

UNIVERSITÉ DE PARIS VII
U.E.R. DES SCIENCES PHYSIQUES DE LA TERRE

THÈSE

présentée pour l'obtention du Doctorat de l'Université de PARIS VII

par

Frédérique SEYLER

**RECHERCHE MÉTHODOLOGIQUE
SUR LE TRAITEMENT D'IMAGES
DE TÉLÉDÉTECTION AÉRIENNE,
BASÉE SUR L'ANALYSE PRÉALABLE
DES FORMATIONS SUPERFICIELLES
AVEC LEUR COUVERTURE VÉGÉTALE.**

**Étude d'un secteur de lande sur schistes
en Bretagne centrale.**

Soutenue le 29 Mai 1986 devant le jury composé de

MM.	P. AUROUSSEAU
	G. BOCQUIER
	B. CERVELLE
	A. RUELLAN
	G. SAVARY
	G. STAMON
	J. TOUFFET

SOMMAIRE

INTRODUCTION

LA REFERENCE TERRAIN

- 1.0 - Introduction : Définitions préliminaires
- 2.0 - Présentation de la zone d'étude
- 3.0 - Analyse des formations superficielles
- 4.0 - Analyse de la couverture végétale
- 5.0 - Analyse des relations entre les formations superficielles et la couverture végétale
- 6.0 - Conclusion : La référence terrain

L'IMAGE ET SON TRAITEMENT

- 7.0 - Introduction : Définitions préliminaires
- 8.0 - Obtention et amélioration des documents de travail
- 9.0 - Les traitements de type statistique sur les réflectances
- 10.0 - Les traitements de type textural
- 11.0 - Conclusion : Les résultats des traitements sur les images et les relations terrain-image

CONCLUSIONS GENERALES

INTRODUCTION

Cette étude a commencé au mois de Janvier 1983, à la conjonction de plusieurs travaux sur la cartographie des formations superficielles et sur la mise en oeuvre de techniques plus ou moins récentes, comme la télédétection et le traitement d'images.

En effet, une nouvelle approche cartographique a été recherchée à travers un grand nombre de travaux visant à analyser et à exprimer l'organisation du sol dans ses trois dimensions, dans un souci de prendre en compte la réalité de la continuité des formations superficielles, ainsi que les interactions, transformations et transferts, qui ont lieu à l'intérieur de leur couverture.

Il nous paraît utile de jalonner l'évolution de cette démarche, en citant les travaux précurseurs de MILNE (1935), de H. GREENE (1945) et de A.A. RODE (1947), et ceux de G. BOCQUIER (1968 et 1971) et de A. RUELLAN (1970). Viennent ensuite les travaux commencés en 1977 par R. BOULET et son équipe en Guyane française, (R. BOULET, A. CHAUVEL, F.X. HUMBEL, Y.LUCAS, 1982), et le récent travail d'E. FRITSCH (1984), enfin, les travaux effectués en Bretagne par P. CURMI (1979), P. QUIDEAU (1980), F. ROUSSEL (1980), AL SIDDICK (1983).

Tous ces travaux ont été mis en oeuvre dans des zones géographiques différentes, s'intéressant à divers types de différenciation; ils s'appuient sur des techniques de terrain qui ne sont pas toutes semblables; ils prennent comme marqueurs de l'organisation du sol (ou courbes d'isodifférenciation selon la dénomination de R. BOULET et al, 1982), des entités aussi différentes, selon la liste qui en a été faite par A. RUELLAN (1981), que:

- "Le début ou la fin d'un volume bien délimité.
- L'apparition ou la disparition d'un ou plusieurs caractères morphologiques marquant le début ou la fin du passage latéral entre deux volumes.
- Une modification latérale de la limite séparant deux volumes superposés.
- Une limite d'épaisseur d'un volume."

Ces travaux sont donc très divers, mais ils ont en commun qu'ils s'intéressent surtout aux variations et aux limites de différenciation. Ils sont issus d'une réflexion se situant en réaction contre des techniques de cartographie s'appliquant avant tout au contenu. Nous allons essayer de schématiser ces différentes démarches en cartographie.

Le sol étant un continuum en trois dimensions, dont on ne perçoit généralement que la surface, la façon la plus logique et la plus commode de l'appréhender pour un observateur, est de creuser une fosse perpendiculairement à cette couverture. La face de la fosse soumise à l'observation est dénommée profil. Le sol étant organisé, les premiers observateurs se sont vite aperçu qu'il n'y avait pas une infinité possible de profils différents, mais qu'on pouvait au contraire les regrouper en types, que l'on pouvait classer. De là pour la cartographie, la facilité

de rattacher un profil décrit à une classe, puis d'établir des limites entre les différentes unités reconnues.

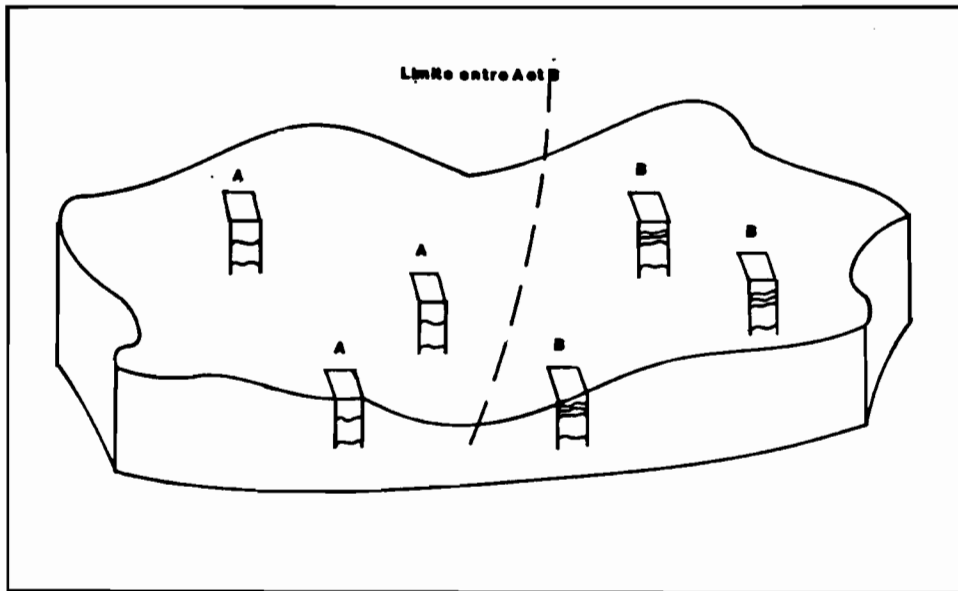


Figure 1 : Tracé d'une limite entre deux unités différentes, A et B.

Pour le tracé de la limite entre deux unités définies par leur appartenance à une classe, on se base souvent sur des relations supposées entre le sol et la végétation ou entre le sol et le modelé. C'est à ce niveau que la photographie aérienne et depuis peu l'imagerie satellitaire jouent leur rôle très important de permettre le tracé d'une limite avec une bonne vision spatiale, ce qui n'est pas toujours le cas sur le terrain.

Les problèmes qui ont été d'abord soulevés dans l'application du type de démarche que nous venons de schématiser, concernaient les deux points suivants:

- L'abstraction faite dans le rattachement d'un profil observé à un type ou une classe de sol; mais une abstraction est toujours nécessaire, pour rendre compte d'une réalité.
- L'interpolation ou l'extrapolation entre ou d'après des données connues; là encore, il est toujours nécessaire d'interpoler ou d'extrapoler pour rendre compte d'un continuum à partir d'observations ponctuelles, quelque soit la densité du maillage d'observation.

Il va de soi qu'on peut s'attacher dans n'importe quel type de méthodologie à réduire l'abstraction ou les interpolations nécessaires, mais le problème principal ne se situe pas là. Le problème qui nous paraît le plus fondamental est celui de la déficience, de l'absence ou même de la perte d'informations concernant les limites de la différenciation:

1. Au niveau spatial, bien sûr. En effet, les relations utilisées pour le tracé des limites ne sont généralement pas explicites. Un pédologue qui doit cartographier un périmètre donné ne va pas en général implanter ses profils au hasard. Il va se baser sur des relations intuitives entre le sol et le modelé, ou entre le sol et la végétation; les fosses seront creusées dans des unités physiographiques différentes.

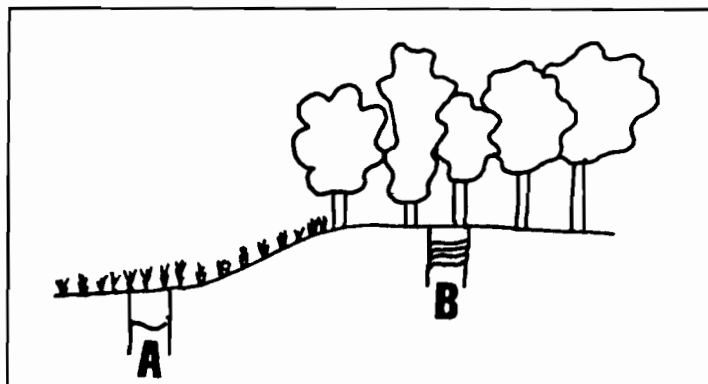


Figure 2 : Implantation des profils dans des unités physiographiques différentes.

Si deux unités de sol différentes sont reconnues, par exemple sous prairie et sous forêt, la limite va passer bien naturellement à la lisière de la forêt. En fait, l'étude des relations entre limites de sol et limites de végétation, ou entre limites de sol et modelé, n'ont pas encore conduit à l'énoncé de lois spécifiques. Et la cartographie se base très souvent sur tout un corpus de connaissances intuitives sur ces relations, qui s'avèrent parfois justes mais aussi parfois fausses; et ce sont ces relations intuitives qui servent à la fois pour implanter les profils et pour tracer les limites.

2. De façon plus fondamentale, c'est à la limite qu'il est possible d'élaborer des raisonnements sur les relations entre deux unités. Or c'est seulement l'établissement de ces relations qui permet de proposer un modèle structural de l'organisation du sol. Et c'est par l'établissement de ces relations que peut être élaboré un modèle fonctionnel des formations superficielles. Sans l'analyse directe de ces relations, qui ne se fait qu'à la limite, seules des hypothèses sur le fonctionnement et l'organisation du sol sont possibles.

Ceci nous paraît un point très important, et c'est sur l'observation directe des limites, entre deux volumes différents quel qu'ils soient, que sont basés tous les travaux que nous avons cités plus haut, et c'est par ce point qu'ils se rejoignent. Pour terminer la caractérisation générale de la démarche que nous allons adopter pour l'analyse des formations superficielles, il nous faut aborder deux points qui sont très souvent discutés dans les travaux de réflexion sur les types de cartographie, en particulier dans le récent travail de GIRARD (1983).

1. F.X. HUMBEL (1983) propose quatre cas d'organisation spatiale que nous résumons ici:
 - Cas 1: La différenciation latérale du sol est négligeable.
 - Cas 2: La différenciation latérale est en relation stricte avec un axe topographique.
 - Cas 3: L'organisation est plus complexe, mais il existe des structures répétitives selon des axes particuliers.
 - Cas 4: Il y a absence de symétrie interne, ou on ne peut pas reconnaître ou représenter les structures ordonnées.

Dans les cas 1 et 4, l'approche classique répondrait mieux aux objectifs de la cartographie. Dans les cas 2 et 3, l'approche dite structurale est performante.

Nous dirions plutôt que l'approche basée sur l'observation directe des limites est nécessaire partout où une différenciation s'exprime. Ne pas analyser les relations entre deux unités ne permet pas de mettre en évidence l'organisation des formations superficielles; Dans le cas 4, il est maintenant souvent admis qu'il suffit de descendre à un niveau d'observation inférieur, pour retrouver une possibilité d'élaborer un schéma d'organisation. C'est en effet dans les cas 2 et 3 que la démarche proposée apporte plus d'informations que l'approche classique en restant néanmoins possible à un niveau d'organisation macroscopique.

Cette dernière remarque nous amène à notre second point:

2. En effet, elle pose le problème du choix du niveau d'observation et d'appréhension de l'organisation des formations superficielles. Les choix qui sont faits dans cette optique règlent de manière secondaire les discussions fréquentes sur les problèmes d'échelle et sur le sens de la démarche. L'échelle de la cartographie est en général imposée par des critères économiques (nombre d'observations dans une superficie donnée). Savoir si une démarche est ascendante ou descendante devient également accessoire. La plupart des démarches sont à cet égard dialectiques. On choisit forcément un périmètre d'observation avant de procéder aux observations. Toute démarche est donc initialement descendante. Puis ayant ouvert un profil, on peut s'intéresser aux niveaux d'organisations inférieurs au profil, et on continue là à descendre, ou bien on creuse un profil à côté ou une tranchée pour étudier les variations des organisations, et là on remonte, on procède généralement par aller et retour, ce qui caractérise une démarche dialectique. Une étude de type structural reconnaîtra les différents niveaux emboîtés de l'organisation des formations superficielles et leurs échelles, et pourra alors se situer à un niveau donné, en négligeant peut être les niveaux inférieurs pour des impératifs économiques ou tout autre type de raisons. En ce sens la démarche dite structurale pourrait être caractérisée comme allant de l'intérieur vers l'extérieur, plutôt que comme une démarche ascendante ou descendante. Et il n'y aura qu'un seul choix d'échelle d'étude possible, tenant compte des impératifs économiques s'il en existe, mais adaptée en premier lieu aux variations des formations superficielles.

En résumé, notre approche est basée sur une analyse structurale de la couverture des formations superficielles, c'est à dire:

- D'une part, la reconnaissance des différents niveaux d'organisation des formations superficielles.
- D'autre part, l'observation directe à un niveau donné, des limites entre volumes présentant des organisations différentes.
- Enfin, le suivi spatial de ces limites, afin de définir un modèle de l'organisation en trois dimensions des formations superficielles.

Cette démarche cartographique nécessite une analyse importante. Elle ne pourra donc porter que sur des secteurs géographiques limités. Pour définir les limites spatiales d'application du modèle structural élaboré, l'idée vient de confronter le grand nombre d'informations acquises sur le terrain avec l'information fournie par l'outil télédétection, qui offre une continuité spatiale dans toute une gamme de résolutions. La première étape de cette recherche consiste à définir dans quelle mesure cet outil répond à ce qu'on attend de lui sur la zone même sur laquelle est bâti le modèle structural. Ce travail constitue donc une première approche méthodologique, qui va tenter de définir s'il existe des relations exploitables entre

une cartographie de type structural et une image de télédétection, et quelle est la nature de ces relations si elles existent. Ceci étant fait sur une zone géographique limitée.

Pour cela, il est nécessaire de définir la résolution de l'image en fonction de l'échelle des variations de la couverture des formations superficielles. Puis, l'image étant une représentation de la surface, et la surface étant dans la majorité des cas couverte de végétation, il faut tenir compte de cet intermédiaire obligatoire.

La deuxième étape de ce travail consistera donc en une étude de la répartition spatiale de la couverture végétale, du point de vue de ses relations avec l'organisation des formations superficielles.

Enfin, l'image elle-même doit être analysée. Nous avons vu que le choix de sa résolution n'est pas indifférent. Mais ce n'est pas le seul choix à envisager. Chaque pixel ou point élémentaire de l'image est une réponse de nature physique à un certain nombre de paramètres, difficiles à maîtriser, de l'objet d'étude et des intermédiaires entre l'objet et le capteur, quel qu'il soit. Cette réponse de l'objet varie dans le spectre des rayonnements réfléchis. Enfin, l'arrangement des pixels entre eux correspond à une organisation de l'image. Les moyens d'analyse de cette grammaire ne sont pas non plus indifférents. Les différents traitements de l'image offrent des points de vue sur celle-ci aussi différents que peuvent l'être pour un même objet sol, une analyse chimique globale de ses différents constituants, ou une observation directe de l'agencement de ses phases minérales au microscope optique. Il est donc nécessaire d'aborder ce très vaste domaine qu'est le traitement d'image, de notre point de vue particulier, qui est celui de ses relations avec l'organisation des formations superficielles, en continuité avec notre démarche de terrain, qui est celle, structurale, que nous avons définie plus haut.

Nous venons de définir les choix théoriques qui sont nécessaires pour commencer tout travail, et qui ont été faits pour commencer celui-ci:

Nous étudierons d'abord le volume des formations superficielles, puis leur surface, donc la végétation, puis la représentation de la surface, donc, l'image.

La définition et la description aussi complète que possible des différentes données obtenues soit sur le terrain, soit sur l'image, sont exposées dans les chapitres 1 et 7 de ce présent travail, mais nous pouvons dire ici, concrètement, comment s'est déroulée l'étude dans le temps.

Ce travail a commencé par l'étude du terrain. Le secteur a été choisi parmi d'autres par consultation des cartes existantes et des photographies aériennes IGN. Trois terrains sommairement délimités ont été reconnus lors d'une première campagne de terrain. Un seul a été choisi pour sa végétation de lande naturelle. Deux toposéquences ont été décrites. Une première série d'échantillons a été prélevée et étudiée en lames minces. Une campagne de prise de vue aérienne a été alors commandée, en infra-rouge couleur et à l'échelle approximative du 1/20000. Cette mission aérienne a été spécifiée pour répondre à l'échelle de variation des formations superficielles, estimée à quelques mètres lors de la première approche de terrain.

L'étude de terrain a ensuite été précisée par d'autres toposéquences et par le creusement de tranchées. Les tranchées répondaient à deux besoins:

- Approfondir l'observation jusqu'aux niveaux altéritiques.
- Offrir une observation continue aux endroits de variation rapide de la couverture des formations superficielles.

Une deuxième série d'échantillons a alors été prélevée, ceux-ci ont été de nouveau soumis à une observation en microscopie optique, puis à une batterie d'analyses granulométriques et chimiques.

Les photographies obtenues lors de la mission aérienne ont été parallèlement analysées par photo-interprétation. Le résultat de cette photo-interprétation a été utilisé sur le terrain pour guider une cartographie des ensembles végétaux, de type non classique pour un botaniste ou un phytosociologue, mais qui nous a paru adaptée à nos besoins, c'est à dire à l'estimation de la répartition spatiale de la couverture végétale.

Pendant la même campagne de terrain, on a relevé le long de toutes les toposéquences des observations sur la végétation. Encore une fois, ces observations n'ont pas été faites suivant un mode opératoire reconnu parmi les spécialistes du domaine végétal. Elles ont été celles, plus habituellement pratiquées par le pédologue, estimant un paramètre végétation qu'il lui est nécessaire d'intégrer à son analyse du milieu.

Enfin, entre les différentes missions de terrain et après que celles-ci soient terminées, a pris place la numérisation, puis le traitement des images, et l'extraction, par confrontation avec l'analyse du terrain, des informations contenues dans l'image.

La présentation de ce travail se fera donc de la façon suivante:

Dans la première partie sera établie la référence terrain. Le premier chapitre explicitera les choix pratiques qui ont été faits pour l'analyse, et la nature des données recueillies. Le second chapitre présentera la zone choisie. Le troisième développera l'analyse des formations superficielles, tandis que le quatrième exposera celle de la végétation. Le cinquième chapitre traitera des relations entre la végétation et les formations superficielles. Dans le sixième chapitre, nous donnerons les conclusions qui font de ce faisceau d'analyses, la référence qui va nous servir par la suite.

La deuxième partie portera sur l'image. Le septième chapitre introduira la télédétection et l'image qui en résulte. Le huitième présentera les documents utilisés et leur préparation à l'analyse. Le neuvième et dixième chapitre exposeront deux groupes de traitements de l'image, le premier basé sur les propriétés statistiques des réflectances et le second sur les propriétés texturales de l'image. Enfin un onzième chapitre conclura sur les relations définies entre notre référence terrain et les images résultant des traitements effectués.

Notre conclusion générale devra naturellement exposer les résultats de cette première approche méthodologique. Mais elle devra également nous conduire à estimer ce que l'on peut attendre des techniques utilisées dans le but qui a guidé cette étude, c'est à dire la possibilité d'extrapolation vers une cartographie à petite échelle tenant compte de l'organisation du sol.

LA REFERENCE TERRAIN

1.0 INTRODUCTION : DEFINITIONS PRELIMINAIRES

Cette introduction à la partie référence terrain se propose de :

- Définir la nature des données utilisées pour l'analyse du terrain.
- Présenter la façon dont elles ont été acquises.
- Donner la définition de termes employés dans des acceptions précises lors de leur présentation.

Les données nécessaires à l'établissement de cette référence terrain sont de trois types :

1. Des données existantes.
2. Des données d'analyse des formations superficielles.
3. Des données d'analyse de la couverture végétale.

1.1 Les données existantes

Les données existantes comprennent les cartes, les photographies aériennes, les données bibliographiques, les communications personnelles d'auteurs ayant travaillé sur le même terrain ou un terrain proche, les connaissances des utilisateurs du sol.

Ainsi, nous avons utilisé,

Pour l'analyse des formations superficielles :

- La carte topographique au 1/25 000, (IGN : feuille de Laniscat), qui a servi pour l'implantation du secteur de référence, le calage des relevés topographiques, et l'analyse morphologique d'ensemble du secteur.
- La carte géologique au 1/50 000, feuille de Pontivy (J.P. SAGON, à paraître), ainsi que des renseignements sur le secteur lui-même donnés par l'auteur.
- Un extrait du cadastre (feuille de Laniscat, section C, au 1/2 500).
- Une carte pédologique de reconnaissance au 1/25 000 établie par P. AUROUSSEAU (non publiée).
- Des données bibliographiques sur les sols de Bretagne, dont la liste est donnée dans la bibliographie; les travaux les plus utilisés pour cette étude sont les

thèses récentes présentées à l'Université de Rennes (CURMI, 1979; ROUSSEL, 1980; AL SIDDIK, 1983).

Pour l'analyse de la couverture végétale :

- Le cadastre.
- Les photographies aériennes IGN de 1952, 1961, 1969, 1978, 1981.
- La photographie aérienne infrarouge couleur (IRC) de Septembre 1983.
- Des renseignements oraux du propriétaire du terrain sur son utilisation actuelle.

1.2 Les données d'analyse des formations superficielles

Les données d'observation et d'analyse de terrain sur les formations superficielles du secteur de Kermaner ont été recueillies sous la direction du Professeur G. BOCQUIER, au cours de plusieurs campagnes de terrain qui se sont échelonnées sur deux années :

- En Mai 1983, durant le stage de terrain du D.E.A. de l'Université Paris VII, sous la direction de P. ILDEFONSE, et avec la participation de M. DOSSO.
- En Juillet 1983 avec la participation de P. AUROUSSEAU et P. BOIVIN
- En Mai 1984, durant le stage de terrain du D.E.A.
- En Juillet 1984
- En Septembre 1984

Nous allons décrire les modes d'obtention de ces données d'analyse des formations superficielles et définir leur nature.

Obtention des données :

Les formations superficielles étant organisées en trois dimensions, il est nécessaire pour les observer de creuser des profils et des tranchées, ainsi que des sondages complémentaires à la pelle ou à la tarière. Nous explicitons ces termes et les rapports de ces différentes observations entre elles sur le schéma figure 3.

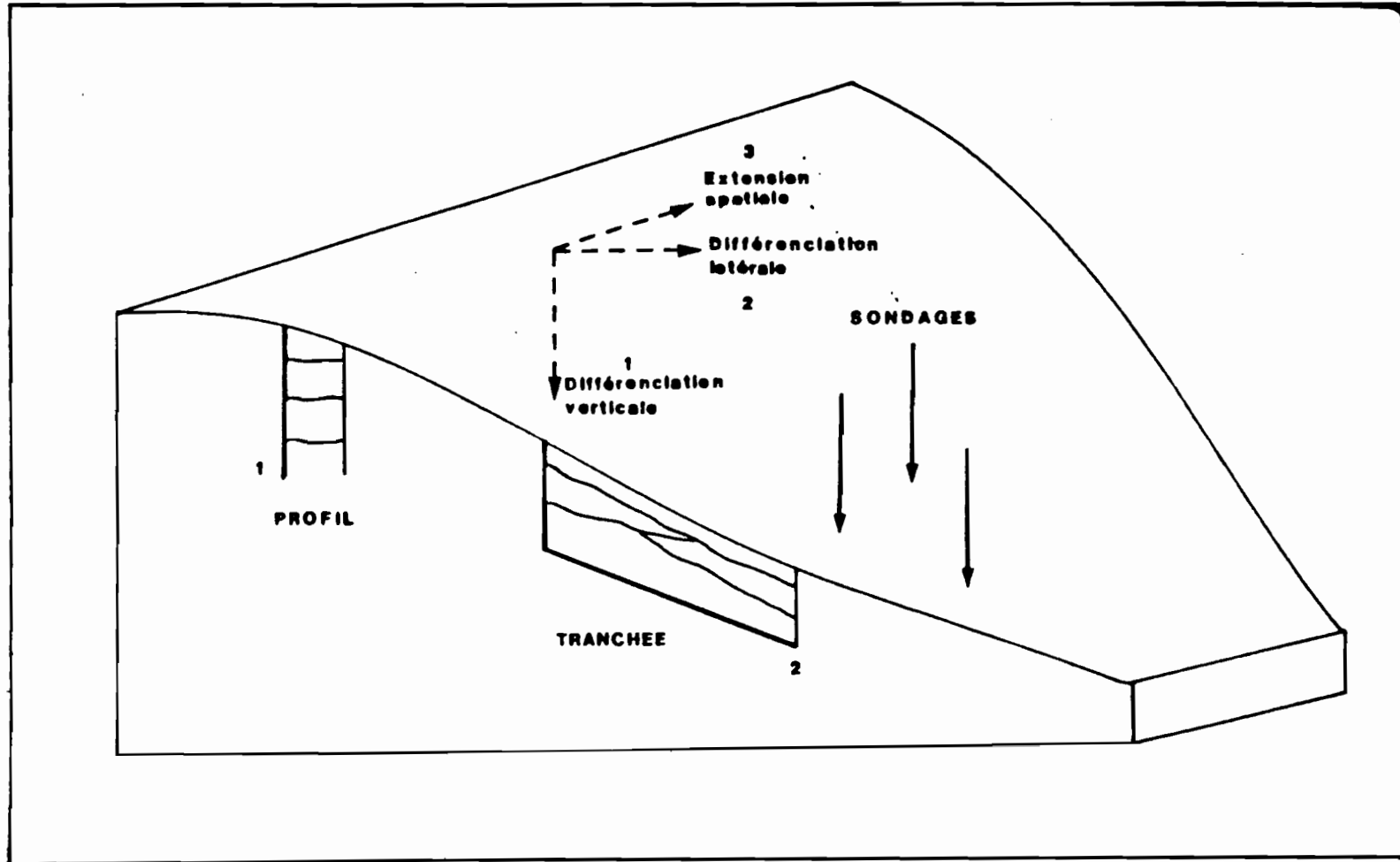


Figure 3 : Profils, tranchées, sondages, leur représentation dans l'espace.

Les profils sont implantés suivant la pente topographique et constituent des toposéquences. Ces profils sont décrits macroscopiquement afin de définir les différentes unités d'organisation (traits pédologiques, horizons, ensembles...) qui les constituent. Grâce à ces profils on repère également le long des séquences les zones de plus grande variabilité des formations superficielles.

Les tranchées sont creusées à la pelleteuse dans les zones de variabilité rapide, afin de pouvoir préciser dans leur extension latérale les limites d'apparition et de disparition des principales unités d'organisation précédemment définies. Ces différentes tranchées sont décrites et relevées géométriquement.

Les sondages complémentaires, à la pelle ou à la tarière ont été effectués afin de pouvoir suivre dans l'espace les limites repérées dans les tranchées et sur les séquences.

Les descriptions macroscopiques et les relevés géométriques (qui seront explicités plus loin) sont complétés par le prélèvement d'échantillons de deux sortes :

Des échantillons servant à la confection de lames minces, réalisées au Laboratoire des Sols de Rennes, et pour une petite partie au laboratoire de l'Université Paris VII. Ces échantillons sont prélevés sur profils et sur tranchées afin de préciser et d'établir la caractérisation des différentes unités d'organisation. Les prélèvements sont effectués à l'intérieur des horizons définis macroscopiquement ou sur la limite entre deux horizons. Cette prise d'échantillon s'effectue avec le minimum de perturbations possible, c'est à dire à l'aide de boîtes rigides qu'on enfonce progressivement dans une face nettoyée du profil, en dégagant au couteau autour de la boîte. Ces échantillons sont ensuite imprégnés d'une résine pour les rendre solides. La dilution de la résine est également choisie pour qu'elle ne perturbe pas l'échantillon en séchant (temps de séchage longs). Cet échantillon solidifié est ensuite découpé comme une roche, et amené à l'épaisseur d'une "lame mince" (quelques microns d'épaisseur). Ces lames minces, qui ont acquis la propriété de laisser passer la lumière, peuvent ensuite être observées à l'aide d'un microscope optique, et toutes les techniques de détermination de minéraux et d'analyse des micro-structures peuvent leur être appliquées. L'ensemble de ces techniques appliquées à l'analyse des formations superficielles a été nommée pédographie (R. BREWER, 1976).

Des échantillons servant à des déterminations analytiques. Ces échantillons sont prélevés en sacs plastiques, en vue de les soumettre à un certain nombre d'analyses granulométriques et chimiques réalisées au Laboratoire Central d'Analyse des Sols d'Arras.

Nature des données

Nous pouvons classer les différentes données obtenues en vue de définir la différenciation dans l'espace des formations superficielles, en deux ensembles de nature différente :

- Des données de caractérisation des différentes unités d'organisation.

- Des données concernant les relations spatiales et chronologiques entre ces unités d'organisation. Ces données sont dénommées structurales.

Des données de caractérisation

Des caractérisations macroscopiques : Ces données descriptives concernent principalement

- La couleur : donnée à l'aide d'un code des couleurs connu sous l'appellation de "code Munsell". Une couleur y est définie par un code de teinte (hue; ex : 10 YR), suivi d'un code de clarté (value), c'est à dire la luminance de la teinte (plus ou moins de blanc), (ex : 10 YR 5), enfin d'un code de pureté (chroma), c'est à dire la saturation de la teinte, (ex : 10 YR 5/6).
- Le pourcentage et la nature des éléments grossiers.
- La structure : Cette variable concerne le mode d'arrangement des agrégats entre eux. Les différents états de la structure d'un sol sont également codifiés.
- La porosité : Cette variable décrit la forme, la grosseur et la direction des vides observables macroscopiquement, et donne une estimation de leur nombre.
- Les différents traits pédologiques : On entend par traits pédologiques tous les caractères qui se distinguent du fond par leur couleur, leur consistance, etc..., comme des taches, des revêtements,...

Ces descriptions macroscopiques permettent en premier lieu de définir des horizons et d'établir leurs limites qui correspondent à des discontinuités verticales ou à des variations progressives d'un ou plusieurs caractères au sein du profil.

Des caractérisations microscopiques : Ces descriptions concernent

- Le squelette : C'est l'ensemble des minéraux visibles au microscope optique (hérités de la roche mère) et des micro-fragments de cette roche.
- Le plasma : C'est l'ensemble des produits secondaires minéraux et organiques formés lors de l'altération de la roche ou par des processus de transformations pédogénétiques. Il est formé principalement de minéraux argileux, d'hydroxydes, et de produits organiques non directement identifiables en microscopie optique.
- L'arrangement et l'estimation des proportions relatives du squelette et du plasma.
- Les vides.
- Les traits pédologiques : De la même façon que pour l'observation macroscopique, il s'agit de micro-structures d'accumulation ou de concentration de matière qui se différencient dans le fond matriciel, que constitue l'ensemble du squelette, du plasma et des vides.

Des données analytiques : elles comprennent principalement

- L'analyse des pourcentages de carbone et de matière organique.
- La granulométrie : C'est une estimation quantitative des différentes fractions minérales classées par leur taille.
- Le pH.
- La capacité d'échange : C'est une estimation donnée par un indice de la capacité du complexe argilo-humique à échanger des cations.
- Teneur en principaux cations échangeables.
- Analyse chimique totale : Dissolution du sol par attaque à l'acide fluorhydrique en ces principaux éléments chimiques et dosages de ces éléments.

Ces différentes données de caractérisation, descriptives ou analytiques, qualitatives ou quantitatives, assurent donc la reconnaissance et le positionnement des variations verticales au sein des profils étudiés. Elles permettent de définir les **différenciations verticales** dans les formations superficielles d'altération et de pédogénèse.

Des données structurales

Les données structurales sont obtenues par l'analyse des relations entre les différentes unités d'organisation (ou unités de différenciation) qui ont été identifiées à différentes échelles (macroscopique, microscopique), c'est à dire à différents niveaux d'organisation.

Ces relations sont étudiées sur un plan géométrique, par la forme des limites établies entre les différentes unités d'organisation.

La forme des limites résulte des mécanismes de la différenciation et elle peut permettre de définir un ordre dans cette différenciation.

Par exemple, une limite nette, brutale, recoupant d'autres limites peut correspondre à une discordance de dépôt, alors qu'une variation progressive, une limite irrégulière ou discontinue, sera interprétée comme une transformation d'une unité d'organisation en une autre unité.

L'ordre défini par la géométrie de ces limites s'établit :

Dans le temps :

Dans le cas de dépôts successifs, la superposition ou la discordance d'unités d'organisation entre elles indiquent une chronologie relative, (figure 4).

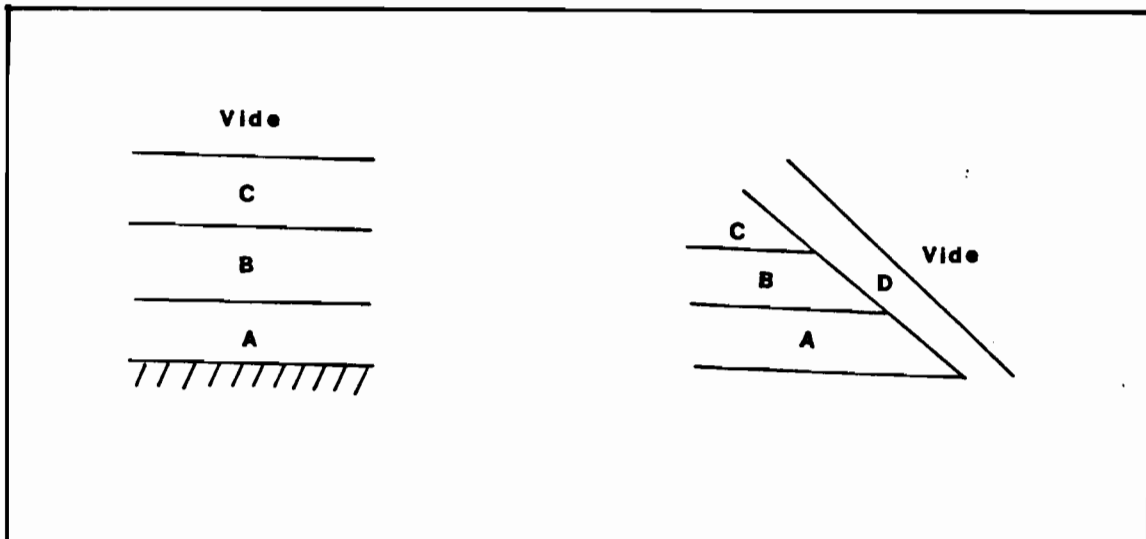


Figure 4 : Chronologie relative entre des dépôts successifs, établie par des relations de superposition, et de discordance.

1. Superposition (A,B,C).
2. Discordance (D), et superposition (A,B,C).

Dans le cas d'une transformation, la forme générale de la limite et la présence et la disposition des reliques (limite discontinue) indique le sens de la propagation de la transformation, (figure 5).

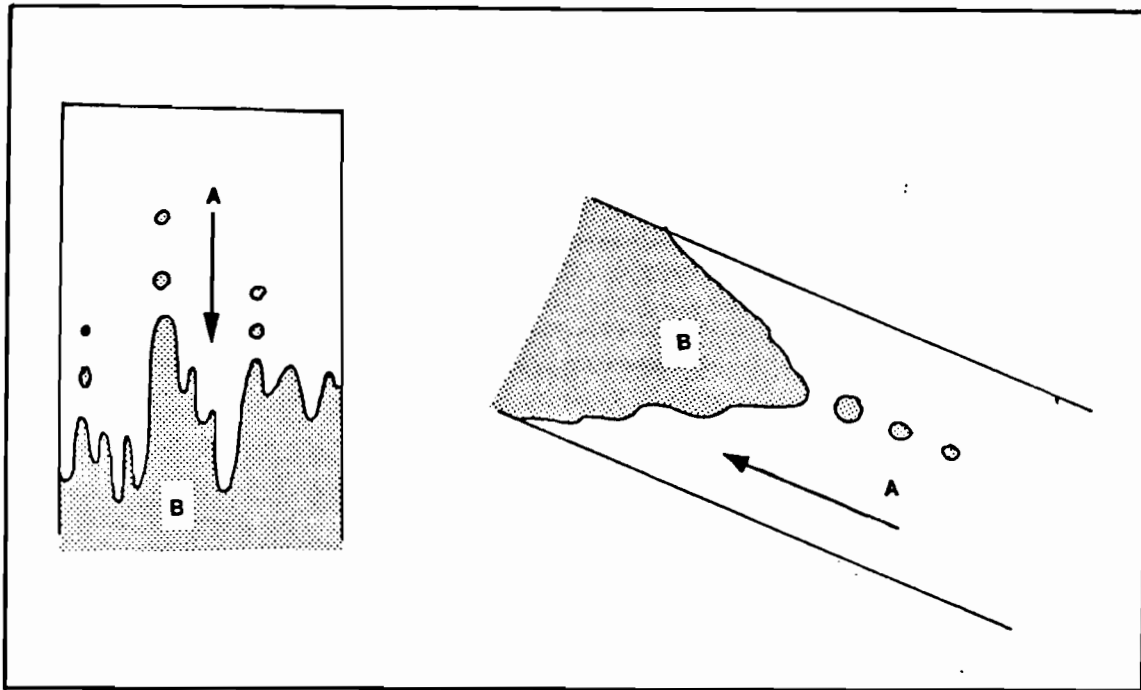


Figure 5 : Sens de la propagation d'une transformation indiqué par la forme de la limite et la disposition des reliques entre des horizons A et B

Dans l'espace : L'agencement des limites dans l'espace définit une hiérarchie des différentes unités d'organisation par des relations d'inclusion (un domaine est inclus dans un autre domaine), ou d'indépendance.

Toutes ces relations structurales permettent de définir **l'organisation spatiale et chronologique** d'une formation superficielle :

- La dépendance ou l'indépendance entre les différentes unités d'organisation.
- L'ordre de la différenciation.

Cette analyse sur les formations superficielles s'appuie donc sur des données de deux types, des données de caractérisation et des données structurales. Il faut noter que les relations structurales doivent se confirmer par des relations géochimiques et minéralogiques. Ce type de relations n'est pas du tout abordé ici, ce qui constitue une des limites de ce présent travail.

1.3 Les données d'analyse de la couverture végétale

Toutes les données concernant la végétation ont été obtenues sous la direction du Professeur J. TOUFFET.

Les observations de la couverture végétale sont de trois types différents :

Les relevés de végétation

56 relevés de végétation ont été effectués sur le terrain, visant à établir en chacun de ces points la liste des espèces dominantes du point de vue du recouvrement en surface, et des espèces marquantes parce que caractéristiques d'un milieu donné, par exemple spécifiques d'un pâturage, d'une lande, d'un milieu xérophile ou humide. Ces relevés ont été effectués dans des plages définies par une photointerprétation de l'image IRC de la zone. Chacune des plages a fait l'objet d'un relevé.

Les transects de végétation

Des transects de végétation ont été établis le long de chacune des toposéquences d'analyse des formations superficielles. On a relevé autour de chaque profil les espèces dominantes, leurs recouvrements, leurs tailles et leurs modes d'association.

L'établissement de la carte des ensembles végétaux

A partir de la photographie IRC, on a établi une carte des limites de réflectance. Sur le terrain, on a examiné la signification de chacune de ces limites du point de vue de la distribution des espèces végétales. Cette carte, modifiée par nos observations sur le terrain, nous a servi à faire la synthèse des sondages de végétation pour obtenir une carte de répartition des ensembles végétaux.

Ces définitions préliminaires étant données, et la nature de nos différentes observations étant définies, nous pouvons commencer l'exposé de l'analyse des formations superficielles et de la couverture végétale qui nous a servi à établir la référence terrain.

2.0 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le secteur étudié se situe au sud de St Brieuc, à une dizaine de kilomètres à l'ouest de Mûr de Bretagne.

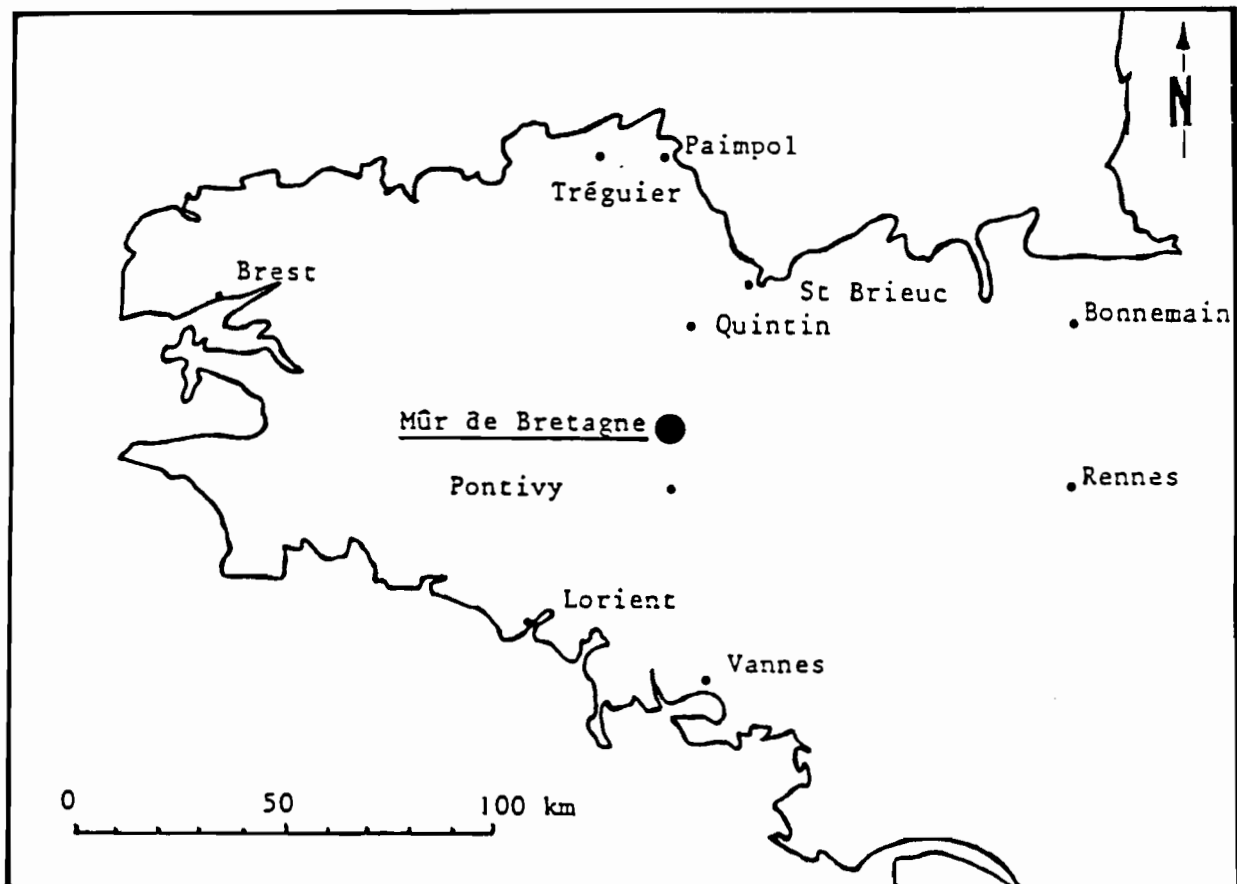


Figure 6 : Localisation de la zone d'étude en Bretagne centrale.

On a choisi la Bretagne centrale comme zone d'étude pour plusieurs raisons :

- Une analyse structurale des sols y a été entreprise depuis plusieurs années. Ainsi, des travaux récents (P. CURMI, 1979, P. QUIDEAU, 1980, F. ROUSSEL, 1980, AL SIDDIK, 1983) y ont été exécutés sous la direction de A. RUELLAN et P. AUROUSSEAU. Un certain nombre de résultats sont acquis : Des horizons caractéristiques des sols de Bretagne ont été définis, des mécanismes d'altération et de pédogenèse ont été mis en évidence, et une

cartographie de type structural a été entreprise en forêt de Rennes et en forêt de Paimpont.

- Outre cette connaissance des sols de Bretagne, un appui logistique nous a été fourni par le Laboratoire de Pédologie de l'ENSA de Rennes : Matériel de terrain, lames minces, déterminations analytiques, etc.

2.1 Cadre de l'étude

Après une reconnaissance rapide d'une vaste zone à l'ouest de Rennes, cartographiée au 1/25 000 par P. AUROUSSEAU (travaux effectués entre 1975 et 1979, non publiés), un secteur d'une superficie de 5 km sur 12 km a été délimité, (voir fig. 7). Ses dimensions correspondent à celles d'une vue du futur satellite SPOT.

Le choix de cette zone correspond à la démarche de cette étude : Commencer un inventaire des organisations du sol existant dans une région, étudier leur correspondance avec une image de télédétection de résolution compatible avec leur échelle, puis tenter une extrapolation à une cartographie régionale grâce à une image de résolution adaptée à l'échelle de cette cartographie. Les dimensions de la zone choisie s'adaptent donc à une perspective régionale dans laquelle doit être replacée cette étude.

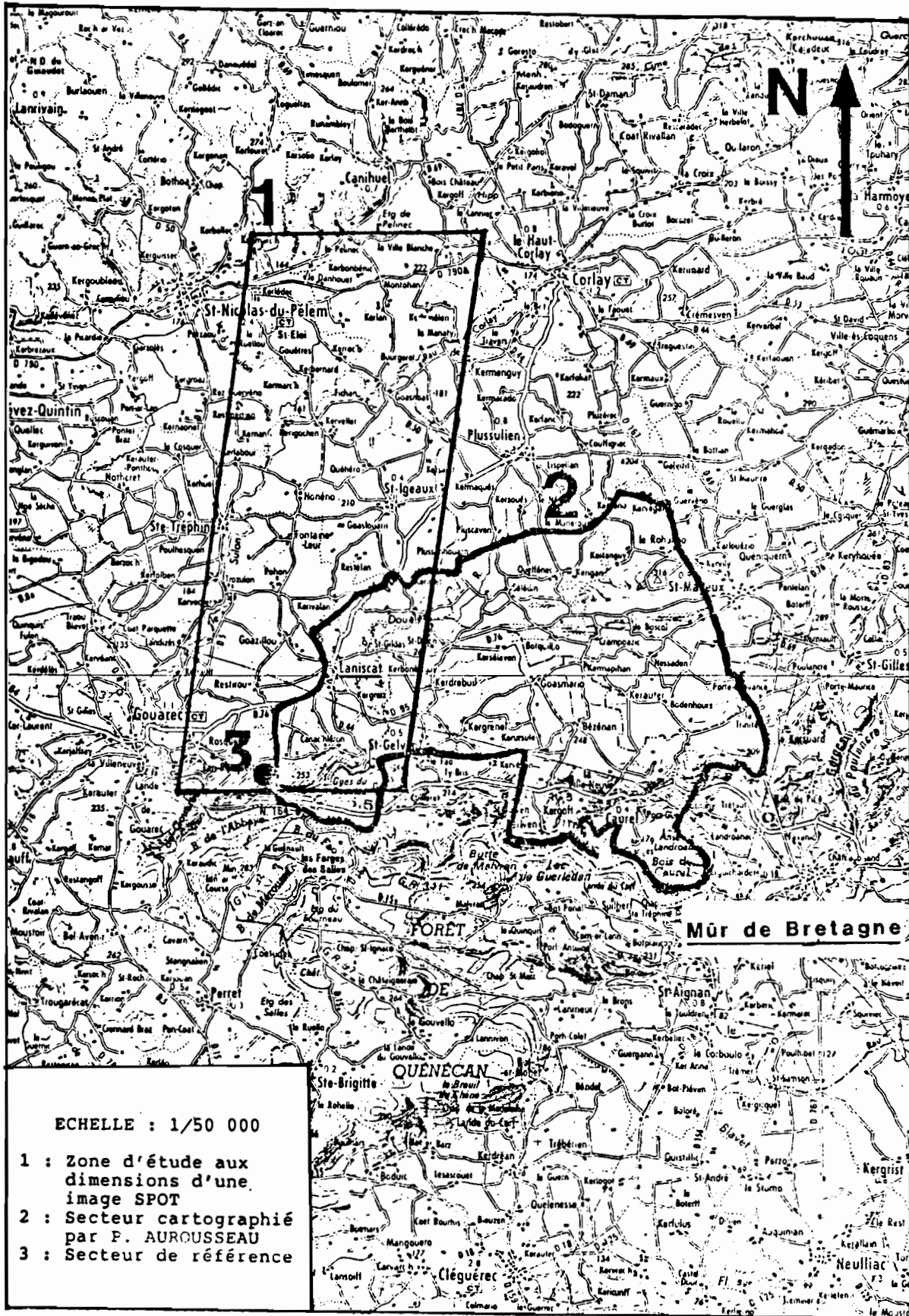


Figure 7 : Délimitation de la zone d'étude.

Le choix du secteur de référence

La zone ainsi délimitée chevauche plusieurs grandes structures géologiques qui constituent l'ossature des différentes formes du relief régional.

Au nord, le massif granitique de Quintin détermine un relief grossièrement circulaire qui domine le synclinorium médian de schistes et grauwackes du Dinantien. Cette zone médiane est elle-même une zone de plateaux mollement ondulés dans lesquels sont creusés les bassins du Sulon et de la Rivière de Corlay. Au sud, des reliefs orientés E-W ou ENE-WSW correspondent à deux anticlinaux constitués par des schistes et quartzites du Dévonien. La vallée du Daoulas forme une gorge dans l'anticlinal situé le plus au sud.

Trois premiers secteurs ont été choisis sur anticlinal de schiste, deux en terrain cultivé et le troisième en végétation de lande. Ces secteurs ont été étudiés au cours du stage de terrain du D.E.A. de pédologie de PARIS VII de mai 1983. Et ce sont ces reconnaissances préalables qui ont servi à implanter l'étude présente, sur le secteur de lande.

2.2 Le secteur de référence

Le secteur de référence est une zone de 32 hectares de superficie située autour du lieu-dit Kermaner, près de Laniscat.

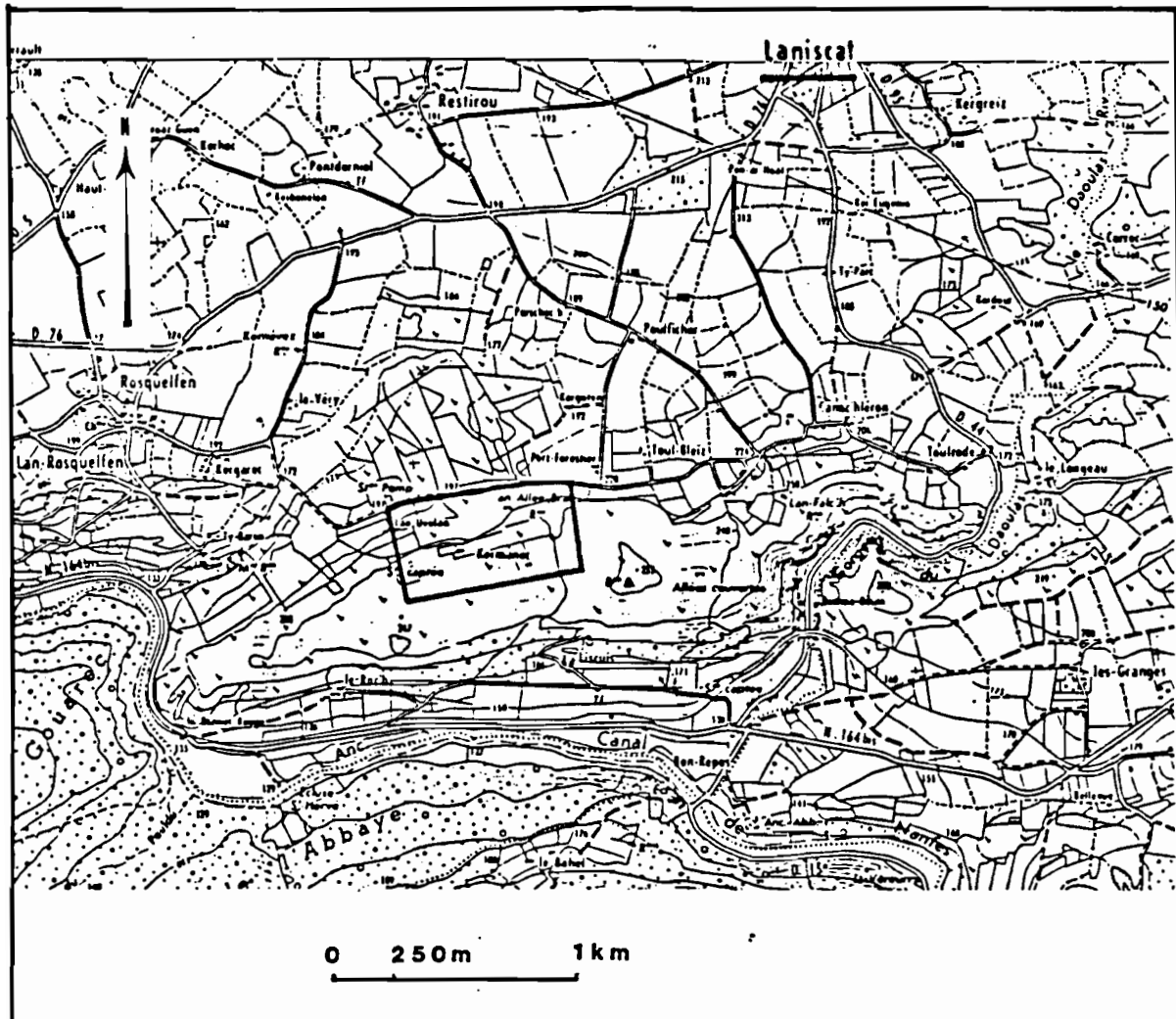


Figure 8 : Localisation du secteur de référence près de Laniscat

Climat, géomorphologie, hydrologie

Le climat régional

A la station de Rostrenen, distante de 16 km de Laniscat, le climat se caractérise par :

- Une amplitude thermique faible (moyenne Janvier : 5°, moyenne Juillet : 15°).
- Une humidité persistante, un grand nombre de jours de pluie, (en 1963 : 195 jours de pluie pour un total annuel de 1016 mm.).
- Un enneigement faible, des gelées peu nombreuses.
- Des vents dominants du SW.

Géomorphologie, hydrologie

Le secteur étudié se situe sur le flanc nord d'une colline allongée de direction E-W. Au bas de cette colline se trouve une zone de bas-fonds marécageux qui collecte les eaux s'écoulant de notre secteur et dont l'exutoire rejoint le canal de Nantes à Brest à côté de Gouarec.

La morphologie générale de ce secteur et le sens de l'écoulement des eaux sont donnés dans les figures 9 et 10.

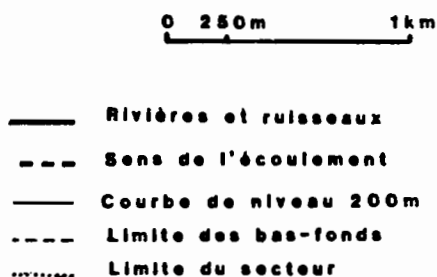
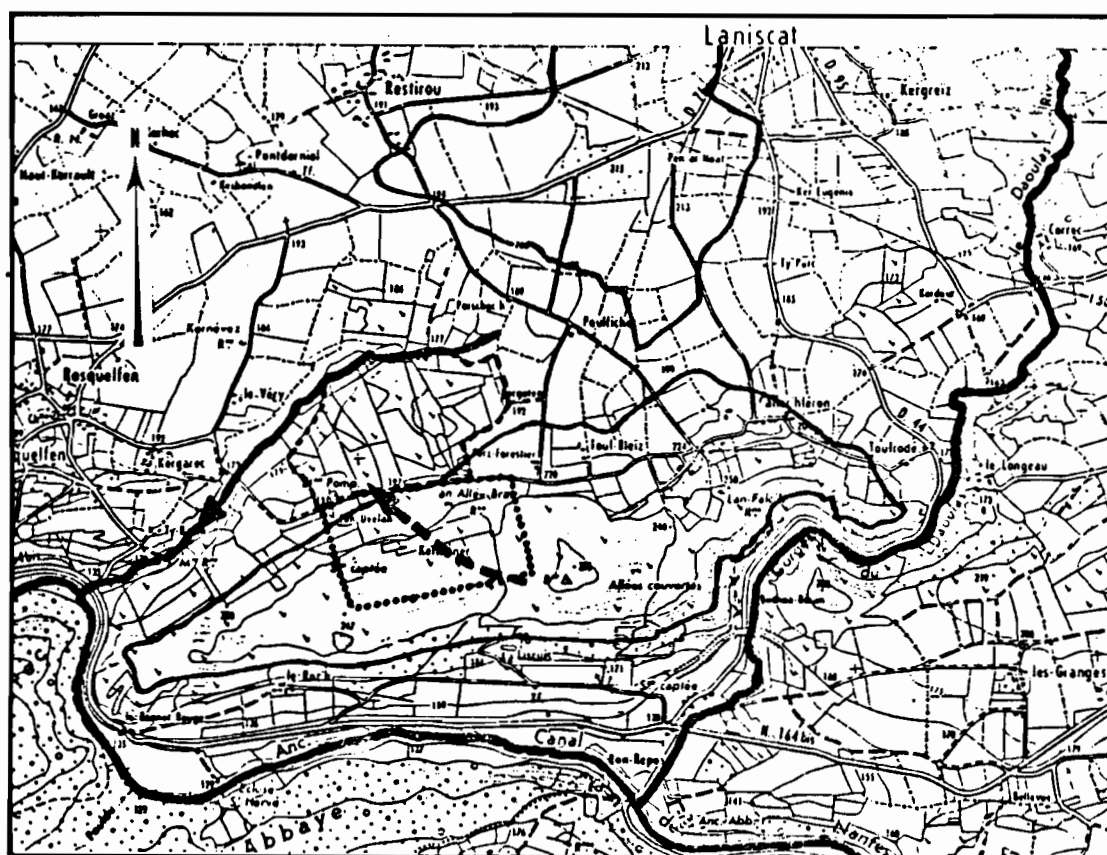


Figure 9 : Géomorphologie et écoulement des eaux

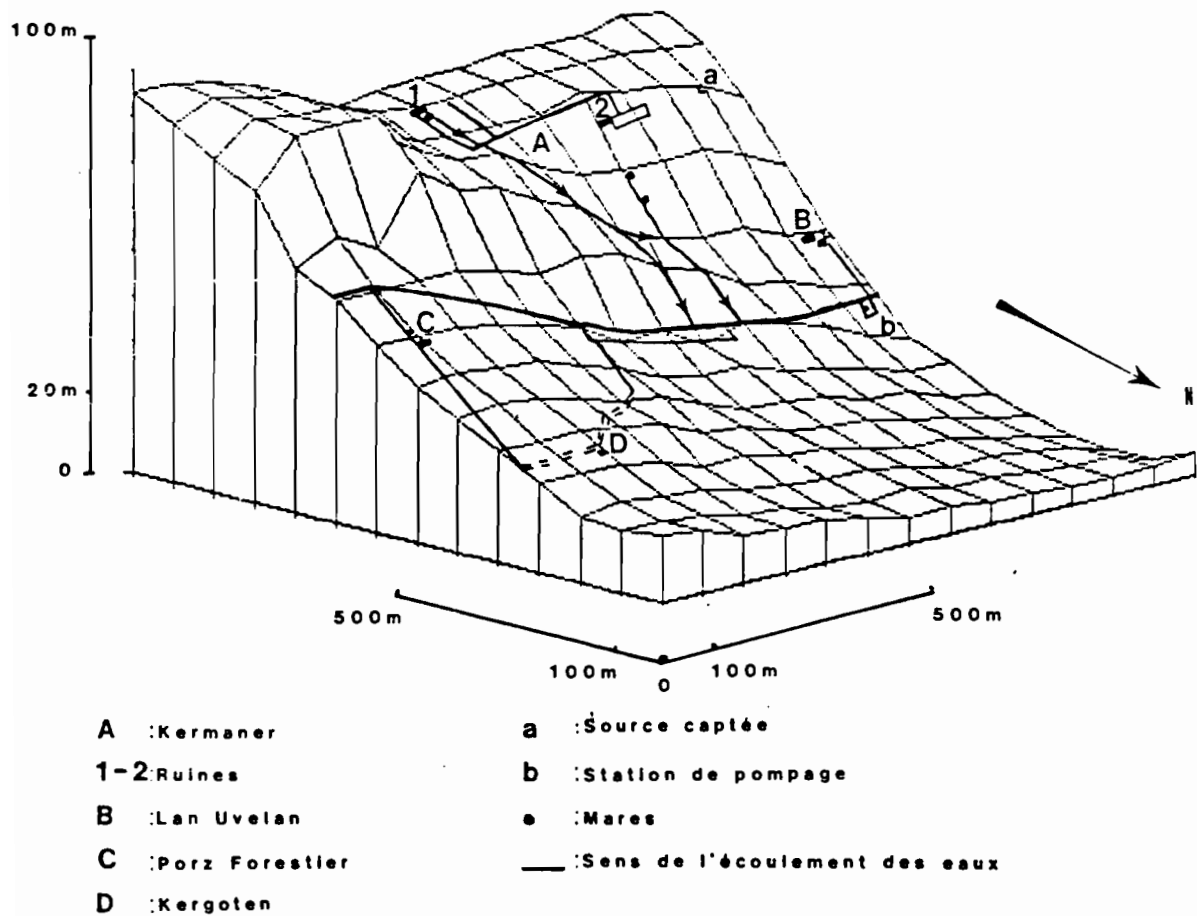


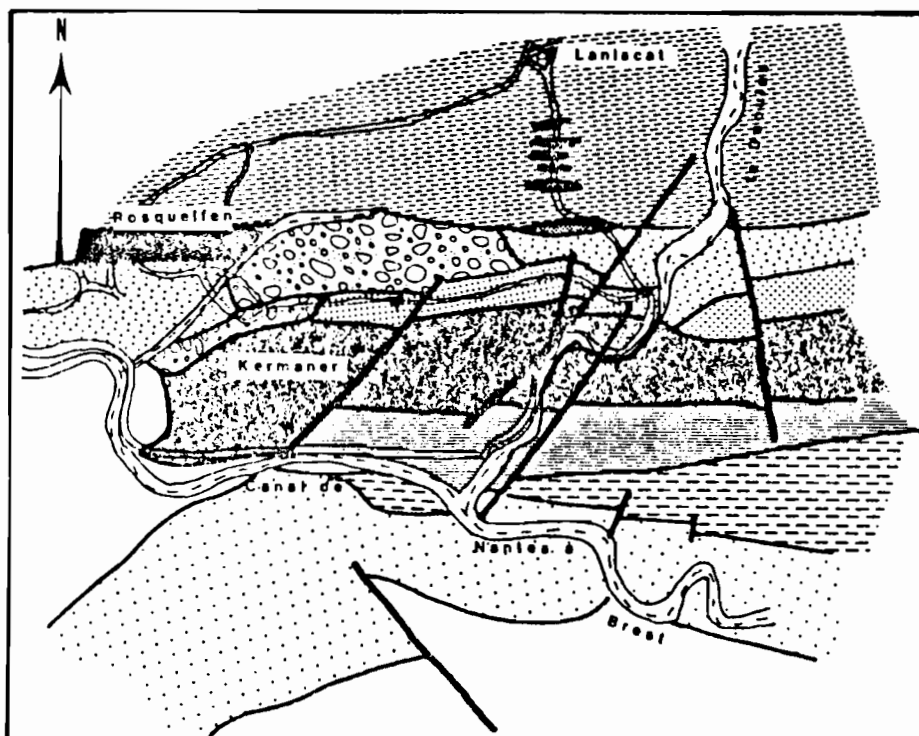
Figure 10 : Bloc diagramme du secteur d'étude.

Géologie

Les données géologiques dont nous disposons sont extraites de la carte géologique au 1/50 000 de Pontivy (J.P. SAGON, à paraître), de la thèse de J.P. SAGON (1976), ainsi que de communications personnelles de l'auteur.

Le secteur étudié comporte (figures 11 et 12):

- Des schistes du Gédinnien ($d1x^1$).
- Des quartzites et des grès ferrugineux appartenant au Siegénien inférieur ($d2ax$).
- Des éboulis (E).



0 500m 2 km 500

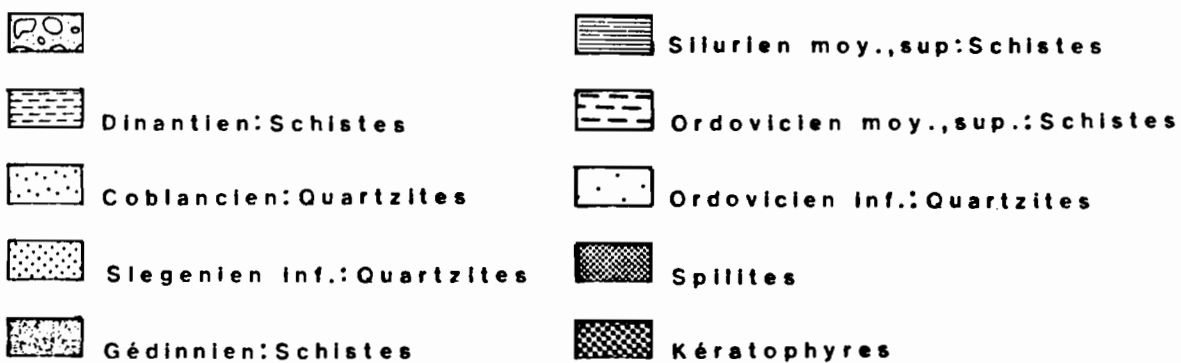


Figure 11 : Extrait de la carte géologique de Pontivy au 1/50 000, de J.P. SAGON

Le Gédinnien

Le Gédinnien est constitué de schistes et quartzites, très durs, formant des crêtes déchiquetées (Gorges du Daoulas).

Les schistes sont gris ou gris foncé, durs, grossiers, en dalles, et parfois pyriteux. Ils sont marqués par un métamorphisme de faciès "schistes verts", (de type Barrow), à paragenèse quartz, muscovite, chloritoïde, parfois chlorite.

Ces schistes Gédinnien sont constitués de fines paillettes de muscovite, néoformées, formant une trame (schistosité S1) dans laquelle sont dispersés des grains de quartz, allongés suivant la schistosité S1, et des paillettes de chloritoïde soit orientées selon S1, soit obliques sur cette schistosité.

Ces schistes contiennent 26 % d'alumine et 6.6 % de fer, en poids d'oxydes.

Les quartzites : A la fin de la série du Gédinnien, les schistes et les quartzites occupent sensiblement le même volume.

Les bancs de quartzites sont en général peu épais, gris, beige ou verdâtre, pyriteux, à grain fin ou très fin.

Les grains de quartz sont, soit jointifs à structure en mosaïque ou dentelée (cas le plus fréquent), soit séparés par des paillettes néoformées, de chlorite, de chloritoïde ou de muscovite.

Le Siegénien inférieur

Cet étage est concordant sur les schistes et quartzites du Gédinnien.

Il est constitué soit de quartzites et de grès ferrugineux, imprégnés par de l'hématite ou de la goethite, soit de grès très riches en minéraux phylliteux. Des "chapeaux de fer", correspondant à l'altération supergène de pyrite (PANIRIZADEH, SAGON, MISERY, 1982), ont été mis en évidence à Porz-Forestier au NE de Kermaner.

Les quartzites sont constitués de grains de quartz soit le plus souvent jointifs à structure dentelée, soit séparés par de rares paillettes de chlorite ou de muscovite néoformées, et parfois par des grains de goethite très peu abondants.

Ces quartzites se distinguent de ceux du Gédinnien par l'absence de chloritoïde et par un grain plus grossier.

Les grès :

Les grès ferrugineux dérivent des quartzites par augmentation du ciment ferrugineux (goethite et hématite). La muscovite y est également plus abondante.

Les grès chloriteux présentent des grains de quartz dispersés, réunis par une mésostase constituée essentiellement par de la chlorite et comportant en outre quelques paillettes néoformées de muscovite et des oxydes de fer.

Altération

En Bretagne, les phénomènes d'altération ont été étudiés, surtout du point de vue des argiles, des silicifications et des accumulations de fer, en particulier par J. ESTEOULE (1983).

Occupation du sol et végétation

Le secteur était occupé par une lande à ajonc. Celle-ci, défrichée un peu avant les années 1950, puis abandonnée quelques années plus tard, retourne aujourd'hui à la lande envahie par la fougère.

Le parcellaire du secteur étudié est reproduit sur la carte suivante (figure 12), qui est un extrait du cadastre, et qui nous servira par la suite de fond de carte. On y a ajouté quelques données topographiques, hydrologiques, et géologiques, ainsi que certaines observations de surface indiquées en légende.

En conclusion, dans la région qui a été choisie, le sud du massif granitique de Quintin, la zone du synclinorium médian Dinantien, et les anticlinaux Dévonien, le secteur de Kermaner se situe dans cette dernière formation géologique (schistes et quartzites du Gedinnien, quartzites et grès du Siegennien inférieur). Il est en outre caractérisé par sa morphologie de versant nord à piémont marécageux et par sa végétation de lande secondaire.

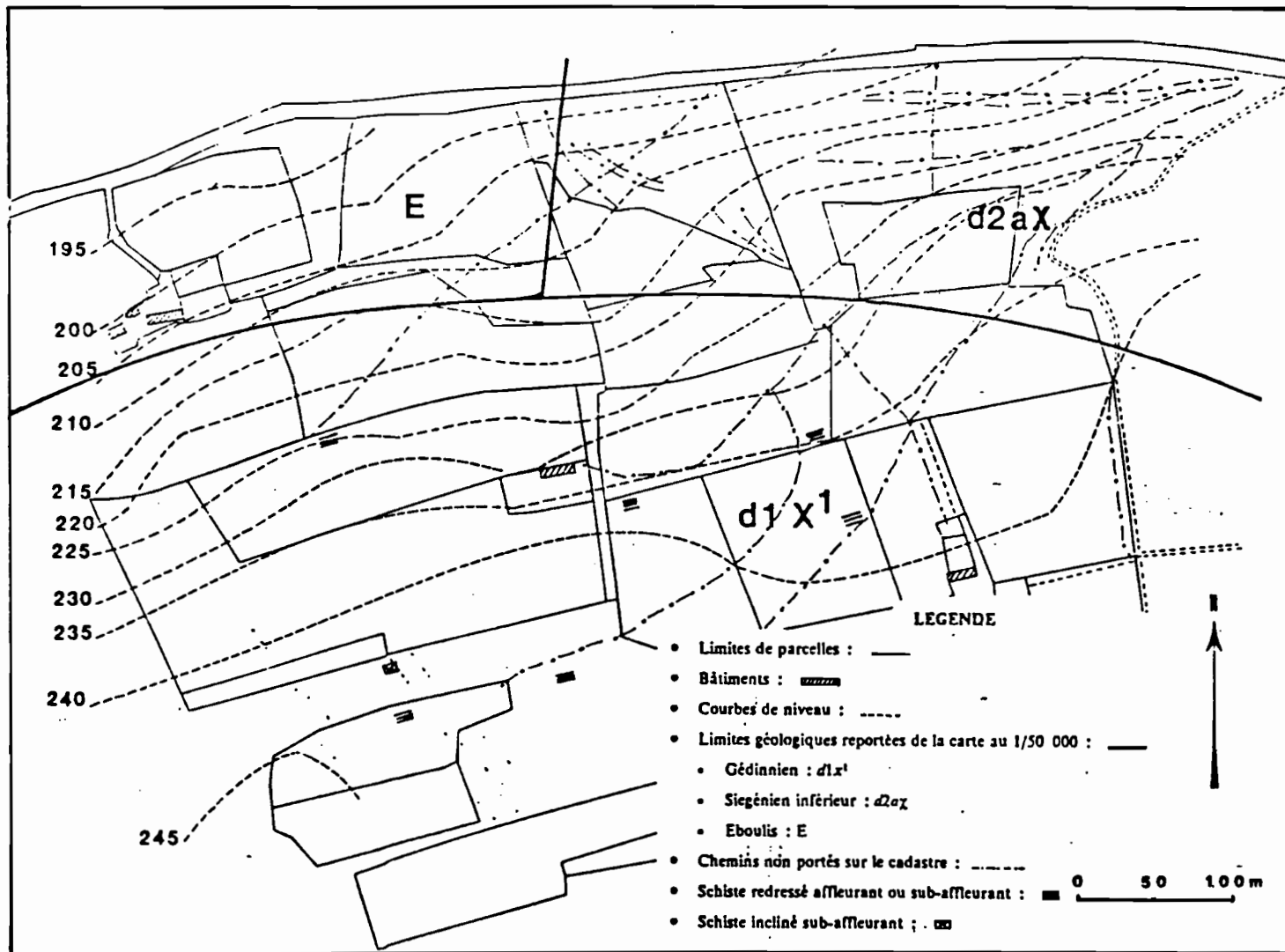


Figure 12 : Limites géologiques reportées sur le cadastre
(Feuille de Laniscat au 1/2 500)

3.0 ANALYSE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES

3.1 Introduction : Les différentes unités d'organisation

Cette introduction se propose de présenter l'ensemble des unités d'organisation reconnues, afin de fournir les éléments nécessaires à la compréhension du plan synthétique adopté, ce plan visant à exposer les données suivant un ordre cohérent plutôt que systématique.

Nous avons réparti nos observations des formations superficielles sur profils et sur tranchées le long de 14 toposéquences (figure 13).

Les unités d'organisation reconnues grâce à ces observations peuvent être replacées sur une toposéquence synthétique (figure 14), où sont distingués deux principaux ensembles superposés:

- Un ensemble altéritique, profond.
- Un ensemble pédologique, superficiel.

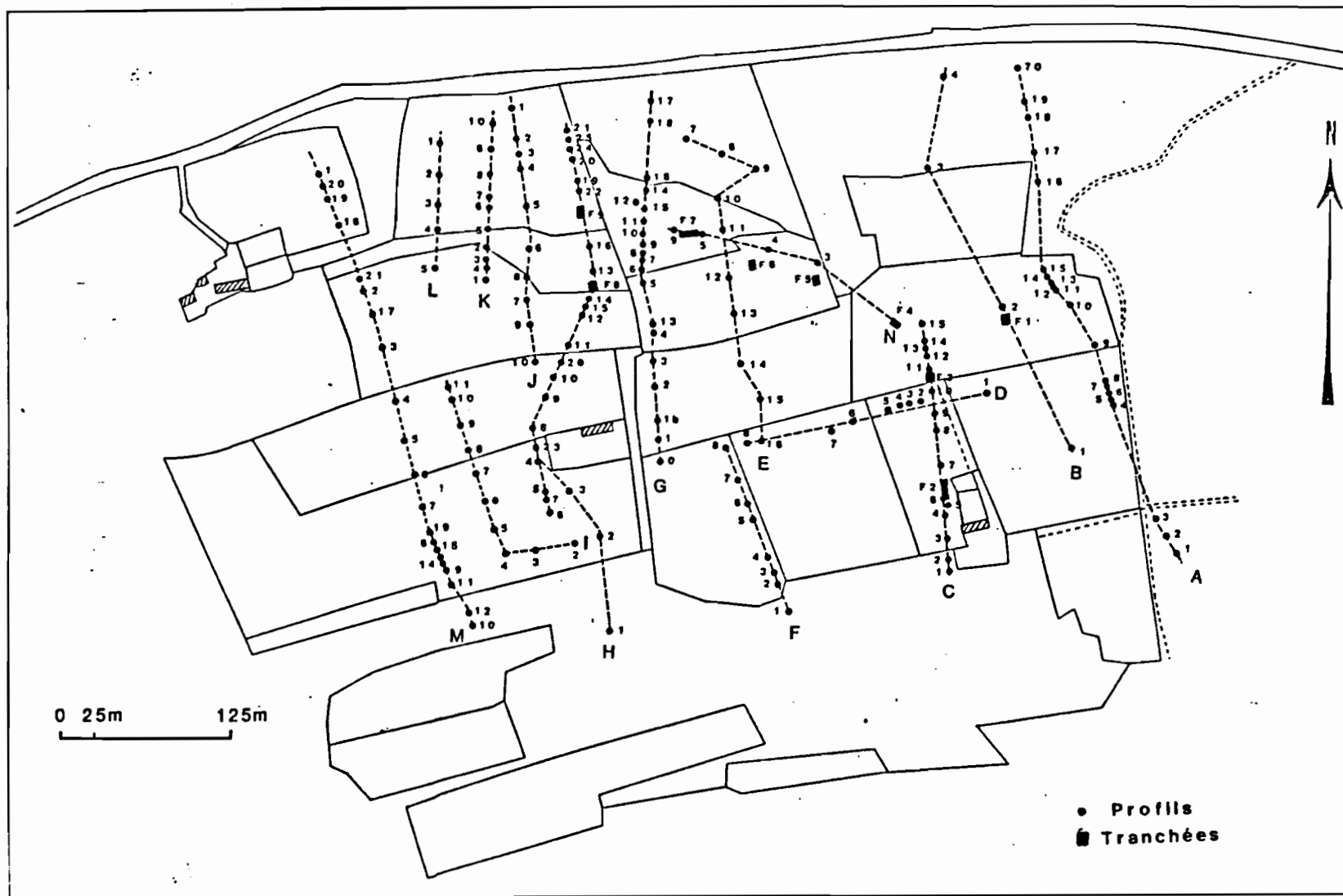


Figure 13 : Carte de situation des profils et tranchées

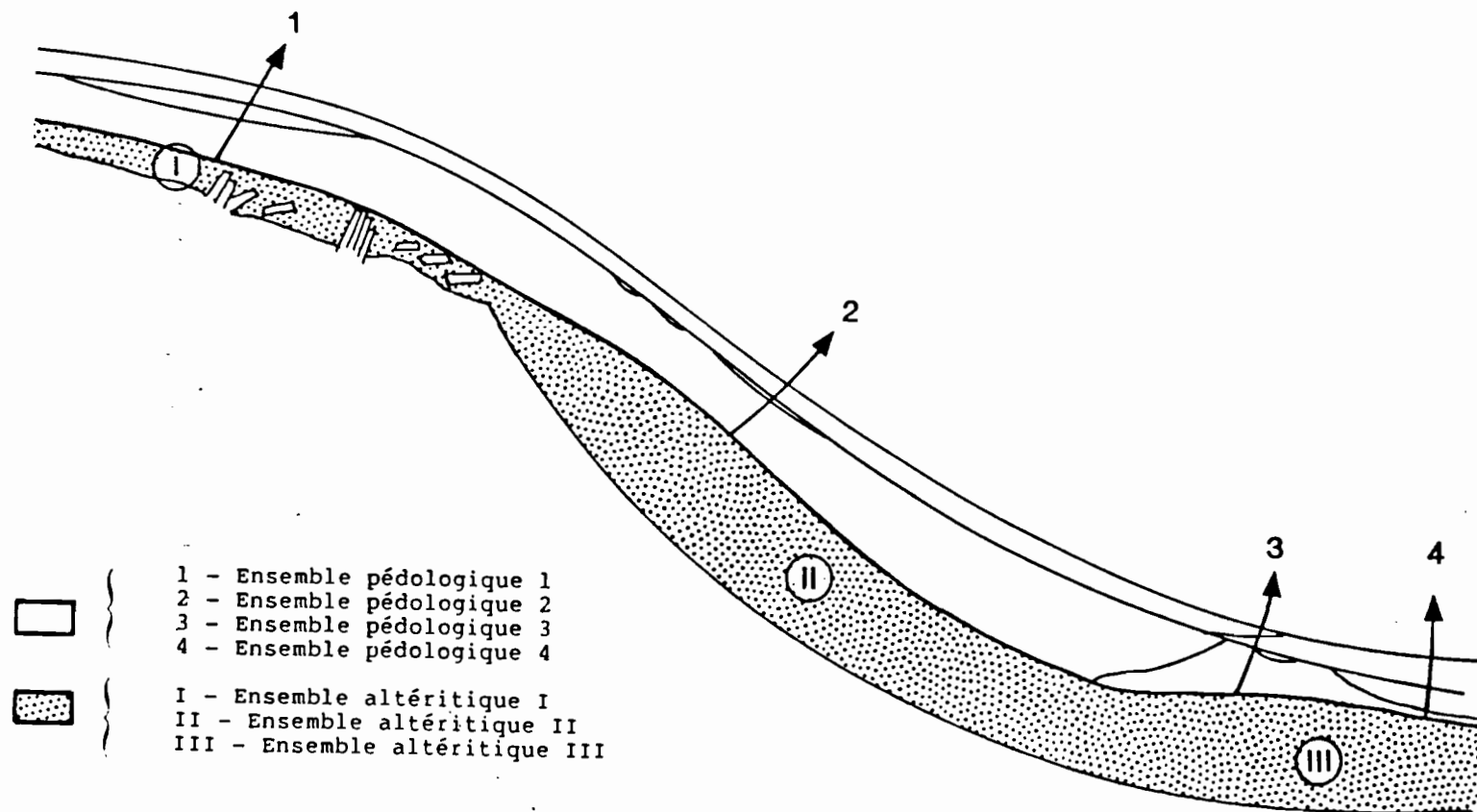


Figure 14 : Toposéquence synthétique : Les différentes unités d'organisation reconnues.

Notre exposé se fera en trois grandes parties,

- Ensembles altéritiques I et II,
- Ensembles pédologiques 1 et 2,
- Domaine altéritique III et pédologique 3 et 4.

Nos données seront donc présentées suivant l'ordre suivant (figure 15):

- De la roche au sol,
- De l'amont vers l'aval,
- Suivant une complexité croissante.

En effet, nous commencerons l'exposé de nos données par les altérites. Les différents domaines ont entre eux une relation de position le long d'une toposéquence théorique (figure 14) et nous commencerons par le domaine I situé à l'amont. Enfin, ces domaines ont entre eux des relations de complexité croissante du I au III, puisque le domaine I est caractérisé par une altérite peu développée, le domaine II par une altérite très développée, et le domaine III par des transformations affectant à la fois l'ensemble altéritique et l'ensemble pédologique.

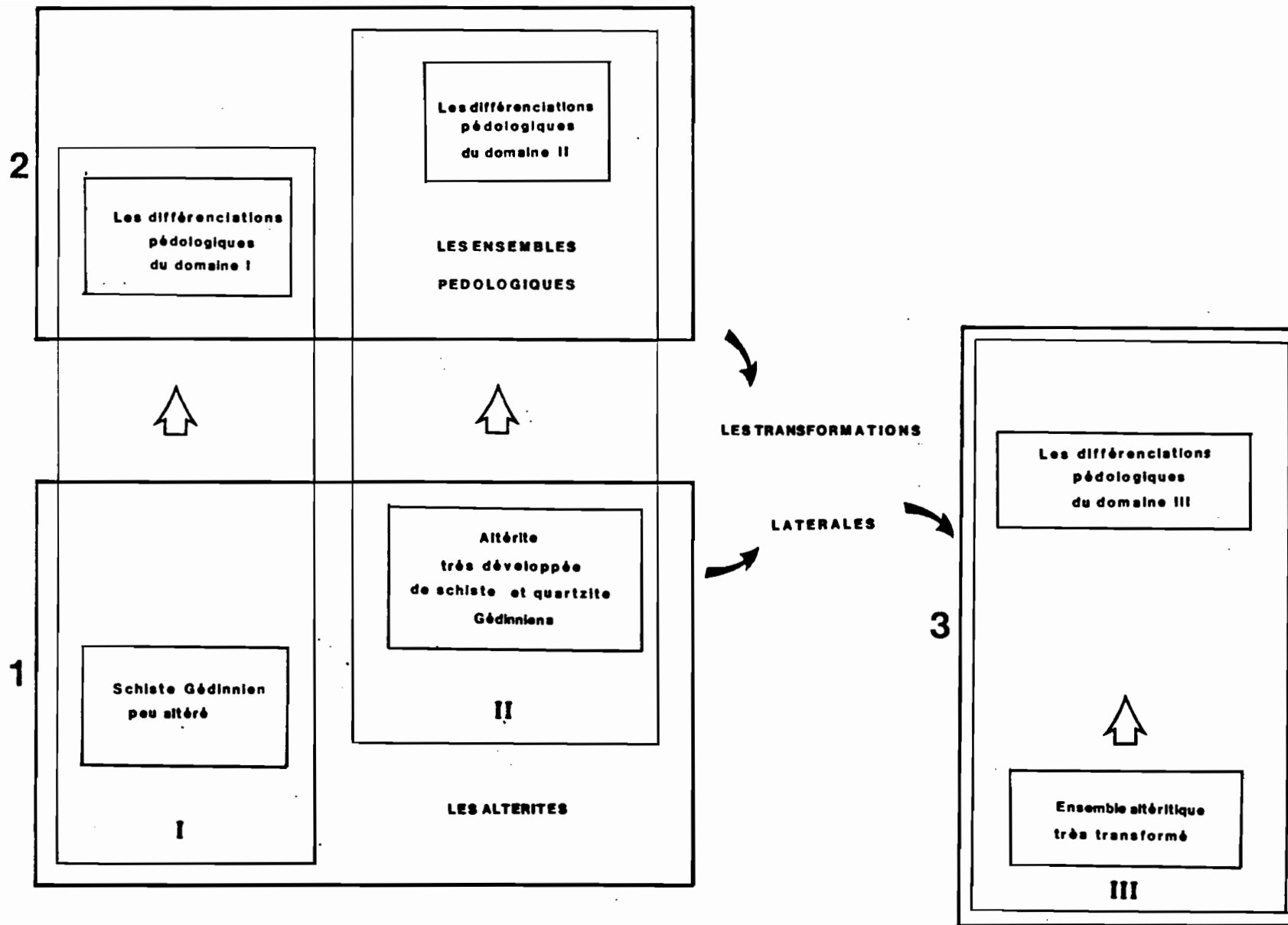


Figure 15 : Schématisation du plan suivi 1,2,3 pour l'exposé de l'analyse des formations superficielles, dans les domaines I,II,III.

Nous commencerons par la caractérisation des altérites de schistes et quartzites Gédinniens.

3.2 Les schistes et quartzites Gédinniens et leurs altérites

3.2.1 L'ensemble altéritique sur schiste Gédinnien

3.2.1.1 Le pendage et l'orientation des schistes le long du versant

Quand le creusement des profils ou tranchées a atteint le schiste en place, ou des blocs de schiste présentant une organisation particulière, le pendage et l'orientation de ces bancs ou de ces blocs ont été mesurés et reportés le long des séquences concernées.

La fig. 16, présente quelques unes de ces séquences positionnées les unes par rapport aux autres, de telle façon que les distances respectives des différents profils au plateau sommital soient respectées. On met ainsi en concordance les observations réalisées sur les schistes dans différentes séquences.

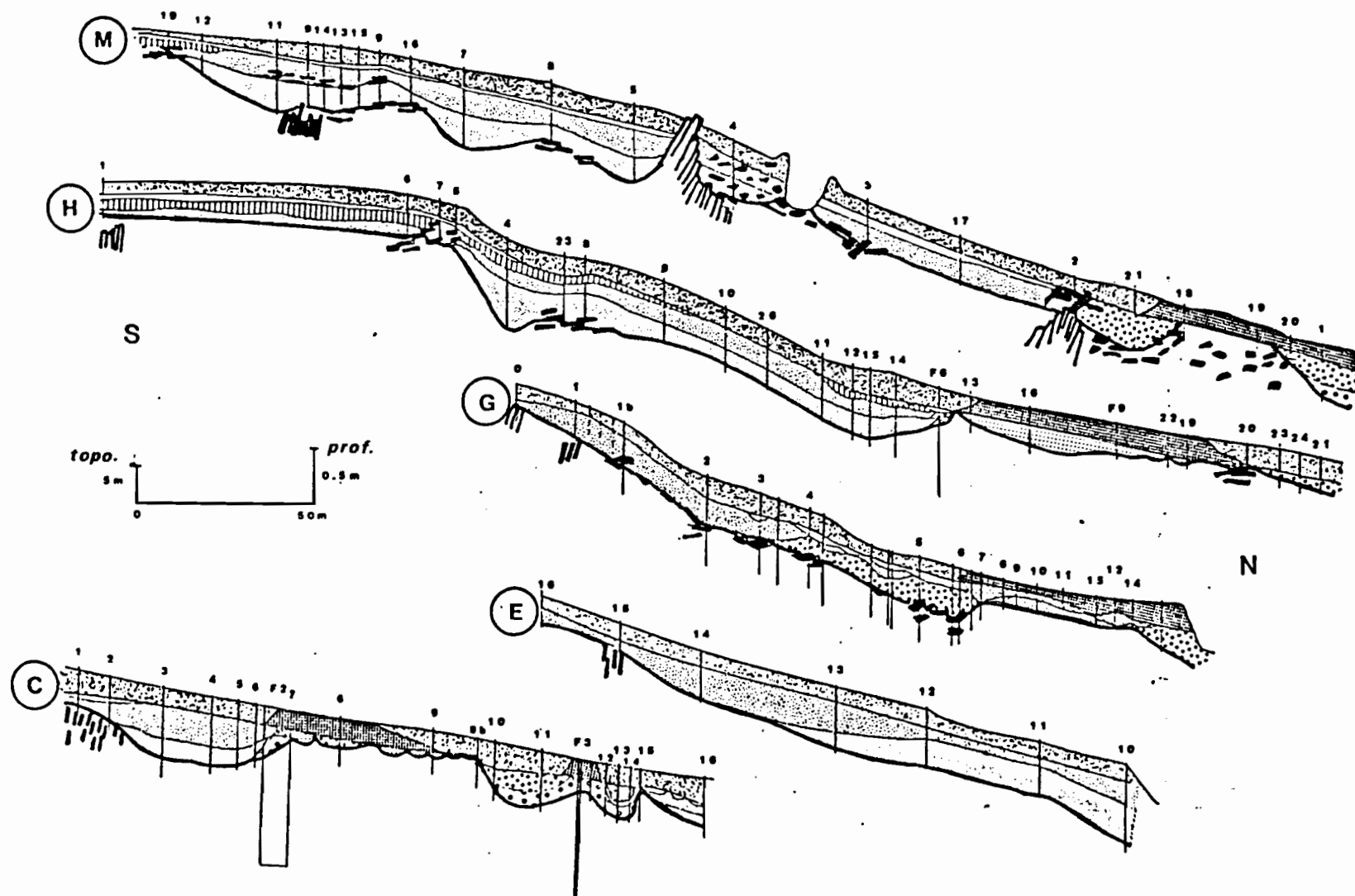


Figure 16 : Figuration des relevés de pendage sur les bancs de schiste en place ou sur les blocs de schiste, le long de cinq toposéquences.

Le long du versant les **bancs de schiste en place, redressés**, sont distribués en rides successives; Ces rides, constituées de bancs ou de blocs affleurants ou sub-affleurants présentent des pendages de 86° S. à 61° S. La carte géologique de Pontivy ne précise pas de mesure de pendage dans cette zone, mais les mesures concernant les schistes Gédinniens de la région sont comprises entre 80 et 60° S. Nos mesures sont donc compatibles avec celles portées sur la carte géologique.

Entre ces rides les blocs sont **couchés** : Les pendages sont alors de 44° S. jusqu'à une orientation subhorizontale et même parallèle à la pente.

P. CURMI (1979) a observé dans des arènes granitiques des phénomènes de **fauchage** sur versants. Ce fauchage concerne en particulier des filons quartzeux en place dans l'arène à structure conservée, ceux ci se couchant dans le sens de la pente au sommet de l'altérite. Ici, nous aurions plutôt un phénomène de fauchage des blocs le long de la pente, entre des bancs en place, plus cohérents, et non dissociés en blocs.

La profondeur maximale où ces blocs couchés de schiste ont été reconnus est de 80 cm.

Les principales mesures concernant ces deux modes de distribution des schistes Gédinniens sont regroupés dans la figure 17 :

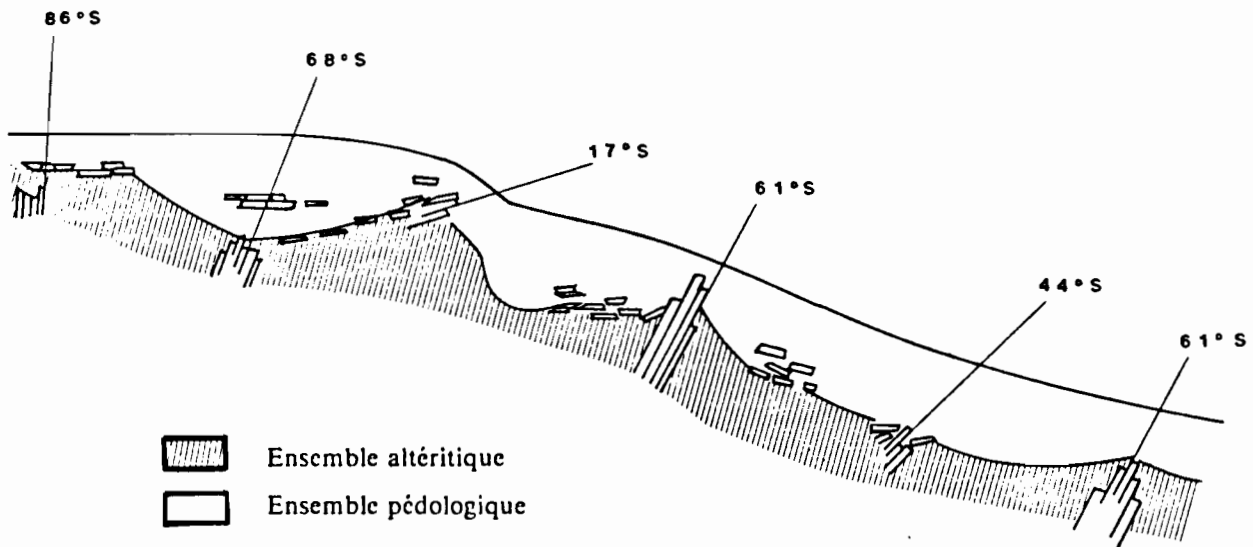


Figure 17 : Toposéquence synthétique présentant les différentes mesures de pendage et un schéma de l'organisation des schistes Gédinniens le long de la pente.

On peut noter une différence entre les séquences observées. En effet, on passe latéralement de la séquence M (figure 16) située le plus à l'ouest, où le schiste Gédinnien présente des bancs en place tout au long de la pente, aux séquences G, E et C où les rides de schistes en place ne s'observent qu'en haut de pente. La séquence H représente une disposition intermédiaire entre ces deux extrêmes, avec une morphologie générale de type convexe, comme la séquence G, mais pas de bancs en place observés très bas dans la pente.

3.2.1.2 Caractérisation de l'altérite de schiste Gédinnien

Dans les profils sur blocs de schiste en place ou couchés, les blocs sont emballés dans un matériau altéritique. Les profils G1 et H1, représentés schématiquement figure 18, montrent la répartition des blocs et de ce matériau altéritique qui se caractérise **macroscopiquement** de la manière suivante :

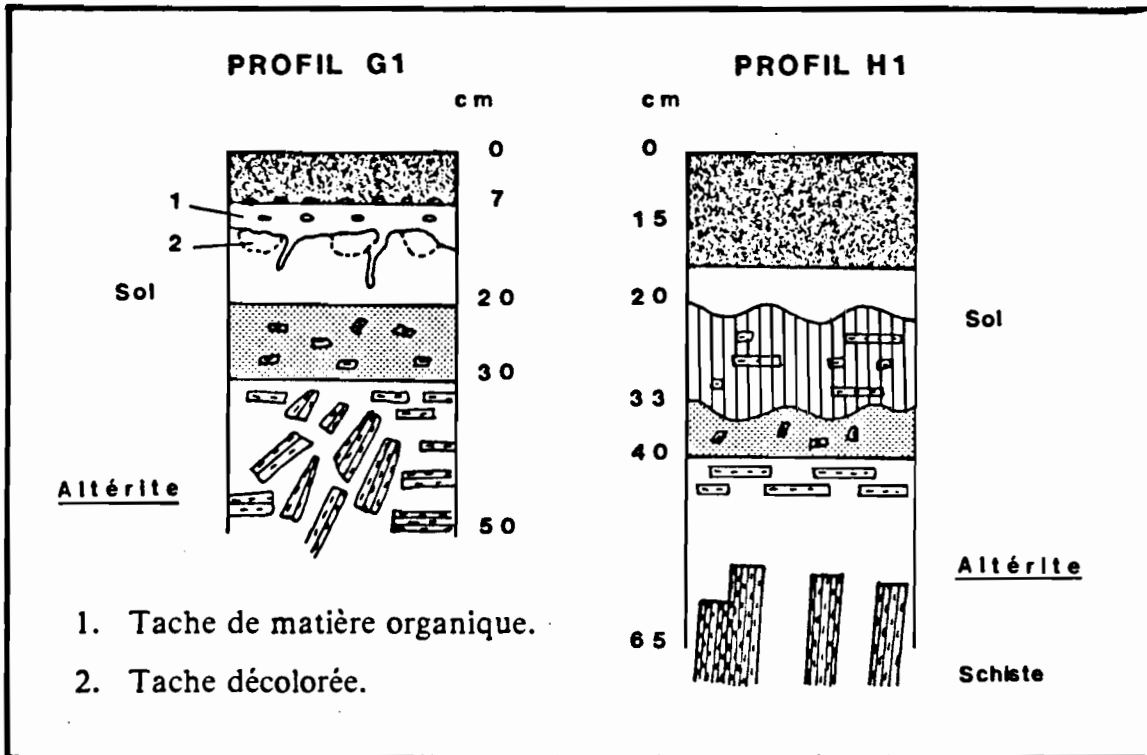


Figure 18 : Les altérites de schistes gédinniens dans les profils G1 et H1, (localisation de ces profils figure 13 et 16).

- Légèrement humide.
- Couleur brun jaune grisâtre 10 YR 5/2.
- 80 % de blocs non altérés. Grande majorité de blocs de schiste. Les blocs ou cailloux de quartzite sont rares.
- Granulométrie limono-sableuse.
- Structure polyédrique fine (agrégats de 1mm à 5mm de diamètre) à sous-structure microgrumeleuse le long des faces des agrégats.
- Porosité assez importante, très fine, pores de 1mm à inférieurs au mm.
- Très peu de racines.

En microscopie optique (figure 19), cette altérite de schiste est caractérisée par des lithoreliques de grande taille, à bords dentelés libérant de petits grains de quartz dans le plasma d'altération et montrant ainsi la progression centripète de l'altération de ces lithoreliques schisteuses. Ces lithoreliques sont caractéristiques des schistes Gédinniens par leurs fines paillettes de muscovite formant une trame dans laquelle sont dispersés des grains de quartz, et par leurs paillettes de

chloritoïde soit orientées dans la schistosité, soit obliques sur cette schistosité (voir chapitre 2).

La muscovite est soit non altérée, présentant ses teintes normales de biréfringence, soit altérée, présentant alors des teintes jaune à rouille en lumière polarisée. Les chloritoïdes, souvent non altérés, ont été plutôt observés dans les profils sur schistes proches de la surface. Quand les chloritoïdes s'altèrent, une ferruginisation se localise d'abord le long des clivages puis vient à masquer toute la surface du minéral. Dans toutes les lames provenant de ces profils sur schiste Gédinnien, le chloritoïde altéré entièrement ferruginisé conserve des bords nets et la forme originelle de ce minéral.

Le plasma d'altération, localisé entre ces reliques, présente une structure asépique à extinction tachetée, caractéristique d'un altéroplasma.

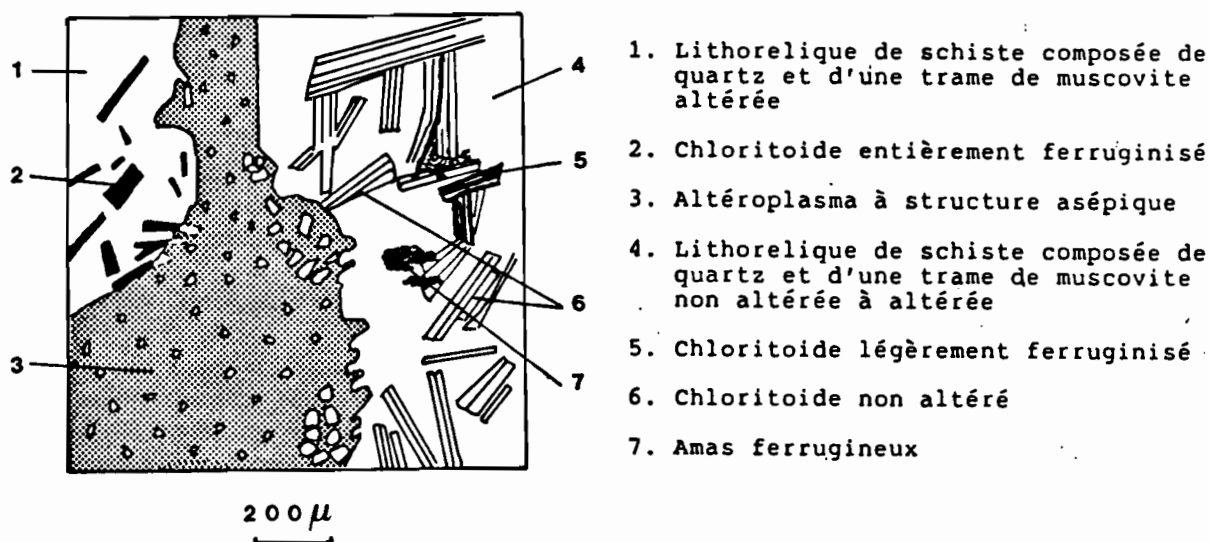


Figure 19 : Organisation microscopique de l'altérite de schiste du profil G1.

3.2.1.3 Conclusion : Reconnaissance et définition d'un ensemble d'altération des schistes Gédinniens.

- Ce premier ensemble altéritique se développe entre des blocs de schiste de grande taille, en place ou couchés, et ne présente pas plus de 20 à 30 cm d'épaisseur au dessus de ces blocs quasiment jointifs. Cette altérite est donc peu développée.
- Les lithoreliques qu'elle renferme présentent elles-même des caractères d'une altération faible à nulle.
- Cette altérite se développe essentiellement sur schiste Gédinnien : Les blocs de quartzite sont rares ou absents dans les profils. Les lithoreliques de quartzites dans les lames minces observées sont très rares.

Ce premier ensemble altéritique peut donc être défini comme celui d'une **altérite** peu développée sur schistes Gédinniens en place ou couchés, peu ou non altérés.

3.2.2 L'ensemble altéritique sur schistes et quartzites Gédinniens

L'ensemble altéritique sur schistes et quartzites Gédinniens a été observé grâce aux tranchées creusées à la pelleuse dans les situations repérées sur la figure 13. En effet la profondeur des profils est telle que le haut de cet ensemble est atteint, mais elle n'est généralement pas suffisante pour effectuer des observations satisfaisantes. Les tranchées elles-mêmes n'ont jamais pu être creusées jusqu'à la roche saine et en place. Les profondeurs atteintes dans les différentes tranchées sont les suivantes :

TRANCHEES	PROFONDEURS TOTALES
F1	2m20
F2	1m80
F3	1m50
F4	1m70
F5	1m50
F6	1m50
F7	2m75

Tableau n° 1

Ce grand ensemble altéritique peut donc être considéré comme généralement très épais.

L'analyse de ces sept tranchées conduit d'autre part à distinguer dans cet ensemble deux faciès d'altérite :

- Un faciès isaltéritique dans lequel le litage de la roche mère est conservé.
- Un faciès allotéritique dans lequel la structure de la roche n'est pas conservée.

3.2.2.1 Le faciès isaltéritique

L'analyse de quatre tranchées, F1, F2, F4 et F7, représentées figure 20 et 21, situées successivement le long du versant, dans les localisations indiquées en bas de la figure 20, nous a permis :

- D'étudier les variations du pendage des schistes et blocs de schiste et d'établir le fauchage des bancs rocheux et de l'isaltérite le long de la pente.
- De caractériser ce faciès altéritique.

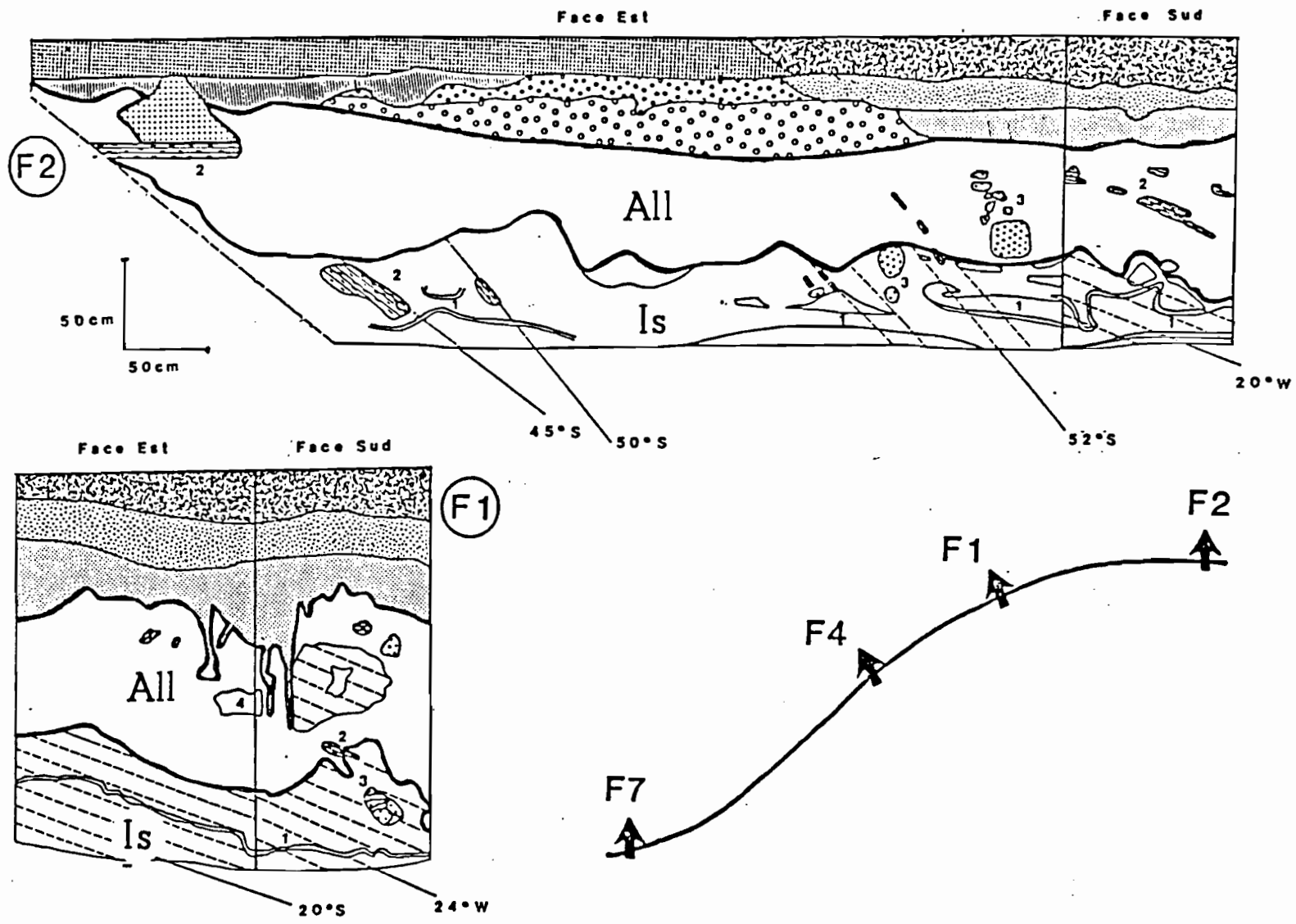


Figure 20 : Tranchées F2 (toposéquence C) et F1 (toposéquence B)

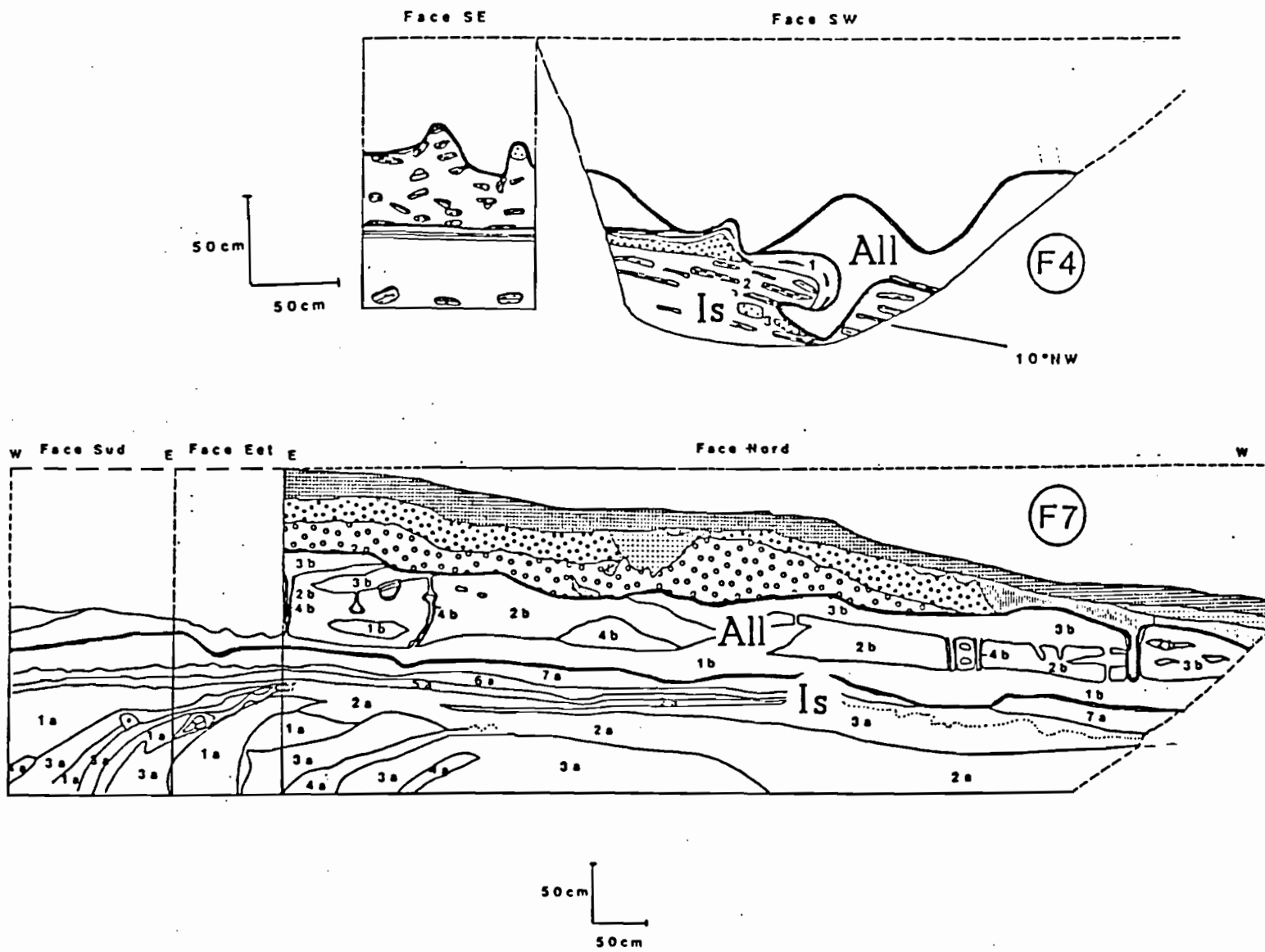


Figure 21 : Tranchées F4 et F7 (toposéquence N)

Le fauchage des bancs rocheux et de l'isaltérite le long de la pente

Le faciès isaltéritique est notée Is dans les quatre tranchées représentées figures 20 et 21; Sous chacun des schémas sont notées les mesures de pendage relevées le long des blocs non altérés ou suivant le litage de l'altérite à structure conservée. Dans la tranchée F2, située à l'amont sur le versant, le pendage varie de 52° S. à l'amont, à 45° S. à l'aval. Sur la face perpendiculaire (Est) le pendage est de 20° W. Le pendage ouest est normal par rapport à la disposition structurale du Gédinnien dans cette zone (J.P. SAGON, 1977). On constate donc que les bancs de schiste ont subi un léger fauchage par rapport aux pendages relevés sur les rides en place de l'ensemble I. Et ce fauchage s'accroît vers l'aval de la tranchée. Dans la tranchée F1, correspondant au rebord du versant le fauchage s'est encore accru, puisqu'il est de 20° S. Dans la tranchée F4, en milieu de versant, les blocs prennent alors une orientation subparallèle à la pente, (orientation nord). Cependant ce fauchage régulier qui semble s'accroître généralement le long de la pente, comme l'indiqueraient ces trois premières tranchées, est précisé par les relevés effectués dans la tranchée F7 où les figures de fauchage s'observent alors à l'échelle de la tranchée elle-même. Ainsi sur la face Est de la tranchée, le pendage est Sud à la base de la tranchée et l'on constate alors que des bancs d'orientation subverticale en profondeur s'infléchissent progressivement jusqu'à devenir subhorizontaux vers la partie supérieure de l'isaltérite.

Ces tranchées, ayant une profondeur maximum de 2.75 m, n'ont jamais atteint la roche mère. Les relevés de pendage qui ont été effectués se situent donc toujours au sommet de l'isaltérite, et indiquent les valeurs extrêmes du fauchage atteintes en chaque lieu. Ces valeurs extrêmes augmentent avec la pente, mais l'exemple de la tranchée F7, un peu plus profonde que les autres, montre que chaque banc peut avoir sa racine en place en profondeur. Ainsi, ces relevés qui ne permettent pas de juger du pendage du schiste sain, montrent qu'il existe un phénomène de fauchage général le long du versant, et indiquent quelles dispositions et orientations extrêmes il peut prendre.

Caractérisation de l'isaltérite

Cette isaltérite présente les caractères **macroscopiques** suivants :

- Moyennement humide.
- Organisée en noyaux durs conservant la schistosité de la roche, de la couleur du schiste, se délitant au couteau. Ces noyaux peu altérés forment des bancs discontinus, dont on peut relever le pendage. Ces noyaux lithorelictuels sont emballés dans un matériau plus altéré, qui n'a plus la couleur du schiste mais prend des teintes pastel, jaune, rose, gris bleuté. Ce matériau d'altération est très doux au toucher.
- On peut suivre des passées quartzitiques pulvérulentes, (sable très fin).

Analyses totales

Dans le tableau ci-dessous, les pourcentages en sept éléments principaux (calcium, magnésium, potassium, sodium, fer, aluminium et silice) sont comparés pour l'isaltérite de schiste par rapport au schiste Gédinnien. Les analyses pour le schiste Gédinnien sont données par J.P. SAGON (1976) et concernent quatre échantillons de schiste prélevés dans les gorges du Daoulas. La comparaison porte d'une part sur la moyenne des quatre analyses de schiste, et d'autre part, sur les résultats de l'analyse de schiste donnés en poids d'oxyde transformés en poids de l'élément.

Dans une deuxième ou troisième colonne, les résultats obtenus ont été ramenés à 100 %.

	SCHISTE GEDINNIEN			ISALTERITE DE SCHISTE	
	Poids d'oxyde	Poids de l'élément.	P. 100%	%	P. 100%
CALCIUM	0.51	0.36	0.90	0.19	0.40
MAGNESIUM	1.32	0.79	1.98	0.05	0.10
POTASSIUM	3.46	1.43	3.59	2.52	5.32
SODIUM	0.55	0.20	0.50	0.24	0.50
FER	6.66	5.02	12.61	5.34	11.28
ALUMINIUM	25.98	6.97	17.26	15.58	32.92
SILICIUM	55.06	25.72	64.63	23.40	49.45
TOTAL	99.00	39.79	101.47	47.32	99.97

Tableau n° 2 : Analyses totales comparées du schiste Gédinnien et de l'isaltérite de schiste

Bien que ces résultats exprimés en poids ne permettent pas une comparaison à volume constant, ils indiquent néanmoins, du schiste à l'altérite, un déficit relatif en tous les éléments sauf en aluminium et potassium.

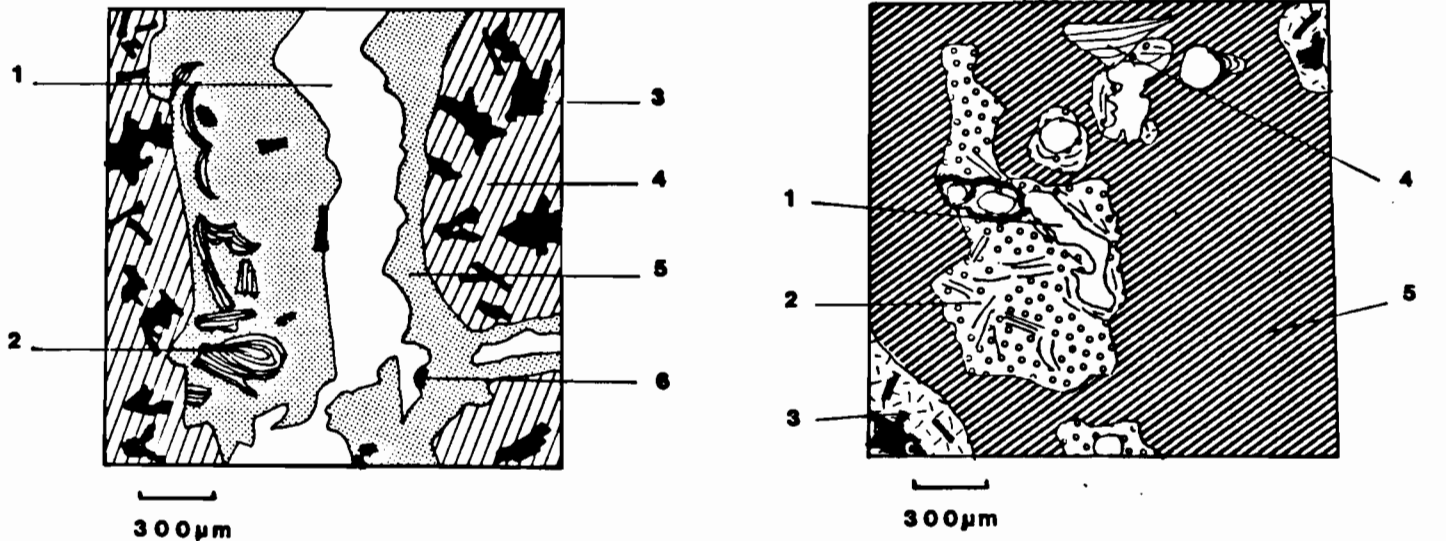
Toutefois, ces analyses doivent être discutées en tenant compte du fait que les échantillons ont été obtenus dans des sites différents. Le schiste Gédinnien est de faciès identique entre les Gorges du Daoulas (où ont été prélevés par J.P. SAGON les échantillons de schiste sain) et le sommet du plateau où ont été prélevées les altérites, mais il est néanmoins hétérogène, et les interprétations doivent en tenir compte.

Caractérisation microscopique

Les échantillons destinés à la préparation des lames minces ont été prélevés dans les passées schisteuses, à la fois dans les parties peu altérées (noyaux quasi-jointifs) et dans les parties plus altérées. L'analyse de ces lames minces permet de mettre en évidence les caractères suivants concernant :

- L'altération des reliques de schiste.
Dans les reliques de schiste (figure 22), les muscovites ont pour une partie d'entre elles perdu leur teinte de polarisation et présentent une teinte de biréfringence faible (gris du premier ordre). Les chloritoïdes sont entièrement remplacés par des amas opaques d'hydroxydes de fer, dont certains ne conservent plus la forme du minéral.
- Des accumulations non actuelles
Les vides ultimes, actuels, ne sont pas occupés par des dépôts, alors que dans le fond matriciel, des papules argilo-ferrugineux témoignent d'anciennes accumulations.
- La déferruginisation et la réorganisation du plasma autour des vides.
Des plages de plasma jaune clair, déferruginisé, se localisent autour des vides, (figure 22-b), et dans ce plasma les paillettes de muscovite se réorganisent en s'orientant autour de ces vides. Ainsi se différencie localement dans cette

altérite, par déferruginisation puis pédoturbation, un pédoplasma à partir d'un plasma micacé (figure 22).



1. Vide
2. Papules argilo-ferrugineuses, au sein du fond matriciel, correspondant à une accumulation antérieure.
3. Chloritoïde entièrement remplacé par un amas d'hydroxydes de fer noirs.
4. Lithorelique de schiste composée de quartz et d'une tiane de muscovite altérée.
5. Pédoplasma.
6. Fragment de chloritoïde.

1. Vide.
2. Pédoplasma jaune clair, lié aux vides, avec des grains de quartz et des paillettes de muscovite réorientées parallèlement aux vides.
3. Reliques de schiste.
4. Papules.
5. Pédoplasma micacé brun rouge à squelette quartzeux.

Figure 22 : Organisation microscopique de l'isaltérite de schiste.

22-a: L'altération des lithoreliques, les papules d'accumulation argilo-ferrugineuse.

22-b: Déferruginisation et réorganisation du plasma autour des vides.

Conclusion : Reconnaissance et définition du faciès isaltéritique

Cette altérite de schiste se caractérise donc par:

- La conservation partielle de la structure de la roche : Alignements de noyaux peu altérés à partir desquels on peut reconstituer les bancs de schiste, leur pendage, les alternances schiste, quartzite. Mais la disposition de cette isaltérite est modifiée progressivement le long de la pente par le phénomène du fauchage.
- Des phases d'accumulation d'argile, de déferruginisation et de réorganisation du plasma d'altération.

Il s'agit donc d'une isaltérite à accumulation ancienne d'argile, en voie de déferruginisation et de pédoturbation.

3.2.2.2 Le faciès allotéritique

L'ensemble altéritique de schiste et quartzite est constitué de deux faciès différents. Au dessus du niveau à faciès isaltéritique, un niveau dans lequel la structure de la roche n'est plus conservée est défini (noté All dans les figures 20 et 21); il s'agit du faciès allotéritique qui est caractérisé de la façon suivante :

Caractérisation macroscopique

- Limite inférieure irrégulière, et présence de noyaux résiduels d'isaltérite.
 - Assez humide
 - Couleur brun rouge (5 YR 4/6)
 - 50 % d'éléments grossiers : Blocs, cailloux, graviers de schiste et quartzite mélangés, généralement sans orientation.
 - Granulométrie sablo-limoneuse.
 - Structure lamellaire épaisse (1 à 2 cm).
 - Porosité tubulaire à cavitaire; matériau très poreux. Des cavités de 1 à 2 mm donnent un aspect alvéolé à la surface des lamelles .
 - Traits pédologiques :
 - Revêtements épais limono-argileux rouges, (5 YR 5/8), localisés sur les faces de certaines lamelles.
 - Dépôts limoneux très clairs, blanc grisâtre, (5 YR 7/1), sur les faces des lamelles.
 - Cette alternance de dépôts colorés donne un aspect zoné lamellaire. Le débit des lamelles se fait le plus souvent dans les zones à accumulation de limon clair. Il y a des passées plus compactes, plus schisteuses, sans accumulation de limon mais avec des revêtements rouges.
- Les traits pédologiques représentent environ 20 % de ce matériau altéritique.

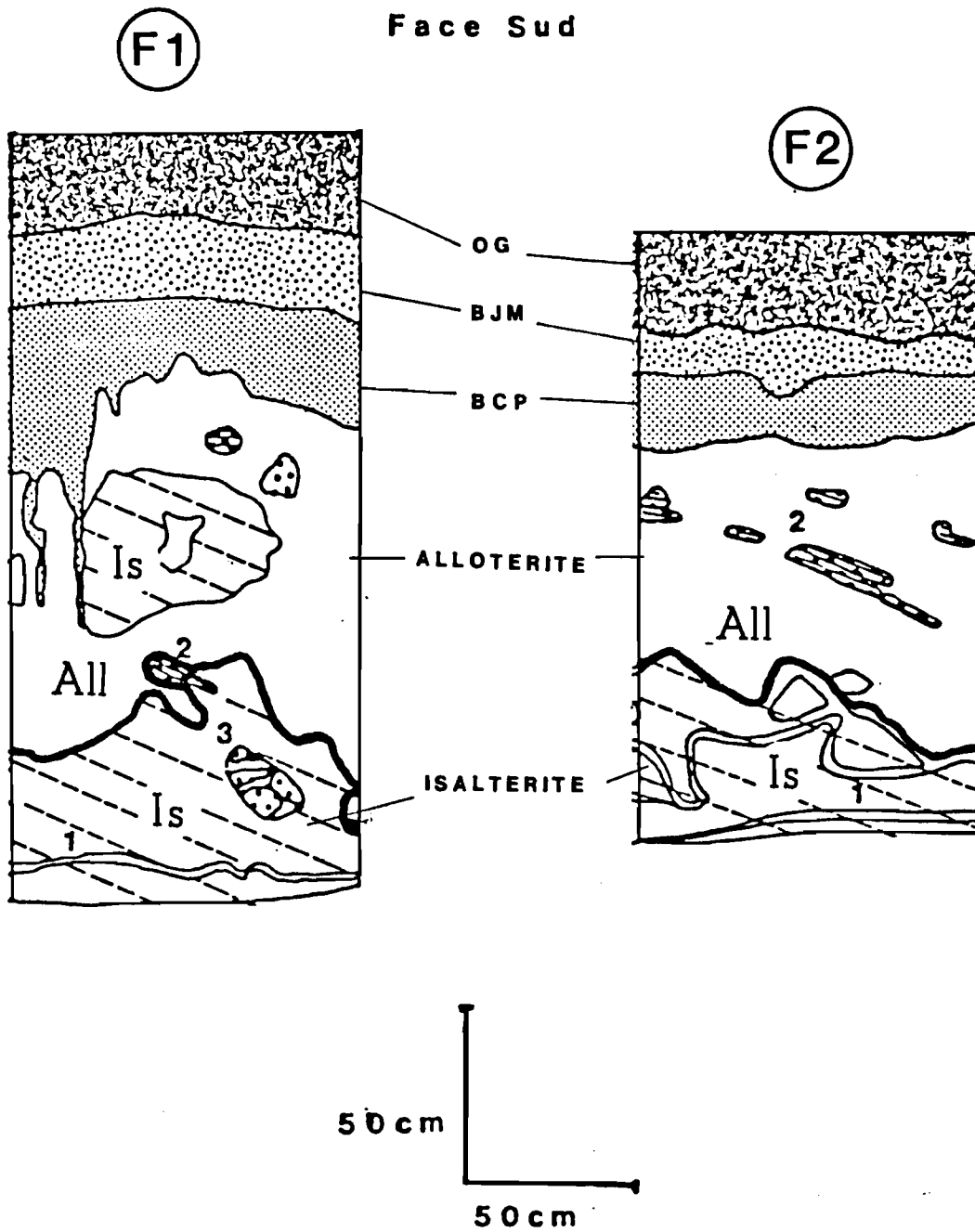


Figure 23 : Irrégularité de la limite entre les faciès isaltéritique et allotéritique dans les tranchées F1 et F2.

Caractérisation microscopique

L'observation des lames minces de l'allotérite dans la fosse F1 permet de dégager les caractères suivants :

- Un squelette quartzeux très abondant, un mélange de reliques de petite taille de schiste et de quartzite (figure 24-a).
- Des témoins d'une accumulation de fer et d'argile ancienne et actuelle, sous la forme de papules et de cutanes argilo-ferrugineux, (figure 24-b).
- Deux phases successives d'accumulation : argileuse, puis limoneuse, dans certains vides, (figure 24-b).
- Une ségrégation du fer dans le plasma, sous la forme de halos glébulaires (fig. 24-b).

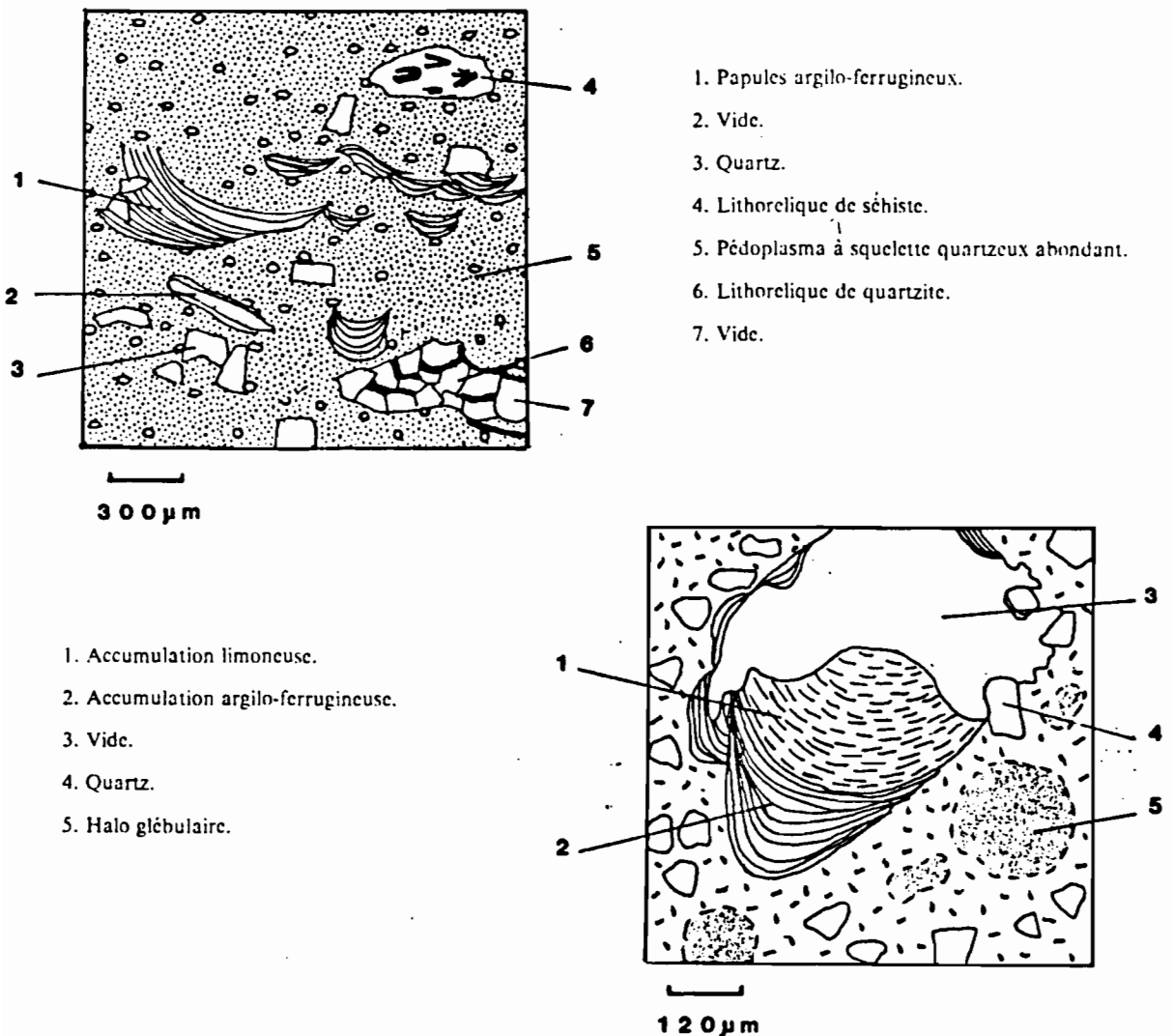


Figure 24 : Organisation microscopique de l'allotérite de schiste et quartzite Gédinniens, fosse F1.

24-a: Abondance du squelette quartzeux et figures d'accumulations ancienne et actuelle.

24-b: Phases successives d'accumulation argileuse puis limoneuse, et halos glébulaires.

Analyses totales

Les résultats des analyses totales de l'allotérite peuvent être comparés avec ceux du faciès isaltéritique :

	ISALTERITE		ALLOTERITE	
	%	P. 100%	%	P. 100%
CALCIUM	0.19	0.40	0.22	0.46
MAGNESIUM	0.05	0.10	0.10	0.21
POTASSIUM	2.52	5.32	1.25	2.65
SODIUM	0.24	0.50	0.22	0.46
FER	5.34	11.28	2.79	5.91
ALUMINIUM	15.58	32.92	7.36	15.61
SILICIUM	23.40	49.45	35.20	74.67
TOTAL	47.32	99.97	47.14	99.97

Tableau n° 3 : Comparaison des résultats d'analyses totales dans l'isaltérite de schiste et dans l'allotérite.

Exprimés en poids, ces résultats indiqueraient entre l'isaltérite et l'allotérite, un déficit relatif en potassium, fer et aluminium.

Si l'on reporte les résultats obtenus pour l'analyse du schiste Gédinnien, de l'isaltérite schisteuse et de l'allotérite, dans un diagramme : Silice, aluminium, fer, on constate que la composition moyenne de cette isaltérite par rapport au schiste se rapprocherait sensiblement du pôle kaolinite. Par contre, le trajet suivi pour passer de l'isaltérite à l'allotérite pourrait signifier soit une transformation des argiles, soit plutôt un enrichissement relatif en silice.

Bien que ces échantillons proviennent de la même tranchée, les résultats de ces analyses très ponctuelles, doivent être discutés avec prudence, vu l'hétérogénéité du schiste.

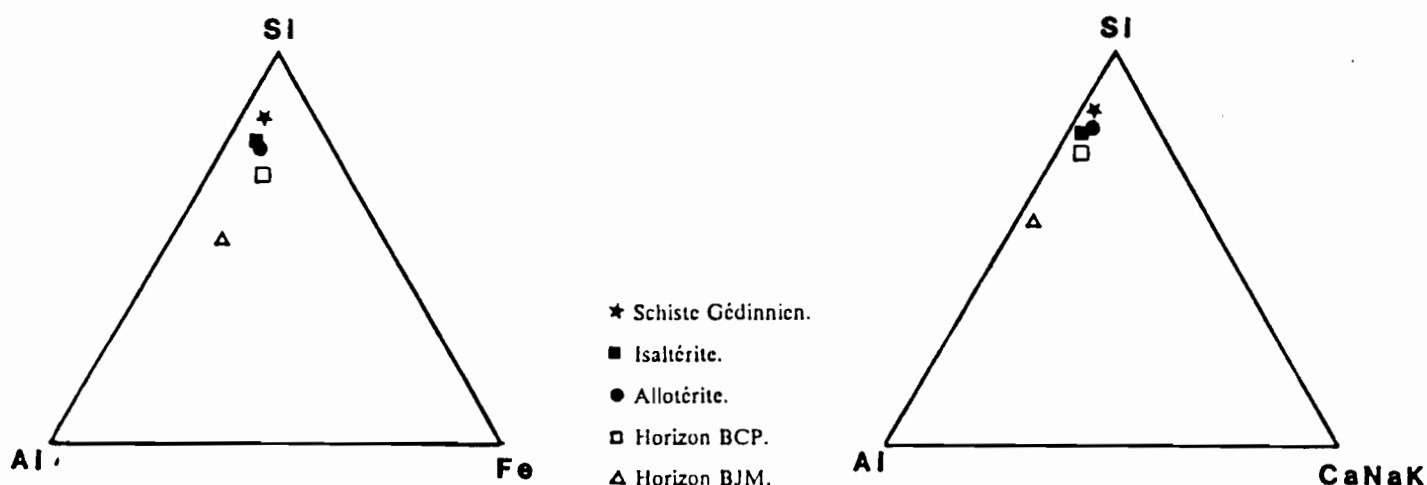


Figure 25 : Localisation dans des diagrammes : Silice, aluminium, fer ou Ca Na K, du schiste Gédinnien, des altérites et horizons pédologiques. de schiste et quartzite.

Ces interprétations peuvent être discutées à l'aide des données macroscopiques et microscopiques suivantes:

- L'isaltérite de schiste est constituée de bancs à structure relictuelle de schiste et de quelques passées quartzitiques. Les lames minces d'isaltérite ont été réalisées dans des échantillons prélevés dans des bancs à structure schisteuse. Il en est de même pour les échantillons prélevés en vue d'analyses. Dans l'allotérite, au niveau macroscopique les éléments grossiers sont constitués d'un mélange de schiste et quartzite. Au niveau du profil, on ne reconnaît plus ni structure schisteuse, ni structure quartzitique. En microscopie optique on trouve également un mélange des lithoreliques de schiste et de quartzite à l'échelle de la lame mince. Les échantillons prélevés dans l'allotérite l'ont donc été dans un mélange de schistes et de quartzites.
- Dans le profil F1, au niveau macroscopique, les éléments grossiers de nature quartzitique sont estimés former la moitié au moins de la totalité des éléments grossiers dans l'allotérite. Dans le faciès isaltéritique du même profil les bancs schisteux occupent la plus grande part des parois du profil, alors que la structure quartzitique est limitée à quelques passées de sable fin.
- D'autre part, l'observation des lames minces du faciès allotéritique a montré la présence d'un squelette quartzeux abondant et d'un plasma beaucoup moins micacé que celui de l'isaltérite.

Il est ainsi probable que l'allotérite apparaisse enrichie en silice du fait du prélèvement même des échantillons, effectué dans un mélange schiste/quartzite au niveau du faciès allotéritique, et choisi dans une passée schisteuse au niveau du faciès isaltéritique.

Mais il apparaît également probable qu'il y ait un enrichissement relatif en silice de l'allotérite par rapport à l'isaltérite, du fait de l'altérabilité plus grande du schiste par rapport au quartzite, qui se traduit au niveau du profil, et qui correspondrait également à la dégradation du plasma micacé observé en lames minces (muscovite et produits d'altération).

Conclusion : Reconnaissance et définition du faciès allotéritique;

Ce faciès d'altérite est ainsi caractérisé par :

- Une perte des structures de la roche mère. Mais des reliques de schiste et de quartzite sont présentes, en proportions égales, au niveau des lames minces.
- Le déficit relatif en fer et en aluminium par rapport à l'isaltérite, ainsi que l'abondance du squelette quartzéux dégagé de la trame muscovitique correspondraient à une altération intense accompagnée de pertes de matière.
- L'existence de deux phases d'accumulation successives : l'une argileuse, parfois non liée aux vides actuels, recouverte par une autre accumulation plutôt limoneuse.

Ce second faciès d'altérite peut donc être défini comme une **allotérite issue d'une altération intense de schiste et quartzite, et à accumulations d'argile et de limon.**

3.2.2.3 Conclusion : Définition d'un deuxième ensemble altéritique

Par rapport à l'altérite peu développée sur schistes Gédinniens, ces deux faciès isaltéritique et allotéritique peuvent être regroupés en un second ensemble altéritique, du fait du développement et de l'intensité plus grande de leur altération. En effet, le faciès isaltéritique dont nous ne pouvons connaître l'épaisseur puisque nous n'avons jamais atteint le schiste en place à sa base, et le faciès allotéritique présentant des caractères d'altération intense et d'environ un mètre d'épaisseur font de ce deuxième ensemble altéritique **une altérite très développée de schistes et quartzites Gédinniens.**

3.2.3 Répartition spatiale et relations entre ces deux ensembles altéritiques

La répartition spatiale de ces deux ensembles altéritiques est précisée figure 26.

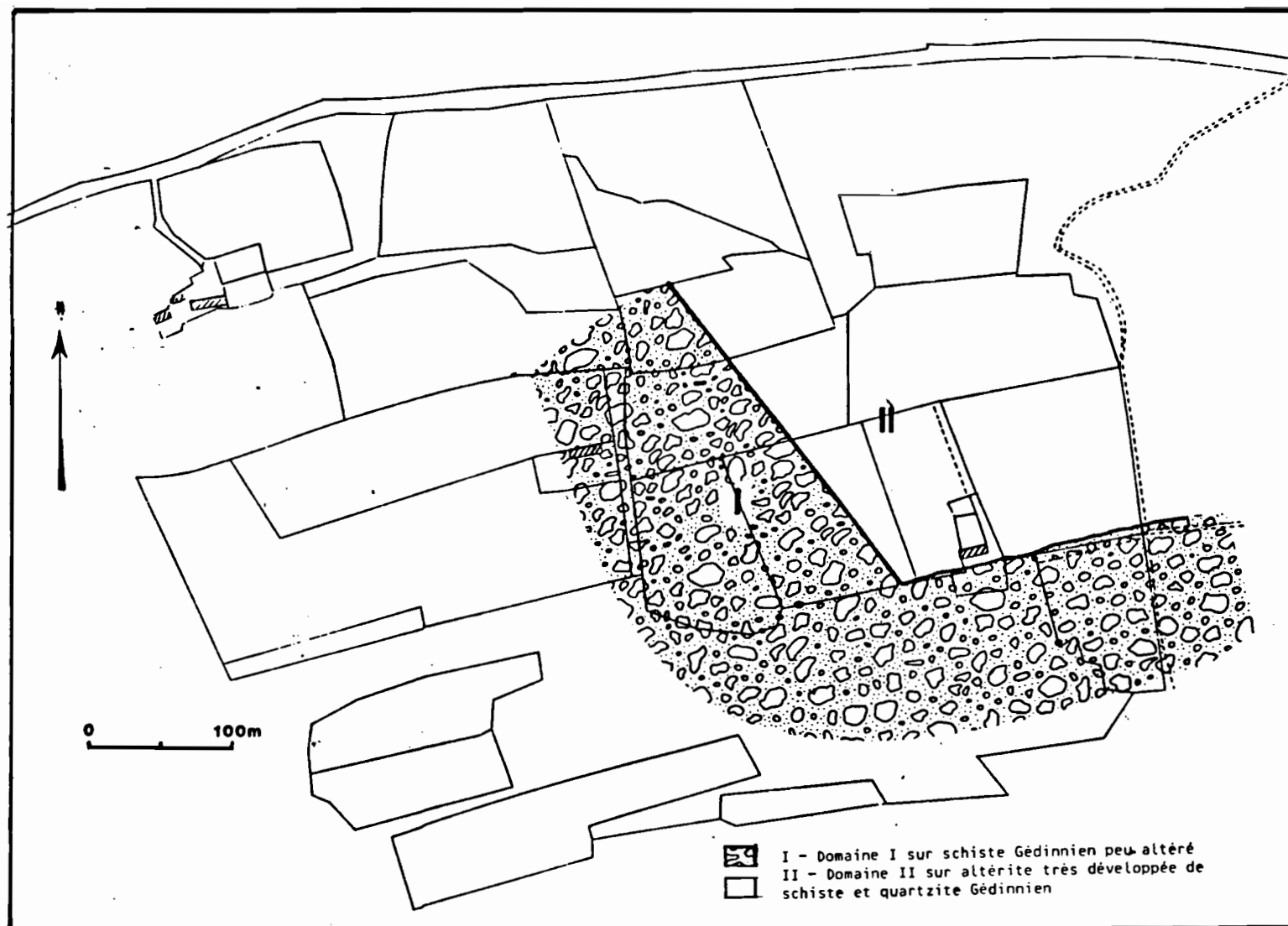


Figure 26 : Répartition spatiale des deux ensembles altéritiques.

La répartition entre ces deux ensembles altéritiques peut être analysée de deux façons différentes, et la limite qui les sépare n'a pas la même signification sur toute sa longueur.

En effet, pour une première analyse, la différence entre ces deux ensembles altéritiques peut résulter d'une altération plus importante sur le versant que sur le sommet. P. CURMI (1979), étudiant l'altération et la différenciation sur granite en Bretagne, note "qu'une relation entre le modelé et l'importance de l'arène peut exister pour les versants, dans le massif de Pontivy : Les pentes très fortes, supérieures à 10 %, ont en général un amont armé par le granite diaclasé et un versant arénisé". Il semble que la relation puisse être faite également pour les versants sur schistes et quartzites. Dans la partie Est du terrain, où l'ensemble altéritique II succède à l'ensemble I sur la pente, (figure 26), on a bien un amont caractérisé par une altérite peu développée alors que la pente présente un ensemble altéritique épais.

D'autre part, les rides sommitales de schiste Gédinnien ont un pendage proche de celui du schiste en place, alors que des phénomènes de fauchage décrits paragraphe 3-2-2-1, se manifestent sur la pente. P. CURMI (1979) a montré sur arène granitique des phénomènes de fauchage analogues, avec des filons quartzitiques en place en profondeur et un fauchage de ces filons au sommet de l'altérite.

Enfin, la plus grande abondance des quartzites dans l'ensemble I que dans l'ensemble II s'explique lithologiquement par le fait que le début de la série du Gédinnien est constitué presque exclusivement de schistes durs, alors que la fin de la série est formée d'une alternance de bancs plus minces de schiste et de quartzite. Dans le paysage Gédinnien, c'est le début de la série qui forme l'ossature du relief (Gorges du Daoulas).

Dans la partie Est du terrain, le plateau et sommet de versant seraient constitués de bancs de schiste dur (début Gédinnien), en place, avec une altération de type I, alors que le versant serait sur la partie médiane à sommitale du Gédinnien, caractérisé par une alternance schiste/quartzite, et par une altérite épaisse, de type II: Faciès isaltéritique dont on ne connaît pas l'épaisseur, présentant des phénomènes de fauchage, et faciès allotéritique épais, montrant les caractères d'une altération intense. Le bas du versant est porté sur la carte géologique comme appartenant au Siegenien inférieur (figure 12).

La deuxième partie de la limite qui sépare les ensembles I et II en deux domaines, l'un situé à l'est du terrain et l'autre situé à l'ouest, relève d'une autre analyse. En effet, il ne peut s'agir ici d'une relation de versant entre les deux ensembles, puisqu'il sont situés latéralement par rapport à la pente. Dans la partie Ouest du terrain, l'ensemble I se développe le long du versant en rides successives de schistes durs, en place, dans l'intervalle desquelles les blocs de schistes sont couchés mais toujours proches de la surface. Sur cette armature de schistes durs une altérite peu développée et caractérisée par une altération peu poussée prend place. Une faille ayant décalé le bloc ouest vers le nord rendrait compte des différences de lithologie entre les deux domaines ainsi délimités, d'où découlerait l'altération plus importante observée dans l'ensemble II.

Une telle faille, dont l'extension ainsi que le jeu sont relativement faibles et qui a pu ne pas être portée sur la carte géologique au 1/50 000, serait néanmoins de direction compatible avec les autres failles ayant affecté cette région (figure 11).

Les deux ensembles altéritiques définis déterminent donc l'existence de deux premiers domaines. Les relations entre ces deux domaines en ce qui concernent leurs altérites sont essentiellement :

- Dans la partie Est du terrain, topographiques et lithologiques.

- Entre les parties Est et Ouest, lithologiques et structurales

Nous allons étudier maintenant les différenciations pédologiques réalisées dans ces deux domaines.

3.3 Les ensembles pédologiques différenciés dans les deux domaines altéritiques définis

3.3.1 Les différenciations pédologiques dans le domaine des schistes Gédinniens peu altérés

3.3.1.1 Introduction : Les trois types d'horizons (ou ensemble de micro-horizons) différenciés au dessus du schiste

Gédinnien peu altéré

Nous définirons et caractériserons successivement les trois horizons suivants dont la distribution générale est donnée dans les figures 14 et 27.

- Brun clair à structure polyédrique (BCP), localisé en profondeur et à l'aval.
- Brun jaune à structure microgrumeleuse (BJM), en position intermédiaire et à l'amont.
- Ensemble MP, superficiel.

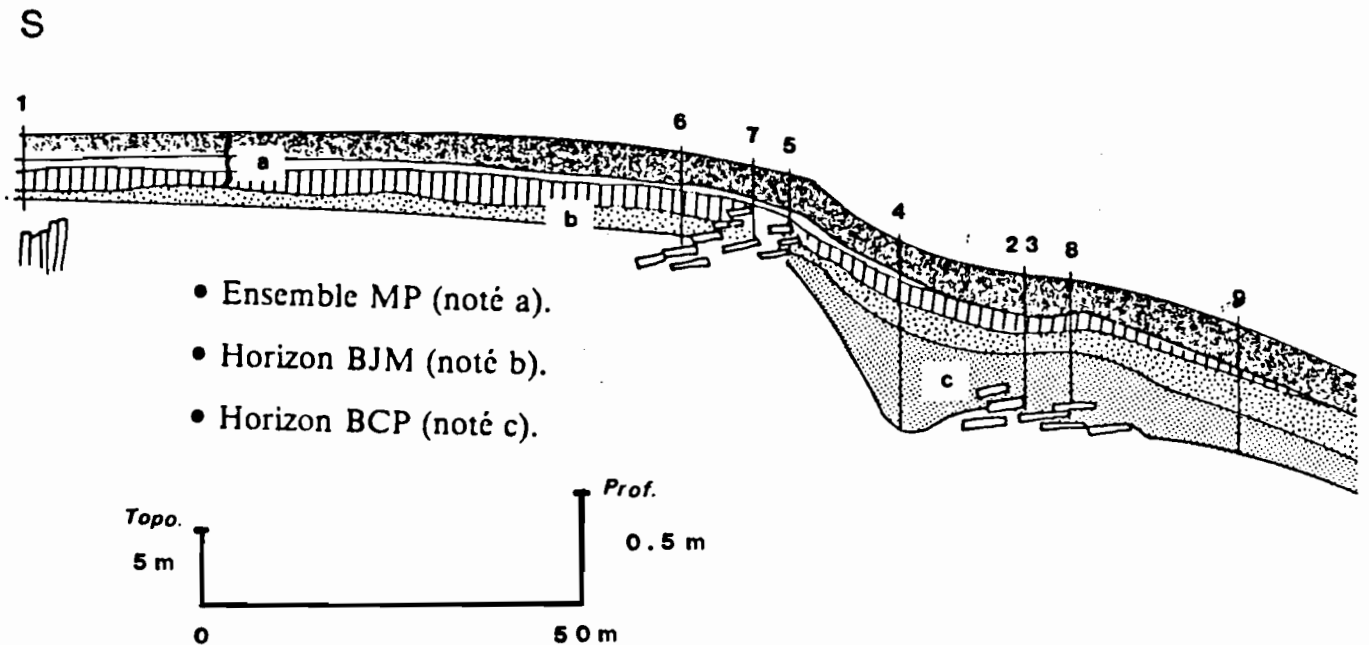


Figure 27 : Distribution des trois horizons qui se différencient sur le schiste Gédinnien peu altéré, séquence H.

3.3.1.2 L'horizon BCP.

Caractérisation macroscopique

- Légèrement humide.
- Couleur brun clair (7.5 YR 5/6).
- 10 à 50 % d'éléments grossiers, surtout des blocs de schiste, mais aussi des cailloux et graviers.
- Granulométrie limono-sableuse.
- Structure polyédrique, localement à sous-structure microgrumeleuse sur les faces des agrégats.
- Pores tubulaires de diamètre inférieur au mm., peu poreux.
- Traits pédologiques :

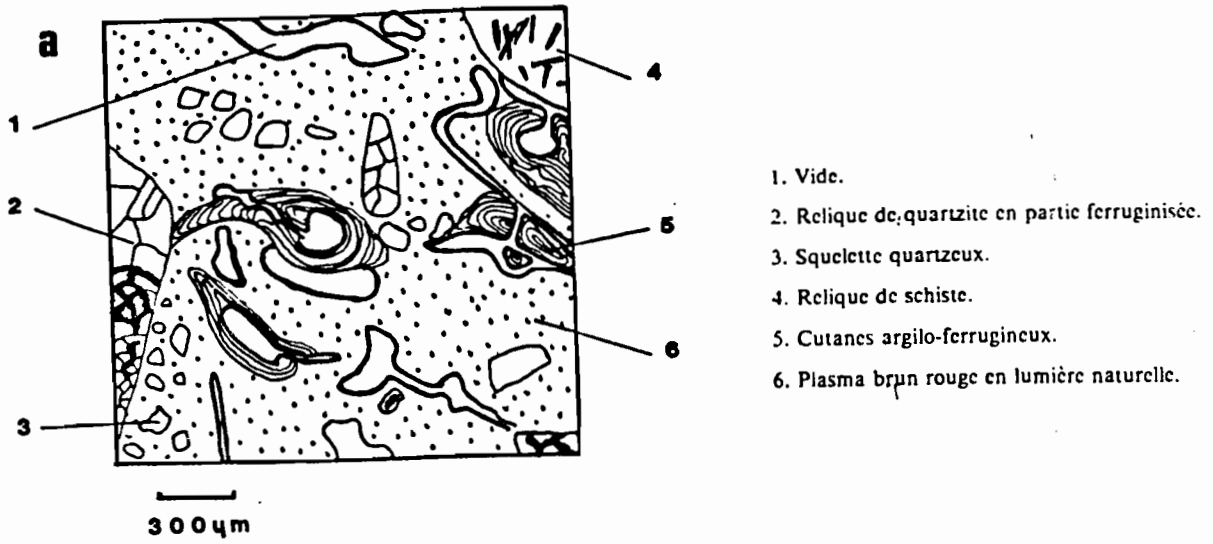
Revêtements argilo-ferrugineux :

Recouvrement 7 à 15 %,
Couleur brun 7.5 YR 4/6,
Sans relation visible avec la structure,
Peu contrastés.

Caractérisation microscopique

Les caractères que nous pouvons relever en microscopie optique (figure 28-a) concernent :

- Une accumulation argilo-ferrugineuse sous forme de nombreux cutanes d'illuviation argilo-ferrugineux (fig. 28-a).
- Une ségrégation du fer dans le fond matriciel correspondant à la formation de nodules diffus (fig. 28-b).



1. Plasma à squelette quartzeux très abondant.
2. Cutane.
3. Papule.
4. Relique de quartzite.
5. Vide.
6. Nodule diffus.

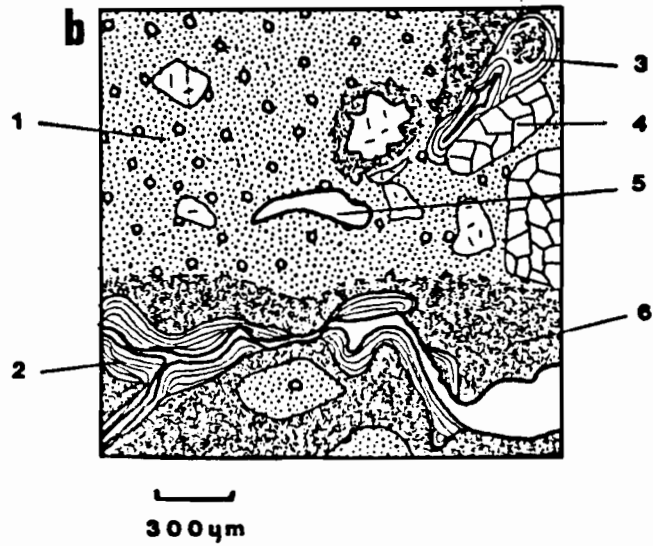


Figure 28 : Organisation microscopique de l'horizon BCP.

a-Accumulation argiloferrugineuse
b-Concentrations de fer

3.3.1.3 L'horizon BJM

Cet horizon repose soit directement sur l'altérite de schiste peu développée lorsque les blocs de schiste sont proches de la surface, généralement en haut de versant, soit sur l'horizon BCP (figures 14 et 27).

Caractérisation macroscopique

- Limite inférieure peu nette, transition sur 5 à 10 cm.
- Légèrement humide.
- Couleur brun jaune 10 YR 5/6.
- 10 à 50 % d'éléments grossiers, blocs, cailloux de schiste peu ou non altérés.
- Granulométrie limono-sableuse.
- Structure microgrumeleuse très nette à sur-structure polyédrique anguleuse peu nette (agrégats de 20 à 50 mm).
- Porosité assez importante, pores tubulaires inférieurs à 0.1 mm de diamètre.
- Racines peu nombreuses, inférieures à 1 mm de diamètre.

Caractérisation microscopique

Les caractères de cet horizon en microscopie optique (figure 29) sont les suivants :

- Des lithoreliques de petite taille de schiste et de quartzite.
- Un squelette quartzé fin peu abondant.
- Un plasma brun formant des micro-agrégats, en particulier le long des vides.
- Des vides très nombreux anastomosés.

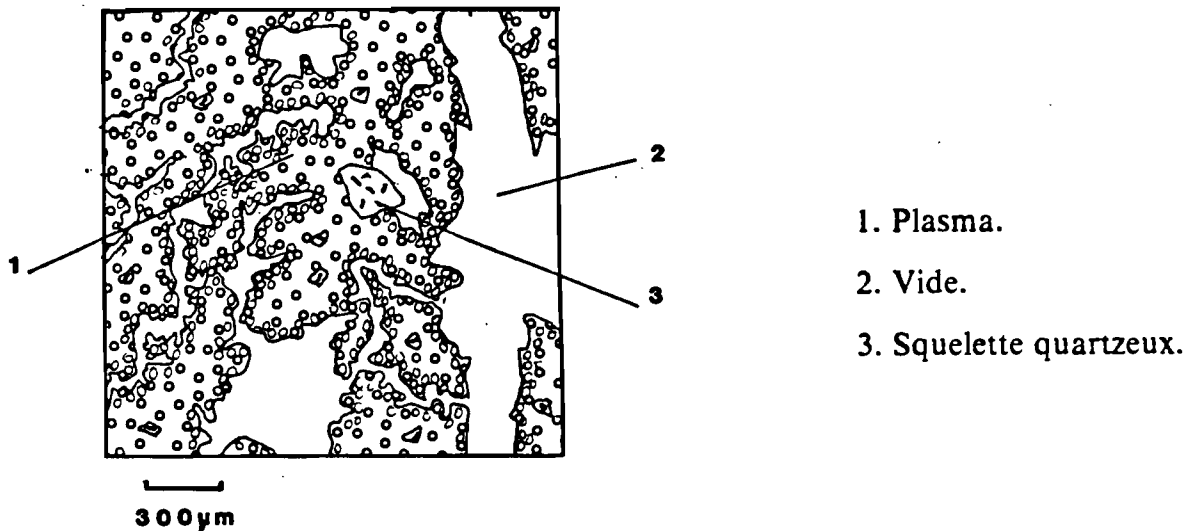


Figure 29 : Organisation microscopique de l'horizon BJM

Cet horizon BJM est donc caractérisé par sa structure, observable aussi bien macroscopiquement qu'en microscopie optique, et dans une moindre mesure par sa couleur.

3.3.1.4 Relations entre l'horizon BCP et l'horizon BJM

L'horizon BCP est présent lorsque l'ensemble pédologique s'épaissit, et il est alors surmonté par l'horizon BJM (Figure 27). Dans ce cas les caractères d'accumulation argiloferrugineuse observés tant au niveau macroscopique que microscopique

pique peuvent correspondre à un développement de l'horizon BCP par une illuviation provenant de l'horizon BJM.

D'autre part la limite entre BJM et BCP est souvent nette, et sa forme qui peut être légèrement glossique indiquerait une progression (un enfoncement) de l'horizon BJM aux dépens de l'horizon BCP.

De plus, la disposition de la sous-structure microgrumeleuse à l'intérieur de l'horizon BCP a pu être à maintes reprises observée de la manière suivante : Un agrégat se présente avec une base très subanguleuse à revêtement limoneux clairs tandis que la partie supérieure de l'agrégat présente un aspect émoussé dû au foisonnement de la structure microgrumeleuse. P. CURMI (1979) a décrit des structures identiques développées sur granite.

Ceci suggérerait également un développement de l'horizon BJM aux dépens de l'horizon BCP, mais une analyse plus fine serait nécessaire pour préciser et assurer les relations qui peuvent exister entre ces deux horizons. Si l'horizon BCP se forme par illuviation de l'horizon BJM, l'éluviation progressant par la base de l'horizon BJM peut reprendre des parties illuviées et créer ainsi des structures complexes.

3.3.1.5 Répartition spatiale de l'horizon BCP

L'horizon BJM est présent partout à l'intérieur de ce domaine I. Par contre, l'horizon BCP peut être présent ou absent, en particulier en haut de pente ou aux endroits où les blocs de schiste sont proches de la surface. On a tracé, figure 30, la limite d'apparition de cet horizon. D'un côté de cette limite, on trouve la superposition BCP-BJM et de l'autre l'horizon BJM repose directement sur le schiste Gédinnien peu altéré.

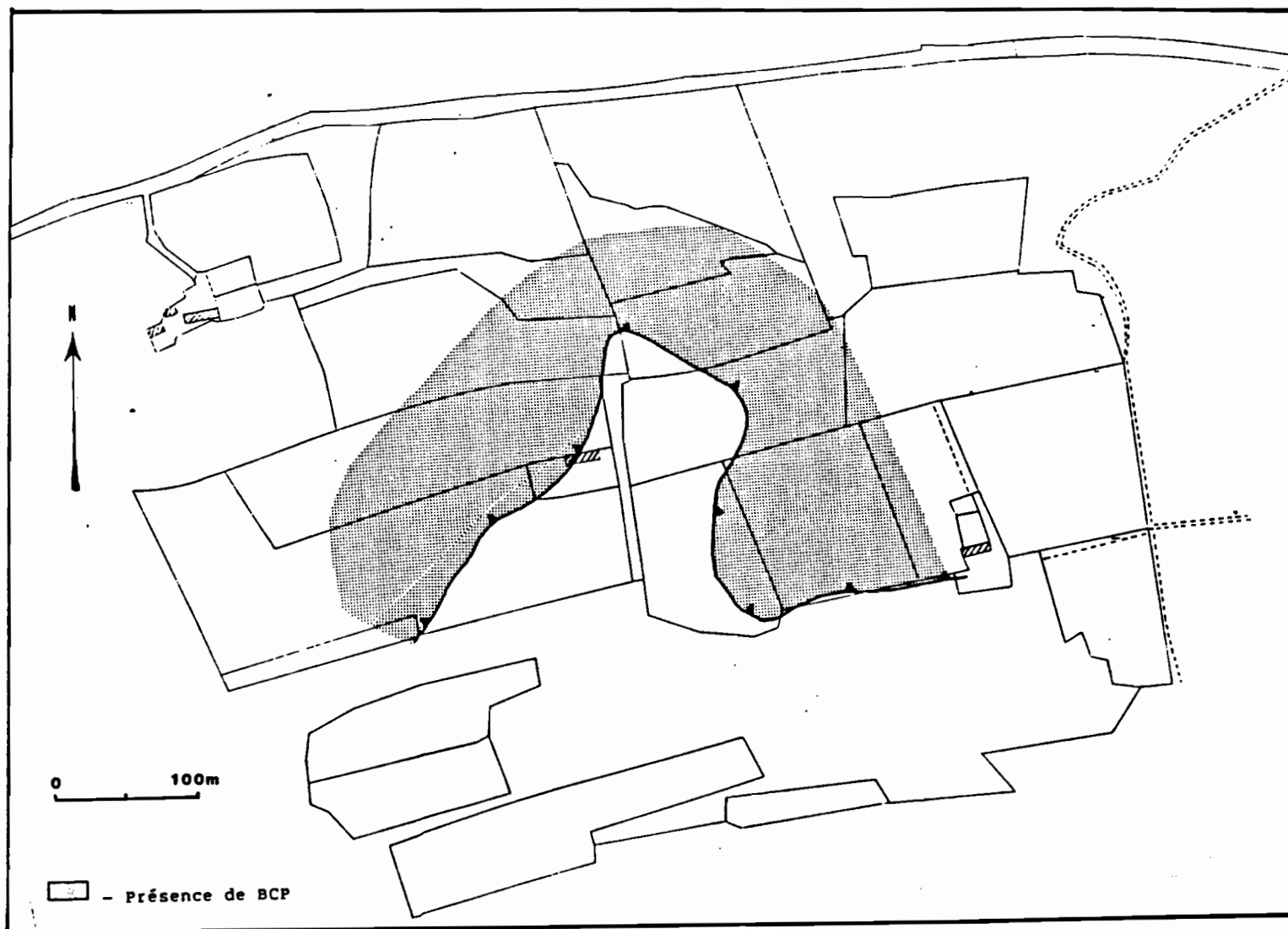
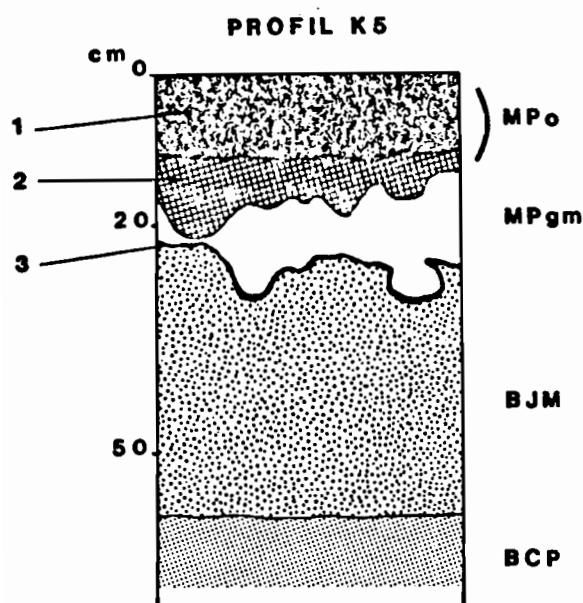


Figure 30 : Répartition spatiale de l'horizon BCP

3.3.1.6 Les horizons MPo, MPgm, MPbjvm

Au sommet de l'horizon BJM, on définit une succession de trois microhorizons, soit respectivement de haut en bas :

- Un horizon superficiel organique (MPo)
- Un horizon gris massif à liséré ferrugineux (MPgm)
- Un horizon brun jaune vif à structure microgrumeleuse très nette. (MPbjvm)



1. Partie grumeleuse brun noir.
2. Partie massive marron très foncé.
3. Liséré ferrugineux.

Figure 31 : Organisation schématique du profil K5. Succession au sommet de l'horizon BJM des micro-horizons MPo et MPgm.

Caractérisation macroscopique

Horizon MPo

- Epaisseur d'une vingtaine de cm.
- Limite inférieure régulière nette.
- Couleur brun noir entre 10 et 7.5 YR 3/3.
- Granulométrie limono-sableuse.
- Structure grumeleuse.

La base de cet horizon est parfois sur une dizaine de cms de couleur marron très foncé (7.5 YR 2/3) et de structure massive.

Horizon MPgm

- Epaisseur d'une dizaine de cm.
- Limite inférieure très nette.
- Moyennement humide.
- Couleur : Gris (5 Y 5/1); parfois taché de matière organique diffuse dans la masse de l'horizon, on a alors une couleur entre brun noir et gris rouge foncé (2.5 et 5 YR 3/1).
- 10 à 30 % d'éléments grossiers, cailloux, graviers, surtout de schiste, un peu de quartz.
- Granulométrie limoneuse très sableuse.
- Structure massive.
- Porosité faible.
- Très peu de racines.
- Taches, recouvrement 30 à 50 %, couleur orange (5 YR 6/8).

La base de cet horizon est très souvent soulignée d'un liséré rouille très net et très vif (figure 31).

Horizon MPbjvm

- Son épaisseur peut varier de 30 à quelques cm d'épaisseur.
- Moyennement humide.
- Couleur brun jaune vif (10 YR 5/8).
- Granulométrie limono-sableuse.
- Structure microgrumeleuse très nette.
- Très poreux.

Cet horizon repose toujours, quand il existe, sur l'horizon BJM. Sa limite inférieure est peu nette, diffuse, est il est parfois assez difficile à distinguer de l'horizon sous-jacent compte tenu de ses variations de couleur et de la structure analogue, quoique en général mieux exprimée.

Nous avons suivi les limites de l'horizon MPgm pour étudier la répartition spatiale de cet ensemble de micro-horizons, car l'horizon MPbjvm est parfois absent, quand l'ensemble MP est très peu développé.

Caractérisation microscopique de l' ensemble MP

L'observation en microscopie optique (figure 32) permet de dégager les caractères suivants :

- Un squelette quartzeux très abondant et un plasma grisâtre peu abondant (figure 32-a)
- Une concentration, ségrégation du fer en lisérés (figure 32-b), ou autour des vides, (figure 32-c)

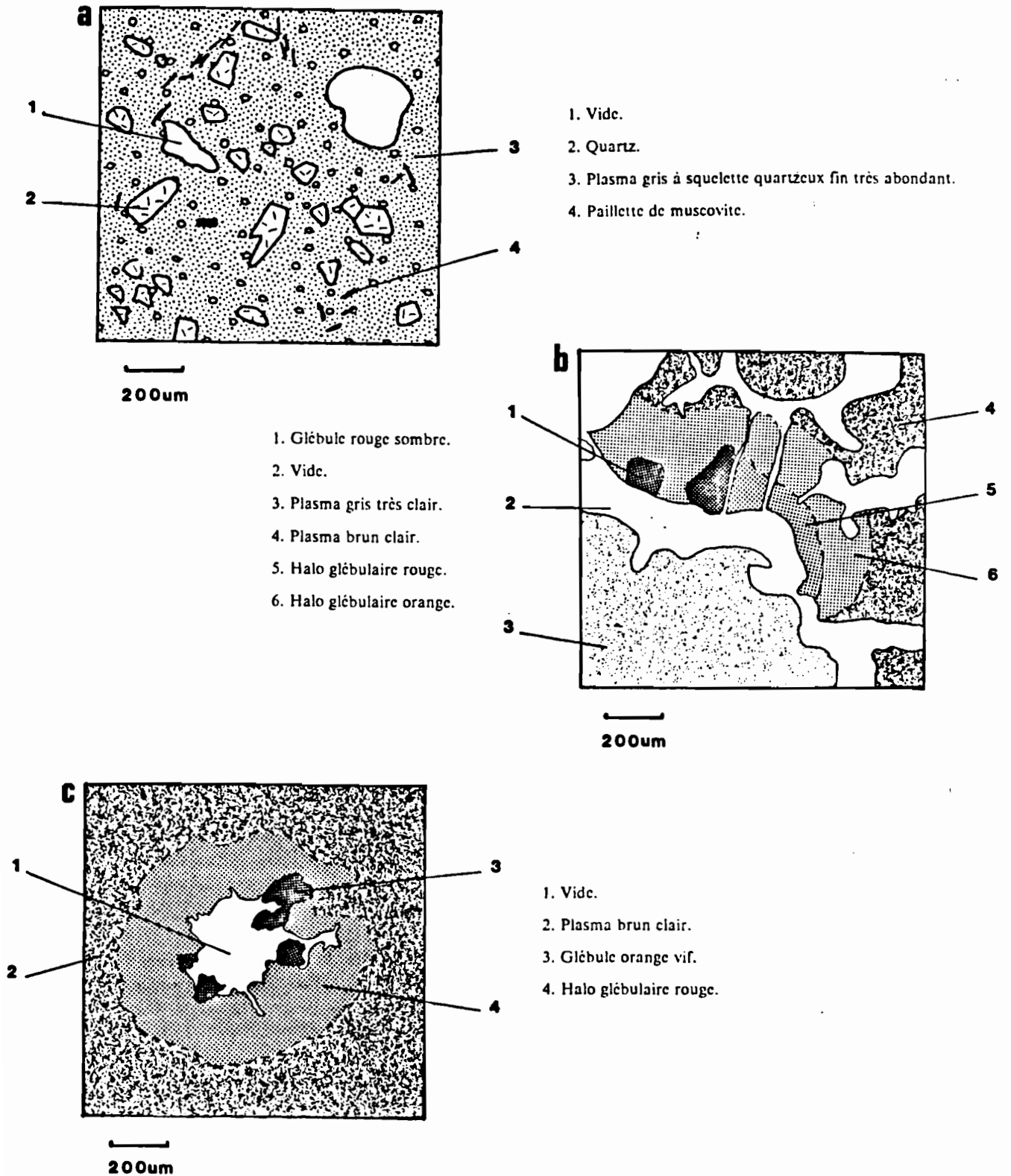


Figure 32 : Organisation microscopique de l'horizon MPgm dans la tranchée F8,

a-Abondance du squelette quartzeux,
b-Ségrégation du fer en liséré,
c-Ségrégation du fer autour des vides.

La différenciation de ces trois micro-horizons est identifiée par les caractères suivants :

- La différenciation d'un horizon éluvié, massif, gris, (dégradation probable des argiles, perte de la structure) et migration du fer (couleur grise), comparable à un horizon "cendreux" de podzol.
- Le début d'une migration de la matière organique. Nous n'avons pas identifié d'horizon Bh caractéristique du podzol, mais la transformation de la matière organique se manifeste par l'individualisation à la base de l'horizon MPo, d'une partie massive de couleur marron très foncé, et la migration par la présence de taches ou d'une coloration diffuse par la matière organique de l'horizon MPgm.
- La migration et l'accumulation du fer en liséré ferrugineux soulignant la base de l'horizon MPgm, et la présence occasionnelle d'un horizon MPbjvm, qui s'apparente par sa couleur et sa structure à un horizon Bs de podzol.

Des podzols et des micropodzols ont été étudiés en Bretagne par L. LE CALVEZ et Y. LE BARS (1977), et P. QUIDEAU (1980) et la caractérisation de ces horizons de micropodzols sont analogues à celles citées dans ces travaux.

Mais P. AUROUSSEAU (communication personnelle) note des caractères d'hydromorphie dans ces micro-horizons. Une analyse minéralogique et géochimique serait nécessaire pour étudier les rapports entre la micropodzolisation et l'hydromorphie dans ces horizons, particulièrement à la rencontre du domaine III que nous décrirons plus loin. Pour la présente étude, et en soulignant ce problème non résolu, nous dénommerons ces horizons, des horizons de micropodzol.

Nous allons maintenant compléter la caractérisation de ces horizons par des analyses granulométriques et chimiques.

Analyses granulométriques

Les analyses granulométriques des horizons MPgm et MPbjvm montrent une diminution relative en argile des horizons micropodzoliques par rapport à l'horizon BJM et une augmentation relative des limons fins. La granulométrie de l'horizon MPbjvm se distingue nettement de celle de l'horizon BJM et se rapproche de celle des horizons sus-jacents.

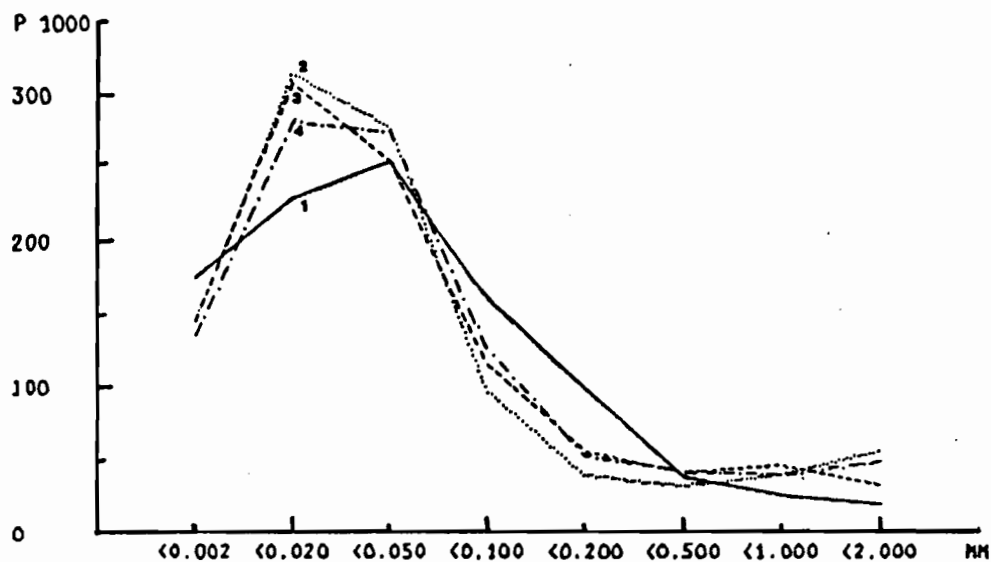


Figure 33 : Courbes représentant les pourcentages de chaque fraction granulométrique des horizons suivants :

1. BJM (profil F1)
2. MPbjvm (profil F8)
3. MPgm (profil B6)
4. MPgm (profil F8)

Les courbes granulométriques de ces trois micro-horizons, proches les une des autres, se distinguent donc de celle de l'horizon BJM par un appauvrissement en argile et un enrichissement relatif en limons grossiers.

Analyses chimiques

	HORIZON MPgm (PROFIL G6)		HORIZON MPgm (PROFIL F8)		HORIZON MPbjvm (PROFIL F8)		HORIZON BJM (PROFIL F1)	
P 1000								
CARBONE ORGANIQUE	10.10		13.70		14.00		9.30	
MATIERE ORGANIQUE	17.30		23.50		24.00		15.90	
pH	5.0		4.9		5.1		5.1	
MEQ. P. 100								
ALUMINIUM échangeable	1.5		1.6		1.1		1.4	
CAPACITE D'ECHANGE	2.90		3.50		5.50		3.40	
	%	P.100%	%	P.100%	%	P.100%	%	P.100%
CALCIUM	0.13	0.28	0.13	0.28	0.15	0.33	0.17	0.37
MAGNESIUM	0.14	0.30	0.22	0.47	0.21	0.46	0.10	0.21
POTASSIUM	1.41	3.05	1.41	3.03	1.39	3.02	1.12	2.44
SODIUM	0.30	0.65	0.29	0.62	0.35	0.76	0.32	0.70
FER	2.81	6.09	3.41	7.34	3.86	8.39	2.50	5.44
ALUMINIUM	7.65	16.58	7.61	16.37	7.43	16.15	5.00	10.89
SILICIUM	33.70	73.04	33.40	71.87	32.60	70.88	36.70	79.94
TOTAL	46.14	99.99	46.47	99.98	45.99	99.99	45.91	99.99

Tableau n° 4 : Comparaison des analyses concernant d'une part trois horizons de micropodzol et d'autre part l'horizon brun jaune microgrumeleux.

On note une teneur beaucoup plus élevée en carbone et en matière organique, en particulier dans l'horizon MPbjvm, que celle analysée dans l'horizon BJM. Par rapport à l'horizon BJM toujours, la capacité d'échange est plus faible dans l'horizon MPgm et plus forte dans l'horizon MPbjvm, et les teneurs en fer et en aluminium sont beaucoup plus élevées. Les échantillons ayant été prélevés dans des situations différentes, il est difficile d'établir des conclusions, mais les résultats de ces analyses sont concordants avec l'hypothèse de la micropodzolisation.

La répartition spatiale de cet ensemble superficiel micropodzolique

Comme nous l'avons dit plus haut, nous avons suivi la limite d'apparition de l'horizon MPgm pour marquer la répartition de cet ensemble superficiel micropodzolique. En fait, cette modification de surface affecte très généralement les horizons différenciés sur l'altérite de schiste Gédinnien du domaine I. La limite de cette différenciation micropodzolique coïncide sur une grande partie de sa longueur avec la limite déjà définie entre le domaine I et le domaine II (Figure 26), notamment dans la partie Est du secteur.

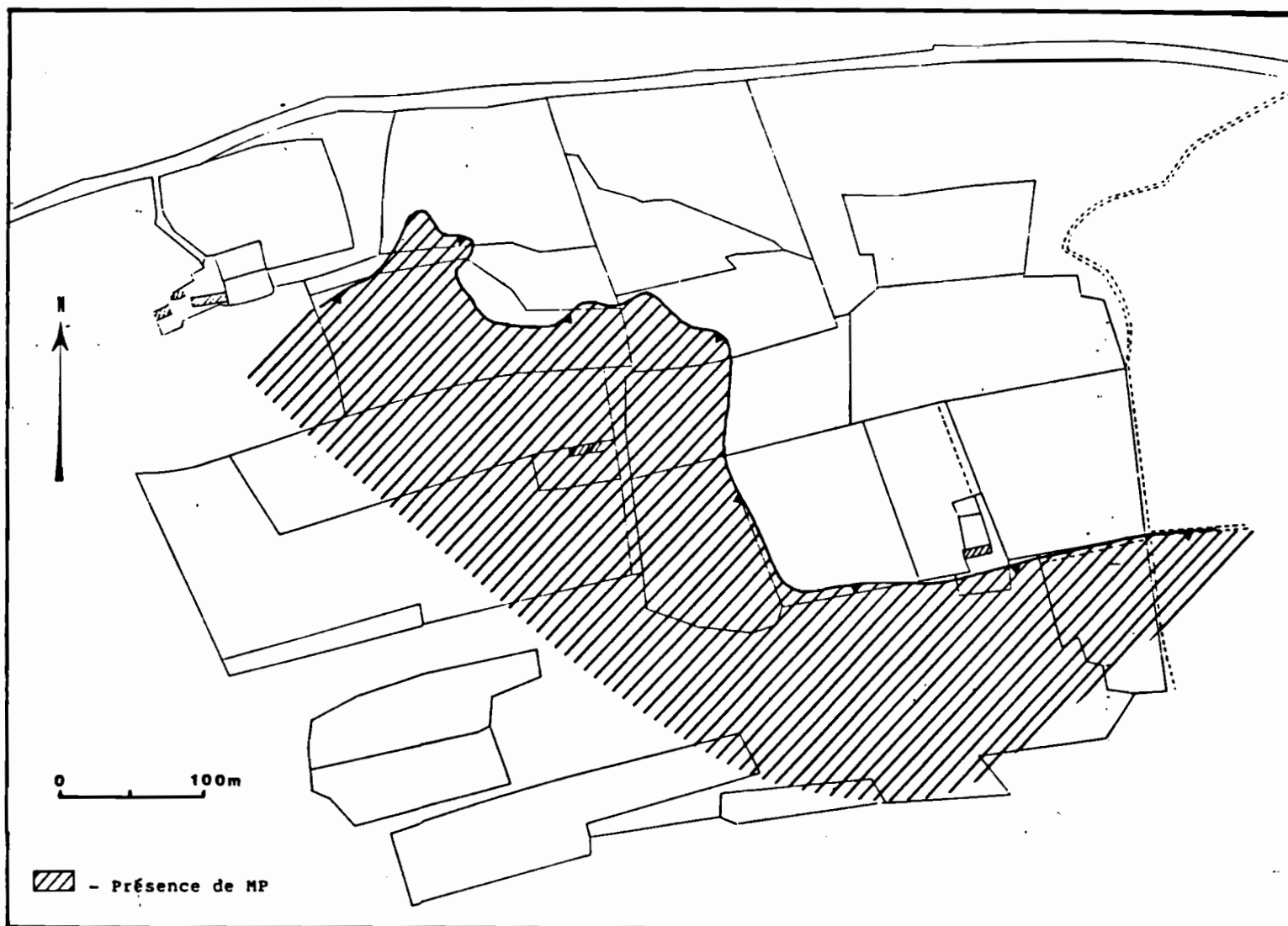


Figure 34 : Répartition spatiale de l'ensemble micropodzolique

3.3.2 Les horizons pédologiques dans le domaine sur altérite très développée de schistes et quartzites Gédinniens.

3.3.2.1 Introduction : L'ensemble BCP et BJM et les horizons de surface

Sur l'altérite très développée de schistes et quartzites Gédinniens (Domaine II) se différencient un horizon brun clair polyédrique (BCP) et un horizon brun jaune microgrumeleux (BJM). La même différenciation pédologique de profondeur s'effectue donc sur le schiste Gédinnien peu altéré et sur l'altérite très développée de schiste et quartzite. Les seules différences relevées dans les caractérisations macroscopiques et microscopiques effectuées sur des profils de ces deux domaines portent sur :

- La teneur en éléments grossiers : Quelques %, à moins de 2 %, donc beaucoup plus faible sur l'altérite très développée que sur le schiste peu altéré.
- La nature des éléments grossiers : Le mélange schiste, quartzite (le quartzite étant légèrement plus abondant), caractérise aussi bien les éléments grossiers au niveau du profil que les lithoreliques au niveau des lames minces.

Nous allons compléter la caractérisation de l'ensemble BCP et BJM par une comparaison de leurs analyses granulométriques et chimiques avec celles de l'allotérite, (les échantillons étant pris pour les trois niveaux dans la tranchée F1), puis nous caractériserons les différenciations de surface observées dans ce domaine.

3.3.2.2 L'ensemble pédologique composé des horizons profonds BCP et BJM

Analyses granulométriques

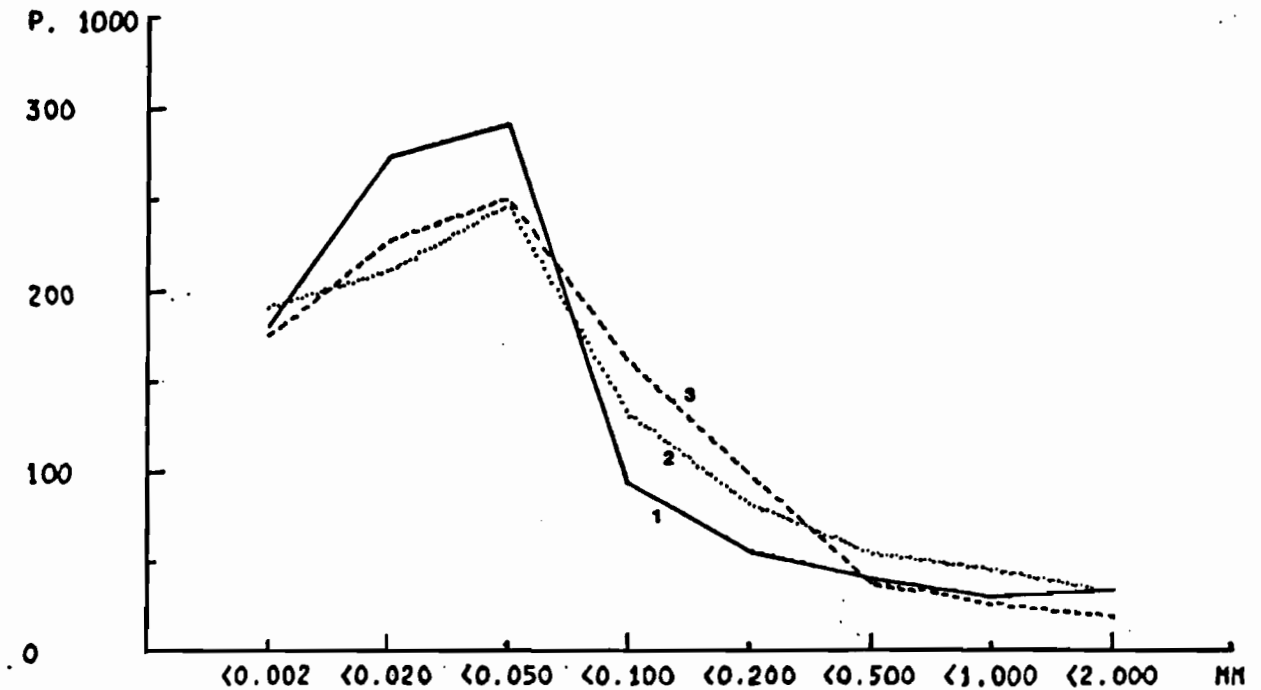


Figure 35 :
Courbes représentant les pourcentages de chaque fraction granulométrique des niveaux altéritiques et horizons suivants :

1. L'allotérite (fosse F1)
2. L'horizon BCP (fosse F1)
3. L'horizon BJM (fosse F1)

- Les deux courbes des horizons pédologiques sont assez semblables et diffèrent de la courbe de l'altérite par une plus faible teneur en limons fins et une teneur plus forte en limons grossiers et sables fins. Par contre le squelette quartzéux est plus abondant dans les horizons pédologiques alors que dans l'altérite, le quartz reste en majeure partie inclus dans les reliques de la roche.
- L'horizon BCP est caractérisé par une plus forte teneur en argile par rapport aux horizons sous et sus-jacents. Cet horizon, dont on observe les revêtements en macroscopie, les cutanes très nombreux et très développés en microscopie, peut donc être considéré comme un horizon d'accumulation en argile.

Analyses chimiques

	ALLOTÉRITE (Fosse F1)		HORIZON BCP (Fosse F1)		HORIZON BJM (Fosse F1)	
P 1000						
CARBONE ORGANIQUE			3.70		9.30	
MATIÈRE ORGANIQUE			6.30		15.90	
MEQ. P. 100						
CAPACITÉ D'ÉCHANGE			3.70		3.40	
	%	P. 100%	%	P. 100%	%	P. 100%
CALCIUM	0.22	0.46	0.17	0.37	0.17	0.37
MAGNESIUM	0.10	0.21	0.26	0.57	0.10	0.21
POTASSIUM	1.25	2.65	1.34	2.94	1.12	2.44
SODIUM	0.22	0.46	0.37	0.81	0.32	0.70
FER	2.79	5.91	3.12	6.85	2.50	5.44
ALUMINIUM	7.36	15.61	6.14	13.49	5.00	10.89
SILICIUM	35.20	74.67	34.10	74.94	36.70	79.94
TOTAL	47.14	99.97	45.50	99.97	45.91	99.99

Tableau n° 5 : Comparaison des analyses chimiques concernant d'une part l'ensemble pédologique BCP et BJM et d'autre part le faciès allotéritique de l'altérite très développée sur schistes et quartzites Gédinniens.

L'horizon BJM montre donc une plus forte teneur en carbone et matière organique, et une plus faible capacité d'échange, que l'horizon BCP. Ces différences sont liées avec la teneur en argile, plus élevée dans l'horizon BCP.

F. ROUSSEL (1980) a décrit sur schistes pourpres de Montfort un horizon ALE caractérisé par une structure microgrumeleuse associée à une structure polyédrique. Il a montré également que le taux d'argile augmentait de la première à la seconde, la capacité d'échange variant dans le même sens.

Enfin, les teneurs en fer sont maximum dans l'horizon BCP, et décroissent à la fois dans l'allotérite et dans l'horizon BJM.

Nous récapitulons les variations de ces caractères dans les horizons BCP et BJM dans la figure 36 :

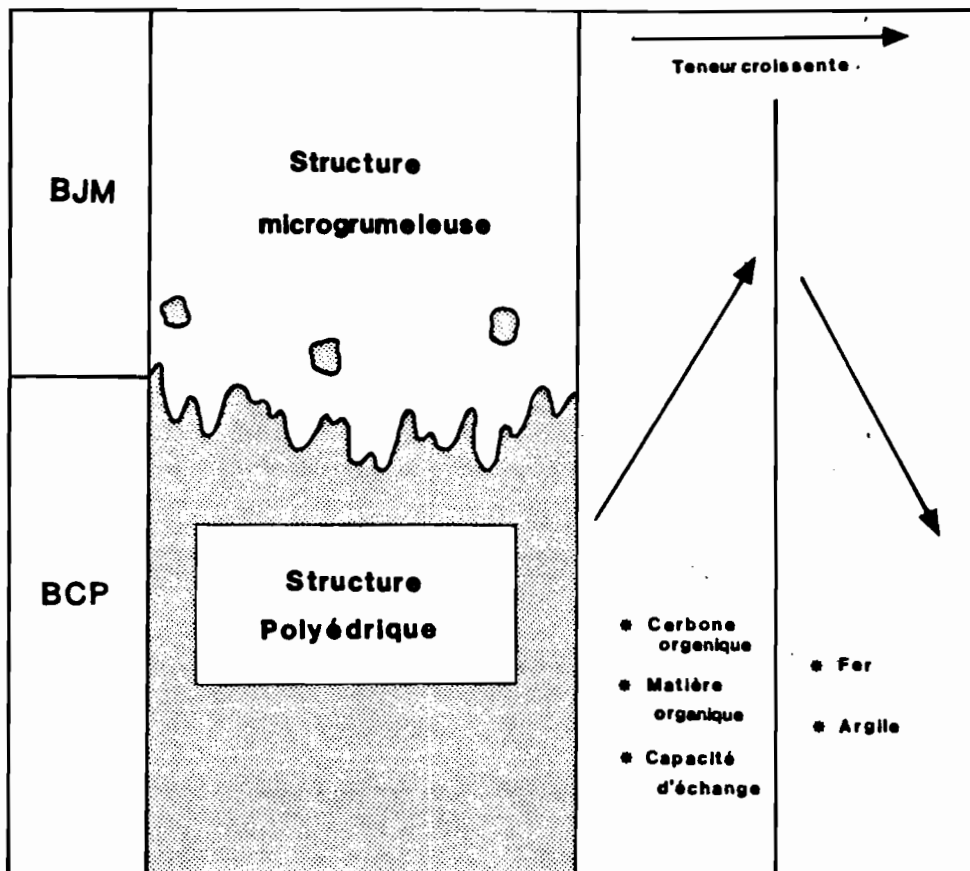


Figure 36 : Comparaison des horizons BCP et BJM

3.3.2.3 Les horizons de surface dans le domaine sur altérite très développée

Au dessus de l'horizon BJM, se différencie un horizon superficiel organique grumeleux (OG) et parfois entre l'horizon BJM et l'horizon OG, un horizon brun jaune clair lamellaire (BJCL).

L'horizon OG

L'horizon organique différencié au dessus de l'horizon BJM dans le domaine II sur altérite développée peut être caractérisé de la manière suivante :

- Epaisseur d'une vingtaine de cms.
- Limite inférieure ondulée peu nette.
- Couleur brun jaune terne (10 YR 4/3).
- Eléments grossiers : Moins de 2 % de graviers principalement de quartz de formes irrégulières, non altérés.
- Granulométrie limono-sableuse.
- Structure polyédrique sub-anguleuse nette.
- Porosité faible, pores tubulaires de 0.1 à 1 mm de diamètre.
- Racines nombreuses.

L'horizon BJCL

Cet horizon a été observé en certaines situations au sommet de l'horizon BJM, immédiatement sous l'horizon OG. Son épaisseur atteint une dizaine de cms dans la plupart des cas. Il a été caractérisé de la manière suivante :

Caractérisation macroscopique

- Limite inférieure irrégulière, transition peu nette (sur 1 à 2 cm).
- Légèrement humide.
- Couleur variant de jaune clair (2.5 Y 7/4) à brun jaune (10 YR 5/6).
- Eléments grossiers : 2 à 5 % de graviers, essentiellement de quartzite, de forme irrégulière, altérés.
- Granulométrie limono-sableuse.
- Structure lamellaire fine (de 2 à 5 mm d'épaisseur), discontinue.
- Porosité très faible.
- Racines peu nombreuses, d'orientation en majorité horizontale.
- Traits pédologiques :

1. Taches de matière organique :

Recouvrement 7 à 15 %.

Couleur brun jaune terne (10 YR 4/3).

10 à 20 mm de diamètre, transition nette par rapport à la matrice, contrastées.

2. Taches de déferrugineisation :

Recouvrement allant de 2 à 90 % de l'horizon quand celui-ci est éclairci dans la masse.

Couleur jaune clair (2.5 Y 7/4).

3. Pellicules et taches ferrugineuses :

Recouvrement 2 à 7 %.

Couleur orange (5 YR 6/8).

Liées aux faces horizontales des agrégats.

En taches ou en raies d'épaisseur inférieure au mm.

Transition nette par rapport à la matrice, contrastées.

Ces pellicules ferrugineuses peuvent se concentrer à la base de l'horizon en un liséré de 1 à 3 mm d'épaisseur.

Macroscopiquement, cet horizon BJCL présente des similitudes avec les horizons MPgm décrits dans les ensembles micropodzoliques du domaine I sur schistes peu altérés. La couleur et la structure sont toutefois différentes. Les analyses granulométriques et microscopiques permettent de préciser ces différences.

Analyses granulométriques

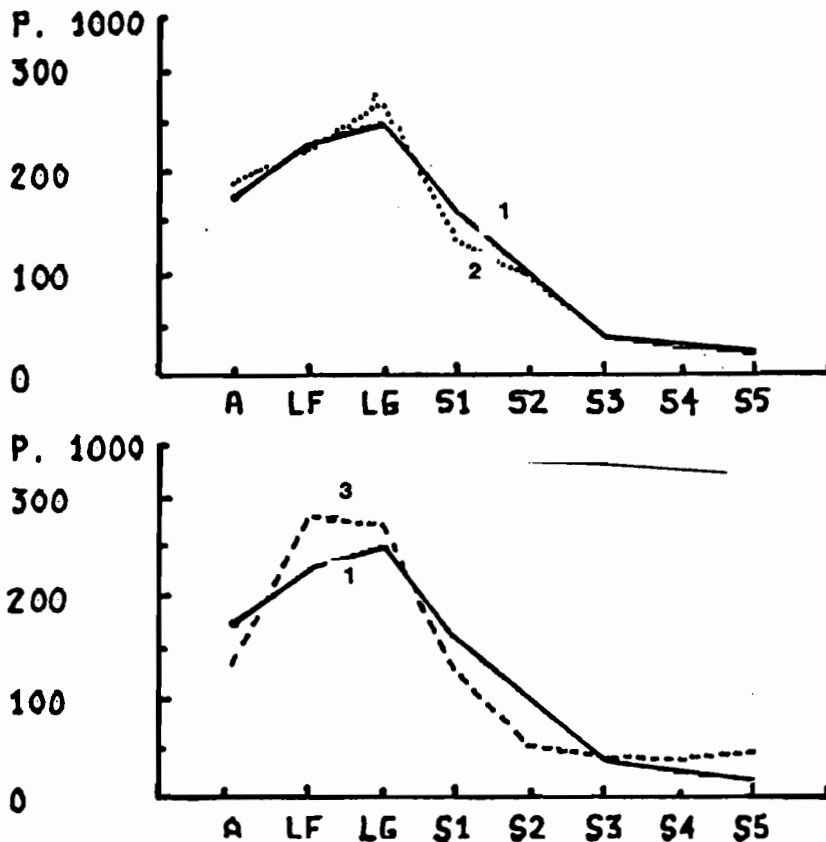


Figure 37 :
Courbes représentant les pourcentages de chaque fraction granulométrique
des horizons suivants :
Profils granulométriques

1. L'horizon BJM (fosse F1)
2. L'horizon BJCL (fosse F1)
3. L'horizon MPgm (fosse F8)

La répartition en fractions granulométriques de l'horizon BJCL est très proche de celle de l'horizon BJM, alors que la courbe de l'horizon MPgm résulte d'une distribution très différente :

La courbe de l'horizon MPgm montre une faible teneur en argile et une dominance des limons fins, alors que pour l'horizon BJCL il n'y a pas d'appauvrissement en argile par rapport à l'horizon BJM; la fraction limons grossiers est dominante dans ces deux derniers horizons.

Caractérisation microscopique

La principale caractéristique de cet horizon est son réseau de très fines fissures subhorizontales illustré figure 38. Le plasma est également différent de celui de l'horizon brun jaune à structure microgrumeleuse, il est plus clair et ne s'organise pas en micro-agrégats.

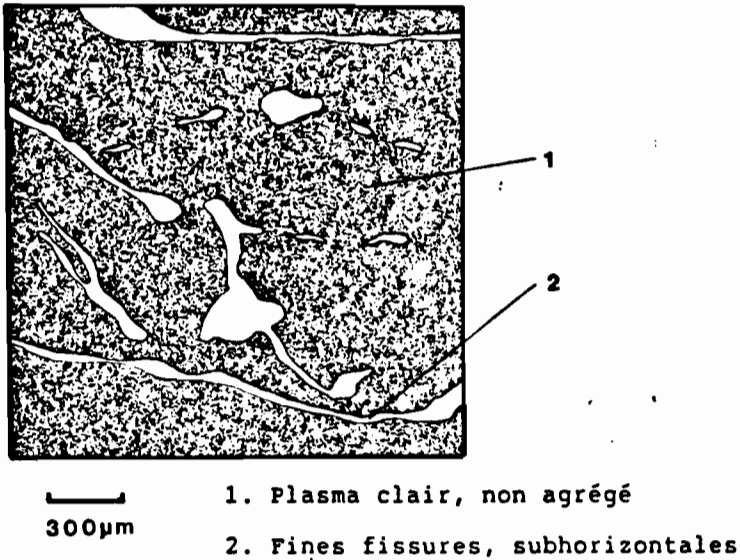


Figure 38 : Organisation microscopique de l'horizon BJCL, réseau fissural et plasma clair non agrégé.

Les différenciations de surface dans le domaine II sont donc constituées d'un horizon organique grumeleux (OG) et parfois d'un horizon à structure lamellaire (BJCL), de granulométrie proche de celle du BJM, sans appauvrissement en argile, mais à taches et liserés ferrugineux, montrant une mobilisation locale du fer.

3.3.2.4 Répartition spatiale des horizons pédologiques différenciés sur schistes et quartzites Gédinniens

Les horizons BJM et OG sont toujours présents sur l'altérite très développée. L'horizon BCP est parfois absent, principalement en situation de forte pente. La présence de l'horizon BJCL semble liée à un champ anciennement mis en culture, et à des lieux de passage qui sont maintenant peu utilisés mais dont le tracé a pu varier latéralement sur une dizaine de mètres.

Les courbes d'apparition de l'horizon BJCL et de disparition de l'horizon BCP sont représentées figure 39.

Ces courbes se recourent. La présence ou l'absence de l'horizon BJCL et celle de l'horizon BCP sont donc indépendantes l'une de l'autre. Elles sont dues à des situations particulières (forte pente ou ancienne culture).

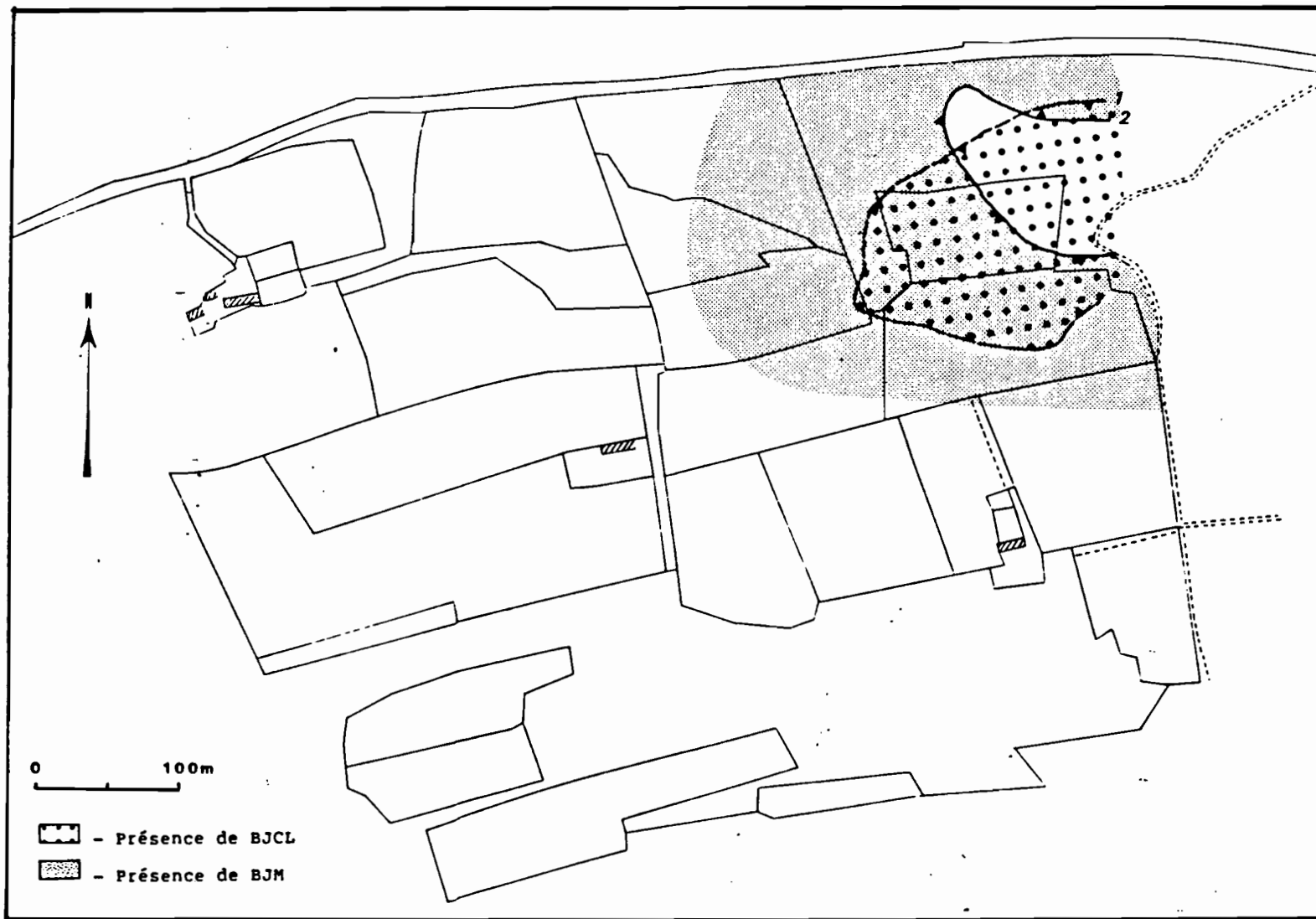


Figure 39 : Repartition spatiale des horizons BCP et BJCL dans le domaine sur altérite très développée de schiste et quartzite Gédinniens
 1.Apparition de l'horizon BJCL
 2.Disparition de l'horizon BCP

3.4 Carte récapitulative des différentes unités d'organisation pédologiques sur les domaines altéritiques I et II

Nous avons caractérisé dans les paragraphes 3-2 et 3-3, différentes unités d'organisation :

- Un ensemble altéritique sur schiste Gédinnien peu altéré
- Un ensemble altéritique très développé de schiste et quartzite Gédinniens dans lequel nous avons reconnu deux faciès différents :
 - Un faciès isaltéritique
 - Un faciès allotéritique

A l'intérieur de chacun des domaines définis par ces deux ensembles altéritiques, nous avons reconnu un ensemble pédologique formé des horizons suivants :

- Dans le domaine I sur schiste peu altéré :
 - BCP
 - BJM
 - MP
- Dans le domaine II sur altérite développée :
 - BCP
 - BJM
 - OG et parfois BJCL

Ensembles Pédologiques	Ensemble MP - o - gm - (bjvm)		OG (BJCL)	
	BJM	BJM	BJM	BJM
BCP		BCP		
Ensembles Altéritiques	I Ensemble altéritique sur schiste Gédinnien peu altéré		II Ensemble altéritique très développé sur schiste et quartzite Gédinnien	

Tableau n° 6 : Les différentes unités d'organisation définies

Nous avons reporté sur la figure 40 les limites suivantes :

- Limite entre les deux domaines altéritiques (40-3)
- Limite localisant l'espace où l'horizon BCP est absent, et donc où le BJM repose directement sur l'ensemble altéritique (haut de pente ou forte pente) (40-2 et 5)
- Limite localisant l'existence de l'ensemble micropodzolique (40-1)
- Limite d'apparition de l'horizon BJCL (40-4).

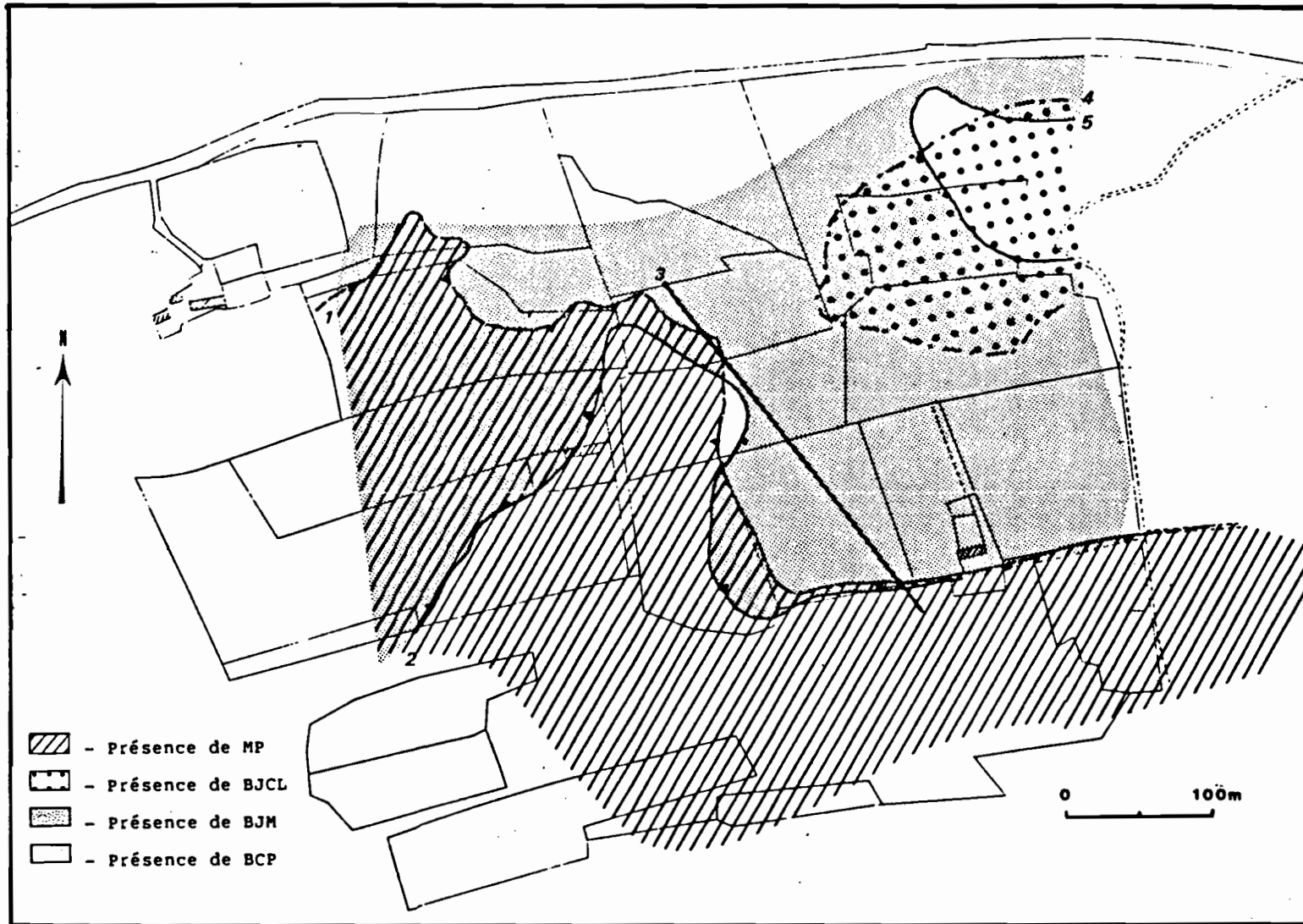


Figure 40 : Carte récapitulative de la répartition spatiale des unités d'organisation définies jusqu'à présent.

Dans le paragraphe 3-1, nous avons précédemment montré sur une séquence schématique l'apparition en bas de versant de nouveaux horizons pédologiques définis comme :

- Un horizon massif à taches grises et orange (Mtgo)
- Un horizon massif à taches grises (Mtg)
- Un horizon superficiel organique massif (OM)

Or, nous avons observé dans différentes tranchées réparties le long de la pente, que les ensembles altéritiques sont progressivement transformés. Nous allons décrire ces transformations, qui gagnent latéralement en extension et en intensité dans chaque tranchée décrite. L'apparition des horizons Mtgo, Mtg et OM est relativement brutale sur les ensembles altéritiques déjà transformés. Nous allons caractériser ces nouveaux ensembles pédologiques et définir leurs relations avec les ensembles altéritiques sous-jacents, et avec les horizons BCP, BJM et OG que nous venons de décrire.

3.5 Caractérisation des transformations latérales dans les ensembles altéritiques et pédologiques

Nous caractériserons tout d'abord les transformations latérales observées dans les deux ensembles altéritiques définis :

- L'ensemble sur schiste Gédinnien peu altéré
- L'ensemble très développé sur schiste et quartzite Gédinnien

3.5.1 Les transformations latérales dans les ensembles altéritiques

3.5.1.1 L'apparition de taches grises et orange dans l'ensemble altéritique sur schiste Gédinnien peu altéré

Dans le bas des séquences sur schiste peu altéré, on observe une modification de l'altérite de schiste. La représentation schématique de la tranchée F8 (figure 41) montre à la base de l'altérite l'apparition de taches grises et oranges. Le faciès d'altérite, transformé par l'hydromorphie présente les caractères **macroscopiques** suivants :

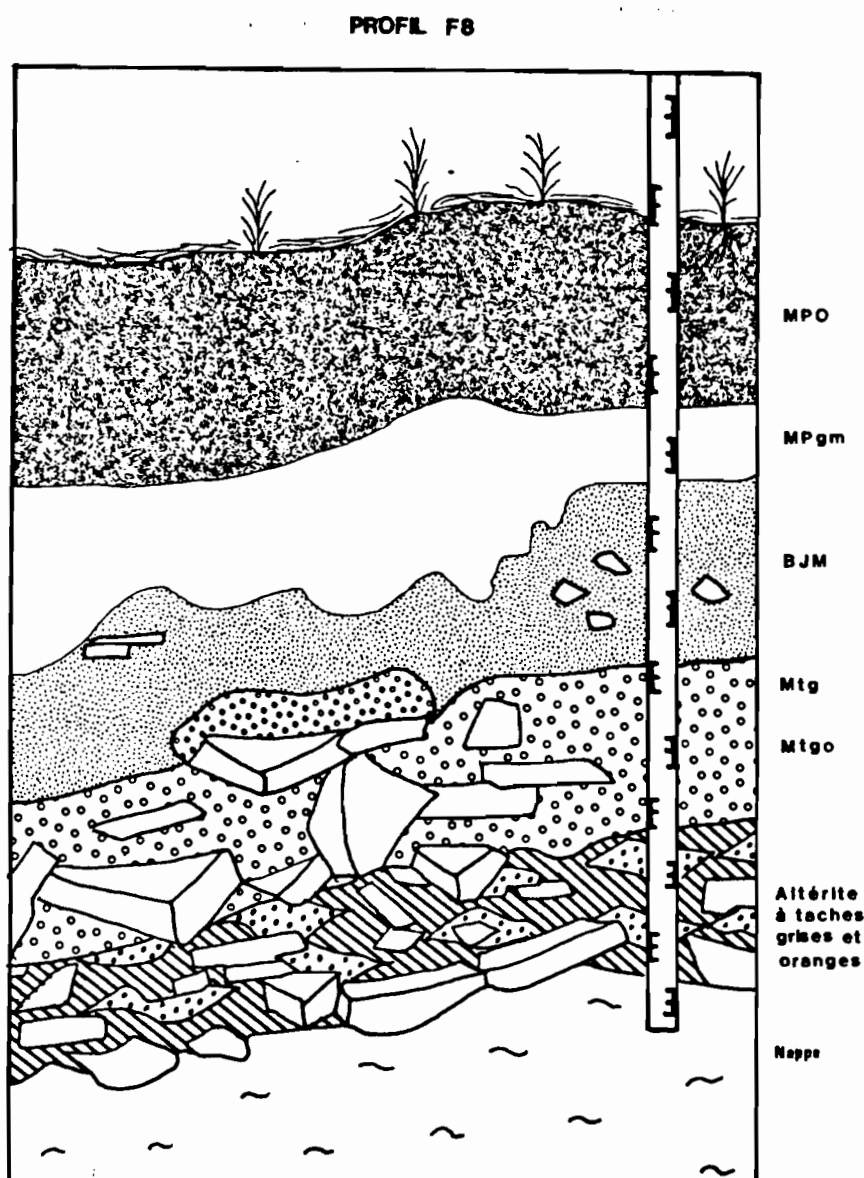


Figure 41 : Représentation schématique de la tranchée F8

- Très humide.
- Couleur de la matrice (recouvrement 10%) entre 7.5 YR 6/3 et 7.5 YR 5/4; la dernière couleur est celle du schiste altéré.
- 90 % d'éléments grossiers, blocs, cailloux, non orientés à la base du profil, deviennent subhorizontaux au sommet de l'horizon. Ce sont des schistes non altérés et altérés.
- Granulométrie de la matrice : Sablo-limoneuse.
- Structure massive.
- Porosité forte :
 - Gros canaux par où l'eau coule avec un fort débit (au mois de juillet, la fosse se remplit entièrement en quelques heures);
 - Porosité fissurale due aux cailloux; les cailloux d'orientation subhorizontale ont une face inférieure propre et une face supérieure chargée de matrice;
 - Pores tubulaires peu nombreux de moins de 1 mm de diamètre.
- Pas de racines.

- Traits pédologiques :
 - Taches grises et orange
A la partie supérieure de l'horizon les taches grises et orange ont une localisation subhorizontale (en revêtements sur les cailloux et les blocs).
A la base de l'horizon (cailloux non orientés) les taches sont réparties suivant un mode marmorisé : zones grises entourées de matériau orange avec revêtements.
 - Revêtements limoneux (10 YR 7/4) dans les gros chenaux de la porosité.

L'apparition de taches grises et orange dans cet ensemble altéritique peu développé sur schiste Gédinnien est relativement brutale. La tranchée F8 est la seule ayant été creusée dans le domaine défini par la présence de cette altérite, en raison de la pente forte de toute cette partie du versant. Mais les observations que nous avons pu faire du sommet de cet ensemble altéritique dans tous les profils creusés sur le versant montrent qu'il n'y a pas de taches grises et orange observables avant la tranchée F8. La transformation de l'ensemble I sur schiste peu altéré, caractérisée par l'apparition de taches d'hydromorphie, se réalise donc vraisemblablement en quelques mètres, en bas de versant.

3.5.1.2 Les transformations latérales de l'ensemble altéritique très développé sur schiste et quartzite Gédinniens

Le développement de "rubannements colorés" dans le faciès isaltéritique

Figures 42, on a représenté schématiquement l'ensemble altéritique observé dans les tranchées F1, F2 et F7.

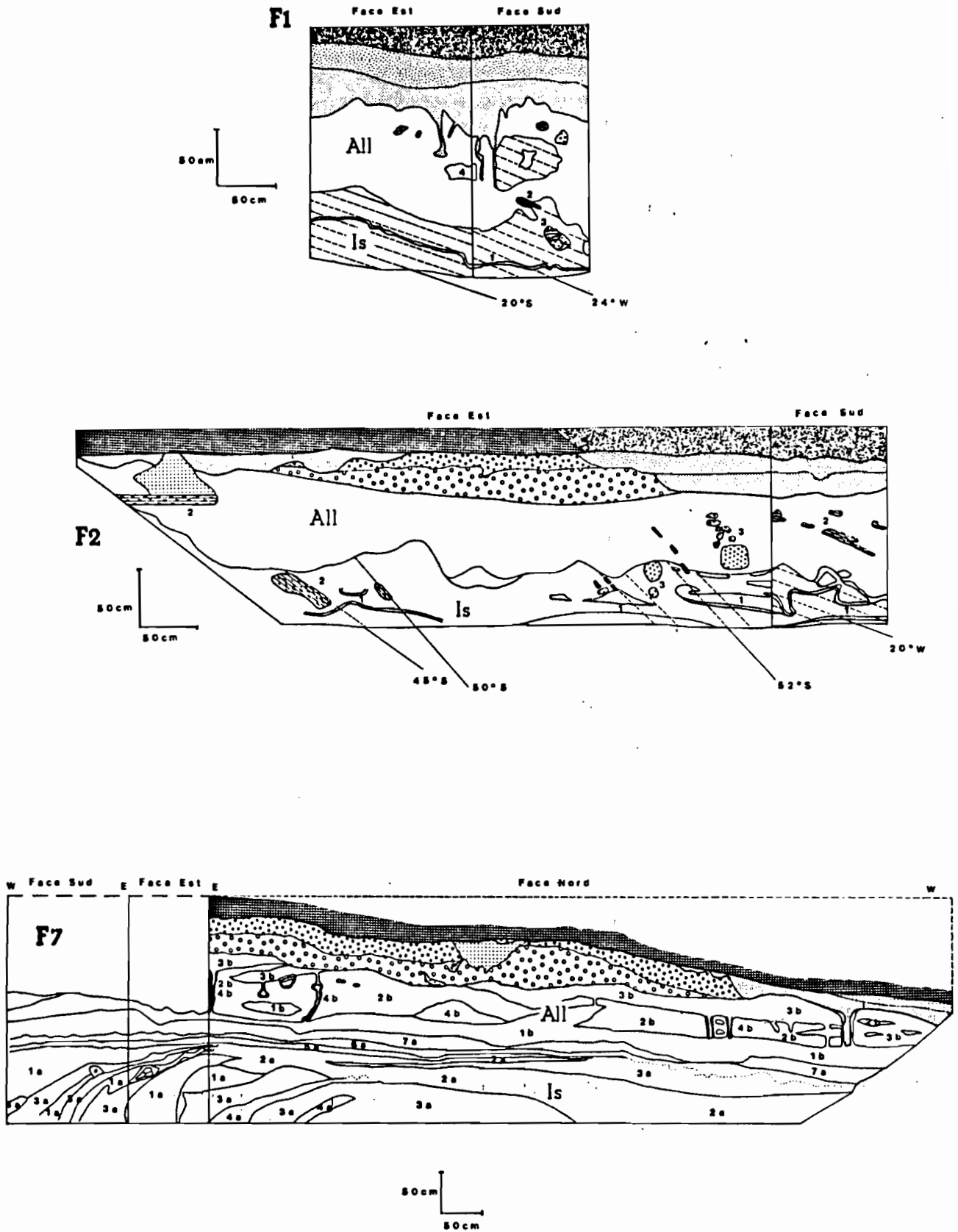


Figure 42 : Représentation schématique des tranchées F1, F2 et F7

Légende de la figure 42
Faciès isaltéritique (Is)

Tranchée F1

- * A : Couleur du schiste.
- * 1 : Rubannement horizontal, blanc à jaune vif, recoupant la schistosité.
- * 2 : Bloc de schiste.
- * 3 : Bloc de quartzite.

Tranchée F2

- * A : Couleur du schiste ; Taches gris jaune et oranges s'organisant en réseaux subhorizontaux.
- * 1 : Rubannement discontinu.

Tranchée F7

- * 1a : Altérite schisteuse violet-mauve très vif.
- * 2a : Altérite schisteuse et quartzitique en blancs très fins, marron-beige.
- * 3a : Altérite schisteuse blanche.
- * 4a : Altérite quartzitique rose vif.
- * 5a : Zonation schisteuse jaune d'or.
- * 6a : Zonation schisteuse blanche.
- * 7a : Zonation gréseuse rouge grenat, à limite inférieure indurée, irrégulière, faisant des diverticules dans la zonation blanche sous-jacente.

Faciès allotérique (All)

Tranchée F1

- * 4 : Faciès à taches grises et oranges contrastées, organisées (gris au centre et orange sur le pourtour).

Tranchée F2

- * Des taches grises et oranges affectant 50 à 60 % de la surface, en réseaux subhorizontaux de l'ordre du cm, ou en cercle, gris à l'intérieur, orange sur le pourtour.

Tranchée F7

- * 1b : Sous-horizon très cohérent, massif, gris-orange vif, limite inférieure irrégulière.
- * 2b : Sous-horizon très cohérent, massif, marron rouge terne et brun gris, très riche en éléments grossiers.
- * 3b : Sous-horizon presque identique au 1b, couleurs moins contrastées.
- * 4b : Chenaux gris olive au centre, orange à la périphérie.

On observe donc dans l'isaltérite de ces trois tranchées un rubanement coloré dont l'importance augmente de la tranchée F1 à F7, ainsi que la vivacité et le contraste des couleurs. Ce rubanement a fait l'objet d'une caractérisation microscopique.

Caractérisation microscopique des rubanements colorés

Tranchée F1

Au niveau du rubanement observé en macroscopie, on note (figure 43-a) dans l'isaltérite schisteuse un liséré de concentration de fer, présentant une polarité puisqu'il est de plus en plus concentré vers le bas. A l'intérieur de ce liséré ferrugineux, on peut observer de petites papules d'accumulation argilo-ferrugineuse.

Tranchée F2

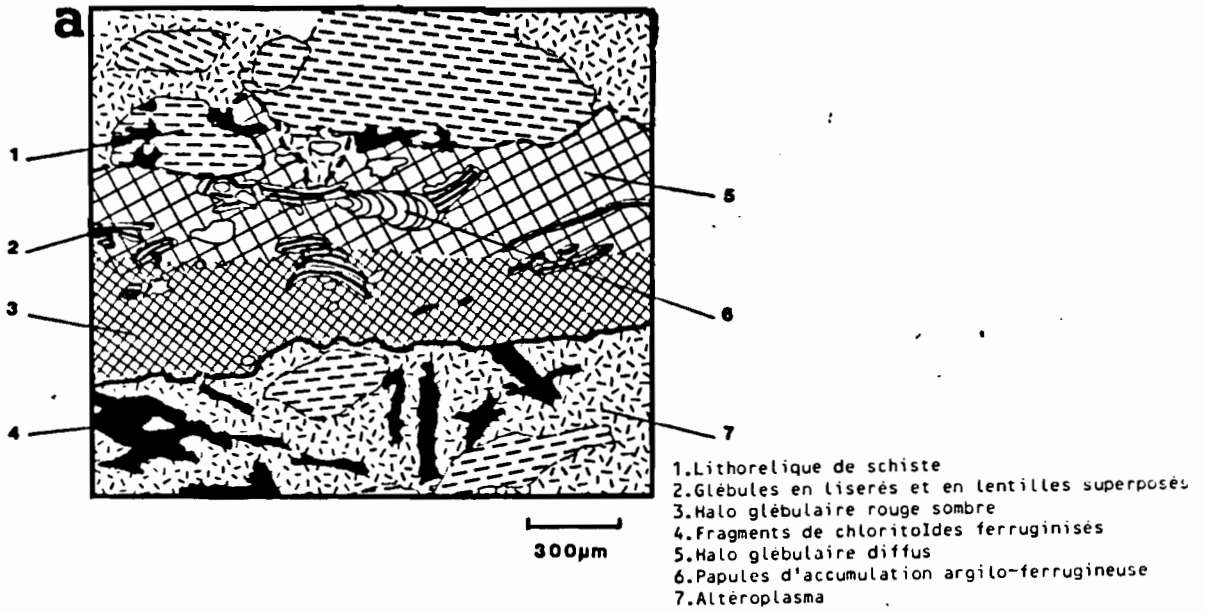
Trois lames minces ont été faites à l'intérieur du rubanement rouge-jaune observé sur le terrain.

1. La première a été réalisée dans le bas de la partie jaune du rubanement avec au dessous, l'isaltérite de schiste. On observe (figure 43-b) une accumulation diffuse du fer, sous la forme d'une glébulisation localement polarisée. On a représenté sur le dessin cette polarité, qui est une concentration croissante vers le bas à l'intérieur de loupes discontinues. Une glébulisation plus diffuse gagne vers le bas sur l'isaltérite de schiste, laissant des reliques sans accumulation de fer.
2. La seconde intéresse le haut de la zonation jaune et le bas de la partie rouge. Le bas de la zone rouge (figure 44-a) qui correspond à une glébulisation plus intense, subit un début d'éluviation; les vides sont propres et entourés d'une zone blanchie. L'accumulation du fer recommence un peu plus bas, créant ainsi le rubanement jaune.
3. La troisième se place dans la partie rouge du rubanement, et montre une polarité de la glébulisation, plus concentrée vers le bas de la lame, mais qui est ici une polarité continue.

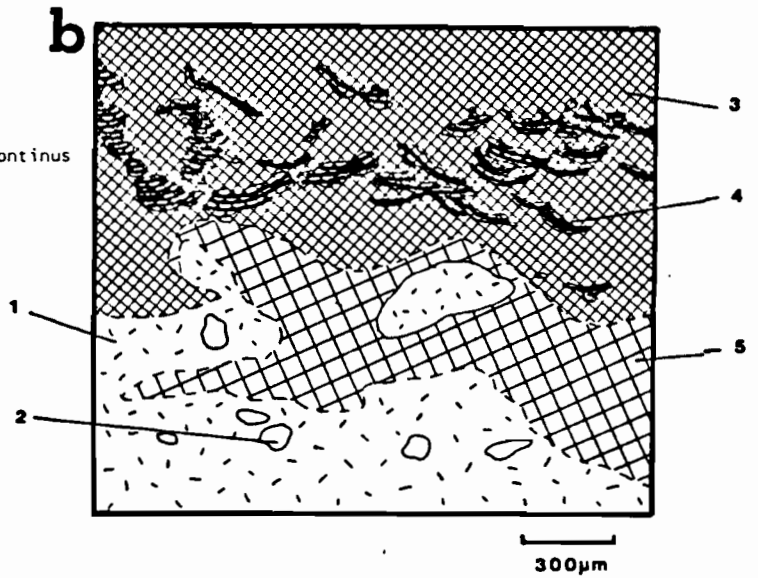
Tranchée F7

Sur le terrain, le "rubanement" qui est ici un horizon de 30 à 40 cm d'épaisseur est séparé en trois zonations 5a, 6a, et 7a, jaune, blanc, rouge. Des lames minces ont été effectuées dans chacun de ces niveaux.

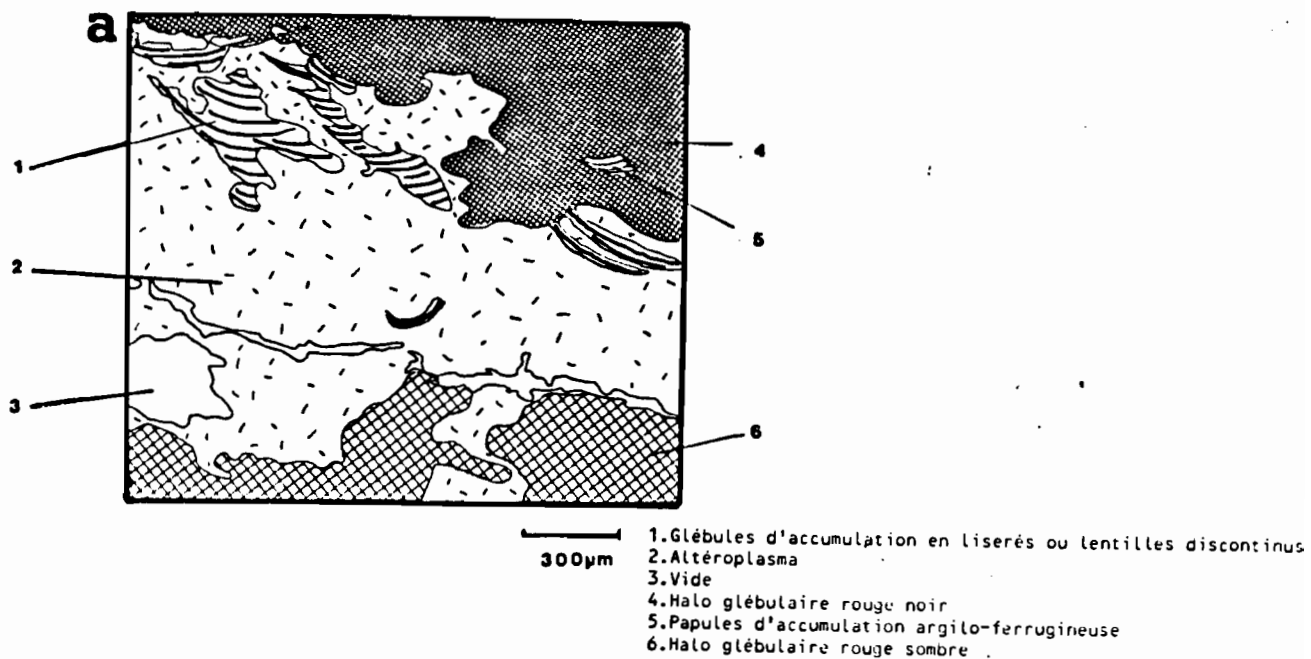
1. Zonation jaune, niveau schisteux à schistosité conservée. Elle présente (figure 44-b) une accumulation diffuse de fer, des papules argilo-ferrugineuses jaune clair en lumière naturelle, et des concentrations de fer plus denses en lisérés sub-horizontaux successifs, principalement autour de micro-fissures.
2. Zonation blanche, niveau schisteux à schistosité conservée à deux passées quartzitiques très fines, entièrement éluviée. Il s'agit d'un schiste altéré dont une grande partie du ciment muscovitique a perdu ses teintes de polarisation.
3. Zonation rouge, niveau quartzitique. Cette zonation présente (figure 44-c) une concentration du fer très dense (noire en lumière naturelle) enrobant tous les grains de quartz et les reliques de quartzite. On observe également d'épais cutanes d'accumulation argilo-ferrugineuse, dont le litage est parfois masqué par une glébulisation qui se surimpose aux cutanes eux-même.



1. Altéroplasma
2. Quartz
3. Halo glébulaire rouge sombre
4. Glébules d'accumulation en liserés ou lentilles discontinus
5. Halo glébulaire diffus



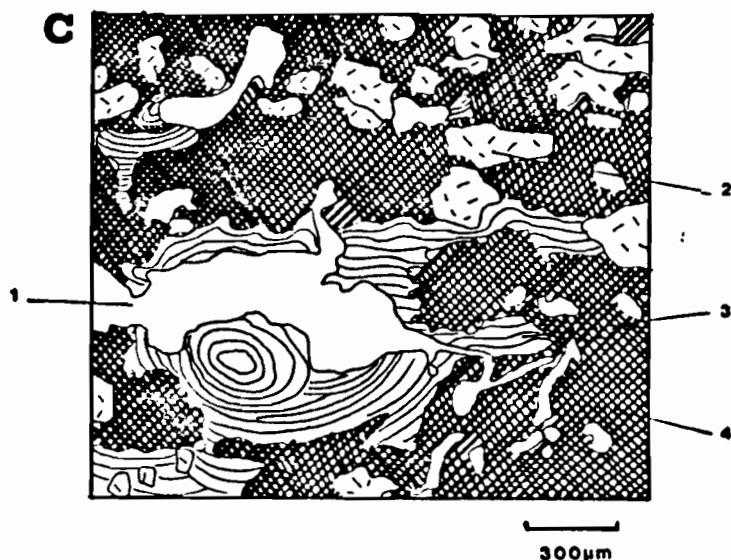
Figures 43-a et 43-b:
Analyse microscopique du développement de rubanements
colorés dans le faciès isaltéritique sur schiste et quartzite Gédinniens



1. Halo glébulaire rouge noir
2. Papules d'accumulation argilo-ferrugineuse
3. Halo glébulaire rouge sombre
4. Vide
5. Liseré ferrugineux



Figures 44-a et 44-b:
Analyse microscopique du développement de rubannements
colorés dans le faciès isaltéritique sur schiste et quartzite Gédinniens



1. Vide.
2. Quartz.
3. Cutanes d'accumulation argilo-ferrugineuse.
4. Halo glébulaire rouge noir.

Figure 44-c:
Analyse microscopique du développement de rubannements colorés dans le faciès isaltérite sur schiste et quartzite Gédinniens

Les rubannements colorés observés dans la fosse F1 à F7 au niveau du faciès isaltérite correspondent donc à une mobilisation, et une concentration du fer et probablement des argiles (papules argilo-ferrugineuses dans le liséré de la fosse F1 et F7).

1. Cette mobilisation et cette concentration du fer connaît un **développement croissant de la tranchée F1 à la tranchée F7** :
 - Tranchée F1 : Liséré (1 à 2 cm) à accumulation de fer et d'argile croissante vers le bas.
 - Tranchée F2 : Liséré en deux bandes, respectivement de haut en bas
 - rouge, glébulisation de densité croissante vers le bas,
 - jaune, glébulisation diffuse, à concentration croissante vers le bas en loupes discontinues.
 - Tranchée F7 : Succession de trois zonations (40 à 50cm au total), respectivement de haut en bas :
 - rouge, glébulisation intense et épais cutanes d'accumulation argilo-ferrugineuse,
 - blanc, éluviation,
 - jaune, glébulisation diffuse, papules argilo-ferrugineux, accumulation ferrugineuse plus intense en lisérés successifs.
2. Cette mobilisation, concentration du fer se fait à un niveau local, la concentration suivant immédiatement l'éluviation. Il peut y avoir reprise d'un niveau à concentration de fer par l'éluviation (tranchée F2, et F7)

3. Les rubannements observés dans la fosse F1 et F2 en profondeur de l'isaltérite, sont dans la fosse F7 localisés à la surface de ce faciès isaltéritique. Ils sont dans les trois cas sub-horizontaux.
4. Enfin il faut noter que ce phénomène, qui peut s'interpréter, d'après les caractères que nous venons d'énumérer, comme résultant d'un battement de la nappe, connaît son moindre développement en rupture de pente, dans la tranchée F1, un stade intermédiaire sur le plateau, dans la situation de la tranchée F2, et son stade le plus développé dans la tranchée F7, en bas de versant.

Nous allons maintenant caractériser les transformations latérales dans le faciès allotéritique.

L'apparition dans le faciès allotéritique de taches grises et orange s'organisant en réseaux

De la même façon que pour le faciès isaltéritique, la figure 42 ainsi que sa légende pour le faciès allotéritique (noté All dans les trois tranchées), vont nous permettre de dégager les éléments de caractérisation des transformations affectant ce faciès allotéritique.

L'apparition de taches d'hydromorphie grises et orange, qui se manifeste dans la tranchée F1 au niveau d'une poche décimétrique, gagne dans la tranchée F2, 50 à 60 % du faciès allotéritique. Dans la tranchée F7 ces taches, qui s'organisent déjà en F2 en réseaux sub-horizontaux, affectent entièrement les parties supérieures et inférieures de l'allotérite, en formant deux sous-horizons continus dans ce faciès allotéritique. Ces deux sous-horizons sont rejoints par des chenaux sub-verticaux montrant eux-même une polarité de la mobilisation, concentration du fer (chenaux gris au centre, orange sur le pourtour). Entre ces deux sous-horizons, un sous-horizon massif très riche en éléments grossiers, à taches diffuses grises et orange, est vraisemblablement soumis à l'éluviation. Les caractérisations microscopiques vont nous aider à interpréter ces différentes observations macroscopiques.

Caractérisation microscopique

Fosse F1

On note :

- Des glébules d'accumulation ferrugineuse.
- Des papules argilo-ferrugineuses.
- Les vides sont en majorité propres parfois entourés d'auréoles déferruginisées.

Fosse F2

On observe des figures particulières de concentration du fer; une glébulisation intense prend place sous des lithoreliques d'orientation subhorizontale (aussi bien de schiste que de quartzite), alors qu'au dessus, la matrice est beaucoup plus claire en lumière naturelle. Ceci peut témoigner d'une accumulation de fer reprise par une éluviation qui laisse une glébulisation témoin quand celle ci est protégée par une relique.

Fosse F7

Des lames minces effectuées dans chacun des niveaux 1b, 2b et 3b montrent:

1. Niveau 1b, une partie entièrement éluvée qui surmonte une partie très ferruginisée.
2. Niveau 2b, des papules argilo-ferrugineuses, une matrice claire avec quelques glébules, et des liserés ferrugineux autour des vides indiquant une migration du fer vers la porosité.
3. Niveau 3b : Glébules d'accumulation du fer en liserés sub-horizontaux épais.

L'analyse microscopique confirme que les caractères macroscopiques observés sur le terrain sont bien liés à des phases successives d'éluviation et de concentration du fer.

- Dans la tranchée F1, vides propres entourés d'auréoles déferruginisées au milieu d'une matrice marquée par la glébulisation.
- Dans la tranchée F2, plasma clair au dessus, glébulisé au dessous des lithoreliques, pouvant s'interpréter également comme une phase d'éluviation reprenant une accumulation de fer antérieure.
- Dans la tranchée F7, également alternance de caractères d'éluviation et de concentration du fer. Le sous-horizon 2b présente bien des caractères d'éluviation.

Des analyses chimiques de ces différents faciès allotéritiques dans les tranchées F1 à F7 permettent de préciser ces transformations

Analyses chimiques dans les différents faciès allotéritiques

	A L L O T E R I T E S					
	F1-B	F1-B4	F2	F7-1b	F7-2b	F7-3b
CALCIUM	0.46	0.33	0.39	0.21	0.39	0.36
MAGNESIUM	0.21	0.46	0.64	0.15	0.30	0.28
POTASSIUM	2.65	2.80	3.48	5.06	3.10	2.61
SODIUM	0.46	0.71	1.03	0.34	0.67	0.36
FER	5.91	5.99	7.03	7.78	8.20	9.16
ALUMINIUM	15.61	13.99	17.31	25.71	19.99	16.41
SILICIUM	74.67	75.69	70.10	60.75	67.35	70.80

Tableau n° 7

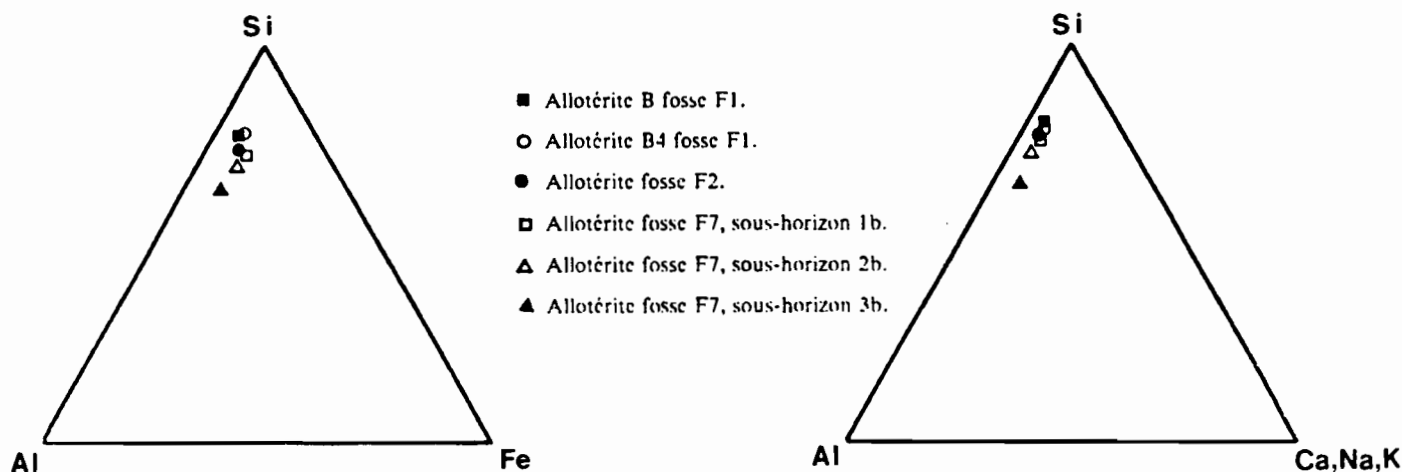


Figure 45 : Localisation dans un diagramme triangulaire silice - aluminium - fer, de différents faciès allotéritiques.

Les teneurs en silice, aluminium, fer ou Ca Na K, des différents faciès allotéritiques dans les tranchées F1 à F7 sont replacés dans des diagrammes triangulaires. Les points obtenus sont très proches les uns des autres, sauf les points des sous-horizons de la tranchée F7-2b, 3b et 4b. Les différences entre ces sous-horizons portent sur les pourcentages relatifs de silice et d'aluminium, et ceux-ci varient dans le même sens que ceux de l'isaltérite à l'allotérite dans la tranchée F1 (figure 25). Ces différences tiennent donc vraisemblablement à l'altération croissante du bas vers le haut de la tranchée. La seule variation chimique globale pouvant caractériser la transformation par l'hydromorphie de ce faciès allotéritique serait une augmentation relative faible mais constante des teneurs en fer et aluminium avec les échantillons de plus en plus transformés, et une diminution relative en silice. Cette variation chimique pourrait s'expliquer par une augmentation des ferri-argilanes (Al, Fe, Si combinés), et donc une diminution relative de Si (quartz).

3.5.1.3 Conclusion : Les transformations latérales dans les ensembles altéritiques

Ces transformations se caractérisent donc par :

- L'apparition de taches d'hydromorphie grises et orange dans l'ensemble altéritique sur schiste Gédinnien peu altéré.
- Des mobilisations et des concentrations du fer prenant l'aspect de zonations colorées sub-horizontales dans le faciès isaltéritique de l'ensemble très développé sur schiste et quartzite Gédinniens.

- Des mobilisations et des concentrations du fer sous forme de taches grises et orange organisées en réseaux sub-horizontaux ou en sous-horizons dans le faciès allotéritique de ce dernier ensemble.

Le passage latéral n'a pu être étudié dans le domaine sur schiste peu altéré, vu l'impossibilité de creuser des tranchées sur le versant à forte pente; mais il semble d'après les seules observations sur profils, (limitées au sommet de cet ensemble altéritique), que l'apparition des taches intervienne très brutalement, en bas de versant et début de replat.

Dans le domaine sur altérite très développée de schiste et quartzite Gédinniens, la transformation semble, sinon s'installer plus progressivement, du moins apparaître dans les situations de versant. En effet, dès la tranchée F1, située en rebord de plateau, des signes d'hydromorphie dans l'ensemble altéritique sont présents : liséré d'accumulation argilo-ferrugineuse à concentration croissante vers le bas dans le faciès isaltéritique, et chenal présentant une mobilisation, concentration du fer dans le faciès allotéritique. Sur le plateau, à l'amorce d'un thalweg transversal représenté sur le bloc diagramme figure 9, la tranchée F2 présente un stade plus développé de la transformation : zonation colorée centimétrique d'accumulation du fer dans le faciès isaltéritique, et mobilisation, concentration du fer affectant 50 à 60 % du faciès allotéritique. Vers l'aval, les quatre tranchées réparties sur le versant (F3 à F6), présentent un ensemble altéritique identique à celui de la tranchée F1. La transformation ne se développe donc pas le long du versant. La tranchée F7 en bas de versant et début de replat, présente un stade très développé de la transformation : sous-horizons colorés témoins d'alternances d'éluviation du fer puis de concentration intense, atteignant 60 cms d'épaisseur, et faciès allotéritique entièrement marqué par des phénomènes d'éluviation et de concentration du fer. En bas de versant, cette transformation apparaît également de façon brutale, entre la tranchée F6 et la tranchée F7, très peu éloignées l'une de l'autre. Sur le replat, on reconnaît par la disparition du faciès isaltéritique, un troisième ensemble altéritique

3.5.2 Caractérisation de l'ensemble altéritique III

Caractérisation macroscopique

- Epaisseur : 1m30 dans la tranchée F9 (roche en place non atteinte)
- Humide
- Couleurs orange et gris, organisées en lits horizontaux, donnant un aspect feuilleté.
- 60 % d'éléments grossiers : Blocs de 10 à 20 cm de diamètre, cailloux, graviers de schiste et de quartz, sans orientation. La face inférieure des blocs est propre, la face supérieure est chargée de matière.
- Granulométrie sableuse.
- Structure massive.
- Porosité importante, tubulaire (plusieurs mm)
- Traits pédologiques : Revêtements rouge orange dans la porosité des zones orange; la porosité des zones grises est lavée.

Caractérisation microscopique

L'observation de lames minces effectuées dans le niveau altéritique de la fosse F9 permet de mettre en évidence diverses différenciations successives, liées à des processus :

D'accumulation, glébulisation (figure 46-a)

Des cutanes épais argilo-ferrugineux, bordant tous les vides, sont souvent entourés, parfois pris par une accumulation diffuse à dense d'oxydes de fer.

De contraintes (figure 46-a)

Une zone de plasma sépique indique que des contraintes se sont exercées sur ce plasma, provoquant une réorganisation des particules argileuses.

D'autre part, figure 46-b, des concentrations de plasma non cutaniques, orientées, parallèles les unes aux autres et sub-horizontales représentent également des séparations du plasma sous l'effet de contraintes.

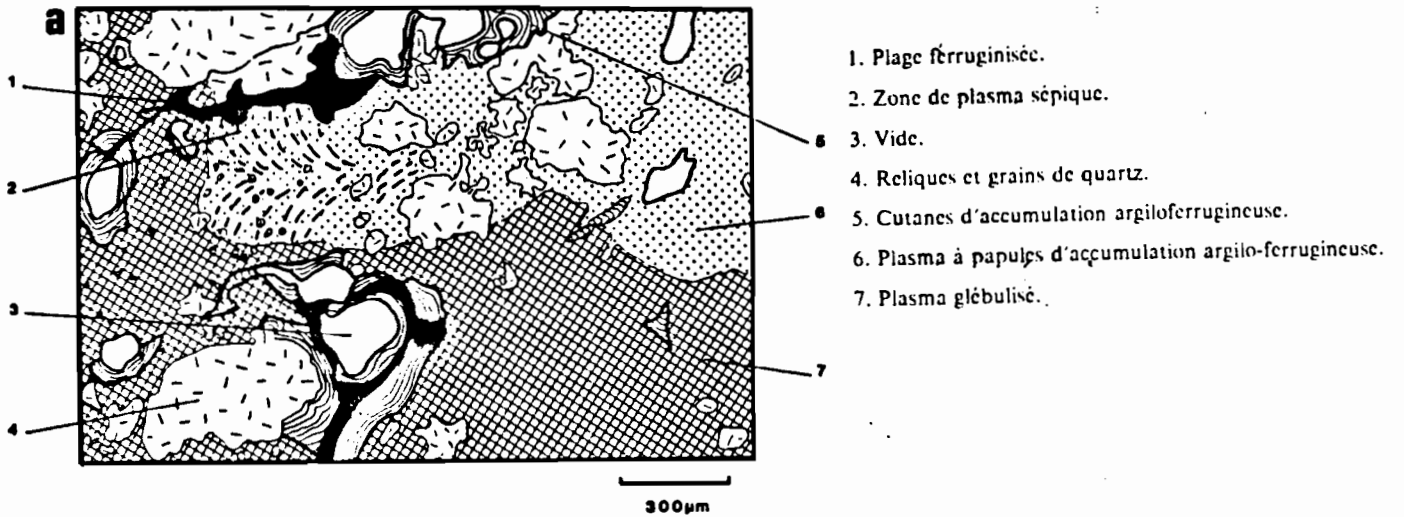
Ces séparations de plasma recourent des glébules ferrugineux indiquant que ces contraintes sont postérieures à la glébulisation. En outre, une partie du glébule étant remplacé par ces séparations plasmiques, on peut en déduire qu'il y a eu perte en fer au moment de cette réorganisation du plasma.

De ségrégation du fer vers les vides et d'oxydation (figure 46-a)

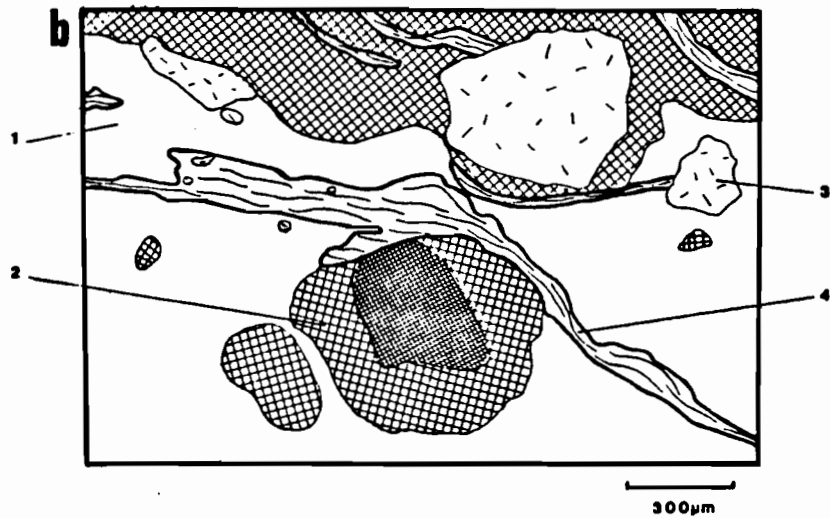
Une ségrégation du fer autour d'une micro-fissure se localise en haut et à gauche du dessin. Cette migration du fer vers la porosité et son oxydation recoupe toutes les structures préalablement décrites, structures d'accumulation argilo-ferrugineuse, de glébulisation et de réorganisation du plasma.

D'accumulation ultime (figure 46-c)

Un cutane argilo-ferrugineux remplit un vide fissural oxydé. A d'autres endroits des lames minces, des accumulations ultimes de matière organique occupent la porosité.



1. Plasma à squelette quartzeux abondant.
2. Glébulé.
3. Reliques et grains de quartz.
4. Accumulation plasmique non cutanique.



Figures 46-a et 46-b: Analyse microscopique de l'altérite III;
les processus suivants sont mis en évidence
a-Accumulation, glébulisation, contraintes,
ségrégation du fer vers la porosité,
b-Séparations plasmiques sous l'effet de contraintes,

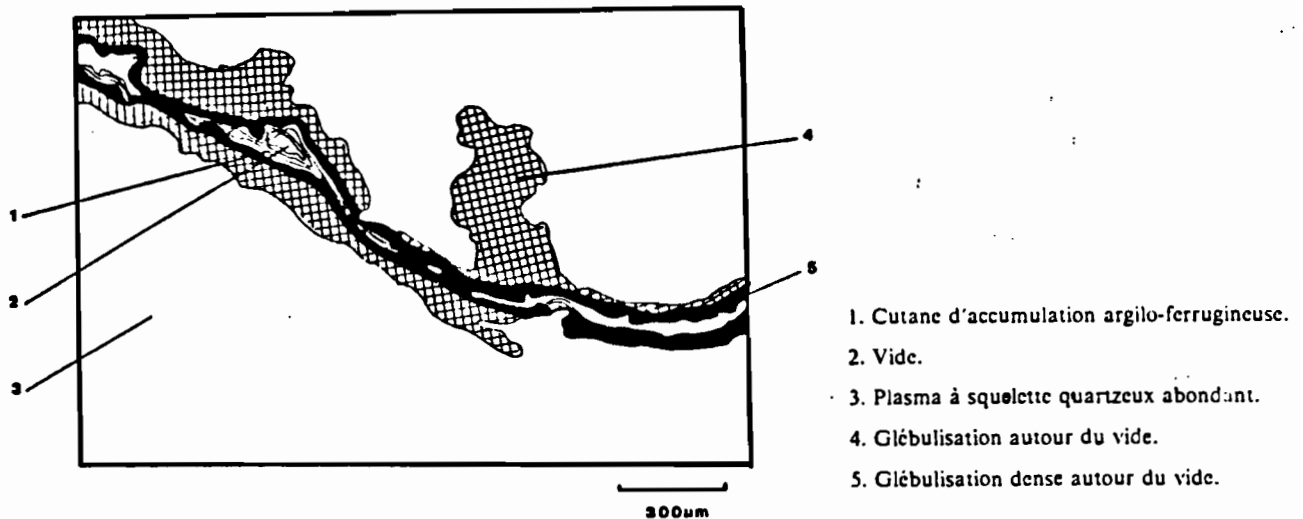


Figure 46 c: Analyse microscopique de l'altérite III
Ségrégations du fer vers la porosité et accumulations ultimes

Le sommet de cette altérite est souvent interprété par les chercheurs spécialistes du Massif Armoricain comme un horizon B dégradé (communication personnelle de P. AUROUSSEAU). L'observation de la tranchée F7, où le suivi de la limite supérieure de l'altérite et son relevé géométrique montre bien une diminution d'épaisseur des horizons supérieurs, ainsi que l'observation des lames minces où le matériau semble proche de celui de l'altérite non transformée, nous ont fait choisir l'hypothèse précédente car on n'a pas observé de B non transformé plus haut dans la séquence. Mais la discussion reste ouverte et les études ultérieures élucideront ce point.

3.5.3 Les transformations latérales dans les ensembles pédologiques

Comme le montre la schématisation du plan suivi, figure 15, nous allons étudier maintenant les nouveaux horizons pédologiques différenciés sur les ensembles altéritiques déjà transformés, sur le replat du haut de plateau et en bas de versant. Leurs caractérisations macroscopiques et microscopiques effectuées, nous nous attacherons à caractériser les transformations latérales entre les horizons différenciés sur altérite non transformée et ces nouveaux horizons définis. De l'altérite vers la surface, nous étudierons tout d'abord l'horizon Mtgo, puis l'horizon Mtg, enfin l'horizon superficiel OM.

3.5.3.1 L'horizon Mtgo

Caractérisation macroscopique

- Limite inférieure régulière, très peu nette, très progressive avec l'allotérite.
- Peu humide.
- Couleur de la matrice (7.5 YR 5/6).

- 20 à 30 % de cailloux et graviers de schiste, quartzite.
- Structure massive
- Porosité moyenne à assez forte, tubulaire, fine.
- Racines jusqu'à 3mm de diamètre.
- Traits pédologiques :
 - Taches grises et orange dans la masse recouvrant environ 20 % de l'horizon; quelques grandes taches décolorées de 10 à 20 cm de diamètre.
 - Taches grises d'accumulation de limons, en revêtements dans la porosité.

Caractérisation microscopique

En microscopie optique, on observe dans l'horizon Mtgo une accumulation argilo-ferrugineuse intense sous forme de nombreux cutanes très développés, ainsi qu'une glébulisation beaucoup plus marquée que dans celle de l'horizon BCP.

Caractérisation de la transformation de l'horizon BCP à l'horizon Mtgo

Les caractères macroscopiques

Les caractères qui définissent la transformation apparaissent dans l'horizon BCP en noyaux, puis de manière diffuse dans la masse de l'horizon, puis gagnent tout l'horizon Mtgo en laissant des reliques de l'horizon BCP. Ces caractères macroscopiques sont les suivants :

- Une perte de la structure.
- L'apparition de taches grises et orange dans la masse de l'horizon.

Analyses granulométriques

Figure 47, sont présentées les analyses granulométriques de l'horizon BCP et de l'horizon Mtgo.

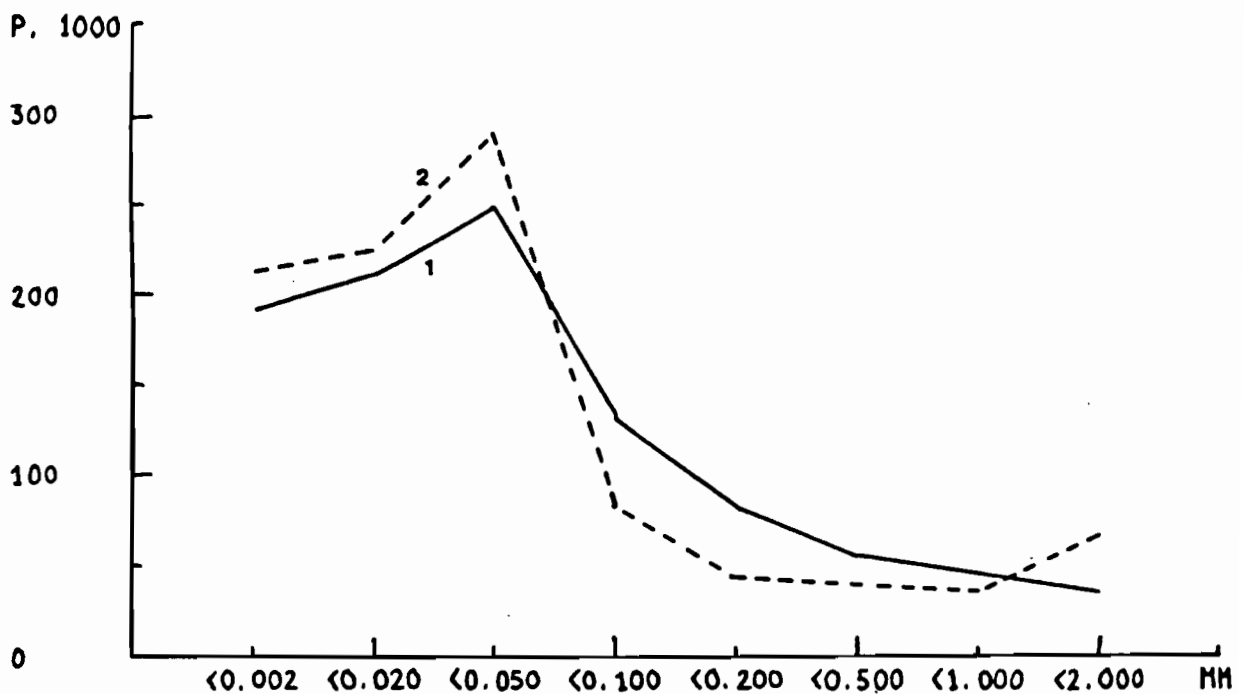


Figure 47 : Courbes représentant les pourcentages de chaque fraction granulométrique des horizons suivants :

1. Horizon BCP
2. Horizon Mtgo

Dans l'horizon Mtgo, il y a enrichissement en argile et limons fins et un appauvrissement relatif en limons grossiers et sables fins, par rapport à l'horizon brun clair polyédrique.

3.5.3.2 L'horizon Mtg

Caractérisation macroscopique

- Limite inférieure peu nette, transition sur 5 à 10 cm.
- Légèrement humide.
- Couleur 10 YR 6/4.
- 10 à 20 % d'éléments grossiers, blocs, cailloux de schiste peu ou non altérés.
- Granulométrie limono-sableuse.
- Structure massive
- Porosité assez importante, pores tubulaires inférieurs à 0.1 mm de diamètre.
- Racines peu nombreuses, inférieures à 1 mm de diamètre.
- Traits pédologiques :
Taches claires et grises dans la masse de l'horizon

Caractérisation de la transformation de l'horizon BJM à l'horizon Mtg

La transformation se fait de la même façon que pour les horizons sous-jacents, en noyaux puis diffuse dans la masse, laissant des reliques de l'horizon BJM. Elle se caractérise par

Les caractères macroscopiques suivants :

- La perte de la structure microgrumeleuse.
- L'éclaircissement dans la masse de l'horizon.
- L'apparition de taches claires puis grises.

Analyses granulométriques

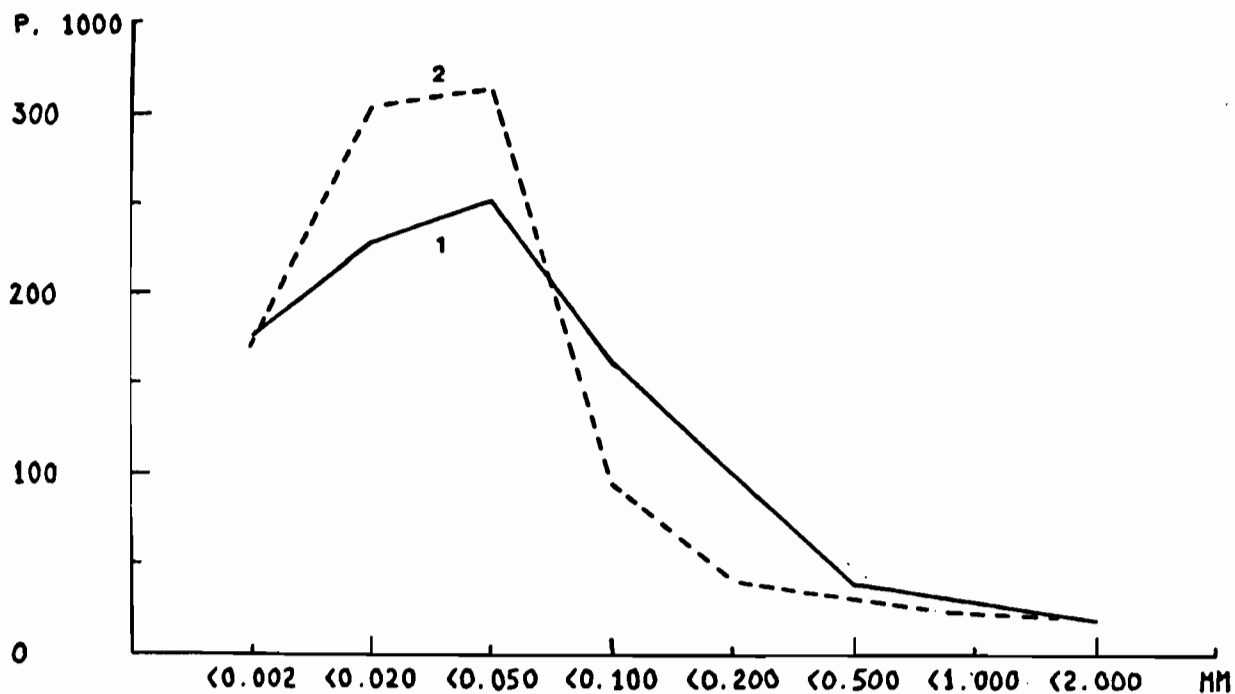


Figure 48 : Courbes représentant les pourcentages de chaque fraction granulométrique des horizons suivants :

1. Horizon BJM
2. Horizon Mtg

Les courbes granulométriques comparées de l'horizon BJM et de l'horizon Mtg montrent la même évolution que celle observée entre l'horizon BCP et l'horizon Mtgo : Une augmentation relative des limons fins et une diminution des limons grossiers et sables fins dans l'horizon massif à taches grises.

3.5.3.3 *L'horizon OM*

Caractérisation macroscopique

- Epaisseur d'une vingtaine de cms.
- Limite inférieure irrégulière peu nette.
- Couleur 10 YR 4/2.
- Eléments grossiers : 5 % de graviers principalement de quartz de formes irrégulières, non altérés.
- Granulométrie limono-sableuse.
- Structure massive.
- Porosité faible, pores tubulaires de 0.1 à 1 mm de diamètre.
- Racines nombreuses, entourées de gaines rouille.

Les caractères de la transformation entre OG et OM

- Perte de la structure grumeleuse. L'horizon devient massif, compact.
- Apparition de gaines rouille autour des racines.

3.5.3.4 *Conclusion : Analyse de la répartition spatiale des horizons Mtgo, Mtg et OM*

Le passage latéral entre l'ensemble micropodzolique et les horizons affectés par l'hydromorphie n'a pas été étudié. Les transformations nous sont apparues particulièrement complexes et impossibles à caractériser compte tenu des moyens utilisés et sans une étude minéralogique et géochimique appropriée.

Pour définir et localiser les limites d'apparition des horizons Mtgo et Mtg le long des séquences, nous avons utilisé surtout sur le terrain le caractère de structure du sol, car le caractère apparition des taches est extrêmement progressif. Quand des taches apparaissent macroscopiquement au niveau d'un profil, elles sont déjà visibles à la loupe un peu plus haut dans la séquence. La limite a été tracée quand le caractère massif apparaît dans l'horizon, bien que le caractère macroscopique de la structure soit également soumis à l'échelle d'observation. Ces limites ne constituent donc en aucune façon des discontinuités, mais sont plutôt équivalentes à des repères jalonnant un stade estimé de la transformation d'un horizon en un autre horizon.

Si la position de ces limites le long des séquences peut varier vraisemblablement de un à quelques mètres selon les jalons choisis, par contre leur forme a été tracée grâce à de nombreuses observations où l'horizon BCP surmonte l'horizon Mtgo, et où l'horizon BJM subsiste au dessus de l'horizon Mtg. On a pu également observer au dessus de l'horizon Mtg des reliques d'horizon BJM, en aval de la disparition de celui-ci sous forme d'un horizon continu. La disparition de l'horizon BJM et de l'horizon BCP peut s'effectuer en quelques mètres, et la limite a alors été tracée avec une inclinaison faible, ou bien cette disparition est "rapide" et la limite a alors une forte inclinaison.

La géométrie de ces limites pourrait alors permettre d'énoncer certaines conclusions sur la dépendance ou l'indépendance de ces différentes transformations et sur leur hiérarchie :

- Ces limites ne sont jamais des discontinuités, mais des jalons dans une variation progressive et continue. Ceci permet d'affirmer, qu'il n'y a pas juxtaposition d'unités d'organisation différentes mais bien transformation d'horizons en d'autres horizons.
- Le fait que les horizons Mtgo, Mtg et OM n'apparaissent que sur des ensembles altéritiques déjà transformés; que l'apparition de la transformation se fait toujours par la base des différents horizons, montre que la transformation dans les horizons pédologiques est dépendante de la transformation dans les ensembles altéritiques et que cette transformation a un sens de propagation vertical remontant.
- La forme de ces limites, la disposition des reliques d'horizon BJM au sommet de l'horizon Mtg, permet de penser que ce sont les horizons marqués par l'hydromorphie qui se développent aux dépens des horizons "sains". Les travaux de ROUSSEL, AUROUSSEAU, BACHELARD et ROBAIN (1985), ont montré le même sens d'évolution.

Ces différentes limites sont marquées sur les séquences H, G et C, figure 16 et dans la tranchée F2, figure 42.

Ces limites ont été suivies spatialement, et les courbes sont tracées figure 49 et 50. Avant la courbe 1, l'horizon BCP existe seul; entre les courbes 1 et 2 l'horizon BCP est superposé à l'horizon Mtgo; après la courbe 2 l'horizon Mtgo subsiste seul.

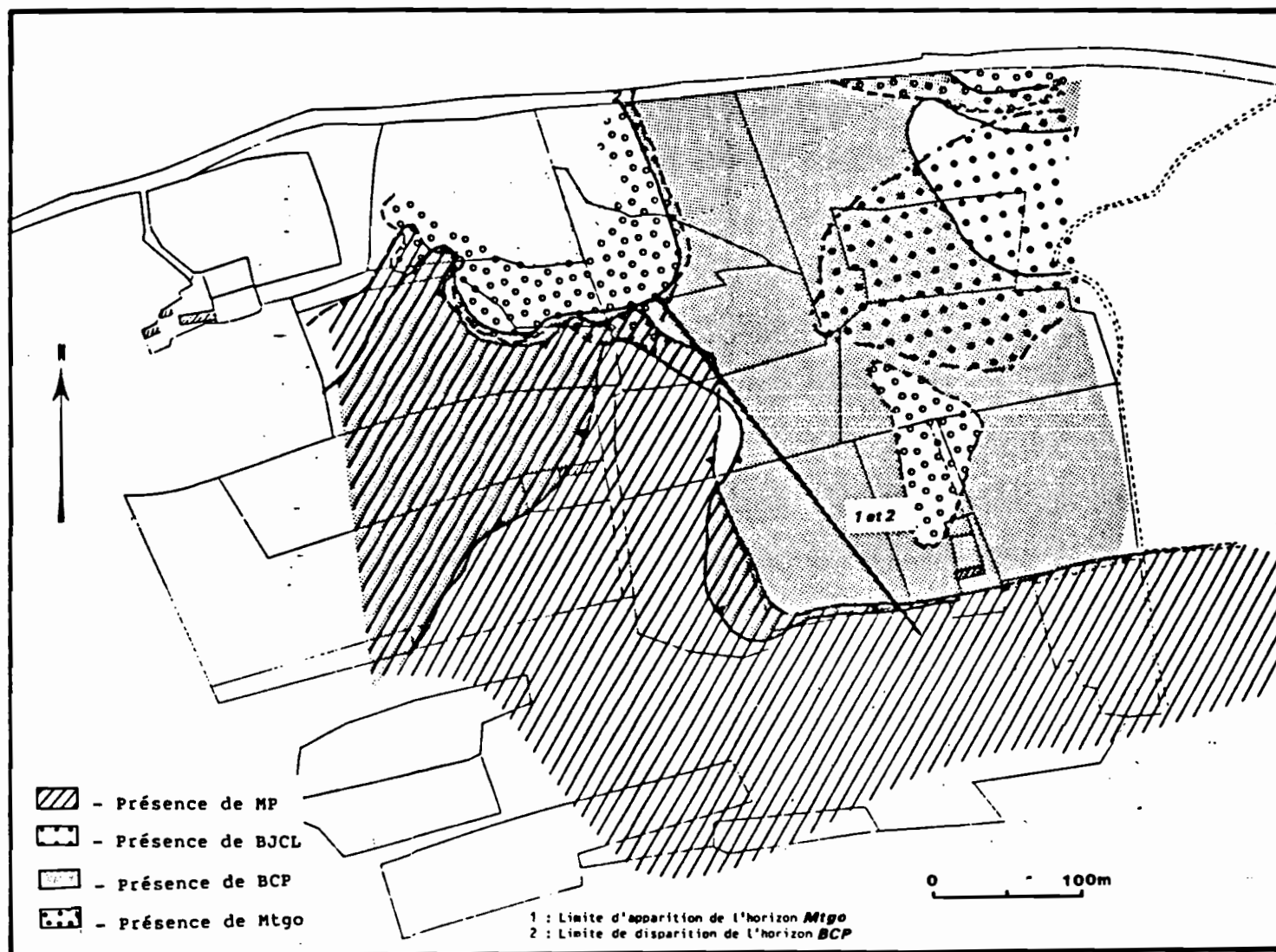


Figure 49 : Courbes de répartition spatiale marquant l'apparition de l'horizon *Mtgo* (1) et la disparition de l'horizon *BCP* (2).

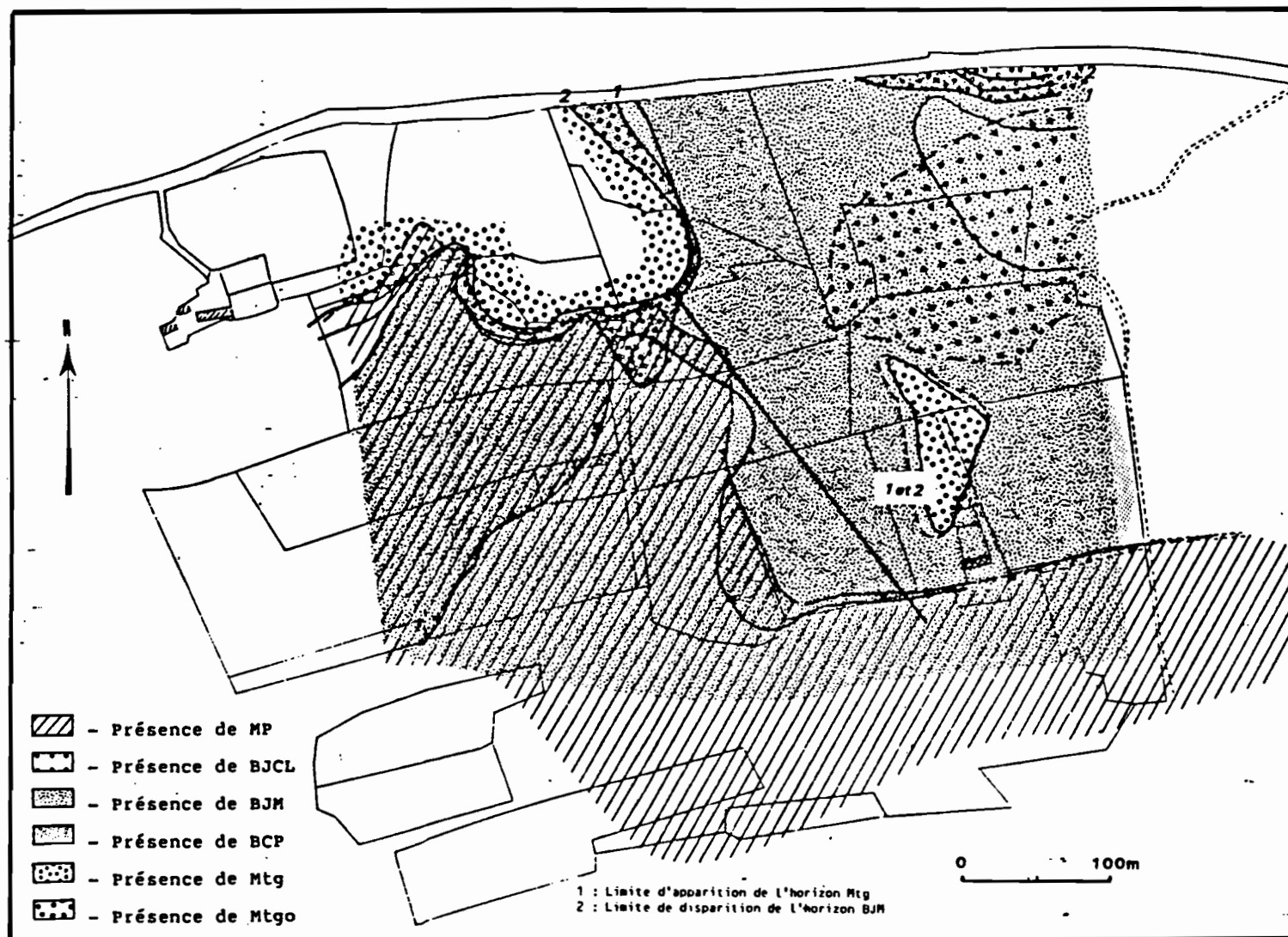


Figure 50 : Courbes de répartition spatiale marquant l'apparition de l'horizon Mtg et la disparition de l'horizon BJM

Nous venons de caractériser une transformation par l'hydromorphie, dont le sens de propagation est vertical remontant, qui affecte les ensembles altéritiques I et II, puis les horizons pédologiques différenciés sur ces deux domaines, les nouveaux horizons affectés par l'hydromorphie se développant aux dépens des horizons "sains".

Sur la figure 14 (toposéquence synthétique présentant les différentes unités d'organisation reconnues), apparaissent sur le replat du bas de versant de nouveaux horizons pédologiques, notés 9 et 10, sur l'ensemble altéritique III. Nous allons maintenant caractériser ces nouvelles unités d'organisation, et étudier leurs relations avec celles précédemment définies.

3.5.4 Les horizons pédologiques GMto et GM

Nous allons caractériser maintenant les horizons gris massif à taches orange (GMto) et gris massif (GM) qui sont représentés figure 51.



- 1.OM
- 2.Taches de matière organique
- 3.GM
- 4.GMto
- 5.Altérite feuilletée

Figure 51 : Les horizons du profil G12

3.5.4.1 L'horizon GMto

Caractérisation macroscopique

- Epaisseur d'une vingtaine de centimètres
- Légèrement humide.
- Couleur gris clair (5 Y 7/1).
- 2 à 5 % d'éléments grossiers, graviers, cailloux de quartz.
- Granulométrie limono-sableuse.
- Structure massive.
- Porosité faible.
- Très peu de racines.
- Taches de matière organique.
- Taches ferrugineuses, couleur marron rouge clair (5 YR 5/8).

Caractérisation microscopique

En microscopie optique, on observe une glébulisation intense et une ségrégation du fer autour des vides.

3.5.4.2 L'horizon GM

Caractérisation macroscopique

- Epaisseur d'une vingtaine de cms.
- Légèrement humide.
- Couleur gris clair (5 Y 7/1).
- Teneur en éléments grossiers inférieure à 2 % de graviers de quartz.
- Granulométrie limono-sableuse.
- Structure massive.
- Porosité faible.
- Racines peu nombreuses.
- Taches de matière organique en traînées verticales et horizontales.

Caractérisation microscopique

Les taches de matière organique en traînées verticales et horizontales qui forment un réseau dans l'horizon GM, ont pu être observées au microscope optique. Il ne s'agit pas d'une accumulation de matière organique, comme on aurait pu le penser sur le terrain, mais d'une imprégnation du plasma par la matière organique autour de certaines fissures.

De même, en microscopie optique, on peut aisément distinguer l'horizon MPgm et l'horizon GM. L'horizon MPgm présente un squelette quartzeux très abondant alors que l'horizon GM présente un plasma très développé, riche en limon et argile, et un squelette quartzeux moyennement abondant.

3.5.4.3 Analyses chimiques de l'ensemble altéritique III et des horizons GM et GMto

Pour l'ensemble altéritique, il n'y a pas de différence importante entre les analyses chimiques totales effectuées dans les niveaux d'allotérite de la fosse F7 et celles effectuées dans l'altérite de la fosse F9.

	ALTERITE (Profil G12)		HORIZON GMto (Profil G12)		HORIZON GM (Profil G12)	
	%	P. 100%	%	P. 100%	%	P. 100%
CALCIUM	0.14	0.31	0.17	0.37	0.15	0.33
MAGNESIUM	0.24	0.53	0.16	0.35	0.13	0.29
POTASSIUM	1.50	3.31	1.49	3.29	1.41	3.12
SODIUM	0.37	0.82	0.42	0.93	0.42	0.93
FER	3.96	8.73	1.23	2.71	1.00	2.21
ALUMINIUM	7.53	16.61	6.62	14.62	6.15	13.62
SILICIUM	31.60	69.69	35.20	77.72	35.90	79.49
TOTAL	45.34	99.99	45.29	99.99	45.16	99.99

Tableau n° 8

Si on compare les analyses totales des horizons GMto et GM avec celles effectuées dans l'altérite, on constate une diminution relative en fer importante. On peut également comparer les analyses chimiques totales et les analyses granulométriques des horizons BJM, Mtg et GM, puisqu'on observe des passages latéraux entre ces trois horizons :

3.5.4.4 Comparaison des analyses chimiques et granulométriques des horizons BJM, Mtg, et GM

	HORIZON BJM (Tranchée F1)		HORIZON Mtg (Tranchée F2)		HORIZON GM (Profil G12)	
	%	P. 100%	%	P. 100%	%	P. 100%
CALCIUM	0.17	0.37	0.18	0.39	0.15	0.33
MAGNESIUM	0.10	0.21	0.23	0.60	0.13	0.29
POTASSIUM	1.12	2.44	1.45	3.13	1.41	3.12
SODIUM	0.32	0.70	0.50	1.08	0.42	0.93
FER	2.50	5.44	2.61	5.63	1.00	2.21
ALUMINIUM	5.00	10.89	6.85	14.79	6.15	13.62
SILICIUM	36.70	79.94	34.50	74.48	35.90	79.49
TOTAL	45.91	99.99	46.32	99.99	45.16	99.99

Tableau n° 9

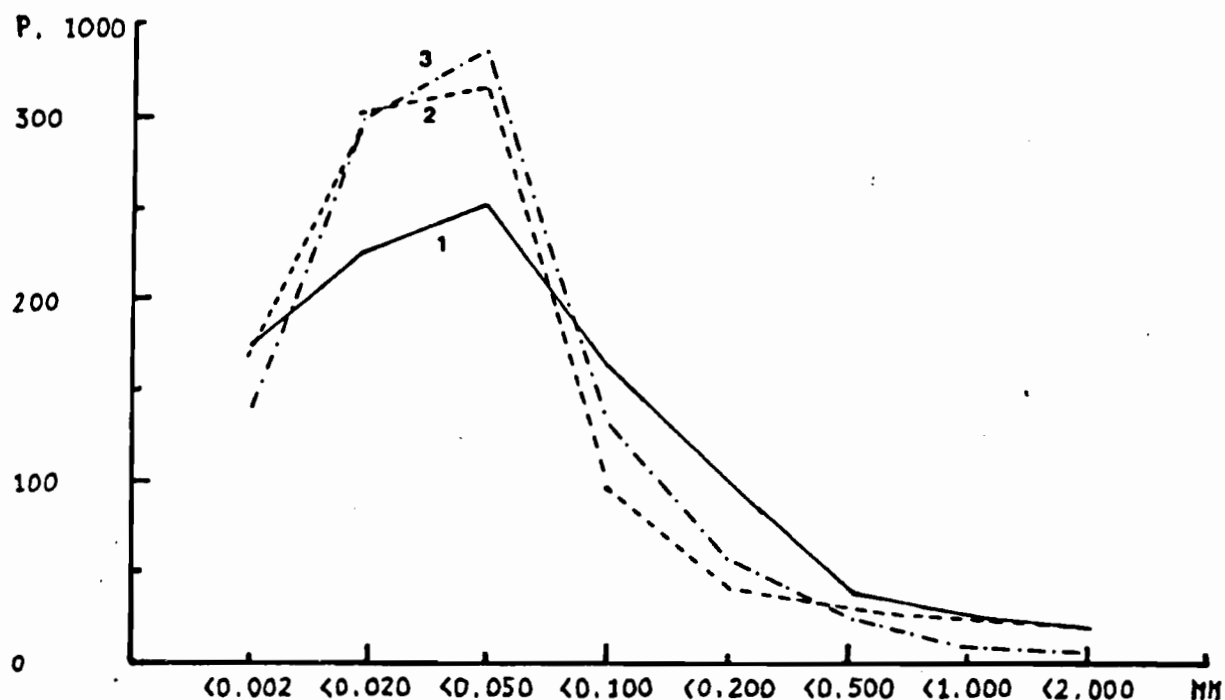


Figure 52 : Courbes représentant le pourcentage de chaque fraction granulométrique des horizons suivants :

1. L'horizon BJM (fosse F1)
2. L'horizon Mtg (fosse F2)
3. L'horizon GM (profil G12)

Pour la composition chimique totale, l'horizon Mtg est très peu différent de l'horizon BJM, alors qu'il y a une forte diminution de la teneur en fer dans l'horizon GM par rapport aux deux premiers horizons; on notera que macroscopiquement, les deux horizons brun présentent également beaucoup moins de différences entre eux qu'avec l'horizon GM.

Du point de vue de la distribution granulométrique au contraire, ce sont les deux horizons massifs qui présentent sensiblement les mêmes courbes, marquant une augmentation relative en limons fins par rapport à l'horizon BJM.

3.6 Conclusion : Relations latérales entre les trois domaines et répartition spatiale

3.6.1 Relations latérales

Du domaine I au domaine III

Le passage du domaine I au domaine III est en général très brutal. Figure 53, on donne comme exemple une partie de la séquence H et la séquence K. La disparition des horizons pédologiques est brutale, l'altérite arrivant presque en surface. Immédiatement à l'aval, il y a apparition de l'horizon GM, de façon également très rapide.

Sur toute cette partie du terrain, le passage entre le domaine I et le domaine III est marqué par une petite dénivellation d'une quarantaine de cm, le domaine III étant légèrement déprimé. La plupart du temps un muret ou un petit talus jalonne le passage et empêchent de creuser un profil à cet endroit, car cette limite a été choisie comme limite de champ, l'amont étant pâturé vraisemblablement alors que la partie aval ne l'était pas.

Séquence H, dans la tranchée F8 creusée juste avant cette limite, on suit l'apparition des horizons MTgo et Mtg, selon un "faciès" un peu particulier puisqu'il y a beaucoup de blocs à cet endroit. Mais le passage entre les horizons du micropodzol et l'horizon GM n'a pas été étudié; il pourrait faire l'objet d'une autre étude.

Un peu plus à l'est, séquence G (figure 54), le passage du domaine I au domaine III est un peu différent. Il y a bien comme dans la situation précédente une diminution d'épaisseur des horizons pédologiques à l'approche de la limite. Mais ici des profils rapprochés permettent de suivre le passage de l'horizon Mtg à l'horizon GM, ce qui n'avait pas été possible dans la première partie de la limite.

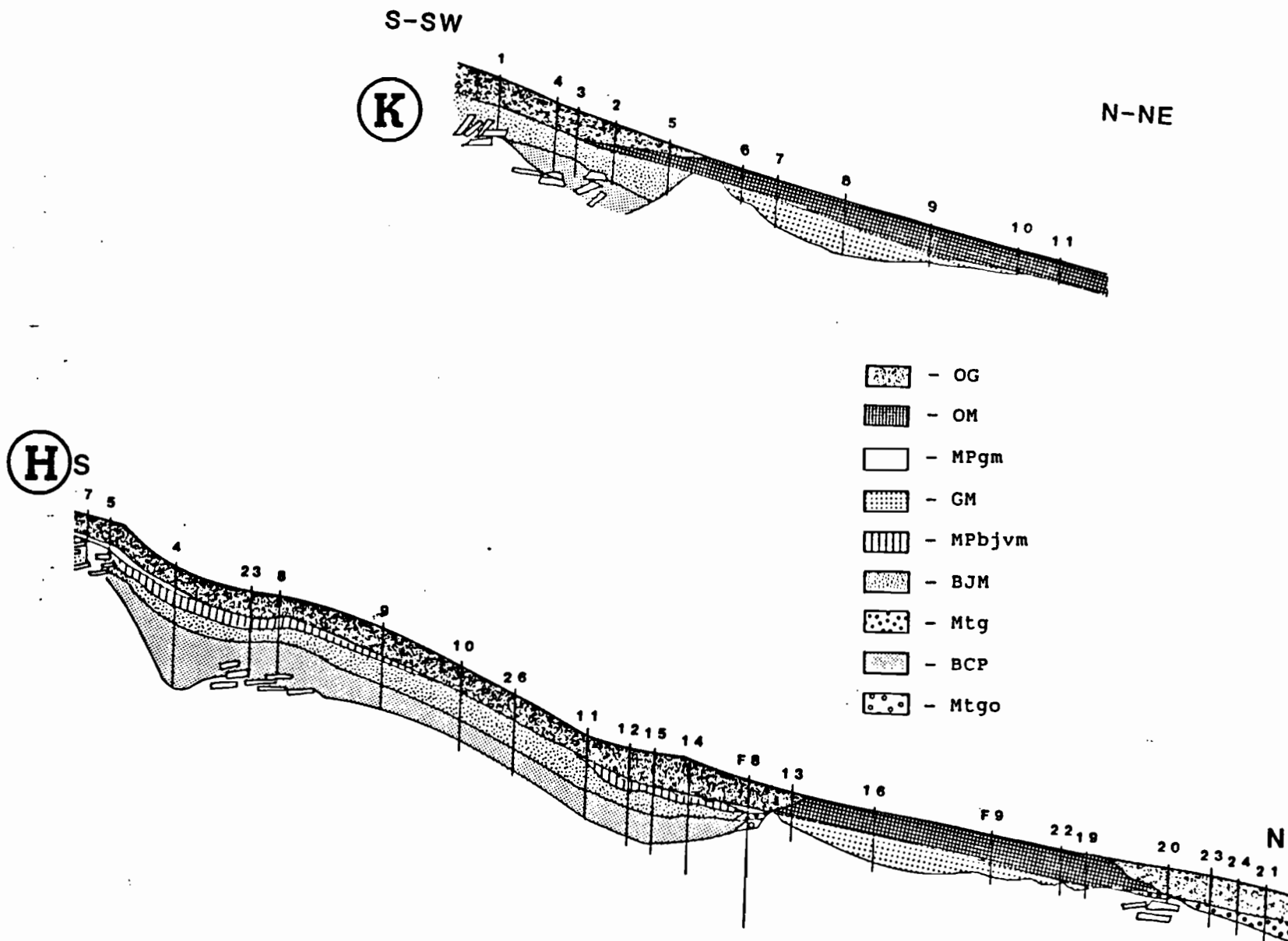


Figure 53 : Représentation schématique des séquences K et H

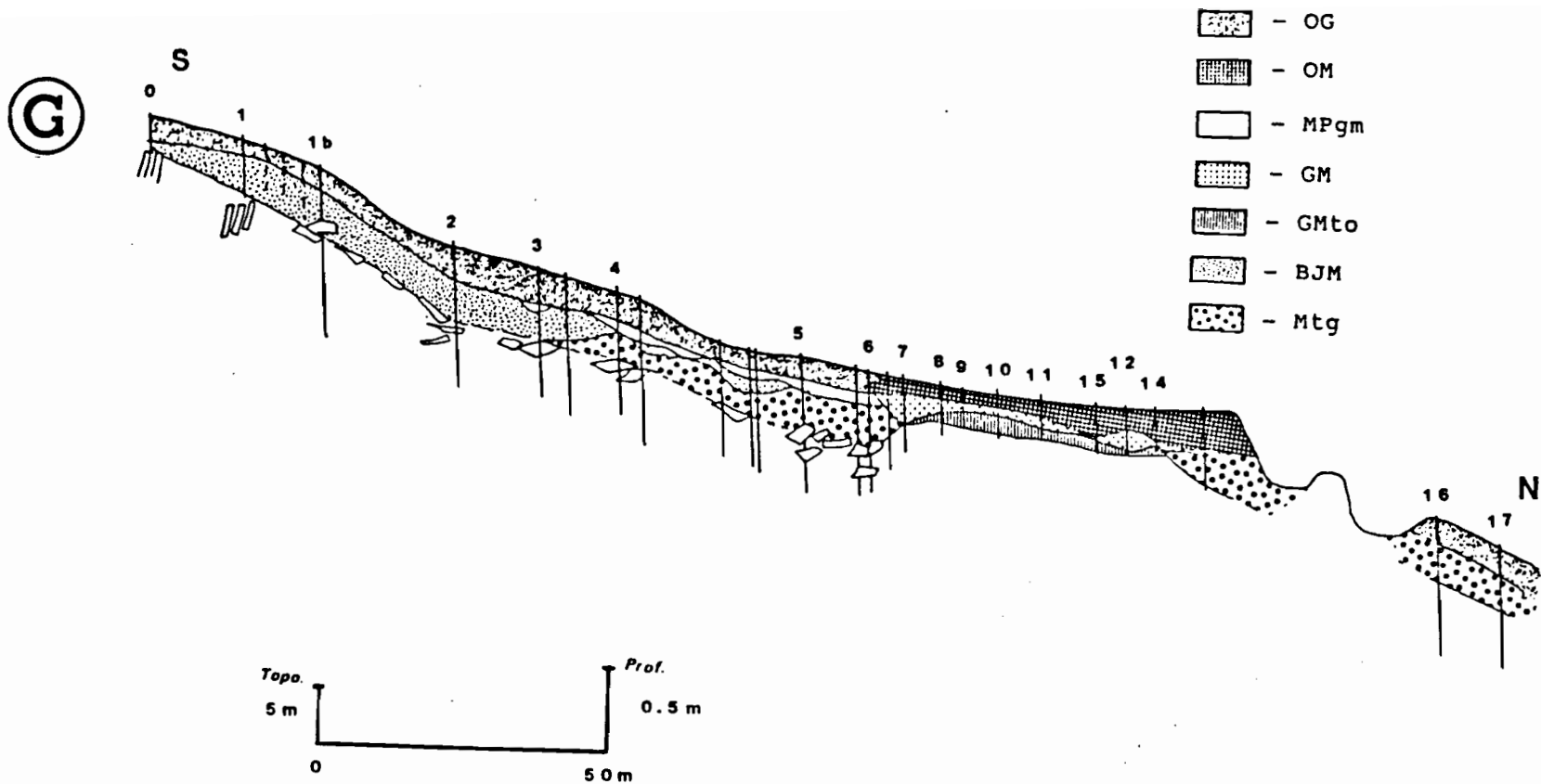


Figure 54 : Représentation schématique de la séquence G

Du domaine II au domaine III

L'apparition des horizons GM et GMto a été suivie dans la tranchée F7, (figure 55), et dans la tranchée F2, (figure 56).

En effet sur le haut du plateau, les horizons GMto et GM apparaissent de manière discontinue , au dessus de l'horizon Mtg.

Le passage des domaines I et II au domaine III est donc caractérisé par :

- Une diminution d'épaisseur des horizons pédologiques, l'altérite étant toujours très proche de la surface entre 60 et 40 cm de profondeur.
- L'apparition d'horizons à éluviation intense du fer, cette transformation étant verticale descendante, comme le montrent les limites de ces horizons dans les séquences et les tranchées.
- Cette transformation tend à gagner vers l'amont, comme le montrent les petites loupes d'horizon GM dans l'horizon Mtg.
- Enfin ce domaine III est caractérisé par une altérite très transformée; on n'a observé qu'un seul niveau d'altérite, proche de l'allotérite du domaine II. L'isaltérite est soit plus profonde que la limite de nos observations, soit absente. Cette dernière hypothèse est la plus vraisemblable compte tenu des observations géologiques. En effet la carte géologique au 1/50 000 signale à cet endroit une zone d'éboulis dont les limites, autant que la précision de la carte nous permet d'en juger, correspondraient avec celles de notre domaine III.

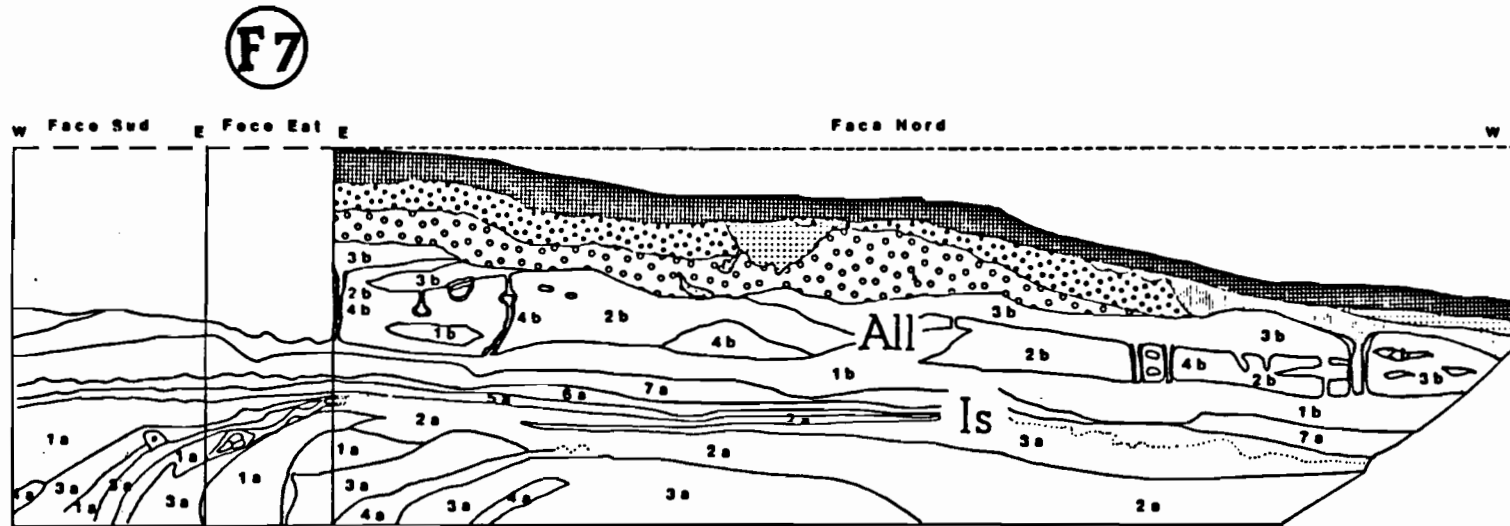


Figure 55 : Représentation schématique de la tranchée F7

- OM
- GM
- GMto
- Mtg
- Mtgo

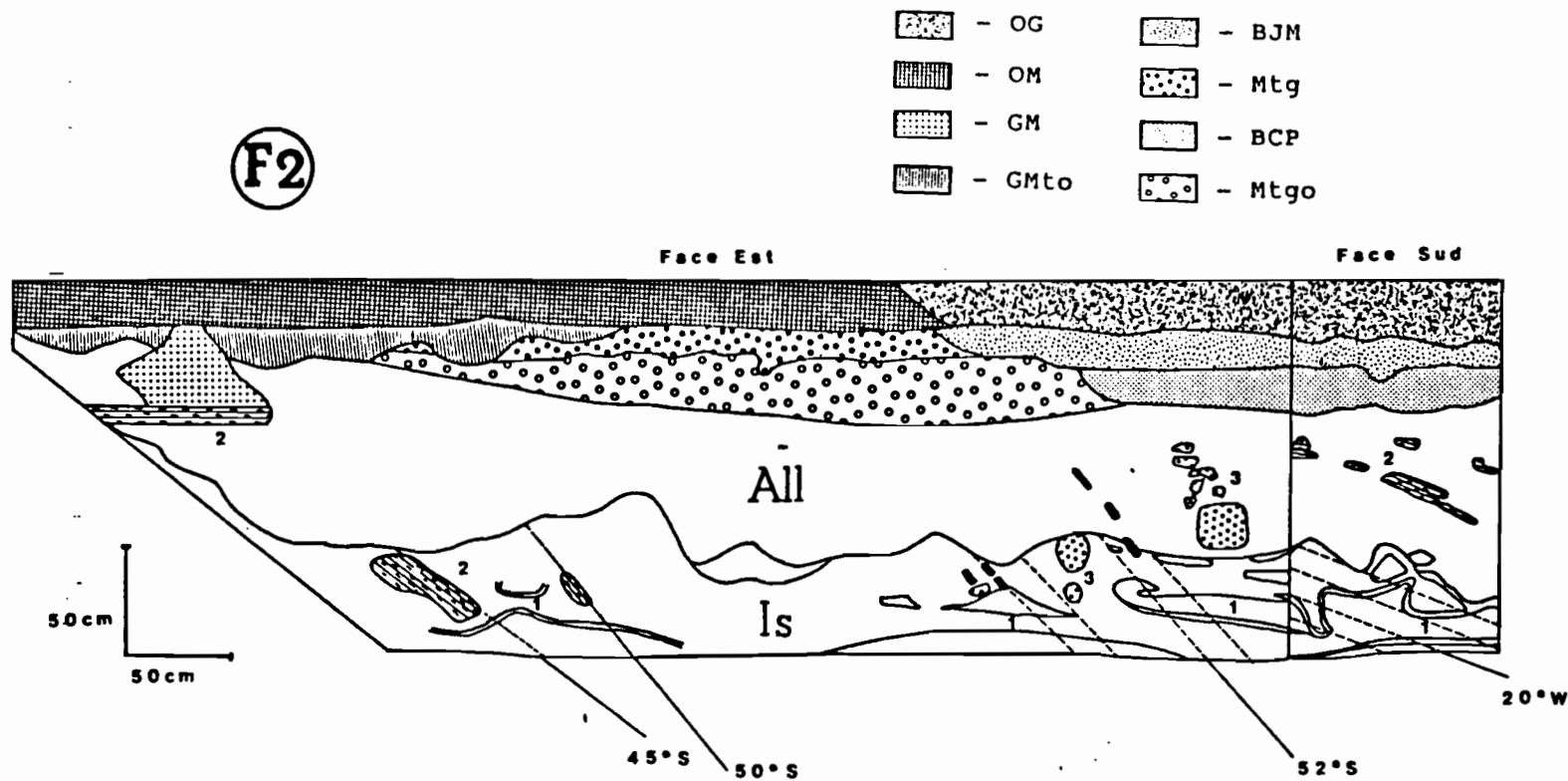


Figure 56 : Représentation schématique de la tranchée F2

3.6.2 Répartition spatiale de l'horizon GM et des horizons Mtgo et Mtg (le passage latéral des uns à l'autre ayant été établi)

On peut suivre les courbes de répartition de ces horizons :

Figure 57

Courbe de répartition de l'horizon Mtgo, c'est à dire apparition à l'amont (1) et disparition à l'aval (2) quand il est remplacé par l'horizon GM ou GMto.

A l'ouest les courbes d'apparition et de disparition se rejoignent puisque qu'on ne trouve plus à cet endroit que l'horizon BJM ou Mtg sur l'altérite.

Figure 58

De la même façon que précédemment, on peut suivre ici les courbes d'apparition (1) et de disparition (2), de l'horizon Mtg.

Figure 59

La répartition spatiale de l'horizon GM par rapport à celle de l'horizon Mtg permet de dégager les conclusions suivantes :

- L'apparition de l'horizon GM est indépendante de la disparition de l'horizon Mtg; en effet, il peut apparaître alors que l'horizon Mtg est présent ou après qu'il ait disparu.
- L'horizon GM est globalement dépendant de l'apparition de l'horizon Mtg. Dans la plupart des cas, il se différencie sur l'horizon Mtg, les deux courbes ne se croisant jamais, sauf sur le haut du plateau, où la courbe d'apparition de l'horizon GM englobe un domaine où il peut exister de manière discontinue et où il peut exister de façon extrêmement locale, au dessus d'un bloc de schiste sub-horizontale par exemple (nous avons observé une telle poche d'horizon GM dans la tranchée F2, figure 56).
- La courbe marquant l'individualisation de l'horizon OM recoupe la courbe d'apparition de l'horizon GM et celle de l'horizon Mtg. Il peut se différencier avant ces deux horizons, après l'horizon Mtg et avant GM, ou après ceux-ci. Dans les tranchées observées, et sur presque toute la longueur de sa courbe de répartition, il semble globalement dépendant de Mtg, et très localement dépendant de GM.

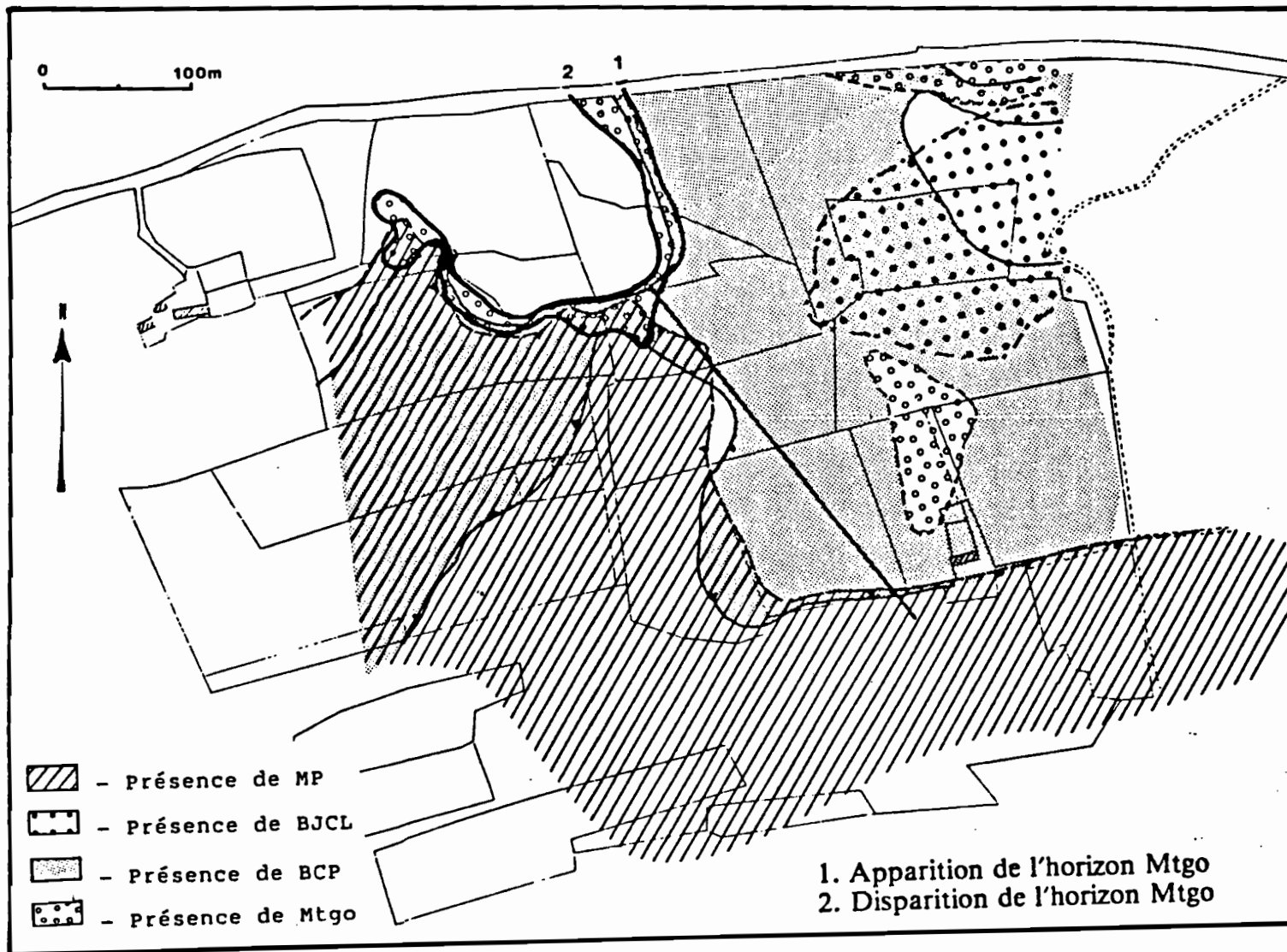


Figure 57 : Courbes de répartition spatiale de l'horizon Mtgo

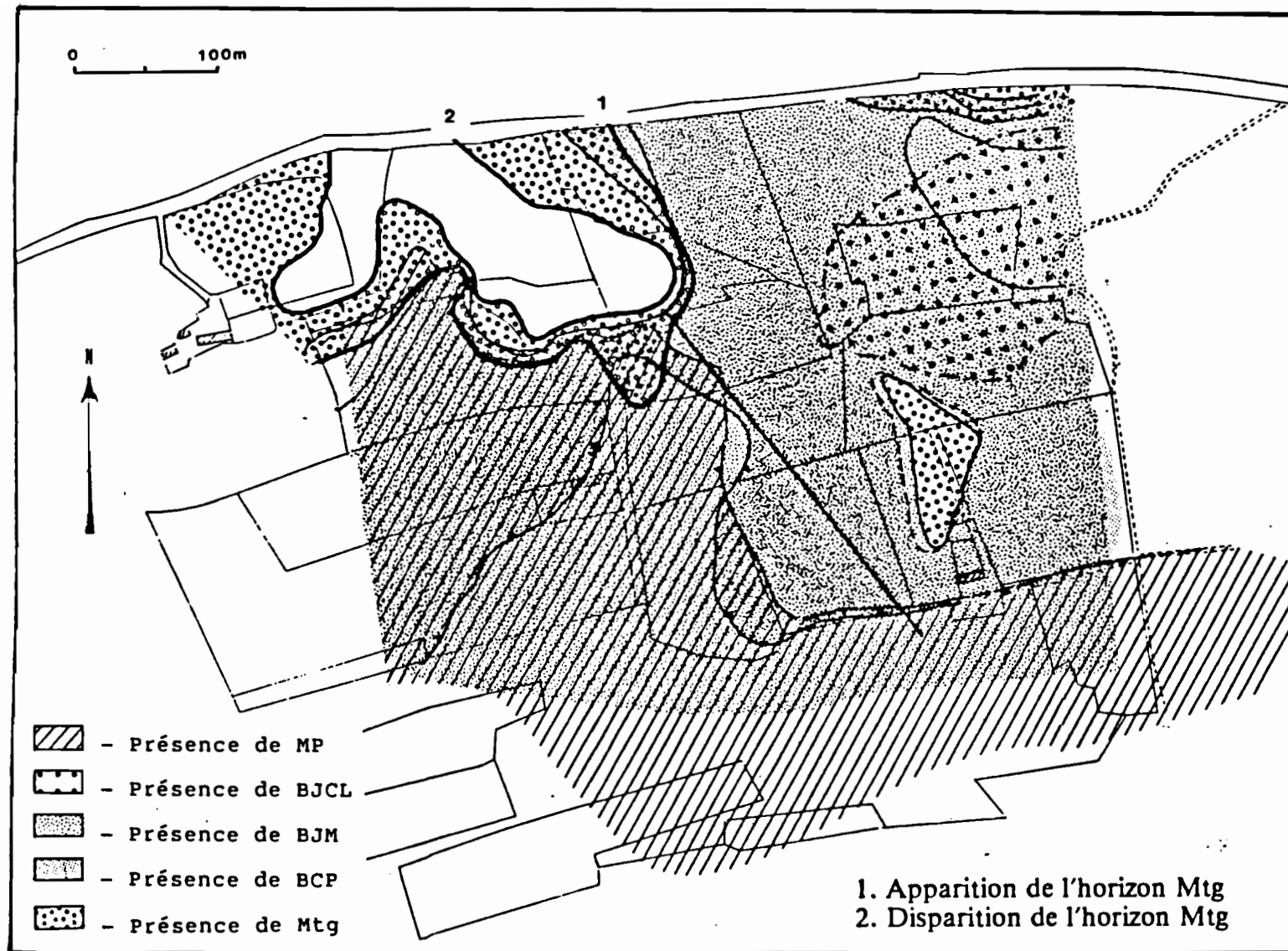


Figure 58 : Courbes de répartition spatiale de l'horizon Mtg

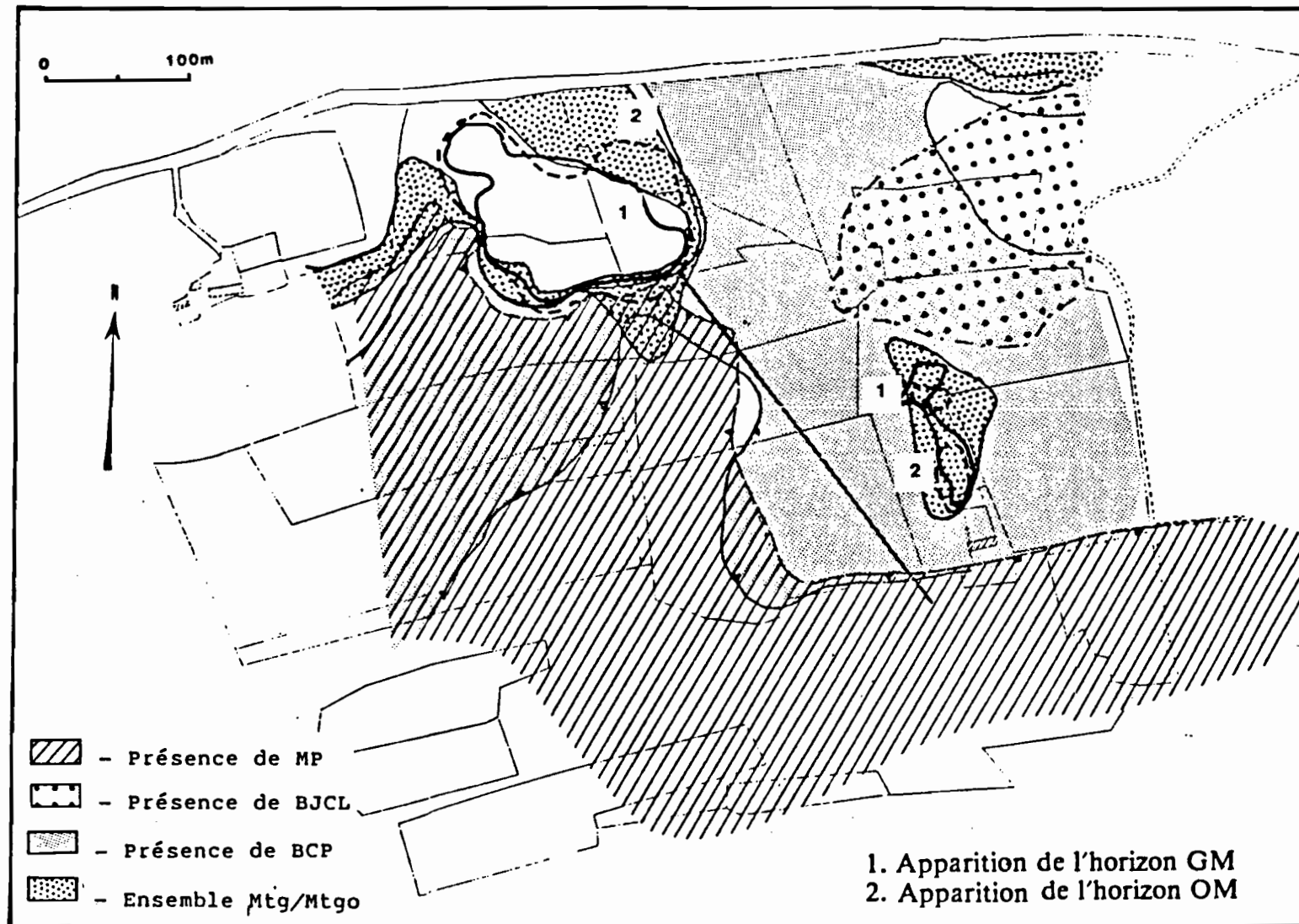


Figure 59 : Courbes de répartition spatiale des horizons GM, OM.

3.7 Conclusion : Les trois domaines reconnus dans les formations superficielles et leurs relations structurales

3.7.1 La définition des trois domaines structuraux reconnus dans les formations superficielles

Les trois domaines structuraux définis par les différents ensembles altéritiques et pédologiques qui les constituent, ainsi que leurs relations latérales sont représentés synthétiquement en coupe dans la figure 60.

Le domaine I

- Sur altérite peu développée sur schistes Gédinniens, en place ou couchés, peu ou non altérés.
- L'ensemble pédologique différencié sur cette altérite est formé des horizons BCP (absent en haut de versant ou situation de forte pente), BJM et d'une différenciation superficielle micropodzolique (MP).

Le domaine II

- Sur altérite très développée de schiste et quartzite Gédinniens, présentant une superposition de faciès isaltéritique et allotéritique.
- L'ensemble pédologique est formé des horizons BCP (absent en situation de forte pente), BJM, OG, et localement (sur champ anciennement cultivé ou sur des lieux de passage) d'un horizon BJCL entre BJM et OG.

Dans ces deux premiers domaines, une transformation par l'hydromorphie, qui se manifeste principalement par la mobilisation et la concentration du fer, et dont le sens de propagation est latéral remontant, se localise d'abord dans l'altérite puis fait se différencier les horizons Mtgo, Mtg et OM aux dépens des horizons BCP, BJM, et OG; à partir de la zone la moins transformée située en bordure de plateau et sur le versant, cette transformation affecte à la fois le sommet du plateau et l'aval du versant.

Le domaine III

- Sur altérite très transformée d'éboulis de schiste et quartzite.
- Ce domaine est caractérisé par une transformation verticale descendante qui fait se différencier les horizons GM et GMto aux dépens des horizons des domaines I et II, et qui se manifeste par une diminution importante de l'épaisseur des horizons et par une éluviation intense du fer.
- Nous n'avons pas pu préciser lors de l'étude de cette altérite la part de la transformation qu'on pourrait relier à la transformation du domaine II (qui devrait être ici à son stade le plus développé) et la part qui pourrait être reliée à la transformation verticale descendante (qui affecte peut être l'altérite en se surimposant à la première).

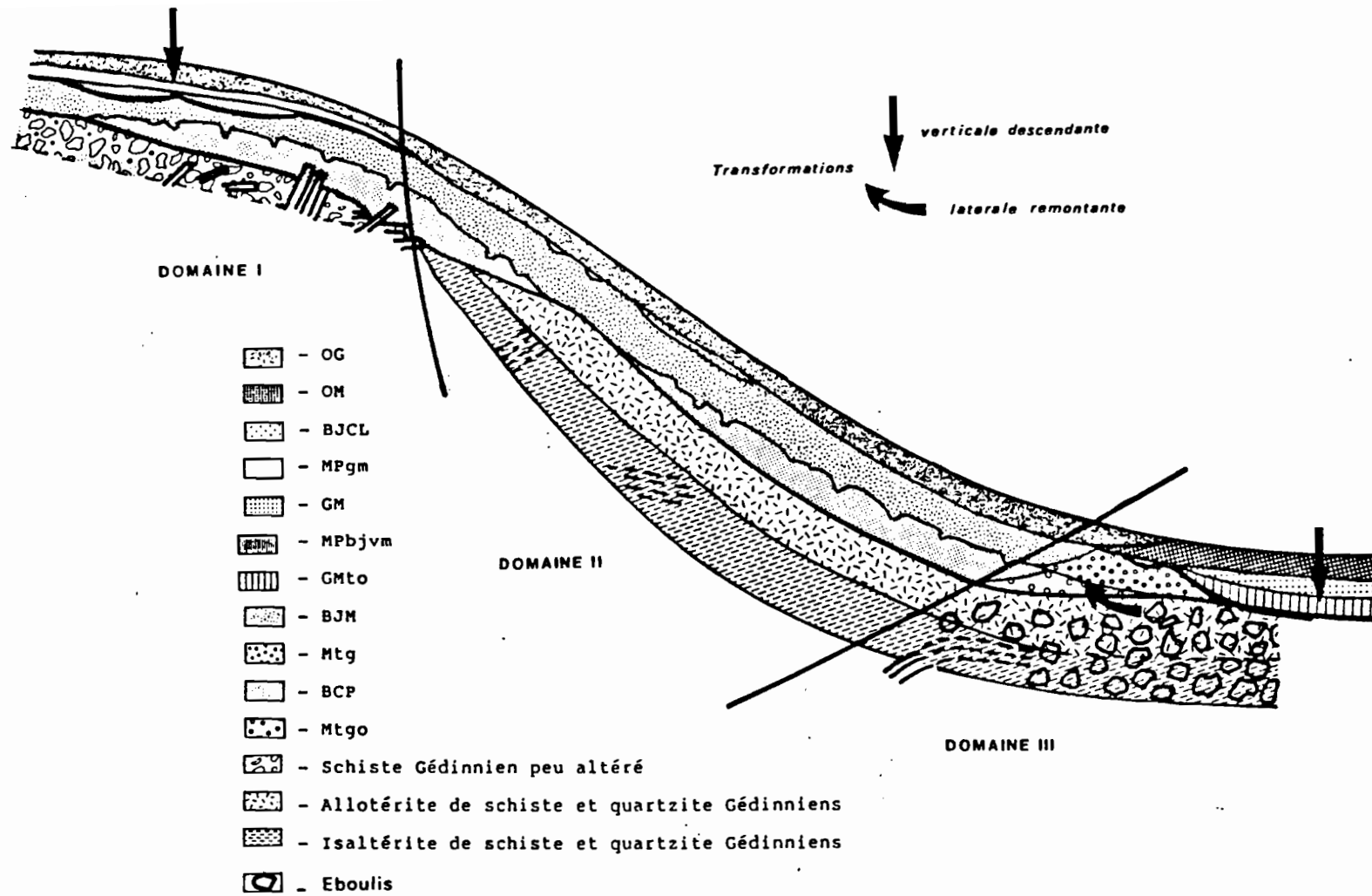


Figure 60 : Séquence synthétique représentant les principaux ensembles altéritiques et pédologiques différenciés dans les trois domaines structuraux et leurs relations latérales.

Il existe des corrélations entre les horizons reconnus au cours de cette étude et ceux définis au cours de travaux antérieurs, déjà cités, qui ont été effectués en Bretagne Centrale depuis plusieurs années, en particulier avec le travail de F. ROUSSEL sur schistes pourpres de Montfort (1980). Les horizons suivants présentent de grandes ressemblances de caractérisation :

- BJM et ALE
- BCP et BT

Ceux qui suivent présentent des caractères communs :

- Mtgo et BG
- GMto et EG2
- Mtg et EG1
- GM et ED

Enfin les relations latérales entre les groupes d'horizons suivants sont analogues :

- BJM/BCP et ALE/BT
- BCP/Mtgo et BT/BG
- BJM/Mtg et ALE/EG1
- Mtg/GM et EG1/ED

3.7.2 Les relations structurales les plus générales entre ces trois domaines

La carte synthétique (planche hors-texte n°1) représente les relations structurales entre ces trois domaines.

La limite entre le domaine I et le domaine II est une limite de nature géologique, comme nous l'avons discuté plus haut. Elle est également une limite structurale pédologique, puisqu'elle correspond en partie à l'apparition d'une transformation de surface, qui est la micropodzolisation.

La limite entre les domaines III et I et II, est également une limite structurale puisqu'elle est peut être aussi une limite géologique (zone d'éboulis à l'aval), mais surtout parce qu'elle délimite l'apparition d'une transformation par hydromorphie de surface, qu'on peut peut être relier à l'effet d'une nappe temporaire d'hiver. Ainsi F. ROUSSEL (1980) a mis en évidence un effet analogue d'une nappe temporaire d'hiver grâce à une étude hydrologique. Cette transformation se surimpose aux stades les plus développés d'une transformation verticale remontante. Celle-ci pourrait être due à l'effet d'une nappe permanente, qui serait plus proche de la surface et soumise à des battements plus importants à l'aval du terrain et sur le replat du haut de plateau; cette nappe serait également moins "circulante" dans ces deux localisations. Les relations entre ces deux transformations n'ont pas été étudiées mais au vu de la répartition spatiale des horizons concernés par ces transformations, on peut déduire que la transformation du domaine III est en quelque sorte dépendante de celle du domaine II :

La transformation du domaine III ne se réalise que sur un terrain déjà transformé.

En conclusion de ce chapitre, nous obtenons et présentons une carte synthétique (Planche hors-texte n°1) récapitulant les courbes d'apparition et de disparition des horizons définis d'après les caractères retenus dans cette étude, et les limites structurales qui en découlent: Les limites structurales étant celles qui définissent la nature et le sens des relations entre domaines ou entre ensembles de différenciation.

4.0 ANALYSE DE LA COUVERTURE VEGETALE

4.1 Introduction : Les grands ensembles végétaux et leur répartition spatiale

Ce chapitre présente une synthèse d'informations sur la végétation actuelle et l'histoire de l'occupation humaine sur le terrain de Kermaner, obtenue sous la direction de J. TOUFFET. L'exposé des différents résultats aboutira à l'élaboration d'une carte structurale d'occupation actuelle du sol dont les unités correspondront aux grands ensembles végétaux existant sur le terrain.

Les grands ensembles végétaux présents sur le terrain de Kermaner ont été définis grâce aux relevés de végétation (décrits dans le chapitre de définitions préliminaires), et leurs limites ont été tracées à l'aide d'une part des données de terrain et d'autre part de la photographie aérienne IRC.

La nomenclature utilisée pour les espèces végétales correspond à celle utilisée dans l'ouvrage:

"Flore et végétation du Massif Armoricain, Tome I, Flore vasculaire, par H. DES ABBAYES, G. CLAUSTRES, R. CORRILLON et P. DUPONT (1971)"

Les différents ensembles végétaux reconnus sont :

- Le fourré à ajonc d'Europe.
- Les arbres :
 - Les haies,
 - Les bosquets et les arbres fruitiers.
- La ptéridaie.
- Les complexes lande-pelouse.

4.2 Le fourré à ajonc d'Europe

Le fourré à ajonc d'Europe (*Ulex europaeus L.*) a dû constituer l'essentiel de la végétation de la lande. Ces fourrés ont été défrichés pour des fins agricoles (terres et pâtures) avant 1950. La photographie aérienne IGN la plus ancienne sur cette zone date de 1952. Nous pouvons voir sur la carte interprétative qui en a été tirée que le défrichement intéresse une vaste superficie et semble récent si on en juge par la taille des arbres des haies nouvellement plantées (figure 61).

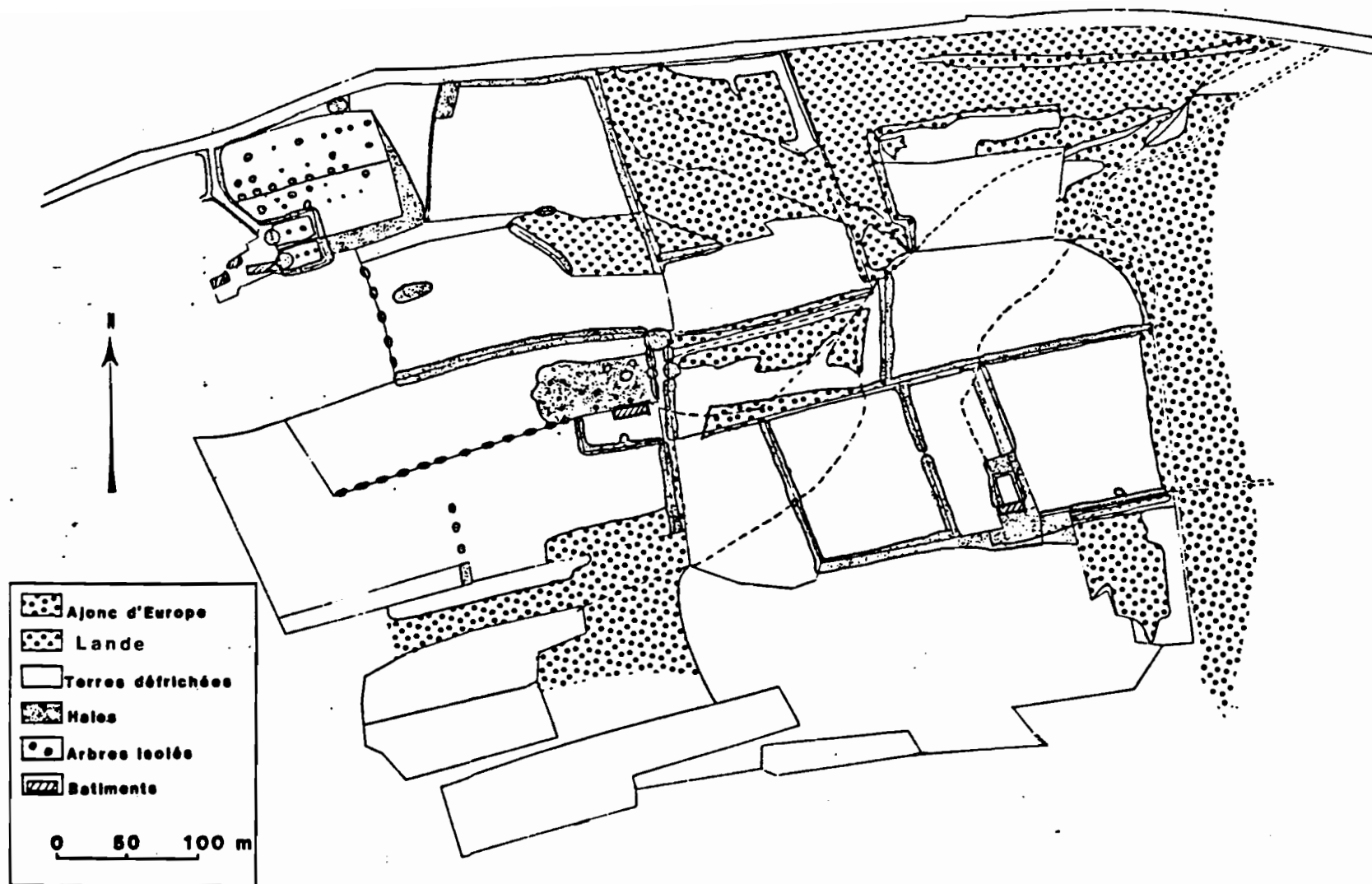


Figure 61 : Carte interprétative de la photographie IGN de 1952

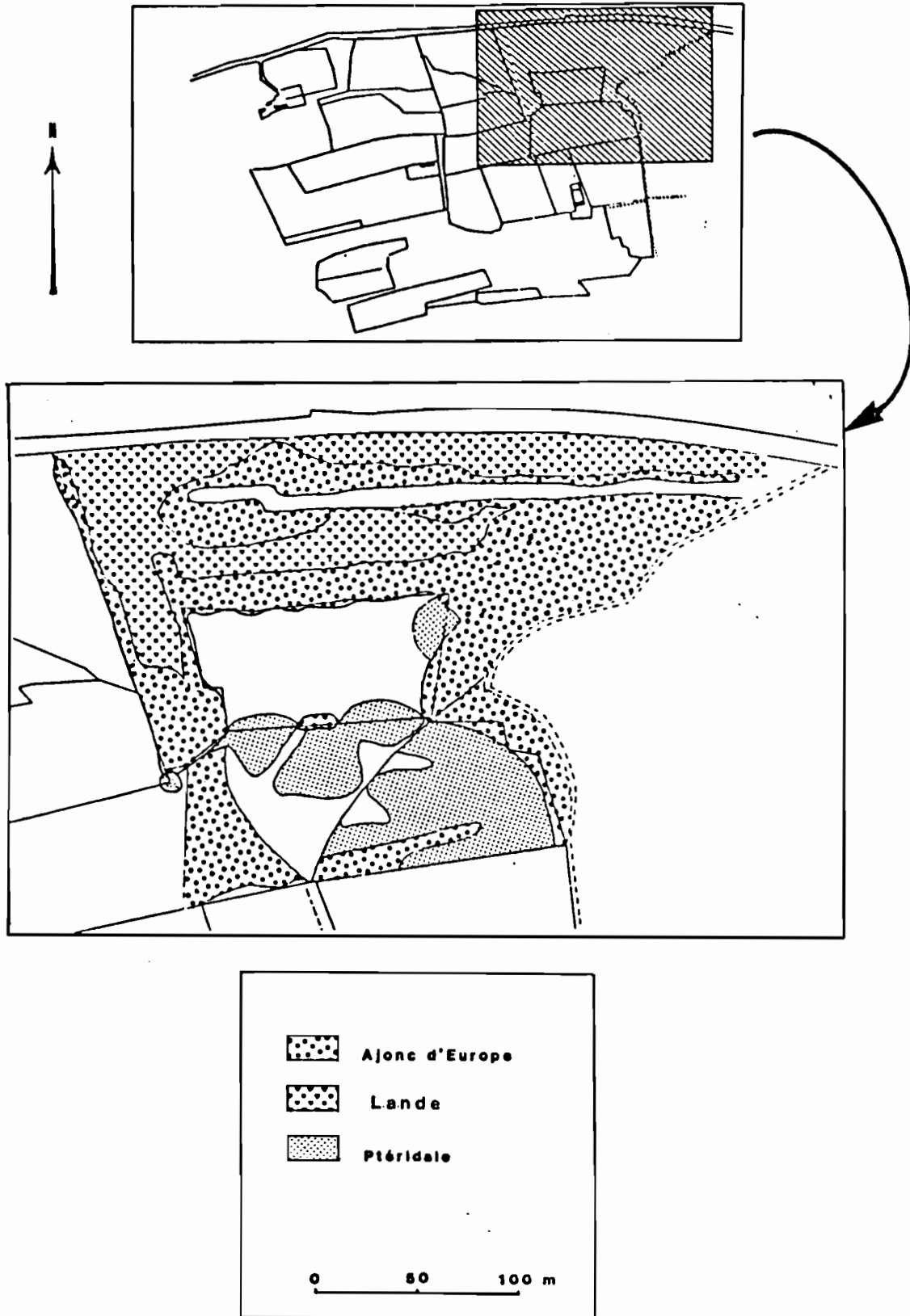


Figure 62 : Carte interprétative de la photographie IGN de 1969

Le fourré avait regagné sur des terres déjà partiellement abandonnées lors de la prise de vue IGN de 1969 (figure 62).

Il a ensuite été brûlé, sans doute assez récemment puisqu'il reste encore sur le terrain des vestiges d'arbustes calcinés. Ce brûlis correspond à l'ouverture de terrains de chasse. En effet cette zone n'est aujourd'hui ni cultivée, ni pâturée, mais est réservée à une chasse privée.

L'extension actuelle de ce fourré à ajonc d'Europe est limitée à la partie du terrain qui n'a pas été défrichée récemment à notre connaissance. Une repousse est localisée sur les haies non plantées d'arbres, ou en association avec des espèces de lande secondaire, dans des zones où la compétition avec la fougère aigle est limitée par les conditions du sol ou du microrelief défavorables pour la fougère. Partout ailleurs la fougère est favorisée, surtout en raison du brûlis récent. (Extension actuelle du fourré à ajonc d'Europe, carte interprétative tirée de la photographie infrarouge couleur, figure 63).

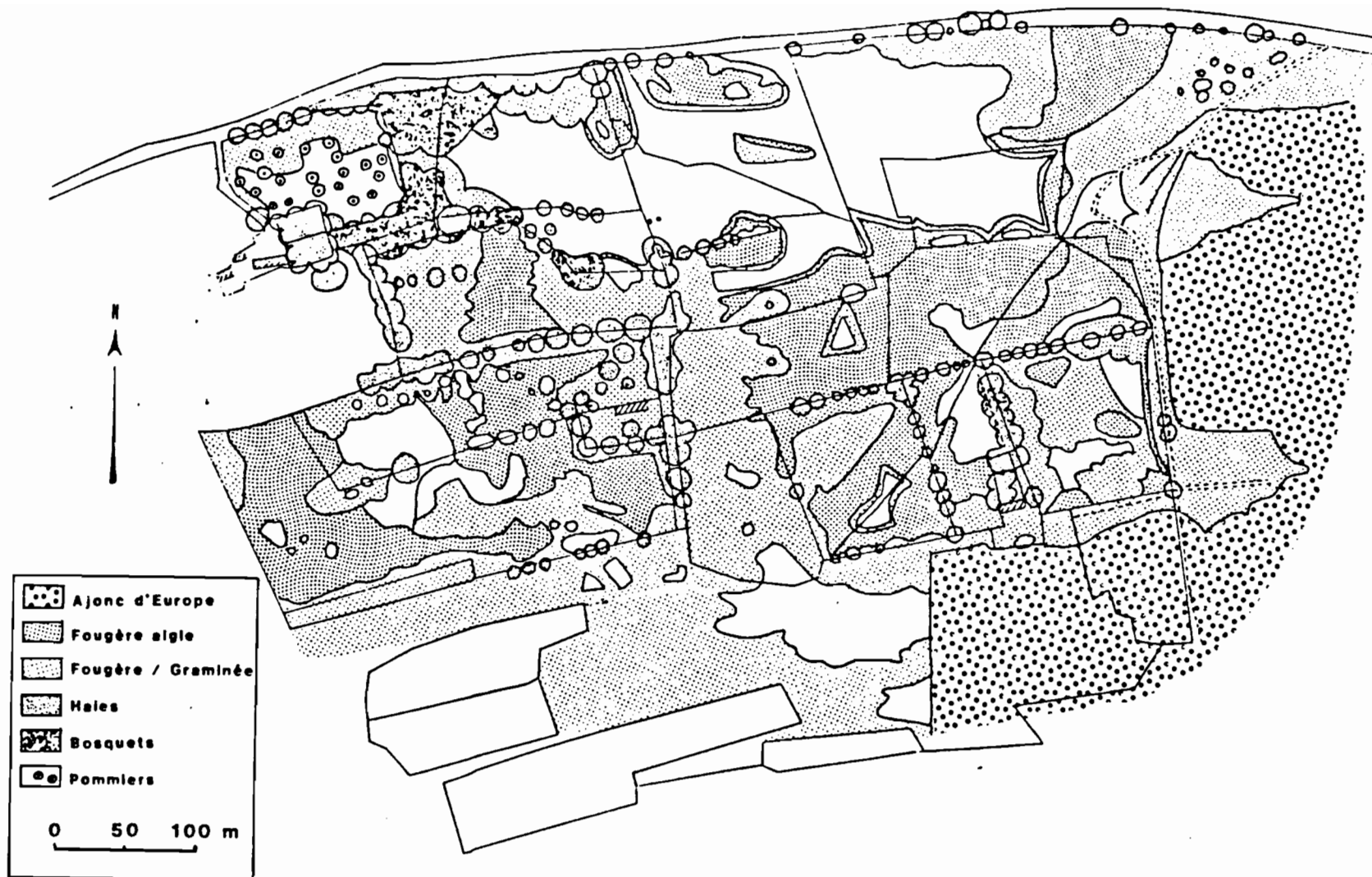


Figure 63 : Carte interprétative de la photographie infra-rouge couleur (1983)

4.3 Les arbres

Haies : Les haies sont plantées de chênes, hêtres, châtaigniers. Occasionnellement sont intercalés des résineux (*Epicéa commun*), des bouleaux, et des saules.

Bosquets et arbres fruitiers : On note un petit bois de bouleaux (*Betula pubescens Ehrh.*) de 2 à 10 mètres de hauteur, associés à des saules (*Salix atrocinnerea Brot.*), ainsi qu'un champ de pommiers, situé près de la ferme abandonnée Lan Uvelan.

Répartition spatiale de ces arbres : La répartition de ces différentes espèces arborées est représentée figure 63.

4.4 La ptéridaie

La ptéridaie est constituée de fougère aigle (*Pteridium aquilinum (L.) Kuhn*). La photographie aérienne de 1969 (figure 62) nous permet de penser que la conquête par la fougère des terrains défrichés puis abandonnés avait alors déjà commencé en compétition avec les ajoncs. L'extension actuelle de la ptéridaie (figure 63) est considérable, sa conquête du terrain ayant été favorisée par le brûlis des ajoncs.

La ptéridaie est divisée en deux grands domaines :

- D'une part, un domaine où la fougère est dense, haute (de 1m60 à 1m80 de hauteur) avec une sous-strate extrêmement pauvre au point de vue floristique, formée de ronces et surtout d'un tapis très épais de feuilles de fougère sèches.
- D'autre part, un domaine où la fougère est moins dense, moins haute et où il subsiste une sous-strate graminéenne, constituée pour l'essentiel d'agrostis grêle (*Agrostis tenuis Sibth.*).

Les zones de fougère clairsemée se trouvent :

- En bordure de la ptéridaie compacte. En effet les fougères de l'année qui sont en franges grossièrement circulaires autour de la fougère plus ancienne (développement en clones par rhizomes souterrains, 30 à 40 cm. de profondeur en général mais pouvant être plus profonds), ces fougères de l'année colonisent un terrain déjà occupé par d'autres espèces, souvent des graminées dans la zone qui nous intéresse, et surtout, il n'y a pas sous ces plantes de première génération de tapis de feuilles sèches. (voir figure 64)

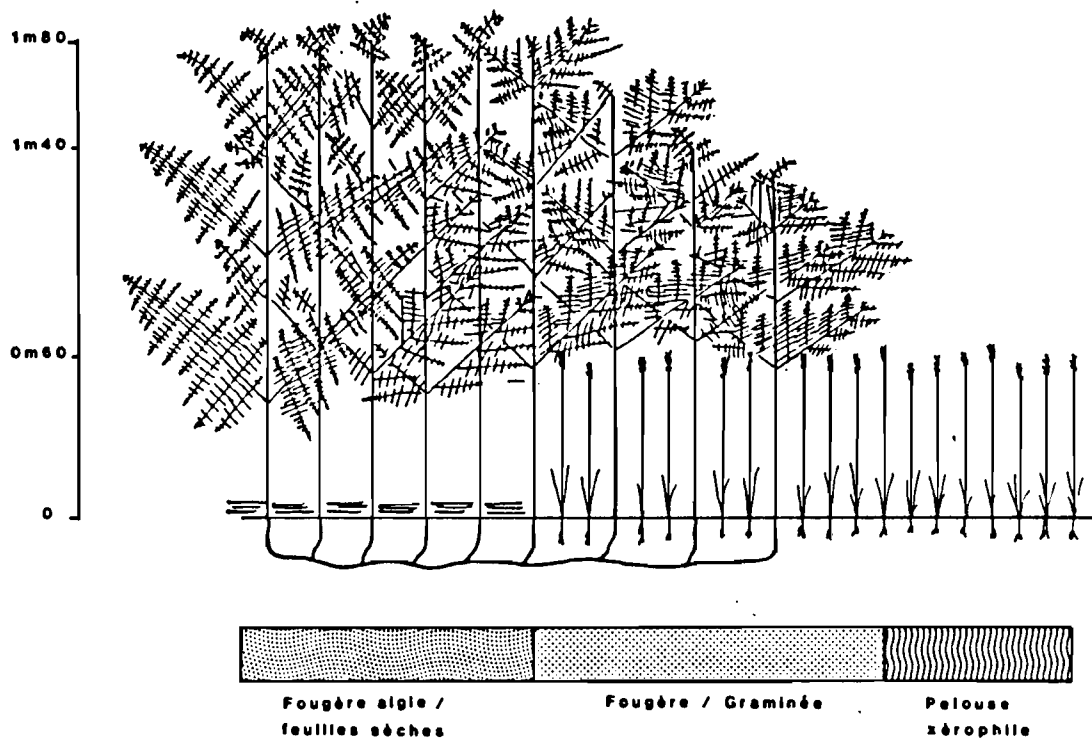


Figure 64 : Front de la fougère

- A l'ombre d'une haie. Dans ces zones la fougère est moins dense et un couvert graminéen subsiste, en particulier l'agrostis grêle (Agrostis tenuis Sibth.). On pourra remarquer ces zones sur la carte figure 63.

Dans ces deux types de situation, la différence d'implantation de la fougère résulte de compétitions entre espèces. Il y a cependant d'autres situations où la différence d'implantation de la fougère ne peut pas s'expliquer par une compétition végétale.

4.5 Les complexes lande - pelouse

4.5.1 Unités de type xéro-mésophiles

4.5.1.1 Domaines xérophiles

Pelouse à gaillet des rochers (Galium saxatile L.) en mosaïque avec une lande à bruyère cendrée (Erica cinerea L.).

L'ancienne lande pâturée a donné une pelouse qui est reconquise actuellement par une lande secondaire. La lande est ici dynamique.

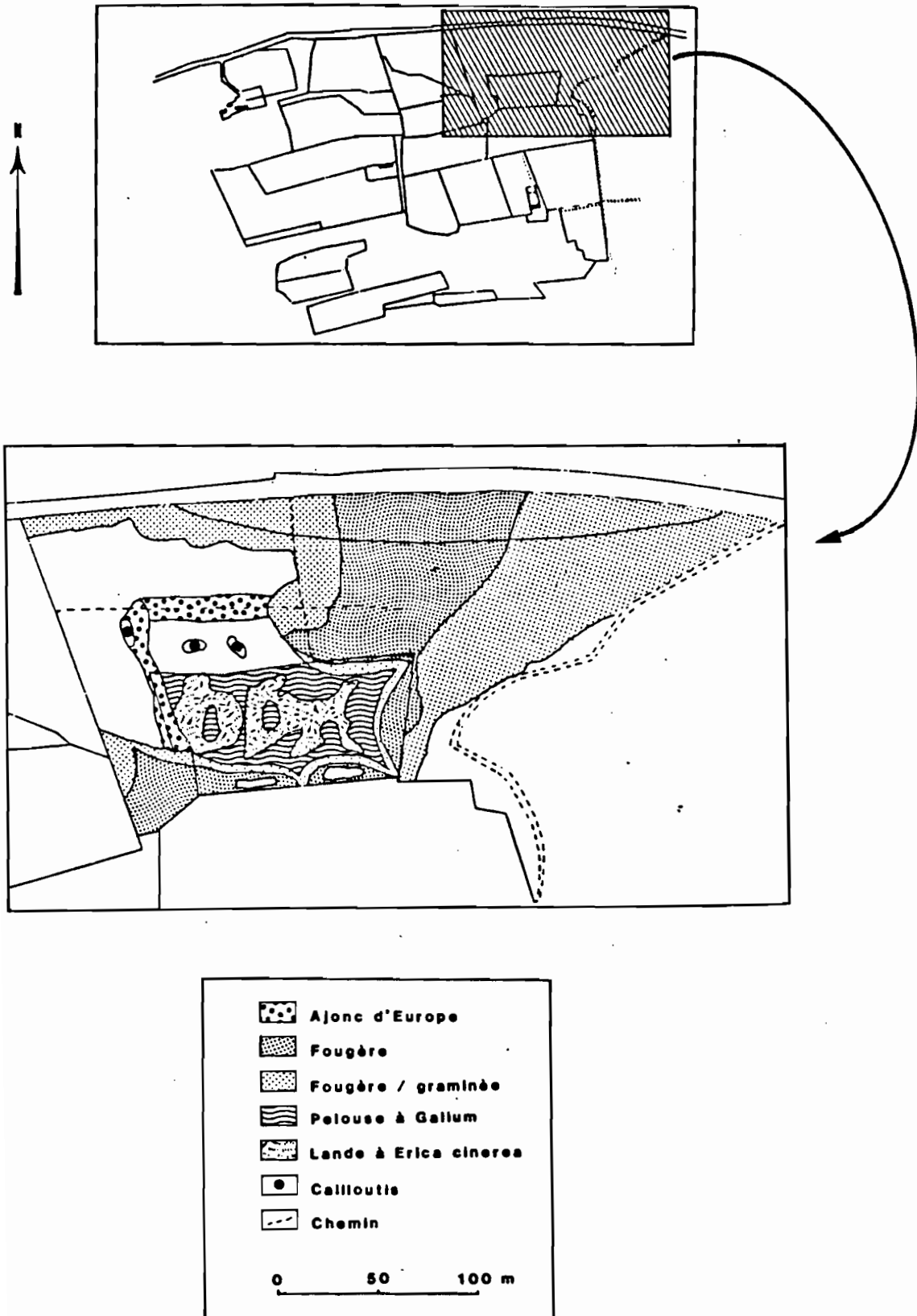


Figure 65 : Mosaïque lande pelouse
Domaine xérophile

Espèces de pelouse :

- Gaillet des rochers (Galium saxatile L.).
- Tapis de mousse (Hypnum cupressiforme).
- Luzule Forsteri (Luzula Forsteri (Sm.) DC.).
- Véronique des champs (Veronica arvensis L.).
- Epervière Piloselle (Hieracium Pilosella L.).

Espèces de lande :

- Bruyère cendrée (Erica cinerea L.).
- Callune vulgaire (Calluna vulgaris (L.) Hull.).
- Potentille Tormentille (Potentilla Tormentilla Necker.).
- Polygala (Polygala serpyllifolia Hose.).

La pelouse est également en compétition avec la fougère aigle sur la périphérie de l'ancien champ. Deux dynamiques contraires s'exercent donc ici aux dépens de la pelouse xérophile issue du défrichement et du pâturage.

La répartition lande-pelouse est représentée figure 65, et illustrée figure 66, la photographie (figure 67) montrant le "front" de la fougère sur la pelouse.



Figure 66 : Photographie de la mosaïque lande - pelouse



Figure 67 : Photographie du front de la fougère

4.5.1.2 Domaines mésophiles

Lande mésophile à :

Ajonc d'Europe (*Ulex europaeus* L.).

Bruyère ciliée (*Erica ciliaris* L.).

Agrostis à soies (*Agrostis setacea* Curt.).

En association avec :

- La bruyère cendrée (*Erica cinerea* L.).
- La molinie bleue (*Molinia caerulea* L.).
- La fougère aigle (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn.

Et :

- Potentille Tormentille (*Potentilla Tormentilla* Necker)
- Polygala (*Polygala serpyllifolia* Hose)
- Violette (*Viola lancifolia* Thore)
- Pediculaire des bois (*Pedicularis sylvatica* L.)
- Gaillet des rochers (*Galium saxatile* L.)
- Cirse bulbeux (*Cirsium anglicum* Lobel)

Plusieurs types de compétition s'exercent ici. Le microrelief de cette partie du terrain est très bouleversé. De nombreux chemins profondément entaillés (1m à 1m50 de dénivelé) créent une succession de creux et de rides, et cela entraîne une hétérogénéité de la colonisation végétale. On assiste à une repousse dispersée des ajoncs d'Europe après le brûlis récent. Cette repousse des ajoncs est en général liée aux rides, mais elle est lente et le terrain momentanément laissé libre est ouvert à la conquête par les fougères. Celles ci s'installent sur un mode compact avec front, partout où le microrelief est relativement stable, mais leur colonisation s'effectue surtout en ordre dispersé à cause du bouleversement du terrain. Partout où la fougère s'installe, l'agrostis à soies (*Agrostis setacea* Curt.)

héliophile, disparaît. Reste la molinie plus résistante. La molinie est également localisée dans les creux où elle devient l'espèce dominante.

La fougère est souvent associée avec la germandrée scorodaine ou sauge des bois (Teucrium Scorodonia L.), espèce préforestière.

La callune vulgaire (Calluna vulgaris (L.) Hull) est parfois associée avec la repousse des ajoncs.

La répartition de ces différents groupes est représentée figure 68

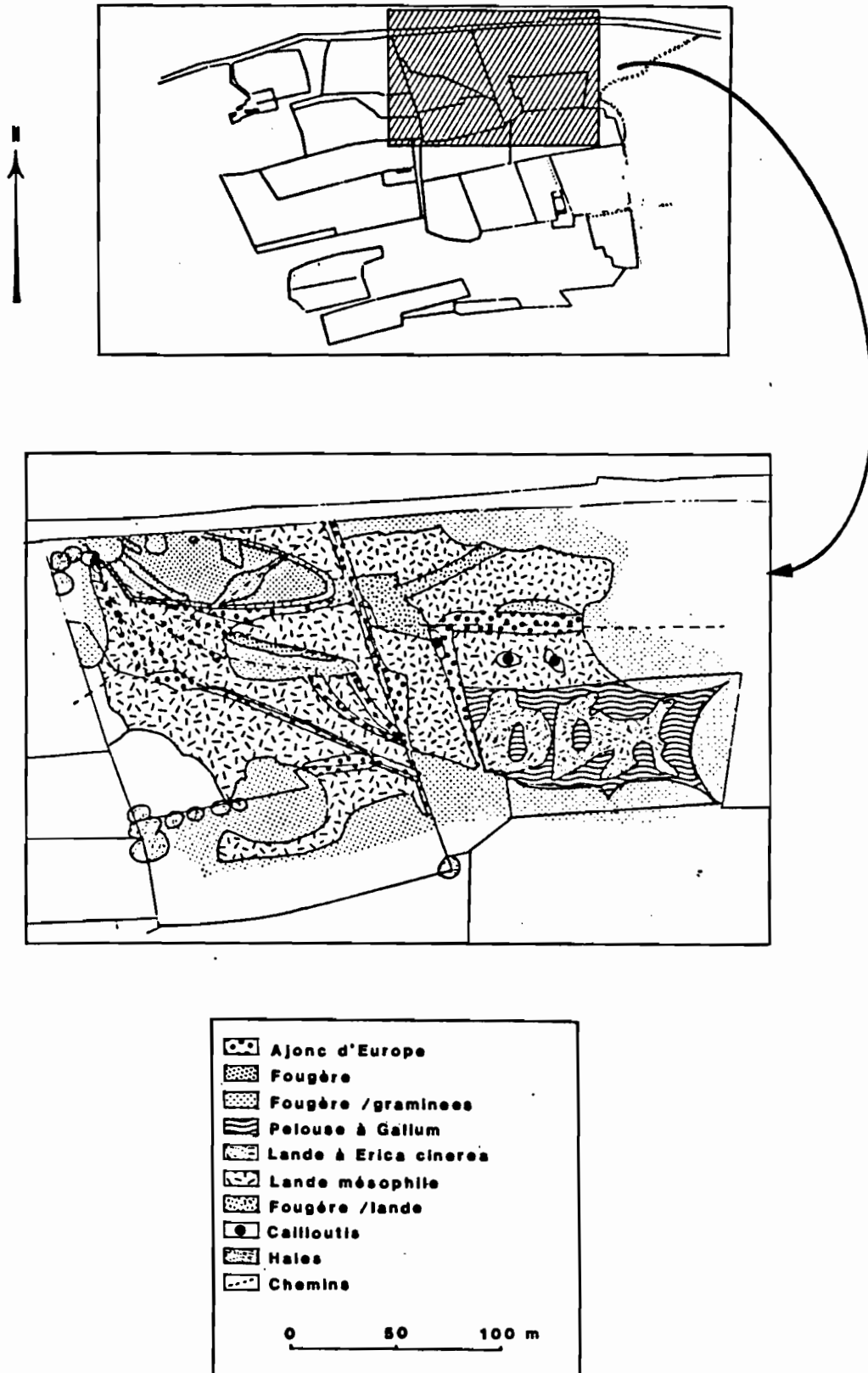


Figure 68 : Lande mésophile

Les domaines notés en lande mésophile sont les domaines où l'association des espèces citées plus haut se fait sans dominance particulière, ou ceux où la dominance d'une espèce sur les autres est tellement variable spatialement qu'elle est impossible à représenter à cette échelle. Les domaines à dominance de fougère stricte, ceux où l'ajonc associé à la bruyère domine (le long de chemins), et ceux où la fougère, sans être dominante, figure nettement parmi les espèces de lande, sont portés figure 68.

Pelouse à :

Agrostis grêle (Agrostis tenuis Sibth.)

Gaillet des rochers (Galium saxatile L.)

C'est une pelouse issue d'un pâturage à espèces résiduelles de lande.

Espèces de pelouse pâturée :

- Stellaire graminée (Stellaria graminea L.)
- Houlque laineuse (Holcus lanatus L.)
- Canche flexueuse (Deschampsia flexuosa L.)
- Luzule des champs (Luzula campestris L.)
- Rumex petite oseille (Rumex Acetosella L.)
- Flouve odorante (Anthoxanthum odoratum L.)

Espèces résiduelles de lande :

- Ajonc d'Europe (Ulex europaeus L.)
- Bruyère cendrée (Erica cinerea L.)
- Carex à deux nervures (Carex binervis L.)
- Potentille (Potentilla Tormentilla Necker)
- Polygala (Polygala serpyllifolia Hose)
- Violette (Viola Riviniana Reich.)

Ici la compétition s'effectue avec la fougère, mais aussi avec des espèces forestières, le bouleau (Betula pubescens Ehrh.) et la germandrée scorodaine (Teucrium Scorodonia L.) Ces compétitions ne s'exercent pas de la même façon. Nous avons déjà observé le mode d'avancée de la fougère et c'est également sous forme de fronts de forme semi-circulaire à partir de la périphérie de l'ancienne pâture qu'elle se manifeste ici. La colonisation par les bouleaux s'effectue différemment, suivant le mode de reproduction de cette espèce. Le bouleau est disséminé par le vent et de petits bouleaux poussent dans la pelouse (figure 69 la zone de bouleau notée 1) sous forme d'un coin, dont l'orientation pourrait être reliée à celle des vents dominants, et qui se manifeste de façon clairsemée dans la pelouse même si sa limite peut être nettement suivie; (nous rappelons que la colonisation par les fougères se fait suivant un mode compact).

4.5.2 Unités de type humides à mouillés

4.5.2.1 Les domaines de mouillères

Ces domaines sont essentiellement occupés par les espèces suivantes:

- Molinie bleue en touradons (Molinia caerulea L.)
- Sphaignes (Sphagnum papillosum)
- Sphaignes (Sphagnum compactum)
- Narthecium ossifrage (Narthecium ossifragum (L.) Huds.)

On trouve la molinie et les sphaignes dans des domaines moins humides mais elle sont alors dispersées et associées à d'autres espèces; le narthecium est limité à ces domaines.

4.5.2.2 Les domaines tourbeux

Ces domaines sont occupés par des espèces de lande tourbeuse :

- Molinie bleue (Molinia caerulea L.)
- Bruyère à quatre angles (Erica Tetralix L.)
- Bruyère ciliée (Erica ciliaris L.)
- Ajonc nain (Ulex minor Roth)
- Saule rampant (Salix repens L.)
- Potentille (Potentilla Tormentilla Necker)
- Saule (Salix aurita L.)
- Sphaignes (localement).

4.5.2.3 Les zones à bouleaux

Notées 2 sur la figure 69

La périphérie de ces landes tourbeuses est occupée par une association de petits bouleaux (Betula pubescens Ehrh.), avec des saules (Salix repens L.) et (Salix aurita L.) et par des plages à cirse (Cirsium anglicum Lobel).

4.5.2.4 Les domaines humides

La pelouse à agrostis (Agrostis canina L.).

Associé avec :

- Carex (Carex demissa Horn.)
- Lotier des marais (Lotus uliginosus Schk.)
- Scutellaire (Scutellaria minor L.)
- Carex en étoile (Carex stellulata Good.)
- Sphaignes et molinie bleue (Molinia caerulea L.) localement dans des creux.
- Houleque laineuse (Holcus lanatus L.) localement sur de petites buttes.

Sur de petites buttes on trouve également des résidus de :

- Ajonc d'Europe (Ulex europaeus L.)
- Callune vulgaire (Calluna vulgaris (L.) Hull.)

Groupements à joncs

Le long de deux fossés très peu marqués par le relief mais marqués par des espèces végétales différentes et qui sont peut être la marque d'anciens fossés de drainage, on trouve une association à :

- Joncs (Juncus effusus L.)
- Molinie (Molinia caerulea L.)
- Bruyère (Erica Tetralix L.)

La répartition de ces différents domaines mouillés à humide est représentée sur la figure 69

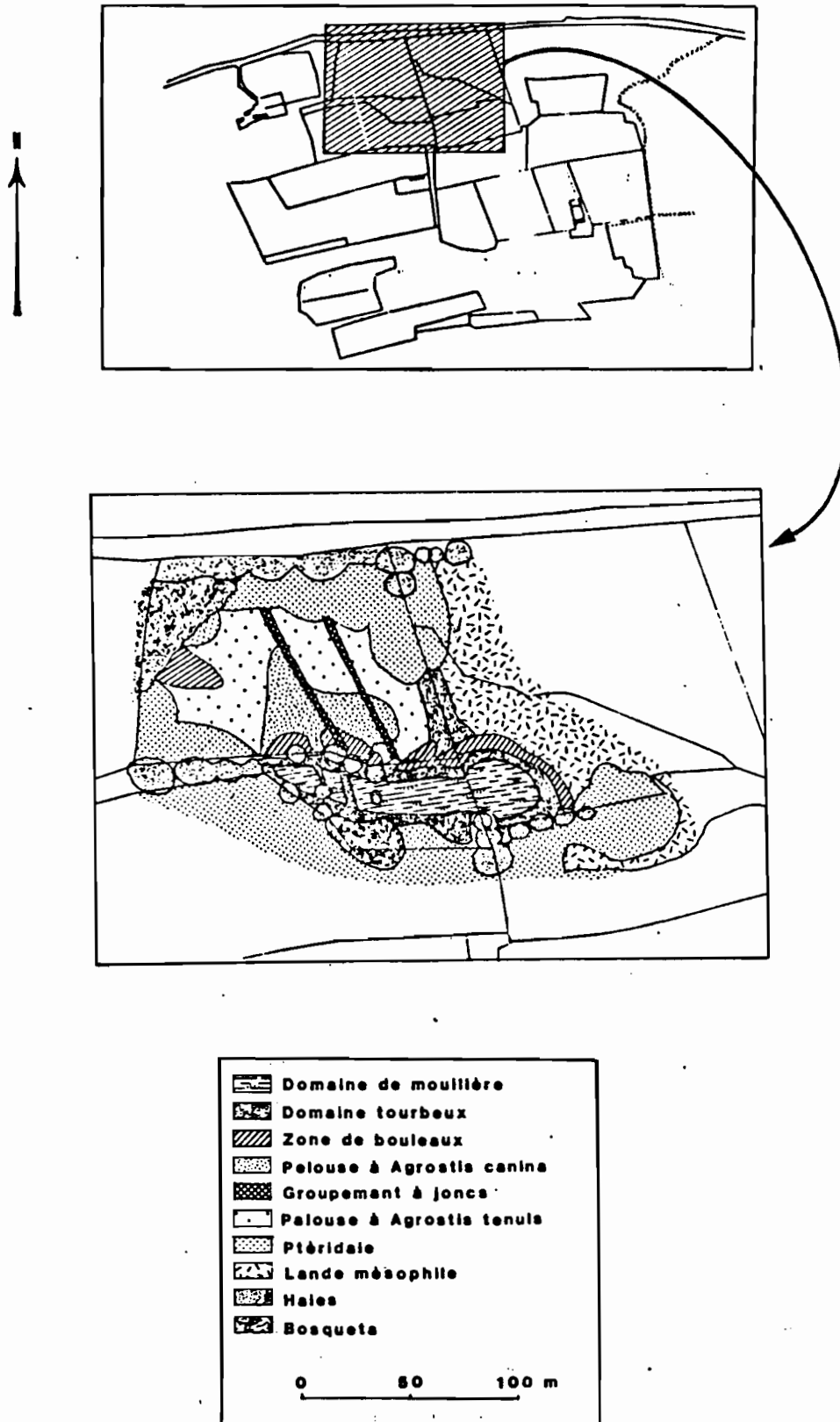



















Figure 69 : Domaines mouillés à mésophiles

4.6 Conclusion : Carte de répartition des ensembles végétaux

Les sondages de végétation effectués sur le terrain ainsi que l'interprétation des différentes photographies aériennes, nous a permis de faire l'inventaire des grands ensembles végétaux et d'étudier leur répartition spatiale. Nous aboutissons donc à la carte, figure 70.

-  Ajonc d'Europe.
-  Fougère aigle, mode compact sur feuilles sèches
-  Fougère aigle, mode clairsemé sur sous-strate graminéenne.
-  Haies.
-  Bosquets de bouleaux, saules.
-  Pommiers
-  Pelouse à gaillet (Galium saxatile L.)
-  Lande à bruyère cendrée (Erica cinerea L.)
-  Cailloutis
-  Lande à ajoncs, bruyère ciliée et agrostis (Ulex europaeus L., Erica ciliaris L. et Agrostis setacea Curt.)
-  Lande avec fougère.
-  Domaines de mouillère.
-  Domaines tourbeux
-  Domaines humides
-  Pelouse à agrostis (Agrostis canina L.)
-  Groupements à joncs
-  Pelouse à agrostis et gaillet (Agrostis tenuis Sibth.) et (Galium saxatile L.)

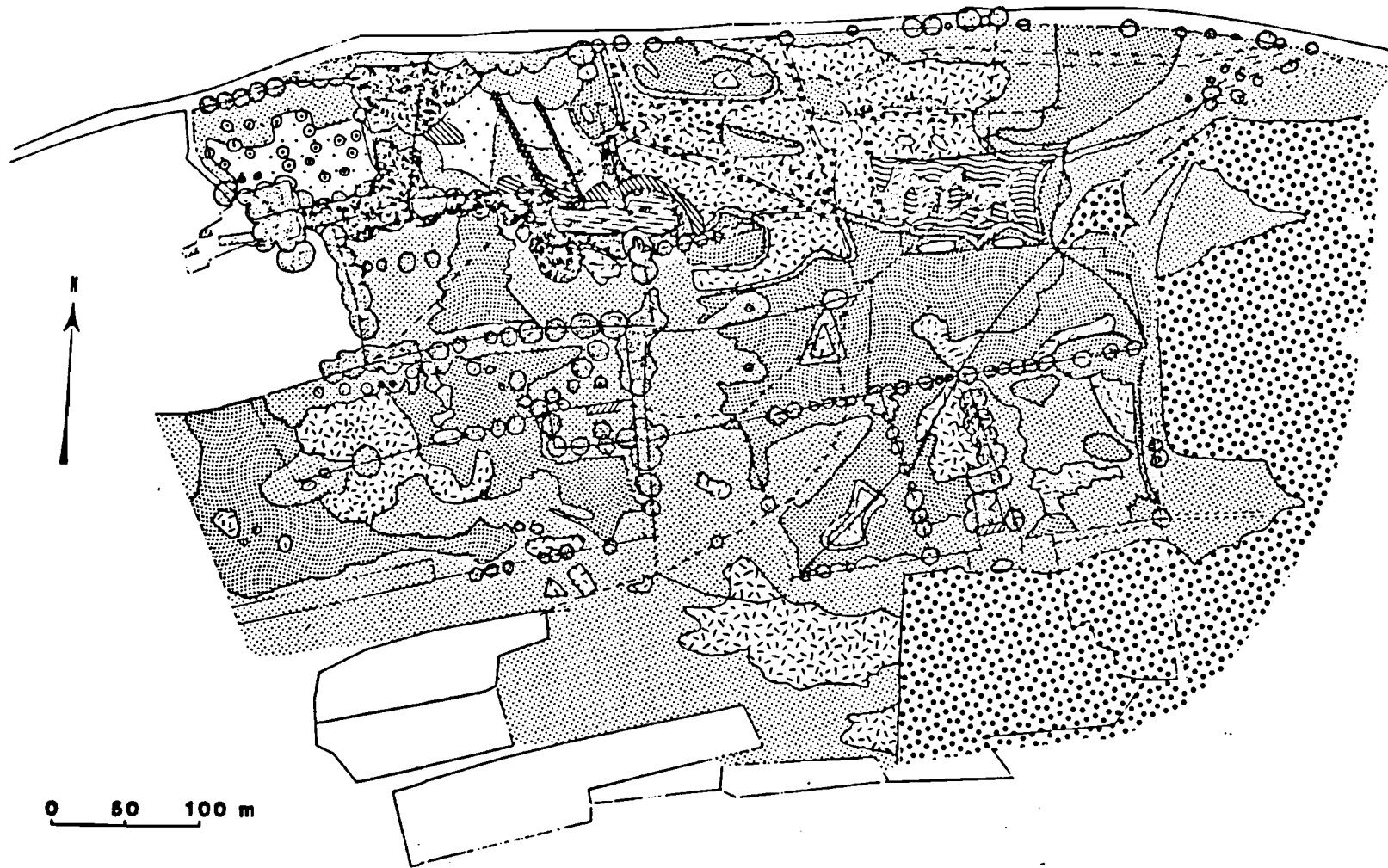


Figure 70 : Carte de répartition des ensembles végétaux

4.7 Analyse de la signification des différentes limites entre ensembles végétaux

Nous allons examiner chacune des limites entre ensembles végétaux et analyser leur signification du point de vue des relations entre ensembles. La numérotation affectée à chacune des limites renvoie aux figures 71, 72, 73 et 74.

4.7.1 Limites liées à une dynamique végétale (figure 71)

Les limites décrites dans ce paragraphe sont des limites séparant deux domaines dont les relations sont de concurrence végétale. Cette concurrence peut être :

- Soit les espèces sont en concurrence directe, pour l'espace et pour la lumière par exemple, nous qualifierons ce type de relation de **dynamique végétale pure**.
- Soit l'occupation humaine ancienne ou actuelle a créé un facteur limitant pour la végétation, et ce seront alors les espèces anciennement favorisées par le défrichement par exemple (qui ne sont plus protégées) qui céderont du terrain devant d'autres espèces, plus robustes ou mieux adaptées. Nous appellerons ce type de relation de **dynamique végétale influencée par l'occupation humaine**.

Dynamique végétale pure

- 1. Dynamique lande/pelouse xérophiles : La lande à la reconquête de la pelouse, (voir par. 4-5-1-1).
- 2. Dynamique fougère/lande ou pelouse.
 - 2a. Conquête du terrain par la fougère sur un mode compact avec front. indicateur de la dynamique actuelle.
 - 2b. Idem que précédemment mais sur un mode non compact dû à l'ombre d'une haie (persistance des graminées, voir par. 4-4).
- 3. Dynamique des bouleaux sur la pelouse (par. 4-5-1-2 pelouse à agrostis grêle).

Dynamique végétale influencée par l'occupation humaine

- 4. Dynamique de la fougère sur une lande ou une pelouse résiduelle.
 - 4a. L'avancée de la fougère a été retardée par l'occupation humaine: Présence d'un chemin.
 - 4b. L'implantation de la fougère a été favorisée par un terrain relativement stable par rapport aux bouleversements alentours (voir par. 4-5-1-2 lande mésophile).
 - 4c. La limite de la fougère correspond à celle d'un ancien labourage ou d'un défrichement différentiel (voir photographie de 1952, figure 62).

- 5. Repousse des ajoncs.
 - 5a. Repousse des ajoncs sur des haies non plantées d'arbres
 - 5b. Repousse des ajoncs sur des rides liées à des chemins (voir par. 4-5-1-2- lande mésophile).
- 6. Différence d'implantation de la fougère due à l'ombre des arbres.

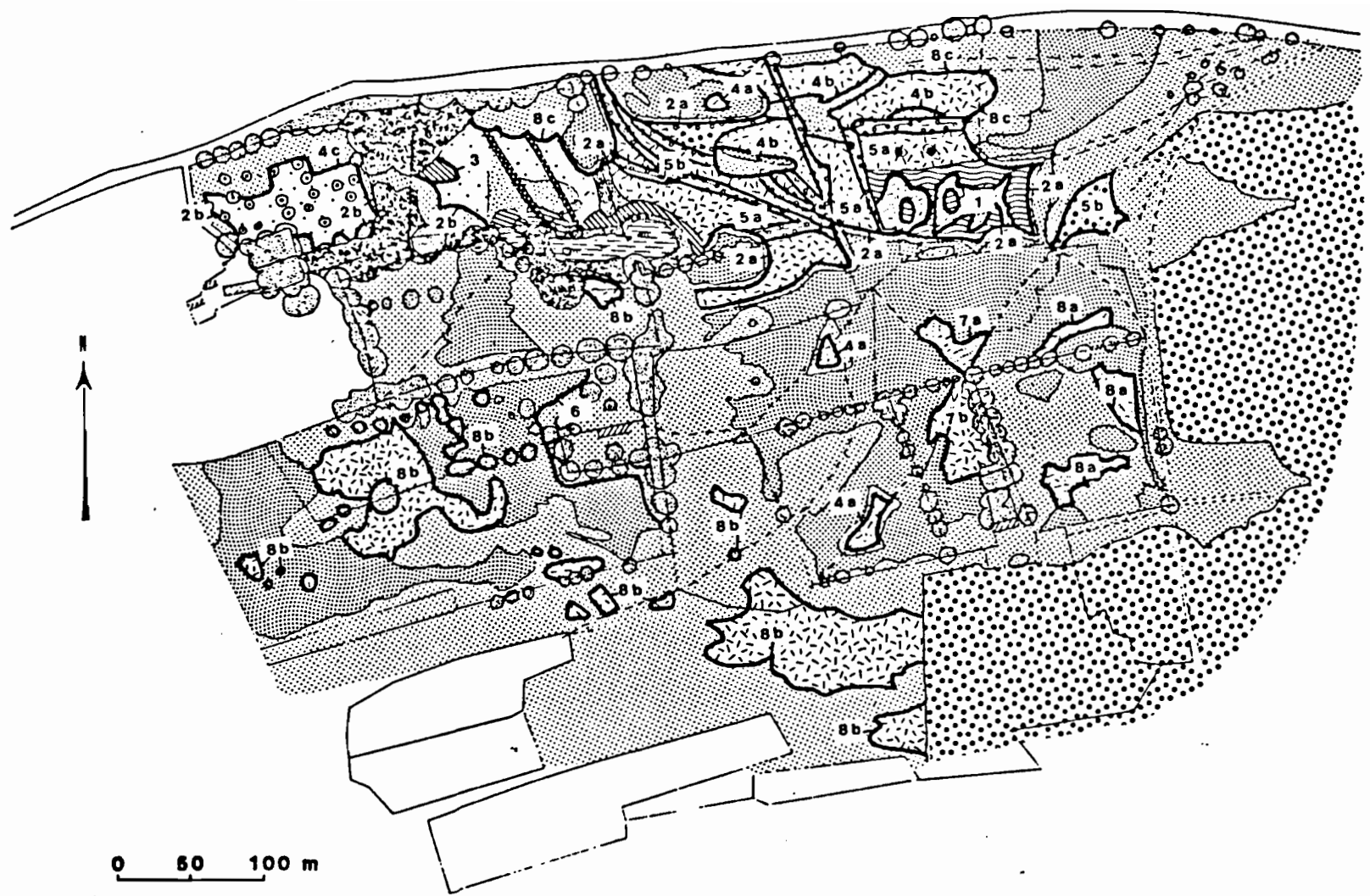


Figure 71 : Carte des limites liées à la dynamique végétale

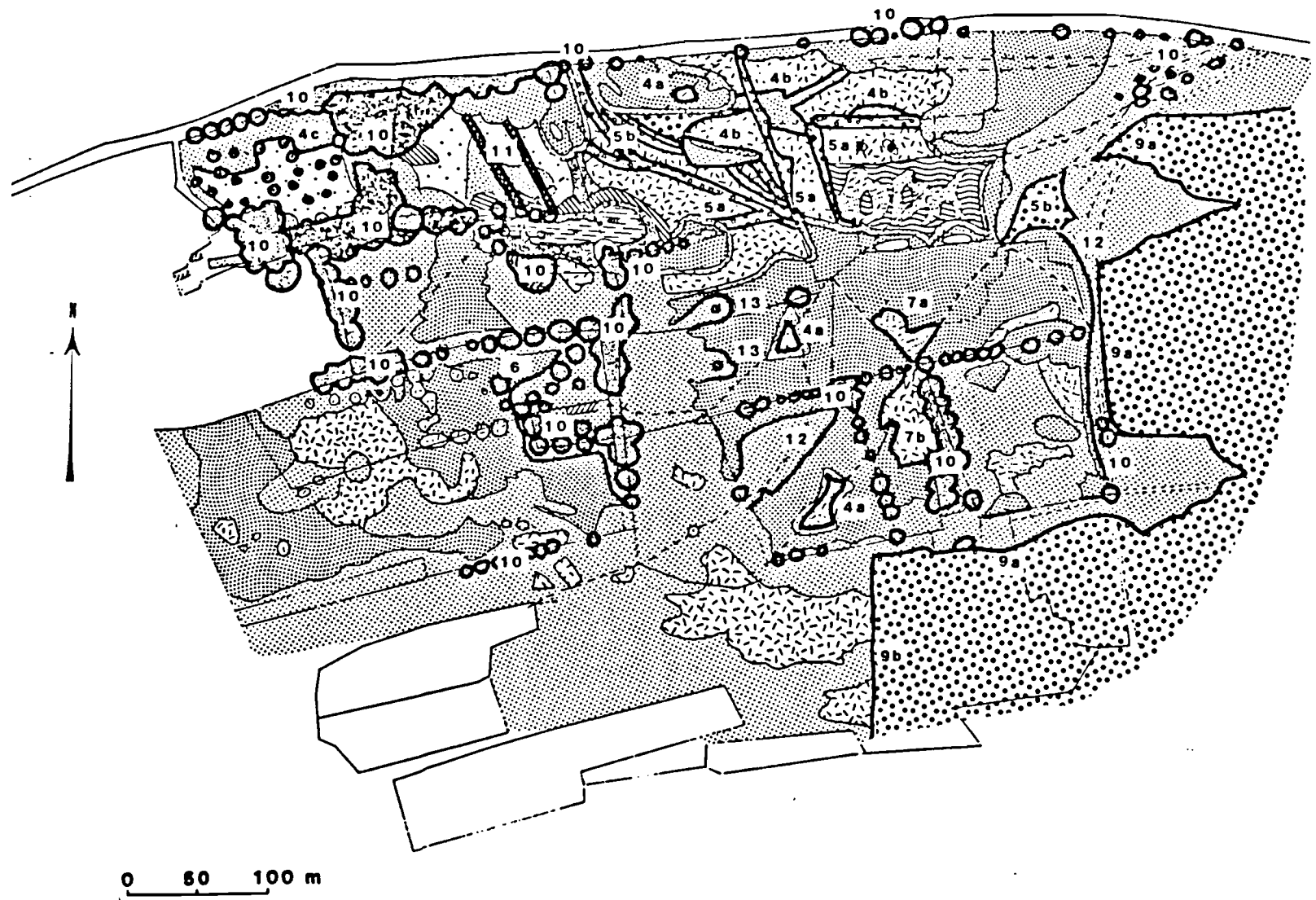


Figure 72 : Carte des limites liées à l'occupation humaine

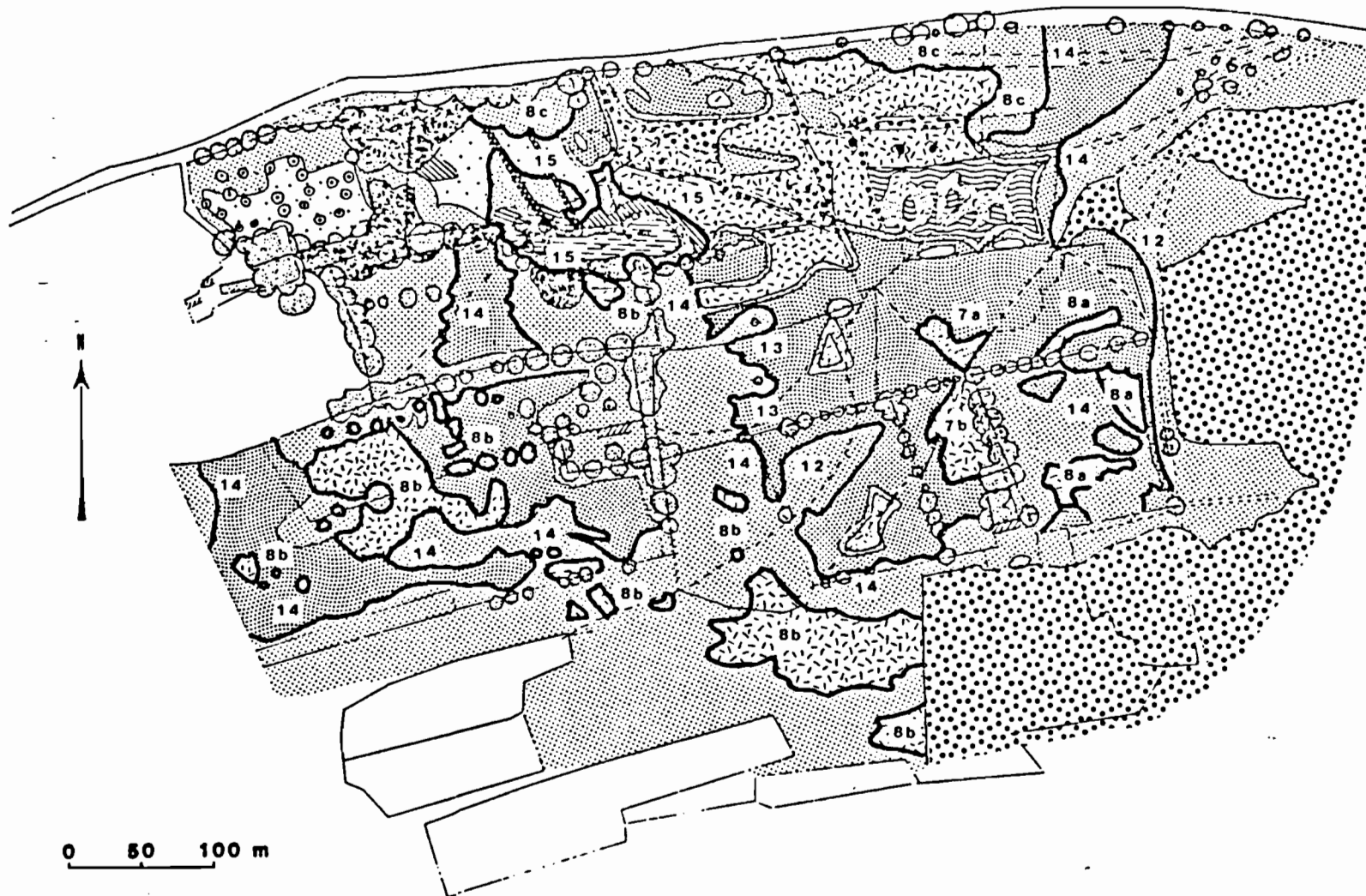


Figure 73 : Carte des limites dont les relations ne sont pas uniquement de dynamique végétale ou d'occupation humaine.

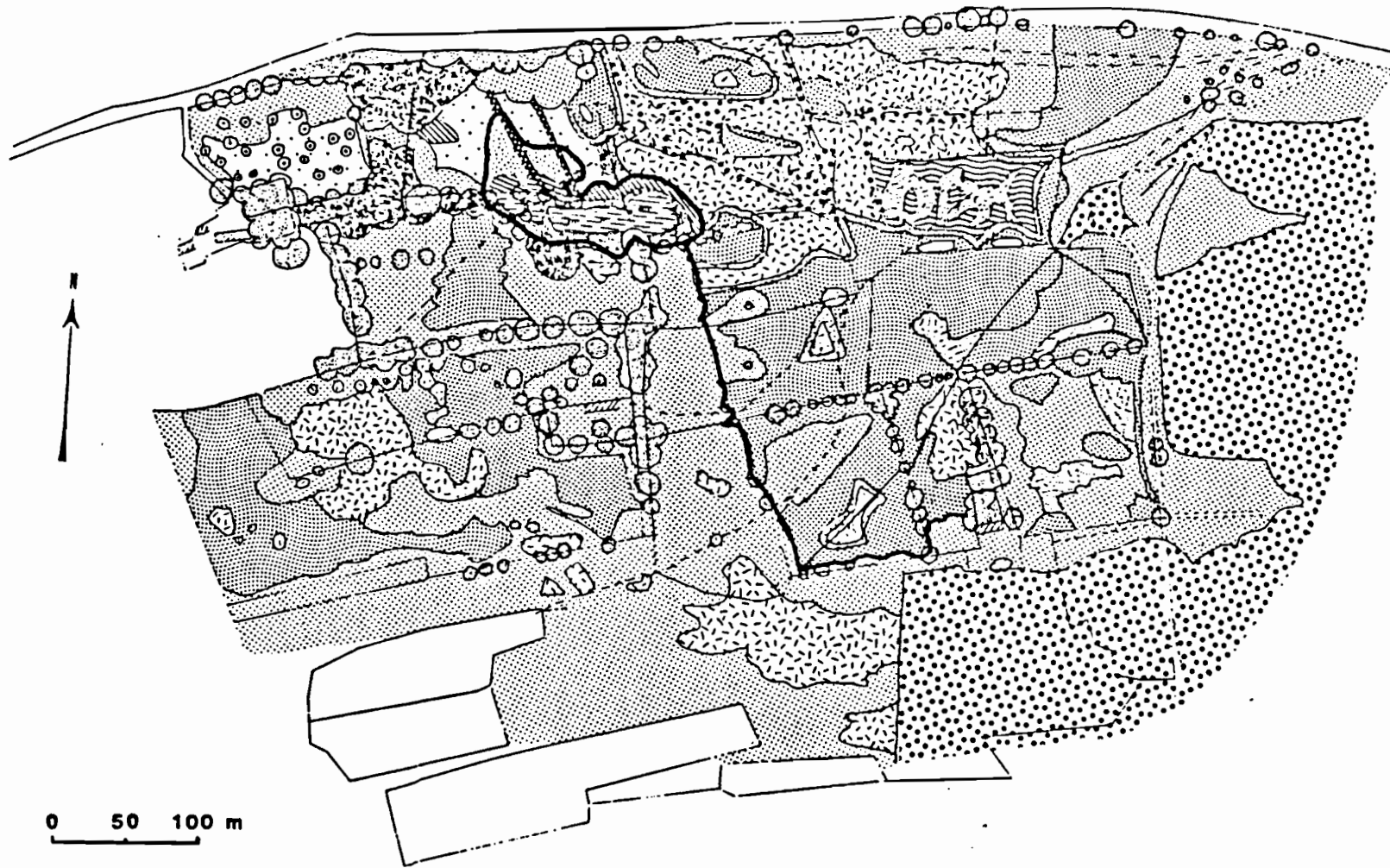


Figure 74 : Carte des limites pour lesquelles les relations ne sont pas expliquées.

4.7.2 Limites liées à l'occupation humaine (figure 72)

- 9. Limite des ajoncs
 - 9a. Limite de défrichement de la lande.
 - 9b. Limite d'un incendie.
- 10. Haies et bosquets
- 11. Anciens fossés d'irrigation

4.7.3 Limites pour lesquelles les relations ne sont pas uniquement de dynamique végétale ou liées à l'occupation humaine (figure 73)

Les limites 7, 8, 12 et 13 sont des limites dont l'existence ou la forme ne peut pas être déterminée seulement par un processus de concurrence végétale ou par l'occupation humaine. Un autre type de relation doit être recherché:

Dynamique végétale - Occupation humaine - Autre type de relation

- 7. Dynamique de la fougère sur une lande résiduelle.
 - 7a. On peut voir que la fougère a avancé sur la lande par rapport à la fig. 62, interprétation de la photographie de 1969.
La forme de la tache est reliée à la présence de chemins
Mais pas de front : La dynamique est elle encore actuelle? Est elle stoppée par un autre facteur?
 - 7b. Même remarques que pour 7a, mais ici on a affaire à une lande mésophile; la différence de contenu ne s'explique pas plus que l'absence de front. Donc également présence d'un autre type de relation.

Dynamique végétale - Autre type de relation

- 8a. Dynamique fougère / lande résiduelle xérophile.
Mode compact ou non compact.
Pas de signe d'occupation humaine pour expliquer le retard de colonisation par la fougère.
Pas de front : Dynamique ancienne ou lente.
- 8b. Dynamique fougère / lande résiduelle mésophile.
Même chose que précédemment, différence de contenu.
- 8c. Dynamique fougère / lande ou pelouse.
Sur un mode non compact.
Pas de front : Dynamique ancienne ou lente.
Même situation en bas de versant.

Occupation humaine, dynamique végétale et autre type de relation

- 12. Limite séparant deux modes différents d'implantation de la fougère. La forme de la limite est liée à un chemin ou à la limite d'un champ, mais cela n'explique pas la différence de contenu; donc autre type de relation.
- 13. Forme de la limite due à l'ombre de deux arbres.

4.7.4 Limites pour lesquelles les relations ne sont pas expliquées (figure 74)

- 14. Limites entre des formes d'organisation différentes de la fougère: Mode compact et mode dispersé avec sous-strate graminéenne.
- 15. Limites des domaines humides contigus à des domaines mésophiles.

Certaines des limites portées sur cette carte n'ont donc pas de signification structurale puisque les relations entre les domaines qu'elles séparent ne sont pas (ou pas entièrement) déterminées et nous devons maintenant nous intéresser aux relations de la végétation avec le sol.

5.0 ANALYSE DES RELATIONS ENTRE LES FORMATIONS SUPERFICIELLES ET LA COUVERTURE VEGETALE

Le long de chacune des séquences qui nous ont permis de suivre les variations des formations superficielles (figure 13, séquence A à M), des séquences parallèles de végétation ont été établies. Les limites des grands domaines végétaux définis au chapitre 4 ont été reportées sur ces séquences, et des informations ont été relevées concernant la hauteur ou la densité du couvert végétal, la composition particulière d'une sous-strate herbacée, des détails concernant le microrelief ou l'occupation humaine. Ces informations font l'objet d'une légende détaillée repérée le long des séquences de végétation par des numéros.

Les séquences de formations superficielles et de végétation ainsi que leur légende sont données in extenso en annexe (Les figurés précis employés pour leur rendu graphique se prêtent mal à la réduction et ces dessins ont donc été renvoyés en annexe). Nous donnons ici trois exemples seulement qui sont les toposéquences B, G et H, qui représentent bien la diversité du secteur (figures 75,76 et 77).

Nous allons dans un premier temps analyser la répartition des ensembles végétaux en fonction des formations superficielles, puis nous concluerons sur les relations ou l'absence de relations qui peuvent être établies entre la végétation et le sol.

5.1 Analyse de la répartition des ensembles végétaux en fonction des formations superficielles

5.1.1 Séquence B

Les horizons suivants ont été définis :

- Un horizon brun clair polyédrique (BCP).
- Un horizon brun jaune microgrumeleux (BJM).
- Un horizon brun jaune clair lamellaire (BJCL).
- Un horizon organique grumeleux (OG).

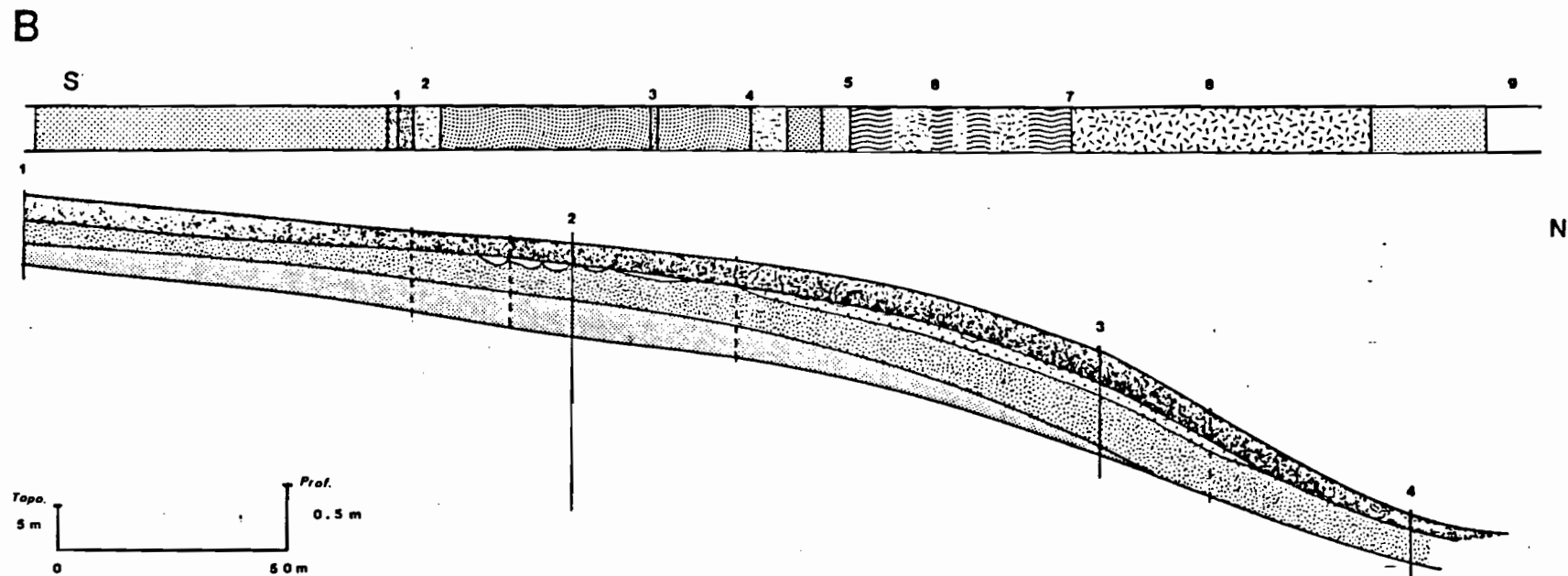


Figure 75 : Répartition des ensembles végétaux dans la séquence B

Les variations de ces horizons le long de ces toposéquences sont les suivantes :

- L'horizon BCP disparaît en situation de pente forte, l'horizon BJM se trouve alors directement sur l'allotérite de schiste et quartzite.
- L'horizon BJCL apparaît de manière discontinue coïncidant avec des lieux de passage (chemin) dont la localisation a pu varier de plusieurs mètres au cours du temps. Son apparition de manière continue coïncide exactement avec la limite haute d'un champ anciennement cultivé situé à la rupture de pente. Il disparaît une trentaine de mètres après la limite basse de ce champ, en situation de pente forte.

La fougère occupe tout le haut de la séquence jusqu'à la rupture de pente. Elle est répartie soit en mode clairsemé, soit en mode compact, indifféremment sur la succession BCP, BLM, OG ou BCP, BJM, BJCL (discontinu), OG. Des résidus de lande (noté 2 et un peu plus bas que 4 sur la séquence de végétation), ainsi que le front de la fougère (succession vers l'extérieur mode compact, mode clairsemé, figure 64) permettent de penser que la fougère gagne sur la mosaïque lande-pelouse occupant le champ anciennement cultivé à la rupture de pente. Nous avons analysé les relations entre lande et pelouse au chapitre 4, et cette mosaïque occupe une grande partie de la succession BCP, BJM, BJCL continu, OG, sur le versant. Après la limite basse du champ, succède à la mosaïque lande-pelouse, une lande mésophile à ajoncs, bruyère ciliée et agrostis à soies (Ulex Europaeus L., Erica ciliaris L., et Agrostis setacea Curt.). Puis la fougère clairsemée reprend en bas de versant.

5.1.2 Séquence G

Le long de cette séquence, les successions verticales sont les suivantes :

- En haut de versant, pente forte : BJM sur altérite peu développée de schiste Gédinnien, puis MPgm et Mpo.
- En milieu de versant, pente moyenne : Mtg sur altérite. BJM en poches résiduelles, MPgm continu et Mpo.
- En bas de versant, replat, GMtgo, Gm, OM.
- En bas de versant, reprise de la pente, Mtg, OM puis plus bas OG.

Une fougère en mode clairsemé occupe le versant, indifféremment sur la succession BJM, MPgm discontinu, Mpo, ou Mtg, MPgm continu, MPO, entrecoupée par deux haies d'arbres successives. A la fougère, fait suite une lande tourbeuse (ou mouillère, l'eau affleurant en hiver), à molinie bleue en touradons, narthecium et sphaignes (Molinia caerulea L., Narthecium ossifragum L.). Une petite ceinture de bouleaux nains marque le bas de cette lande tourbeuse. et on trouve ensuite une lande mésophile à ajoncs et callune (Ulex minor Roth., Ulex europaeus L., et Calluna vulgaris (L.) Hull), et quelques pieds de fougère aigle clairsemés, enfin sur la reprise de la pente une fougère dense avec front à l'amont qui indique une conquête sur la lande mésophile, limitée par deux fossés assez profonds (environ un mètre de dénivelé).

G

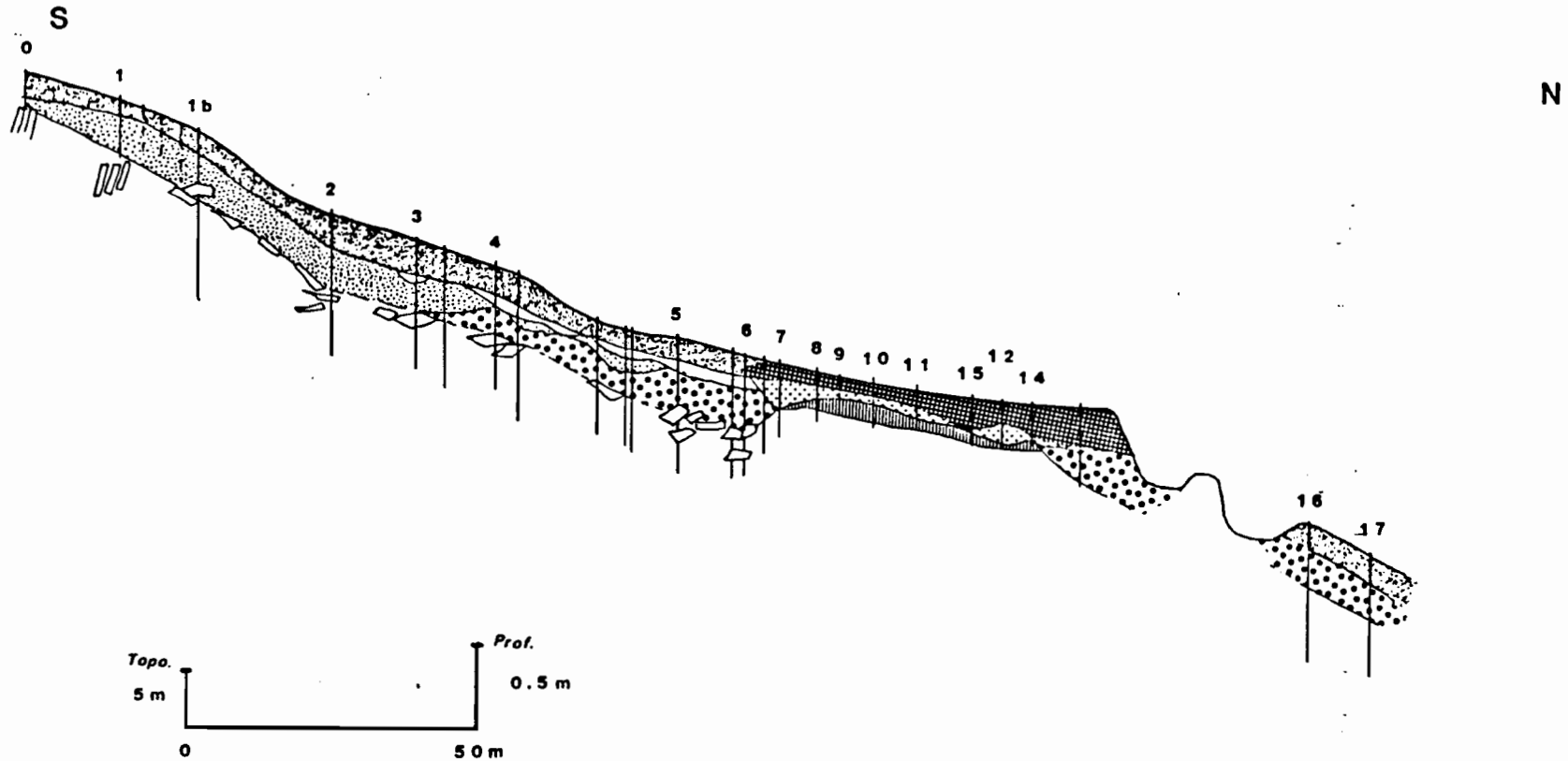


Figure 76 : Répartition des ensembles végétaux dans la séquence G

5.1.3 Séquence H

Les successions verticales sont les suivantes :

- Sur le haut du plateau : Altérite peu développée sur schiste Gédinnien, BJM, MPbjvm, MPgm, MPo.
- Sur le versant BCP, BJM, MPbjvm discontinu, MPo.
- Un passage très rapide en bas de versant Mtgo, Mtg, MPgm, MPo.
- Sur le replat, GM, OM.
- Plus bas, Mtg, OG.

La fougère en mode clairsemé à sous-strate importante occupe le haut du plateau, entrecoupée de clairières de lande mésophile à bruyère ciliée, houlque laineuse, agrostis à soies et fougères très clairsemées, (Erica ciliaris L., Holcus lanatus L., Agrostis setacea Curt. Pteridium aquilinum (L.) Kuhn).

Ensuite, une fougère en mode compact occupe le versant, devenant de plus en plus dense vers l'aval tandis que la sous-strate herbacée diminue, jusqu'à une large clairière de lande mésophile. Sur le replat, une lande tourbeuse à molinie en touradons et narthecium, est limitée à l'aval par une bordure de bouleaux et d'ajoncs nains (Ulex minor Roth.). Vient ensuite une pelouse mésophile à agrostis grêle, houlque laineuse et canche flexueuse (Agrostis tenuis Sibth., Holcus lanatus L. et Deschampsia flexuosa L.). Les fougères reprennent en bas de versant d'abord sur un mode clairsemé puis sur un mode compact.

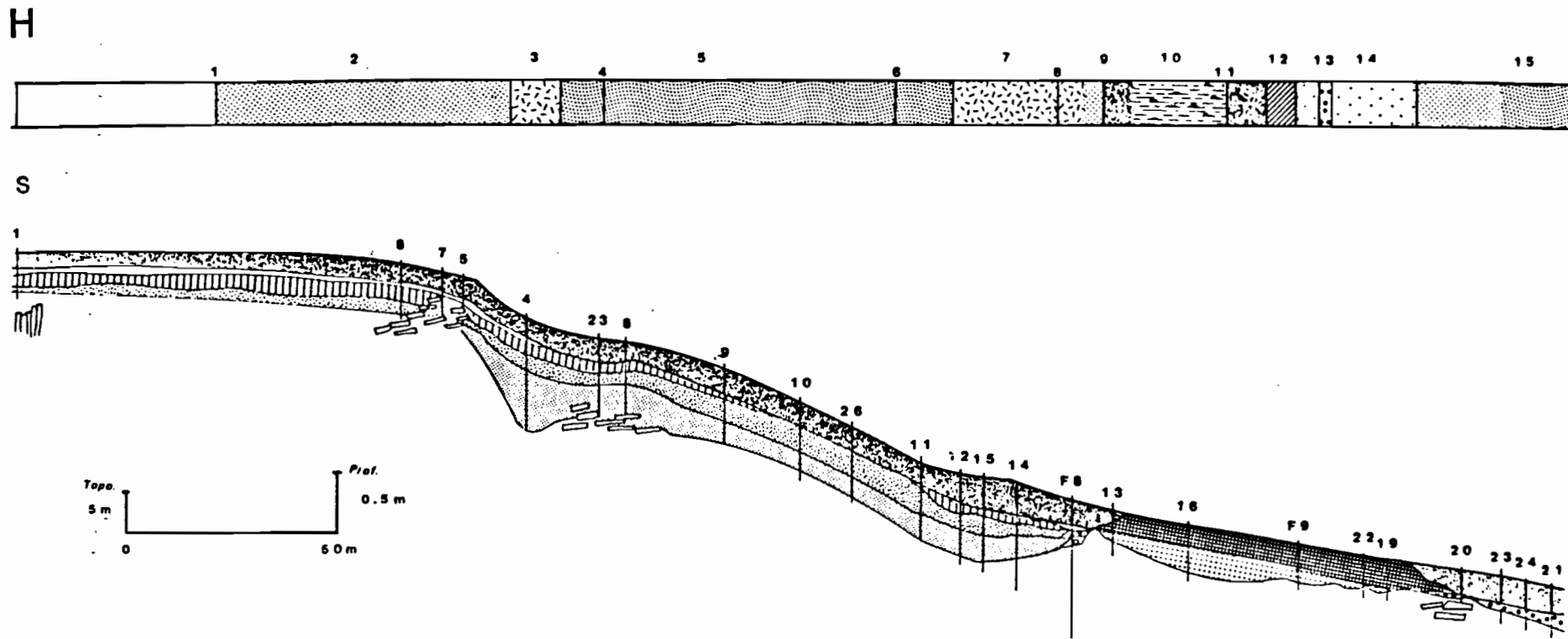


Figure 77 : Répartition des ensembles végétaux dans la séquence H

5.1.4 Etablissement de relations partielles

On peut tirer de l'analyse de ces trois séquences et de l'étude des autres séquences données en annexe, les relations suivantes :

1. La présence de la fougère en mode compact ou clairsemé est liée à celle de l'horizon **BJM** ou **OG**.
2. La présence de lande-pelouse xérophile ou mésophile est liée soit à l'existence de l'horizon **BJCL** continu épais, soit (en résidus plus ou moins importants) à l'existence du micropodzol (**MPgm** ou **MPbjvm** ou **MPO**), soit à l'aval des successions verticales **GM**, **OM**.
3. La présence de lande tourbeuse (ou mouillères), des ceintures de bouleaux nains, et de pelouse humide est liée à la succession **GM**, **OM**.

Ces trois types de relations se vérifient dans toutes les séquences.

- Elles sont globales : Tels domaines végétaux sont reliés à telles successions verticales d'horizons.
- Elles sont partielles : Il existe des exceptions aux deux premières relations;
 - relation 1 : Exception I (séquence **K**, annexe)
 - relation 2 : Exception II (séquences **E** et **N**, annexe)
- Elles ne sont pas univoques : Plusieurs types de domaines végétaux ou d'implantation de la fougère peuvent se trouver sur une seule succession d'horizons. Par exemple :
 - Sur la succession 1 : **BCP**, **BJM**, **OG**
 - De la fougère en mode clairsemé (séquence **A**, annexe).
 - De la fougère en mode compact (séquence **B**, figure 75).
 - De la lande mésophile (annexe **A**).
 - Sur la succession 2 : (**BCP**), **BJM**, **BJCL**, **OG**
 - De la fougère en mode clairsemé (séquence **A**, annexe).
 - De la fougère en mode compact (séquence **A**, annexe).
 - La mosaïque lande-pelouse (séquence **B**, figure 75).
 - Une lande mésophile (séquence **B**, figure 75).
 - Sur la succession 3 : (**BCP**), **BJM**, **MP**
 - De la fougère en mode compact (séquence **D**, annexe).
 - De la fougère en mode clairsemé (séquence **J**, annexe).
 - De la lande mésophile (séquence **H**, figure 77).
 - Sur la succession 4 : (**Mtgo**), **Mtg**, **OG** ou **OM**
 - De la lande mésophile (séquence **C**, annexe).
 - De la fougère en mode clairsemé (séquence **D**, annexe).
 - De la pelouse humide (séquence **L**, annexe).
 - Des bouleaux nains (séquence **L**, annexe).
 - De la pelouse mésophile (séquence **M**, annexe).
 - Sur la succession 5 : (**Gmtgo**), **GM**, **OM** (discontinu ou non)
 - De la lande mésophile (séquence **C**, annexe).

Des domaines de mouillère (séquence G, figure 76).
Des bouleaux nains (séquence G, figure 76).
Des bosquets de bouleaux, saules (séquence J, annexe).
De la pelouse humide (séquence J, annexe).
De la pelouse mésophile (séquence J, annexe).
De la fougère clairsemée (séquence K, annexe).

- On ne peut déterminer aucun caractère des formations superficielles (épaisseur, continuité d'un horizon, apparition d'un horizon) qui soit strictement lié à l'implantation d'une ou de plusieurs espèces végétales. Par exemple, la limite de disparition de la fougère vers l'aval des séquences coïncide à plusieurs reprises avec l'apparition de l'horizon OM : C'est vrai dans les séquences N et H. Tout à fait à l'aval de la séquence H, la réapparition de la fougère coïncide avec la disparition de l'horizon OM. Mais cette relation ne peut être établie pour les séquences J, K et C.

5.2 Conclusion : Les relations entre les formations superficielles et la couverture végétale

Les seules relations établies au niveau des toposéquences entre les formations superficielles et la couverture végétale sont les suivantes :

- Sur les horizons BJM ou OG, la fougère en mode compact ou clairsemée est implantée à deux exceptions près.
- Les landes ou pelouses, xérophiles ou mésophiles existent sur les successions BJM, OG le plus souvent avec BJCL, ou sur MP, ou à l'aval des successions GM, OM.
- Les ensembles végétaux à caractère humide, tourbeux ou mouillés sont **toujours** sur la succession GMtgo, GM, OM. Mais on peut trouver d'autres ensembles végétaux sur cette succession.

Donc, pour des observations à une dimension (profil), ou à deux dimensions (séquence), on établit des relations d'ordre global qui ne font que confirmer des connaissances empiriques; un pédologue par exemple, connaît par expérience certaines relations entre la végétation et le sol, même si elles sont pour lui implicites, et la meilleure preuve en est qu'il choisit l'implantation de ses profils ou tranchées en fonction du relief, mais aussi de la végétation.

Par contre, nous avons établi que ces relations d'ordre général ne sont pas strictes, ne sont pas univoques et comptent des exceptions. Mais ceci est aussi une opinion courante: Il n'y a pas de relations strictes entre les caractères des formations superficielles et une espèce ou un groupe d'espèces végétales.

Or, si on compare :

- Les limites de la carte de végétation qui n'ont pas seulement une signification de dynamique végétale ou d'occupation humaine, et surtout celles qui n'ont pas de signification de ces deux points de vue (figures 76 et 77, les limites n° 14, 15, 7a et 7b), et,
- les limites structurales des formations superficielles (planche hors texte n°1).

On peut constater (planche hors texte n°2), que leur forme présentent de grandes similitudes, si elles ne sont pas exactement superposables.

C'est un premier résultat important :

S'il n'y a pas de relations strictes entre caractères du sol et de la végétation, il y a des relations entre les limites structurales des formations superficielles et des limites d'organisation de la couverture végétale, comme c'est le cas de la fougère (limite n° 14), ou des limites de groupements d'espèces dont la dynamique est liée au sol (limites n° 15 et 7a, 7b).

6.0 CONCLUSION : LA REFERENCE TERRAIN

Cette conclusion rappellera les résultats les plus importants obtenus au cours de cette première partie, qui établit notre référence terrain.

6.1 Les trois domaines structuraux définis dans les formations superficielles

Nous avons défini trois domaines structuraux :

1. Un premier domaine sur altérite peu développée sur schistes Gédinniens, en place ou couchés, peu ou non altérés, caractérisé par une différenciation de surface micropodzolique.
2. Un second domaine sur altérite très développée de schistes et quartzites Gédinniens.
3. Un troisième domaine sur altérite très transformée d'éboulis de schiste et quartzite.

La limite entre les domaines I et II est de nature géologique. Elle marque une différence lithologique : Bancs de schiste dur proches de la surface d'une part, ces bancs forment l'ossature du relief dans le paysage sur schistes Gédinniens et sont donc peu altérables, puis alternance de schistes plus altérables et de quartzites quand on va vers le sommet du Gédinnien (ici vers le bas du versant). Une faille NNE-SSW ayant décalé le bloc ouest vers le nord entraînerait ces différences lithologiques de part et d'autre de la limite dans sa portion N/S.

Cette limite se retrouve dans les altérites. D'une part, une altérite peu développée, d'autre part, une altérite profonde en deux faciès isaltéritique et allotéritique.

Cette limite ne se traduit pas dans les différenciations pédologiques intermédiaires, la même succession BCP, BJM étant rencontrée dans les deux domaines.

Enfin, cette limite marque l'existence sur le domaine sur altérite peu développée d'une différenciation micropodzolique de surface.

La limite entre les domaines I et II d'une part et le domaine III d'autre part est peut être de nature géologique. Elle pourrait correspondre à la présence d'un éboulis de schiste et quartzite en bas de versant.

Elle est surtout le front de rencontre de deux transformations de nature hydromorphe et de sens de propagation vertical opposé. Dans les domaines I et II se manifeste d'abord dans les ensembles altéritiques puis pédologiques une transformation qui n'a pas été caractérisée géochimiquement, qui se traduit par une mobilisation et une concentration du fer, et qui est latérale remontante. Elle se manifeste à la fois sur le haut du plateau et en bas de versant, les ensembles

les moins transformés se situant en rupture de pente et sur le versant. Dans le domaine III une transformation verticale descendante qui se traduit par une éluviation intense du fer se surimpose à la transformation précédente. La limite entre le domaine III et les deux premiers est le point de rencontre de ces deux transformations. D'un côté la transformation latérale remontante existe seule, de l'autre les deux transformations existent et leurs rapports n'ont pas été étudiés géochimiquement.

6.2 Les relations entre les formations superficielles et les ensembles végétaux

6.2.1 Au niveau des séquences

Les relations établies entre la répartition des ensembles végétaux le long des séquences de sol et les variations latérales des formations superficielles le long de ces mêmes toposéquences sont d'ordre global, non univoques, partielles.

Il n'y a pas de relations strictes entre l'un quelconque des caractères des formations superficielles et la présence d'une espèce ou d'un groupement d'espèces végétales.

Mais les relations d'ordre global établies vont nous servir à la fois de vérification et d'explication, pour les limites tenant compte d'un autre facteur que la dynamique végétale et l'occupation humaine; ces limites ont été analysées à partir de la carte de répartition des domaines végétaux après élimination de toutes les autres limites explicables de ces deux points de vue.

6.2.2 Au niveau spatial

La confrontation des limites 14, 15, 7a et 7b, de la carte de répartition des ensembles végétaux et des limites de la carte structurale des formations superficielles nous amène aux conclusions suivantes :

1. Les limites 14, 15, 7a et 7b coïncident avec des limites dans la couverture des formations superficielles.
2. Ces limites ne sont pas exactement superposables, ni strictement parallèles, mais il y a des correspondances générales de forme et de situation.
 - Par rapport aux relations établies sur les séquences, la limite 15 correspond aux domaines humides à mouillés et englobe le centre de la succession GMto, GM, OM.
 - La limite 14 est une limite entre une fougère en mode compact et une fougère clairsemée. Mais surtout, de part et d'autre de cette limite, on trouve deux modes de répartition différents des fougères en mode compact, clairsemé et des landes, pelouses.

A l'est de cette limite, la fougère en mode compact domine, les résidus de lande pelouse sont peu nombreux, de grande taille et liés soit au facteur formations superficielles (zone à succession GM, OM en mode discontinu), soit au facteur occupation humaine.

A l'ouest de cette limite, la fougère en mode clairsemé domine, la fougère en mode compact est limitée à de petits espaces (en mosaïque) et les résidus de lande, pelouse sont très nombreux, en majorité de petite taille,

allant jusqu'à de larges plages de lande et pelouse mésophile peu denses, (le sol nu apparaît par places), qui rejoignent la lande à ajoncs du haut de plateau.

L'implantation de la fougère à l'ouest de la limite 14 peut être due soit à l'existence du micropodzol, soit à la présence de nombreux blocs en surface qui gênent la colonisation par la fougère et sont à l'origine de multiples résidus de lande de petite taille.

- **Ces limites coïncident avec les limites structurales des formations superficielles, celles qui séparent les trois domaines.**

Or la carte des domaines végétaux a été établie en partie grâce à l'interprétation visuelle de la photographie aérienne brute de départ.

L'information recherchée ici est donc globalement contenue dans la photographie aérienne

L'IMAGE

7.0 INTRODUCTION : DEFINITIONS PRELIMINAIRES

Ce chapitre définit ce que nous entendons par le terme image, et examine comment ont été acquises et ce que représentent les données qui vont être analysées, puis nous présenterons la façon dont nous pourrions les traiter.

Nos documents de base sont des photographies aériennes de deux types :

- Photographie aérienne IGN, panchromatique, sur support papier.
- Photographie aérienne provenant d'une mission spéciale, infra-rouge couleur, sur film plastique transparent.

7.1 *La télédétection électromagnétique*

La télédétection permet d'acquérir des informations sur un objet sans qu'il y ait contact direct entre l'appareil de mesure et cet objet.

L'appareil photographique embarqué à bord d'un avion a capté à un moment donné sur une pellicule sensible le rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par la surface du sol et son couvert végétal.

7.1.1 L'onde électromagnétique

Le soleil, la terre et l'atmosphère ont des comportements proches de ceux de corps noirs. Un corps noir est un corps théorique qui transforme en chaleur toute l'énergie qu'il reçoit et rayonne en ondes électromagnétiques une quantité d'énergie égale à celle qu'il a absorbé.

Ces trois entités émettent donc des rayonnements qui sont enregistrés par le capteur, soit directement dans le cas de l'atmosphère et de la terre, soit par réflexion sur la surface du sol ou du couvert végétal dans le cas du soleil.

Le soleil : A la limite de l'atmosphère terrestre, le rayonnement électromagnétique issu du soleil peut être considéré comme dépendant uniquement des variations saisonnières de la distance terre-soleil et de l'inclinaison de la surface réceptrice.

L'atmosphère : L'atmosphère se comporte comme un émetteur de rayonnement électromagnétique, mais aussi comme un milieu perturbateur pour les rayonnements issus du soleil, et ceux émis ou réfléchis par la surface terrestre.

Perturbations : Les perturbations dues à l'atmosphère se traduisent par :

- d'une part une absorption du rayonnement par les gaz atmosphériques, intense pour les couches hautes de l'atmosphère, principalement dans l'ultra-violet et l'infrarouge,
- d'autre part des diffractions dues à sa constitution granulaire (diffraction de Rayleigh, etc.),
- enfin des distorsions géométriques dues aux variations de l'indice de réfraction (constitution stratifiée).

Ces perturbations dépendent donc de la composition de l'atmosphère, de la latitude, de l'heure, des conditions climatiques, etc.

Emission : L'atmosphère présente une forte émissivité pour les longueurs d'onde correspondant aux bandes d'absorption maximale.

La terre :

Emission : Le rayonnement terrestre s'effectue dans l'infrarouge moyen.

Réflexion : La façon dont le rayonnement solaire est réfléchi dépend d'un grand nombre de facteurs : Longueur d'onde, donc pénétration du rayon incident, indice de réfraction, température, humidité, rugosité, couvert végétal (épaisseur, température, humidité, hétérogénéité), etc.

7.1.2 Le signal enregistré sur la photographie

7.1.2.1 Caractéristiques

Le signal qui arrive sur la pellicule sensible représente une moyenne spatiale et une résultante spectrale du rayonnement incident. Nous illustrons ci-après ces deux notions, pour ce qui concerne les documents que nous avons utilisés.

Une moyenne du rayonnement sur une surface au sol de :

- 3,20 dm^2 environ (18 cm de coté) pour la photographie infra-rouge couleur,
- 10,9 dm^2 environ (33 cm de coté) pour la photographie panchromatique.

En effet, l'échelle approximative de la photographie infra-rouge couleur est de 1/15 000 et le pouvoir résolvant au centre est de 80 lignes par mm, l'échelle de la photographie panchromatique est de 1/33 000 et le pouvoir résolvant au centre est de 100 lignes par mm.

La photographie constitue donc un échantillonnage spatial; elle est granulaire donc discontinue.

Une résultante des différents rayonnements, que nous avons sommairement présentés dans le paragraphe précédent.

Pour l'infra-rouge couleur, le rayonnement électromagnétique capté est filtré en trois bandes spectrales correspondant à la sensibilité des trois couches de l'émulsion :

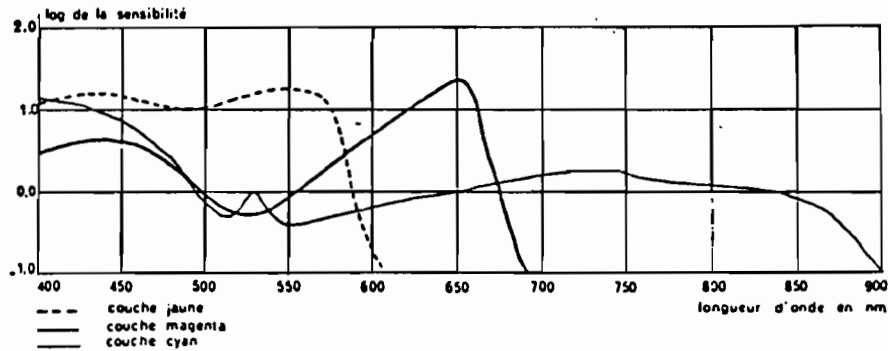


Figure 78 : Courbes de sensibilité spectrale des trois couches du film Kodak aérochrome infra-rouge 2443 (d'après C-M. et M-C. GIRARD, 1975)

On ajoute des filtres pour accroître la sélectivité de sensibilité des trois couches: Filtre jaune sur la couche cyan pour éliminer sa sensibilité au vert, filtre orange sur l'objectif pour éliminer la sensibilité des trois couches au bleu.

La couleur des couches n'a rien à voir avec leur sensibilité; par exemple, la couche jaune est sensible au vert. Par ailleurs, il s'agit de couches sur film négatif, qui après développement et tirage sur un positif donnent la couleur complémentaire; par exemple, la couche jaune donne du bleu.

Couleur des couches (négatif)	Sensibilité au :	Couleurs résultantes (positif)
Jaune	Vert	Bleu
Magenta	Rouge	Vert
Cyan	Infra-rouge	Rouge

Tableau n° 10

Pour le panchromatique, le rayonnement électromagnétique capté est filtré par l'émulsion photographique qui a une bonne sensibilité entre 400 et 700 nm (visible) avec une baisse de sensibilité dans le vert (500 nm). On ne garde donc du rayonnement incident que ce qui est compris dans cette bande de longueurs d'onde :

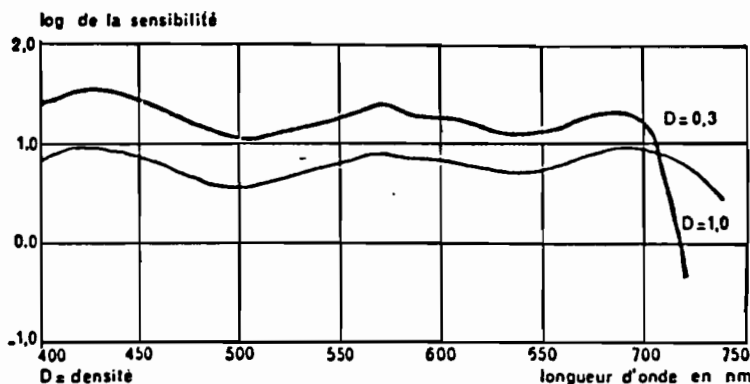


Figure 79 : Courbes de sensibilité spectrale d'un film panchromatique (d'après C-M et M-C GIRARD, 1975)

La photographie constitue donc un échantillonnage spectral; toutes les longueurs d'onde du rayonnement ne sont pas retenues, et certaines sont mieux mises en valeur que d'autres, la sensibilité de l'émulsion n'étant pas une fonction constante de la longueur d'onde.

7.1.2.2 Bruit résultant de la prise de vue

Pour la photographie, le bruit a des causes géométriques et photométriques.

Causes géométriques

- L'image d'un point est une tache dont les dimensions dépendent principalement de la résolution de l'émulsion. Il y a donc dispersion du signal réélu.
- Le pouvoir résolvant de l'émulsion n'est pas le même sur toute la surface de la pellicule : il est meilleur au centre qu'à la périphérie. L'échantillonnage n'est donc pas le même en tout point de l'image. Par exemple, pour la photographie infrarouge couleur, le pouvoir résolvant au centre de la pellicule est de 80 lignes par mm, il est de 50 lignes par mm au bord.
- L'image photographique est discontinue, elle correspond donc à un échantillonnage spatial.

Causes photométriques

- La transparence est en relation inverse avec le degré de noircissement de la photographie et c'est donc une mesure de sa réaction au rayonnement incident. Il n'y a pas de relation simple entre l'éclairement et la transparence de la photographie. En effet, il existe un seuil au dessous duquel l'émulsion n'est pas impressionnée, c'est la sous-exposition; au dessus de ce seuil, la transparence décroît avec l'éclairement; au dessus d'un seuil maximum, il y a saturation de l'émulsion.
- Les sensibilités des émulsions effectuent un filtrage sur le spectre des rayonnements arrivant sur l'objectif.
- L'objectif lui même effectue un filtrage sur l'intensité lumineuse, qui varie suivant l'angle entre la direction du rayonnement incident et l'axe de l'objectif. La clarté, qui évalue la perte de luminosité chute très rapidement en dehors de cet axe.
- La photographie peut être voilée (diminution du contraste de l'image) pour les causes suivantes :

1. La lumière parasite réfléchiée ou diffusée dans l'appareil,
2. Des pressions ou des frottements dans la chambre de prise de vue,
3. Un vieillissement ou une éventuelle oxydation à l'air ou au développement.

7.1.2.3 Représentation physique du signal et du bruit

Nous venons de résumer ce que représentent matériellement le signal et le bruit enregistrés sur la photographie. Il est maintenant nécessaire d'en donner une formulation physique car cela nous sera utile par la suite.

Signal sinusoïdal monodimensionnel : Un signal est une fonction d'une ou plusieurs variables. Prenons l'exemple d'une onde monochromatique, c'est une fonction sinusoïdale du temps, $s(t)$, de la forme :

$$s(t) = a \cos 2\pi ft$$

avec :

a = amplitude

f = fréquence

C'est un signal monodimensionnel (fonction du temps). On peut représenter le signal et son spectre de fréquence f :

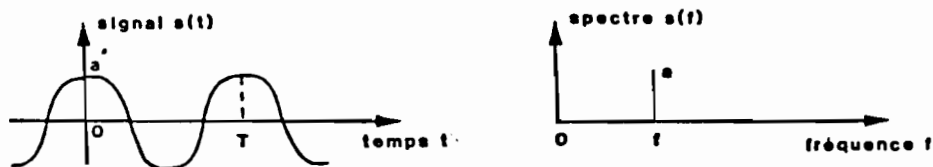


Figure 80 : Signal monodimensionnel sinusoïdal et son spectre

Signal périodique monodimensionnel : Un signal périodique monodimensionnel peut être décomposé en un signal sinusoïdal de fréquence $f = 1/T$ et en une infinité de sinusoïdes de fréquences multiples de f (harmoniques). Il s'écrit alors en série de Fourier :

$$s(t) = \sum_0^{\infty} a_n \cos(2\pi nft - \varphi)$$

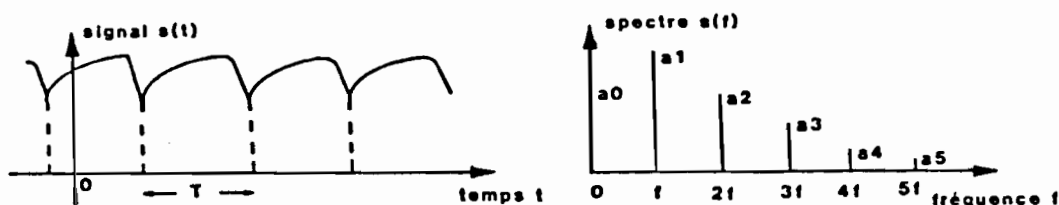


Figure 81 : Signal périodique monodimensionnel et son spectre

Signal non périodique monodimensionnel : Un signal non périodique monodimensionnel peut être considéré comme la limite d'un signal périodique dont la période devient infiniment longue. Le spectre $S(f)$ devient continu.

$$s(t) = \int_0^{\infty} S(f) \cos[2\pi ft - \varphi(f)] df$$



Figure 82 : Signal monodimensionnel non périodique et son spectre

Signal bidimensionnel quelconque : Une image est un signal bidimensionnel $s(x,y)$, fonction des coordonnées spatiales x et y . Son spectre $S(u,v)$ est également une fonction de deux fréquences spatiales u et v , selon les deux directions Ox et Oy respectivement.

Un signal non périodique bidimensionnel peut être considéré comme une somme infinie de composantes sinusoïdales ayant toutes les fréquences spatiales possibles réparties dans toutes les directions du plan de façon à former le spectre continu bidimensionnel $S(u,v)$.

Une image est également la résultante d'un signal et de sa transmission à travers un système de prise de vue, plus un bruit. L'équivalent à deux dimensions du facteur $\cos(2\pi ft - \varphi(f))$ de l'équation précédente, correspond à la réponse impulsionnelle du système de prise de vue. Il sera noté $h(x,y,u,v)$

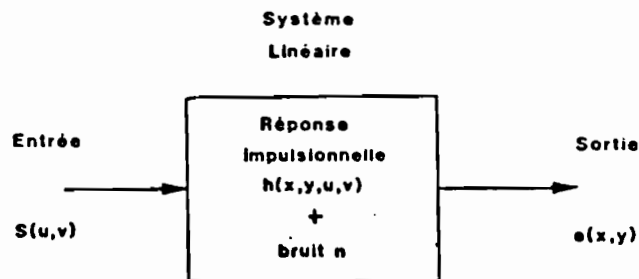


Figure 83 : Signal résultant d'un système de prise de vue.

Le signal résultant peut alors s'écrire comme la convolution du spectre et de la réponse impulsionnelle.

$$s(x,y) = \int S(u,v)h(x,y,u,v)dudv + n(x,y)$$

avec :

$h(x,y,u,v)$ = la réponse impulsionnelle du système linéaire

$n(x,y)$ = le bruit.

Pour illustrer de façon simple la répartition des fréquences dans l'espace à deux dimensions de l'image, on réalise une coupe selon une direction et on peut alors

représenter quelques motifs du spectre de l'image sur un axe (représentation monodimensionnelle).

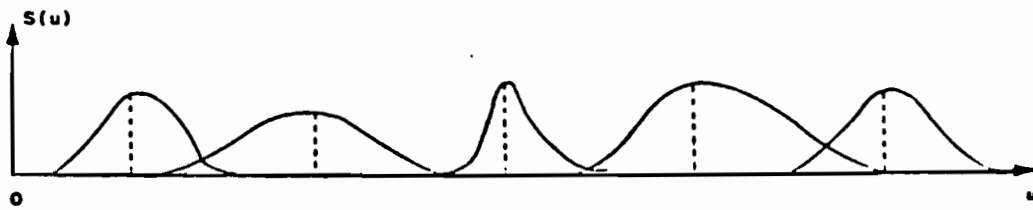


Figure 84 : Quelques motifs du spectre de l'image.

Cette schématisation de la représentation physique de l'image sera reprise ultérieurement pour mieux comprendre les choix des paramètres de la numérisation.

7.2 La numérisation

7.2.1 Principe

La numérisation consiste à échantillonner la photographie selon un maillage régulier, et à quantifier l'intensité lumineuse en chaque point ou pixel (abréviation de "picture element"). La photographie est ainsi transformée en une matrice numérique susceptible d'être traitée par ordinateur.

Pratiquement, la numérisation effectuée a consisté à mesurer la fraction de lumière transmise à travers un film transparent (les tirages papier ont été transformés en positifs transparents à cet effet), c'est à dire à mesurer la transmittance T .

$$T = I_o \div I_t$$

Avec :

- T = Transmittance
- I_o = Lumière incidente
- I_t = Lumière transmise

La mesure peut également s'effectuer en densité optique du cliché. La densité optique D est définie par :

$$D = \log 1 \div T$$

Pour ce faire, on a utilisé un microdensitomètre qui transforme l'information optique en une information électrique à l'aide d'un photomultiplicateur. Il s'agit d'un tube à vide comportant une photocathode qui transforme les photons incidents en électrons. Les électrons sont ensuite attirés vers une anode à travers une série d'étages multiplicateurs. L'information électrique est enfin amplifiée puis enregistrée par un convertisseur analogique digital.

7.2.2 L'information numérique obtenue

L'information numérique obtenue varie suivant un certain nombre de facteurs à chaque étape de la numérisation.

7.2.2.1 L'échantillonnage spatial

Il s'agit d'effectuer des mesures de luminosité suivant un maillage régulier. Il va donc falloir choisir un pas d'échantillonnage en ligne et en colonne, et une taille du spot d'analyse.

Pratiquement, le pas minimum autorisé par le microdensitomètre utilisé est de 1 micron, et il n'y a pas de pas maximum, on peut choisir de prendre une mesure par ligne d'image par exemple.

D'autre part, l'appareil autorise 64 tailles et formes possibles du spot d'analyse. Ces choix doivent être faits avec l'objectif de minimiser les distorsions dues à l'échantillonnage.

Nous avons vu figure 84 un exemple de coupe à travers le spectre de l'image. Selon la théorie de Shannon, l'échantillonnage ne doit pas conduire à une perte d'information s'il n'y a pas recouvrement des motifs du spectre, et si on choisit un pas d'échantillonnage $p \leq 1 \div 2 \times Bc$

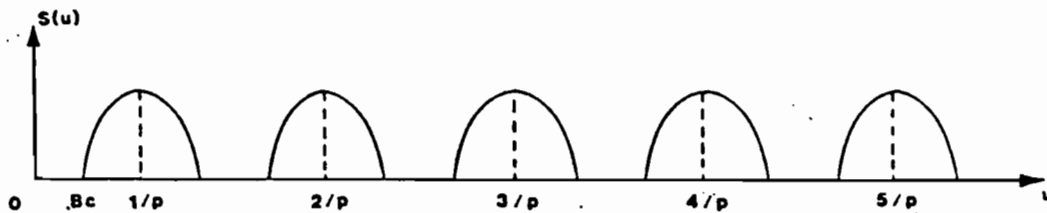


Figure 85 : Représentation monodimensionnelle théorique de quelques motifs du spectre de l'image et pas d'échantillonnage. (d'après G. CHOUQUER et A. MARION, 1983)

Dans la réalité, les conditions de Shannon ne sont pas respectées, (voir figure 84 le recouvrement des motifs). L'échantillonnage revient à effectuer un filtrage qui atténue les basses fréquences (filtre passe-bas).

La théorie de Shannon implique également un spot d'analyse ponctuel. En pratique le spectre d'analyse est une surface, il effectue un filtrage de l'image qui atténue les hautes fréquences (filtre passe-haut).

Le filtrage dû au pas d'échantillonnage et celui dû à la taille du spot d'analyse sont donc antagonistes. Le choix de ces deux paramètres doit résulter d'un compromis.

7.2.2.2 La quantification

L'intensité lumineuse d'une photographie est une fonction pratiquement continue. Chaque grain de l'émulsion est blanc ou noir, mais sur une fenêtre la teinte résultante est continue entre le noir et le maximum (blanc maximum ou intensité de teinte maximum). La quantification consiste à coder l'intensité en un certain nombre de niveaux, en général répartis de façon linéaire entre 0, le noir, et une valeur maximum. Dans le cadre de cette étude on a utilisé une valeur extérieure au cliché (transparence du verre) comme niveau d'intensité maximum. Ceci rend

le codage invariant d'une épreuve à l'autre. D'autre part, on a employé au plus 4096 niveaux d'intensité.

7.2.2.3 L'analyse de la couleur

Les photographies infra-rouge couleur ont été numérisées en trois passages avec trois filtres colorés rouge, vert, bleu. La figure ci-dessous montre les courbes d'absorption des filtres. On remarquera que les filtres utilisés séparent bien les trois couleurs rendues par le cliché.

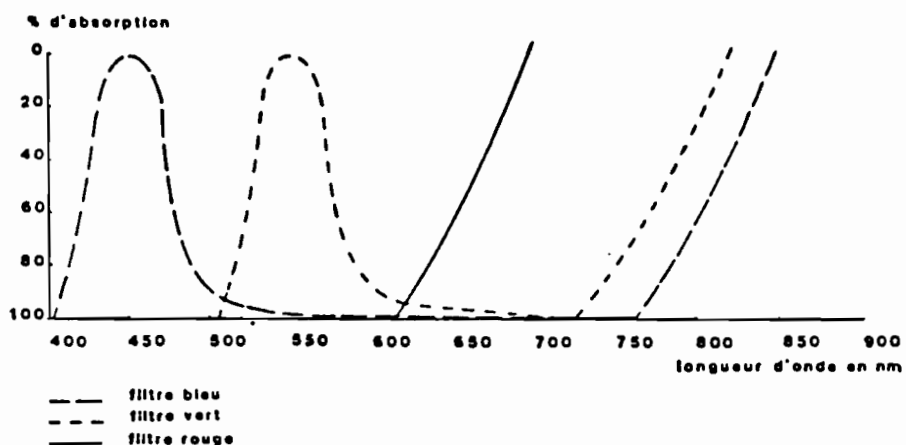


Figure 86 : Courbes d'absorption des filtres Wratten n° 12, 13 et 14. (d'après Kodak)

Dans l'analyse de la couleur, il faut également tenir compte de l'absorption du tube photomultiplicateur qui n'est pas constante sur tout le spectre; elle est par exemple plus forte dans le rouge et l'infrarouge.

7.2.2.4 La vitesse de la mesure

C'est un autre des paramètres de la numérisation qui intervient dans la qualité du résultat obtenu et qu'il faut choisir en conséquence; en effet, la précision de la mesure diminue quand la vitesse croît, le nombre de photons arrivant sur la cathode étant directement proportionnel à la durée de la mesure.

7.3 L'image numérique et le traitement d'image

L'image numérique, résultat des différentes étapes résumées dans les paragraphes précédents, peut être appréhendée de différentes manières, et les grandes voies actuelles du traitement d'image découlent des différents regards qu'on peut porter sur elle.

7.3.1 L'image signal - La restauration d'image - K.W. PRATT (1978).

De la formulation physique de l'image signal que nous avons vu précédemment, découlent des techniques de restauration de l'image. Il s'agit de retrouver le signal de départ $S(u,v)$ en faisant une estimation sur le bruit.

7.3.2 L'image matrice numérique - Les traitements statistiques et l'amélioration d'image - NAGAO et MATSUYAMA (1980), SWAIN

(1978).

L'image est une matrice de nombres à valeurs comprises entre 0 et 255 dans le cas d'une numérisation à 256 niveaux. Chaque nombre représente la réflectance du point correspondant dans l'espace géographique de l'image. On peut dresser l'histogramme de l'ensemble des réflectances, calculer leur moyenne, leur écart type, etc. De cette conception de l'image découle un ensemble de techniques d'amélioration de contraste de l'image par modification de l'histogramme (HUMMEL, 1975 et 1977). La modification de la forme de l'histogramme change la répartition des niveaux de gris entre le noir et le blanc et donc le contraste.

Dans le cas d'une image en couleur, ou de plusieurs photographies panchromatiques d'une même scène étalées dans le temps, à chaque point correspond un vecteur de propriétés. Ce vecteur est formé des réflectances pour chaque couleur de base (rouge, vert, bleu) dans le cas d'une image en couleur, ou des réflectances du même point à des dates différentes. On est toujours dans l'espace des propriétés, mais c'est maintenant un espace à plusieurs dimensions. On peut donc effectuer des changements d'axes à l'aide d'une analyse en composantes principales dans le but de mettre en valeur certaines informations. (LOWITZ, 1976 et 1979).

Dans le même but, on peut tenter d'effectuer une classification sur les réflectances par des méthodes comme le maximum de vraisemblance ou les fonctions discriminantes (BORRIELO et CAPPOZZA, 1974, NARENDRA et GOLDBERG, 1977).

A titre d'exemple, les figures ci-dessous montrent l'histogramme des réflectances d'une image panchromatique, puis l'histogramme bidimensionnel de deux canaux d'une image en couleur. L'amélioration de contraste des images utilisées dans ce travail sera traitée au chapitre 8, et les traitements de type statistique sur les réflectances feront l'objet du chapitre 9.

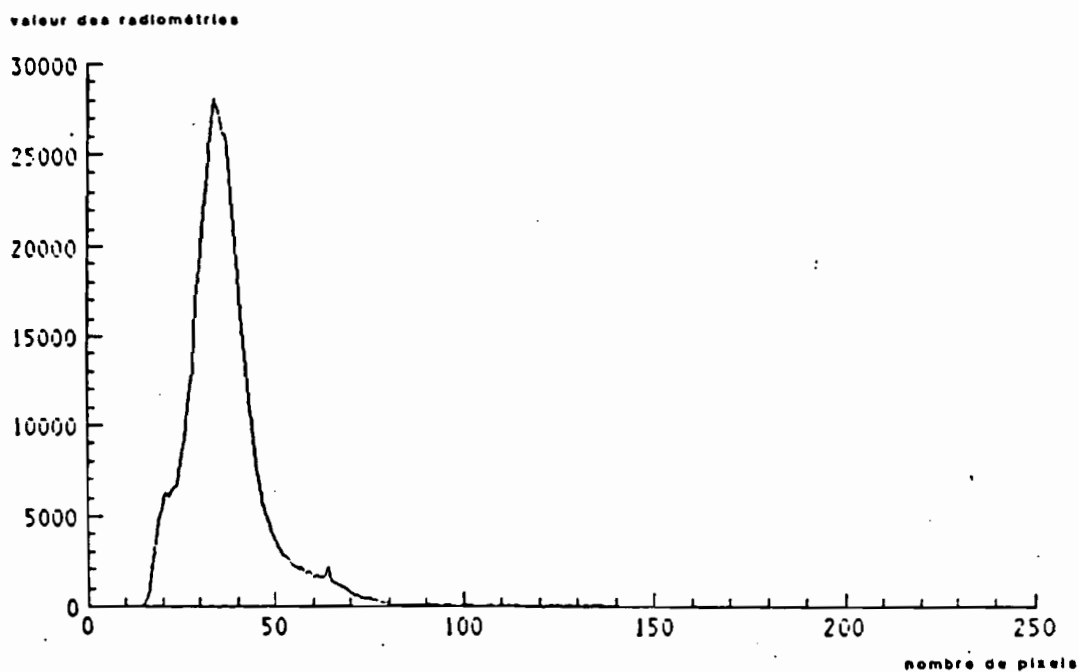


Figure 87 : Histogramme des réflectances d'une image panchromatique.

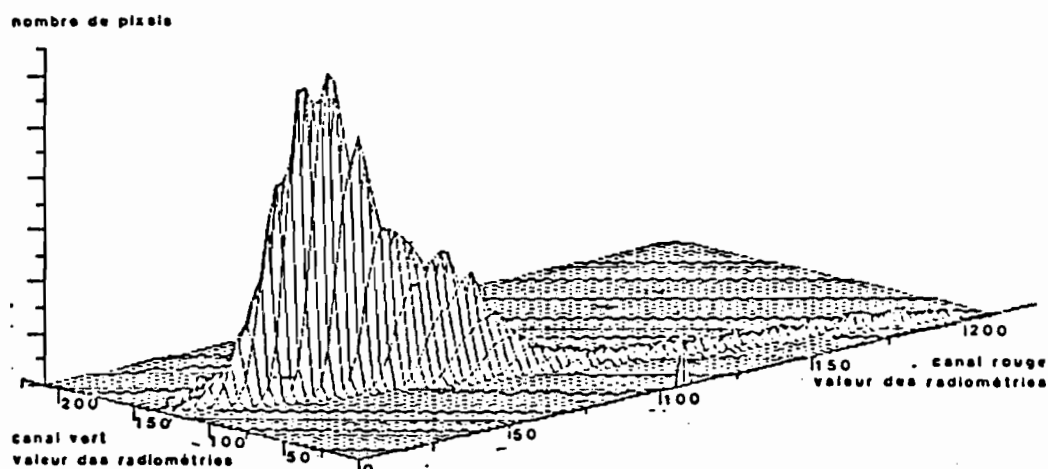


Figure 88 : Histogramme bidimensionnel des réflectances sur les canaux rouge et vert d'une image couleur.

7.3.3 L'image langage - L'approche syntaxique et texturale - LOWITZ (1978).

L'approche syntaxique de l'image est fondée sur la remarque suivante : Parmi tous les états possibles d'un ensemble de pixels codés sur huit bits (256 états possibles du pixel), un petit nombre d'entre eux seulement sont réalisés.

De là vient l'idée que l'image peut être décrite par un certain nombre de primitives, possédant un certain nombre d'arrangements entre elles. C'est là considérer l'image comme un langage, possédant un vocabulaire et une grammaire. Malheureusement, il s'agit d'une grammaire à plusieurs dimensions et d'un vocabulaire extrêmement riche.

Cette conception de l'image est cependant intéressante dans ce sens que sans chercher à établir l'ensemble du vocabulaire et de la grammaire, on peut s'attacher à décrire l'image ou partie de l'image par des arrangements locaux de quel-

ques pixels, trouvés de manière statistique ou par tout autre moyen. C'est le domaine de l'analyse de texture et le chapitre 10 lui sera consacré.

De très nombreux travaux récents s'intéressent à la texture; nous ne pouvons tous les citer ici, mais les principaux sont référencés dans la bibliographie aux numéros 9, 19, 31, 40, 45, 46, 49, 50, 51, 56, 70, 73, 74, 75, 81, 82, 86, 99 et 100.

7.3.4 La surface image - L'approche topologique et structurale - BRICE et FENNEMA (1970), PRATT (1978).

On peut maintenant considérer l'image comme une surface au sens géographique du terme, et la représenter dans l'espace, la troisième dimension correspondant aux réflectances. Nous sommes ici dans le domaine de la structure de l'image. La structure est formée des relations de chaque point avec tous les autres, mais est caractérisée surtout par des propriétés locales donc par les relations de chaque point avec ses voisins.

On peut alors s'intéresser aux discontinuités de l'image, et considérer comme caractéristiques de la structure les vallées, les cols, les fonds ou les sommets, qui sont en général obtenus par dérivation de l'image, ou bien s'intéresser aux domaines ainsi délimités et les décrire par leur texture, ou par leur forme et c'est le domaine de l'analyse topologique. Pour illustrer ces propos, on trouvera ci-après un transect d'image et la représentation d'un petit morceau de sa surface.

De la même façon que pour la texture on peut grouper ici les travaux référencés dans la bibliographie sous les numéros 3, 9, 21, 24, 33, 37, 57, 77, 80, 94.

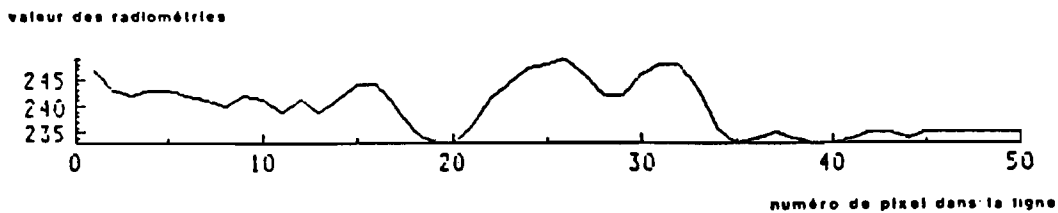


Figure 89 : Transect d'image.

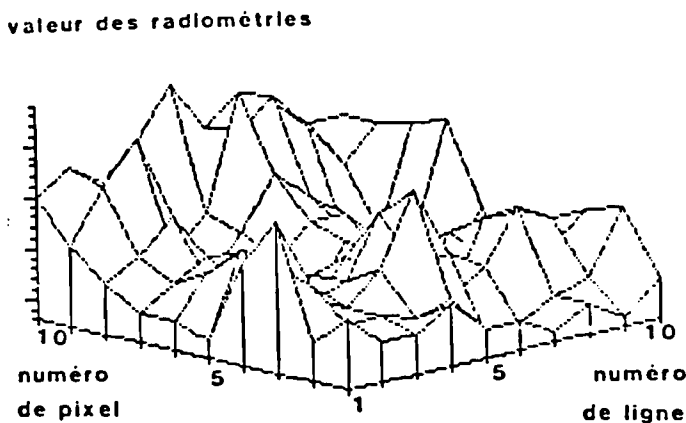


Figure 90 : Surface de l'image sur un échantillon de 10 par 10 pixels.

On remarquera qu'il n'y a pas de différence de conception entre les approches texturale et structurale, puisque dans les deux cas on s'intéresse aux relations spatiales entre pixels. On peut simplement dire pour les différencier que la seconde s'effectue à un niveau moins local que la première.

7.3.5 L'image représentation d'objet - L'approche thématique - HARALICK (1973)

L'image de télédétection est une réponse de la surface de la terre à diverses excitations, réponse caractéristique de certaines propriétés du milieu. Mais c'est aussi la représentation de la répartition dans l'espace de l'objet d'étude, et cette variation spatiale peut également être une caractéristique de cet objet.

Nous voyons là s'ébaucher les deux grandes voies de l'analyse thématique qui peuvent être menées à partir des images :

- l'une que nous appellerons physique, qui par inversion des données de réflectance essaie de retrouver certaines propriétés physiques des corps;
- l'autre que nous qualifierons de structurale, qui s'intéresse aux variations spatiales d'un objet espérant les relier à sa structure. Ce problème sera traité dans le prochain chapitre.

Le présent travail s'appuie essentiellement sur l'analyse spatiale ou structurale de l'image.

7.3.6 L'image flot d'informations - Codage et automatisation - GUEGUEN et al. (1976), LOWITZ (1978), LEVIALDI (1979).

Enfin, une des visions que l'on peut avoir de l'image numérique est sa très grande taille : pour stocker une image en couleur de taille moyenne, 1000 par 1000 pixels par exemple, 24 millions de bits sont nécessaires si elle est codée sur 256 niveaux. Dans le cas de l'imagerie satellite multispectrale, cette notion a conduit à tout une série de traitements visant à comprimer l'information, ou à automatiser certaines tâches. Ces types de traitement n'entrent pas dans le cadre de cette étude.

7.4 La restitution de l'image

Il nous reste à traiter la façon dont on restitue l'information sous forme visuelle. Pour ce travail, la transformation de l'image numérique par les multiples traitements dont nous venons de parler et la restitution de l'information extraite ont été effectuées sur le même système de traitement d'image, qui est un IBM 7350. Le logiciel d'application qui a été utilisé s'appelle APLIAS (G. SAVARY et J.P. CHANOD, 1985).

Il permet :

- d'aller chercher des images codées sous forme numérique sur des disques de l'ordinateur central (IBM 370);
- de les stocker dans 6 mémoires de 1024 x 1024 octets.
- de visualiser une image sur un écran couleur de 1024 x 1024 points. Cet écran est desservi par une mémoire de rafraîchissement de 12 plans, permettant de visualiser soit une image en noir et blanc codée sur 32 niveaux de gris, soit deux ou trois images couleur, chacune étant codée sur 6 ou 4 bits soit 64 ou 16 niveaux. La mémoire de rafraîchissement comprend deux plans supplémentaires : l'un permet de superposer une image codée sur un bit, une carte par exemple; l'autre peut servir de masque et permet de travailler sur une partie de l'image;

- de travailler de façon interactive sur les images stockées, à l'aide d'un langage transposé du langage APL. Les images sont traitées de la même manière que des matrices en APL;
- de renvoyer sur un disque les images après traitement;
- de pointer l'image affichée à l'aide d'un curseur.

Il s'agit là d'un résumé grossier des possibilités du système, mais de plus amples informations sur la manière dont fonctionne APLIAS seront données dans les chapitres sur les traitements effectués sur les images.

Les planches couleur figurant dans ce travail ont été obtenues par tramage en quatre canaux jaune, magenta, cyan et noir à l'aide du programme de tramage contenu dans le logiciel APLIAS.

7.5 Conclusion : Définition, limites et qualités de l'"outil" image

Nous voudrions retenir ici les faits suivants :

- L'image est donc une certaine représentation de la réalité. La photographie est une image, l'image numérique en est une autre, l'image créée sur l'écran du 7350 ou la photographie de l'écran lui-même en sont également. Il est cependant essentiel de garder à l'esprit les transformations par lesquelles ces représentations ont été obtenues.
- L'image est une source d'information difficilement exploitable, dans le sens qu'elle représente une seule fonction d'une infinité de variables. Là est le problème le plus important quand on veut résoudre une inversion des données, et retrouver une quelconque des propriétés du système représenté par l'image.
- L'image est une information très riche, dans le sens qu'elle permet un regard absolument différent de celui porté par l'oeil humain, tant dans le domaine spectral que spatial; elle peut donc être un outil précieux et le but de ce travail est d'explorer certaines des possibilités qu'elle nous offre.

8.0 OBTENTION ET AMELIORATION DES DOCUMENTS DE TRAVAIL

Les documents de travail dont nous disposons sont de deux types:

- Les images
- Les cartes

8.1 Premier type de document : Les images

8.1.1 Obtention des images

8.1.1.1 Documents photographiques de base

Photographie IGN panchromatique

- N° 145-582.
- Mission du 18 Août 1981.
- Echelle approximative 1/33 000.
- Sensibilité de l'émulsion : Visible (400 à 700 nm).
La sensibilité est bonne de 400 à 700 nm sauf dans le vert (autour de 500 nm), bande de longueur d'onde pour laquelle la sensibilité diminue.
- Pouvoir résolvant du film : 100 lignes/mm environ.
- Cette photographie a été agrandie jusqu'à une échelle approximative de 1/20 000. La résolution est donc passée à environ 66 lignes/mm.

Photographie Infra-Rouge Couleur

- Mission du 7 Septembre 1983.
- Echelle approximative de 1/15 000.
- Sensibilité de l'émulsion : Les trois couches jaune, magenta, cyan sont respectivement sensibles au vert, rouge et proche infra-rouge. Après développement (voir chap.7) la couleur rouge de la photographie restitue un rayonnement de la surface du sol dans le proche infra-rouge, la couleur verte

restitue un rayonnement dans le rouge et la couleur bleue restitue un rayonnement dans le vert.

- Le pouvoir résolvant est de 80 lignes/mm au centre et de 40 à 60 lignes/mm au bord.

8.1.1.2 Numérisation

La numérisation des différentes photographies utilisées a été effectuée sur un microdensitomètre Perkin Elmer PDS 1010G, à l'institut de physique d'Orsay. Tous les renseignements sur la numérisation nous ont été donnés par Messieurs MARION et EQUILBEY de ce même institut.

Photographie IGN panchromatique

- On a soumis à l'analyse un rectangle de l'agrandissement positif transparent de 7.8 x 4 cm englobant le secteur de Kermaner.
- Le pas de numérisation a été choisi de 30 microns, c'est à dire qu'on a analysé 33 points sur un parcours de 1mm; on est donc là à la moitié du pouvoir résolvant de la photographie de départ.
- Un point de l'image représente approximativement le rayonnement lumineux d'un carré au sol de 66 cm de côté.
- L'image résultante obtenue fait 1943 lignes sur 2592 pixels (ou colonnes).
- La photographie positive a été analysée en transmission (voir la définition de la transmission chapitre 2).
- Les valeurs de chaque point sont codés sur 12 bits, et peuvent donc prendre 4096 niveaux de quantification.

Photographie infra-rouge couleur

La photographie a été soumise à deux numérisations différentes, l'une (nommée KERENT) englobant un secteur plus large que l'autre (appelée KERMAN).

KERMAN

- On a soumis à l'analyse un rectangle de la photographie en positif transparent de 3.4 x 4.5 cm englobant le secteur de Kermaner.
- Le pas de numérisation a été choisi de 30 microns, c'est à dire qu'on a analysé 33 points sur un parcours de 1 mm; on est donc en dessous du pouvoir résolvant de la photographie de départ.
- La taille du spot d'analyse a été choisi de 50 microns.
- Un point de l'image représente approximativement le rayonnement lumineux d'un carré au sol de 50 cm de côté.
- L'image résultante obtenue fait 1122 lignes sur 1516 pixels (ou colonnes).

- La photographie positive a été analysée en densité (voir la définition de la densité optique chapitre 2).
- Trois passages ont été effectués, avec trois filtres sélectifs différents rouge, vert, bleu pour analyser respectivement les composantes rouge, vert, bleu de la photographie couleur.

KERENT

- On a soumis à l'analyse un rectangle de la photographie en positif transparent de 4.6 x 6.1 cm englobant le secteur de Kermaner.
- Le pas de numérisation a été choisi de 60 microns
- La taille du spot d'analyse a été choisi de 50 microns.
- Un point de l'image représente approximativement le rayonnement lumineux d'un carré au sol de 90 cm de côté.
- L'image résultante obtenue fait 760 lignes sur 1024 pixels (ou colonnes).
- La photographie positive a été analysée en transmission.

8.1.1.3 Conversion des informations obtenues lors de la numérisation pour leur utilisation sur l'IBM 7350

Pour le traitement sur l'IBM 7350, il est nécessaire de réduire les niveaux de quantification. En effet chaque mémoire de stockage d'images (storage buffer) comprend 8 plans soit 8 bits pour chaque point. L'information obtenue grâce au microdensitomètre codée sur 12 bits et stockée sur bande magnétique doit donc être convertie. Ceci est fait en ne prenant en compte que les bits les plus significatifs donc en comprimant 16 niveaux sur un seul. On obtient donc 256 niveaux de quantification.

Image issue de la photographie IGN panchro (appelée MUR)

Le secteur de la photographie IGN panchromatique qui nous intéresse a été transformé en une matrice de 1943 lignes sur 2592 colonnes, chaque point variant de 0 à 255, le 0 représentant les points les plus sombres et 255 les points les plus clairs. Nous ne travaillerons donc que sur des valeurs relatives et non sur des valeurs physiques du rayonnement.

KERMAN et KERENT

Les deux images KERMAN et KERENT ont subi la même compression que l'image issue de la photographie IGN panchromatique. Nous disposons donc de deux fois trois matrices codées sur 256 niveaux d'intensité de couleur rouge, vert ou bleu.

8.1.1.4 Récapitulation des caractéristiques des différentes images utilisées

	MUR	KERMAN	KERENT
Photographie de départ	IGN panchro.	IRC	IRC
Pas en microns	30	30	60
Taille du spot en microns	50	50	50
Analyse en :	Transmission	Densité	Transmission
Résolution au sol en cm	66	50	90
Taille en lignes x pixels	1943x2592	1122x1516	760x1024

Tableau n° 11

On notera qu'il y a recouvrement des points analysés pour les images MUR et KERMAN (taille du spot de 50 microns pour un pas de 30 microns), alors qu'il n'y a pas recouvrement pour l'image KERENT (taille du spot 50 microns pour un pas de 60 microns). On notera également que les images KERMAN et KERENT ont été analysées suivant un mode différent (transmission-densité) de façon à analyser les avantages et les inconvénients des deux méthodes, si toutefois ces deux modes d'analyse engendrent des différences significatives sur les caractéristiques des images résultantes.

8.1.2 Amélioration de contraste sur les images

Selon PRATT (1978), les processus d'amélioration de l'image consistent en une collection de techniques qui visent à améliorer l'apparence visuelle, ou à la mettre sous une meilleure forme pour l'analyse humaine. L'amélioration d'image n'est pas une amélioration de la fidélité de la reproduction d'une image par rapport à sa forme "idéale", comme c'est le cas pour la restauration d'image. Il n'y a donc pas de théorie générale de l'amélioration.

Toujours selon PRATT (1978), un des défauts les plus communs des images photographiques ou électroniques est un faible contraste résultant d'un intervalle réduit de la luminosité de l'image.

D'autre part, les histogrammes des luminances d'une image naturelle typique qui a été quantifiée linéairement, sont généralement très décentrés vers les niveaux les plus foncés, du point de vue de leur moyenne, mais également de leur répartition (il y a plus de la moitié des points vers des valeurs plus faibles que la moyenne).

L'amélioration visuelle d'une image est donc obtenue par une manipulation de son histogramme.

8.1.2.1 Analyse des histogrammes des images brutes après numérisation

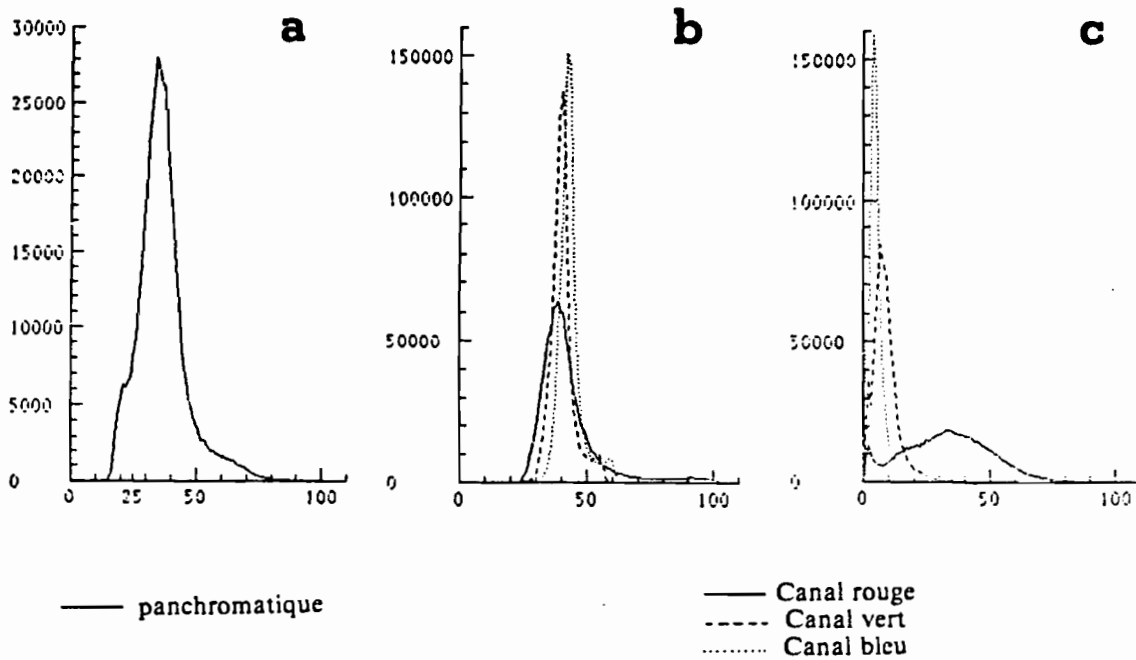


Figure 91 : Histogrammes des images brutes

- a-Image MUR issue de la photographie IGN panchromatique
- b-Image KERMAN
- c-Image KERENT

Pour analyser ces trois histogrammes, on peut s'aider du tableau suivant :

	MOYENNE	ECART-TYPE	% DES VALEURS INF. A MOY.
MUR	37.21	12.65	61
KERMAN rouge	43.12	12.83	67
KERMAN vert	43.49	4.99	61
KERMAN bleu	40.56	5.06	56
KERENT rouge	33.69	17.12	50
KERENT vert	5.62	5.63	65
KERENT bleu	9.28	7.17	63

Tableau n° 12

Ces trois images ont effectivement une moyenne déportée vers les valeurs basses, un écart type réduit laissant prévoir un faible contraste, et plus de la moitié des valeurs inférieures à la moyenne de l'histogramme, donc une forme générale des histogrammes déportée également vers les faibles valeurs de luminosité. Nous

ne donnerons pas d'exemple de restitution visuelle de ces images brutes, car elles sont réellement de mauvaise qualité.

Ces histogrammes présentent des différences sensibles entre les images KERMAN et KERENT qui sont des numérisations différentes de la même image de départ. La numérisation en densité ou en transmission engendre les différences suivantes :

- Les objets sombres vont être représentés dans les valeurs basses de l'histogramme pour la numérisation en transmission, et dans les valeurs hautes de l'histogramme pour la numérisation en densité.
- D'autre part, l'analyse sur le microdensitomètre se fait toujours en transmission. Pour avoir des valeurs de densité optique, le signal sortant du photomultiplicateur traverse un module à caractéristique logarithmique avant d'attaquer le convertisseur analogique - numérique. Donc, en densité, on va écraser les valeurs basses qui représentent les objets clairs et étaler les hautes valeurs qui représentent les objets sombres. Inversement en transmission les valeurs sombres vont être relativement plus resserrées et les valeurs claires plus étalées.
- On pourra étudier dans la suite de nos traitements, quelle est la numérisation qui semble la plus appropriée à notre analyse.

8.1.2.2 L'amélioration de l'image par transformation de l'histogramme

L'amélioration visuelle de l'image par transformation de l'histogramme doit porter sur trois points :

- Le décalage de la moyenne vers les valeurs centrales de l'image.
- L'augmentation de la dynamique de la répartition.
- La transformation de la forme de l'histogramme.

Ces techniques d'amélioration sont abondamment décrites dans la littérature sur le traitement d'image, notamment celles concernant la transformation de l'histogramme. On trouvera une revue exhaustive de ces techniques dans CASTAN (1979), HUMMEL (1975 et 1977) et surtout PRATT (1978). La technique la plus couramment citée est celle de l'égalisation de l'histogramme (histogram equalization) qui consiste à répartir les points de telle façon que la distribution soit uniforme. Ceci est réalisé en regroupant les petites classes. HUMMEL (1975) fait ainsi la distinction entre l'égalisation de l'histogramme et l'aplatissement de l'histogramme (histogram flattening) qui est réalisé en cassant les classes de luminance et en regroupant les points de façon aléatoire selon une distribution rigoureusement uniforme.

Cette technique présente beaucoup d'inconvénients pour les images naturelles, le principal étant qu'elle annule tout contraste dans les parties extrêmes de la répartition. Visuellement le résultat de cette transformation est une image trop contrastée.

PRATT (1978) cite de nombreuses autres transformations qui produisent des histogrammes de forme exponentielle ou hyperbolique.

La transformation utilisée dans ce travail est une transformation mise au point par G. SAVARY et J.P. CHANOD (1985) dans le logiciel de traitement d'image APLIAS. L'histogramme est transformé suivant une fonction arc-tangente. On peut choisir la moyenne et l'écart type de l'histogramme transformé. L'amélioration la plus utilisée fixe une moyenne de 128 et un écart type d'environ 50.

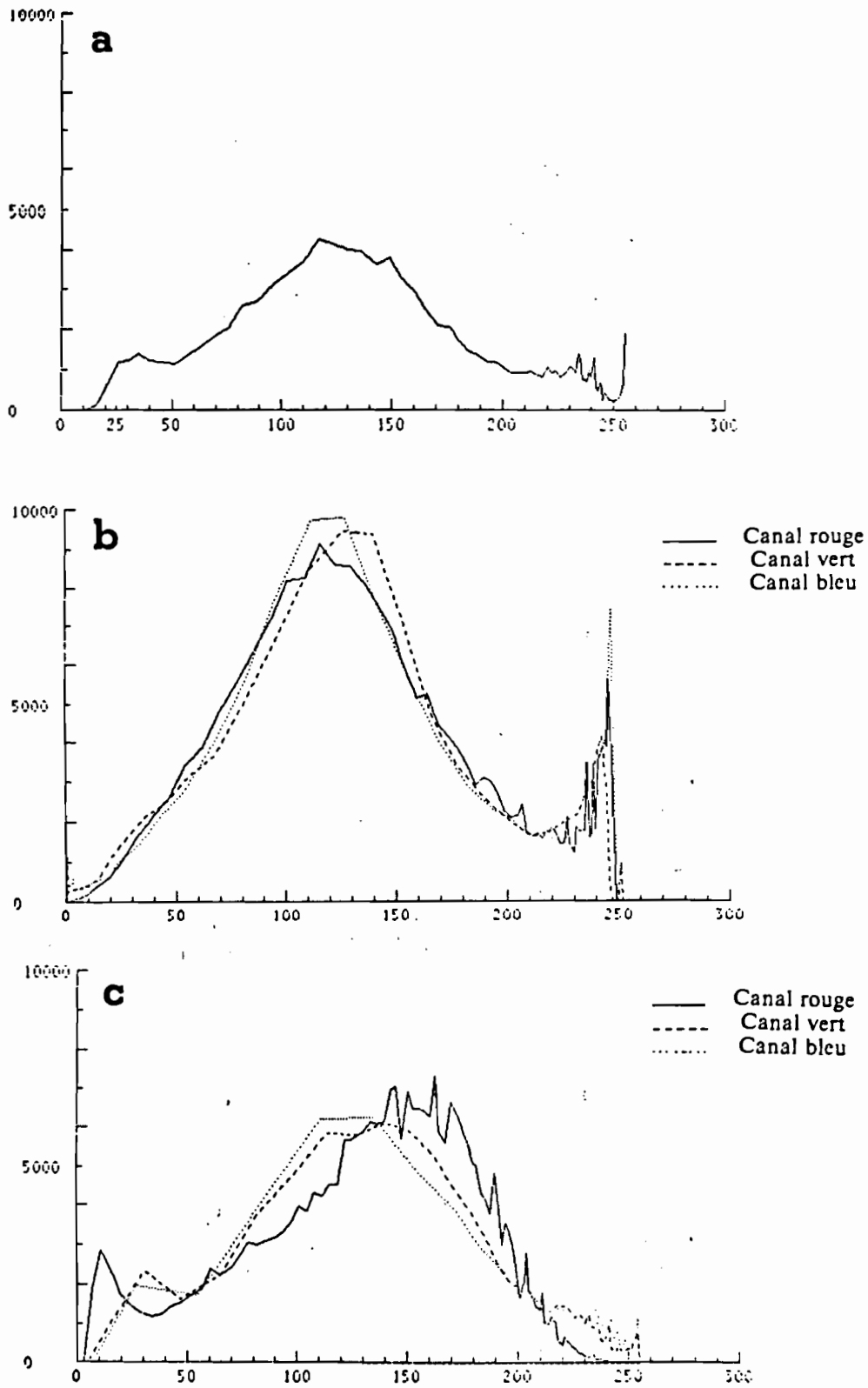


Figure 92 : Histogrammes des images après amélioration de contraste

- a-Image MUR issue de la photographie IGN panchromatique
- b-Image KERMAN
- c-Image KERENT

En analysant ces histogrammes, on note des effets de bords, c'est à dire un regroupement des valeurs extrêmes de la distribution, notamment sur les histogrammes de l'image KERMAN. Cet effet est difficile à éviter, et cette méthode est conçue pour réaliser un compromis entre un étalement maximum des valeurs et un effet de bord le moins important possible. Nous vérifierons ultérieurement que la perte de contraste sur ces valeurs extrêmes ne nuit pas au traitement de l'information. Pour l'instant, c'est l'amélioration visuelle de ces images qui nous intéresse, et nous allons maintenant traiter de leur restitution sur document papier.

8.1.3 La restitution des images après amélioration de contraste

MUR

Il s'agit d'une image en noir et blanc. Pour pouvoir restituer l'image sur une imprimante, il faut lui appliquer une trame. En effet, l'imprimante fonctionne en tout ou rien en chacun de ses points élémentaires dont la taille est d'environ 1/10 mm. C'est à dire que chacun de ces points est entièrement noir ou blanc. L'impression visuelle de gris est provoquée par la densité plus ou moins grande de points noirs dans une zone donnée.

Le programme de tramage inclus dans APLIAS fonctionne sur l'IBM 7350. Il effectue une amélioration de contraste et une mise à l'échelle, puis il utilise une matrice à 10 niveaux pour remplacer chaque pixel par un point noir ou un point blanc en fonction de la valeur de ce pixel et de sa position dans l'image.

Le document papier, (figure 93), résultat de ce tramage est traité par une imprimante IBM 6670.



Figure 93 : Restitution papier de l'image MUR

KERENT

Les trois canaux rouge, vert, bleu, codés chacun sur 16 niveaux d'intensité dans la mémoire de rafraîchissement (voir chapitre 7), sont restitués après amélioration de contraste par un tramage dans les trois couleurs de base cyan, jaune, magenta effectué sur l'IBM 7350.

L'image KERENT, après amélioration de contraste, est présentée sur support papier, planche hors texte n° 3

KERMAN

L'image KERMAN est restituée de la même façon planche hors texte n° 4.

On a fait une transformation de l'image KERMAN en transmission en effectuant sur APLIAS l'opération suivante :

$$KERMANT = 10^{(-KERMAN)}$$

L'image KERMANT est restituée de la même façon que KERMAN et KERENT (planche hors texte n° 5).

8.2 Deuxième type de documents : Les cartes

8.2.1 Obtention

8.2.1.1 Les documents de base

- Le plan cadastral : C'est le fond de carte qui nous a servi pour établir la carte de l'analyse structurale des formations superficielles, et la carte de végétation.
- La carte de l'analyse structurale des formations superficielles.
- La carte de répartition des ensembles végétaux.

8.2.1.2 Numérisation

Ces trois cartes ont été numérisées à l'aide d'une caméra digitale DATACOPY Model 90 pilotée par un IBM PC avec un logiciel WIPS. Elles ont été enregistrées sous forme binaire : valeur 1 pour les contours, et valeur 0 pour le fond.

Ces trois cartes ont été ensuite recadrées afin de les rendre superposables les unes aux autres et superposables aux différentes images.

On a choisi l'image comme objet de référence pour le recadrage, pour ne pas avoir à faire de rééchantillonnage spatial sur l'image, et disposer ainsi d'une information la moins transformée possible au niveau spatial.

L'opération de recadrage s'effectue en prenant des points de contrôle sur l'image (objet de référence), et sur la carte (qui va donc subir la transformation). Ces points de contrôle étant pris, on calcule la translation et la transformation affine nécessaire pour que ces points soient au mieux recalés les uns sur les autres. Ensuite, on applique la transformation calculée à tous les points de la carte et on recrée ainsi une carte binaire superposable à l'image.

A titre d'exemple, on montre planche hors texte n° 6 le cadastre recadré sur l'image KERENT.

8.2.2 Vectorisation des cartes

Ces trois cartes ont été numérisées ligne par ligne puisque la caméra digitale est composée d'une barrette de capteurs (axe des X), qui avance pas à pas suivant l'axe des Y. Si on veut extraire les points de l'image correspondant à l'intérieur du contour, ou ceux correspondant au contour lui-même, il est nécessaire de connaître les coordonnées de chaque point de contour. Les cartes doivent donc être vectorisées, c'est à dire que chaque contour doit être stocké dans un espace de travail sous forme de vecteur. Cette opération peut être menée manuellement, sur une tablette digitale, en suivant le contour avec un curseur qui enregistre point par point les coordonnées du contour. On a choisi pour ce travail de mettre au point un programme semi-automatique de suivi de contour.

Le programme mis au point avec R. ALIBERT, J.P. CHANOD et G. SAVARY du Centre Scientifique IBM FRANCE fonctionne de la manière suivante : Un premier point de contour est, soit cherché automatiquement sur l'image (ce sera alors le premier point à 1 rencontré sur la première ligne ou sur les lignes suivantes si toute la ligne est à 0), soit donné par l'opérateur qui pourra alors le choisir n'importe où à l'intérieur de l'image. Ce premier point de contour obtenu, on cherche dans les huit points voisins un nouveau point de contour. Quand ce deuxième point est trouvé, on cherche le point suivant d'abord dans la même direction, puis dans les deux directions adjacentes et ainsi de suite jusqu'à balayer la fenêtre des huit voisins.

Le programme est donc conçu pour que les points de contour soient choisis s'ils existent en continuité de direction avec le début du contour. Si le contour fait un angle droit ou aigu, il est détecté également. Au niveau des intersections de contour, le même choix de la continuité de direction est pris. Ce programme est semi-automatique et interactif puisqu'à tout moment, si une option prise par le programme est contraire aux désirs de l'opérateur, celui-ci peut faire revenir le programme au point de divergence, effacer le mauvais contour ou le garder en réserve pour un autre tracé et remettre le programme sur le contour désiré. De la même façon, si le contour est interrompu, c'est l'opérateur qui doit remettre le programme sur la suite du contour, et les deux morceaux sont réunis linéairement.

8.3 Conclusion : L'obtention des documents de travail et leur préparation en vue des traitements qui vont leur être

appliqués

Nous disposons donc de documents de travail de deux sortes :

1. Des images

- MUR, provenant de la photographie IGN panchromatique.
- KERMAN et KERENT, provenant de la photographie IRC.

2. Des cartes

Ce sont les documents que nous avons élaborés (sauf le plan cadastral qui sert de fond de carte) au cours de la première partie de ce travail. Ce sont les documents qui vont nous servir de référence terrain.

Ces documents ont été numérisés, puis préparés en vue des traitements qui vont leur être appliqués :

1. Traitements de type statistique sur les réflectances.
2. Traitements de type textural (ou structural) sur la répartition spatiale des réflectances et les réflectances elles-mêmes.

Ces deux types de traitements ont été sommairement définis au chapitre 6 de définitions préliminaires, et nous allons maintenant détailler leur emploi et leurs résultats.

9.0 LES TRAITEMENTS DE TYPE STATISTIQUE SUR LES REFLECTANCES

L'image est ici considérée comme une matrice de nombres dans le cas de la photographie IGN panchromatique ou comme un tableau à trois dimensions dans le cas des images couleur. Nous avons introduit cette notion de l'image matrice numérique dans le chapitre 7 d'introduction sur l'image.

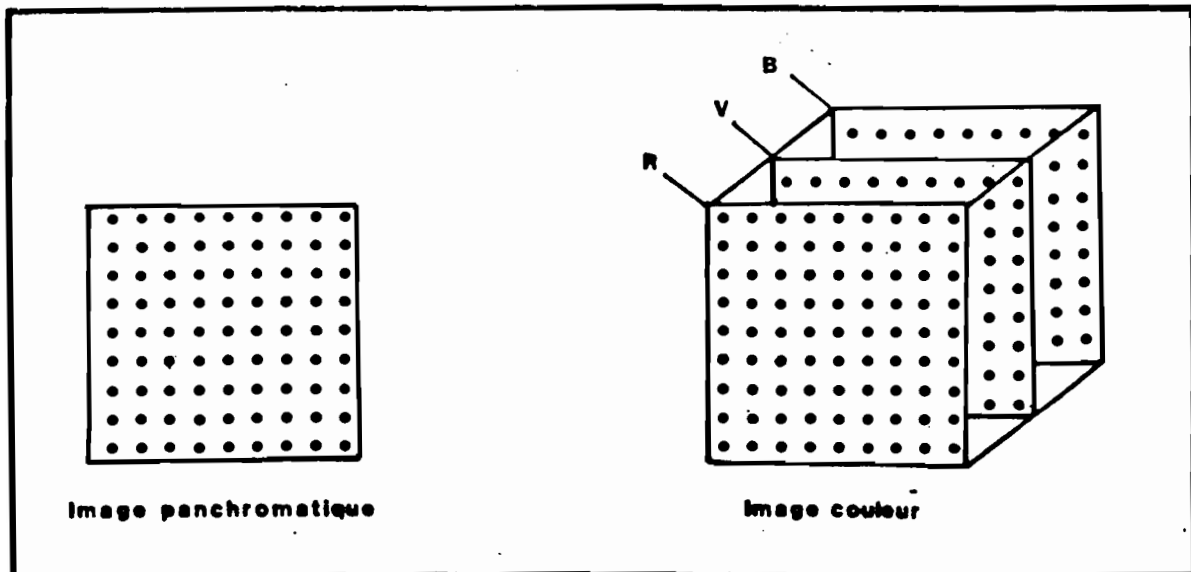


Figure 94 : Image panchromatique et image couleur

L'image couleur, qui est un tableau à 3 dimensions peut se concevoir comme un nuage de points dans le repère formé par les couleurs de base (figure 95)

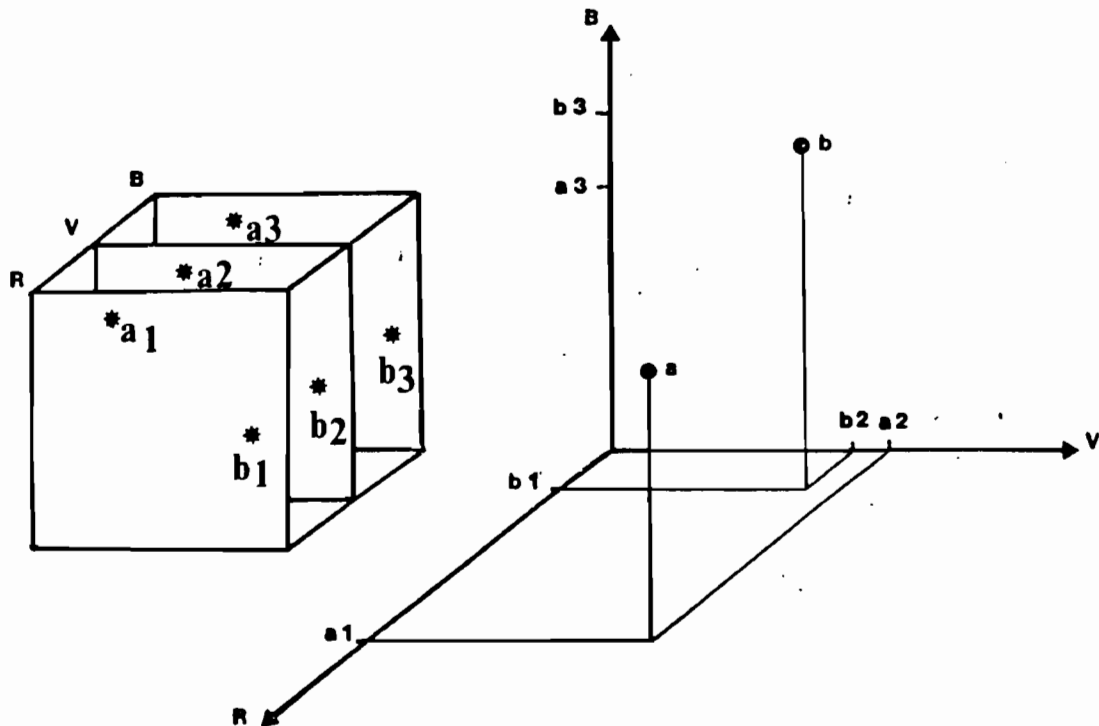


Figure 95 : Deux façons de représenter les points d'une image couleur

Deux points repérés dans le tableau à trois dimensions par leurs coordonnées x_1 en ligne et y_1 en colonne et x_2, y_2 ont les valeurs de réflectance a_1, a_2 dans le canal rouge, b_1, b_2 dans le canal vert, et c_1, c_2 dans le canal bleu.

Les deux types de traitements que nous avons expérimenté en utilisant l'image sous cette forme, peuvent se répartir en deux groupes :

- Des changements du système de référence, par transformation linéaire du repère rouge, vert, bleu.
- Des segmentations des valeurs de réflectance sur les nouveaux axes calculés.

9.1 Les changements de système de référence

9.1.1 L'analyse en composantes principales

LOWITZ (1975) décrit un certain nombre de techniques de codage orthogonal qui consistent à projeter les points de la base de départ dans une nouvelle base orthogonale, cette nouvelle base étant une transformation linéaire de la base d'origine. La transformation que nous avons choisi de tester ici est celle de KARHUNEN-LOEVE (appelée dans les ouvrages de statistique analyse en composantes principales ou ACP).

La transformation de KARHUNEN-LOEVE est une transformation dont les vecteurs de base sont les vecteurs propres de la matrice de covariance de l'image de départ. Si les canaux de départ sont très corrélés entre eux, il y a tassement de la variance sur le premier et le deuxième axe.

On peut décrire la transformation de Karhunen-Loève géométriquement dans un cas à deux dimensions pour mieux comprendre la projection effectuée. Si l'on repère tous les points d'une image sur deux axes orthogonaux de départ, par exemple les canaux rouge et vert, l'ensemble des points forme un nuage de forme plus ou moins elliptique, l'ellipse étant d'autant plus plate (se rapprochant d'autant plus d'une droite) que les canaux sont plus corrélés entre eux, (figure 96).

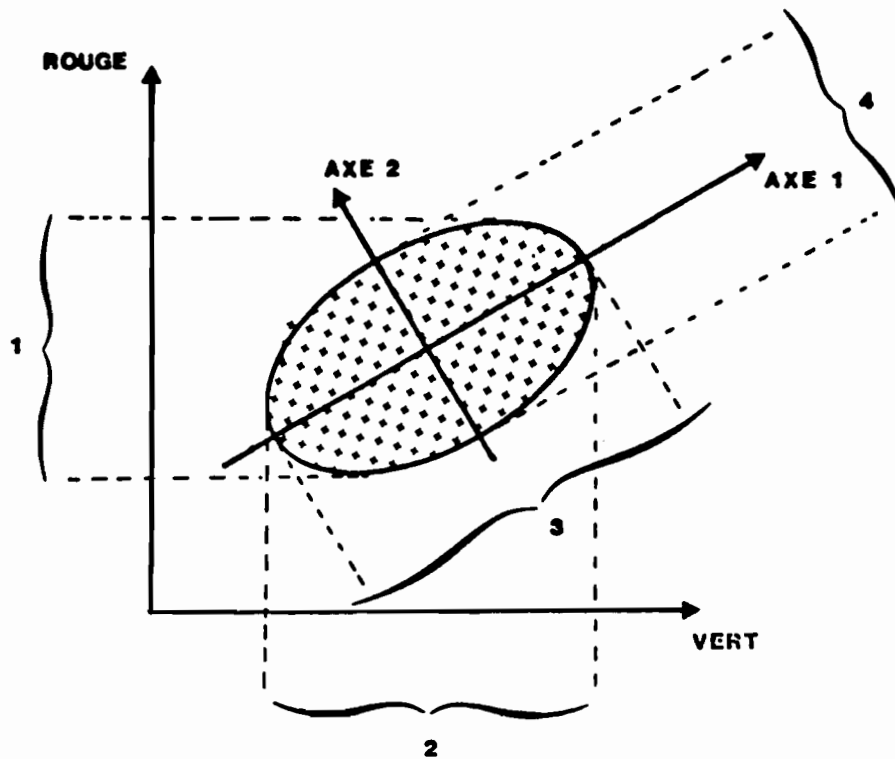


Figure 96 : Transformation de Karhunen-Loève.

Sur cette figure, on voit que la variance est répartie à peu près également sur les deux canaux de départ (1 et 2).

Les nouveaux axes calculés par la transformation de Karhunen-Loève sont les axes d'inertie de l'ellipse, obtenus par translation, rotation de la base de départ. La variance du nuage de points est alors répartie inégalement entre la première et la deuxième composante, (respectivement 3 et 4).

On peut généraliser cette transformation à n dimensions, chaque point étant l'extrémité d'un vecteur à n composantes. L'ensemble des points formera un nuage de forme plus ou moins ellipsoïdale (forme en dragée).

La décroissance de la longueur des axes principaux est d'autant plus rapide que les canaux de départ sont plus corrélés entre eux. Les valeurs propres calculées par la matrice de corrélation des nouveaux axes représentent le tassement de la variance, ou la décroissance de la longueur des axes principaux.

Il faut noter ici que la dernière composante est souvent considérée comme ne contenant plus que du bruit.

La transformation de Karhunen-Loève réunit donc deux avantages qui découlent l'un de l'autre:

- Les nouveaux axes, ou axes principaux sont décorrélés.

- Ils réalisent un tassement de presque tout le contraste de l'image sur les deux premiers axes; cette dernière propriété est utilisée en compression d'image (LOWITZ, 1979).

C'est la propriété de décorrélation que nous allons maintenant utiliser, en expérimentant son effet sur la séparation de nos domaines végétaux.

Les matrices de corrélation

KERMAN				KERENT			
	ROUGE	VERT	BLEU		ROUGE	VERT	BLEU
ROUGE	1	0.881	0.813	ROUGE	1	0.313	0.446
VERT	0.881	1	0.972	VERT	0.313	1	0.953
BLEU	0.813	0.972	1	BLEU	0.446	0.953	1

Tableau n° 13

Pour les deux images, il y a une corrélation très forte (0.972) entre les canaux vert et bleu. Mais l'image KERENT a un canal rouge peu corrélé avec les canaux vert et bleu, alors que l'image KERMAN a pour ces mêmes canaux une corrélation relativement forte.

Valeurs propres

KERMAN			KERENT		
AXE 1	AXE 2	AXE 3	AXE 1	AXE 2	AXE 3
2.779	0.202	0.018	2.195	0.769	0.036

Tableau n° 14

La corrélation plus faible entre les canaux de départ de l'image KERENT entraîne une décroissance plus faible des valeurs propres pour cette image.

Matrices de transformation

KERMAN			
	ROUGE	VERT	BLEU
AXE 1	0.5586	0.5933	0.5796
AXE 2	-0.8078	0.2306	0.5425
AXE 3	0.1882	-0.7712	0.6081

KERENT			
	ROUGE	VERT	BLEU
AXE 1	0.4107	0.6319	0.6573
AXE 2	-0.9045	0.3731	0.2065
AXE 3	-0.1147	-0.6794	0.7248

Tableau n° 15

Ces matrices donnent les coefficients de la transformation linéaire qui doivent être appliqués à la valeur de chaque pixel des canaux de départ pour obtenir les valeurs dans chaque composante principale.

Dans le calcul de l'ACP, nous avons utilisé les matrices de corrélation qui se rapportent à des images centrées réduites, c'est à dire ayant une moyenne nulle et un écart-type égal à 1. Nous devons donc ramener les canaux de départ à une expression centrée réduite par l'opération suivante.

$$(ROUGE - MROUGE) \div ETROUGE$$

avec :

MROUGE = moyenne du canal rouge

ETROUGE = écart-type du canal rouge

L'opération est répétée pour les autres canaux.

Nous utilisons la carte de végétation pour prélever sur les images centrées réduites les valeurs de petites zones comprises dans les domaines végétaux suivants:

- Arbres (2)-(AR)
- Ajoncs (1)-(AJ)
- Fougère dense (5)-(FD)
- Fougère clairsemée (6)-(FC)
- Pelouse sèche (7)-(PS)
- Lande sèche (8)-(LS)
- Pelouse mésophile (11)-(PM)
- Lande mésophile (9)-(LM)
- Pelouse humide (15)-(PH)
- Domaine de mouillère (12)-(LT)

Les chiffres entre parenthèses correspondent à ceux de la légende de la carte de végétation (chapitre 4), Nous donnons également entre parenthèses les symboles utilisés pour désigner les domaines végétaux dans les figures et dans la suite du texte.

On applique aux moyennes de ces 10 domaines dans les canaux rouge, vert et bleu la transformation linéaire de l'ACP. Pour comparer leur répartition avant et après transformation, on a placé ces moyennes dans les différents repères des canaux de départ et des composantes principales.

Nous allons analyser ces diagrammes pour chaque image:

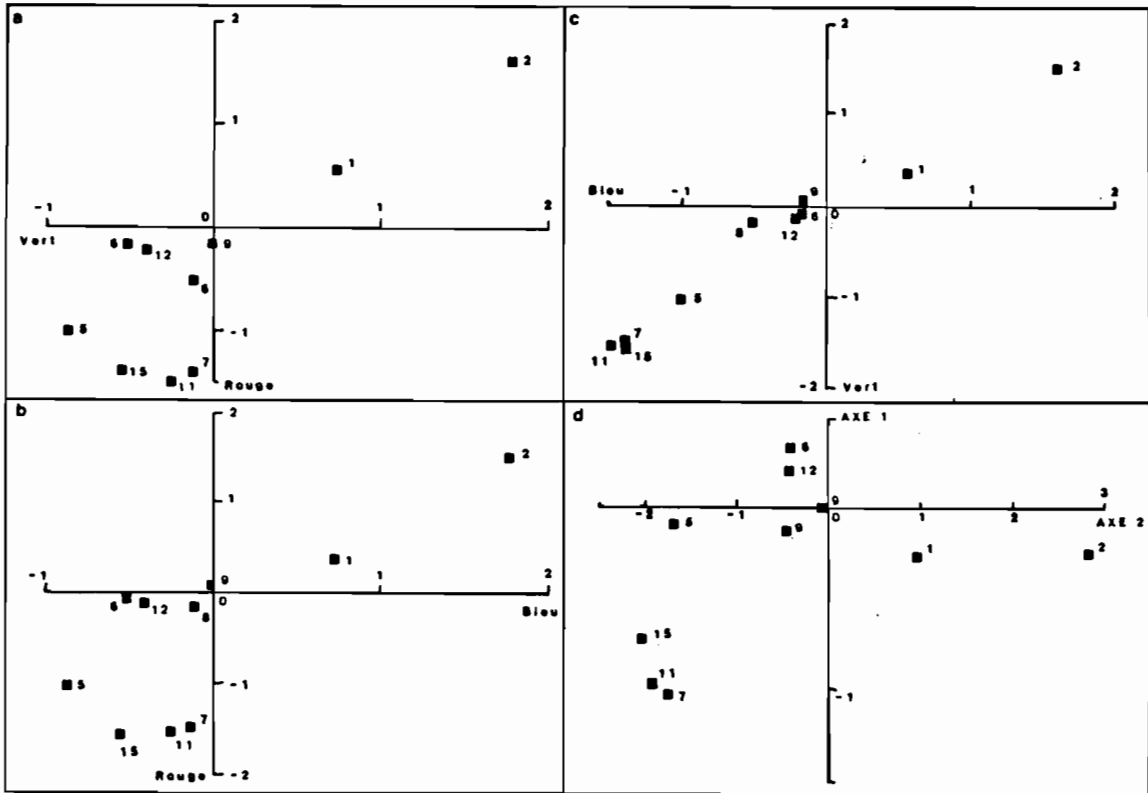


Figure 97 : Image KERMAN, place des différents domaines végétaux (repérés par leur moyenne) dans les repères formés par

- a-Les canaux rouge et vert
- b-Les canaux rouge et bleu
- c-Les canaux vert et bleu
- d-Les axes 1 et 2 de l'ACP

Nous vérifions sur ces diagrammes les résultats donnés par la matrice de corrélation : Les canaux sont fortement corrélés deux à deux. En effet, les points sont répartis en un nuage elliptique; en particulier pour le repère canal vert, canal bleu, la répartition des points est proche d'une droite.

Les domaines de fougère clairsemée (6) et de lande tourbeuse (12), ceux de lande sèche (8) et de lande mésophile (9), enfin les domaines (7), (11) et (15) c'est à dire pelouse sèche, pelouse mésophile et pelouse humide sont proches les uns des autres et ce sont des domaines qu'il nous importerait de voir séparés. C'est la répartition de ces domaines en particulier qui va marquer l'intérêt de la transformation.

On note bien la décorrélation des canaux. En ce qui concerne la séparation de nos domaines, on note un très léger éloignement des domaines (6)-(FC) et 12-(LT) sur l'axe 2, et aucune amélioration notable dans la séparation des domaines 8-(LS) et 9-(LM) d'une part, et des domaines 7-(PS), 11-(PM) et 15-(PH) d'autre part.

Image KERENT

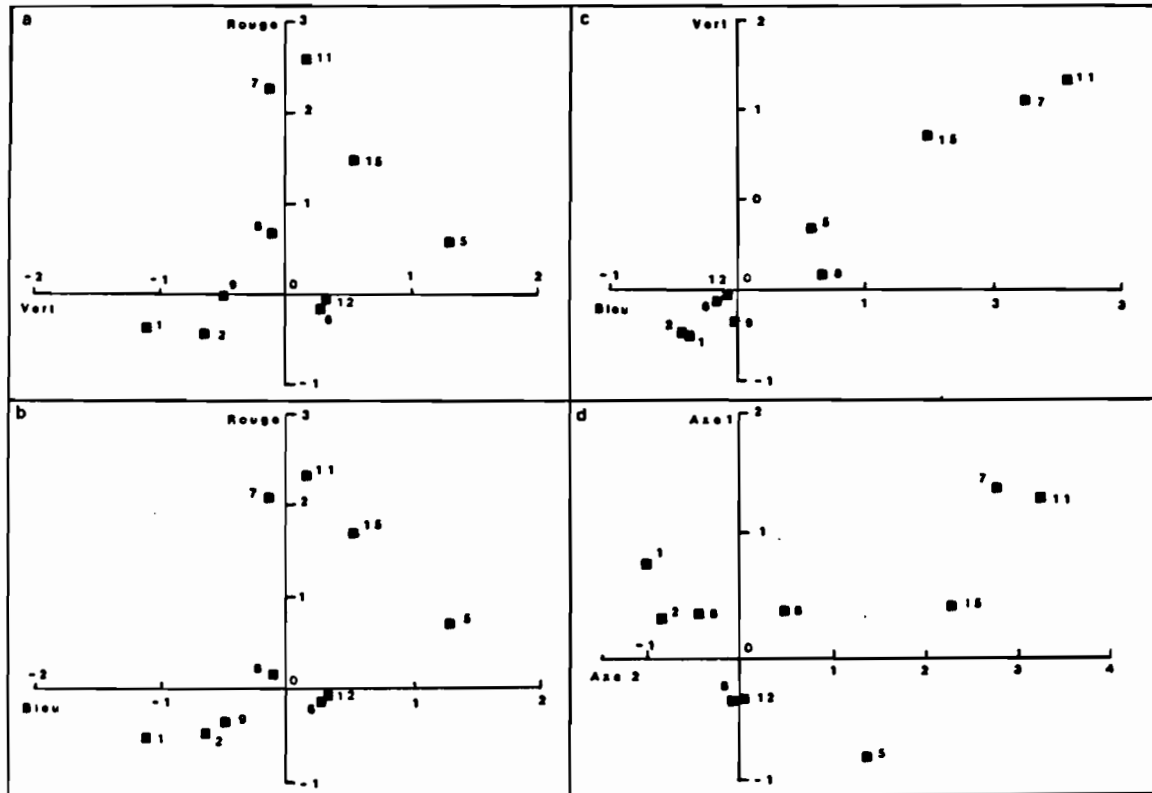


Figure 98 : Image KERENT
Place des différents domaines végétaux (repérés par leur moyenne)
dans les repères formés par:

- a-Les canaux rouge et vert
- b-Les canaux rouge et bleu
- c-Les canaux vert et bleu
- d-Les axes 1 et 2 de l'ACP

Pour l'image KERENT, il n'y a aucune amélioration de la séparation des domaines (6)-(FC) et (12)-(LT), par contre, les domaines (8)-(LS) et 9-(LM) qui sont déjà mieux séparés sur l'image d'origine, le sont encore un peu plus sur l'axe 1. de même pour les domaines (7)-(PS), (11)-(PM) et (15)-(PH) sur l'axe 2.

Visualisation

Si on tente une visualisation simultanée des trois composantes principales en rouge, vert, bleu, ou une visualisation des deux premières composantes avec les

tables de couleur courantes, c'est à dire en luminance-couleur ou en rouge-vert (dans le premier cas des valeurs de luminance croissantes sont attribuées aux valeurs croissantes de la première composante et des valeurs arbitraires de couleur sont attribuées aux valeurs croissantes de la deuxième composante, dans le deuxième cas des valeurs d'intensité croissantes de rouge sont attribuées aux valeurs croissantes de la première composante et des valeurs d'intensité croissantes de vert à la deuxième composante), les améliorations que l'on a décelées sur les graphiques, n'apparaissent pas visuellement. Nous allons donc chercher dans un prochain paragraphe des modes de visualisation particuliers (paragraphe 9-2).

9.1.2 L'indice de végétation

On a testé un autre changement d'axes qui consiste à se ramener à un seul canal par combinaison linéaire des deux canaux rouge et vert. Le résultat de cette combinaison est connue sous le nom d'indice de végétation (Tucker et al., 1983). L'indice de végétation (I.V.) a été démontré en corrélation nette avec la production végétale. Il est calculé de la façon suivante:

$$I.V. = \frac{\text{Infrarouge} - \text{Rouge}}{\text{Infrarouge} + \text{Rouge}}$$

donc:

$$I.V. = \frac{\text{can.rouge} - \text{can.vert}}{\text{can.rouge} + \text{can.vert}}$$

Cette transformation linéaire donne une image à un seul canal qui peut donc être visualisée en noir et blanc. Il est difficile de tester son intérêt à partir d'une telle visualisation. Nous allons donc la tester dans le prochain paragraphe par segmentation de son histogramme.

9.2 La segmentation sur les canaux

La segmentation sur les canaux consiste à faire une partition de l'histogramme et à affecter une couleur à chacune des classes ainsi formée. C'est à la fois une classification et un mode de visualisation (figure 99).

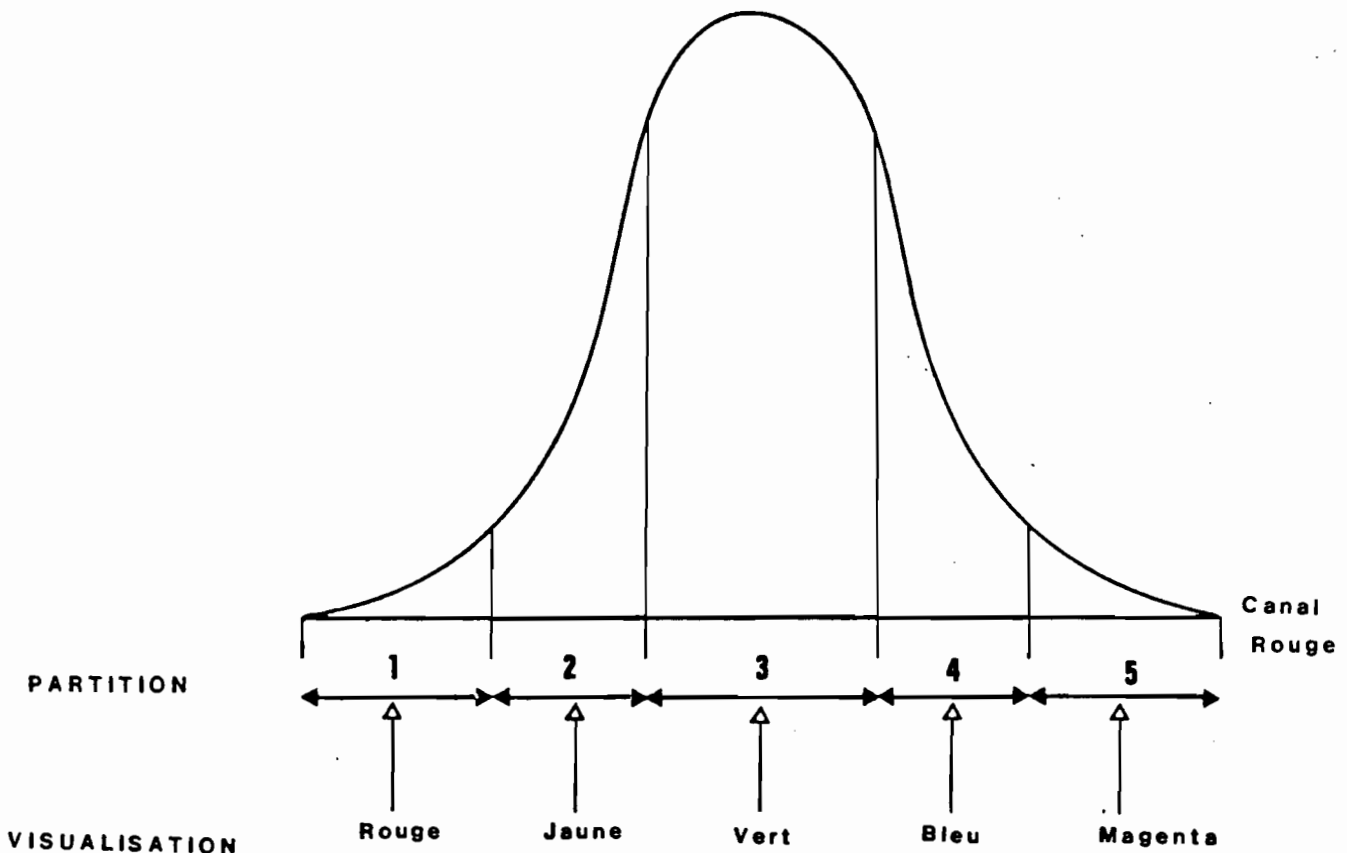


Figure 99 : Exemple théorique de partition de l'histogramme d'une image, et de sa visualisation.

9.2.1 La segmentation monodimensionnelle

L'axe 1 de l'ACP représente 92 % de la variance totale des valeurs de réflectance pour l'image KERMAN et 73 % de la variance totale pour l'image KERENT. Sans penser que la variance des valeurs de réflectance de l'image représente de façon absolue la quantité d'information contenue dans l'image, l'axe 1 de l'ACP présente néanmoins les deux avantages suivants :

1. Un tassement considérable de la variance, donc une représentation relative d'une grande partie de l'information contenue dans les trois canaux de départ.
2. Une décorrélation des canaux de départ qui laisse espérer, d'après la répartition des moyennes des réflectances des grands domaines sur les axes principaux, une meilleure séparation de ces domaines par rapport aux canaux de départ.

C'est donc en premier lieu une segmentation de l'axe 1 de l'ACP qui est testée sur les deux images.

L'axe 2, qui ne représente plus qu'environ 7 % de la variance pour l'image KERMAN et environ 16 % pour l'image KERENT, sépare mieux, comme cela a été démontré plus haut, les moyennes des domaines FC et LT pour KERMAN,

et PS, PM et PH pour KERENT. On testera donc ensuite une segmentation de ces domaines sur l'axe 2 de l'ACP.

9.2.1.1 Segmentation sur l'axe 1 de l'ACP

Image KERMAN (figure 100)

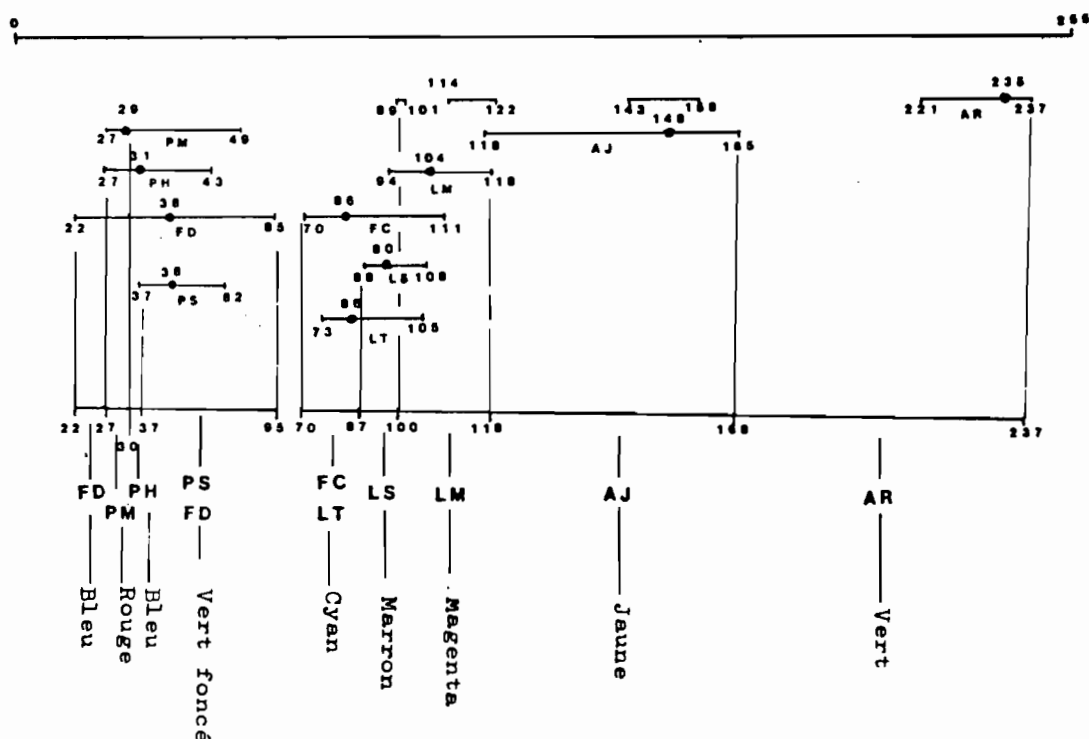


Figure 100 : Partition de l'histogramme Axe 1 de l'ACP , image KERMAN, et affectation des couleurs

Le résultat de cette partition est représenté (figure 100). Cette segmentation n'a pas pu séparer les classes FC et LT, et FD et PS dont les valeurs centrales sont identiques. Les autres classes ont été séparées par leur valeur centrale, mais elles se chevauchent en deux grands groupes :

- D'une part, le groupe des pelouses + la fougère compacte.
- D'autre part, le groupe des landes + la fougère clairsemée.

La classe arbre n'est pas homogène. Une partie, qui représente les réflectances des arbres eux-même (feuillage) est en partie confondue avec la classe ajonc. L'autre partie, qui représente l'ombre des arbres (dans les valeurs les plus élevées dont nous rappelons qu'elles sont affectées au réflectances les plus proches du noir par la numérisation en densité) est nettement séparable.

Image KERENT (figure 101)

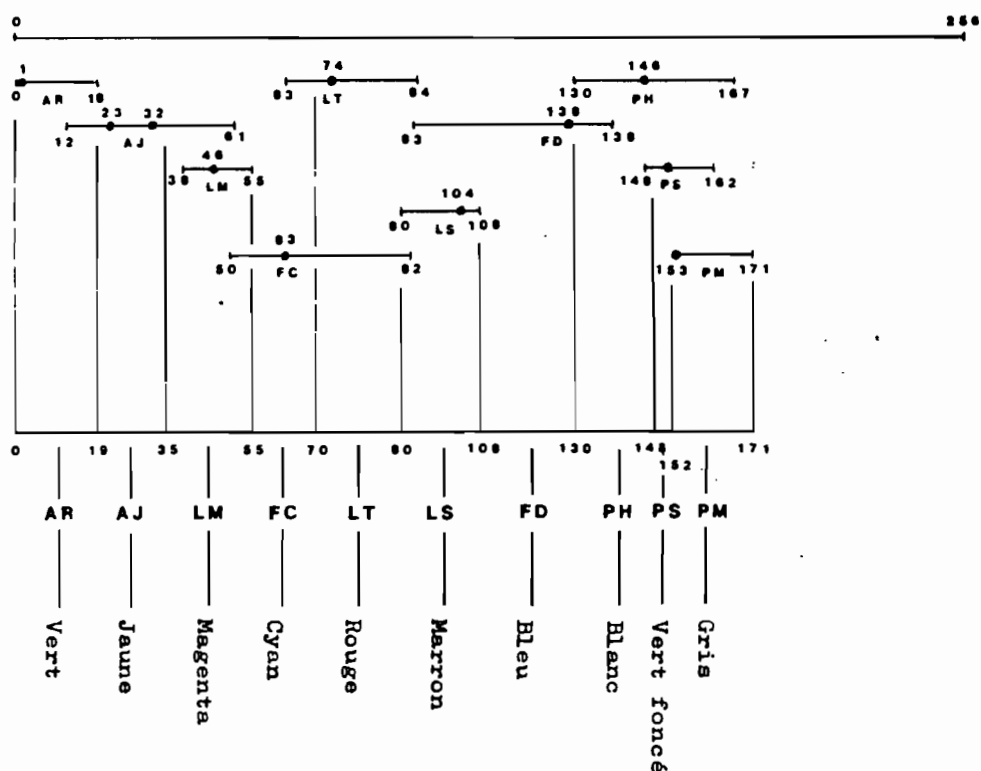


Figure 101 : Partition de l'histogramme Axe 1 de l'ACP , image KERENT,
et
affectation des couleurs

Toutes les classes sont séparées par leur valeur centrale. On retrouve néanmoins mais moins nettement que pour l'image KERMAN, les deux grands groupes landes et fougère clairsemée, et pelouses. La classe fougère dense chevauche les classes LS et PH.

Visualisation des deux segmentations effectuées

Ces visualisations de la segmentation sur l'axe 1 de l'ACP ne sont pas satisfaisantes. A part la classe des arbres, et dans une moindre mesure celle des ajoncs, qui sont relativement bien individualisées, la classification ne présente aucun intérêt. Il y a même perte d'information par rapport à l'image de départ.

9.2.1.2 Segmentation sur l'axe 2 de l'ACP

Image KERMAN

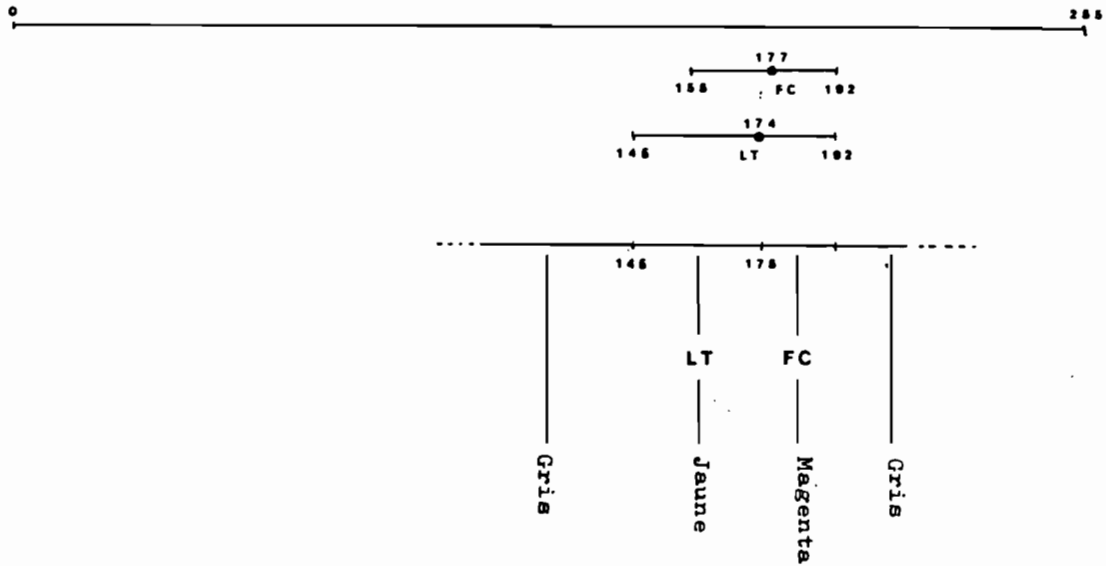


Figure 102 : Partition de l'histogramme Axe 2 de l'ACP , image KERMAN, et affectation des couleurs

Les deux classes que nous voulions tenter de séparer ne le sont pas réellement. Elles se recouvrent quasi complètement et la segmentation faite sur les valeurs centrales donne une visualisation peu satisfaisante.

Image KERENT

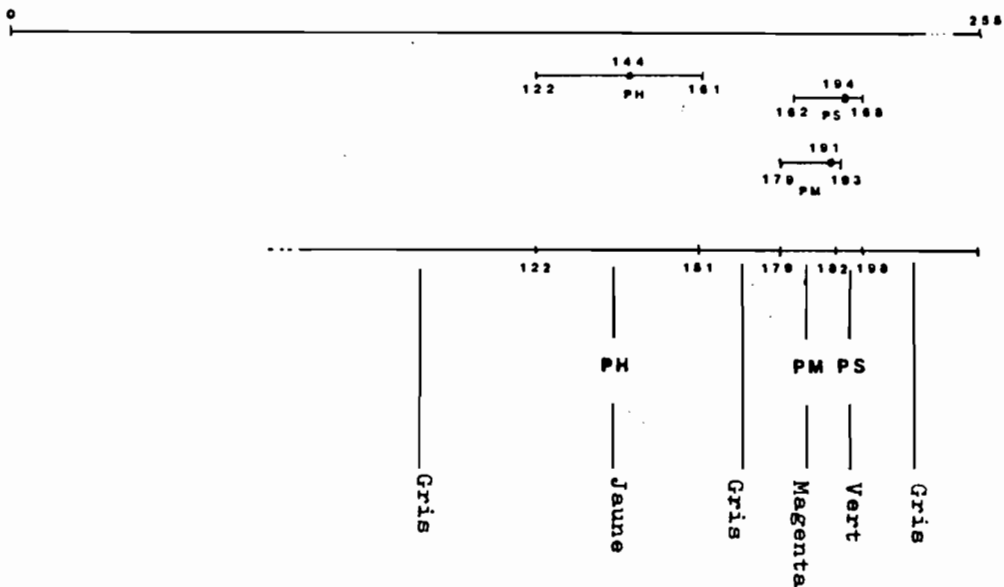


Figure 103 : Partition de l'histogramme Axe 2 de l'ACP , image KERENT, et affectation des couleurs

La classe pelouse humide est bien séparée des classes PS ET PM qui sont elles-mêmes presque confondues;

9.2.1.3 Segmentation sur l'axe indice de végétation

L'image indice de végétation est une image à un seul canal qui résulte de la combinaison linéaire des canaux rouge et vert. Les canaux vert et bleu étant très corrélés l'un à l'autre, on peut estimer que l'image IV contient également une grande partie de l'information contenue sur les trois canaux. Une partition est donc réalisée sur ce nouvel axe, pour nos deux images.

Partition image KERMAN (figure 104)

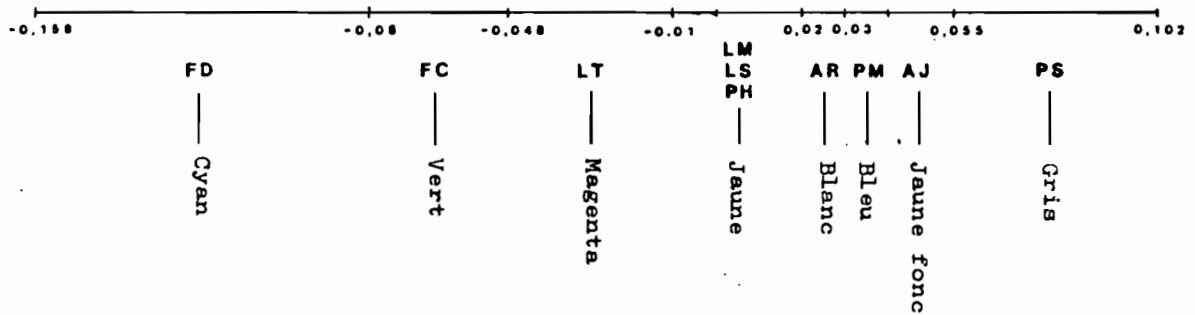


Figure 104 : Partition de l'histogramme IV, image KERMAN, et affectation des couleurs

La partition ne semble pas très bonne. On réalise seulement huit classes, les classes PH, PS et LM étant confondues par leurs valeurs centrales et se recouvrant sur une grande partie de leur histogramme.

Partition image KERENT (figure 105)

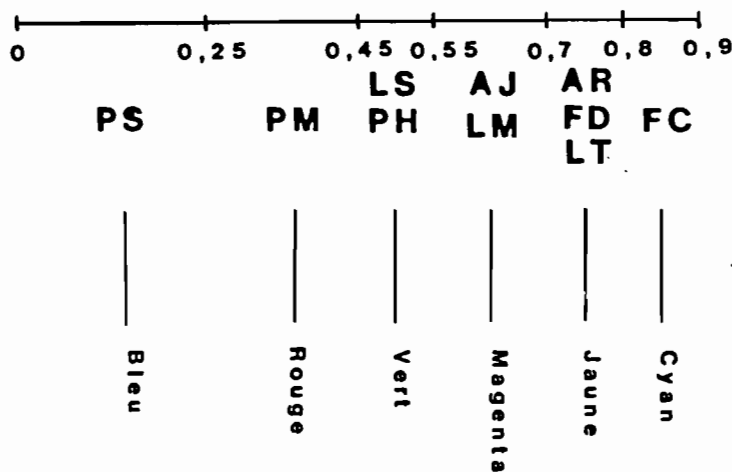


Figure 105 : Partition de l'histogramme IV, image KERENT, et affectation des couleurs

Seulement six classes ont pu être individualisées. Les classes (PH, LS), (AJ, LM), et (AE,FD, LT) sont confondues.

Visualisation

Ces partitions sont effectivement mauvaises. Toutes les classes sont pratiquement confondues. La classe LT pour l'image KERMAN se retrouve partout, et est pratiquement mieux représentée sur toute l'image que dans la répartition spatiale où elle existe réellement. Pourtant, ces partitions présentent un intérêt, (auquel on pouvait s'attendre puisque cette combinaison linéaire IV est donnée dans la littérature comme séparant ce qui est chlorophyllien de ce qui ne l'est pas), cet intérêt étant que FS, FC sont très bien séparées de ce qui est pelouse ou lande (à l'exception de la lande tourbeuse). Ces visualisations sont telles que tout l'espace non occupé par la fougère ressort très bien du reste de l'image, et on perçoit ici ce qui fait la différence entre le domaine de fougère dense et le domaine de fougère clairsemée (carte de végétation) : C'est à l'intérieur du domaine lui-même, l'espace occupé par ce qui n'est pas de la fougère (ici en magenta et jaune surtout). Si on prend l'ensemble cyan, vert, la répartition de ces couleurs n'est pas du tout la même sur la droite et sur la gauche de l'image. Par contre les limites ne sont pas du tout précises.

9.2.2 La segmentation bidimensionnelle

Il est possible, grâce à un programme réalisé dans APLIAS de faire une partition d'un histogramme bidimensionnel.

Sur l'écran de l'IBM 7350, on affiche les deux canaux de l'image à classer, et sur l'écran moniteur (IBM 3279) est affiché le plan de l'histogramme bidimensionnel. De manière interactive, on prélève sur l'image nos échantillons classes de végétation, et leur répartition sur le plan de l'histogramme est repéré (toutes les valeurs représentées sur l'image pour la classe considérée, ainsi que la valeur centrale). On individualise alors la classe (en lui affectant un symbole A, B, etc.) et on lui affecte une couleur. On visualise alors immédiatement sur le 7350 le résultat de la partition.

On a réalisé des partitions sur l'axe 1 et 2 de l'ACP pour les images KERMAN et KERENT. On a séparé arbitrairement des classes qui se chevauchaient sur leurs bordures, mais toutes ont pu être séparées par leur valeur centrale.

Ces partitions sont représentées figures 106 et 107 sur le plan de l'histogramme bidimensionnel et leurs résultats sont visualisés planches hors texte n° 7 et 8.

KERENT CP1 CP2

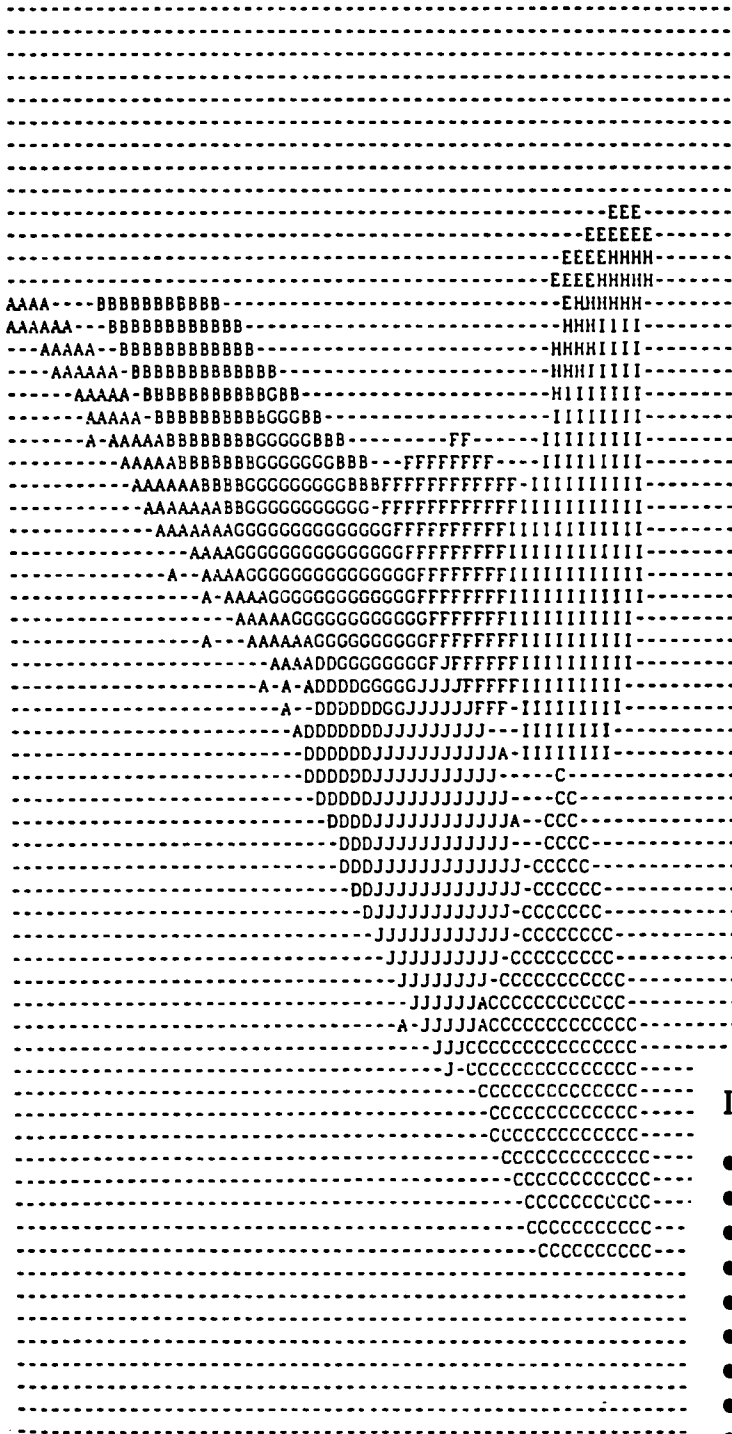


IMAGE KERENT

- A = ARBRE
- B = AJONC
- C = FOUGERE DENSE
- D = FOUGERE CLAIRSEMEE
- E = PELOUSE SECHE
- F = LANDE SECHE
- G = LANDE MESOPHILE
- H = PELOUSE MESOPHILE
- I = PELOUSE HUMIDE
- J = LANDE TOURBEUSE

Figure 106 : Partition sur l'histogramme bidimensionnel (KERMAN)
Axes 1 et 2 de l'ACP

Ces partitions sont d'une façon générale bonnes pour les arbres et pour les ajoncs, avec une perte de précision sur les contours par rapport à l'image d'origine, en particulier sur les arbres.

L'apport de ces visualisations par rapport aux images de départ est principalement :

- pour l'image KERENT, la répartition des pixels non classés (en noir) dans des zones de sol nu ou dans des zones où la végétation est moins couvrante,
- pour l'image KERMAN,
 1. un bon contraste lande sèche (classes confondues lande sèche et lande mésophile, vert clair et rouge), par rapport à la pelouse sèche dans le complexe lande pelouse xérophile, (champ anciennement cultivé),
 2. un assez bon contraste pelouse humide par rapport à la pelouse mésophile (ici classée en majorité en pelouse sèche jaune clair),
 3. Une bonne séparation des domaines fougère dense (magenta clair, droite de l'image) et fougère clairsemée (cyan, gauche de l'image), avec des limites beaucoup plus précises que celles de la partition IV sur KERMAN.

9.3 Conclusion : Intérêts et limites des traitements de type statistique sur les réflectances

La partition bidimensionnelle sur les axes 1 et 2 de l'ACP donne de meilleurs résultats que les partitions monodimensionnelles sur les axes ACP ou sur l'axe IV. Ces résultats sont cependant partiels. Les visualisations permettent de faire mieux ressortir certains détails peu visibles sur la photographie, mais le mélange des classes est constant. Nous analyserons de façon plus précise ce recouvrement des classes dans le chapitre suivant, avant d'exposer les traitements de type textural.

10.0 LES TRAITEMENTS DE TYPE TEXTURAL OU STRUCTURAL

Les traitements de type statistique sur les réflectances nous ont conduit à établir des classifications de l'image par segmentation de l'histogramme monodimensionnel (sur un seul axe, axe 1 de l'ACP, axe 2, ou axe IV), ou bidimensionnel (axe 1 et 2 de l'ACP).

La segmentation a été établie à l'aide de petites zones extraites de l'image représentant un échantillonnage des principaux ensembles végétaux. Les classifications les plus satisfaisantes, celles qui conduisent à la meilleure séparation de nos ensembles, ont été obtenues grâce à la segmentation bidimensionnelle.

Pourtant, ces classifications ne sont pas suffisantes. Les images ainsi créées, montrent que les classes obtenues sont spatialement mélangées les unes aux autres: nous allons dans un premier temps analyser les histogrammes des petites zones de départ (échantillonnage des domaines végétaux) prises sur les images classées, pour déterminer précisément les domaines mal séparés les uns des autres.

La constatation que nous venons de faire de la difficulté de séparer nos domaines uniquement sur les valeurs de réflectances conduit à la notion de texture. Un "photo-interprète" se base sur la couleur, mais aussi sur l'arrangement des couleurs entre elles pour établir son interprétation de l'image, et enfin sur sa connaissance du terrain. Notre but étant d'étudier les possibilités intrinsèques que nous offre l'image, (la modélisation de la connaissance du terrain n'étant en aucun cas dans nos objectifs), nous devons donc tenter d'analyser **cet arrangement des réflectances entre elles.**

Cette notion de la texture de l'image est très généralement celle qui guide la plupart des travaux sur le sujet. Nous avons donné dans le chapitre 7 de définitions préliminaires, des définitions un peu plus complètes de ce qu'on appelle dans la littérature de traitement d'image, la texture et la structure de l'image. La texture et la structure s'intéressent aux relations spatiales entre pixel, l'une à un niveau moins local que l'autre. Il n'existe pas de formulation mathématique de la texture. Mais nous ferons dans un deuxième temps une synthèse bibliographique très rapide des informations disponibles sur le sujet, dans le but de mieux définir les traitements sur la texture, et de justifier les choix qui ont été faits de traitements particuliers.

Nous terminerons ce chapitre par l'exposé des traitements effectués et de leurs résultats.

10.1 Analyse des images classées par partition de l'histogramme bidimensionnel

Pour l'image KERMAN Les domaines végétaux les mieux séparés sont les domaines suivants :

- Arbre
- Ajonc
- Fougère dense

Les autres domaines se répartissent en deux groupes :

- Le groupe des pelouses : Les domaines de PS, PM, et PH sont très mal séparés, les deux premiers se recouvrant pratiquement et le dernier se superposant en partie aux deux premiers.
- Le groupe des landes et de la fougère clairsemée, en deux sous-ensembles, l'un formé de FC et LT pratiquement confondus, et l'autre de LS et LM.

Bien sur, ces mélanges dans les réponses spectrales ne sont pas l'effet du hasard; les pelouses ont des réflectances très proches, dans le jaune (graminées en fin d'épiaison), lande tourbeuse et fougère clairsemée dans les verts et probablement dans l'infrarouge (chlorophylle), et landes sèche et mésophile dans les verts sombres, marron (dominance des bruyères).

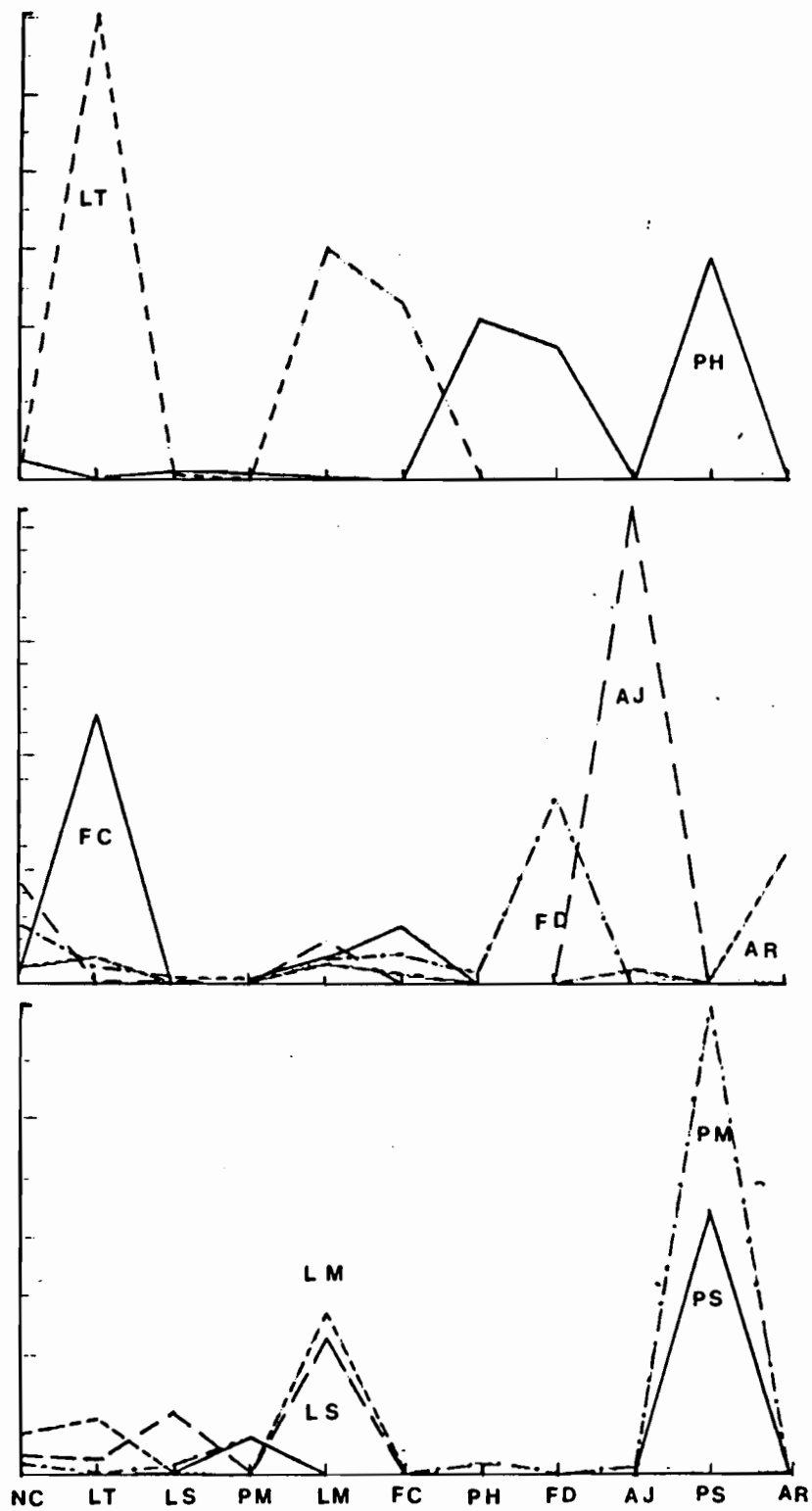


Figure 108 : Histogrammes des groupes de végétation sur l'image
KERMAN
après classification bidimensionnelle.

Pour l'image KERENT Cinq classes sont bien séparées :

- Arbres.
- Ajoncs.
- Fougère dense.
- Lande sèche.
- Pelouse humide.

Les classes mal séparées sont réparties en trois groupes :

- Lande mésophile et une partie des ajoncs.
- Pelouse sèche et pelouse mésophile.
- Fougère clairsemée et lande tourbeuse.

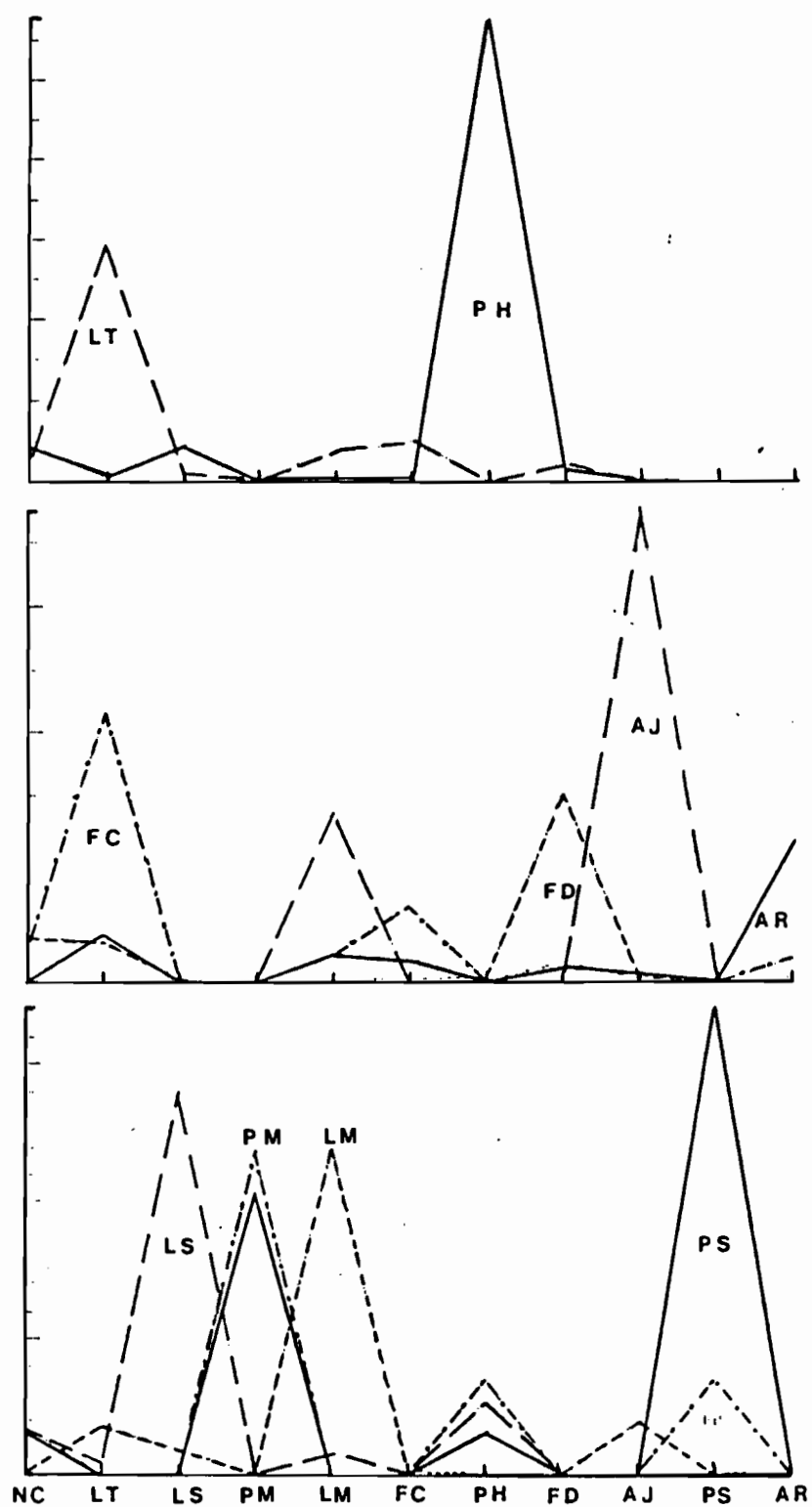


Figure 109 : Histogrammes des groupes de végétation sur l'image KERENT après classification bidimensionnelle.

Pour les deux images, il existe une classe de pixels non classés (qui n'entrent dans aucune classe). Après observation des images obtenues, cette classe des pixels non classés regroupe en majorité les zones de sol nu, c'est à dire à végétation très espacée, haut de plateau, route, maisons, etc.

L'analyse du classement effectué sur les réflectances amène une constatation importante : La classification effectuée sur l'image KERENT est nettement meilleure que celle de l'image KERMAN. En effet, cinq classes au lieu de trois pour KERMAN, sont bien séparées, le mélange lande mésophile et une partie des ajoncs est normal, puisqu'il y a bien des ajoncs clairsemés dans le domaine de lande mésophile, il ne reste donc que deux groupes de deux domaines impossibles à séparer par une segmentation sur les réflectances.

Or les réflectances sont rigoureusement les mêmes puisqu'il s'agit de la même photographie de départ. La différence entre les deux images tient dans l'échantillonnage. Le pas d'échantillonnage est de 30 μ pour KERMAN et de 60 μ pour KERENT. Un pas d'échantillonnage trop faible et le recouvrement de l'échantillonnage pourrait causer une augmentation du bruit et être à l'origine de cette différence dans les résultats de la classification. Il faut cependant être prudent dans ces hypothèses, car l'échantillonnage des domaines végétaux eux-mêmes ne sont pas identiques pour les deux images, puisqu'elles n'ont pas la même taille, et les différences dans la classification peuvent également venir d'un meilleur échantillonnage pour l'image KERENT.

Nous venons d'analyser ces images classées par segmentation bidimensionnelle sur les réflectances, et il en résulte que même pour l'image KERENT donnant les meilleurs résultats, les classes :

Pelouse sèche et pelouse mésophile,
Lande tourbeuse et fougère clairsemée,

ne peuvent être séparées.

La suite de ce chapitre sera consacrée aux traitements de type textural, en commençant par une synthèse bibliographique rapide des travaux existants.

10.2 Synthèse bibliographique des travaux existants sur l'analyse de la texture

Les définitions de la texture sont extrêmement nombreuses, mais très proches les unes des autres. HARALICK (1979) donne la suivante, qui est une de celles les plus employées dans la littérature :

"...la texture est faite de primitives qui apparaissent en arrangements spatiaux répétitifs presque réguliers".

HARALICK (1979) sépare deux sortes d'analyse texturale selon

- une approche structurale,
- une approche statistique.

L'approche structurale est celle qui définit explicitement les primitives. L'approche est statistique quand la présence d'interactions spatiales (ou leur absence) entre les primitives est mesurée par des probabilités.

Suivant l'approche "structurale" de la texture, pour décrire la texture, il faut d'abord définir les primitives, puis leurs règles d'organisation, d'où une deuxième dichotomie :

- Description des primitives.
- Description de l'arrangement des primitives.

10.2.1 Description des primitives

Plûtôt que description des primitives, on pourrait dire choix des primitives, car le nombre de paramètres différents pris comme base de l'analyse de texture proprement dite est considérable. Nous pouvons essayer de classer ces types de primitives.

10.2.1.1 Par leur nature

La plus simple des primitives (et très souvent employée) est le pixel lui-même. Une primitive peut être un ensemble de pixels, cet ensemble ayant une propriété quelconque qui sera alors la primitive choisie.

Un autre type de primitive est le pixel auquel on affecte les propriétés d'un voisinage de ce pixel, le voisinage étant par exemple :

- les huit voisins,

1	2	3
8	P	4
7	6	5

- Les quatre voisins,

	1	
4	P	2
	3	

selon les règles de connexité choisies, ou tout autre voisinage qu'on peut définir; on peut choisir d'affecter à un pixel la somme (par exemple) de ses voisins sur une fenêtre 7x7, ou 9x9 pixels, etc.

10.2.1.2 Par leur signification du point de vue de l'image

Une troisième dichotomie s'effectue ici : Une primitive peut être basée

- sur des domaines,
- sur les limites ou contours.

Les techniques de recherche de primitives basées sur les domaines mettent en évidence des zones de l'image à l'intérieur desquelles un ou plusieurs paramètres restent constants. Les techniques de recherche de primitives basées sur les limites

réhaussent les discontinuités locales de certaines propriétés (comme la réflectance de l'image), (R. NEVATIA et K. PRICE, 1977). Ces discontinuités locales reflètent la structure de l'image; ce sont les crêtes ou les vallées, les fonds ou les sommets qui sont en général obtenus par dérivation de l'image.

Les techniques basées sur les contours:

Les méthodes pour détecter ces discontinuités sont nombreuses. On peut citer quelques unes de celles récapitulées dans W.K. PRATT (1978) :

- Une simple différence de réflectance.
Si $F(i,j)$ est la réflectance d'un pixel de coordonnées i en ligne et j en colonne, la différence G horizontale s'exprime par :

$$G(i,j) = F(i,j) - F(i,j + 1)$$

On peut également effectuer les différences verticalement ou diagonalement

$$G(i,j) = F(i,j) - F(i + 1,j + 1)$$

- Une dérivation (différenciation discrète bidimensionnelle) obtenue par convolution de l'image avec un masque directionnel, par exemple :
Direction nord

1	1	1
1	-2P	1
-1	-1	-1

Direction sud est

-1	-1	1
-1	-2P	1
1	1	1

- Un renforcement des contours linéaire non directionnel avec un masque de type LAPLACIEN.

0	-1	0
-1	4P	-1
0	-1	0

- Un renforcement des contours non linéaire

- De type SOBEL: Module ($\sqrt{A^2 + B^2}$) de A, résultat de la convolution de l'image par un masque de type

-2	0	2
-1	0P	1
-2	0	2

et de B, résultat de la convolution de l'image par un masque de type

2	1	2
0	0P	0
-2	-1	-2

- De type WALLIS : Equivaut à appliquer un masque de type Laplacien sur le logarithme des réflectances de l'image.
On pourrait citer encore la méthode de MITCHELL et AL. (1977), basée sur les minima et extrema locaux.

Cette liste des détecteurs de discontinuités n'est pas complète, mais les résultats obtenus par ces différentes méthodes sont en fait très proches les uns des autres.

Les techniques basées sur les domaines :

Ces techniques sont également diverses. On peut citer

- Les longueurs de chaînes de pixels (run length). Les primitives sont alors le nombre de pixels contiguës en ligne ou en colonne de réflectance égale (M.H. GALLOWAY, 1975).
- Les domaines ou les histogrammes sont similaires (NAGAO, MATSUYAMA, 1980), par exemple les domaines où l'histogramme présente un seul pic est une zone homogène, un domaine où l'histogramme est bimodal ou dissymétrique se trouve à proximité d'un contour (CHAUME, SAVARY, STEHLE, 1979).
- On peut choisir comme primitives, les classes d'une image segmentée par partition de l'histogramme bidimensionnel (ROGALA, 1980).

Cette liste des méthodes employant des primitives basées sur des domaines n'est pas non plus exhaustive.

10.2.2 Description de l'arrangement des primitives

Les méthodes les plus employées sur toutes sortes de primitives (réflectance d'un pixel, run length, histogramme des domaines, classes d'une image segmentée, contours, extrema locaux) sont apparentés ou dérivés de la méthode dite matrice de co-occurrence (W.K. PRATT, 1978, DAVIS et al, 1979, par exemple). C'est la

matrice des fréquences relatives ($P_{i,j}$) avec lesquelles on trouve deux voisinages séparés par la distance d , l'un ayant la propriété i , et l'autre la propriété j . Un autre type de méthode est basé sur la somme ou la moyenne des primitives (réflectances, contours) dans une fenêtre, ce qui donne également une indication de la "grosièreté" ou de la "finesse" d'une texture. Une somme élevée indiquera une zone où les différences entre réflectances sont importantes (texture grossière), une somme faible reflètera une zone où les différences sont faibles (texture fine se rapprochant de l'homogénéité). S. BRACONNE (1977) emploie une somme pondérée des réflectances sur un voisinage. Toutes ces méthodes sont groupées sous le terme générique de lissage, car elles sont employées (surtout la moyenne sur les réflectances dans une fenêtre) comme des améliorations d'image (atténuation du bruit). Mais ce sont également des techniques de description de l'arrangement des primitives, plus particulièrement quand elles sont appliquées aux discontinuités de l'image.

Nous avons donc fait une revue particulièrement rapide des travaux sur la texture qui sont très nombreux, mais qui ne sont pas encore reliés par une véritable théorie. Il est pourtant nécessaire de tenter d'en faire une synthèse pour choisir les traitements à appliquer dans un but précis.

10.3 Les traitements de type textural effectués et leurs résultats

Nous devons tout d'abord expliciter le choix qui a été fait entre les différentes techniques d'extraction de primitives. Le premier choix se situe au niveau des techniques basées sur les domaines, et des techniques basées sur les contours. La recherche d'une cohérence avec l'étude de terrain nous inclinait à choisir une technique basée sur les contours. En effet, aussi bien pour les formations superficielles que pour la végétation, c'est l'étude des limites et de leur signification du point de vue des relations entre les domaines délimités qui a été la plus riche d'information. Mais il s'agit là d'une cohérence de forme : Le mot "structural" est employé pour désigner des propriétés proches d'un point de vue conceptuel, mais qui s'applique là à des domaines très différents, et doit donc être manié avec prudence.

Nous avons fait ce choix compte tenu de l'image même et compte tenu de notre objectif. Notre but n'est pas une cartographie automatique, il est de définir comment on peut, dans un cas précis, exploiter au mieux l'information contenue dans l'image. Plus concrètement, il s'agit à l'issue des traitements sur les réflectances, de mieux séparer les domaines végétaux que nous avons reconnus en partie sur l'image de départ, en partie sur le terrain. Il faut donc réhausser l'information existante, et précisément l'information qui s'est révélée intéressante par l'étude de terrain, mais qui n'est pas la plus évidente sur l'image.

Or, les domaines végétaux que nous voulons séparer ne sont pas homogènes du point de vue des réflectances. De plus, en reprenant à l'intérieur de chacun des grands domaines végétaux, les échantillons qui nous ont servi à établir les classes par partition de l'histogramme bidimensionnel, en les reprenant sur l'image classée, nous avons établi au début de ce chapitre que certains échantillons se recouvrent du point de vue des classes elles mêmes. Ce qui veut dire que nos domaines végétaux sont proches les uns des autres dans l'espace des réflectances, mais également qu'ils sont formés spatialement des mêmes associations de classes (globalement puisqu'il s'agit d'un raisonnement sur les histogrammes). Si ces

domaines se différencient, ce n'est donc pas par leur contenu, ni en réflectance, ni même en classes de réflectance, mais par la façon dont ces classes sont agencées entre elles. D'où l'idée d'ajouter à l'information réflectance une information densité de contour par exemple, plutôt que de partir des classes déjà formées et d'étudier leur répartition spatiale d'un point de vue statistique (par exemple les domaines végétaux fougère clairsemée et lande tourbeuse sont formés spatialement de la même répartition statistique des classes FC et LT).

Nous avons donc choisi comme élément texturant ou primitive, le contour, et employé une méthode d'extraction de contours.

Les différents filtres exposés plus haut : Différences, LAPLACIEN, SOBEL, WALLIS ont été testés. Le filtre LAPLACIEN ne donne pas de bons résultats en ce qui concerne les contours. Les résultats obtenus avec les autres filtres ne sont pas très différents d'un point de vue visuel. Nous avons donc choisi un filtre de type SOBEL, dont les résultats nous ont paru légèrement meilleurs.

Nous avons donc appliqué à chacun des canaux rouge, vert, bleu, une convolution (par un filtre 3x3 indiqué plus haut) sur les lignes, puis sur les colonnes, puis nous avons calculé le module de ces deux images filtrées.

Cette opération constitue donc une extraction de contour et peut être classée dans l'extraction des primitives.

Pour la description de l'arrangement des primitives, nous avons choisi une somme dans une fenêtre 7x7. C'est une méthode simple, et qui s'est avérée ici donner de bons résultats.

Figures 110 et 111, les images obtenues par cette succession d'opérations sont représentées, le canal rouge étant seul donné en exemple.



Figure 110 : Image KERMAN, comptage sur les contours, canal rouge



Figure 111 : Image KERENT, comptage sur les contours, canal rouge

Ces différentes étapes effectuées, nous disposons de six canaux différents, trois canaux réflectance et trois canaux texture. Si les canaux réflectances ne donnent pas de bons résultats de classification, les canaux texture ne sont guère exploitables seuls, les figures ci dessus en témoignent. Il nous faut donc trouver une méthode de combinaison de ces informations.

La méthode que nous avons choisi est la méthode de la classification par le maximum de vraisemblance. Elle consiste, si on veut en rendre compte de manière simplifiée, à définir des classes, puis à calculer des distances inter-classes et intra-classes, enfin de calculer la distance de chaque pixel au centre de chaque classe, et de l'affecter à celle pour laquelle la distance est minimale; Cette distance devant être inférieure à la distance intra-classe.

Cette classification a été effectuée en tenant compte des six canaux, et pour les deux images KERMAN et KERENT, et les résultats obtenus figurent dans les planches hors texte n° 9 et 10

Les images obtenues sont très satisfaisantes, comparées aux précédents résultats obtenus. La confrontation avec la référence terrain fera l'objet du prochain chapitre de conclusion de la partie image. Mais nous pouvons d'ores et déjà conclure ce chapitre par le constat que la méthode définie et employée ici est intéressante. En effet, la combinaison des informations réflectance et texture met en évidence **toutes** les limites de végétation que nous avons retenues, en particulier la limite entre la zone à dominance de fougère clairsemée, et la zone à dominance de fougère dense. La limite de la zone de mouillère est également bien marquée, et les autres zones de l'image où cette classe est représentée sont des domaines où la molinie est associée avec d'autres espèces de graminées. D'autre part, toutes les limites ont à peu près la même valeur, dans le sens qu'il n'y a pas une limite très marquée, comme l'est celle de la fougère sur la lande ou la pelouse dans la plupart des autres images, ce qui est très important pour la photo-interprétation, puisqu'on n'est alors pas induit à privilégier une limite très nette du point de vue des réflectances, mais qui n'a pas une importance primordiale du point de vue de l'interprétation qu'on en fait.

Cette méthode nous paraît donc extrêmement prometteuse, si elle se révèle reproductible dans les études d'extrapolation qui devront faire suite à celle-ci.

11.0 CONCLUSION : L'IMAGE

Les résultats des traitements sur les images et les relations terrain-image

L'image obtenue après amélioration de contraste sur la photographie numérisée est une image très riche. Elle contient toute l'information qui nous intéresse, mais elle contient presque trop d'informations. Il est très difficile de l'utiliser.

Pour montrer la difficulté d'utiliser l'image brute pour la photointerprétation, nous pouvons comparer (figure 112 et 113), d'une part le résultat de la photointerprétation qui nous a servi à "interroger" chacune des limites de réflectance du point de vue de leur signification sur le terrain et à bâtir la carte de répartition des ensembles végétaux, et d'autre part cette carte de répartition des ensembles végétaux. La différence entre ces deux documents est très grande. Elle ne concerne pas seulement le renseignement du contenu mais aussi les limites elles-mêmes : Le morcellement est extrême, le tracé est approximatif, certaines ne sont pas fermées, ni rejointes, (c'est le cas des domaines humides à mouillés), certaines ne figurent pas, (c'est le cas de pratiquement toutes les limites entre fougère sèche et fougères clairsemées, principalement de la limite 14.

L'aboutissement des traitements, dont les meilleurs sont ceux qui combinent l'information réflectance, et l'information texture, font apparaître infiniment mieux la **hiérarchie des limites**. Les classifications obtenues après combinaison des six canaux texture et réflectance, les limites des ajoncs, des arbres, de la fougère, et de la lande pelouse, sont très clairement exprimées. La limite 14 apparaît beaucoup mieux que dans toutes les précédentes images obtenues, et certainement mieux que dans l'image de départ puisque cette limite n'avait pas été dégagée lors de l'opération de photointerprétation effectuée sur cette image.

La photointerprétation de cette dernière image serait certainement plus proche de la carte de répartition des ensembles végétaux que la photointerprétation qui a été faite de l'image brute. Planche hors-texte n° 11, les limites de végétation coïncidentes avec les limites structurales des formations superficielles ont été recadrées sur l'image obtenue par classification des trois canaux réflectance et des trois canaux texture. La classification obtenue met donc bien en valeur ces limites importantes du point de vue de notre analyse des formations superficielles.

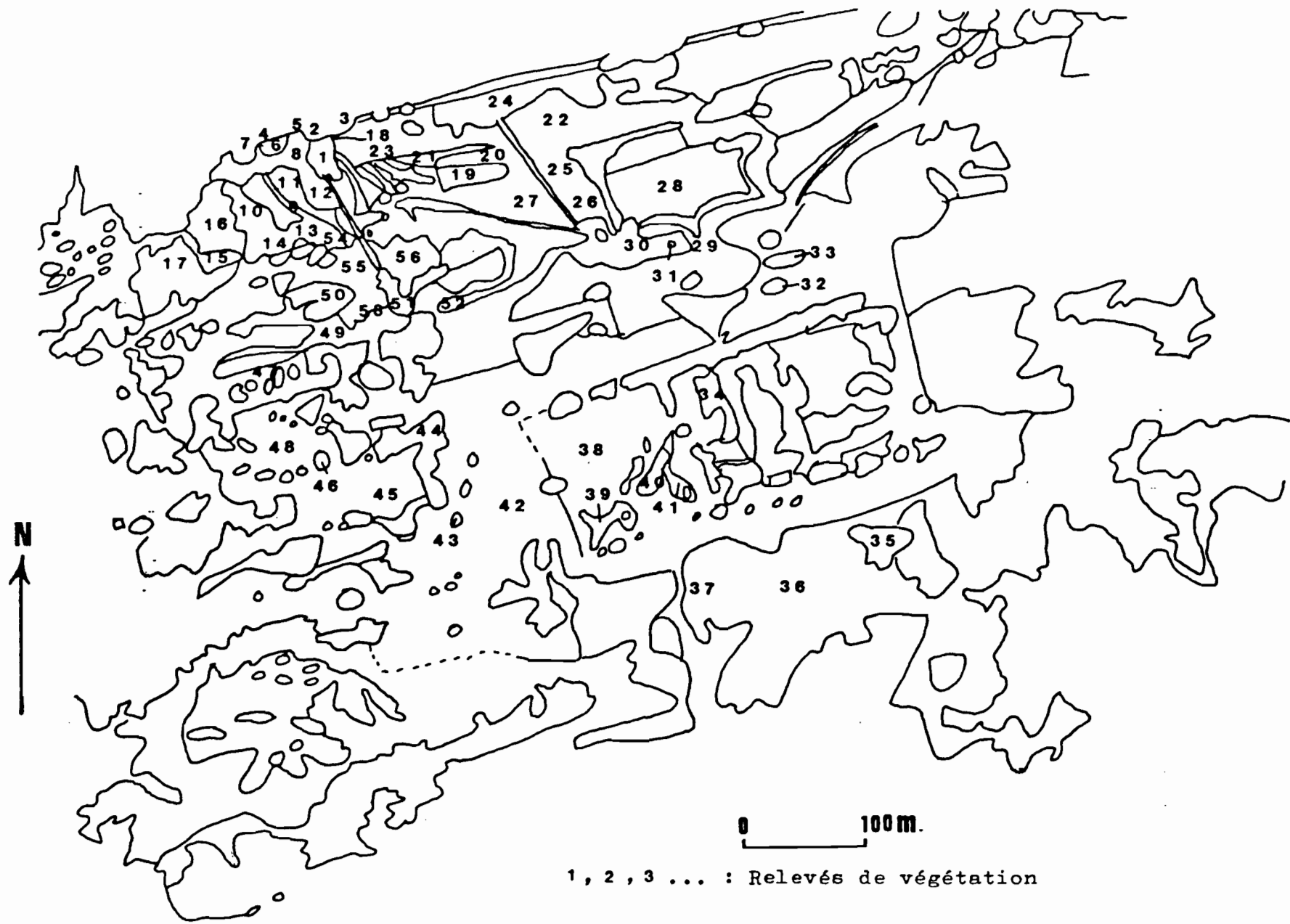


Figure 112 : Photo-interprétation de la photographie
aérienne avant traitements.

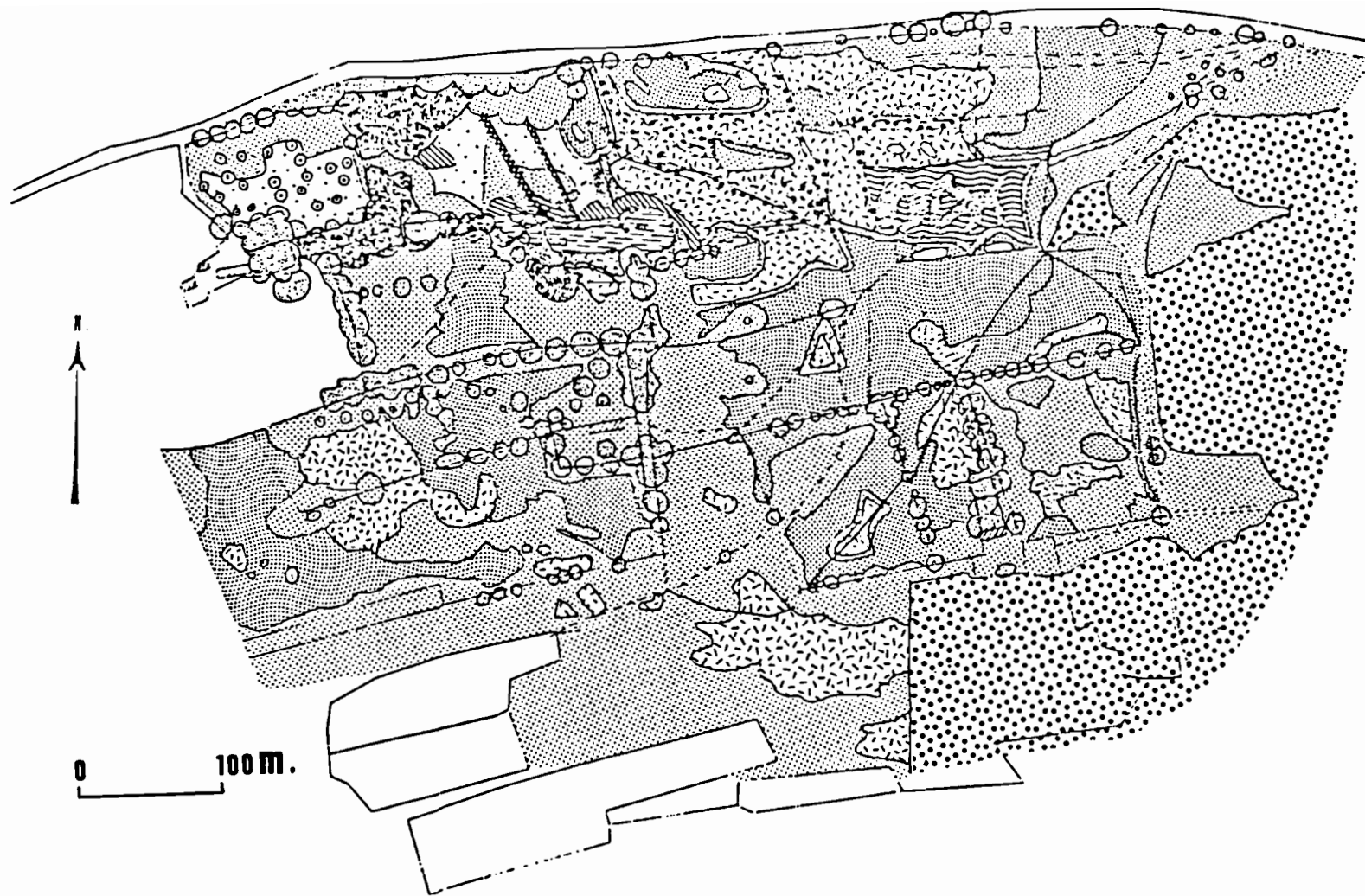


Figure 113 : Carte de répartition des ensembles végétaux

CONCLUSIONS GENERALES

Le travail que nous venons de présenter a concerné une zone de 32 hectares autour du lieu-dit Kermaner, en Bretagne Centrale. Ce secteur de lande est constitué d'un plateau, d'un versant nord et d'un replat aval, sur anticlinal de schistes et quartzites du Gédinnien et du Siegénien inférieur.

L'étude a comporté deux parties:

1. Une étude de terrain

- sur l'organisation des formations superficielles:
Quatorze toposéquences, comportant 165 profils et 9 tranchées, ont permis de définir par une observation macroscopique des volumes d'organisation différente dans les ensembles altéritiques et pédologiques. Des analyses en microscopie optique et des analyses chimiques nous ont amené à préciser les caractérisations et à déterminer certaines processus et leur chronologie au sein des différents volumes ainsi différenciés. Par des relevés géométriques des tranchées, on a établi des relations entre les volumes. Enfin, le suivi spatial des limites a permis de préciser la nature des relations entre les différents domaines.
- sur la répartition de la végétation:
La végétation, traitée dans ce travail comme un intermédiaire entre les formations superficielles et l'image de télédétection, a été analysée de ces deux points de vue.
 - une carte de répartition spatiale de la végétation a été élaborée, à partir d'une interprétation de la photographie infra-rouge couleur au 1/15 000 de la zone, et grâce à des observations ponctuelles sur les espèces végétales, à l'intérieur de chaque zone homogène et sur leurs limites. Cette carte de répartition a permis d'analyser la signification de ces limites.
 - Des observations ont été réalisées le long de chacune des toposéquences pour étudier les relations entre la végétation et les formations superficielles.

2. Une étude de l'image de télédétection

La photographie infra-rouge couleur au 1/15 000, obtenue au cours d'une mission aérienne, a été numérisée, de telle façon que chaque pixel de l'image représente un carré au sol de 50 cm de côté pour la première image (KERMAN), et de 90 cm de côté pour la seconde (KERENT). Ces images ont été préparées pour la visualisation par des traitements d'amélioration de contraste. Le plan cadastral, la carte de répartition des formations superficielles et la carte de répartition des ensembles végétaux, ont également été numérisés, recadrés sur chacune des images, et préparés pour les confrontations ultérieures par une vectorisation semi-automatique des contours.

Différents types de traitements ont ensuite été testés en utilisant la référence terrain.

La mise en oeuvre de ces analyses conjointes permet de proposer les cinq principaux résultats suivants:

- La reconnaissance à la base des formations superficielles de trois principaux domaines altéritiques.
- La reconnaissance dans les horizons pédologiques superficiels de différenciations et de transformations dépendantes des différenciations et transformations dans les altérites.
- Les relations entre la répartition des ensembles végétaux et celle des formations superficielles.
- Une proposition de choix et de combinaison des traitements de l'image par confrontation avec la référence terrain.
- L'apport du traitement des images à leur interprétation.

I - RECONNAISSANCE A LA BASE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES DE TROIS PRINCIPAUX DOMAINES ALTERITIQUES.

Deux domaines ont d'abord été mis en évidence par la profondeur et le degré de leur altération et par la nature des éléments grossiers et des reliques contenus dans les altérites. En effet, on distingue:

Un premier domaine sur altérite peu développée, sur blocs de schiste couchés entre des bancs en place, répartis en rides successives le long de la pente. Les lithoreliques montrent une dominante de schiste, et une altération peu poussée.

Un second domaine, sur altérite très développée, constituée de deux faciès:

Un faciès isaltéritique, à conservation partielle de la structure de la roche, présentant un phénomène de fauchage le long de la pente.

Un faciès allotéritique, avec perte des structures de la roche. Cette allotérite présente des reliques de schiste et de quartzite en quantité égale et les caractères d'une altération intense.

Une faille NNE-SSW aurait décalé les deux blocs constituant ces deux domaines, dont l'un à l'ouest serait formé du début du Gédinnien, et l'autre à l'est comporterait une partie du début et la fin du Gédinnien, le Siegénien inférieur se situant à l'aval du versant.

La différenciation de l'altération dans ces deux premiers domaines est donc de nature géologique, le début du Gédinnien étant constitué de schistes durs alors que la fin est formée d'une alternance de schistes plus altérables et de quartzites.

A l'intérieur de ces deux premiers domaines altéritiques prend place une transformation de nature hydromorphe.

Dans le domaine I cette transformation apparaît en quelques mètres en bas de versant. Dans le domaine II, elle se manifeste à l'intérieur du faciès isaltéritique, par des rubannements de couleurs vives, traces de la mobilisation et de la concentration du fer et des argiles, et à l'intérieur du faciès allotéritique par une mobilisation et une concentration du fer en réseaux sub-horizontaux. La place des rubannements dans l'isaltérite le long de la pente, la reprise des niveaux à concentration de fer par l'éluviation, aussi bien dans l'isaltérite que dans l'allotérite, fait attribuer cette transformation aux battements de la nappe permanente. La transformation est minimum au sommet du versant, et elle croît vers le plateau et vers l'aval.

En bas de versant, un troisième domaine altéritique est donc reconnu, montrant des caractères d'une transformation hydromorphe intense. En outre, la carte géologique place à cet endroit un éboulis de quartzite qui peut avoir favorisé le développement maximum de cette transformation.

La différenciation d'un troisième domaine altéritique est donc dépendante d'une transformation de nature hydromorphe et peut être de la lithologie.

II - RECONNAISSANCE DANS LES HORIZONS PEDOLOGIQUES SUPERFICIELS DE DIFFERENCIATIONS ET DE TRANSFORMATIONS DEPENDANTES DES DIFFERENCIATIONS ET TRANSFORMATIONS DANS LES ALTERITES

Une différenciation de surface de type micropodzolique est limitée au domaine I, alors qu'un horizon organique grumeleux est localisé dans le domaine II. Cette différenciation de surface est donc globalement dépendante de la différenciation dans les altérites, sans que les raisons de cette dépendance aient été expliquées.

Les différenciations pédologiques intermédiaires sont également réparties dans les domaines I et II. Un ensemble formé par les horizons brun clair polyédrique, et brun jaune microgrumeleux est en effet présent dans les deux domaines. Un horizon brun jaune clair lamellaire est localisé dans les zones anciennement mises en culture dans le domaine II. L'horizon brun clair polyédrique est absent en haut de versant et aux endroits où les blocs de schistes sont proches de la surface dans le domaine I, et en situation de forte pente dans le domaine II. L'apparition ou la disparition de ces horizons à l'intérieur des domaines dépendants des altérites induisent des limites de hiérarchie inférieure aux limites principales de différenciation des deux domaines.

Par contre, l'apparition des horizons massif à taches grises et rouilles, massif à taches grises et organique massif, est progressive à partir des horizons brun clair polyédrique, brun jaune microgrumeleux, et organique grumeleux. Ils sont donc différenciés par une transformation qui est de nature hydromorphe. La forme des limites montre que cette transformation se développe aux dépens des horizons "sains" et de la profondeur vers la surface. D'autre part, cet ensemble pédologique transformé ne prend place que sur des altérites déjà transformées au sommet du plateau et en bas de versant.

Cet ensemble pédologique marqué par l'hydromorphie est donc dépendant de la transformation dans les altérites.

Enfin, l'apparition des horizons gris massif et gris massif à taches rouilles sur l'altérite du domaine III marque le maximum de la transformation inférieure. Elle est donc elle-même dépendante de la transformation dans les altérites, par l'intermédiaire de l'horizon massif à taches grises, puisque des relations établies au niveau spatial montrent que la limite de l'horizon gris massif est dépendante de celle de l'horizon massif à taches grises.

La forme des limites d'apparition des horizons gris massif et gris massif à taches rouilles montre qu'ils sont issus d'une transformation verticale descendante, sans doute liée à la nappe temporaire d'hiver; cette transformation supérieure se sur-impose à la précédente. Elle se manifeste de manière discontinue sur le plateau.

III - LES RELATIONS ENTRE LA REPARTITION DES ENSEMBLES VEGETAUX ET CELLE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES

1. Les ensembles végétaux sont répartis de la façon suivante:
 - La ptéridaie (fougère aigle) qui a une extension importante.
 - Les complexes lande-pelouse, connaissant des compétitions entre lande et pelouse, et une compétition avec la fougère. On peut distinguer dans ces complexes:
 - Des groupements mésophiles à xérophiles.
 - Des groupements humides à mouillés.
2. L'analyse des limites de la carte de répartition des ensembles végétaux conduit à leur classement en trois grands types:
 - Des limites liées à une dynamique végétale (compétition entre espèces).
 - Des limites liées à l'occupation humaine.
 - Des limites pour lesquelles une relation avec le sol doit être recherchée.
3. L'analyse des relations entre les formations superficielles et la couverture végétale le long des séquences nous a conduit à établir les relations suivantes:
 - L'implantation de la fougère est liée à la succession Brun jaune microgrumeleux/Organique grumeleux.
 - Les landes ou pelouses sont le plus souvent sur la succession Brun jaune microgrumeleux/ Brun jaune clair lamellaire/Organique grumeleux ou ensemble micropodzolique, ou encore à l'aval des successions Gris massif/Organique massif.
 - Les groupements humides, tourbeux ou mouillés sont toujours sur la succession Massif à taches grises et oranges/Massif à taches grises/ Organique massif.

Ces relations ne sont pas strictes (par exemple il peut y avoir d'autres groupements végétaux que ceux cités plus haut sur la succession Massif à taches grises et oranges/Gris massif/Organique massif, et elles comptent des exceptions.
4. Par comparaison des deux cartes de répartition spatiale (formations superficielles et végétation), on montre une similitude de forme entre les limites qui n'ont aucune signification de type dynamique végétale ou occupation humaine et les limites structurales des formations superficielles.

IV - UNE PROPOSITION DE CHOIX ET DE COMBINAISON DE TRAITEMENTS DE L'IMAGE PAR CONFRONTATION AVEC LA REFERENCE TERRAIN

Deux types de traitement ont été testés sur les images après leur préparation:

1. Des traitements de type statistique sur les réflectances. Les meilleurs résultats sont obtenus par une segmentation de l'histogramme bidimensionnel de l'image. Mais certaines classes restent confondues dans le plan des réflectances.
2. Des traitements prenant en compte les arrangements de pixels à un niveau local. Les différents essais de traitement intégrant ce paramètre textural nous ont conduit à déterminer que:
 - Des traitements d'extraction de primitives basées sur les contours étaient préférables dans notre cas à celles basées sur les domaines. En effet, certains de nos échantillons de référence (vérité-terrain) sont formés d'un même mélange de classes spectrales. Ce n'est donc pas en cherchant à agréger des domaines formés d'un même assemblage de classes que l'on peut arriver à les distinguer. Nous avons donc choisi des traitements basés sur l'estimation d'une densité de contours (gradients) sur un voisinage.
 - Ces traitements texturaux donnent des résultats difficilement exploitables seuls.
 - La prise en compte, avec un poids équivalent, de canaux réflectance et de canaux densité de contours, dans une classification bayésienne, donne les résultats suivants:
 - a - Toutes les limites portées sur la carte de végétation apparaissent de façon nette, en particulier la limite des domaines de mouillère et la limite entre la fougère dense et la fougère clairsemée.
 - b - Ces dernières limites de végétation coïncident par leur forme avec les limites des trois domaines altéritiques, dont dépendent la majeure partie des différenciations pédologiques. Ces limites sont donc les plus importantes du point de vue de la différenciation des formations superficielles.
 - c - L'image obtenue par la suite des traitements définis plus haut s'avère donc refléter cette structure profonde des formations superficielles, par l'intermédiaire des différenciations de surface et de l'implantation de la végétation qui en découle.

V - L'APPORT DU TRAITEMENT DES IMAGES A LEUR INTERPRETATION

L'image obtenue après combinaison des traitements sur les réflectances et sur la texture met en évidence les limites reflétant la structure profonde des formations superficielles, alors que ces limites n'avaient pas été reconnues par l'interprétation de la photographie de départ.

Cette absence de reconnaissance était due au fait que ces limites sont peu marquées sur la photographie brute. En effet, lors de l'interprétation, les changements de couleur sont ceux qui sont le mieux perçus. Leur hiérarchie dans l'interprétation est donc très forte. Ce n'est qu'en deuxième analyse que les différences dans l'arrangement des couleurs sont perçues.

Le choix des traitements qui a été fait a répondu à cette nécessité: Mettre en évidence les arrangements de couleurs, ou la texture de l'image. En outre le choix de la combinaison des traitements, qui attribue dans la classification le même poids aux informations réflectance et aux informations texture, empêche qu'une hiérarchie subjective ne s'établisse lors de l'interprétation. C'est ainsi que les limites d'arrangement entre pixels prennent toute leur importance.

Pour conclure, le travail présenté ici est une contribution sur un seul cas, à une analyse méthodologique qui devrait conduire à une extrapolation de données structurales sur les formations superficielles. D'autres cas devraient être étudiés, et une itération de l'image vers le terrain serait maintenant nécessaire, puisqu'à ce stade, seules sont reconnues sur l'image les structures identifiées sur le terrain. Cependant l'approche proposée paraît intéressante puisque une image adaptée à l'échelle de variation du milieu naturel permet, grâce à des traitements appropriés, de reconnaître certaines structures des formations superficielles.

BIBLIOGRAPHIE

1. ALLAIRE G., PHIPPS M. et STOUPY M. (1973) - Analyse écologique des structures de l'utilisation des sols. L'Espace Géographique, n° 3, pp. 185-197.
2. AL SIDDIK M.A. (1983) - La couverture pédologique en forêt de Rennes : Analyse morphologique de séquences et cartographie en courbes d'isodifférentiation à grande et petite échelle. Thèse de Docteur ingénieur ENSA - Univ. Rennes : Multigr. 125 p.
3. ASFAR L. (1981) - Recherche de contour dans une image LANDSAT. Congrès de Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle de l'AFCEC, Nancy : Multigr. 13 p.
4. AUROUSSEAU P. (1976) - Morphologie et genèse des sols sur granite du Morvan. Thèse de Docteur Ingénieur Univ. Rennes : Multigr. 177 p.
5. AZZAOUI M., BROMBLET P., COMBES P., MEDHIOUB M. et VALAT B. (1984) - Rapport de stage de D.E.A. Univ. PARIS VII : Manusc.
6. BARGEL B. (1980) - Classification of remotely sensed data by texture and shape features in different spectral channels. Proc. 5th Intern. Conf. on Pattern Recognition. Miami. IEEE Computer Society, pp. 2-4.
7. BECKER F. (1978) - Problématique de la télédétection électromagnétique et principes d'interprétation. Actes du colloque intern., Toulouse, 6-11 mars, B/1, pp. 1-17.
8. BACHELARD G. (1957) - La formation de l'esprit scientifique. Contribution à une psychanalyse de la connaissance objective. 3ème Ed. J. Vrin Ed. Paris, 256 p.
9. BIJAOUI A. (1981) - Image et information. 2ème Ed. Masson Ed. Paris, 274 p.
10. BOCQUIER G. (1968) - Biogéocénoses et morphogénèse actuelle de certains pédiments du bassin tchadien. Int. Cong. Soil Sci. (9), Adélaïde, vol IV, pp. 605-614.

11. BOCQUIER G. (1971) - Genèse et évolution de deux toposéquences des sols tropicaux du Tchad. Thèse ORSTOM Paris, 364 p.
12. BOIVIN P. (1983) - Etude structurale d'un milieu naturel. Etude structurale de son image. Recherche préliminaire de correspondances. Mémoire D.E.A. Univ. Paris VII : Multigr. 60 p.
13. BORRIELLO L. and CAPOZZA F. (1974) - A clustering algorithm for unsupervised crop classification. Proc. 9th Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan, pp. 181-188.
14. BOULAIN J. (1980) - Pédologie appliquée. Masson Ed. Paris, 220 p.
15. BOULET R. (1974) - Toposéquences de sols tropicaux en Haute Volta. Equilibres dynamiques et bioclimatiques. Thèse Strasbourg : multigr. 330 p. (n° CNRS A0 9953).
16. BOULET R., CHAUVEL A., HUMBEL F-X. et LUCAS Y. (1982) - Analyse structurale et cartographie en pédologie . Cah. ORSTOM, Sér. Pédologie, vol. XIX, n° 4, pp. 309-351.
17. BOULET R., CHAUVEL A. et LUCAS Y. - Les systèmes de transformation en pédologie. A paraître.
18. BOURGEON G. et BERTRAND R. (1983) - Organisation de la couverture pédologique et précision de sa cartographie. Analyse d'un exemple. Bull. Assoc. Franç. d'Etudes du Sol, n° 1, pp. 49 - 59.
19. BRACONNE S. (1974) - Structures topologiques et cartographie thématique des images aériennes. Bull. Soc. Franc. de Photogrammétrie, n° 56, pp. 39-54.
20. BREWER R. (1976) - Fabric and mineral analysis of soil. R.E. Krieger Publishing Company, Huntington Ed. New York, 482 p.
21. BRICE C.R. and FENNEMA C.L. (1970) - Scene analysis using regions. Artificial intelligence, vol. 1, pp. 205-226.
22. CASTAN S. (1979) - Restauration et amélioration d'images. Centre d'Actualisation Scientifique et Technique, Journées internationales, vol. 2, pp. 1-40.

23. CHATELIN Y. (1976) - Une épistémologie des sciences du sol. Fac. Sc. Dijon et mémoire ORSTOM n° 88 (1979) Paris : multigr. 151 p.
24. CHAUME D., SAVARY G. et STEHLE J.L. (1979) - Extraction de contours en traitement d'images. 2ème congrès AFCET-IRIA : Multigr. 8 p.
25. CHHIKARA R.S. and ODELL P.L. (1973) - Discriminant analysis using certain normed exponential densities with emphasis on remote sensing applications. J. of Pattern Recognition, vol. 5, n° 3, pp. 259-272.
26. CHOUQUER G. et MARION A. (1983) - Informatique et mathématique appliquées à l'archéologie. Cours intensif européen CNRS/CRA : multigr. pp. 1 - 19.
27. COLEMAN G.B. (1977) - Image segmentation by clustering. USCIPI Report 770, Univ. of Southern California, College Park, pp. 204-207.
28. COMBEAU A. (1980) - Simulation des données satellites SPOT - Résultats dans le domaine de l'occupation des sols et comparaison LANDSAT- simulation SPOT. Initiation, documentation techniques, Télédétection 7, ORSTOM Paris : Multigr. 41 p.
29. CREUSOT C., DAVID S., GRANDJEAN E., PROST D. et SIMONIN X. (1983) - Rapport de stage de D.E.A., Univ. PARIS VII : Manusc.
30. CURMI P. (1979) - Altération et différenciation sur granite en Bretagne. Etude d'une toposéquence. Thèse de Docteur-ingénieur ENSA - Univ. de Rennes : Multigr. 176 p.
31. DAVIS L.S., JOHNS S.A. and AGGARWAL J.K. (1979) - Texture analysis using generalized co-occurrence matrices. IEEE trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. PAMI-1, n° 3, pp. 251-259.
32. DURAND D. (1979) - La systémique. Coll. Que sais-je ?, PUF Ed. Paris, 128 p.
33. ERNST D., BARGEL B. and HOLDERMANN F. (1976) - Processing of remote sensing data by a region growing algorithm. Proc. 3rd Intern. Joint Conf. on Pattern Recognition, pp. 679-683.
34. ESTEOULE-CHOUX J. (1983) - Altérations et silifications au Tertiaire dans le Massif armoricain. Géologie de la France (2), n°4, pp. 345-352.

35. FLOUZAT M. et NAERT M. (1973) - Rapport du groupe de travail interprétation. Ecole d'été CNES - ONU : La télédétection des ressources terrestres, Tarbes, pp. 506-520.
36. FLOUZAT G., GUICHOU C., MERGHOUB Y. et GUILLEMYN D. (1984) - Recherche de fonctions texturantes et cartographie automatique de l'occupation des terres. L'Espace Géographique, n° 3, pp. 241-249.
37. FREEMAN H. (1961) - On the encoding of arbitrary geometric configurations. IEEE Trans. on Electronic Computers, vol. EC 10, pp. 260-268.
38. FRIDLAND V.M. (1967) - Structure de la couverture pédologique. Géoderma, n° 12, pp. 35-41.
39. FRITSCH E. (1984) - Les transformations d'une couverture ferrallitique. Analyse minéralogique et structurale d'une toposéquence sur schistes en Guyane Française. Thèse de Docteur 3ème cycle, Univ. Paris VII : Multigr. 188 p.
40. GALLOWAY M. (1975) - Texture analysis using grey level run lengths. Computer Graphics and Image Processing, vol. 4, pp. 172-179.
41. GIRARD M-C. (1973) - Pédologie et télédétection. Ecole d'été CNES - ONU : La télédétection des ressources terrestres, Tarbes, pp. 445-456.
42. GIRARD C-M. et GIRARD M-C. (1975) - Applications de la télédétection à l'étude de la biosphère. Coll. Sciences Agronomiques, Masson Ed. Paris. 186 p.
43. GIRARD M-C. (1981) - Apports et possibilités d'utilisation de la télédétection en pédologie. Sc. du Sol, n° 1, pp. 3-20.
44. GIRARD M-C. (1983) - Recherche d'une modélisation en vue d'une représentation spatiale de la couverture pédologique. Application à une région des plateaux jurassiques de Bourgogne - Département des sols INAPG, Paris, 430 p.
45. GRANLUND G.H. (1978) - In search of a general picture processing operator. Computer Graphics and Image Processing, vol. 8, pp. 155-173.
46. GRANLUND G.H. (1980) - Description of texture using the general operator approach. Proc. 5th conf. on Pattern Recognition, Miami, vol. 2 of 2, pp. 776-779.

47. GREENE H. (1945) - Classification and use of tropical soil. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 10, pp. 392-396.
48. GUEGUEN C., GAAFAR M. et MICLET L. (1976) - Reconnaissance des formes structurelle appliquée aux images. Automatisme, tome XXI, n° 3/4, pp 102-105.
49. HARALICK R.M., (1973) - Glossary and index to remotely sensed image-Pattern recognition concepts. J.of Pattern Recognition, vol. 5, n° 4, pp. 391-401.
50. HARALICK R.M. (1979) - Statistical and structural approaches to texture. Proc. IEEE, vol. 67, pp. 786-804.
51. HSU S.Y. (1978) - Texture-tone analysis for automated land-use mapping. Phot. Eng., vol. 44, n° 11, pp. 1393-1404.
52. HUMBEL F.X. (1983) - L'approche utilisée en Guyane par l'ORSTOM pour étudier et représenter l'organisation du sol (travaux de R. BOULET et al. de 1977 à 1982). Cours de DEA Pédologie et Aménagement des sols.
53. HUMMEL R.A. (1975) - Histogramm modification techniques. Computer Graphics and Image Processing, vol. 4, pp. 209-224.
54. HUMMEL R. (1977) - Image enhancement by histogram transformation. Computer Graphics and Image Processing, vol. 6, n° 2, pp. 184-195.
55. JAMAGNE M. (1967) - Bases et techniques d'une cartographie des sols. Ann. Agr., n° 18 numéro hors série, INRA, 188 p.
56. JAMES M. (1980) - Feature detection using the general linear model. Pattern recognition, vol. 12, pp. 137-140.
57. KACED A. (1980) - The K-Forms; A new technic and its applications in digital image processing. Proc. 5th Conf. on Pattern Recognition, Miami, Vol. 2 of 2, pp. 933-936.
58. KAZMIERCZAK H. (1977) - Contour and object extraction from image data. Proc. Intern. Sem. on Automation and Inspection Applications of Image Processing Techniques, SPIE, vol. 130, pp. 53-60.
59. LE CALVEZ L. et LE BARS Y. (1977) - Les podzols et leurs horizons sous-jacents sur les grès armoricains de Mûr de Bretagne. Mémoire D.A.A. Ecole d'Agronomie de Rennes.

60. LE CALVEZ L. (1979) - Genèse des formations limoneuses de Bretagne Centrale : Essai de modélisation. Thèse de Docteur 3ème cycle ENSA - Univ. Rennes : Multigr. 213 p.
61. LE LANNOU M. (1950) - Géographie de la Bretagne. Plihon Ed. Rennes, tome I, 283 p.
62. LEROY G. (1980) - Utilisation des données satellites en pédologie. Doc. ronéo ORSTOM : 83 p.
63. LEVIALDI S. (1979) - Image processing - Exposé de synthèse. Centre d'Actualisation Scientifique et Technique, Journées internationales, vol. 1, pp. 1-24.
64. LOWITZ G.E. (1976) - Traitement orthogonal des images multispectrales. Automatisme, tome XXI, n° 3/4, pp. 83-88.
65. LOWITZ G.E. (1979) - Les images multispectrales, leur compression et analyse. CAST. Développements récents en reconnaissance des formes, Journées internationales, vol. 5, pp. 1-15.
66. MATHIEU D. et WIEBER J-C. (1973) - L'analyse des structures des paysages naturels. L'Espace Géographique, n° 3, pp. 171-184.
67. MEYNIER A. (1943) - Champs et chemins en Bretagne. Les conférences universitaires de Bretagne, pp. 161-178.
68. MEYNIER A. (1946) - Les ensembles cadastraux circulaires en Bretagne. Chronique géographique des pays celtes, pp.14-25.
69. MILNE (1935) - Some suggested units of classification and mapping particularly for East African soils. Soil Res., 4, pp. 183-198.
70. MITCHELL O.R. and CARLTON S.G. (1978) - Image segmentation using a local extrema texture measure. Pattern recognition, vol. 10, pp. 205-210.
71. MONNE J. et SCHMIDT F. (1979) - Synthèse de texture par une méthode probabiliste bi-dimensionnelle. 2ème Congrès AFCET-IRIA, tome 2, pp. 91-98.
72. MUSSET R. (1937) - La Bretagne. Armand Colin Ed. Paris, 208 p.

73. NAGAO M., TANABE H. and ITO K. (1976) - Agricultural land use classification of aerial photographs by histogram similarity method. Proc. 3rd Int. Joint Conf. on Pattern Recognition, pp. 669-671.
74. NAGAO M., MATSUYAMA T. and IKEDA Y (1979) - Region extraction and shape analysis in aerial photographs. Computer Graphics and Image Processing, vol. 10, pp. 195-223.
75. NAGAO M., and MATSUYAMA T. (1980) - A structural analysis of complex aerial photographs. Plenum press Ed. New York and London, 199 p.
76. NARENDRA P.M. and GOLDBERG M. (1977) - A non-parametric clustering scheme for Landsat. Pattern Recognition, vol. 9, pp. 207-215.
77. NEVATIA R. and PRICE K. (1977) - A comparison of some segmentation techniques. USCIPI Report 770, Univ. of Southern California, College park, pp. 5-10.
78. PFALTZ J.L. and ROSENFELD A. (1967) - Computer representation of planar regions by their skeletons. Comm. ACM, vol. 10, pp. 119-123.
79. PIAGET J. (1970) - Le structuralisme. Coll. Que sais-je ? PUF Ed. Paris, 125 p.
80. PRAGER J.M. (1980) - Extracting and labeling boundary segments in natural scenes. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. PAMI-2, n° 1, pp. 16-26.
81. PRATT W.K. (1977) - Singular value decomposition image feature extraction. USCIPI Report 770, Univ. of Southern California, College Park, pp. 20-30.
82. PRATT W.K. (1978) - Digital image processing. Wiley-Interscience Ed., 750 p.
83. QUIDEAU P. (1980) - Cartographie détaillée des horizons en forêt de Paimpont. Mémoire D.A.A. ENSA - Univ. Rennes : Multig. 66 p.
84. RIVIERE D. (1974) - Côtes du Nord - Bretagne. Notes et études documentaires - La Documentation Française, 132 p.

85. RODE A. A. (1947) - The soil forming process and soil evolution. Moscou, traduit en anglais par JOFFE (J.F.), Israel program for scientific translation, Jerusalem, 1961, 100 p.
86. ROGALA J-P. (1982) - Approche numérique de l'espace agricole. Thèse de Docteur Ingénieur. I.N.A. Paris-Grignon : Multigr. 224 p.
87. ROSENFELD A. (1978) - Iterative methods in image analysis. Pattern recognition, vol. 10, pp. 181-187.
88. ROUSSEL F. (1980) - Etude d'une toposéquence sur schistes pourpres de Montfort. Application aux problèmes de mise en valeur forestière sur les sols dégradés dans la région de Rennes. Thèse de Docteur Ingénieur ENSA - Univ. Rennes : Multigr. 215 p.
89. RUELLAN A. (1970) - Contribution à la connaissance des sols des régions méditerranéennes : Les sols à profil calcaire différencié des plaines de la Basse Moulouya (Maroc oriental). Thèse Univ. Strasbourg : Mémoire ORSTOM, n° 54, 302 p.
90. RUELLAN A. (1981) - L'horizon pédologique : Unité de base de la cartographie des sols. ENSA-INRA Rennes, S.D.S. 228 : Multigr. 13 p.
91. SAGON J.P. (1976) - Contribution à l'étude géologique de la partie orientale du Bassin de Châteaulin (Massif Armoricaïn) : Stratigraphie, volcanisme, métamorphisme, tectonique. Thèse Univ. Paris VI : Multigr. 671 p. + Annexe.
92. SAGON J-P. (1977) - Carte géologique de la France au 1/50 000 ème, feuille de Quintin. B.R.G.M., Orléans.
93. SAVARY G. et CHANOD J.P. (1985) - APLIAS - Un langage de manipulation d'images construit sur APL. Journées d'étude AFCET - APL et l'ingénierie informatique.
94. SERRA J. (1977) - Présentation de la morphologie mathématique. Le traitement automatique de l'image - Documentation et Recherches, Numéro spécial 33-34, Interphotothèque, pp. 111-122.
95. SWAIN P.H. (1978) - Image data analysis in remote sensing. Digital Image Processing and Analysis, Advanced Study Institute NATO-IRIA, pp. 1-16.
96. TRICART J. (1962) - L'épiderme de la terre. Masson Ed. Paris, 160 p.

97. TUCKER C.J., VANPRAET C., BOERWINKEL E. and GASTON A. (1983) - Satellite remote sensing of total dry matter production in Senegalese Sahel. Remote sensing of environment, 13, pp 461-474, Elsevier publishing Co., Inc., N.Y.
98. VEILLON F. (1979) - One pass computation of morphological and geometrical properties of objects in digital pictures. Signal Processing, vol. 1, pp. 175-189.
99. VILNROTTER F., NEVATIA R. and PRICE K. (1980) - Structural description of natural textures. Proc. 5th Int. Conf. on Pattern Recognition, vol. 2 of 2, pp. 1142-1143.
100. WESZKA J.S., DYER C.R. and ROSENFELD A. (1976) - A comparative study of texture measures for terrain classification. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, vol. SMC-6, n° 4, pp. 269-285.

TABLE DES FIGURES

- Figure 1:** Tracé d'une limite entre deux unités différentes, A et B.
- Figure 2:** Implantation des profils dans des unités physiographiques différentes.
- Figure 3:** Profils, tranchées, sondages, leur représentation dans l'espace.
- Figure 4:** Chronologie relative entre des dépôts successifs, établie par des relations de superposition, et de discordance.
- Figure 5:** Sens de la propagation d'une transformation indiqué par la forme de la limite et la disposition des reliques.
- Figure 6:** Localisation de la zone d'étude en Bretagne centrale.
- Figure 7:** Délimitation de la zone d'étude.
- Figure 8:** Localisation du secteur de référence près de Laniscat.
- Figure 9:** Géomorphologie et écoulement des eaux.
- Figure 10:** Bloc diagramme du secteur d'étude.
- Figure 11:** Extrait de la carte géologique de Pontivy au 1/50 000, de J.P. SAGON.
- Figure 12:** Extrait du cadastre, Feuille de Laniscat au 1/2 500.
- Figure 13:** Carte de situation des profils et tranchées.
- Figure 14:** Toposéquence synthétique : Les différentes unités d'organisation reconnues.
- Figure 15:** Schématisation du plan suivi pour l'exposé de l'analyse des formations superficielles.
- Figure 16:** Figuration des relevés de pendage sur les bancs de schiste en place, ou sur les blocs de schistes, le long de cinq toposéquences.
- Figure 17:** Toposéquence synthétique présentant les différentes mesures de pendage et un schéma de l'organisation des schistes Gédinniens le long de la pente.
- Figure 18:** Les altérites de schistes gédinniens dans les profils G1 et H1, (localisation de ces profils figure 13 et 16).
- Figure 19:** Organisation microscopique de l'altérite de schiste du profil G1.
- Figure 20:** Tranchées F2 et F1
- Figure 21:** Tranchées F4 et F7
- Figure 22:** Organisation microscopique de l'isaltérite de schiste. a-L'altération des lithoreliques, les papules d'accumulation argilo-ferrugineuse. b-Déferruginisation et réorganisation du plasma autour des vides.
- Figure 23:** Irrégularité de la limite entre les faciès isaltéritique et allotéritique dans les tranchées F1 et F2.
- Figure 24:** Organisation microscopique de l'allotérite de schiste et quartzite Gédinniens, fosse F1. a-Abondance du squelette quartziteux et figures d'accumulations ancienne et actuelle. b-Phases successives d'accumulation argileuse puis limoneuse, et halos glébulaires.
- Figure 25:** Localisation dans un diagramme : Silice, aluminium, fer, du schiste Gédinnien, de l'isaltérite de schiste et de l'allotérite de schiste et quartzite.
- Figure 26:** Répartition spatiale des deux ensembles altéritiques.
- Figure 27:** Distribution des trois horizons qui se différencient sur le schiste Gédinnien peu altéré, séquence H.

- Figure 28:** Organisation microscopique de l'horizon BCP. a-Accumulation argiloferrugineuse
b-Concentrations de fer
- Figure 29:** Organisation microscopique de l'horizon BJM
- Figure 30:** Répartition spatiale de l'horizon BCP
- Figure 31:** Organisation schématique du profil K5. Succession au sommet de l'horizon BJM des micro-horizons MPo, MPgm et MPbjvm.
- Figure 32:** Organisation microscopique de l'horizon MPgm dans la tranchée F8, a-Abondance du squelette quartzeux,
b-Ségrégation du fer en liséré,
c-Ségrégation du fer autour des vides.
- Figure 33:** Courbes représentant les pourcentages de chaque fraction granulométrique des horizons suivants:
BJM (profil F1)
MPbjvm (profil F8)
MPgm (profil B6)
MPgm (profil F8)
- Figure 34:** Répartition spatiale de l'ensemble micropodzolique
- Figure 35:** Courbes représentant les pourcentages de chaque fraction granulométrique des niveaux altéritiques et horizons suivants:
L'allotérite (fosse F1)
L'horizon BCP (fosse F1)
L'horizon BJM (fosse F1)
- Figure 36:** Comparaison des horizons BCP et BJM
- Figure 37:** Courbes représentant les pourcentages de chaque fraction granulométrique des horizons suivants:
L'horizon BJM (fosse F1)
L'horizon BJCL (fosse F1)
L'horizon MPgm (fosse F8)
- Figure 38:** Organisation microscopique de l'horizon BJCL, réseau fissural et plasma clair non micro-agrégé.
- Figure 39:** Répartition spatiale des horizons BCP et BJCL dans le domaine sur altérite très développée de schistes et quartzites Gédinniens.
- Figure 40:** Carte récapitulative de la répartition spatiale des unités d'organisation définies jusqu'à présent.
- Figure 41:** Représentation schématique de la tranchée F8
- Figure 42:** Représentation schématique des tranchées F1, F2 et F7
- Figure 43:** Analyse microscopique du développement de rubannements colorés dans le faciès isaltéritique sur schiste et quartzite Gédinniens
- Figure 44:** Analyse microscopique du développement de rubannements colorés dans le faciès isaltéritique sur schiste et quartzite Gédinniens
- Figure 45:** Localisation dans un diagramme triangulaire silice - aluminium - fer, de différents faciès allotéritiques.
- Figure 46:** Analyse microscopique de l'altérite III; les processus suivants sont mis en évidence
a-Accumulation, glébulisation, contraintes, ségrégation du fer vers la porosité,
b-Séparations plasmiques sous l'effet de contraintes,
c-Ségrégation du fer vers la porosité et accumulations ultimes
- Figure 47:** Courbes représentant les pourcentages de chaque fraction granulométrique des horizons suivants:
Horizon BCP
Horizon Mtgo

- Figure 48:** Courbes représentant les pourcentages de chaque fraction granulométrique des horizons suivants:
Horizon BJM
Horizon Mtg
- Figure 49:** Courbes de répartition spatiale marquant l'apparition de l'horizon Mtgo (1) et la disparition de l'horizon BCP (2).
- Figure 50:** Courbes de répartition spatiale marquant l'apparition de l'horizon Mtg (1) et la disparition de l'horizon BJM (2).
- Figure 51:** Les horizons du profil G12
- Figure 52:** Courbes représentant le pourcentage de chaque fraction granulométrique des horizons suivants
L'horizon BJM (fosse F1)
L'horizon Mtg (fosse F2)
L'horizon GM (profil G12)
- Figure 53:** Représentation schématique des séquences K et H
- Figure 54:** Représentation schématique de la séquence G
- Figure 55:** Représentation schématique de la tranchée F7
- Figure 56:** Représentation schématique de la tranchée F2
- Figure 57:** Courbes de répartition spatiale de l'horizon Mtgo
Apparition de l'horizon Mtgo (1).
Disparition de l'horizon Mtgo (2).
- Figure 58:** Courbes de répartition spatiale de l'horizon Mtg
Apparition de l'horizon Mtg (1).
Disparition de l'horizon Mtg (2).
- Figure 59:** Courbes de répartition spatiale des horizons GM, OM.
Apparition de l'horizon GM (1).
Disparition de l'horizon OM (2).
- Figure 60:** Séquence synthétique représentant les principaux ensembles altéritiques et pédologiques différenciés dans les trois domaines structuraux et leurs relations latérales.
- Figure 61:** Carte interprétative de la photographie IGN de 1952
- Figure 62:** Carte interprétative de la photographie IGN de 1969
- Figure 63:** Carte interprétative de la photographie infrarouge couleur (1983)
- Figure 64:** Front de la fougère
- Figure 65:** Mosaïque lande pelouse
Domaine xérophile
- Figure 66:** Photographie de la mosaïque lande - pelouse
- Figure 67:** Photographie du front de la fougère
- Figure 68:** Lande mésophile
- Figure 69:** Domaines mouillés à mésophiles
- Figure 70:** Carte de répartition des ensembles végétaux
- Figure 71:** Carte des limites liées à la dynamique végétale
- Figure 72:** Carte des limites liées à l'occupation humaine
- Figure 73:** Carte des limites dont les relations ne sont pas uniquement de dynamique végétale ou d'occupation humaine.
- Figure 74:** Carte des limites pour lesquelles les relations ne sont pas expliquées.
- Figure 75:** Répartition des ensembles végétaux dans la séquence B
- Figure 76:** Répartition des ensembles végétaux dans la séquence G
- Figure 77:** Répartition des ensembles végétaux dans la séquence H
- Figure 78:** Courbes de sensibilité spectrale des trois couches du film Kodak aérochrome infra-rouge 2443 (d'après C-M et M-C GIRARD, 1975)
- Figure 79:** Courbes de sensibilité spectrale d'un film panchromatique (d'après C-M et M-C GIRARD, 1975)
- Figure 80:** Signal monodimensionnel sinusoïdal et son spectre
- Figure 81:** Signal périodique monodimensionnel et son spectre
- Figure 82:** Signal monodimensionnel non périodique et son spectre

- Figure 83:** Signal résultant d'un système de prise de vue.
- Figure 84:** Quelques motifs du spectre de l'image.
- Figure 85:** Représentation monodimensionnelle théorique de quelques motifs du spectre de l'image et pas d'échantillonnage. (d'après G. CHOUQUER et A. MARION, 1983)
- Figure 86:** Courbes d'absorption des filtres Wraten n° 12, 13 et 14. (d'après Kodak)
- Figure 87:** Histogramme des réflectances d'une image panchromatique.
- Figure 88:** Histogramme bidimensionnel des réflectances sur les canaux rouge et vert d'une image couleur.
- Figure 89:** Transect d'image.
- Figure 90:** Surface de l'image sur un échantillon de 10 par 10 pixels.
- Figure 91:** Histogrammes des images brutes
- Figure 92:** Histogrammes des images après amélioration de contraste
- Figure 93:** Restitution papier de l'image MUR
- Figure 94:** Image panchromatique et image couleur
- Figure 95:** Deux façons de représenter les points d'une image couleur
- Figure 96:** Transformation de Karhunen-Loève.
- Figure 97:** Image KERMAN, place des différents domaines végétaux (repérés par leur moyenne) dans les repères formés par:
a-Les canaux rouge et vert
b-Les canaux rouge et bleu
c-Les canaux vert et bleu
d-Les axes 1 et 2 de l'ACP
- Figure 98:** Image KERENT Place des différents domaines végétaux (repérés par leur moyenne) dans les repères formés par:
a-Les canaux rouge et vert
b-Les canaux rouge et bleu
c-Les canaux vert et bleu
d-Les axes 1 et 2 de l'ACP
- Figure 99:** Exemple théorique de partition de l'histogramme d'une image, et de sa visualisation.
- Figure 100:** Partition de l'histogramme Axe 1 de l'ACP, image KERMAN, et affectation des couleurs
- Figure 101:** Partition de l'histogramme Axe 1 de l'ACP, image KERENT, et affectation des couleurs
- Figure 102:** Partition de l'histogramme Axe 2 de l'ACP, image KERMAN, et affectation des couleurs
- Figure 103:** Partition de l'histogramme Axe 2 de l'ACP, image KERENT, et affectation des couleurs
- Figure 104:** Partition de l'histogramme IV, image KERMAN, et affectation des couleurs
- Figure 105:** Partition de l'histogramme IV, image KERENT, et affectation des couleurs
- Figure 106:** Partition sur l'histogramme bidimensionnel (KERMAN) Axes 1 et 2 de l'ACP
- Figure 107:** Partition sur l'histogramme bidimensionnel (KERENT) Axes 1 et 2 de l'ACP
- Figure 108:** Histogrammes des groupes de végétation sur l'image KERMAN après classification bidimensionnelle.
- Figure 109:** Histogrammes des groupes de végétation sur l'image KERENT après classification bidimensionnelle.
- Figure 110:** Image KERMAN, comptage sur les contours, canal rouge
- Figure 111:** Image KERENT, comptage sur les contours, canal rouge
- Figure 112:** Photo-interprétation de la photographie aérienne
- Figure 113:** Carte de répartition des ensembles végétaux

TABLE DES PLANCHES HORS TEXTE

- Planche n°1:** Carte synthétique de la répartition des formations superficielles
- Planche n°2:** Relations entre limites de végétation et limites structurales des formations superficielles
- Planche n°3:** Image KERENT
- Planche n°4:** Image KERMAN
- Planche n°5:** Image KERMAN transformée en transmission
- Planche n°6:** Cadastre recadré sur l'image KERENT
- Planche n°7:** Image KERMAN après segmentation de l'histogramme bidimensionnel axe1/axe2 de l'A.C.P.
- Planche n°8:** Image KERENT après segmentation de l'histogramme bidimensionnel axe1/axe2 de l'A.C.P.
- Planche n°9:** Image KERMAN classée sur trois canaux réflectances et trois canaux texture
- Planche n°10:** Image KERENT classée sur trois canaux réflectances et trois canaux texture
- Planche n°11:** Limites de la carte de végétation coïncidant avec les limites structurales des formations superficielles, recadrées sur l'image KERMAN classée sur trois canaux réflectance et trois canaux texture.

12.0 TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	3
LA REFERENCE TERRAIN	9
1.0 INTRODUCTION : DEFINITIONS PRELIMINAIRES	11
1.1 Les données existantes	11
1.2 Les données d'analyse des formations superficielles	12
1.3 Les données d'analyse de la couverture végétale	18
2.0 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	19
2.1 Cadre de l'étude	20
2.2 Le secteur de référence	22
3.0 ANALYSE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES	31
3.1 Introduction : Les différentes unités d'organisation	31
3.2 Les schistes et quartzites Gédinniens et leurs altérites	36
3.2.1 L'ensemble altéritique sur schiste Gédinnien	36
3.2.2 L'ensemble altéritique sur schistes et quartzites Gédinniens	41
3.2.3 Répartition spatiale et relations entre ces deux ensembles altéritiques	52
3.3 Les ensembles pédologiques différenciés dans les deux domaines altéritiques définis	55
3.3.1 Les différenciations pédologiques dans le domaine des schistes Gédinniens peu altérés	55
3.3.2 Les horizons pédologiques dans le domaine sur altérite très développée de schistes et quartzites Gédinniens.	68
3.4 Carte récapitulative des différentes unités d'organisation pédologiques sur les domaines altéritiques I et II	76
3.5 Caractérisation des transformations latérales dans les ensembles altéritiques et pédologiques	78
3.5.1 Les transformations latérales dans les ensembles altéritiques	78
3.5.2 Caractérisation de l'ensemble altéritique III	91
3.5.3 Les transformations latérales dans les ensembles pédologiques	94
3.5.4 Les horizons pédologiques GMto et GM	103
3.6 Conclusion : Relations latérales entre les trois domaines et répartition spatiale	107
3.6.1 Relations latérales	107
3.6.2 Répartition spatiale de l'horizon GM et des horizons Mtgo et Mtg (le passage latéral des uns à l'autre ayant été établi)	113
3.7 Conclusion : Les trois domaines reconnus dans les formations superficielles et leurs relations structurales	117
3.7.1 La définition des trois domaines structuraux reconnus dans les formations superficielles	117
3.7.2 Les relations structurales les plus générales entre ces trois domaines	119
4.0 ANALYSE DE LA COUVERTURE VEGETALE	121
4.1 Introduction : Les grands ensembles végétaux et leur répartition spatiale	121
4.2 Le fourré à ajonc d'Europe	121
4.3 Les arbres	126
4.4 La ptéridaie	126
4.5 Les complexes lande - pelouse	127
4.5.1 Unités de type xéro-mésophiles	127
4.5.2 Unités de type humides à mouillés	134
4.6 Conclusion : Carte de répartition des ensembles végétaux	137
4.7 Analyse de la signification des différentes limites entre ensembles végétaux	140
4.7.1 Limites liées à une dynamique végétale (figure 71)	140
4.7.2 Limites liées à l'occupation humaine (figure 72)	146

4.7.3	Limites pour lesquelles les relations ne sont pas uniquement de dynamique végétale ou liées à l'occupation humaine (figure 73)	146
4.7.4	Limites pour lesquelles les relations ne sont pas expliquées (figure 74)	147
5.0	ANALYSE DES RELATIONS ENTRE LES FORMATIONS SUPERFICIELLES ET LA COUVERTURE VEGETALE	149
5.1	Analyse de la répartition des ensembles végétaux en fonction des formations superficielles	149
5.1.1	Séquence B	149
5.1.2	Séquence G	151
5.1.3	Séquence H	153
5.1.4	Etablissement de relations partielles	155
5.2	Conclusion : Les relations entre les formations superficielles et la couverture végétale	156
6.0	CONCLUSION : LA REFERENCE TERRAIN	159
6.1	Les trois domaines structuraux définis dans les formations superficielles	159
6.2	Les relations entre les formations superficielles et les ensembles végétaux	160
6.2.1	Au niveau des séquences	160
6.2.2	Au niveau spatial	160
	L'IMAGE	163
7.0	INTRODUCTION : DEFINITIONS PRELIMINAIRES	165
7.1	La télédétection électromagnétique	165
7.1.1	L'onde électromagnétique	165
7.1.2	Le signal enregistré sur la photographie	166
7.2	La numérisation	171
7.2.1	Principe	171
7.2.2	L'information numérique obtenue	172
7.3	L'image numérique et le traitement d'image	173
7.3.1	L'image signal - La restauration d'image - K.W. PRATT (1978).	174
7.3.2	L'image matrice numérique - Les traitements statistiques et l'amélioration d'image - NAGAO et MATSUYAMA (1980), SWAIN	174
7.3.3	L'image langage - L'approche syntaxique et texturale - LOWITZ (1978).	175
7.3.4	La surface image - L'approche topologique et structurale - BRICE et FENNEMA (1970), PRATT (1978).	176
7.3.5	L'image représentation d'objet - L'approche thématique - HARALICK (1973)	177
7.3.6	L'image flot d'informations - Codage et automatisation - GUEGUEN et al. (1976), LOWITZ (1978), LEVIALDI (1979).	177
7.4	La restitution de l'image	177
7.5	Conclusion : Définition, limites et qualités de l'"outil" image	178
8.0	OBTENTION ET AMELIORATION DES DOCUMENTS DE TRAVAIL	179
8.1	Premier type de document : Les images	179
8.1.1	Obtention des images	179
8.1.2	Amélioration de contraste sur les images	182
8.1.3	La restitution des images après amélioration de contraste	186
8.2	Deuxième type de documents : Les cartes	188
8.2.1	Obtention	188
8.2.2	Vectorisation des cartes	189
8.3	Conclusion : L'obtention des documents de travail et leur préparation en vue des traitements qui vont leur être	190
9.0	LES TRAITEMENTS DE TYPE STATISTIQUE SUR LES REFLECTANCES	191
9.1	Les changements de système de référence	192
9.1.1	L'analyse en composantes principales	192
9.1.2	L'indice de végétation	198
9.2	La segmentation sur les canaux	198
9.2.1	La segmentation monodimensionnelle	199
9.2.2	La segmentation bidimensionnelle	205
9.3	Conclusion : Intérêts et limites des traitements de type statistique sur les réflectances	208
10.0	LES TRAITEMENTS DE TYPE TEXTURAL OU STRUCTURAL	209
10.1	Analyse des images classées par partition de l'histogramme bidimensionnel	210
10.2	Synthèse bibliographique des travaux existants sur l'analyse de la texture	214
10.2.1	Description des primitives	215

10.2.2 Description de l'arrangement des primitives	217
10.3 Les traitements de type textural effectués et leurs résultats	218
11.0 CONCLUSION : L'IMAGE	223
CONCLUSIONS GENERALES	227
BIBLIOGRAPHIE	235
TABLE DES FIGURES	245
TABLE DES PLANCHES HORS TEXTE	249

ANNEXE

Notes sur les séquences de végétation

Séquence A

- 1 : Chemin et limite de champ.
- 2 : Chemin.
- 3 : Route.

Séquence B

- 1 : Limite de champ : Talus planté de chênes.
- 2 : Dominante de lande xérophile à fougères clairsemées.
- 3 : Chemin.
- 4 : Limite de champ.
- 5 : Front de la fougère
- 6 : Mosaïque de pelouse à Galium saxatile L. et de lande à Erica cinerea L.
- 7 : Limite de champ.
- 8 : Dominante de lande mésophile à Ulex europaeus L., Erica ciliaris L., Molinia caerulea L. et à fougères clairsemées.
- 9 : Route.

Séquence C

- 1 : Talus.
- 2 : Chemin bordé de talus plantés de petits chênes et envahis par des graminées.

Séquence D

- 1 : Talus.
- 2 : Haie.
- 3 : Haie.

Séquence E

- 1 : Talus.
- 2 : Haie.
- 3 et 5 : Bord d'un chemin formant une ride à dominante de Ulex europaeus L. sur une lande mésophile.
- 4 : Fond d'un chemin à dominante de Molinia caerulea L. sur lande mésophile.

Séquence F

- 1 : Ancienne lande à Ulex europaeus L.
Vestiges d'ajoncs brûlés.
Reconquête par une lande mésophile à Molinia caerulea L., Agrostis Setacea Curt. et fougères très clairsemées.
On trouve des plages de sol nu.

Séquence G

- 1 : Limite de champ et haie.
- 2 : Lande mésophile avec Ulex europaeus L. et Calluna vulgaris (L.) Hull.
Fougère très clairsemée.

Séquence H

- 1 : Limite de champ.
- 2 : Fougère clairsemée entre 0m70 et 1m de hauteur.
Sous-strate à Agrostis tenuis, ronces, Erica ciliaris L. importante.
- 3 : Lande à Erica ciliaris L., Holcus lanatus L., Agrostis setacea Curt.,
fougères très clairsemées.
- 4 : Limite de champ.
- 5 : Fougère haute : 1m70 à 1m80 de hauteur. La densité de la fougère augmente vers l'aval tandis que le tapis herbacé diminue.
- 6 : Limite de champ.
- 7 : Clairière dans les fougères : Agrostis setacea Curt., Holcus lanatus L., Potentilla, Erica ciliaris L., ronces et fougères très clairsemées.
- 8 : Limite de champ.
- 9 : Limite des fougères
- 10 : Molinie en touradons, Narthecium ossifragum L. et sphaignes.
- 11 : Limite de champ.
- 12 : Petite couronne de bouleaux à Ulex minor Roth.
- 13 : Bande de Ulex europaeus L. et Calluna vulgaris (L.) Hull.
- 14 : Pelouse à Agrostis tenuis Sibth., Holcus lanatus L., Deschampsia flexuosa L., Potentilla.
- 15 : Fougères devenant de plus en plus denses et hautes tandis que le tapis herbacé diminue et que le tapis de feuilles de fougères sèches augmente.

Séquence I

- 1 : Fougères basses avec de petites clairières de Holcus lanatus L., Deschampsia flexuosa L., Calluna vulgaris (L.) Hull et Erica ciliaris L.
- 2 : Lande mésophile dominante; fougères très clairsemées.
- 3 : Limite de champ.
- 4 : Fougère dense avec petites clairières à Holcus lanatus L.
- 5 : Bordure de chemin : Fougères clairsemées et chênes.

Séquence J

- 1 : Limite de champ.
- 2 : Haie de bouleaux.
- 3 : Molinia caerulea L., sphaignes, Erica Tetralix L., Erica ciliaris L.
- 4 : Route.

Séquence K

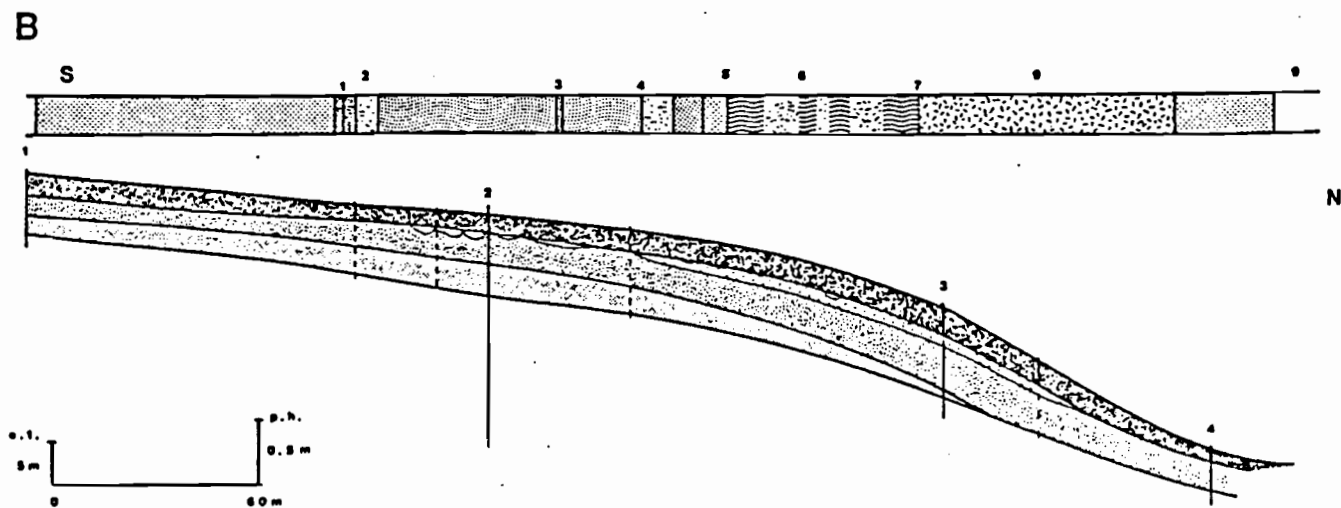
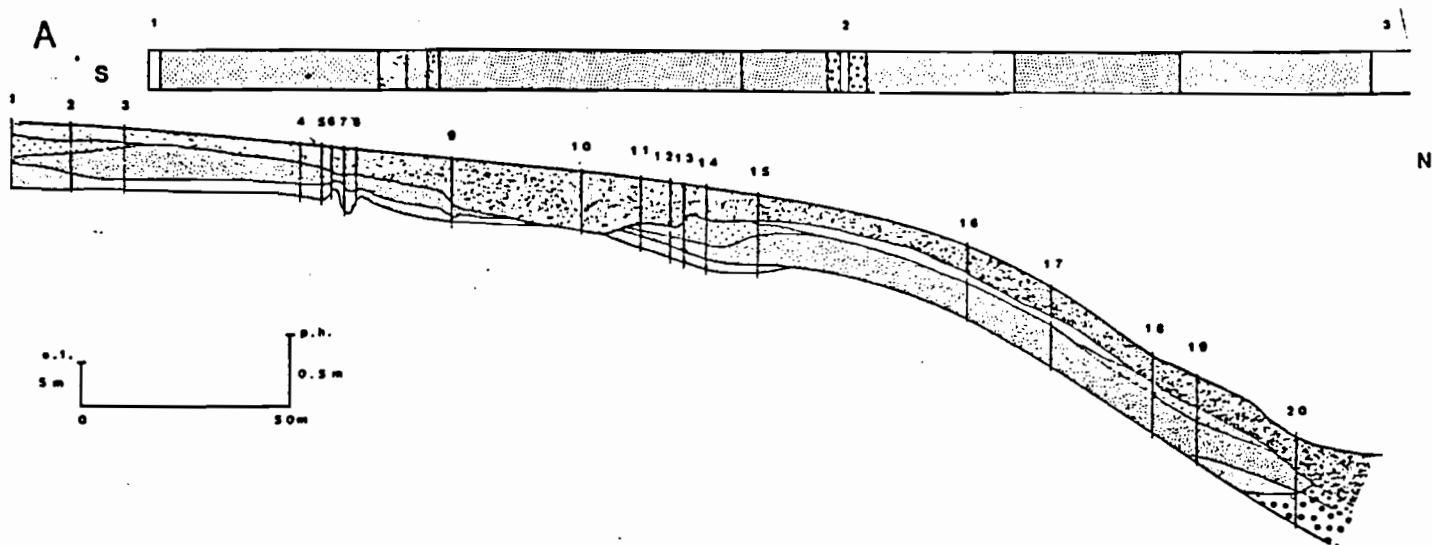
- 1 : Haie de bouleaux.
- 2 : Pelouse à Molinia caerulea L., Holcus lanatus L., Deschampsia flexuosa L., Potentilla, Stellaria, ronces, Ulex minor Roth. et Erica Tetralix L.
- 3 : Route

Séquence L

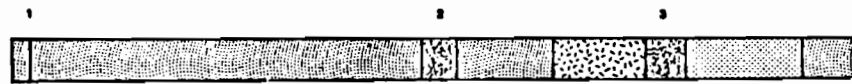
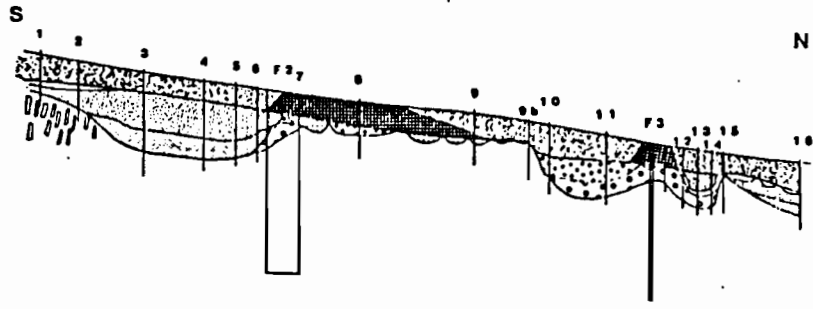
- 1 : Fougères de 1m70 à 1m80 de hauteur, à sous-strate d' Agrostis tenuis Sibth. bien développée.
- 2 : Route.

Séquence M

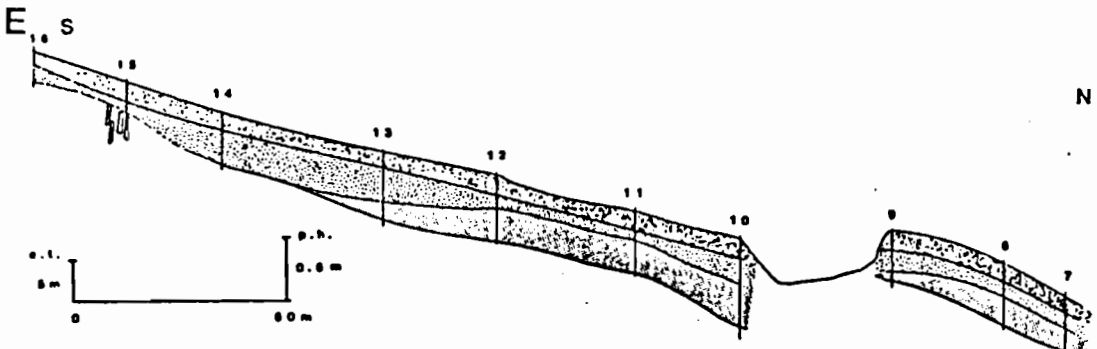
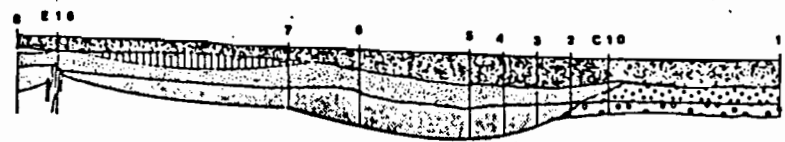
- 1 : Fougères clairsemées, 1m de hauteur, sous-strate de Molinia caerulea L. et Holcus lanatus L.
- 2 : Limite de champ.
- 3 : Limite de Molinia caerulea.
- 4 : Clairière de Holcus lanatus L., Teucrium scorodonia L., Erica ciliaris L.
- 5 : Fougères clairsemées 1m10 de hauteur. Tapis bien développé de Holcus lanatus L. et Deschampsia flexuosa L.
- 6 : Fougères très clairsemées 0m70 de hauteur; clairières nombreuses de Calluna vulgaris (L.) Hull et Deschampsia flexuosa L.
- 7 : Clairière à dominante Deschampsia flexuosa L.
- 8 : Mosaïque de fougères basses clairsemées et de clairières à Erica Tetralix L., Teucrium scorodonia L., Deschampsia flexuosa L.
- 9 : Limite de champ.
- 10 : Fougères clairsemées 1m70 de hauteur, ronces.
- 11 : Limite de champ.
- 12 : Fougères 1m20 de hauteur en mosaïque avec Erica Tetralix L., ronces, Teucrium scorodonia L., Holcus lanatus L.
- 13 : Fougères 1m70 de hauteur dont la densité augmente vers l'aval tandis que le tapis herbacé diminue.
- 14 : Bosquet de bouleaux, chênes.
- 15 : Champ de pommiers avec pelouse à Agrostis tenuis Sibth. et Holcus lanatus L.



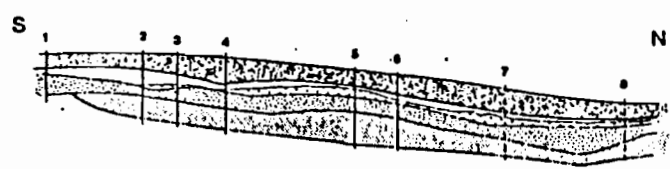
C



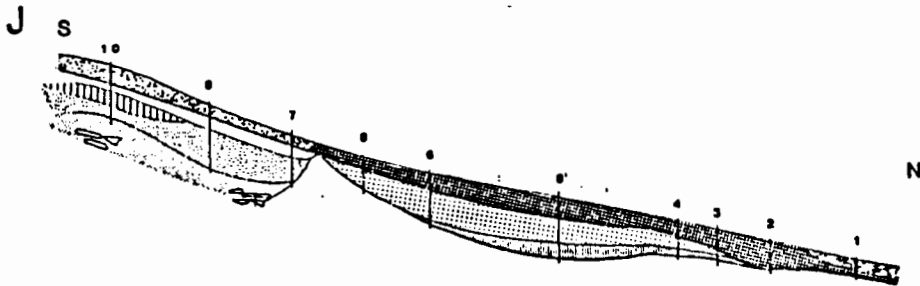
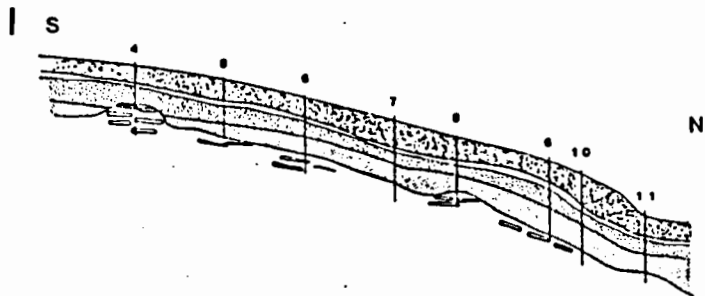
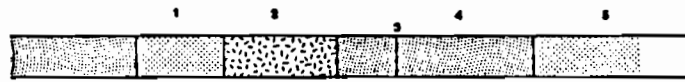
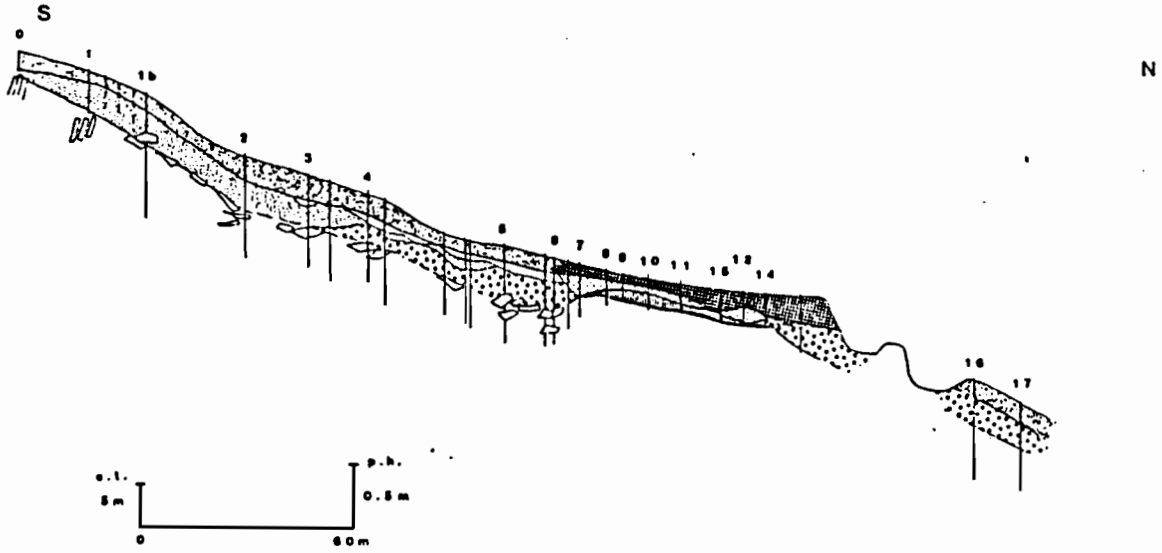
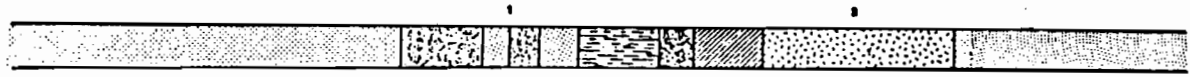
D w

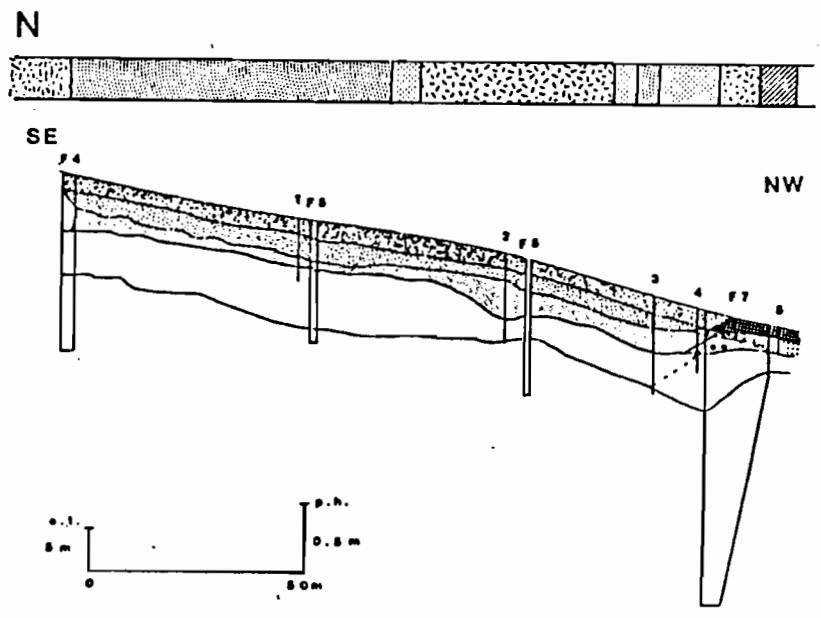
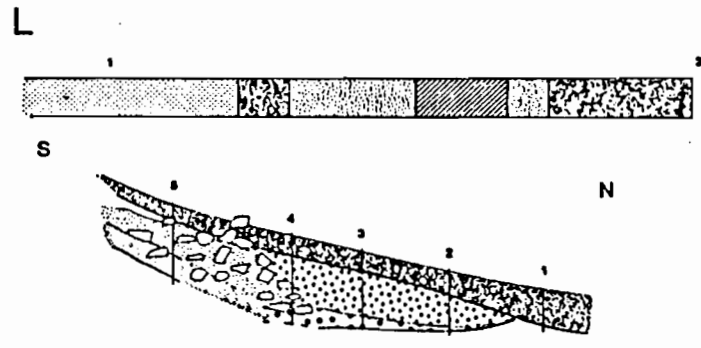
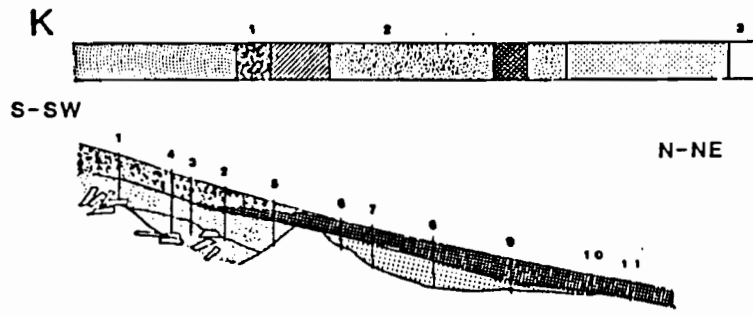


F



G



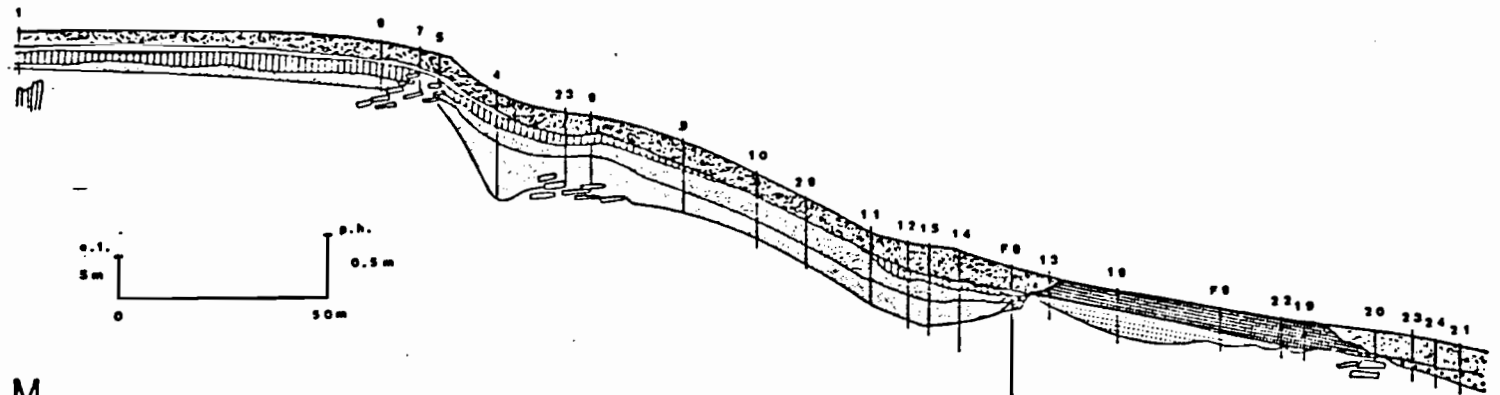


H



S

N



M



S

N

