports à 5% près, combiné avec une prédiction (très honorable) précise à 10% en validation, ne permettent pas de mettre en évidence, de façon significative, des modifications des volumes écoulés qui seraient inférieures à 15%.

Pour la prédiction des écoulements en forêt primaire, on a utilisé le modèle hydrologique naturel constitué par le bassin témoin, utilisé selon le principe des bassins appariés (*paired watershed technique*) : les témoins et les bassins promis à l'expérimentation ont été observés simultanément pendant au moins deux années dans des conditions de forêt naturelle. Cette période initiale (*Epoque Verte*) a permis de caler des algorithmes, qui ont permis de reconstituer le comportement hydrologique des bassins expérimentaux pendant toute la durée des essais. Les données des bassins témoins, qui ont continué d'être observés dans les conditions originelles de forêt primaire, ont été utilisées comme entrées de ces "modèles".

La précision et la robustesse de ces modèles ont été testées par calages et validations croisées ; cette précision s'est avérée variable, et fonction de la typologie du bassin :

- La précision est excellente pour les bassins ayant les écoulements les plus abondants, c'est à dire les bassins à sols à dynamique latérale avec nappe de bas-fond (G et H, appariés avec F). Par exemple, les reconstitutions des volumes de crue annuels ont été obtenues avec des écarts de -0,8% et de +1,4% sur le bassin G (résultats en validation).
- La précision est très bonne à bonne sur les bassins entièrement à dynamique superficielle et latérale et sans nappe (A et J) : l'erreur de reconstitution des volumes est de 2% sur A et de 8% sur J. Pour les bassins mixtes, combinant les 2 types pédologiques définis, l'erreur augmente avec la proportion des sols à drainage vertical sur le bassin. Ceci parce qu'il n'existe pas de bassin témoin sur sols à dynamique verticale dans le dispositif ECEREX, et que le comportement bien particulier de ces sols est mal pris en compte. L'erreur sur les volumes est comprise entre 3 et 5% sur D et E ; elle a atteint 12,9% pour une validation sur I.
- La précision est tout juste moyenne pour un bassin versant entièrement situé sur sols à dynamique verticale (bassin C). Les volumes annuels, calculés avec les régressions crue par crue, s'écartent de plus de 30% des volumes observés, mais l'utilisation d'un modèle décadaire a permis de reconstituer la valeur observée à mieux que 15% près, en validation, dans le plus mauvais cas.

L'erreur des estimations à des pas de temps non globalisés (c'est à dire l'écart entre valeur prédite et valeur observée par crue ou par décade) est beaucoup plus forte. Une investigation à l'échelle de la crue serait ainsi peu significative. Par contre, l'écart moyen par décade, de l'ordre de 15 à 30%, a permis de présenter un suivi des effets de l'expérimentation au pas de temps décadaire.

LES PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS SUR LE PLAN HYDROLOGIQUE (*)

Ces acquis portent sur les points suivants :

LA COMPREHENSION DE LA VARIABILITE SPATIALE DES ECOULEMENTS

Les écoulements entre bassins versants en forêt primaire varient dans des proportions considérables. A l'échelle annuelle, les écoulements sont dans un rapport de 1 à 5, pour des bassins soumis à une pluviosité quasi uniforme, avec des pentes comparables, des sols dérivés de la même roche-mère, et une couverture indifférenciée de forêt primaire.

On imagine facilement la perplexité d'un hydrologue qui, en des temps très anciens, aurait confronté des résultats aussi variés avec la désespérante uniformité des à-plats colorés des cartes géologiques et des cartes pédologiques conventionnelles. Il aurait sans doute invoqué "l'effet d'échelle", concept un peu imprécis pour caractériser les effets intempestifs de l'**hétérogénéité** du milieu, qui se manifeste à l'échelle de l'hectare, et que les méthodes d'approche utilisées alors ne permettaient pas de prendre en compte.

Le mérite d'une approche pédologique plus réaliste, qui prend en compte le fonctionnement hydrologique des versants, est d'avoir montré qu'il y existait une **organisation** là où l'on n'aurait pu voir que l'**hétérogénéité**. Il faut préciser que la sélection des 10 bassins versants n'a pas été faite arbitrairement, mais résulte d'un échantillonnage après prospection. Cette sélection inclut toutes les situations pédologiques d'interfluves, considérées comme caractéristiques et extrêmes de la zone.

Les caractères pédologiques suivants se sont avérés **pertinents** pour expliquer les fonctionnements hydrologiques des bassins versants :

- Le pourcentage des sols à dynamique verticale,
- Le pourcentage des sols à dynamique superficielle et latérale
- Le pourcentage du bassin occupé par une nappe phréatique venant à l'affleurement en saison pluvieuse.

Ces critères ont permis de caractériser le milieu de façon satisfaisante par rapport à notre objectif de compréhension de la variabilité spatiale des comportements hydrologiques.

* : Des résultats concernant l'érosion ont été présentés par ailleurs (Fritsch et Sarrailh, 1986)

Les clefs de détermination offertes par la pédologie structurale peuvent paraître complexes, jusqu'à en être décourageantes pour un non-pédologue, mais il faut noter qu'elles transcendent l'ordre ancien, souvent utilisé sous forêt faute de mieux (typologie des bassins versants en fonction de la roche-mère). Ainsi, peut on aussi bien trouver des interfluves à dynamique verticale ou à dynamique latérale sur granites, sur gneiss, sur formations sédimentaires récentes, etc. **Si la méthode introduit une complexité supplémentaire** (mais qui est à l'image du milieu - Cf. les différences *objectives* entre les bassins versants), **elle apporte aussi des possibilités de généralisation**, et ceci compense sans doute largement cela.

UNE VISION AFFINEE DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Le traitement de base, commun à tous les bassins, prévoyait la réalisation d'une *exploitation* papetière, suivie d'un *défrichement* agricole.

En phase d'expérimentation, des variantes importantes ont été introduites dans le traitement qui vient d'être décrit. Certaines résultent d'une volonté délibérée des promoteurs du programme, comme l'exécution d'une déforestation entièrement manuelle, préliminaire à une culture traditionnelle sur brûlis (I), ou comme la réalisation de débardages et de défrichements en saison sèche et aussi en saison des pluies. D'autres variantes (utilisation d'un seul engin à chenilles pour le débardage et pour le défrichement) résultent par contre d'ajustements du protocole à des situations conjoncturelles et imprévues.

On trouvera deux synoptiques (figures 6.1 et 6.2), correspondant à deux représentations possibles de l'expérimentation ECEREX :

Le schéma n°1 correspond à une vision assez proche de celle qui prévalait au lancement du Plan Vert : l'expérimentation porte sur une unité hydro-pédologique homogène et indifférenciée (les sols sur schistes, à défaut des sols de Guyane dans leur ensemble). Les bassins versants, tous identiques, subissent le même traitement. L'expérimentation permet de comparer directement les différents aménagements entre eux, et de répondre immédiatement à des questions du type "*Les crues sont-elles plus fréquentes dans un verger de pamplemousses que dans une plantation d'eucalyptus ?*", ou bien "*l'écoulement d'une prairie broutée est-il supérieur à celui d'une prairie fauchée ?*".

Le schéma n°2 est une représentation plus conforme à ce qu'a réellement été ECEREX. La colonne la plus à gauche prend en compte la **variabilité hydro-pédologique spatiale**, qui est le caractère dominant de l'expérimentation, puisque celle-ci est plus forte que celles qui résultent de la variabilité climatique et des changements d'utilisation du sol. **Il n'y a plus un traitement, mais 6 variantes**, dont il a fallu tenir compte pour expliquer certaines différences de comportement entre bassins ayant des dynamiques très semblables. **Sur 8 expérimentations distinctes, le même traitement n'a été appliqué qu'à 2 groupes de bassins versants (A-C et G-H)**. Ces traitements concernent **4 unités naturelles bien identifiées** (soit de haut en bas, le drainage vertical, les bassins mixtes, la dynamique latérale sans nappe, la dynamique latérale avec nappe)

SOLS DE GUYANE

TRAITEMENT

AMÉNAGEMENT

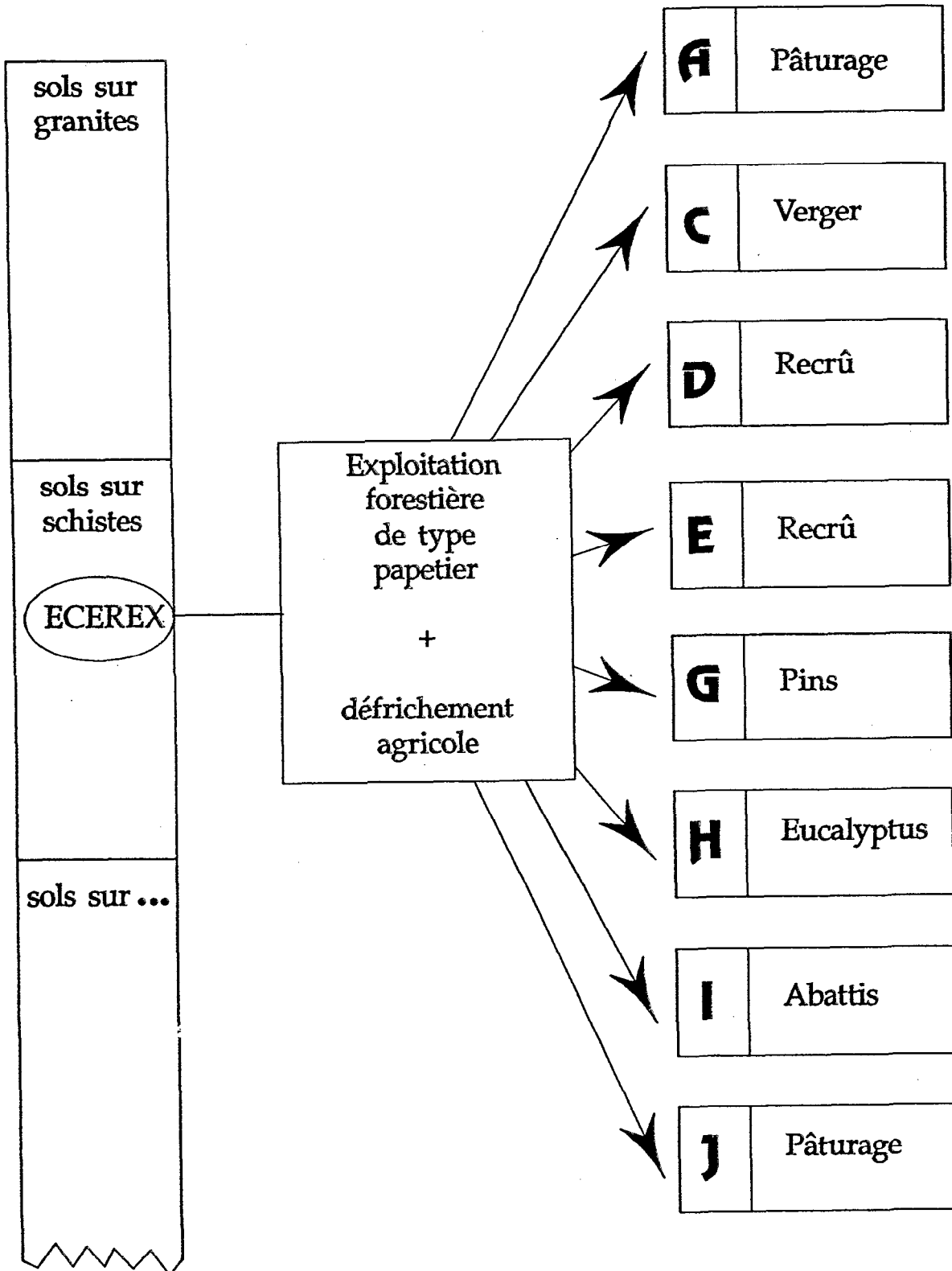


Figure 6.1 : Conception "mécaniste" de l'expérimentation ECEREX (non conforme à la réalité)

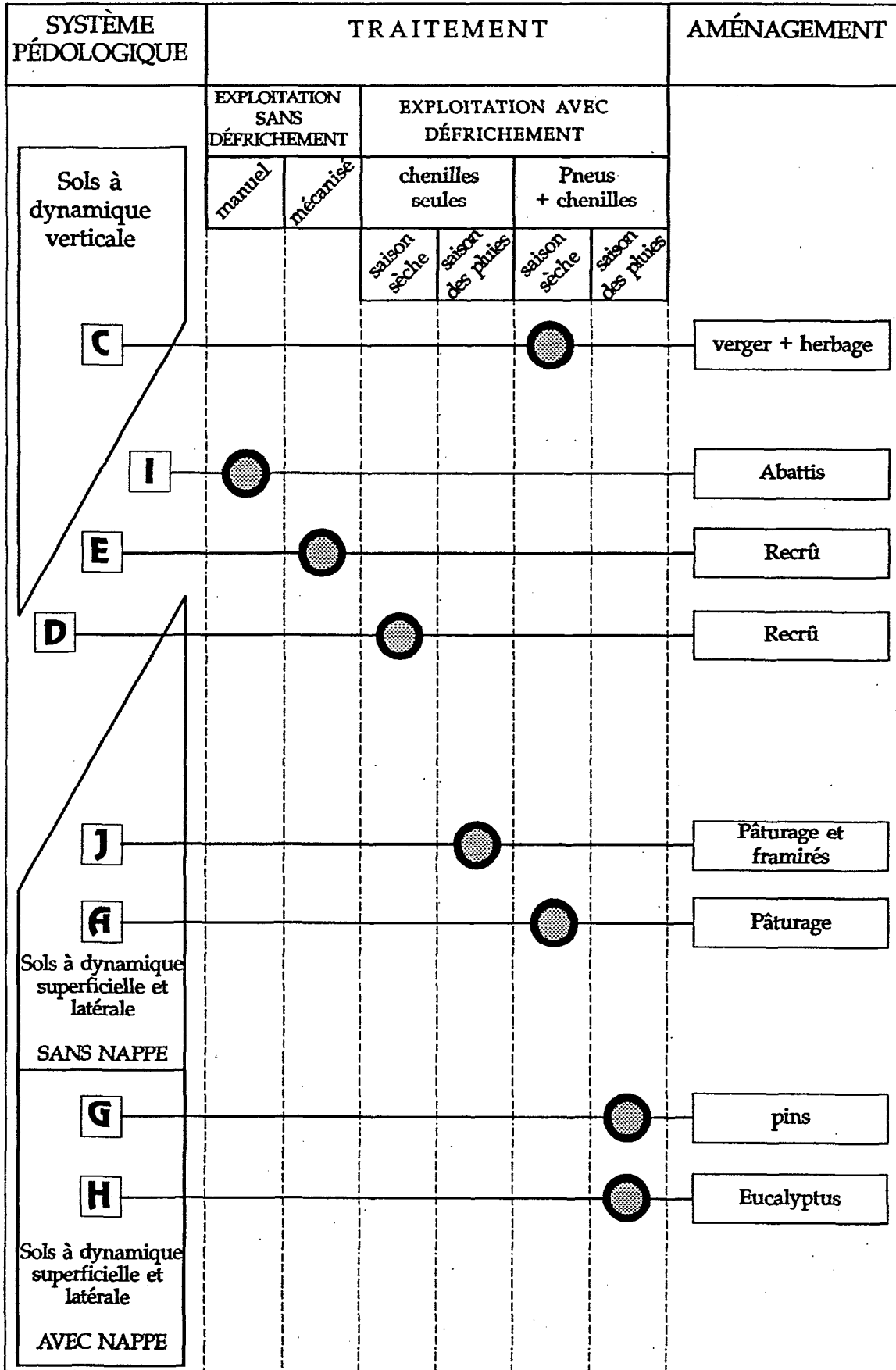


Figure 6.2 : Vision "naturaliste" et réaliste de l'expérimentation ECEREX, prenant en compte les caractéristiques du milieu, et les conditions de sa transformation

Dans le schéma n°1, tout l'intérêt de l'expérimentation s'exprime dans le sens vertical (comparaison entre aménagements) ; le schéma n°2 est plus complexe et implique quelques limitations dans les possibilités de comparaison, mais étant plus proche de la réalité, il est plus "riche" et certainement plus "vrai".

LES MODIFICATIONS HYDROLOGIQUES LIEES A L'UTILISATION DU SOL

Les modifications du couvert végétal sur les bassins ECEREX ont entraîné des augmentations importantes et significatives des volumes écoulés et des débits de pointe.

Le temps des expérimentations a été partagé en une *Epoque Rouge* qui correspond à l'année du défrichement agricole, pendant laquelle le sol était complètement à nu, et en une *Epoque Jaune* pendant laquelle le couvert végétal de l'aménagement avait partiellement ou totalement reconquis l'espace.

- Les modifications sur sol nu (*Epoque Rouge*)

Les volumes écoulés durant l'*Epoque Rouge* ont été supérieurs à ceux qui auraient pu être observés en forêt naturelle, dans des proportions allant de 60% à 130% selon le bassin versant considéré. Ces volumes écoulés supplémentaires représentent des lames comprises entre 228 mm et 714 mm, cette dernière valeur étant, à notre connaissance, la plus forte publiée à ce jour.

Immédiatement après l'exploitation forestière et le défrichement agricole, on observe une période transitoire de réajustement de la surface du bassin, pendant laquelle la réponse hydrologique est brouillée et les comparaisons entre bassins peu significatives. Après un temps variable, allant de quelques semaines à quelques mois, mais qui correspond à un total précipité d'au moins 1000 mm, la réaction hydrologique de chaque bassin s'organise en fonction de ses caractéristiques pédologiques. Ainsi, pendant cette *Epoque Rouge Stabilisée* qui regroupe les mois de la grande saison des pluies, les volumes écoulés ont augmenté dans des proportions allant de 66% à 199% selon les bassins versants, et ces variations sont dans l'ordre inverse des écoulements naturels de ces bassins.

Toutefois, dans les mêmes conditions pluviométriques, les lames écoulées supplémentaires restent plus importantes sur les bassins qui présentaient les écoulements les plus abondants sous forêt primaire.

Une faible part de l'écoulement supplémentaire trouve son origine dans les modifications des flux hydriques verticaux (suppression de l'interception par le couvert forestier et modification de la transpiration des végétaux) : ces mécanismes ne sauraient constituer plus de 20% à l'écoulement supplémentaire. Le reste, soit la part dominante des gains, doit être imputé à l'accroissement de la fonction de production, c'est à dire à des modifications des caractéristiques hydrauliques des sols.

Les débits de pointe ont augmenté de façon très significative pendant l'*Epoque Rouge stabilisée* sur tous les bassins versants dans des proportions qui vont de 17% à 166%. Cette réponse est moins clairement coordonnée avec les caractères pédologiques que celle des lames écoulées.

- **L'évolution pendant la phase de croissance des aménagements (*Epoque Jaune*)**

Sur tous les bassins versants expérimentaux pour lesquels cette estimation a été considérée comme statistiquement significative (soit 7 bassins sur 8), les écoulements diminuent en *Epoque Jaune* tout en restant supérieurs à ceux du milieu naturel pendant les premières années. Un retour à des valeurs comparables à celles du milieu naturel est effectif sur les bassins présentant au moins 4 années d'observations en *Epoque Jaune*, à l'exception notable de la prairie pâturée, sur laquelle les écoulements se maintiennent à un niveau élevé, dépassant encore de près de 30% la valeur prédite sous forêt en quatrième année *Jaune*.

Deux aménagements n'ont pas fait l'objet d'un défrichement complet du bassin : une exploitation forestière intensive et une culture traditionnelle sur brûlis. L'augmentation de l'écoulement annuel est du même ordre sur les 2 systèmes (+30%). On en conclut que la culture traditionnelle sur brûlis, considérée comme une technologie douce, n'en produit pas moins un impact sensible sur le cycle hydrologique.

Les comportements hydrologiques du bassin en culture sur brûlis et du bassin exploité mécaniquement, mais non défriché, ont été très voisins. Ceci montre que des valeurs numériques proches d'un paramètre hydrologique, mesuré à l'exutoire de différents bassins, peuvent recouvrir des situations écologiques très différenciées.

Les écoulements du bassin en exploitation forestière ont retrouvé leurs valeurs naturelles 3 ans après l'abattage et le débardage des arbres.

L'évolution des débits de pointe est parallèle à celle des écoulements, c'est à dire qu'un retour à des valeurs proches de celles de l'écosystème forestier a été constaté. Cette évolution est toutefois plus rapide, puisque cette situation se réalise sur tous les bassins dès la deuxième année *Jaune*. On retrouve le comportement original de la prairie pâturée, sur laquelle les débits de pointes restent plus élevés que dans le milieu naturel pendant toute l'*Epoque Jaune*, dans une proportion moyenne de +76%.

Perspectives pour une Recherche en Hydrologie Forestière

De nécessaires prolongements à notre travail devraient s'orienter dans les directions suivantes :

- **En restant à la même échelle spatiale, et même à ECEREX**
 - Les données que nous avons utilisées ne couvrent pas une période suffisante pour apprécier l'évolution des aménagements à long terme, spécialement ceux incluant l'arbre (ce qui est le cas, à ce jour, de tous les bassins versants, sauf le bassin A en pâturage). Il serait donc pertinent de **faire un nouveau point après 10 ans**, et d'évaluer, sur une année complète et avec les mêmes méthodes, l'évolution des paramètres que nous avons sélectionnés.
 - Les eaux courantes sont le vecteur du cycle bio-géochimique. **Le couplage entre l'hydrologie de l'environnement et la dynamique des éléments, et en particulier des nutriments s'impose donc tout naturellement.** Mais, on avait constaté qu'à l'exutoire du bassin versant d'un hectare, les variations rapides et fréquentes des sorties hydrologiques requéraient des prélèvements en nombre pléthorique. L'arrivée sur le marché de nouveaux équipements (échantillonneurs automatiques, capables de prélever des aliquotes proportionnelles au débit) permettent aujourd'hui d'envisager sereinement cette possibilité.
 - **Affiner notre connaissance des processus hydrologiques en milieu tropical humide.** On dispose d'un potentiel d'informations et de données considérable sur les bassins B et F, qui sont toujours en forêt primaire. L'infrastructure hydrométrique de base (déversoir étalonné) est toujours opérationnelle. Toutes les conditions sont donc réunies pour identifier les objectifs d'une étude de processus, et pouvoir mettre celle-ci en oeuvre sans délais. Cette opération devra être menée dans un esprit très différent du suivi des aménagements qui porte sur des périodes annuelle ou pluriannuelle. Elle suppose un investissement important en hommes et en équipements, mais sur des durées qui peuvent être limitées à quelques semaines sur le terrain. La mise en évidence du déplacement de l'eau par effet piston, ou l'étude de la dynamique des aires participantes, identifient quelques objectifs auxquels pourrait viser une telle étude.
 - Dans le contexte méthodologique de l'évaluation des effets de l'utilisation du sol, il serait très intéressant de **comparer les résultats obtenus ici en utilisant les informations du bassin témoin, avec ceux que fournirait une modélisation pluies-débits du bassin expérimental (modèle calé sur l'Epoque Verte).** On a constaté que le témoin pouvait s'avérer un excellent prédicteur ; mais dans bon nombre de cas concrets, ce dispositif est un luxe fortement contrarié par des contraintes diverses (pression foncière, hétérogénéité de la pluie, etc). Il y a donc un double intérêt, méthodologique et pratique, pour étendre les recherches dans cette direction.

- **En étudiant les effets de déforestation à l'échelle régionale et à la méso-échelle**

Le problème de la déforestation en région tropicale humide est suffisamment préoccupant pour que **les investigations conduites à l'échelle agronomique à ECEREX soient associées avec des recherches portant sur des unités spatiales plus étendues, permettant de prendre en compte les modifications écologiques profondes, dont le régime des eaux courantes est un élément important.**

Si les méthodes d'investigations d'un tel programme sont *essentiellement* différentes de celles mises en oeuvre à ECEREX, la confrontation des résultats acquis sur les grands et sur les petits objets doit aboutir à conforter ou à remettre en cause les "produits scientifiques" de chaque niveau dimensionnel, et à participer à l'édification d'une **vision cohérente de la Biosphère et à la surveillance de l'environnement**. Cet objectif est hors de portée de la seule Science Hydrologique, comme de tout autre domaine de la connaissance considéré isolément, et **l'engagement pluridisciplinaire** est une obligation incontournable pour un tel dessein. Outre la collaboration "traditionnelle" avec les pédologues, la participation des écophysiologistes et des forestiers sera de rigueur.

L'ampleur du problème, et l'enjeu planétaire qui y est attaché, situent ces programmes aux limites des capacités nationales de recherche. La coopération internationale et plus précisément les regroupements européens devraient trouver là un terrain favorable, pour allier leurs compétences et fédérer leurs efforts.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CITEES

- Adamson C.M. (1974) Effects of soil conservation treatment on runoff and sediment loss from a catchment in southwestern New South Wales, Australia. In "Effects of Man on the interface of the hydrological cycle with the physical environment". Proceedings of the Paris Symposium, September 1974, Pub. IAHS n°113, 3-14.
- Anonyme Météorologie Nationale. Bulletin Climatologique mensuel de la Guyane. Service Météorologique de la Guyane, Cayenne.
- Anonyme Météorologie Nationale (1977) Le climat de la Guyane française. Normales et statistiques. Tomes I et II. Météorologie Nationale, Sous-Région Guyane, Cayenne.
- Anonyme Météorologie Nationale (1985) Séries chronologiques mensuelles et statistiques. Service météorologique de la Guyane, Cayenne.
- Anonyme Météorologie Nationale (1988) Etude météorologique du bassin-versant du fleuve Sinnamary à Petit-Saut. Service Météorologique de la Guyane, Cayenne.
- Anonyme ORSTOM-CTFT (1979) Parcelles élémentaires d'étude du ruissellement et de l'érosion sous forêt. In "l'Ecosystème Forestier Guyanais", Bulletin de Liaison du Groupe de Travail, n° 2, avril 1979, ORSTOM INRA CTFT, 22-34.
- Anonyme ORSTOM (1963) Le bassin-versant expérimental de la Crique Virgile - rapport préliminaire. ORSTOM, Paris, 73 p., tableaux, annexes.
- Anonyme ORSTOM (1966) Etude hydrologique du Baoulé et de la Kourou-Kelle (Région d'Odienné). ORSTOM, Service Hydrologique, République de Côte-d'Ivoire, Ministère de l'Agriculture.
- Anonyme Tennessee Valley Authority (1965) Area-Stream Factor Correlation - a pilot study in the Elk River basin. Hydrol. Sci. Bull.
- Atkinson T.C. (1978) Techniques for measuring subsurface flow on hillslopes. In "Hillslope Hydrology", M.J. Kirby Ed., 73-120, John Wiley, New York, n° 10(2), 22-37.
- Ayphassoro H. (1983) Première contribution à l'étude des interactions sol-végétation sur les bassins versants G (pins) et H (Eucalyptus) du dispositif ECEREX. In "Le projet ECEREX" - compte-rendu des journées de Cayenne (4-8 mars 1983), GERDAT, INRA, MUSEUM, ORSTOM, 351-361.
- Bailly C., Benoit de Coignac G., Malvos C., Ningre J.M., Sarrailh J.M. (1974) Etude de l'influence du couvert naturel et de ses modifications à Madagascar - Expérimentations en bassins-versants élémentaires. Cahiers Scientifiques n° 4, Bois et Forêts des Tropiques, CTFT, Nogent-sur-Marne.
- Bailly C., Dubreuil P. (1976) Recherche sur les possibilités de mise en valeur et de transformation de l'écosystème forestier tropical humide et les effets de ses modifications en Guyane. CTFT-ORSTOM, 06-09-1976.
- Baker M.B. Jr. (1984) Changes in stream flow in an herbicide-treated Pinyon-Juniper watershed in Arizona. Wat. Resour. Res., 20(11), 1639-1642.
- Balci A.N., Özyuvaci N., Özhan S. (1986) Sediment and nutrient discharge through streamflow from two experimental watersheds in mature oak-beech forest ecosystems near Istanbul, Turkey. J. Hydrol., n°85, 31-47.
- Barcellos J.M. (1974) Subsídios e diretrizes para um programa de pesquisa com bovinocultura na região Norte. In "Reuniao do Grupo Interdisciplinar de trabalho sobre Diretrizes de Pesquisa Agrícola para a Amazonia", 6-10 Maio 1974. EMBRAPA, Brasília, vol. 2, 6.1, 6-55.

- Barruol J. (1959) Carte géologique détaillée de la France. Notice explicative de la feuille Kourou. Imprimerie Nationale, 17 p.
- Bates C.G., Henry A.J. (1928) Forest and streamflow experiment at Wagon Wheel Gap in Colorado. US Monthly Weather Review, supp. n°36.
- Béreau M., Sarrailh J.M., Andrieux P., de Rouville S. (1986) Etude de la pérennité des productions fourragères en Guyane Française. Compte-rendu de fin d'étude d'une recherche financée par le Ministère de la Recherche et de la Technologie. INRA-CTFT, Kourou.
- Bernard E.A. (1953) l'Evapotranspiration annuelle de la forêt équatoriale congolaise et l'influence de celle-ci sur la pluviosité. Bulletin de l'Inst. Royal Colonial Belge, XX-IV, 1027-1032.
- Bethlamy N. (1972) Comment on "Effects of forest clearfelling on the storm hydrograph". Wat. Resour. Res., 8(1), 166-170.
- Bethlamy N. (1974) More streamflow after a bark beetle epidemic. J. Hydrol., n°23, 185-189.
- Betson R.P. (1964) What is watershed runoff? J. of Geophysical Research, vol. 69 (8), 1541-1552.
- Beven K.J. (1987) Towards a new paradigm in Hydrology. Pub. AISH n°164.
- Beven K.J., Kirby M.J., Schoffield N., Tagg A. (1984) Testing a physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three U.K. catchments. J. Hydrol. n° 69, 119-143.
- Beven K.J., Kirkby M.J. (1979) A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. Hydrol. Sci. Bull., n°24, 43-69.
- Beven K.J., Wood E.F. (1983) Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing areas. J. Hydrol., n° 65, 139-158.
- Biswas A.K. (1966) The Nile : its Origin and Rise. Water and Sewage Works, vol. 113, n°8, August 1966, 282-292.
- Biswas A.K., Asce M. (1967) Hydrology during the Hellenic Civilization. Hydr. Sci.Bull. XII(2), 5-13.
- Blackburn W.H., Wood J.C., De Haven M.G. (1986) Storm flow and sediment losses from site-prepared forestland in East Texas. Wat. Resour. Res., 22(5), 776-784.
- Blancaneaux P. (1981) Essai sur la milieu naturel de la Guyane Française. Travaux et Documents ORSTOM, n°137, Paris.
- Blaney H.F. Criddle W.D. (1950) Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigated data. US Dep. Agric., Div. Irrig. Water Cons., Washington DC, SCS-TP, n°96, 27 p.
- Blaney H.F. Morin K.V. (1942) Evaporation and consumptive use of water : empirical formulas. Trans. Am. Geophys. Union, n°23, 76-83.
- Blavoux B. (1978) Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du tritium. Thèse de Doctorat d'Etat ès-Sciences Naturelles, Paris, 333 p.
- Blavoux B., Mudry J. (1988) Utilisation des isotopes stables en hydrologie. Comptes-Rendus des Quatrième Journées Hydrologiques de Montpellier. Colloques et Séminaires ORSTOM, Paris, 279-301.
- Bocquillon C. (1987) Face au désarroi... d'un hydrologue. Inédit, note manuscrite, Laboratoire d'Hydrologie Mathématique, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 18 p.

- Bois Ph. (1976) Contribution à l'analyse et à la prévision de variables hydrométéorologiques. Applications à la prévision des débits du Niger et des avalanches à Davos. Thèse de Doctorat ès Sciences, Institut National Polytechnique de Grenoble, septembre 1976, 218 p.
- Bois Ph. (1987) Contrôle des séries chronologiques corrélées par étude du cumul des résidus. In "Deuxièmes Journées Hydrologiques de l'ORSTOM", Col. Colloques et séminaires, ORSTOM, Paris, 89-99.
- Bolin S.B., Ward T.J. (1987) Recovery of a New Mexico drainage basin from a forest fire. In : "Forest Hydrology and Watershed Management" (Actes du Colloque de Vancouver, août 1987), Pub. AISH n°167, 191-198.
- Bonnel M, Gilmour D.A. (1978) The development of overland flow in a tropical rainforest catchment. *J. Hydrol.*, n°39, 365-382.
- Bonnel M., Gilmour D. A., Cassels D. S. (1983) Runoff generation in tropical rainforests of northeast Queensland, Australia, and the implication for land use management. In "Hydrology of Humid Tropical Regions with particular reference to the hydrological effects of agriculture and forestry practice". Proceedings of the Hamburg Symposium, August 1983, Pub. IAHS n°140, 287-297.
- Bosch J.M., Hewlett J.D. (1982) A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *J. Hydrol.*, n°55, 3-23.
- Boulet R. (1977) Aperçu sur le milieu pédologique guyanais. Caractères originaux et conséquences sur la mise en valeur. Rapport ORSTOM P150, Cayenne, 36 p.
- Boulet R. (1979) Méthodes d'analyse et représentation des couvertures pédologiques des bassins-versants ECEREX. In "l'Ecosystème Forestier Guyanais", Bulletin de liaison du groupe de travail. ORSTOM, Cayenne, n°1, février 1979, 11-17.
- Boulet R., (1981) Etude pédologique des bassins-versants ECEREX. Bilan de la cartographie. In : Le projet ECEREX - compte-rendu des journées de Cayenne (4-8 mars 1983), GERDAT, INRA, MUSEUM, ORSTOM, 23-52.
- Boulet R., Brugière J.M., Humbel F.X. (1979) Relation entre organisation des sols et dynamique de l'eau en Guyane Française Septentrionale. *Science du Sol*, n°1, 3-18.
- Boulet R., Chauvel A., Lucas Y. (1984) Les systèmes de transformation en pédologie. In "Livre jubilaire du cinquantenaire de l'A.F.E.S"., p.167-169.
- Boulet R., Fritsch E., Humbel F.X. (1978) Méthode d'étude et de représentation des cartes pédologiques de Guyane Française. Rapport ORSTOM P177, Cayenne, 24 p.
- Boulet R., Fritsch E., Humbel F.X. (1979) Les sols des terres hautes et de la plaine côtière ancienne en Guyane Française septentrionale. Organisations en systèmes et dynamique de l'eau actuelle. Rapport ORSTOM P182, Cayenne, 170 p.
- Boyer M., Cabaussel G., Perrot Y. (1979) Atlas de la Guyane Française - planche "Climatologie". ORSTOM-CNRS.
- Boyer M. (1979) Atlas de la Guyane Française - planche "Géomorphologie". ORSTOM-CNRS.
- Branchard J.P., Audoux C. (1981) Recherche sur les transferts d'eau dans un petit bassin-versant (Nouvoitou, Ille et Vilaine) : Approche par l'étude géomorphologique et cartographique des horizons pédologiques. Essai de modélisation du fonctionnement hydrique. ENSA, INRA, Université de Rennes.
- Bren L.J., Turner A.K. (1985) Hydrological behaviour of a small forest catchment. *J. Hydrol.*, n° 76, 333-350.

- Brooks N.K. (1985) Evaluation of deforestation impacts on environment and productivity. Proceedings of IXth World Forestry Congress, Mexico, E1-6.1.A, 13 p.
- Bruijnzeel L.A. (1983) Hydrological and Biogeochemical aspects of Man-Made Forests in South-Central Java, Indonesia. Academisch proefschrift, Vrije Universiteit, Amsterdam.
- Bruijnzeel L.A. (1986) Environmental impacts of (de)forestation in the humid tropics : a watershed perspective. Wallaceana, n°46, 3-13.
- Bruijnzeel L.A. (1987) Evaporation and Transpiration of woody vegetation in the humid tropics : a review. Manuscrit communiqué par l'auteur, proposé à J. Hydrol.
- Bruijnzeel L.A., Wiersum K.F. (1987) Rainfall interception by a young acacia auriculiformis plantation forest in West Java, Indonésia : application of Gash's analytical model. Hydrological processes, vol.1.
- Bultot F. (1962) Sur la détermination des moyennes mensuelles et annuelles de l'évapotranspiration réelle et de l'écoulement dans le bassin congolais. INEAC, Bruxelles, 816-838.
- Bultot F., Dupriez G.L., Bodeux A. (1976) Interception potentielle journalière de la pluie par divers peuplements forestiers. J. Hydrol. n° 31, 381-392
- Burch G.J., Bath R.K., Moore I.D., O'Loughlin E.M. (1987) Comparative Hydrological behaviour of forested and cleared catchments in Southeastern Australia. J. Hydrol., n° 90, 19-42.
- Caldeiros de Miranda R.A., Butler D.R. (1986) Interception of rainfall in a hedgerow apple orchard. J. Hydrol., n° 87, 245-253.
- Calder I.R., Rosier P.T.W. (1976) The design of large plastic-sheet net-rainfall gauges. J. Hydrol. n° 30, 403-405.
- Calder I.R. (1977) A model of transpiration and interception loss from a spruce forest in Plynlimon, Central Wales. J. Hydrol., n° 33, 247-265
- Calder I.R., Wright I.R., Murdiyarso D. (1986) A study of evaporation from tropical rainforest - West Java. J. Hydrol., n° 89, 13-31.
- Calder I.R., Wright I.R. (1986) Gamma-Ray attenuation studies of interception from Sitka spruce. Some evidence for an additional transport mechanism. Water Resour. Res., 22, 409-417
- Camus H., Chaperon P., Girard G., Molinier M. (1976) Analyse et modélisation de l'écoulement superficiel d'un bassin tropical. Influence de la mise en culture. Côte d'Ivoire, Khorhogo, 1962-72. Travaux et Documents ORSTOM n°32, Paris, 81 p.
- Cappus P. (1960) Bassin expérimental d'Alrance. Etude des lois de l'écoulement. Application au calcul et à la prévision des débits. La Houille Blanche, juillet-août 1960, n°A.
- Casenave A. (1986) L'apport de la simulation de pluie dans l'analyse des phénomènes de ruissellement et d'infiltration : quelques exemples d'applications hydrologiques. In "Annales du Comité National Français de Géodésie et Géophysique", vol. 5-1986, 205-218.
- Casenave A., Guigen N., Simon J.M. (1982) Etude des crues décennales des petits bassins-versants forestiers en Afrique Tropicale. Cah. ORSTOM, Série Hydrol., vol. XIX, n°4, 229-252.
- Chaperon P., L'Hôte Y., Vuillaume G. (1985) Les Ressources en Eau de Surface de la Guadeloupe. Col. Monographies ORSTOM, Paris.

- Charles-Dominique P. (1983) Dissémination des graines de certaines espèces pionnières par les chauves-souris. In "Le projet ECEREX" - compte-rendu des journées de Cayenne (4-8 mars 1983), GERDAT, INRA, MUSEUM, ORSTOM, 226-233.
- Chevallier P. (1988) Complexité hydrologique du petit-bassin versant : exemple en savane humide, Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, USTL, Montpellier.
- Chevallier P., Claude J., Pouyaud B., Bernard A. (1985) Pluies et crues au Sahel. Hydrologie de la Mare d'Oursi (Burkina-Faso). Travaux et Documents de l'ORSTOM, n°190. ORSTOM, Paris.
- Cholley A. (1950) Morphologie structurale et morphologie climatique. Ann. de Géographie, LIX, 321-335.
- Choubert B. (1974) Le Précambrien des Guyanes. Mémoire B.R.G.M., Paris, 204 p.
- Collinet J. (1984) Hydrodynamique superficielle et érosion comparées de quelques sols ferrallitiques sur défriches forestières traditionnelles (Côte d'Ivoire). In "Challenges in African Hydrology and Water Resources", Pub. IAHS n°144, 499-516.
- Cordery I., Pilgrim D. H. (1983) On the lack of dependence of losses from flood runoff on soil and cover characteristics. In "Hydrology of Humid Tropical Regions with particular reference to the hydrological effects of agriculture and forestry practice". Proceedings of the Hamburg Symposium, August 1983, Pub. IAHS n°140, 187-195.
- Cosandey C. (1986) De l'origine de l'écoulement rapide de crue dans un petit bassin-versant forestier breton. Z. Geomorph., n°60, 177-186.
- Crouzet E., Hubert P., Olive P., Siwertz E., Marce A. (1970) Le tritium dans les mesures d'hydrologie de surface. Détermination expérimentale du coefficient de ruissellement. J. Hydrol., n° 11, 217-229.
- Davis E.A. (1984) Conversion of Arizona Chaparral to grass increases water yield and nitrate loss. Wat. Resour. Res., 20(11), 1643-1649.
- Davis W.M., 1899. The Geographical Cycle. Géographical Journ., XIV, 481-504.
- Da Costa dos Reis da Silva (1986) Essai d'élaboration et d'utilisation d'un modèle spatialisé de simulation des crues (concept d'unités participantes). Thèse de Doctorat d'Université. USTL, Montpellier.
- Delourme A. (1956) De la circulation atmosphérique et de l'influence de l'air polaire maritime dans les régions intertropicales de l'Atlantique. Mémoire de la Météorologie Nationale, Paris, 47 p.
- de Foresta H. (1981) Premier temps de la régénération naturelle après exploitation papetière en forêt tropicale humide. ARBOCEL, Guyane française. Thèse de Troisième Cycle, USTL, Montpellier, 114 p.
- de Foresta H. (1983) Hétérogénéité de la végétation pionnière en forêt tropicale. Exemple d'une coupe papetière en forêt Guyanaise. In "Le projet ECEREX" - compte-rendu des journées de Cayenne (4-8 mars 1983), GERDAT, INRA, MUSEUM, ORSTOM, 234-255.
- Dolman A.J. (1987) Summer and Winter rainfall interception in an oak forest. Predictions with an analytical and a numerical simulation model. J. hydrol. n° 90, 1-9.
- Dosseur H., Guilbot A. (1974) Résumé des résultats de recherches sur le bassin-versant d'Alrance. Cahiers ORSTOM, Série Hydrol., vol. XI, n°2, 127-132.
- Dubreuil P.L. (1960-a) Etude hydrologique de petits bassins versants en Côte d'Ivoire, Rapport général. Tome I - Zone forestière. ORSTOM, Service Hydrologique, Paris.

- Dubreuil P.L. (1960-b) Etude du bassin-versant de la rivière Agnéby. Résultats de la campagne 1959. ORSTOM, Service Hydrologique, Paris.
- Dubreuil P.L., Chaperon P., Guiscafré J., Herbaud J. (1972) Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux. Années 1951-1969. ORSTOM, Paris, 916 p.
- Dubreuil P.L., Morell M., Séchet P. (1975) Comportement et interaction des paramètres physiques de petits bassins versants semi-arides et intertropicaux. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., vol. XII, n°1, 13-36.
- Dubreuil P.L. (1985) Review of field observation of runoff generation in the tropics. J. Hydrol., n° 80, 237-264.
- Ducrey M., Guelh J.M., Finkelstein D. (1983) Evolution comparée des microclimats en coupe rase, sous recru naturel et sous forêt primaire. In : Le projet ECEREX - compte-rendu des journées de Cayenne (4-8 mars 1983), GERDAT, INRA, MUSEUM, ORSTOM, 327-340.
- Dunne T. (1969) Runoff production in a humid area. Ph.D. Dissertation, Department of Geography, Johns Hopkins Univ., Baltimore, Maryland.
- Dunne T. (1978) Field studies of hillslope flow processes. In "Hillslope Hydrology", M.J. Kirkby Ed., 227-293, John Wiley, New York.
- Dunne T. (1983) Relation of field studies and modeling in the prediction of storm runoff. J. Hydrol., n° 65, 25-48.
- Dunne T., Black R.D. (1970) An experimental investigation of runoff production in a small New England watershed. Wat. Resour. Res., vol 6, 478-490.
- Dunne T., Moore T.R., Taylor C.H. (1975) Recognition and prediction of runoff-producing zones in humid regions. Hydrol. Sci. Bull., XX(3), 305-327.
- Dupraz C. (1984) Bilan des transferts d'eau et d'éléments minéraux dans trois bassins-versants comparatifs à végétations contrastées (Mont Lozère, France). Thèse de Docteur-Ingénieur, Université d'Orléans.
- Engler A. (1919) Untersuchung über den Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer. Mitteilungen der Schweizerischen Zentralanstalt für das forstliche Versuchswesen. n°12, 625 p.
- Engman E.T., Rogowski A.S. (1974) A partial area model for small flow synthesis. Wat. Resour. Res., 10(3), 464-472.
- Fearnside P.M. (1979) O desenvolvimento da Floresta Amazonica : problemas prioritários para a formulação de directizes. Acta Amazonica, 9(4) suplemento, 123-129.
- Feller M.C., Kimmins J.P. (1984) Effects of clearcutting and slash burning on streamwater chemistry and watershed nutrient budgets in Southwestern British Columbia. Wat. Resour. Res., 20(1), 29-40.
- Feyerabend P.K. (1975) Against Method: Outline of anarchistic theory of knowledge. New Left Books, London.
- Finkelstein D. (1982) Evolution comparée des microclimats en coupe rase, sous recru naturel et sous forêt primaire sur la parcelle ARBOCEL. In "l'Ecosystème Forestier Guyanais", Bulletin de Liaison du Groupe de Travail, n°6, mai 82, 19-32.
- Fontes J.C. (1976) Isotopes du milieu et cycles des eaux naturelles : quelques aspects. Thèse de Doctorat d'Etat es-Sciences, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 208 p.
- Fougerouze J. (1965) Le climat de la Guyane française. Monographie de la Météorologie Nationale, Paris, mars 1965, 36 p., 17 cartes.

- Fougerouze J. (1966) Quelques problèmes de bioclimatologie en Guyane Française. *L'Agronomie Tropicale, Etudes et Travaux* n°3, 291-345.
- Franken W., Leopoldo P.R., Matsui E., Goes Ribeiro M.N. (1982a) Estudo da interceptacao da água de chuva em cobertura florestal amazônica do tipo terra firme. *Acta Amazonica* 12(2), 1982, 327-331
- Franken W., Leopoldo P.R., Matsui E., Goes Ribeiro M.N. (1982b) Interceptacao das precipitacoes em floresta amazonica de terra firme. *Acta Amazonica* 12(3) suplemento, 1982, 15-22
- Freeze R.A (1972a) Role of Subsurface Flow in generating Surface Runoff. 1. Base Flow contributions to channel flow. *Wat. Resour. Res.*, 8(3), 609-623.
- Freeze R.A (1972b) Role of Subsurface Flow in generating Surface Runoff. 2. Upstream Source Area. *Wat. Resour. Res.*, 8(5), 1272-1283.
- Fritsch E. (1977) Organisation d'une toposéquence de sols sur schistes Bonidoro de Guyane Française (Piste de St. Elie). Etude morphologique. Rapport ORSTOM P174, Cayenne, 72 p.
- Fritsch E. (1979) Etude des organisations pédologiques et représentation détaillée de 4 bassins-versants expérimentaux sur schistes Bonidoro de Guyane Française. Rapport ORSTOM P183, Cayenne, 30 p.
- Fritsch J.M., Dubreuil P.L., Sarrailh J.M. (1987) De la parcelle au petit bassin versant : effet d'échelle dans l'écosystème forestier amazonien. In "Forest Hydrology and Watershed Management" (Actes du Colloque de Vancouver, août 1987), Pub. AISH n°167, 131-142.
- Fritsch J.M., Sarrailh J.M. (1986) Les transports solides dans l'écosystème forestier tropical humide guyanais : effets du défrichement et de l'aménagement de pâturages. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XXII, n°2, 209-222.
- Gash J.H.C., Morton A.J. (1978) An application of the Rutter model to the estimation of the interception loss from Thetford Forest. *J. Hydrol.*, n° 38, 49-58.
- Gash J.H.C., Wright I.R., Llyod C.R. (1980) Comparative estimates of interception loss from three coniferous forest in Great Britain. *J. Hydrol.*, n° 48, 89-105.
- Gilmour D.A. (1977) Effect of rainforest logging and clearing on water yield and quality in a high rainfall zone of north-east Queensland. *Proceedings of Hydrology Symposium 1977, Brisbane*, 156-160.
- Girard G. (1974) Etude de l'interception par la forêt aux îles Loyauté (Ile Lifou). Rap. ORSTOM, Paris, 9p, 2 p.fig., 8 p. tab.
- Goes Ribeiro M.N., Villa Nova N.A. (1979) Estudos climatologicos da Reserva Florestal Ducke, Manaus, AM. *Evapotranspiracao. Acta Amazonica*, 9(2), 305-309.
- Golding L.D. (1987) Changes in streamflow peaks following timber harvest in a coastal British Columbia watershed. In "Forest Hydrology and Watershed Management" (Actes du Colloque de Vancouver, août 1987), Pub. AISH n°167, 509-517.
- Green M.J. (1970) Calibration of the Brenig catchment and the initial effects of afforestation. In "Proceedings of the Wellington Symposium", Pub. IAHS n°96, 329-345.
- Grimaldi M., Boulet R. (1989) Intérêt de la caractérisation de l'espace poral dans l'étude du fonctionnement hydrodynamique d'une couverture ferrallitique sur socle en Guyane française. ORSTOM, Cayenne, 26 p. En cours de publication dans *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*

- Guehl J.M. (1984) Dynamique de l'eau dans le sol en forêt tropicale humide guyanaise. Influence de la couverture pédologique. Ann. Sci. For., 1984, n°41 (2), 195-236.
- Guehl J.M. (1981) Etude in situ de la dynamique de l'eau dans le sol sous forêt primaire. Influence de la couverture pédologique sur quelques caractéristiques du drainage vertical. In "l'Ecosystème Forestier Guyanais", Bulletin de Liaison du Groupe de Travail, n°4, 52-60.
- Guillobez S., Godon Ph. (1984) Zonage agroclimatologique de la Guyane. La Météorologie, 7^e série, n°5, 37-40.
- Guillot P., Duband D. (1968) La méthode du Gradex pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies. SHF, Dixièmes Journées de l'Hydraulique, Question n°1, Rapport n°7, Paris, 1968
- Guiraud A. (1979) Etat d'avancement des travaux du CTFT, In "l'Ecosystème Forestier Guyanais", Bulletin de Liaison du Groupe de Travail, n° 2, avril 1979, ORSTOM INRA CTFT, 21-26).
- Hadley M., Lanly J.P. (1983) Ecosystèmes des forêts tropicales : différences et similitudes. Nature et Ressources, Vol.XIX, janvier-mars 1983, 2-19.
- Hancock N.H., Crowther J.M. (1979) A technique for the direct measurement of water storage on a forest canopy. J. Hydrol., n° 41, 105-122.
- Harr R.D., Harper W.C., Krygier J.T., Hsieh F.S. (1975) Changes in storm hydrographs after road building and clear-cutting in the Oregon Coast Range. Wat. Resour. Res., 11(3), 436-444.
- Harr R.D., McCorison F.M. (1979) Initial effects of clearcut logging on size and timing of peak flows in a small watershed in Western Oregon. Wat. Resour. Res., 15(1), 90-94.
- Heede B.H. (1987) Overland flow and sediment delivery five years after timber harvest in a mixed conifer forest, Arizona, USA. J. Hydrol, n°91, 205-216.
- Helvey J.D., Patric J.H. (1965) Canopy and litter interception of rainfall by hardwoods of Eastern United States. Water Resour. Res., 1(2), 193-206.
- Hewlett J.D. (1961) Soil moisture as a source of base flow from steep mountain watershed. US Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, North Carolina.
- Hewlett J.D. (1972) Reply on "Effects of forest clearfelling on the storm hydrograph". Wat. Resour. Res., 8(1), 171-172.
- Hewlett J.D. (1982) Forests and floods in the light of recent investigation. Proceedings of Canadian Hydrological Symposium, 14-15 June 1982, Fredericton, N.B., 543-559.
- Hewlett J.D., Bosch J.M. (1984) The dependence of storm flows on rainfall intensity and vegetal cover in South Africa. J. Hydrol., n° 75, 365-381.
- Hewlett J.D., Bosch J.M. (1985) The dependence of storm flows on rainfall intensity and vegetal cover in South Africa. J. Hydrol., n°75, 365-381.
- Hewlett J.D., Fortson J.C., Cunningham G.B. (1977a) The effect of rainfall intensity on storm flow and peak discharge from forested land. Wat. Resour. Res., 13(2), 259-266.
- Hewlett J.D., Fortson J.C., Cunningham G.B. (1977b) The effect of rainfall intensity on storm flow and peak discharge from forested land - Reply. Wat. Resour. Res., 13(6), 1027-1028.

- Hewlett J.D., Fortson J.C., Cunningham G.B. (1984) Additional tests on the effect of rainfall intensity on storm flow and peak flow from wild-land basins. *Wat. Resour. Res.*, 20(7), 985-989.
- Hewlett J.D., Helvey J.D. (1970) Effects of forest clearfelling on the storm hydrograph. *Wat. Resour. Res.*, 6(3), 768-782.
- Hewlett J.D., Hibbert A.R. (1963) Moisture and energy conditions within a sloping soil mass during drainage. *J. of Geophys. Res.*, n°68, 1081-1087.
- Hewlett J.D., Hibbert A.R. (1967) Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In "Forest Hydrology", Sopper W.E. and Lull H.W. Ed., Pergamon, 275-290.
- Hewlett J.D., Nutter W.L. (1970) The varying source area of streamflow from upland basins. In "Proc. of the symposium on Interdisciplinary Aspects of Watershed Management", Montana State University, Bozeman, American Society of Civil Engineers, 65-83.
- Hewlett J.D., Post H.E., Doss R. (1984) Effects of clear-cut silviculture on dissolved ion export and water yield in the Piedmont. *Wat. Resour. Res.*, 20(7), 1030-1038.
- Hibbert A.R. (1967) Forest treatment effects on water yield. In "Forest Hydrology", Sopper W.E. and Lull H.W. Ed., Pergamon, 813 p, 527-543.
- Hiez G., Dubreuil P.L. (1964) Les régimes hydrologiques en Guyane française. ORSTOM, Paris.
- Hoepffner M. (1974) Les bassins-versants de la crique Grégoire. Rapport ORSTOM H48, Cayenne.
- Hoorelbeck J., Lemétais L. (1972) Le bassin versant représentatif de la Crique Cacao. Rapport ORSTOM H44, Cayenne.
- Hornbeck J.W. (1973) Storm flow from hardwood-forested and cleared watersheds in New Hampshire. *Wat. Resour. Res.*, 9(2), 346-354.
- Hornberger G.M., Beven K.J., Cosby B.J., Sappington D.E. (1985) Shenandoah watershed study : Calibration of a topography-based, variable contributing area hydrological model to a small forested catchment. *Wat. Resour. Res.*, 21(12), 1841-1850.
- Horton J.H., Hawkins R.H. (1965) Flow path of rain from the soil surface to the water table. *Soil Science*, n°100, 377-383.
- Horton R.E. (1933) The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Trans. Am. Geophys. Union*, n°14; 446-460.
- Hsia Y.J., Koh C.C. (1983) Water yield resulting from clearcutting a small hardwood basin in Central Taiwan. In "Hydrology of Humid Tropical Regions with particular reference to the hydrological effects of agriculture and forestry practice". Proceedings of the Hamburg Symposium, August 1983, Pub. IAHS n°140, 215-220.
- Humbel F.X. (1978) Caractérisation par des mesures physiques, hydriques et d'enracinement des sols de Guyane Française à dynamique de l'eau superficielle. *Science du Sol* n°2, 83-94.
- Humbert J. (1985) Les crues de 1983 en Alsace et en Lorraine. *Mosella*, Tome XV, 67-125.
- Huttel C. (1972) Estimation du bilan hydrique dans une forêt sempervirente de basse Côte d'Ivoire. Isotopes and radiation in soil-plant relationship including forestry. IAEA, Vienne, 439-452.
- Ikounga M. (1978) Analyse fine du mécanisme de formation du ruissellement sur sols ferrallitiques sous forêt (Région de Yaoundé - Cameroun). Thèse de Docteur-ingénieur, Université P. et M. Curie (Paris VI).
- Jackson I.J. (1971) Problems of trough-fall and interception assessment under tropical forest. *J. Hydrol.*, n° 12, 234-254.

- Jackson I.J. (1975) Relationships between rainfall parameters and interception by tropical forest. *J. Hydrol*, n°24, 215-238.
- Jeje L.K., Ogunkoya O., Uyi E. (1986) Subsurface flow from a forested slope in the Ife area of southwestern Nigeria. *Hydrol. Sci. J.*, n°31(4), 489-499.
- Jordan C.F., Heuveldop J. (1981) The water budget of an amazonian rain forest. *Acta Amazonica*, 11(1), 87-92.
- Kattan Z., Gac J.Y., Probst J.L., (1987) Suspended sediment load and mechanical erosion in the Sénégal Basin. Estimation of the surface runoff concentration and relative contributions of channel and slope erosion. *J. Hydrol.*, n° 92, 59-76.
- Kirkby M.J., Chorley R.J. (1967) Troughflow, overland flow and erosion. *Hydr. Sci. Bull.*, n°12(3), 5-21.
- Klinge H., Rodriguez W.A. (1968) Litter production in an area of Amazonian terra firme forest, parts I and II. *Amazonianna*, 1, 287-302 and 303-310.
- Knisel W.G. (1973) Comments on "Role of subsurface flow in generating surface runoff. 2. Upstream sources areas" by R. Allan Freeze. *Wat Resour Res.*, 9(4), 1107-1110.
- Kovner J.L., Evans T.C. (1954) A method for determining the minimum duration of watershed experiments. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 35, 608-612.
- Krecek J., Zeleny V. (1980) Effects of commercial forest logging upon streamflow processes in a small basin in the Moravian-Silesian Beskydy Mountains. In "The influence of Man on the hydrological regime with special reference to representative and experimental basins". Proceedings of the Helsinki Symposium, June 1980, Pub. IAHS n°130, 105-114.
- L'Hôte Y. (1987) Rappel de l'histoire du cycle de l'eau dans la culture Occidentale. Son enseignement en France, hier et aujourd'hui. *Pub. AISH n°164*, 37-46.
- Lambert R. (1968) Recherche de la structure hydrologique d'un bassin versant. *Annales de Géographie*, vol. 77, 687-706.
- Langford K.J. (1976) Change in yield of water following a bushfire in a forest of *Eucalyptus regnans*. *J. Hydrol.*, n°29, 87-114.
- Lee R., Tajchman S. (1977) Comment on " The effect of rainfall intensity on storm flow and peak discharge from forested land. *Wat Resour Res.*, 13(6), 1025.
- Leopoldo P.R., Franken E., Salati E. (1982a) Balanço hidrico de pequena bacia hidrografica em floresta amazonica de terra firme. *Acta Amazonica* 12(2) 333-337.
- Leopoldo P.R., Franken W., Matsui E., Salati E. (1982b) Estimativa de evapotranspiracao de floresta amazonica de terra firme. *Acta Amazonica suplemento* 12(3) 23-28.
- Lescure J.P., Boulet R. (1985) Relationships between Soil and Vegetation in a Tropical Rain Forest in French Guiana. *Biotropica*, 17(2), 155-164.
- Lescure J.P., Puig H., Riera B., Leclerc D., Beekman A., Beneteau A. (1983) La phytomasse épigée d'une forêt dense en Guyane française. *Acta Ecologica, Ecol. Gener.*, vol. 4, n°3, 237-251.
- Lescure J.P. (1981) La végétation et la flore dans la région de la piste de St. Elie. In " l'Ecosystème Forestier Guyanais", *Bulletin de liaison du groupe de travail*, n°3, 4-24.

- Leyton L., Reynolds E.R.C., Thompson F.B. (1967) Rainfall interception in forests and moorland. In "Forest Hydrology", Sopper W.E. and Lull H.W. Ed., Pergamon, 163-178.
- Liebscher H. (1980) Human influences in the Upper Harz experimental basins. In "The influence of Man on the hydrological regime with special reference to representative and experimental basins". Proceedings of the Helsinki Symposium, June 1980, Pub. IAHS n°130, 15-22.
- Lucas Y. (1983) Méthode d'étude des couvertures pédologiques dans l'Opération ECEREX. In "Le projet ECEREX" - compte-rendu des journées de Cayenne (4-8 mars 1983), GERDAT, INRA, MUSEUM, ORSTOM, 9-22.
- Mérot P. (1978) Bocages: Sols et Eaux. Le bocage en Bretagne granitique, une approche de la circulation des eaux. Thèse de 3^{ème} Cycle, Université de Rennes. 196 p.
- Mérot P., Bourguet M., Le Leuch M., (1981) Analyse d'une crue à l'aide du traçage naturel par l'oxygène 18 mesuré dans les pluies, le sol, le ruisseau. *Catena*, vol. 8, 69-81.
- Miller E.L. (1984) Sediment yield and storm flow response to clear-cut harvest and site preparation in the Ouachita Mountains. *Wat. Resour. Res.*, 20(4), 471-475.
- Moniod F. (1969) Calcul automatique des paramètres de l'Hydrogramme Standard. *Cah. ORSTOM, Série Hydrol.*, vol VI, n°2, 77-98.
- Moore I.D., Mackay S.M., Wallbrink P.J., Burch G.J., O'Loughlin E.M. (1986) Hydrologic characteristics and modelling of a small forested catchment in southeastern New South Wales. Pre-logging condition. *J. Hydrol.*, n° 83, 307-335.
- Morton F.I. (1984) What are the limits on forest evaporation. *J. Hydrol.*, n° 74, 373-398
- Mosley M.P. (1982) Subsurface flow velocities through selected forest soils, South Island, *J. Hydrol.(N.Z.)*, n° 55, 65-92.
- Myers N. (1980) Survey of conversion rates of Tropical Moist Forests : Report to National Academy of Sciences. Washington D.C. National Research Council.
- Myers N. (1982) Depletion of tropical moist forests : a comparative review of rates and causes in the three main regions. *Acta Amazonica*, 12(4), 745-758.
- Obiukwu Duru J. (1984) Blaney-Morin-Nigeria evapotranspiration model. *J. Hydrol.* n° 70, 71-83.
- Oldeman R.A.A. (1974) L'architecture de la forêt guyanaise. Mémoire ORSTOM n° 73, ORSTOM Paris, 204 p.
- Olher F.M.J. (1980) Phytomass and minéral content in untouched forest. *CELOS rapporten n° 132*, Univ. van Surinaame, 43 p.
- Olivry J.C. (1986) Fleuves et rivières du Cameroun. Col. Monographies Hydrologiques ORSTOM, n° 9, MESRES-ORSTOM, Paris.
- Olszyska B., Crowther J.M. (1981) The application of Gamma-Ray attenuation to the determination of canopy mass and canopy surface-water storage. *J. Hydrol.*, n° 49, 355-368.
- Pathak P.C., Pandey A.N., Singh J.S. (1984) Overland flow, sediment output and nutrient loss from certain forested sites in the Central Himalaya, India. *J. Hydrol.*, n°71, 239-251.
- Pearce A.J., MC. Kerchnar A.I. (1979) Upstream generation of storm runoff. In "Physical Hydrology, New Zeland Experience". D.L. Murray and P. Ackroid Ed., 165-182. New Zeland Hydrological Society, Wellington.

- Pearce A.J., Rowe L.K., O'Loughlin C.L. (1980) Effects of clearfelling and slash-burning on water yield and storm hydrograph in evergreen mixed forests, Western New Zealand. In "The influence of Man on the hydrological regime with special reference to representative and experimental basins". Proceedings of the Helsinki Symposium, June 1980, Pub. IAHS n°130, 119-127.
- Pearce A.J., Rowe L.K. (1981) Rainfall interception in a multi-storied, evergreen mixed forest : estimates using Gash's analytical model. *J. Hydrol.*, n° 49, 341-353.
- Pearce A.J., Stewart M.K., Sklash M.G. (1986) Storm runoff generation in humid headwater catchments. 1. Where does the water come from. *Wat. Resour. Res.*, 22(8), 1263-1272.
- Pereira H.C. (1967) Summary of forests and runoff session. In "Forest Hydrology", Sopper W.E. and Lull H.W. Ed., Pergamon, 813 p.
- Pereira H.C. (1973) Land use and water resources in temperate and tropical climates. Cambridge University Press, 264 p.
- Perrot Y. (1975) Le climat de la Guyane. Essai d'expression cartographique. T.E.R. de Géographie tropicale, Univ. de Bordeaux III, 57 p.
- Plamondon A.P., Ouellet D. (1980) Partial clearcutting and streamflow regime of Ruisseau des Eaux-Volées experimental basin. In "The influence of Man on the hydrological regime with special reference to representative and experimental basins". Proceedings of the Helsinki Symposium, June 1980, Pub. IAHS n°130, 129-136.
- Prévost M.F. (1983) Etude de la régénération : la végétation secondaire - Piste de St. Elie. In "Le projet ECEREX" - compte-rendu des journées de Cayenne (4-8 mars 1983), GERDAT, INRA, MUSEUM, ORSTOM, 195-213
- Puig H., Lescure J.P. (1981) Etude de la variabilité floristique dans la région de la piste de St Elie. In "L'Ecosystème Forestier Guyanais", bulletin de liaison du groupe de travail, n° 3, 25-29.
- Ragan R.M. (1968) An experimental investigation of partial area contributions. Pub. AISH n° 76, 241-251.
- Rich L.R. (1972) Managing a Ponderosa Pine forest to increase water yield. *Wat. Resour. Res.*, 8(2), 422-428.
- Riera B. (1982) Observations sur les chablis, piste de St. Elie en Guyane. In "L'Ecosystème Forestier Guyanais", bulletin de liaison du groupe de travail, n° 6, 165-184.
- Riera B. (1983) A propos des chablis en Forêt Guyanaise - Piste de St. Elie. In "Le projet ECEREX" - compte-rendu des journées de Cayenne (4-8 mars 1983), GERDAT, INRA, MUSEUM, ORSTOM, 214-227.
- Riou C. (1975) La détermination pratique de l'évaporation. Col. Mémoires ORSTOM, Paris.
- Roche M.A. (1979) Objectifs et méthodologie d'étude comparative sur l'hydrologie et l'érosion de bassins versants expérimentaux. In "L'Ecosystème Forestier Guyanais", Bulletin de liaison du groupe de travail. ORSTOM, Cayenne, n° 1, février 1979, 11-17.
- Roche M.A. (1982a) Evapotranspiration réelle de la forêt amazonienne en Guyane. Cahiers ORSTOM, série Hydrol., vol. XIX, n° 1, 1982, 37-44.
- Roche M.A. (1982b) Comportements hydrologiques comparés et érosion de l'écosystème forestier amazonien à Ecerec, en Guyane. Cahiers ORSTOM, série Hydrol., vol. XIX, n° 2, 1982, 81-114.
- Roche M. (1963) Hydrologie de surface. Gauthier Villard, Paris.
- Roche M. (1967) Essai de définition d'un Hydrogramme Standard. Cah. ORSTOM, Série Hydrol., vol.IV, n° 1, 27-44.

- Rodier J.A. (1964) Régimes hydrologiques de l'Afrique Noire à l'Ouest du Congo. ORSTOM, Paris.
- Rodier J.A. (1976) Estimation des débits de crues décennales pour les petits bassins forestiers en Afrique Tropicale. Etude préliminaire. Cah. ORSTOM, Série Hydrol., vol. XIII, n° 4, 243-267.
- Rodier J.A. (1985) Caractérisation des crues des petits bassins-versants représentatifs au Sahel. Cah. ORSTOM, Série Hydrol., vol. XXI, n° 2, 3-26.
- Rodier J.A., Auvray C. (1965) Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique Occidentale. ORSTOM - CIEH, Paris.
- Rollet B. (1974) Etudes quantitatives d'une forêt dense humide sempervirente de la Guyane vénézuélienne. Thèse Fac. Sc., Univ. de Toulouse. CNRS 2969. 404 p.
- Roose E., Lelong F., Colombani J. (1983) Influence du bioclimat et de l'aménagement des sols sur les éléments du bilan hydrique en Afrique de l'Ouest. Hydrol. Sci. J., n° 28,(2), 283-309.
- Roose E. (1980) Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Thèse de Doctorat ès-Sciences, Université d'Orléans.
- Rougerie G. (1958) Existence et modalités du ruissellement sous forêt dense de Côte d'Ivoire. C.R. Ac. Sc., CCXLVI, 290-292.
- Rowe L.K. (1979) Rainfall interception by a beech-podocarp-hardwood forest near Reefton, North Westland, New Zealand. J. Hydrol.(N.Z.), n° 18, 63-72.
- Rowe L.K. (1983) Rainfall interception by an evergreen beech forest, Nelson, New Zealand. J. Hydrol., n° 66, 143-158.
- Ruprecht J.K., Schofield N.J. (1989) Analysis of streamflow generation following deforestation in southwest Western Australia. J. Hydrol., n°105, 1-17.
- Rutter A.J., Kershaw K.A., Robins P.C., Morton A.J. (1971) A predictive model of rainfall interception in forests. I Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican Pine. Agric. Météorol., 9, 367-384.
- Rutter A.J., Morton A.J., Robins P.C. (1975) A predictive model of rainfall interception in forests. II Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. J. Appl. Ecol., 12, 367-380.
- Sarrailh J.M. (1982) Premières observations sur les pâturages des parcelles de ruissellement et d'érosion. In "l'Ecosystème Forestier Guyanais", bulletin de liaison du groupe de travail, ORSTOM, Cayenne, n° 6, 7-18
- Sarrailh J.M. (1983) Les parcelles élémentaires d'étude du ruissellement et de l'érosion. Synthèse après quatre années d'études. In "Le projet ECEREX" - compte-rendu des journées de Cayenne (4-8 mars 1983), GERDAT, INRA, MUSEUM, ORSTOM, 394-403.
- Sarrailh J.M. (1983) Mise en place de la parcelle ARBOCEL. Etude de l'évolution du recru sur l'hectare central. In "Le projet ECEREX" - compte-rendu des journées de Cayenne (4-8 mars 1983), GERDAT, INRA, MUSEUM, ORSTOM, 188-194.
- Sarrailh J.M. (1984) Mise en valeur de l'écosystème forestier guyanais. Opération ECEREX : Résumé des premiers résultats. Bois et Forêts des Tropiques, n° 206, 13-32.
- Sarrailh J.M. (1989) Les bassins-versants d'ECEREX. Rapport annuel 1989. CTFT, Kourou, 15 p.

- Schulze R.E., Scott-Shaw C.R., Nänni U.W. (1978) Interception by *Pinus Patula* in Relation to rainfall parameters. *J. Hydrol.* n° 36, 393-396.
- Seuna P. (1980) Long term influence of forestry drainage on the hydrology of an open bog in Finland. In "the influence of Man on the hydrological regime with special reference to representative and experimental basins". Proceedings of the Helsinki Symposium, June 1980, Pub. IAHS n°130, 141-149.
- Shermann L.K. (1932) Streamflow from rainfall by the Unit-graph Method. *Eng. News Rec.*, vol.108, 501-505.
- Singh T., Kalra Y.P., Hillman G.R. (1974) Effects of pulpwood harvesting on the quality of stream waters of forest catchments representing a large area in Western Alberta, Canada. In "Effects of Man on the interface of the hydrological cycle with the physical environment". Proceedings of the Paris Symposium, September 1974, Pub. IAHS n°113, 21-27.
- Sklash M.G., Stewart M.K., Pearce A.J. (1986) Storm runoff generation in humid headwater catchments. 2. A case study of hillslope and low-order stream response. *Wat. Resour. Res.*, 22(8), 1273-1282.
- Sloan P.G., Moore I.D. (1984) Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forest watersheds. *Wat. Resour. Res.* 20(12), 1815-1822.
- Snyder W.M. (1960) Elk River plan for hydrologic analysis, Tributary Watersheds Program, 87 p., Tennessee Valley Authority, Knoxville, USA.
- Snyder W.M. (1973) Comments on "Role of Subsurface Flow in Generating Surface Runoff. 1. Base Flow Contributions to Channel Flow" by R. Allan Freeze. *Wat. Resour. Res.*, 9(2), 489-491.
- Sopper W.E., Lull H.W. (1967) *Forest Hydrology*. Pergamon, 813 p.
- Sopper W.E. Lynch J.A. (1970) Changes in water yield following partial forest cover removal on an experimental watershed. In "Results of research on representative and experimental basins". Proceedings of the Wellington Symposium, Pub. IAHS n°96, 369-389.
- Swank W.T., Douglass J.E. (1974) Streamflow greatly reduced by converting deciduous hardwood stands to pine. *Science*, 185, 857-859.
- Swank W.T., Helvey J.D. (1970) Reduction of streamflow increases following regrowth of clearcut hardwood forests. In "Results of research on representative and experimental basins". Proceedings of the Wellington Symposium, Pub. IAHS n°96, 346-360.
- Thauvin V. (1987) Comportement hydrologique des pins et des eucalyptus par rapport à la forêt tropicale humide guyanaise. Rapport de stage, Maîtrise de Sciences et Techniques ISIM. ORSTOM, Montpellier, 20 p., annexes.
- Tixeront J. (1973) Sur un ancien texte hydrologique attribué à Démocrite. Livre Jubilaire Marcel Solignac. *Ann. des Mines et de la Géologie de Tunisie*. Tunis.
- Tricart J. (1965) Introduction à la géomorphologie climatique. SEDES, Paris.
- Troendle C.A. (1979) A variable Source Area Model for stormflow prediction on first order forested watersheds. Ph.D.Thesis, University of Georgia, USA.
- Troendle C.A., King R.M. (1985) The effect of timber harvest on the Fool Creek watershed 30 years later. *Wat. Resour. Res.*, 21(12), 1915-1922.

- Van Lill W.S., Kruger F.J., Van Wyck D.B. (1980) The effect of afforestation with *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden and *Pinus patula* Schlecht. et Cham. on streamflow from experimental catchments at Mokobulaan, Transvaal. *J. Hydrol.*, n°48, 107-118.
- Villa Nova N.A., Salati E, Matsui E. (1976) Estimativa da evapotranspiracao na bacia Amazonica. *Acta Amazonica*, 6 (2), 215-228.
- Wan Der Weert R., Kamerling G.E. (1974) Evapotranspiration of Water Hyacinth (*Eichornia Crassipes*). *J. Hydrol.* n° 22, 201-212.
- Ward R.C. (1984) On the response to precipitation of headwater streams in humid areas. *J. Hydrol.*, n° 74, 171-189.
- Whipkey R.Z. (1965) Subsurface stormflow from forested slopes. *Hydr. Sci. Bull.*, n° 10(2), 74-85.
- Whipkey R.Z. (1969) Storm runoff from forested catchments by subsurface routes. In "Proc. of Symposium of Leningrad", Pub. IAHS n° 85, 773-779.
- Wilson T.V., Ligon J.T. (1970) The interflow process on sloping watersheds areas. *Water Res. Res. Inst., Clemson Univ.*, Report n° 38, 58 p.
- Woodruff J.F., Hewlett J.D. (1970) Predicting and mapping the average hydrologic response for the Eastern United States. *Wat. Resour. Res.*, n° 6, 1312-1326.
- Zaslavsky D., Sinai G. (1981) Surface Hydrology, I : Explanation of phenomena. *J. Hydraul. Div., Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, 107(Hy1), 1-16.
- Zimmerman U., Munnich K.O., Roether W., Kreutz W, Schubach K, Siegel O. (1966) Tracers determine movement of soil moisture and evapotranspiration. *Science*, n° 152, 346-347.
- Zinke P.J. (1967) Forest interception studies in the United States. In "Forest Hydrology", Sopper W.E. and Lull H.W. Ed., Pergamon, 275-290.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

Introduction	11
Première partie : PROBLEMATIQUE ET CONTEXTE NATUREL	15
1.1 LA PROBLEMATIQUE ET LES REPONSES	19
1.1.1 Le montage institutionnel du programme.....	20
1.1.2 La méthode expérimentale.....	21
1.2 ESQUISSE DU MILIEU NATUREL	23
1.2.1 Eléments du climat de la Guyane.....	23
1.2.1.1 Pluie annuelle.....	23
1.2.1.2 Masses d'air et types de temps.....	25
1.2.2 Le régime des précipitations à ECEREX.....	27
1.2.2.1 Pluies décennales, mensuelles et annuelles.....	27
1.2.2.2 Stations pluviométriques de référence.....	30
1.2.2.3 Relations Intensités-Durées-Fréquences.....	33
1.2.3 Géologie et modelé.....	37
1.2.4 Sols et eaux à ECEREX.....	37
1.2.5 La forêt.....	45
Deuxième Partie : HYDROLOGIE DU MILIEU NATUREL	47
2.1 LES CHEMINS DE L'EAU : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	51
2.1.1 "Forest Hydrology Story" : Hydrologie des pays humides et Anglo-Saxons.....	51
2.1.1.1 La vague de l'écoulement sub-superficiel.....	51
2.1.1.2 La Vision hydrologique "latéraliste" : les Mots pour le dire.....	55
2.1.1.3 La modélisation hydrologique et la théorie des aires participantes.....	59
2.1.2 L'aire Contributive Française à l'hydrologie latéraliste.....	61
2.1.2.1 "Club" et "Lobby" n'ont pas d'équivalents en français.....	61
2.1.2.2 Intensif ou Extensif : Le dilemne des systèmes de production agricole, mais parfois aussi de la Recherche Hydrologique.....	64
2.1.3 Vers une synthèse sans compromis.....	67
2.2 LE DISPOSITIF DE MESURE HYDROLOGIQUE	71
2.2.1 Les parcelles sous forêt naturelle.....	71
2.2.2 Les parcelles d'essai en fourrages.....	72
2.2.3 Les bassins versants élémentaires.....	73
2.2.3.1 Caractéristiques morphométriques.....	73
2.2.3.2 Les sols.....	74
2.2.3.3 Les couvertures végétales.....	77
2.2.3.4 Equipement hydrométrique.....	79
2.2.3.5 Traitement de base des données hydrologiques.....	79

2.2.4	Le petit bassin versant	80
2.2.4.1	Les sols	80
2.2.4.2	La couverture végétale	80
2.2.4.3	Equipement hydrométrique.....	82
2.2.4.4	Traitement de base des données hydrologiques.....	82
2.3	LA SEPARATION DES ECOULEMENTS SUR L'HYDROGRAMME	83
2.3.1	Méthodes analytiques ou graphiques	84
2.3.2	Méthodes isotopiques ou hydrochimiques	89
2.3.3	Discrétisation des crues et séparation des écoulements à ECEREX	94
2.3.3.1	Discrétisation d'événements hydrologiques élémentaires	94
2.3.3.2	Séparation des écoulements.....	98
2.4	UNE PERCEPTION HYDROLOGIQUE DU MILIEU FORESTIER	100
2.4.1	Variabilité spatiale a l'échelle annuelle	100
2.4.1.1	Un échantillon de données pour l'analyse hydrologique du milieu forestier.....	100
2.4.1.2	La faible variabilité spatiale des précipitations	103
2.4.1.3	La grande variabilité spatiale des différents types d'écoulement.....	103
2.4.1.4	La proportion dominante des écoulements de crue par rapport aux écoulements de base...	106
2.4.1.5	La proportion dominante des écoulements rapides dans l'Écoulement Total des Crues.....	107
2.4.1.6	La durée des situations "en crue" et le nombre de crues	107
2.4.2	Derrière l'hétérogénéité, l'organisation	110
2.4.3	De l'effet d'échelle	111
2.4.3.1	De la parcelle au bassin versant élémentaire	111
2.4.3.2	Du bassin élémentaire au petit bassin versant.....	114
2.4.4	Variabilité temporelle	119
2.4.4.1	Variabilité des précipitations	119
2.4.4.2	Variabilité des écoulements.....	124
2.5	LA COMPOSANTE ATMOSPHERIQUE DU BILAN DE L'EAU EN FORET	127
2.5.1	Evapotranspiration et déficit d'écoulement	127
2.5.2	L'interception	132

**Troisième partie : METHODES D'EVALUATION DES EFFETS PROVOQUES
PAR L'EXPERIMENTATION..... 145**

3.1	JUSTIFICATION ET DESCRIPTION DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL	149
3.1.1	Le "défrichement papetier"	149
3.1.2	Les aménagements	150
3.1.2.1	Le recrû naturel.....	150
3.1.2.2	La sylviculture d'essences à croissance rapide.....	152
3.1.2.3	Les pâturages	153
3.1.2.4	L'arboriculture fruitière.....	154
3.1.2.5	L'agriculture traditionnelle sur brûlis.....	155

3.2	PRINCIPES ET METHODES DE L'HYDROLOGIE EXPERIMENTALE	157
3.2.1	De l'usage du bassin expérimental	157
3.2.2	Méthodes d'investigation	159
3.2.2.1	Les méthodes avec un seul bassin versant	159
3.2.2.2	Les méthodes comparatives à plusieurs bassins versants	159
3.2.3	Les résultats	162
3.3	MISE EN OEUVRE DE LA METHODE DES BASSINS APPARIES	164
3.3.1	Rappel des objectifs	164
3.3.2	Constitution des couples bassin expérimental - bassin témoin	166
3.3.3	Les régressions établies sur les écoulements des crues individuelles	170
3.3.3.1	Corrélations linéaires à une variable	170
3.3.3.3	Relation linéaire corrigée par l'écart pluviométrique	175
3.3.4	Les régressions sur les écoulements à l'échelle décadaire	179
3.3.5	Choix de l'opérateur de reconstitution des écoulements de crue en conditions d'Epoque Verte	186
 Quatrième partie : HYDROLOGIE DES BASSINS EN SOL NU : L'Epoque Rouge		193
4.1	LES BASSINS VERSANTS L'ANNEE DU DEFRIchement : L'EPOQUE ROUGE	197
4.2	L'AUGMENTATION DES VOLUMES DE CRUE EN EPOQUE ROUGE	199
4.3	RECHERCHE D'UNE PERIODE HOMOGENE EN EPOQUE ROUGE	205
4.4	L'AUGMENTATION DES VOLUMES DE CRUE PENDANT L'EPOQUE ROUGE STABILISEE	214
4.5	ASPECTS ET CAUSES DE L'AUGMENTATION DES ECOULEMENTS DE CRUE	219
4.5.1	La part respective des apports et de la production	219
4.5.2	Le nombre des crues	224
4.5.3	Les débits de pointe	234
 Cinquième partie : HYDROLOGIE DES BASSINS AMENAGES : l'Epoque Jaune		251
5.1	UNE PRAIRIE PATUREE : LE BASSIN A	253
5.1.1	Les écoulements	256
5.1.2	Les débits de pointe	258
5.2	LE RECRU NATUREL : LES BASSINS D ET E	265
5.2.1	Les écoulements de crue du bassin D	266
5.2.2	Les débits de pointe du bassin D	268

5.2.3	Les écoulements de crue du bassin E.....	272
5.2.4	Comparaison des écoulements de D et E.....	275
5.2.5	Les débits de pointe du bassin E.....	276
5.3	LA SYLVICULTURE A CROISSANCE RAPIDE : LES BASSINS G ET H.....	281
5.3.1	Les écoulements de crue des bassins G et H.....	283
	5.3.1.1 Situation en 1982 et 1983.....	283
	5.3.1.2 Situation en 1987	286
5.3.2	Les débits de pointe des bassins G et H.....	290
5.4	LA CULTURE ITINERANTE SUR BRULIS : LE BASSIN I.....	297
5.4.1	Les écoulements de crue.....	298
5.4.2	Les débits de pointe	302
5.5	UN VERGER DE POMELOS : LE BASSIN C.....	306
5.5.1	Les écoulements de crue.....	307
5.5.2	Les débits de pointe	310
5.6	CONCLUSION A L'ETUDE DES BASSINS AMENAGES	314
5.6.1	Effets des expérimentations sur les volumes écoulés.....	315
5.6.2	Effets des expérimentations sur les débits de pointe.....	317
Sixième partie : CONCLUSIONS.....		325
ECEREX : tout un Programme !.....		329
La signification dimensionnelle d'ECEREX.....		329
La signification hydrologique d'ECEREX.....		331
Performances et limitations de la méthodologie utilisée.....		333
Les principaux résultats acquis sur le plan hydrologique		334
	La compréhension de la variabilité spatiale des écoulements.....	334
	Une vision affinée du protocole expérimental	335
	Les modifications hydrologiques liées à l'utilisation du sol.....	338
Perspectives pour une Recherche en Hydrologie Forestière.....		340
Liste des références bibliographiques citées.....		343

LISTE DES TABLEAUX

1.2.01 :	Pluies mensuelles et annuelles à ECEREX (BV.A et PK.16).....	29
1.2.02 :	Résultats de l'ajustement linéaire des pluies mensuelles d'ECEREX avec Rochambeau, Sinnamary et St. Elie	30
1.2.03 :	Distribution fréquentielle des pluies journalières à ECEREX, Rochambeau, Sinnamary et St. Elie	32
1.2.04 :	Statistique des précipitations maximales à Rochambeau pendant 1, 2, 3, 5, 10, 20 et 30 jours consécutifs.....	34
1.2.05 :	Intensités et durées des pluies à Rochambeau pour les récurrences biennales et décennales, et pour des pas de temps de 6 minutes à 30 jours	35
1.2.06 :	Dispersion des résultats de mesure des perméabilités de surface	44
1.2.07 :	Phytomasses sur les 10 bassins-versants ECEREX.....	46
2.2.01 :	Surfaces des bassins-versants et extension des caractères pédologiques conditionnant le comportement hydrologique.....	78
2.2.02 :	Répartition des différentes dynamiques de l'eau sur le bassin de la Crique Délices	81
2.3.01 :	Classement des crues répertoriées à ECEREX par tranches de hauteur en mm.....	95
2.3.02 :	Pourcentages cumulés de l'Écoulement Total de Crue par tranches de hauteurs des crues.....	95
2.4.01 :	Caractérisation des comportements hydrologiques des 10 bassins-versants ECEREX sous forêt naturelle	102
2.4.02 :	Variabilité des régimes hydrologiques des bassins-versants ECEREX sous forêt naturelle.....	105
2.4.03 :	Proportions relatives à l'Écoulement Total des différents types d'écoulements sous forêt.....	108
2.4.04 :	Proportions relatives des écoulements rapportés au volume des hydrogrammes de crues	108
2.4.05 :	Durées cumulées des crues, et nombre de crues sous forêt pendant une année.....	109
2.4.06 :	Bilan hydrologique du bassin B et de la parcelle A	113
2.4.07 :	Bilan hydrologique de la Crique Délices et des bassins élémentaires B et F	115
2.4.08 :	Nombre de jours de pluie par tranches de hauteurs (mm) à ECEREX - Bassin A	121
2.4.09 :	Hauteurs de pluie maximales (mm) en 1, 2, 3,.... et 90 jours consécutifs à ECEREX	122
2.4.10 :	Lames écoulées annuelles sous forêt sur les bassins B et F.....	126
2.5.01 :	Evaporation mesurées sur bac (mm). Insolation et humidité à Rochambeau	129
2.5.02 :	Définition de l'ETR à ECEREX au pas de temps mensuel	131
2.5.03 :	Précipitation interne des 32 sites étudiés à Grégoire	139
2.5.04 :	Moyenne et écart-type de la précipitation interne en fonction du nombre de pluviomètres.....	143
2.5.05 :	Erreur relative sur la précipitation interne et l'interception, en fonction du nombre de pluviomètres, au risque 0,1	142
3.3.1 :	Synoptique des scénarios expérimentaux testés sur les bassins versants ECEREX.....	156
3.3.01 :	Nombre de crues par bassin versant et par an.....	168
3.3.02 :	Découpage de l'Epoque Verte en périodes I et II pour calage et validation des régressions sur les bassins versants appariés.....	169

3.3.03 :	Paramètres des corrélations linéaires $LETC = LETC \text{ Témoin} * a + b$	170
3.3.04 :	Validation des corrélations linéaires entre lames écoulées par crue	172
3.3.05 :	Ecart en % entre la somme des écoulements totaux de crue pris en compte dans les régressions entre témoin et bassin expérimental et les écoulements effectivement observés sur le bassin expérimental	173
3.3.06 :	Paramètres des corrélations bilinéaires $LETC = LETC \text{ Témoin} * a + (P \text{ Témoin} - P \text{ bassin}) * b + c$	177
3.3.07 :	Validation des corrélations bilinéaires entre lames écoulées par crue	178
3.3.08 :	Validation des corrélations linéaires entre lames écoulées par décades	184
3.3.09 :	Validation des corrélations bilinéaires entre lames écoulées par décades	185
3.3.10 :	Valeur des paramètres des corrélations (par décade ou par crue) pour la reconstitution globale des écoulements de crue, calculées sur l'Epoque Verte	186
3.3.11 :	Valeur des paramètres des corrélations sur les écoulements de crue par décade, en Epoque Verte	187
3.3.12 :	Précision de la reconstitution des volumes écoulés pendant toute l'Epoque Verte, dans l'intervalle de confiance à 90 %	188
4.1.01 :	Périodes de références pour l'état en "sol nu" (Epoque Rouge)	198
4.2.01 :	Écoulements de Crue (ETC) observés sur sol nu et reconstitués sous forêt pendant l'Epoque Rouge	200
4.3.01 :	Pluie totale sur les bassins défrichés, entre l'arrivée des engins et le début de la période considérée comme homogène et identifiée par les tests de Bois	214
4.4.01 :	Écoulements cumulés, observés sur les bassins versants, et gains relatifs calculés après défrichement par comparaison des pentes des doubles cumuls en Epoque Verte et en Epoque Rouge stabilisée	215
4.4.02 :	Effets du défrichement globalisés sur l'Epoque Rouge stabilisée. Estimation des débits en forêt par corrélation	217
4.4.03 :	Tableau synthétique des effets du défrichement globalisés sur l'Epoque Rouge stabilisée	217
4.5.01 :	La part des apports et de la production dans l'augmentation de l'Écoulement Total de Crue en Epoque Rouge stabilisée	221
4.5.02 :	Décompte du nombre de crues en Epoque Verte et Rouge stabilisée, et valeur des pentes des doubles cumuls du nombre de crues	225
4.5.03 :	Nombres de crues par tranches de hauteur (mm), observés après défrichement, et calculés comme sous forêt pendant l'Epoque Rouge stabilisée. Participation de chaque tranche dans l'Écoulement Total de Crue, en %	230
4.5.04 :	Débits de pointe en Epoque Verte	234
4.5.05 :	Débits de pointe en Epoque Rouge stabilisée	235
4.5.06 :	Paramètres des corrélations entre débits de pointe sur les bassins appariés (E. Verte)	237
4.5.07 :	Pentes des courbes de doubles cumuls des débits de pointe sur les bassins appariés, en Epoque Verte et Rouge stabilisée	240
4.5.08 :	Augmentation des débits de pointe en Epoque Rouge stabilisée, par rapport à la forêt naturelle	247
4.5.09 :	Augmentation des débits de pointe en Epoque Rouge stabilisée, par rapport à la forêt naturelle	247
4.5.10 :	Augmentation moyenne des débits de pointes en Epoque Rouge stabilisée. Comparaison des estimations par régression et par doubles cumuls	247
5.1.01 :	Écoulements Totaux de Crue du bassin A en Epoque Jaune (1980-83). Comparaison des écoulements observés et des écoulements calculés en forêt naturelle, selon différentes estimations	257
5.1.02 :	Débits de pointe du bassin A en Epoque Jaune, en $l.s^{-1}.ha^{-1}$	261
5.1.03 :	Augmentation des débits de pointe du bassin A par rapport à la forêt naturelle en Epoque Jaune (prédiction par rapport à Q_m)	262

5.1.04 :	Augmentation des débits de pointe du bassin A par rapport à la forêt naturelle en Epoque Jaune (prédiction par rapport à Q_{95})	264
5.1.05 :	Augmentation moyenne des débits de pointe du bassin A en Epoque Jaune. Comparaison des estimations par régression et par doubles cumuls	264
5.2.01 :	Écoulements Totaux de Crue du bassin D en Epoque Jaune (1980-83). Comparaison des écoulements observés et des écoulements calculés en forêt naturelle, selon différentes estimations	267
5.2.02 :	Débits de pointe du bassin D en Epoque Jaune, en $l.s^{-1}.ha^{-1}$	269
5.2.03 :	Augmentation des débits de pointe du bassin D par rapport à la forêt naturelle en Epoque Jaune (prédiction par rapport à Q_m).....	270
5.2.04 :	Augmentation des débits de pointe du bassin D par rapport à la forêt naturelle en Epoque Jaune (prédiction par rapport à Q_{95}).....	270
5.2.05 :	Écoulements Totaux de Crue du bassin E en Epoque Jaune (1980-83). Comparaison des écoulements observés et des écoulements calculés en forêt naturelle, selon différentes estimations	273
5.2.06 :	Débits de pointe du bassin E en Epoque Jaune, en $l.s^{-1}.ha^{-1}$	276
5.2.07 :	Augmentation des débits de pointe du bassin E par rapport à la forêt naturelle en Epoque Jaune (prédiction par rapport à Q_m).....	277
5.2.08 :	Augmentation des débits de pointe du bassin E par rapport à la forêt naturelle en Epoque Jaune (prédiction par rapport à Q_{95}).....	278
5.3.01 :	Écoulements Totaux de Crue du bassin G en Epoque Jaune (1982-83). Comparaison des écoulements observés et des écoulements calculés en forêt naturelle, selon différentes estimations	283
5.3.02 :	Écoulements Totaux de Crue du bassin H en Epoque Jaune (1982-83). Comparaison des écoulements observés et des écoulements calculés en forêt naturelle, selon différentes estimations	283
5.3.03 :	Écoulements Totaux de Crue des bassins G et H en Epoque Jaune (1987). Comparaison des écoulements observés et des écoulements calculés en forêt naturelle, par corrélation, crue par crue.....	287
5.3.03 :	Débits de pointe des bassins G et H en Epoque Jaune, en $l.s^{-1}.ha^{-1}$	290
5.3.04 :	Augmentation des débits de pointe sur les bassins G et H en Epoque Jaune (1982 et 1983), estimée par les pentes des doubles cumuls	292
5.3.05 :	Augmentation des débits de pointe sur G par rapport à la forêt naturelle en Epoque Jaune (prédiction par rapport à Q_m).....	293
5.3.06 :	Augmentation des débits de pointe sur G par rapport à la forêt naturelle en Epoque Jaune (prédiction par rapport à Q_{95}).....	293
5.3.07 :	Augmentation des débits de pointe sur H par rapport à la forêt naturelle en Epoque Jaune (prédiction par rapport à Q_m).....	295
5.3.08 :	Augmentation des débits de pointe sur H par rapport à la forêt naturelle en Epoque Jaune (prédiction par rapport à Q_{95}).....	295
5.4.01 :	Écoulements Totaux de Crue du bassin I en Epoque Jaune (1982-83). Comparaison des écoulements observés et des écoulements calculés en forêt naturelle, selon différentes estimations	299
5.4.02 :	Débits de pointe du bassins I en Epoque Jaune	302
5.4.03 :	Augmentation des débits de pointe sur le bassin I en Epoque Jaune (1982 et 1983), estimée par les pentes des doubles cumuls	303
5.4.04 :	Augmentation des débits de pointe sur I par rapport à la forêt naturelle en Epoque Jaune (prédiction par rapport à Q_m).....	304
5.4.05 :	Augmentation des débits de pointe sur I par rapport à la forêt naturelle en Epoque Jaune (prédiction par rapport à Q_{95}).....	304
5.5.01 :	Écoulements Totaux de Crue du bassin C en Epoque Jaune (1980 - 1983). Comparaison des écoulements observés et des écoulements calculés en forêt naturelle, selon différentes estimations	308
5.5.02 :	Lames écoulées annuelles sur le bassin C et gains calculés par rapport à la forêt primaire	309

5.5.03 :	Débits de pointe du bassin C en Epoque Jaune	311
5.5.04 :	Augmentation des débits de pointe sur le bassin C en Epoque Jaune (1980 - 1983), estimée par les pentes des doubles cumuls	311
5.5.05 :	Augmentation des débits de pointe sur C par rapport à la forêt naturelle en Epoque Jaune (prédiction par rapport à Q_m).....	312
5.5.06 :	Augmentation des débits de pointe sur C par rapport à la forêt naturelle en Epoque Jaune (prédiction par rapport à Q_{95}).....	312
5.6.01 :	Augmentation des Ecoulements Totaux de Crue sur les bassins expérimentaux ECEREX, en pourcentage des écoulements sous forêt primaire.....	315
5.6.02 :	Augmentation des débits maximum instantanés sur les bassins expérimentaux ECEREX, en pourcentage des débits correspondant sous forêt primaire	318

LISTE DES FIGURES

1.1.01 :	Localisation du programme ECEREX	21
1.2.01 :	Pluviométrie moyenne annuelle sur la Guyane (période 1956-1985)	24
1.2.02 :	Pluviométrie moyenne par décade à ECEREX	28
1.2.03 :	Pluies mensuelles moyennes, maximales et minimales à ECEREX	29
1.2.04 :	Corrélation des pluies mensuelles à ECEREX avec les stations de Rochambeau, Sinnamary et St. Elie	31
1.2.05 :	Distribution fréquentielle des pluies journalières à ECEREX, Rochambeau, Sinnamary et St. Elie	32
1.2.06 :	Relation Intensité-Durée-Fréquences à Rochambeau pour des pas de temps de 6 minutes à 4 jours	33
1.2.07 :	Relation Intensité-Durée-Fréquences à Rochambeau pour des pas de temps de 1 à 30 jours	34
1.2.08 :	Carte géologique de la zone ECEREX.....	36
1.2.09 :	Chevclu du réseau hydrographique dans la zone ECEREX	36
1.2.10 :	Schéma des différents stades d'évolution des couvertures pédologiques sur schistes	40
1.2.11 :	Schématisation des poches d'eau, et de la nappe perchée dans les sols à Dynamique Superficielle et Latérale	42
1.2.12 :	Distribution pondérale des racines dans un sol à Drainage Vertical Libre (SS10) et dans un sol à Dynamique Superficielle et Latérale (HAR7)	42
1.2.13 :	Dispersion des résultats de mesure des perméabilités de surface.	44
2.1.01 :	Concept du fonctionnement d'un bassin-versant selon Hewlett (1961)	53
2.1.02 :	L'analogie de l'écoulement latéral et du toit de chaume ("Tatched Roof Analogy" de Zaslavsky et Sinai)	53
2.1.03 :	Fonctionnement des systèmes hydrologiques en relation avec le modelé et les conditions morphoclimatiques.....	68
2.2.01 :	Le dispositif de mesure hydrologique ECEREX	72
2.2.02 :	Les parcelles d'essai en fourrages, et la parcelle Wischmeier.....	73
2.2.03 :	Cartes hypsométriques des bassins-versants	75-76
2.2.04 :	Evolution de différents caractères et horizons pédologiques sur les bassins-versants ECEREX	78
2.2.05 :	Le bassin-versant de la Crique Délices	81
2.3.01 :	Séparation des écoulements selon Roche (1963)	87
2.3.02 :	Séparation des écoulements selon Hewlett et Hibbert (1967).....	87
2.3.03 :	Séparation des écoulements selon Cosandey (1986).....	87
2.3.04 :	Séparation des écoulements selon Dupraz (1984).....	88
2.3.05 :	Séparation des écoulements selon Humbert (1985).....	88
2.3.06 :	Séparation des écoulements selon Lambert (1968)	88
2.3.07 :	Séparation des écoulements selon Kattan et al.(1987)	88
2.3.08 :	Séparation des écoulements selon Sklash et al.(1986)	91

2.3.09 :	Séparation des écoulements selon Bruijnzeel (1983)	91
2.3.10 :	Séparation des écoulements selon Crouzet et al.(1970).....	92
2.3.11 :	Séparation des écoulements selon Mérot et al.(1981)	92
2.3.12 :	Séparation des écoulements selon Blavoux et Mudry (1988)	92
2.3.13 :	Séparation des écoulements selon Blavoux et Mudry (1988)	93
2.3.14 :	Distribution fréquentielle du nombre de crues à ECEREX par tranches de hauteurs	96
2.3.15 :	Pourcentages cumulés de l'Écoulement Total de Crue par tranches de hauteurs	97
2.3.16 :	Répartition fréquentielle des pentes de séparation des hydrogrammes du bassin B	99
2.4.01 :	Distribution des écoulements sous forêt exprimés en pourcentage de la pluie annuelle	104
2.4.02 :	Coefficients d'Écoulements Rapide annuels en fonction des types de sols.....	105
2.4.03 :	Durées des crues (en % du temps total) et nombre de crues (avec ERC > 0,1mm) - Situation sous forêt naturelle.....	109
2.4.04 :	Simple-cumuls des lames écoulées sur la parcelle A et le bassin B, et de la pluie mesurée au bassin B	113
2.4.05 :	Doubles-cumuls des écoulements sur la Parcelle A et le Bassin B	113
2.4.06 :	Bilan hydrologique annuel de la Crique Délices et des bassins élémentaires B et F	115
2.4.07 :	Écoulements mensuels des bassins B et F et de la Crique Délices	116
2.4.08 :	Répartition des pluies journalières par tranches de hauteur et par année (Pk16-Bassin A)	120
2.4.09 :	Pourcentage cumulé des apports des tranches de hauteurs journalières par rapport au total pluviométrique annuel (Pk16-bassin A)	121
2.4.10 :	Pluies maximales sur des périodes glissantes de 1, 2, 3, 5, 10, 20 et 30 jours consécutifs à ECEREX-bassin A.....	122-123
2.4.11 :	Variabilité interannuelle de l'Écoulement Total de Crue (ETC) sous forêt naturelle. Bassins B et F	126
2.5.01 :	Répartition fréquentielle de la précipitation interne à ECEREX	136
2.5.02 :	Régression entre Précipitation Incidente en clairière (Pia) et Précipitation Interne sous Forêt (Pif).....	138
2.5.03 :	Répartition spatiale de la précipitation interne à Grégoire.....	140
2.5.04 :	Évolution de la précipitation interne ponctuelle en fonction du temps	141
2.5.05 :	Précision de l'estimation de la précipitation interne et l'interception, en fonction du nombre de pluviomètres, au risque 0,1	143
3.1.01 :	Diagramme synoptique de l'expérimentation ECEREX	151
3.3.01 :	Régressions entre Écoulements Totaux de Crue du témoin et du bassin expérimental, effectuées crue par crue, sur les périodes I et II de l'Époque Verte	171
3.3.02 :	Validation du calcul des Écoulements Totaux de Crue à partir des crues du bassin témoin. Valeurs absolues de la précision de la reconstitution des volumes d'ETC sur toute la période (Eglo).....	176
3.3.03 :	Validation du calcul des Écoulements Totaux de Crue à partir des crues du bassin témoin. Moyenne de l'écart absolu par crue (Em), calculée sur toutes les crues (en % de la valeur observée).....	176
3.3.04 :	Validation du calcul des Écoulements Totaux de Crue à partir des crues du bassin témoin. Moyenne de l'écart absolu par crue (Em1), calculée sur les crues avec ETC > 1 mm (en % de la valeur observée).....	176
3.3.05 :	Répartition des volumes décennaux d'Écoulement Total de Crue, par classes de hauteur	182
3.3.06 :	Validation du calcul par décade des Écoulements Totaux de Crue à partir du témoin. Valeurs absolues de la précision de la reconstitution des volumes d'ETC, sur toute la période (Eglo)	183

3.3.07 :	Validation du calcul par décade des Ecoulements Totaux de Crue à partir du témoin. Moyenne de l'écart absolu par décade (Em), calculé sur toutes les décades (en % de la valeur observée).....	183
3.3.08 :	Validation du calcul par décade des Ecoulements Totaux de Crue à partir du témoin. Moyenne de l'écart absolu par décade (Em15), pour les décades avec ETC > 15 mm (en % de la valeur observée)	183
3.3.09 :	Régressions entre Ecoulements Totaux de Crue calculés à partir du témoin (crue par crue), et écoulements observés sur les bassins expérimentaux, pendant l'Epoque Verte	189
3.3.10a :	Régressions entre Ecoulements Totaux de Crue calculés à partir du témoin (par décade), et écoulements observés sur les bassins expérimentaux, pendant l'Epoque Verte	190
3.3.10b :	Régressions entre Ecoulements Totaux de Crue calculés à partir du témoin (par décade), et écoulements observés sur les bassins expérimentaux, pendant l'Epoque Verte	191
4.2.01 :	Doubles cumuls des Ecoulements Totaux de Crue (ETC), discrétisés par décades, depuis l'origine des observations (Epoque Verte), jusqu'à la fin de la période en sol nu (Epoque Rouge).....	201
4.2.02 :	Doubles cumuls des Ecoulements Totaux de Crue (ETC), discrétisés par décades, depuis l'origine des observations (Epoque Verte), jusqu'à la fin de la période en sol nu (Epoque Rouge).....	202
4.2.03 :	Doubles cumuls des Ecoulements Totaux de Crue (ETC), discrétisés par décades, depuis l'origine des observations (Epoque Verte), jusqu'à la fin de la période en sol nu (Epoque Rouge).....	203
4.3.01 :	Cumul des résidus de la corrélation par crue entre Ecoulement Total de Crue du bassin A et du témoin B, et tracé des ellipses de Bois pour les seuils C de 80% et 90%	206
4.3.02 :	Cumul des résidus de la corrélation par crue entre Ecoulement Total de Crue du bassin C et du témoin B, et tracé des ellipses de Bois pour les seuils C de 80% et 90%	207
4.3.03 :	Cumul des résidus de la corrélation par crue entre Ecoulement Total de Crue du bassin G et du témoin F, et tracé des ellipses de Bois pour les seuils C de 80% et 90%	208
4.3.04 :	Cumul des résidus de la corrélation par crue entre Ecoulement Total de Crue du bassin J et du témoin F, et tracé des ellipses de Bois pour les seuils C de 80% et 90%	209
4.3.05 :	Cumul des résidus de la corrélation par crue entre Ecoulement Total de Crue des bassins D et H et des témoins B et F, et tracé des ellipses de Bois pour les seuils C de 80% et 90%	210
4.4.01 :	Augmentation relative de l'Ecoulement Total de Crue (ETC) en Epoque Rouge stabilisée, rapportée à l'écoulement sous forêt dans les mêmes conditions, et exprimé en %	218
4.4.02 :	Coefficients d'écoulement en crue (Ketc), observés en Epoque Rouge stabilisée.	218
4.5.01 :	Doubles cumuls du nombre de crues, discrétisé par décades, depuis l'origine des observations (Epoque verte), jusqu'à la fin de la période en sol nu (Epoque Rouge)	226
4.5.02 :	Doubles cumuls du nombre de crues, discrétisés par décades, depuis l'origine des observations (Epoque verte), jusqu'à la fin de la période en sol nu (Epoque Rouge)	227
4.5.03 :	Nombre de crues en Epoque Rouge stabilisée par tranches de hauteur en mm sur A et C	231
4.5.03 :	Nombre de crues en Epoque Rouge stabilisée, par tranches de hauteur en mm sur A et C	232
4.5.04 :	Nombre de crues en Epoque Rouge stabilisée, par tranches de hauteur en mm sur G et H	233
4.5.05 :	Nombre de crues en Epoque Rouge stabilisée, par tranches de hauteur en mm sur D et J	234
4.5.06 :	Régressions entre débits de pointe sur les bassins appariés	238
4.5.07 :	Régressions entre débits de pointe sur les bassins appariés	239
4.5.08 :	Doubles cumuls des débits de pointe sur les bassins appariés	241
4.5.09 :	Doubles cumuls des débits de pointe sur les bassins appariés	242
4.5.10 :	Augmentation des débits de pointe en Epoque Rouge stabilisée, à partir des corrélations entre bassins appariés	248
4.5.11 :	Augmentation des débits de pointe en Epoque Rouge stabilisée, à partir des corrélations entre bassins appariés	249

5.1.01 :	Doubles cumuls des Ecoulements Totaux de Crue (ETC) du témoin B et du bassin A, discrétisés par décade, en Epoque Jaune. (janvier 1980 - décembre 1983)	259
5.1.02 :	Régression crue par crue des Ecoulements Totaux de Crue (ETC) du témoin B et du bassin A en Epoque Jaune. (janvier 1980 - décembre 1983)	259
5.1.03 :	Cumul des résidus de la corrélation par crue de l'écoulement du bassin A et du témoin B sur l'ensemble de l'Epoque Jaune (janvier 1980 à décembre 1983). Tracé des ellipses de Bois pour les seuils C de 80% et 90%	260
5.1.04 :	Cumul des résidus de la corrélation par crue de l'écoulement du bassin A et du témoin B sur la période janvier 1980 à décembre 1981. Tracé des ellipses de Bois pour les seuils de 80% et 90%	260
5.1.05 :	Doubles cumuls des débits de pointe du témoin B et du bassin A en Epoque Jaune	263
5.1.06 :	Augmentation des débits de pointe sur le bassin A en Epoque Jaune, à partir des corrélations avec le témoin B	263
5.2.01 :	Doubles cumuls des Ecoulements Totaux de Crue (ETC) du témoin B et du bassin D, discrétisés par décade, en Epoque Jaune. (janvier 1982 - décembre 1983)	268
5.2.02 :	Doubles cumuls des débits de pointe du témoin B et du bassin D en Epoque Jaune	269
5.2.03 :	Augmentation des débits de pointe sur le bassin D en Epoque Jaune, à partir des corrélations avec le témoin B	271
5.2.04 :	Doubles cumuls des Ecoulements Totaux de Crue (ETC) du témoin B et du bassin E, discrétisés par décade, en Epoque Jaune. (juin 1980 - décembre 1983)	274
5.2.05 :	Doubles cumuls des Ecoulements Totaux de Crue (ETC) du bassin D et du bassin E, discrétisés par décade, sur toute la durée de l'expérimentation (juin 1978 - décembre 1983)	274
5.2.06 :	Augmentation des débits de pointe sur le bassin E en Epoque Jaune, année 1981, à partir des corrélations avec le témoin B	279
5.2.07 :	Augmentation des débits de pointe sur le bassin E en Epoque Jaune, années 1982-1983, à partir des corrélations avec le témoin B	279
5.2.08 :	Doubles cumuls des débits de pointe du témoin B et du bassin E en Epoque Jaune	280
5.3.01 :	Doubles cumuls des Ecoulements Totaux de Crue (ETC) du témoin F et du bassin G, discrétisés par décade, en Epoque Jaune. (janvier 1982 - décembre 1983)	285
5.3.02 :	Doubles cumuls des Ecoulements Totaux de Crue (ETC) du témoin F et du bassin H, discrétisés par décade, en Epoque Jaune. (janvier 1982 - décembre 1983)	285
5.3.03 :	Ecarts entre l'écoulement observé et l'écoulement reconstitué sous forêt sur G et H, en fonction du volume de la crue sur F (décembre 1986 à juillet 1987)	288
5.3.04 :	Erosion moyenne par transect sur le bassin H	289
5.3.05 :	Doubles cumuls des débits de pointe du témoin F et du bassin G en Epoque Jaune	291
5.3.06 :	Doubles cumuls des débits de pointe du témoin F et du bassin H en Epoque Jaune	291
5.3.07 :	Augmentation des débits de pointe sur le bassin G en Epoque Jaune, année 1982, à partir des corrélations avec le témoin F	294
5.3.08 :	Augmentation des débits de pointe sur le bassin G en Epoque Jaune, année 1983, à partir des corrélations avec le témoin F	294
5.3.09 :	Augmentation des débits de pointe sur le bassin H en Epoque Jaune, année 1982, à partir des corrélations avec le témoin F	296
5.3.10 :	Augmentation des débits de pointe sur le bassin H en Epoque Jaune, année 1983, à partir des corrélations avec le témoin F	296
5.4.01 :	Doubles cumuls des Ecoulements Totaux de Crue (ETC) du témoin B et du bassin I, discrétisés par décade, en Epoque Jaune. (janvier 1982 - décembre 1983)	299
5.4.02 :	Doubles cumuls des débits de pointe du témoin B et du bassin I. En haut : en Epoque Verte - En bas : en Epoque Jaune	303

5.4.03 :	Régression des débits de pointe du témoin B avec les débits du bassin I en Epoque Verte.....	304
5.4.04 :	Augmentation des débits de pointe sur le bassin I en Epoque Jaune, (années 1982 et 1983), à partir des corrélations avec le témoin B.....	305
5.5.01 :	Doubles cumuls des Ecoulements Totaux de Crue (ETC) du témoin B et du bassin C, discrétisés par décade, en Epoque Jaune. (janvier 1980 - décembre 1983)	307
5.5.02 :	Gains d'écoulements annuels par rapport à la forêt primaire sur le bassin C.....	309
5.5.03 :	Doubles cumuls des débits de pointe du témoin B et du bassin C en Epoque Jaune	311
5.5.04 :	Augmentation des débits de pointe sur le bassin C en Epoque Jaune, (années 1980, 1981-82 et 1983), à partir des corrélations avec le témoin B	313
5.5.05 :	Bassin A - Ecart entre lame écoulée observée et lame calculée, par décade, (en mm)	320
5.5.06 :	Bassin G - Ecart entre lame écoulée observée et lame calculée, par décade, (en mm)	321
5.5.07 :	Bassin H - Ecart entre lame écoulée observée et lame calculée, par décade, (en mm)	321
5.5.08 :	Bassin D - Ecart entre lame écoulée observée et lame calculée, par décade, (en mm)	322
5.5.09 :	Bassin E - Ecart entre lame écoulée observée et lame calculée, par décade, (en mm)	322
5.5.10 :	Bassin C - Ecart entre lame écoulée observée et lame calculée, par décade, (en mm)	323
5.5.11 :	Bassin I - Ecart entre lame écoulée observée et lame calculée, par décade, (en mm)	323
6.1 :	Conception "mécaniste" de l'expérimentation ECEREX	336
6.2 :	Vision "naturaliste" et réaliste de l'expérimentation ECEREX.....	337

ANNEXE I :

COMPLEMENTS SUR L'EROSION ET LES TRANSPORTS SOLIDES

Résultats publiés dans les Cahiers ORSTOM, Série Pédologie, Vol. XXII, n°2, 1986

Les transports solides dans l'écosystème forestier tropical humide guyanais : effets du défrichement et de l'aménagement de pâturages

J.M. FRITSCH (1) et J.M. SARRAILH (2)

(1) Hydrologue ORSTOM, B.P. 165, 97323 Cayenne Cedex — (2) C.T.F.T., B.P. 701, 97387 Kourou Cedex

RÉSUMÉ

Les effets du défrichement mécanisé de la forêt primaire et des premiers stades de l'implantation de pâturages sur l'érosion sont mesurés sur petits bassins-versants et sur parcelles d'érosion. A partir des données recueillies dans le même temps sur deux bassins témoins et sur trois parcelles élémentaires en forêt naturelle, les auteurs ont mis en évidence l'importance de l'augmentation, après défrichement, des transports solides en suspension (20 à 30 fois plus qu'en milieu naturel) et du charriage (50 à 500 fois plus).

Le suivi topographique d'un bassin défriché montre que les transports solides mesurés à l'exutoire ne constituent qu'une petite fraction de l'érosion effective sur les versants.

Les transports solides observés sous prairies artificielles sont faibles : 2,4 fois ceux observés sous forêt sur le bassin C et 3,2 fois sur le bassin A ; les valeurs de l'érosion sur parcelles et sur bassins apparaissent tout à fait comparables, quoique légèrement supérieures sur bassins.

MOTS-CLÉS : Bassin expérimental — Parcelle d'érosion — Ruissellement — Erosion — Transports solides — Déforestation — Conservation des sols — Forêt tropicale humide — Guyane française.

ABSTRACT

SOLID DISCHARGES IN THE GUIANESE RAINFOREST :
EFFECTS OF CLEARING AND OF PASTURE MANAGEMENT.

Mechanized clear-cutting of tropical rain forest and pasture management effect on erosion and solid discharge are investigated on 8 small experimental watersheds and erosion plots.

Under natural forest cover, annual sediment discharge is highly correlated with quickflow. Observed values of natural suspended sediment discharge are varying from 50 kg ha⁻¹ year⁻¹ to 700 kg. ha⁻¹. year⁻¹, according to runoff range in the set of watersheds.

After clear-cutting, sediment discharge measured on both experimental watersheds and two undisturbed catchments operated as paired-watersheds and three plots, increases from 35 to 50 times over discharge in natural conditions.

Levelling methods used on clear-cutted bassins indicate that sediment exportation measured at the weir are a very small part of effective erosion of slope which medium value was estimated at 8 cm for the whole basin.

Solid discharges measured on artificial pasture are returning to lower values, such as 540 kg. ha⁻¹. year⁻¹ (A catchment) and 106 kg. ha⁻¹. year⁻¹ (C catchment), with respective increase of 2.4 times and 3.2 times in relation to natural forest cover.

KEY WORDS : Experimental watershed — Erosion plot — Runoff — Erosion — Solid discharge — Clear-cutting — Soil conservation — Amazonian tropical Rain forest — French Guiana.

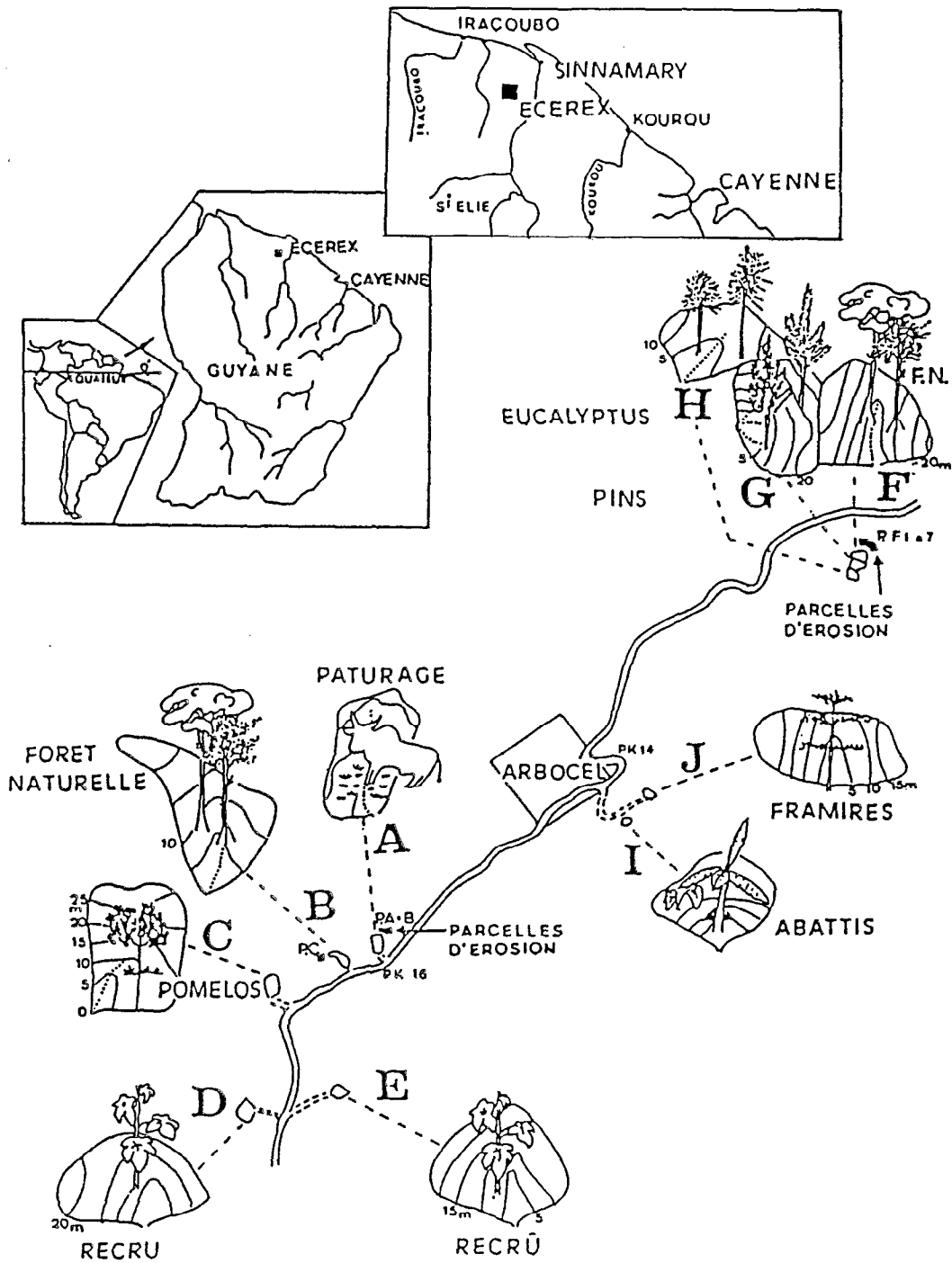


Fig.1. — Dispositif général.

L'opération ECEREX (ECologie ERosion EXpérimentation) a été conçue en 1976 pour répondre aux problèmes posés à la fois par l'exploitation de la forêt, dans l'optique d'un développement papetier de la Guyane et par un développement rural à partir des surfaces déforestées.

Elle consiste en un vaste projet multidisciplinaire dont le but est de préciser les effets de la mise en valeur sur l'équilibre des facteurs de production en relation avec le fonctionnement de l'écosystème forestier initial (dont il s'agit en premier lieu de parfaire la connaissance).

L'essentiel du projet consiste à exploiter des dispositifs comparatifs en petits bassins versants expérimentaux « étalonnés » sous forêt naturelle pendant deux saisons des pluies, puis mis en valeur selon divers schémas de développement concevables pour la Guyane française (SARRAILH, 1984).

DISPOSITIFS DE MESURE DE L'ÉROSION

Les mesures de l'érosion à ECEREX ont été conduites à différentes échelles spatiales et temporelles. On distingue :

— *un ensemble de dix bassins-versants* drainant de 1 à 1,6 hectares (notés A et J) dans lequel 2 bassins témoins ont conservé leur couvert forestier. Après une phase d'étalonnage du milieu naturel, les autres ont été défrichés selon les techniques de la culture traditionnelle sur brûlis pour l'un d'entre eux, tandis que 7 bassins subissaient un défrichement mécanisé (fig.1).

Les débits sont connus par enregistrement continu des niveaux d'eau sur des déversoirs, en V ou de type H-FLUME. Les transports solides en suspension sont calculés à partir de prélèvements unitaires effectués à intervalles de temps rapprochés pendant certaines crues. Les matières transportées en dehors des prises d'échantillons sont reconstituées crue par crue au moyen de régressions.

A l'amont immédiat des déversoirs, des fosses à sédiments captent les dépôts grossiers, dont le volume est connu après une vidange effectuée à la fin de chaque mois.

Les observations ont commencé en 1977 sur 3 bassins (A, B, C). Une première synthèse de l'écoulement et de l'érosion sous forêt naturelle a été établie à partir des données de 8 bassins-versants exploités en 1978 (M.A. ROCHE, 1982).

— *Des parcelles de 100 m² à 400 m²*, sur lesquelles l'érosion est mesurée au pas de temps journalier, selon un procédé qui fournit des résultats sans lacunes depuis le début des observations.

Trois parcelles (PA, PB et PC) sont situées sous forêt primaire et sept autres sont plantées en espèces fourragères (PF1 à PF7). Une parcelle en sol nu de 5 m × 20 m, exploitée selon le protocole de WISCHMEIER complète le dispositif. Les sédiments et les écoulements superficiels sont captés dans des cuves de réception, séparées par des partiteurs.

— *Des levés topographiques* ont été exécutés le long de 8 transects sur les versants de l'un des bassins en juin 1980 sous forêt primaire, puis en juillet 1981 après passage des engins.

LES CONDITIONS DE L'ÉROSION DANS LE MILIEU NATUREL

La pluie

LE RÉGIME PLUVIOMÉTRIQUE

Le climat de la Guyane française est de type équatorial de transition. La pluviométrie moyenne interannuelle (calculée sur 6 ans) sur le site ECEREX est de 3 255 mm. Le régime présente deux périodes pluvieuses distinctes (fig.2) : un premier épisode en décembre-janvier qui reçoit en tout 596 mm et la « grande saison des pluies » de fin mars à juillet avec 2 087 mm, c'est-à-dire 64 % du total annuel.

La pluie moyenne du mois le plus arrosé (mai) atteint pratiquement 600 mm, mais on a observé pour ce mois plus de 1 000 mm (1 027 mm en 1984). On note l'occurrence d'une véritable saison sèche qui s'étend de fin août à la fin novembre, pendant laquelle l'évapotranspiration potentielle est supérieure à la pluie. Durant cette période, aucun mois ne reçoit plus de 100 mm et on n'observe pratiquement jamais d'écoulements.

Les intensités maximales des pluies, observées à petits pas de temps sont faibles et diminuent très rapidement lorsque le pas de temps augmente (tabl. I). Ainsi on a tout juste atteint 50 mm en une heure ce qui correspond à la pluie horaire de fréquence biennale à l'aéroport de Cayenne-Rochambeau. Par contre on a enregistré des intensités en 5 minutes dépassant souvent 100 mm.h⁻¹ avec un maximum à 156 mm.h⁻¹ en 1979. A Rochambeau ce chiffre correspond approximativement à une période de retour de 5 ans.

L'INDEX DE PLUIE DE WISCHMEIER

Cet indice se propose de représenter le potentiel érosif des pluies. Sa moyenne interannuelle à ECEREX, calculée sur 6 ans, vaut 972 unités américaines (R. USA), le décompte ayant porté sur les averses unitaires de plus de 10 millimètres (fig.2). Cette moyenne est fortement influencée par l'année 1983-84 dont le total atteint 1 373.

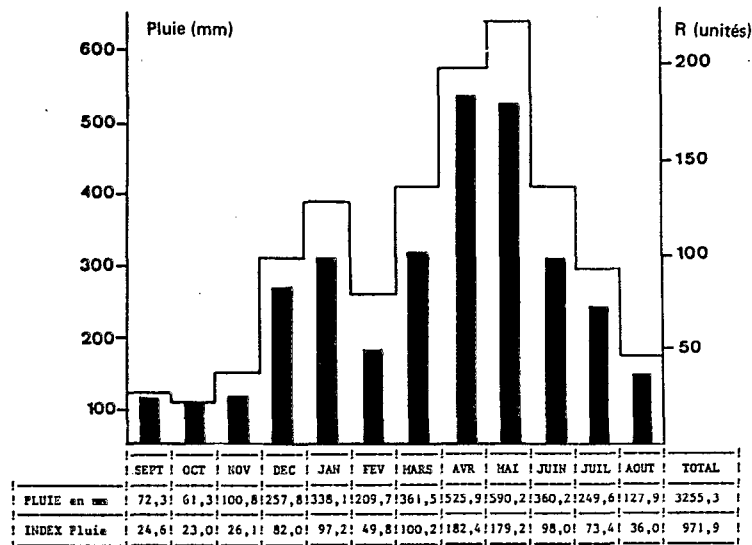


Fig.2. — Régime pluviométrique à ECEREX (moyennes sur 6 ans).

TABLEAU I

Intensités maximales annuelles des pluies mesurées à ECEREX au bassin B, exprimées en millimètres par heure pendant des durées de 5, 15, 30 et 60 minutes.

	5'	15'	30'	60'
1977	120	90	68	46
1978	144	96	72	52
1979	156	81	49	34
1980	102	81	59	44
1981	103	88	56	30
1982	88	76	49	28

La moyenne observée sur les 5 premières années, voisine de 900 unités américaines, paraît plus représentative de la moyenne climatique de la région. On peut comparer cette valeur avec celle calculée 20 kilomètres plus au sud, à la crique Grégoire, sur 9 années de 1968 à 1976 et qui vaut 895 avec un seuil d'averses prises en compte fixé à 5 mm (J.M. FRITSCH, 1984).

Ces chiffres correspondent à une agressivité annuelle importante. Sous des climats réputés très érosifs comme l'Afrique du Nord, l'indice annuel varie entre 50 et 300 et il faut se référer à des climats hyper-humides comme ceux de la côte est de Madagascar ou de la côte de Guinée en Afrique pour trouver des valeurs de R dépassant 1 000 (E. ROOSE, 1981).

Néanmoins toutes les observations et mesures d'érosion effectuées en Guyane avec le couvert forestier originel concluent à des taux de transports solides très bas ; à l'occasion d'une étude d'impact de l'aménagement hydroélectrique du fleuve Sinnamary, on a pu conclure que sur ce bassin de 6 000 km², la concentration annuelle moyenne des eaux en matières minérales ne dépasse pas 15 mg.l⁻¹ (J.M. FRITSCH, 1984).

Cette faible activité de l'érosion est à mettre en rapport avec la couverture de forêt dense primaire absolument continue et presque partout intacte. Le rôle joué par cette couverture végétale est tout à fait capital puisque l'on sait que dans les équations empiriques de calcul de l'érosion, telle l'U.S.L.E. (Universal Soil Loss Equation) de Wischmeier et Smith, l'érosion d'un sol nu est 1 000 fois supérieure à celle observée sous forêt, toutes choses égales par ailleurs (E. ROOSE, 1973, 1981).

Ce phénomène s'explique également par les intensités de pluie qui sont modérées dès que les durées dépassent quelques dizaines de minutes, et la valeur élevée de l'indice R résulte davantage des effets du cumul d'un nombre important d'averses plutôt que de l'énergie particulière de quelques-unes d'entre elles.

Les sols

A ECEREX, le modelé est constitué d'une succession de petites collines culminant à environ 100 m, donnant un relief « en dents de peigne » (M. BOYER, 1976) ou en « amandes » (B. CHOUBERT, 1974). Le lecteur n'aura aucune peine à imaginer que les bassins versants qui s'individualisent dans ce modelé sont de très petite taille, et qu'à partir de quelques hectares, les talwegs

se perdent dans des bas-fonds marécageux en saison des pluies. Les pentes des versants des bassins expérimentaux varient entre 17 et 35 % avec des valeurs modales de 20-25 %, alors que la pente des talwegs oscille entre 10 et 20 % (tabl.II).

Bien que le substratum géologique de la zone étu-

diée soit cartographié comme une unité homogène, (le schiste de Bonidoro), les sols qui en dérivent apparaissent très différenciés au plan de la dynamique de l'eau en fonction des états successifs de transformation de la couverture pédologique (R. BOULET *et al.*, 1982) :

TABLEAU II

Caractéristiques physiques et pédologiques des bassins-versants. Pluviométrie, écoulement et ruissellement sous forêt naturelle en 1979.

	C	I	E	D	B	A	J	G	F	H
Surface (ha)	1.6	1.1	1.6	1.4	1.6	1.3	1.4	1.5	1.4	1.0
Pente des versants (%)	17-20	22-23	32-23	28-18	17-17	20-20	32-29	26-34	35-31	19-24
Surfaces à drainage libre (%)	100	60	57	60	10	0	2	0	0	0
Surfaces à drainage bloqué (%)	0	40	43	40	90	100	98	90	96	86
Zones de nappes (%)	-	-	-	-	-	-	-	10	4	14
Pluie annuelle (mm)	3526	3365	3407	3197	3286	3430	3229	3187	3141	3288
Lame écoulée (mm)	372*	488	497	533	668	690*	996	1551	1617	1833
Coefficient d'écoulement (%)	10.6	14.5	14.6	16.7	20.3	20.1	30.8	48.7	51.5	56.8
Lame ruisselée (mm)	212*	372	471	506	565	597*	948	967	1079	1143
Coefficient de ruissellement (%)	6.0	11.1	13.8	15.8	17.2	17.4	29.4	30.3	34.3	35.4

— Lorsque la couverture initiale est restée intacte, cas le moins fréquent, le cheminement de l'eau est vertical et profond. La dynamique de ces sols à perméabilité élevée est dite « à drainage vertical libre » (DVL).

— Dans un stade ultérieur, et par suite de l'amincissement des horizons supérieurs à porosité élevée, la pénétration de l'eau est interrompue ou fortement ralentie à faible profondeur ce qui entraîne de forts ruissellements et une circulation latérale au-dessus d'un volume de terre compacte, « sec au toucher ». A ce stade les sols sont dits à « drainage vertical bloqué » (DVB).

Il est fréquent de rencontrer sur un même petit bassin des couvertures mixtes, avec une partie des versants, généralement la partie supérieure, en drainage vertical libre et le reste à drainage vertical bloqué.

— Enfin la partie aval du bassin peut être le siège d'une nappe phréatique, temporaire ou permanente, qui peut même affleurer en saison des pluies lorsque la couverture pédologique à dynamique latérale atteint le magasin de la nappe phréatique générale par suite de son enfoncement dans la couverture initiale.

Les écoulements naturels

LES ÉCOULEMENTS SUR BASSINS VERSANTS

Comme on pouvait s'y attendre, avec l'existence des types pédologiques très différenciés qui viennent d'être décrits, les écoulements et les ruissellements varient dans une gamme très étendue (tabl. II).

Ainsi, sous forêt naturelle, on aurait enregistré, en 1979, 212 millimètres de ruissellement, soit 6 % de la pluie sur le bassin C entièrement composé de sols à drainage libre alors qu'à l'autre extrême le ruissellement sur le bassin H a atteint 1 143 millimètres, c'est-à-dire 35 % de la pluie annuelle. Sur ce dernier type de bassin, des coefficients de ruissellement de plus de 80 % à l'échelle de l'averse ne sont pas rares. Les débits maxima instantanés peuvent y atteindre des valeurs aussi élevées que 277 ou 288 litres par seconde et par hectare (tabl.III), soit l'équivalent en intensité de 100 millimètres par heure. Or comme on peut le constater sur le tableau I, ce seuil pluviométrique n'est dépassé que de très peu et pendant des temps très courts, de l'ordre de

5 minutes : c'est dire que les bassins du type F, G et H peuvent présenter un rendement hydrologique exceptionnel. L'existence de tels bassins à côté d'unités à drainage libre comme le bassin C, entraî-

nant une dispersion dans les écoulements de 1 à 5, annonce des comportements différentiels du même ordre de grandeur pour l'érosion sous forêt primaire.

TABLEAU III

Débits maxima instantanés (en $l.s^{-1}.ha^{-1}$) des 5 plus fortes crues enregistrées sous forêt sur les bassins ECEREX

Bassin	A	B ₁	C	D	E	F	G	H	I	J
Période	77-78	77-83	77-78	78-80	78-80	78-83	78-80	78-80	79-81	79-82
N° 1	177	128	73.9	168	97.4	277	244	288	106	143
N° 2	167	113	47.4	124	89.7	149	156	169	74.2	113
N° 3	156	110	45.5	111	81.3	146	126	161	72.5	97.1
N° 4	93.8	102	43.9	102	79.4	143	106	157	72.5	93.8
N° 5	86.1	93.2	41.6	89.4	72.9	135	104	153	53.6	92.8

LES ÉCOULEMENTS SUR PARCELLES

Dans des situations pédologiques équivalentes, les écoulements annuels des parcelles et la somme des écoulements en crues des bassins sont tout à fait comparables. Le seul phénomène d'échelle qui soit perceptible est une plus grande inertie du bassin versant qui écoule moins d'eau que la parcelle en début de saison des pluies ou après une période peu arrosée, alors que c'est l'inverse qui se produit lorsque les averses se succèdent quasiment sans interruption en périodes d'activité de la Zone Intertropicale de Convergence. Cependant l'écart cumulé entre les 2 systèmes reste toujours inférieur à 8 % même dans des conditions très pluvieuses (fig.3).

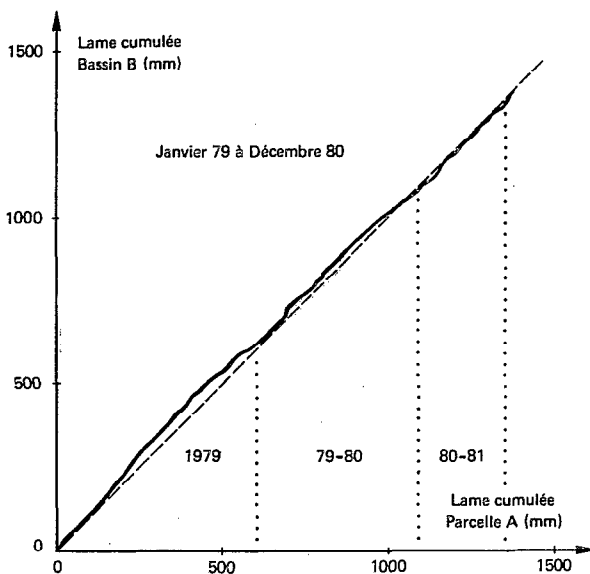


Fig.3. — Evolution comparée des écoulements sous forêt naturelle sur parcelle et sur bassin-versant.

EROSION ET TRANSPORTS SOLIDES DANS L'ÉCOSYSTÈME FORESTIER

L'écosystème forestier primaire amazonien constitue un milieu en équilibre : les transports solides en suspension et par charriage mesurés à un exutoire sont donc égaux en poids à l'érosion mécanique qui s'exerce sur toutes les surfaces drainées à l'amont de ce point.

Les transports solides à l'exutoire des bassins-versants

Les concentrations instantanées en matières en suspension sont faibles et varient relativement peu avec les débits. Par exemple, les concentrations des échantillons prélevés sur le bassin B n'ont jamais dépassé 150 milligrammes par litre et la répartition des teneurs en suspension s'ordonne selon une courbe unimodale qui comporte 60 % des prélèvements dans la gamme 10-25 $mg.l^{-1}$ et 93 % de ceux-ci dans les limites 6-63 $mg.l^{-1}$ (fig.4). Cette faible dispersion explique que le transport solide soit relativement régulier dans l'année et que la contribution des crues importantes puisse être moindre que dans d'autres biotopes. Ainsi en 1979, sur ce même bassin B, 40 % du transport solide en suspension s'est écoulé pendant les phases de crue, c'est-à-dire pendant que les débits se maintenaient au-dessus de 20 litres par seconde, alors que 60 % de celui-ci s'écoulait avec des débits inférieurs à ce seuil. La situation sur l'autre bassin témoin (F) est très semblable : même valeur modale (15 $mg.l^{-1}$), avec cependant un léger aplatissement de la courbe de fréquence qui comporte davantage d'échantillons en dessous de 10 $mg.l^{-1}$ et quelques rares éléments dans la gamme 150-300 $mg.l^{-1}$, non représentée sur le bassin B. Cette stabilité dans les concentrations implique que, à l'échelle annuelle, les transports solides en suspension des bassins-versants soient en assez bonne corrélation avec le ruissellement (fig.5, tabl.IV).

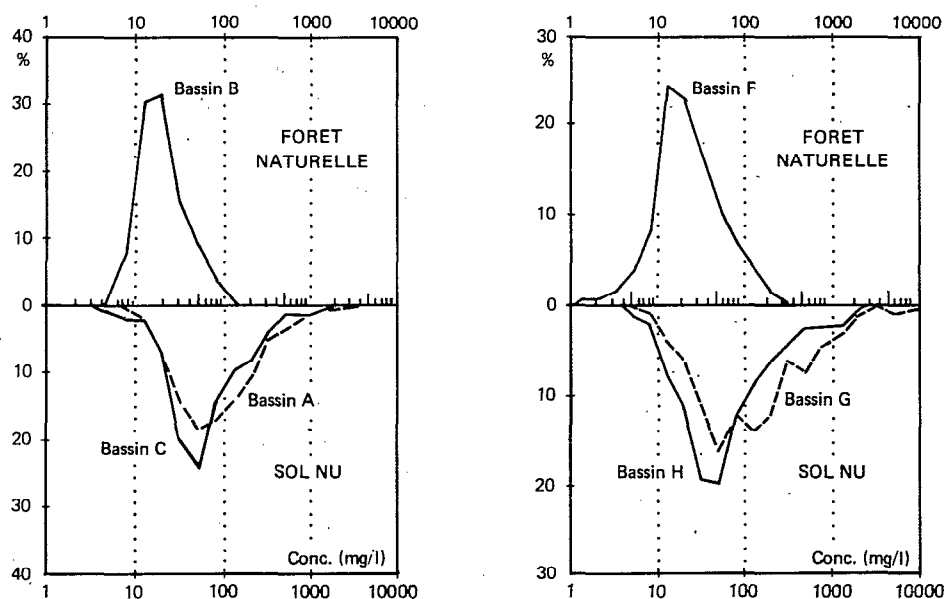


Fig.4. — Histogramme des concentrations de matières en suspension sur les bassins-versants.

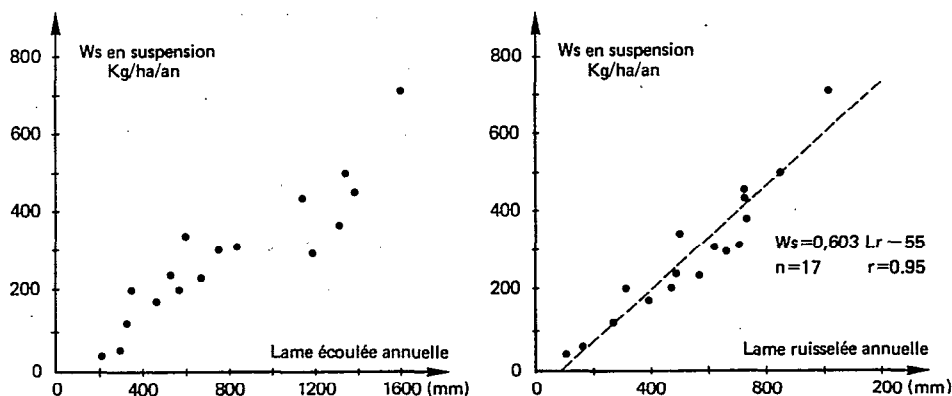


Fig.5. — Transports solides en suspension dans l'écosystème forestier en fonction de l'écoulement total annuel et du ruissellement annuel.

On obtient par ajustement linéaire :

$$W_s = 0,61 L_r - 55 \quad (1)$$

Avec W_s = transport en suspension en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ par an
 L_r = lame ruisselée annuelle en mm.

Une autre estimation, moins précise, du transport solide en suspension, mais qui n'exige pas de connaître le ruissellement, peut être faite à partir de l'écoulement global, sur la base d'un gradient moyen annuel de 35 kg de suspensions par hectare et par tranche de 100 mm d'écoulement.

Les charriages sont extrêmement faibles en milieu naturel non perturbé, ce qui rend leur mesure très aléatoire les premiers mois qui suivent la construction

des déversoirs ou les prospections à pied sur le bassin, faites à l'occasion des levés topographiques et pédologiques et des inventaires botaniques.

Le tableau 5 donne une idée des valeurs absolues de transports de fond, qui représentent quelques kilogrammes de terre par hectare et par an, le charriage du bassin B semblant se stabiliser autour de 10-15 kg et celui du bassin F dans des limites de 40 à 60 kg par hectare et par an. Le rapport de 1 à 4 entre ces deux résultats est dans l'ordre de celui des écoulements respectifs des 2 bassins-versants.

Les sédiments qui sont retirés des fosses sont surtout constitués de « sables » : selon les bassins-versants de 75 à 93 % des sédiments ont une granulométrie

TABLEAU IV

Lame écoulée, lame ruisselée et transports solides en suspension par années sur les bassins ECEREX sous forêt naturelle. Le et Lr en mm. W_s en $kg \cdot ha^{-1}$

Année	Bassin	Le	Lr	W_s
77	A	841	713	299
	D	759	628	293
	C ⁽¹⁾	203	93.4	31.3
78	A	580	495	323
	B	564	464	195
	C	296	150	47.9
	D ⁽²⁾	356	302	191
	F	1395	720	427
	C	1191	656	284
	H	1323	730	357
79	E	668	565	225
	D	533	484	226
	F	1617	1079	707
80	B	461	379	167
	F	1355	893	493
81	D	322	264	113
	F	1153	735	413

(1) : juin-décembre (2) : mai-décembre

TABLEAU V

Transports solides par charriage (en $kg \cdot ha^{-1}$) sur les bassins-versants en forêt naturelle et proportion (en %) de ceux-ci par rapport aux transports en suspension W_s .

B.V		1978	1979	1980	1981	1982
B	Charriage	270	52	39	12	13
	% à W_s	139	23	23	11	7
F	Charriage	148(1)	104	50	38	58
	% à W_s	35	15	10	9	12

(1) d'avril à décembre

comprise en 50 microns et 2 millimètres (résultats de l'année 1979). La fraction supérieure à 2 millimètres est négligeable.

On a également figuré sur ce tableau la proportion

des charriages (en %) par rapport aux matières en suspension. On constate que ces transports grossiers, importants les premières années, évoluent à la baisse et tendent à représenter une masse de l'ordre de 10 % de celles des suspensions.

En utilisant l'équation (1) on peut donc paramétrer l'ensemble du transport solide annuel résultant de l'érosion hydrique dans l'écosystème forestier, sous la forme :

$$W = 1.1 * (0,61 Lr - 55) \quad (2)$$

Avec W = charriages + suspensions (en $kg \cdot ha^{-1}$)
 Lr = lame ruisselée annuelle (en mm).

Les tentatives de prédétermination de l'érosion à partir des formules empiriques, telle l'U.S.L.E. très utilisée sur le continent nord et sud-américain, se sont révélées décevantes en raison des comportements hydrologiques très contrastés des bassins-versants. Ces formules utilisent l'index de pluie de Wischmeier, qui est pratiquement le même sur tous les bassins-versants, qui ne sont séparés que de quelques kilomètres, alors que leurs coefficients de ruissellement annuels varient de 6 % à 35 % (tableau II, dernière ligne). Dans ces conditions, prétendre déterminer les pertes en terre à partir de la pluviométrie paraît tout à fait aléatoire. Pareille constatation avait été faite par les agronomes américains, dont certains proposent d'utiliser un index de ruissellement (Runoff Energy Factor) dans l'U.S.L.E. en substitution de l'index de pluie de Wischmeier (J.R. WILLIAMS, 1971).

L'érosion sur les parcelles

La méthode de prélèvement global des eaux et des sédiments utilisée sur les parcelles ne permet pas de séparer les suspensions et les charriages : les résultats représentent l'ensemble de l'érosion hydrique. La première année d'exploitation, les résultats sont amplifiés par les perturbations créées lors de la mise en place du dispositif et ne représentent pas l'érosion qui s'exerce effectivement dans le milieu naturel. C'est ainsi que l'on a mesuré sur la parcelle A sur drainage vertical bloqué plus de 440 $kg \cdot ha^{-1}$ la première année de mise en service (1979), soit près du double du bassin-versant B soumis aux mêmes conditions hydrologiques. Cet écart n'est pas dû à un facteur d'échelle, puisqu'on peut constater qu'au cours des campagnes 1979-80 et 1980-81, les résultats enregistrés sur les deux dispositifs évoluent avec un parallélisme impressionnant (fig.6)

ÉROSION ET TRANSPORTS SOLIDES APRÈS DÉFRICHEMENT

Destinés à vérifier l'impact d'une exploitation de la forêt pour la production de pâte à papier, les bassins expérimentaux ont été défrichés selon le protocole suivant :

Les transports solides dans l'écosystème forestier tropical humide guyanais

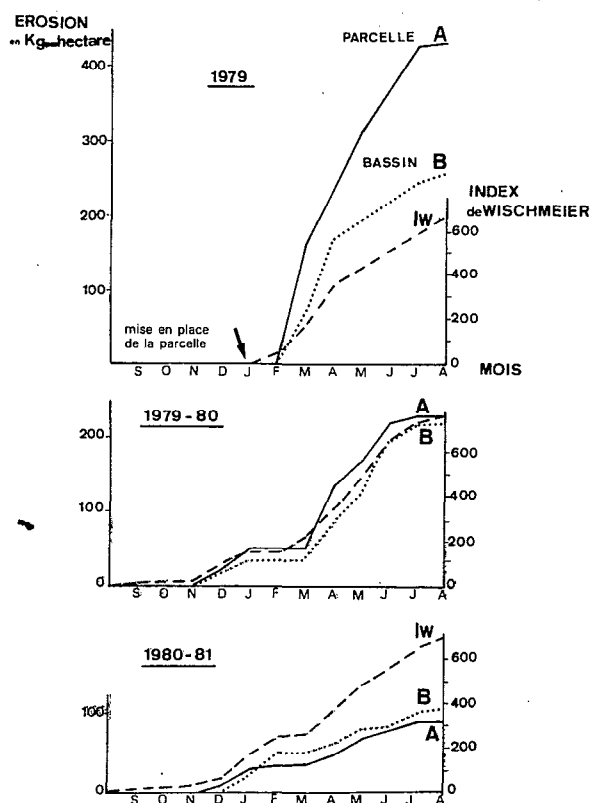


Fig.6. — Evolution de l'érosion sous forêt naturelle, sur la parcelle élémentaire A et le bassin versant B, et de l'index de pluie de Wischmeier IW de 1979 à 1980-81.

— Coupe manuelle à la scie à chaîne des arbres de plus de 40 cm de diamètre — Façonnage en grumes.

— Débardage et exportation des grumes vers les hauts des bassins par un tracteur à pneus (Timber-jack), sur des pistes ouvertes par un chenillard léger (Caterpillar D4).

— Défrichement de la biomasse aérienne et souterraine restante au moyen d'un tracteur lourd à chenilles (Caterpillar D8), équipé d'une lame forestière (dite Rome ou KG) et d'un râteau andaineur hydraulique (FLECO).

Les concentrations en suspension à l'exutoire des bassins-versants pendant les mois qui suivent le défrichement mécanisé et alors que le sol est nu augmentent de façon très significative, puisque par exemple sur les bassins A et C, le mode se situe à 50 milligrammes par litre, contre 25 sous forêt naturelle au bassin B, mais surtout on constate l'apparition de concentrations nettement plus élevées, allant jusqu'à 5000 mg.l⁻¹ au bassin A, sur lequel 25 % des prélèvements présentaient des teneurs supérieures à la limite maximale sous forêt qui était de 150 mg.l⁻¹ (fig.4). La situation est comparable sur le groupe F, G, H où l'on observe la part importante occupée par des échantillons contenant de 200 à 10 000 mg.l⁻¹, après défrichement des unités G

et H. Ces taux de transport en suspension, dont les valeurs absolues peuvent paraître encore modestes, sont à mettre en rapport avec le dispositif de mesure : les écoulements, canalisés sur plusieurs mètres à l'amont de la lame déversante, ont une vitesse très faible et la turbulence est réduite au minimum ; dès lors, seuls les sédiments les plus fins (argiles et limons fins) ne sont pas captés par les fosses et s'écoulent au-delà du seuil où sont faits les prélèvements.

Par ailleurs, il a été établi qu'après défrichement le ruissellement augmentait selon des rapports qui ont varié de 1,5 à 3,3 selon les bassins-versants par rapport au milieu naturel (J.M. FRITSCH, 1986), les gains relatifs les plus importants étant réalisés par les bassins qui, à l'origine, écoulaient les lames les plus faibles.

La conjonction des deux phénomènes — augmentation du ruissellement et augmentation des concentrations en suspension aboutit à des transports solides aux exutoires tout à fait remarquables (tabl.VI), surtout si l'on compare ces chiffres avec ceux des bassins témoins en forêt naturelle (fig.7).

TABLEAU VI

Transports solides annuels en suspension et par charriage (en kg.ha⁻¹) et accroissement par rapport au milieu naturel l'année du défrichement sur les bassins A, C, G et H.

	A	C	G	H
Suspensions	5696	1898	7823	2786
Accroissement des suspensions	X 19	X 28	X 25	X 8
Charrages	6322	1284	9165	3085
Accroissement du charriage	X 108	X 49	X 515	X 126
Total des transports solides	12018	3182	16988	5871
Accroissement des transports solides	X 34	X 34	X 51	X 16

Périodes de référence :

Forêt naturelle : A, B et C juillet 1977 à août 1978

F, G et H août 1978 à juillet 1980

Année du défrichement : A et C déc. 1978 à nov. 1979

G et H janv. 1981 à déc. 1981

A l'exception du bassin-versant H, on peut constater selon le tableau 6 que les transports solides en suspension après défrichement se situent selon des rapports de 20 à 30 fois supérieurs à ceux du domaine naturel, et avec des valeurs respectives de 7 800, 5 700 et 1 900 kg.ha⁻¹ dans l'ordre des coefficient d'écoulement des bassins G, A et C, à savoir 61 %, 47 % et 22 %. Le groupe A-C a été défriché pendant la saison sèche de 1978 alors que G et H l'ont été en saison des pluies, en décembre 1980 et janvier 1981. Cette particularité

explique le chiffre élevé obtenu sur G (7 800 kg.ha⁻¹) et paradoxalement aussi la faible valeur du bassin H (2 800 kg.ha⁻¹) qui correspond à un accroissement de 8 seulement, par rapport au milieu naturel. Les bass-fonds de ce bassin étaient si humides, que les conducteurs d'engins ont renoncé à s'aventurer dans la partie basse, proche du talweg et à déblayer un barrage composé de terre, de souches et de racines qui s'est comporté comme une banquette qui a capté la plus grande part des sédiments provenant des versants. Sans aucun doute, si ce processus n'avait pas existé, les transports solides auraient été comparables à ceux mesurés à l'exutoire du bassin G.

Quant aux charriages, leurs accroissements sont encore plus sensibles, puisque ce mode de transport quasi inexistant sous forêt se voit multiplié selon des facteurs de 50 à 500, ce qui correspond à des masses de 9 200, 6 300 et 1 300 kg.ha⁻¹, toujours dans l'ordre G, A, C. Alors que sous forêt, le contenu de fosses à sédiments était principalement constitué par des sables fins, on y trouve maintenant des sédiments grossiers de taille centimétrique. Sur le bassin A, par exemple, 28 % des dépôts sont refusés par un tamis à mailles carrées de 13 mm de côté. Il s'agit de nodules présents dans des horizons pédologiques situés parfois à plusieurs centimètres, voire plusieurs dizaines de centimètres sous la surface, ce qui constitue d'ores et déjà un indice de l'amplitude de l'érosion sur les versants.

En conclusion, l'ensemble des transports solides d'origine mécanique au cours de l'année qui a suivi le défrichement s'établit à 17 tonnes par hectares sur le bassin G, c'est-à-dire 50 fois plus que dans l'écosystème forestier, à 12 tonnes. ha⁻¹ sur A et 3,2 tonnes. ha⁻¹ sur C, soit un accroissement de 34 pour ces derniers bassins.

Il est intéressant de noter que le paroxysme des apports solides à l'exutoire n'est pas contemporain ni immédiatement postérieur au passage des engins de défrichement, mais se produit plusieurs mois plus tard, au cours de phases de travail du sol non mécanisées lors de la mise en place de l'aménagement : labour à la fourche pour la plantation d'un pâturage sur le bassin A et trouaison pour la plantation d'agrumes sur le bassin C ou de pins caraïbes sur le bassin G.

Cependant, même une perception sommaire des effets du défrichement laisse à penser que l'érosion provoquée est sans commune mesure avec les chiffres qui viennent d'être présentés. Dix ou quinze tonnes de sédiments ne représentent que quelques mètres cubes de sol en place, c'est-à-dire pratiquement le volume arraché par le râteau FLECO lors du dessouchage d'un gros arbre et moins de terre que n'en remue en une seule manœuvre le tracteur débardeur embourbé, sur une pente à 25 %. Cette constatation, faite pendant le défrichement de la première série de bassins A et C, nous a amenés

à mesurer l'érosion effective sur les versants, en parallèle avec les transports solides à l'exutoire. Ce suivi, à partir de méthodes topographiques, a été fait sur le bassin H, le long de 8 transects répartis sur le bassin et orientés selon la ligne de plus grande pente (fig. 8). Par interpolation à l'ensemble du bassin-versant, on a pu estimer l'ablation moyenne à une tranche de sol de 84 millimètres, avec des maxima ponctuels de 150 à 300 millimètres selon les transects (J.M. FRITSCH, 1983). Plus précisément, les volumes colluvionnés dans le

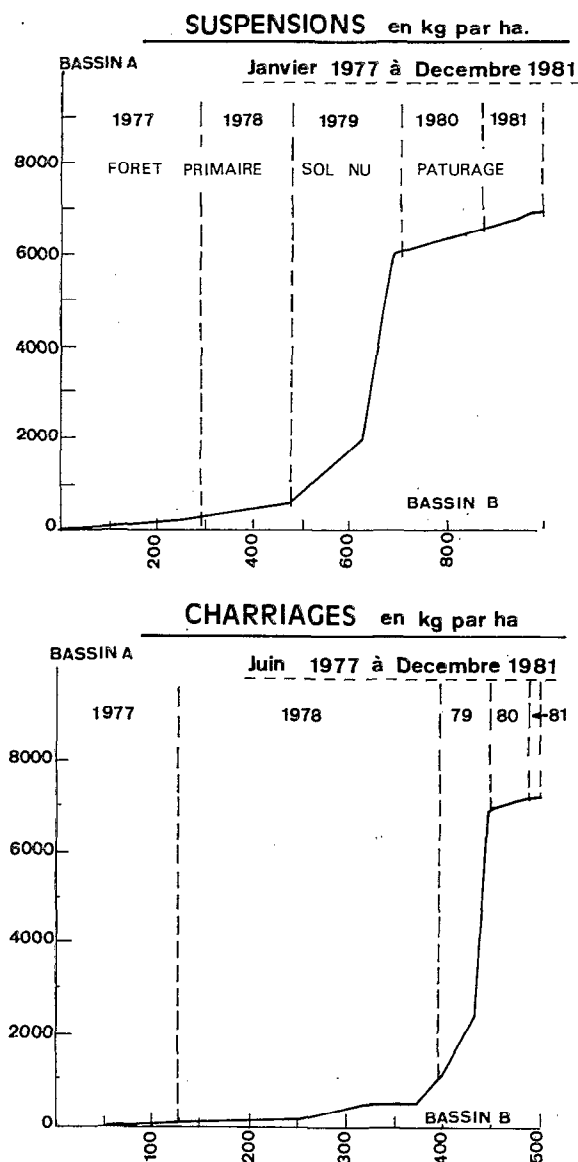


Fig.7. — Evolution comparée des transports solides en suspension et en charriage sur les bassins expérimentaux A et C avec ceux du bassin témoin B.

talweg depuis les parties moyennes et supérieures des versants s'établissent à 656 m^3 sur $8\,100 \text{ m}^2$, c'est-à-dire une érosion effective par hectare de 1 200 tonnes !...,

à comparer avec les 2,8 tonnes de suspensions et les 3,1 tonnes de charriages effectivement exportées en dehors du bassin-versant.

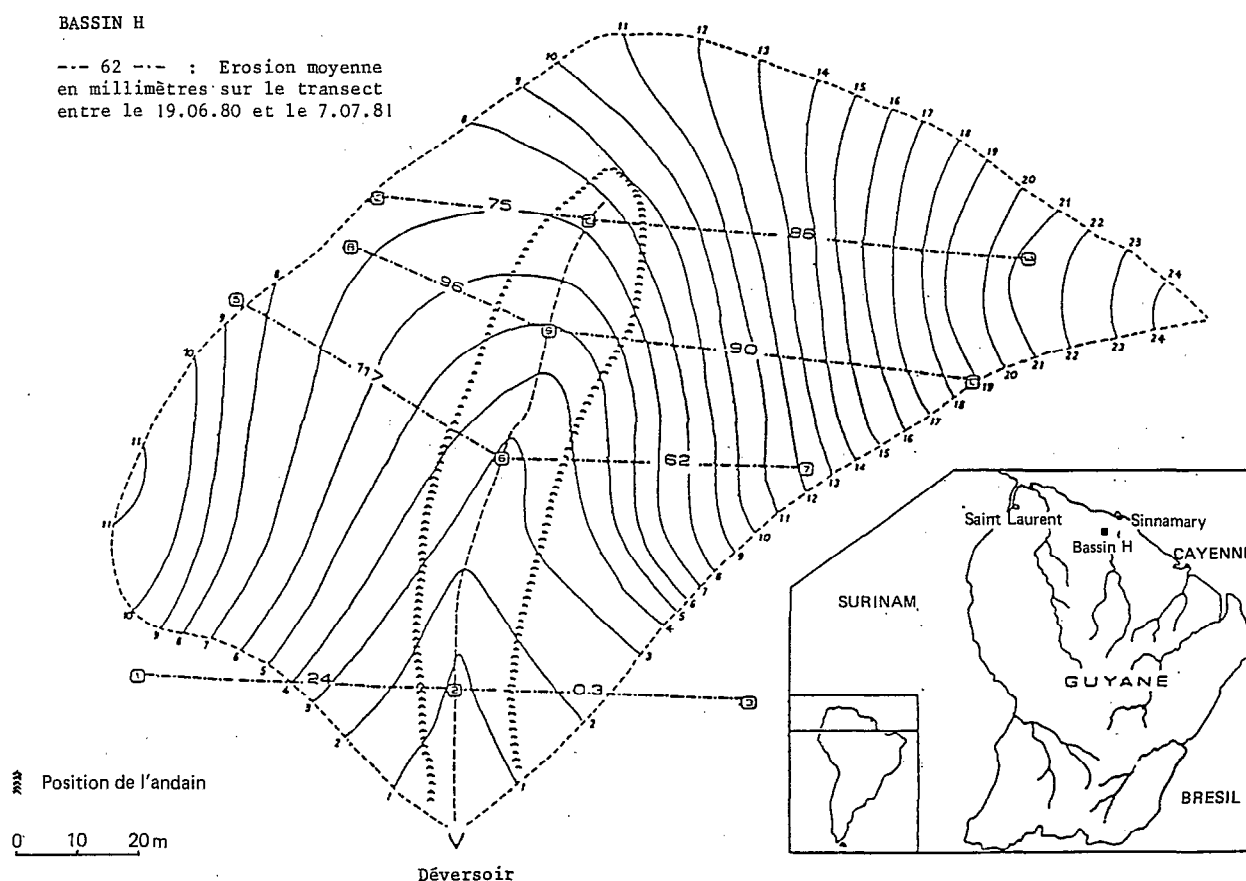


Fig.8. — Erosion après défrichement sur les versants du bassin H (valeurs moyennes, par transect, en millimètres).

Rapportés aux concepts de conservation des sols ou d'impacts agronomiques du défrichement, les transports solides à l'exutoire sont donc très peu significatifs de la rupture d'équilibre et de l'érosion provoquées à l'amont. Selon une analogie électronique « signal-bruit » familière aux amateurs de haute-fidélité, on peut dire que, si l'on assimile l'érosion sur les versants au signal, les transports solides à l'exutoire ne constituent que le bruit, que l'on s'évertue à mesurer avec beaucoup d'efforts et d'application.

Une extrême prudence s'impose donc pour comparer entre eux « les bruits » des différents bassins-versants ou ceux enregistrés par ailleurs sur d'autres dispositifs expérimentaux. Par contre, il est évident que la notion de transports solides garde tout son sens, si l'on considère les impacts plus à l'aval sur la qualité des eaux ou sur les processus de sédimentation.

On a d'autre part mesuré l'érodibilité du sol au moyen d'une parcelle standard appelée *parcelle Wischmeier*, (fig.9).

Sur une parcelle au sol nu régulièrement travaillé (ratissage après chaque averse) les transports solides atteignent des valeurs impressionnantes, si l'on se rapporte à l'érosion mécanique sous forêt (en moyenne : $0,11 \text{ tonnes. ha}^{-1}$ sur la parcelle A, cf. fig.9).

- 1979 (sur trois mois) : $53,3 \text{ tonnes. ha}^{-1}$
- 1979-80 : $109 \text{ tonnes. ha}^{-1}$
- 1980-81 : $87,1 \text{ tonnes. ha}^{-1}$
- 1981-82 : $44,2 \text{ tonnes. ha}^{-1}$

En fait dans l'équation de Wischmeier cela correspond à une susceptibilité des sols à l'érosion faible, puisque seule la première année le facteur K atteint 0,10.

Néanmoins l'érosion qui se produit alors est déterminante puisqu'elle conduit à l'exportation de la

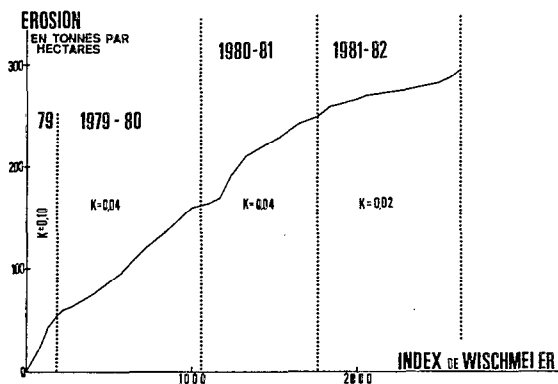


Fig.9. — Erosion sur la parcelle Wischmeier en fonction de l'érosivité de la pluie.

fraction granulométrique fine du sol. La diminution du facteur K les années suivantes est due au fait qu'en sur-

face il ne reste qu'un pavage de nodules qui ne sont plus mobilisables par les eaux de ruissellement et le potentiel agronomique du sol est devenu pratiquement nul.

ÉROSION SOUS PRAIRIES ARTIFICIELLES (1)

Les résultats globaux (tabl.VII) portent la moyenne interannuelle des transports solides, calculés sur les deux années 1980 et 1981 à 541 kg.ha⁻¹ sur le bassin A (*Digitaria swazilandensis*) et à 106 kg.ha⁻¹ sur le bassin C (*Brachiaria U.S.D.A.*). La comparaison faite à partir du bassin témoin pendant cette même période permet d'estimer ces valeurs comme étant 3,2 fois supérieures à ce que l'on aurait observé sous forêt sur le bassin A, et 2,4 fois supérieures à cette même référence sur le bassin C (fig.11).

Les valeurs absolues et relatives sont assez faibles, surtout si l'on considère qu'une partie d'entre elles ont été mesurées pendant la période immédiatement postérieure à la mise en place de l'aménagement.

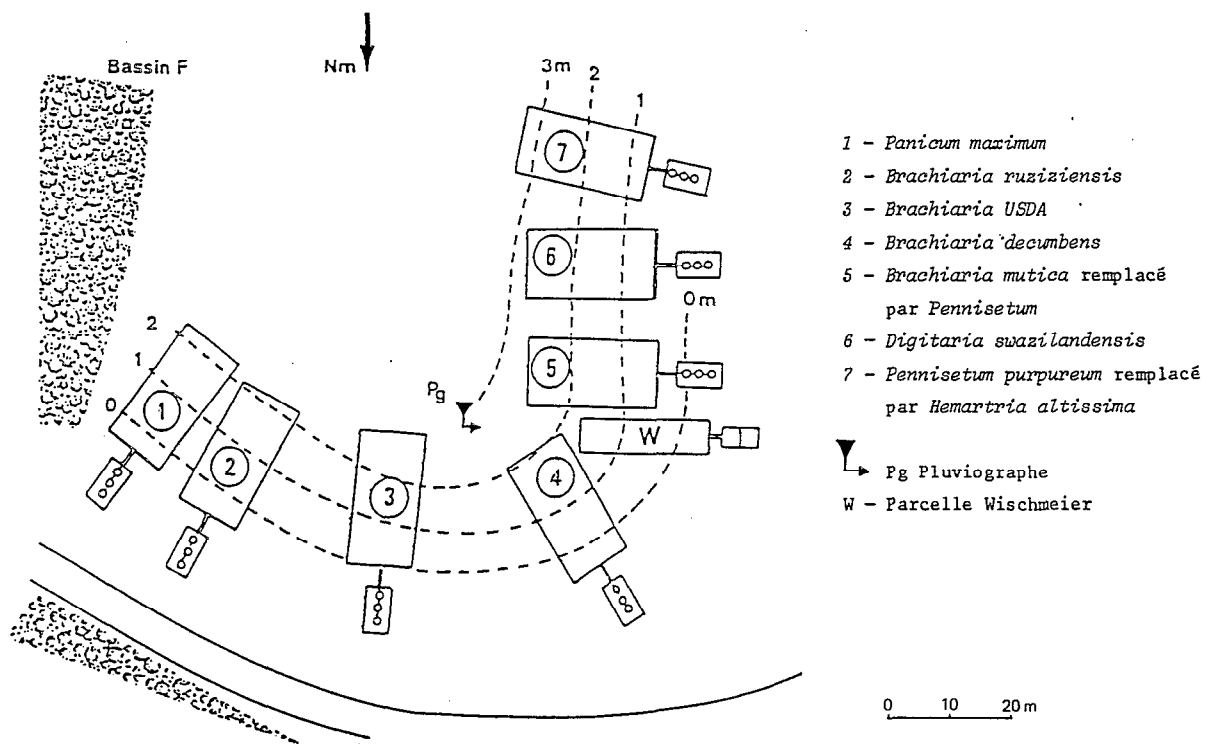


Fig.10. — Plan d'installation des parcelles fourrages.

(1) Voir dispositif de mesures sur la figure 10.

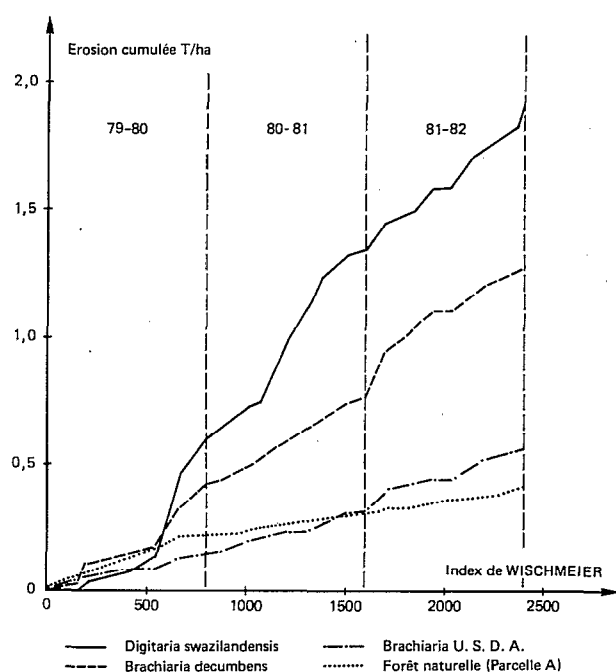


Fig.11. — Erosion cumulée sur des parcelles pâturages en fonction de l'érosivité de la pluie et en comparaison avec une parcelle sous forêt primaire (Parcelle A).

On constate cependant une différence importante entre les deux systèmes, dans un rapport de 1 à 5 environ. Ceci s'explique d'abord par les ruissellements qui ont été deux fois plus importants sur A que sur C, en raison des conditions pédologiques initiales mais aussi sans doute par les caractéristiques de chacune des espèces fourragères considérées.

En effet, la masse totale des sédiments exportés au bassin A en 1980 et 1981, soit 1 081 kg.ha⁻¹ pour une lame écoulée pendant les crues de 1 219 millimètres, correspond à une concentration moyenne des eaux de 89 milligrammes par litre. Sur le bassin C, ce calcul à partir des mêmes paramètres qui valent respectivement 212 kg.ha⁻¹ et 639 millimètres déterminent des concentrations moyennes qui ne sont que de 33 mg.l⁻¹.

Ces différences semblent bien pouvoir être imputées principalement aux « pouvoirs antiérosifs » différents des deux fourrages car les taux mesurés sur parcelles de 200 m², implantées sur une même complexe pédologique (type bassin A) fournissent des résultats qui vont dans le même sens que ceux des bassins-versants (J.M. SARRAILH, 1983).

Pour *Digitaria swazilandensis*, la moyenne interannuelle de l'érosion s'établit à 700 kg.ha⁻¹ pour 983 mm d'écoulement recueillis, donc une teneur moyenne de 71 mg.l⁻¹, alors que la concentration calculée sur

Brachiaria U.S.D.A. vaut 19 mg.l⁻¹. Les valeurs sur parcelles et sur bassins évoluent donc de façon tout à fait comparable, avec cependant des taux supérieurs sur les bassins.

TABEAU VII

Transports solides par suspension et par charriage (en kg.ha⁻¹) sous pâturage.

	Bassin A	Bassin C
Suspension (Kg.ha ⁻¹)	422	74
accroissement	x 2.8	x 2.1
Chariages (kg.ha ⁻¹)	119	32
accroissement	x 6.1	x 3.6
Transports solides d'origine mécanique	541	106
accroissement	x 3.2	x 2.4

Bassin A : *Digitaria swazilandensis*, brouté

Bassin C : *Brachiaria U.S.D.A.*, fauché

Période de référence : 1980-1981.

Si l'on admet que cela n'est pas dû à un effet d'échelle, on peut penser qu'avec *Digitaria swazilandensis* le passage de 71 à 89 mg.l⁻¹ tient à la présence des bovins sur le bassin-versant. Ces conséquences de la charge animale sur l'érosion ne paraissent pas considérables ; il faut cependant noter que ce pâturage fait l'objet d'un protocole d'exploitation très soigné, qui comporte une rotation permanente des animaux dans des placeaux clôturés, ce qui limite au maximum la dégradation du pâturage et donc les effets sur l'érosion (M. BEREAU et J.M. SARRAILH 1985).

Pour *Brachiaria U.S.D.A.*, la valeur plus forte du bassin par rapport à la parcelle s'explique probablement par le fait que ce fourrage n'occupe pas la totalité du bassin-versant, puisqu'un anneau de sol nu est maintenu artificiellement au pied de chacun des plants de pomélos.

En conclusion l'érosion sur les pâturages semble assez réduite, surtout si on la compare avec celle qui se produit l'année du défrichement. Il reste à déterminer par une étude agropédologique plus complète si ces valeurs de 541 kg.ha⁻¹ (bassin-versant A) et de 106 kg.ha⁻¹ (bassin-versant C) sont compatibles avec une conservation des sols à long terme, compte tenu de la nature et de la vitesse des processus pédogénétiques en Guyane.

On peut néanmoins constater que la productivité des pâturages se maintient à un niveau constant pendant cinq ans, au prix d'une fertilisation importante, mais indispensable pour ce type d'aménagement et plus particulièrement sur système pédologique à drainage bloqué.

CONCLUSION

Comme on a pu le constater, l'érosion sous forêt est d'intensité très faible : 50 à 70 kg.ha⁻¹. Les valeurs n'en sont cependant pas aléatoires, mais sous la dépendance étroite du ruissellement, qui est extrêmement variable en Guyane française en fonction des caractéristiques hydrodynamiques des sols.

L'index de Wischmeier n'est pas très performant pour la détermination de cette érosion sous forêt. En revanche il est tout à fait intéressant de constater la concordance remarquable des résultats obtenus en bassins-versants et en petites parcelles d'érosion.

Le défrichement mécanisé produit des bouleversements importants dans la production des transports solides qui sont augmentés selon des facteurs qui ont atteint 50 fois ceux du milieu naturel.

Dans l'absolu ces débits solides sont déjà considérables — de 3 à 17 tonnes par hectares et par an — mais

ne constituent qu'un lointain indicateur des effets érosifs nés sur les versants des bassins, surtout si le défrichement s'est effectué en saison des pluies.

Les transports solides mesurés sur ces mêmes bassins et sur des parcelles retrouvent, après implantation de prairies naturelles, les valeurs modérées de 100 à 500 kg.ha⁻¹.an⁻¹ qui représentent pourtant 2 à 3 fois celles de la forêt sur ces bassins avant l'aménagement.

Ce constat relativement rassurant ne concerne qu'un aspect très particulier des effets de la déforestation ; il faut aussi considérer que ces résultats sont obtenus sur des bassins-versants de superficie réduite : environ un hectare. Ils ne peuvent donc constituer un prétexte ou une incitation à l'abattage et à l'exploitation spéculative de la forêt amazonienne. En effet la déforestation et surtout le défrichement, par la façon dont ils sont réalisés, vont très largement conditionner l'avenir des futurs aménagements.

BIBLIOGRAPHIE

- BEREAU (M.), SARRAILH (J.M.), 1985. — Un aspect de la perennité de *Digitaria swazilandensis* pâturé : évolution du rendement en milieu déforesté. Communication au colloque INRA - SAD en Guyane. Déc. 1985.
- BOULET (R.), CHAUVEL (A.), HUMBEL (F.X.), LUCAS (Y.), 1982. — Analyse structurale et cartographie en pédologie. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XIX, n° 4, 1982 : 309-351.
- BOYER (M.), 1976. — *Atlas de la Guyane* — Planche géomorphologie ORSTOM — CNRS 1979.
- CHUBERT (B.), 1974. — Le précambrien des Guyanes. Paris, *mém. B.R.G.M.* 1974, 204 p.
- FRITSCH (J.M.), 1983. — Evolution des écoulements, des transports solides à l'exutoire et de l'érosion sur les versants d'un petit bassin après défrichement mécanisé de la forêt tropicale humide. Hydrology of humid tropical regions, *IAHS publication* n° 140 : 197-214.
- FRITSCH (J.M.), 1984. — Les transports solides. Etudes d'impact de l'aménagement de Petit-Saut sur le Sinnamary. ORSTOM. Cayenne. *multigr.* 42 p.
- FRITSCH (J.M.), 1986. — L'augmentation du ruissellement après défrichement mécanisé de la forêt amazonienne. Les bassins-versants « ECEREX » en Guyane française. Communication aux XIX^e journées de l'hydraulique organisées par la Société Hydrotechnique de France. Paris. Sept. 1986.
- ROCHE (M.A.), 1982. — Comportements hydrologiques comparés et érosion de l'écosystème forestier amazonien à ECEREX, en Guyane. *Cah. ORSTOM, sér. hydrol.*, vol. XIX, n° 2, 1982 : 81-114.
- ROOSE (E.), 1980. — Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Thèse Docteur es Sciences Université d'Orléans.
- SARRAILH (J.M.), 1983. — Les parcelles élémentaires d'étude du ruissellement et de l'érosion. Synthèse après quatre années d'études — in « le Projet ECEREX, compte rendu des journées de Cayenne » (4-8 mars 1983), 394-403.
- SARRAILH (J.M.), 1984. — Mise en valeur de l'écosystème forestier guyanais. Opération ECEREX : résumé des premiers résultats. *Bois et Forêts des Tropiques*, n° 206, 4^e trimestre 1984 : 13-32.
- WILLIAMS (J.R.), 1971. — Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor — in « present and prospective technology for predicting sediment yields and sources ». *Proceedings of Sediment-Yield Workshop*. USA Sediment Laboratory. Oxford Miss, nov. 1972. ARS s-40-june 75.

ISSN : 0767-2888
ISBN : 2-7099-1057-8
Éditions de l'ORSTOM
72, route d'Aulnay 93143 BONDY Cedex

Photo de couverture :
Brûlis des andains après défrichement
(bassin J ; Guyane française)
Cliché Jean-Marie Fritsch