

Étude d'un système de transformation sur schiste en Guyane française.

Approches morphologique, géochimique et hydrodynamique

C. Grimaldi, M. Grimaldi, R. Boulet
ORSTOM, Cayenne

Les recherches pédologiques menées en Guyane, ces dernières années, associent l'analyse détaillée de l'organisation des sols (analyse structurale) et l'étude de leur fonctionnement hydrique et géochimique. Ces dernières études, souvent lourdes à mettre en œuvre, sont réalisées sur un nombre de sites limité. On s'attache alors à comprendre les mécanismes d'altération, de pédogenèse, d'acquisition de la composition chimique de l'eau en précisant les facteurs déterminants, afin d'extrapoler les résultats obtenus à des zones plus étendues.

I - CADRE ET OBJET DE L'ÉTUDE

Le travail présenté ici a été réalisé sur un des bassins versants sous forêt naturelle du dispositif ECEREX (FRITSCH, 1981 ; ROCHE, 1982 ; BOULET, 1983 ; SARRAILH, 1984). Le substrat géologique est un schiste. Le système de sols étudié est représentatif de vastes zones de la partie septentrionale du bouclier guyanais. Il est interprété comme un système de transformation d'une couverture ferrallitique actuellement en déséquilibre (BOULET, 1983). Cette couverture ferrallitique est encore présente à l'amont du bassin versant. Elle est constituée d'un ensemble d'horizons bruns, argileux, microagrégés et riches en nodules ferrugineux et gibbsitiques, sur plus d'un mètre d'épaisseur. Le caractère microagrégé s'estompe progressivement vers le bas, tandis que la couleur devient plus rouge et que la teneur en argile diminue au profit des limons fins (figure 1). Sur le versant, la transformation se traduit par un rapprochement de la surface topographique d'horizons moins altérés, plus limoneux, d'aspect compact, de couleur rouge puis rouge violacé. Les horizons microagrégés s'amincissent et sont remplacés par des horizons plus jaunes, plus sableux (surtout en sur-

face), macroporeux et à structure polyédrique. La dynamique de l'eau est modifiée en conséquence : à l'amont, l'eau des précipitations s'infiltré verticalement en condition non saturante ; sur le versant, les horizons d'aspect compact ralentissent l'infiltration de l'eau qui sature les horizons superficiels macroporeux et s'y écoule latéralement (GUEHL, 1984 ; GRIMALDI et BOULET, 1989).

Sur une telle séquence, les variations de l'état hydrique du sol sont suivies depuis deux ans à partir de stations équipées de tensiomètres et de tubes d'accès neutronique. Par ailleurs, les eaux saturantes sont interceptées dans des fosses, leur composition chimique étant comparée à celle des écoulements recueillis à l'exutoire. Ces stations et fosses sont localisées sur le transect de la figure 1.

Les résultats exposés ici, concernent l'acquisition de la composition chimique de l'eau dans le sol, au cours des épisodes pluvieux, en relation avec l'évolution actuelle de la couverture pédologique sur le versant. Dans un premier temps, deux profils pédologiques de la séquence, correspondant à des sites de prélèvement d'eau, seront décrits, en s'attachant particulièrement aux variations de leur constitution minérale et de leur espace poral.

II - CONSTITUTION MINÉRALE ET MICROSTRUCTURE DES SOLS DU VERSANT

La description morphologique des deux profils étudiés (figure 2) est présentée en détail en annexe I.

* Le profil situé le plus en amont (B IV ; figure 2) comporte à sa base un horizon d'aspect compact, rouge, de texture argileuse mais riche en limons fins dont on a montré par ailleurs (TANDY *et al.*, 1989) qu'ils étaient constitués de particules de muscovite plus ou moins kaolinisées. Par un horizon de transition aux limites sinueuses, de couleur brun vif, moins limoneux et plus argileux, on passe à des horizons de couleur plus jaune qui s'appauvrissent progressivement en argile et plus encore en limons jusqu'au sommet du profil. Ces horizons sont par contre plus riches en éléments grossiers (sables quartzeux et nodules ferrugineux) ; la macroporosité tubulaire et fissurale y est bien développée.

La muscovite, minéral primaire résiduel, est encore présente dans l'horizon rouge. La kaolinite est partout abondante, la taille des particules diminuant entre l'horizon rouge et l'horizon argileux sus-jacent. Les horizons superficiels contiennent de faibles quantités de gibbsite, par rapport aux horizons microagrégés de l'amont. Le fer est surtout sous forme de goëthite bien cristallisée, et d'hématite dans l'horizon rouge. Le quartz présente des figures de dissolution.

La détermination du spectre poral, en porosimétrie au mercure (figure 3), met aussi en évidence une différenciation verticale importante sur ce profil, que nous interprétons en nous référant à des observations en microscopie optique et électronique (TANDY *et al.*, 1985). Dans l'horizon rouge, la plus grande partie de la porosité prise en compte avec le porosimètre (pores dont la taille équivalente est inférieure à 100 μm) correspond à des pores interparticulaires dont la taille est assez variable (entre 10 nm et 1 μm) avec un mode à 75 nm. Dans l'horizon de transition, parallèlement à l'augmentation de la fraction argileuse, la taille modale passe à 25 nm, le spectre de porosité étant pratiquement unimodal. Plus haut dans le profil, on note une diminution du volume des pores les plus fins dont la taille modale est toujours de 25 nm, et une augmentation du volume des pores de taille supérieure à 1 μm dont la nature est très variable : microfissures, porosité d'assemblage d'agrégats, tubules.

* Le profil B II plus à l'aval (figure 2) présente à sa base un horizon rouge violacé à structure massive, moins altéré que l'horizon rouge, limono-sablo-argileux et sériciteux. Les limons fins restent abondants dans les deux horizons médians brun-jaune plus argileux. Les teneurs en argile et plus encore en limons fins diminuent dans les horizons superficiels (0 à 45 cm de profondeur) macroporeux, riches en nodules lithorelictuels.

Les constituants minéraux sont les mêmes que ceux du profil B IV, dans des proportions certainement variables, si l'on en juge par les différences de granulométrie. En particulier, la muscovite est encore abondante dans les horizons médians.

Le spectre poral de l'horizon rouge violacé (figure 4) se distingue de ceux précédemment décrits par une classe de pores entre les particules les plus fines dont la taille modale est de 150 nm environ, et surtout par un volume important de pores plus grossiers, entre 1 et 50 μm . Ce volume de mésopores diminue sensiblement au sommet de cet horizon, le spectre poral étant alors pratiquement unimodal. Vers le haut du profil, l'allure du spectre poral évolue progressivement : le volume des petits pores augmente puis diminue avec la teneur en argile ; leur taille modale diminue sensiblement (de 75 nm à 25 nm) ; le spectre poral devient aussi nettement bimodal dans les horizons superficiels, avec l'augmentation progressive d'un volume des pores interagrégats.

III - COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX ET INTERPRÉTATION

1. Eaux de crue à l'exutoire du bassin versant

La figure 5 présente l'évolution, au cours d'une crue, de la composition chimique des écoulements à l'exutoire. Bien qu'il existe une certaine variabilité selon les épisodes pluvieux, liée à l'intensité de l'averse, à sa durée, ainsi qu'à l'état hydrique initial du sol avant la crue, on note de façon géné-

rale les observations suivantes (GRIMALDI, 1988) : les eaux sont diluées (conductivité entre 0,015 et 0,040 mS/cm), acides (pH entre 4,6 et 5) ; l'alcalinité est souvent légèrement négative ; les éléments dominants sont le sodium et le chlorure (autour de 0,1 mmole/l) ; la silice est toujours en concentration inférieure à la solubilité du quartz (généralement) inférieure à 0,05 mmole/l) ; les ions potassium, calcium, magnésium sont très peu mobiles (concentrations inférieures à 0,02 mmole/l) ; enfin, on observe parfois quelques teneurs plus importantes en nitrate.

Les concentrations de certains éléments chimiques suivent une évolution inverse à celle du débit : les ions chlorures et sodium, apportés par la pluie, se trouvent en excès dans la solution du sol par rapport à leur absorption par la végétation. Ils sont donc concentrés par évaporation entre les épisodes pluvieux. A l'exutoire, les teneurs les plus élevées (décrue) correspondent à une participation importante d'eaux à temps de résidence élevé dans le sol. Au pic de crue, les teneurs plus faibles proviennent en partie des eaux de l'averse, qui circulent superficiellement et atteignent rapidement l'exutoire. Cet effet dilution au pic de crue concerne également la silice et le pH. Par contre, les ions aluminium, calcium, potassium, nitrate sont souvent plus concentrés lorsque le débit est plus élevé : ceci résulte de leur forte mobilité dans les eaux de circulation superficielle, influencées par la litière et l'horizon humifère. L'aluminium est alors sous forme de complexes organiques ; les anions organiques non dosés sont responsables du déficit en charges négatives de la balance ionique.

En résumé, on peut souligner le faible départ des éléments du cycle biologique, même dans les eaux qui lessivent la litière. On note également l'érosion chimique superficielle importante, qui se manifeste au pic de crue par une mise en solution quasi congruente de silice et d'aluminium. En décrue, les eaux de circulation plus ralenties, c'est-à-dire plus profondes dans le sol, mobilisent par contre moins d'aluminium que de silice, dès lors que les complexes organiques interviennent moins.

2 - Eaux saturantes interceptées sur le versant

Sur les sites B IV et B II, la variation du profil tensiométrique (potentiel total de l'eau), entre le début et la fin d'une averse (figure 6), montre que le sol se sature sur une profondeur plus importante en B II qu'en B IV. On n'a d'ailleurs jamais observé la saturation de l'horizon rouge, au-delà de 1,20 m de profondeur. Cette nappe d'eau est plus fugace dans les horizons superficiels les plus macroporeux que dans les horizons médians plus argileux et moins structurés.

Ces eaux saturantes sont recueillies à l'aide de gouttières installées sur les parois de trois fosses B IV, B II et B I, cette dernière étant située encore

plus à l'aval (figure 1). Notons que l'on prélève en B IV une eau saturante plus superficielle qu'en B II et B I (figure 2).

Afin de mettre en évidence les caractéristiques chimiques liées à l'origine des eaux prélevées, une analyse en composantes principales a été réalisée sur l'ensemble de ces eaux (figure 7 ; tableau 1). Au premier axe factoriel, représentant 32 % de l'inertie du nuage, contribuent essentiellement les variables : concentration en silice, pH, concentrations en aluminium, et en calcium dans une moindre mesure. Le long de cet axe se retrouvent, assez bien discriminées, les eaux issues des trois fosses : de B IV à B II et B I, le pH augmente (de 4,7 jusqu'à 6), les concentrations en silice et aluminium diminuent, celle en calcium augmente. Cette différenciation n'est pas liée à des circulations plus ou moins préférentielles, puisque les variables exprimant les concentrations en sodium et chlorures sont indépendantes de ce premier facteur. Rappelons en effet que ces variables rendent compte, qualitativement, du mélange de la solution préexistante dans le sol et des apports d'eaux au cours de l'averse même. Elles contribuent par contre au deuxième facteur (22 % de l'inertie).

L'évolution du pH n'est pas liée non plus à l'avancement des hydrolyses de muscovite, kaolinite ou gibbsite, lors du cheminement de l'eau de l'amont vers l'aval, puisqu'alors la silice et/ou l'aluminium seraient en concentration croissante dans la solution.

Par contre, les mesures du potentiel d'oxydo-réduction permettent d'expliquer les différences de comportement observées : elles indiquent un milieu plus réducteur pour les eaux prélevées dans les fosses aval B II et B I (Eh 200) que pour les eaux prélevées à l'amont dans B IV (Eh 350-400). Dans les premières, le fer est corrélativement plus dissous, ce qui entraîne l'augmentation du pH. La conséquence de ce pH plus élevé est une immobilisation plus importante de silice et d'aluminium. Dans les deuxièmes eaux, prélevées dans B IV, les conditions acides sont plus favorables à l'exploitation de ces éléments chimiques.

Le diagramme de la figure 8 montre que les deux familles d'eaux n'ont pas le même comportement par rapport à l'équilibre de la kaolinite : l'évolution de $\log(\text{Al}) + \log(\text{H}_4\text{SiO}_4)$ en fonction du pH ne semble pas continue entre les deux types d'eaux. On peut remarquer, aux pH supérieurs à 5, la forte variabilité de l'ordonnée. Ceci pourrait provenir de formes polymères de l'aluminium en solution.

Cette différence de comportement géochimique est liée aux conditions de circulation des eaux saturantes au niveau où elles sont prélevées : les horizons superficiels macroporeux, saturés de manière fugace, évoluent par dissolution ; les horizons plus profonds, moins structurés et à porosité plus fine, sont le siège de néoformations, ce qui accentue leur caractère argileux et

moins perméable et crée les conditions de la dynamique de l'eau caractéristique des sols de versant.

3. Comparaison entre la composition chimique des eaux s'écoulant dans le talweg et des eaux saturantes sur le versant

Des eaux ont été prélevées dans le talweg, le plus à l'amont possible. Elles sont plus acides, plus concentrées en silice et aluminium, moins concentrées en calcium que les eaux prélevées dans le même temps à l'exutoire (tableau 2). Elles sont généralement plus riches en chlorure aussi.

On a donc une évolution chimique de même sens dans le talweg de l'amont vers l'aval, et dans le sol entre les horizons superficiels et les horizons brun-jaune argileux. Cependant cette évolution reste beaucoup plus faible pour les écoulements du talweg. En particulier, le pH de l'eau à l'exutoire reste inférieur à 5. Toutes les eaux prélevées dans le talweg, de l'amont à l'exutoire, présentent des caractéristiques chimiques qui les rapprochent des eaux prélevées dans les horizons macroporeux.

IV - CONCLUSION

Les eaux s'écoulant à l'exutoire du bassin versant sont constituées principalement : au pic de crue, d'eaux de circulation superficielle et, en décrue, essentiellement d'eaux de circulation latérale dans les horizons macroporeux. Ces eaux ont un certain pouvoir érosif qui participe à l'amincissement de la couverture pédologique et à l'augmentation de la macroporosité des horizons superficiels. Dans les horizons médians, la circulation de l'eau, plus ralentie, crée les conditions favorables à la néoformation de kaolinite. Celle-ci, en diminuant la taille des pores (micro et mésoporosité) limite à son tour l'infiltration verticale de l'eau.

On confirme ainsi que cette couverture pédologique évolue à la fois :

- 1) par amincissement des horizons superficiels, en relation avec la composante latérale des flux hydriques dans le sol lors des averses,
- 2) par enfoncement dans la couverture d'altération, en relation avec la composante verticale des flux hydriques pendant et hors averse.

BIBLIOGRAPHIE

BOULET R., 1983 - Organisation des couvertures pédologiques des journées sur le projet ECEREX, mars 1983. ORSTOM, GERDAT.

FRITSCH J.-M., 1981 - Écoulement et érosion sur les bassins versants ECEREX en 1979. Bull. liaison ECEREX, n° 4, ORSTOM Cayenne, p. 23-44.

GRIMALDI C., 1988 - Origine de la composition chimique des eaux superficielles en milieu tropical humide : exemple de deux petits bassins versants sous forêt en Guyane française. Sci. géol. Bull., 41, 3-4, p. 247-262, Strasbourg.

GRIMALDI M., BOULET R., 1989 - Intérêt de la caractérisation de l'espace poral dans l'étude du fonctionnement hydrodynamique d'une couverture pédologique sur socle en Guyane française. Accepté pour publication dans les cahiers de pédologie.

GUEHL J.-M., 1984 - Dynamique de l'eau dans le sol en forêt tropicale humide guyanaise. Influence de la couverture pédologique. Ann. Sci. FOR, 41 (2), p. 195-236.

ROCHE M.-A., 1982 - Comportements hydrologiques comparés et érosion de l'écosystème forestier amazonien à ECEREX, en Guyane Cahiers ORSTOM série hydrologie, vol. XIX, n° 2 p. 81-114.

SARRAILH J.-M., 1984 - Mise en valeur de l'écosystème forestier guyanais. Opération ECEREX : résumé des premiers résultats. Bois et forêts des tropiques, n° 206, p. 13-32.

TANDY J.-C., GRIMALDI M., GRIMALDI C., TESSIER D., 1989 - Mineralogical and textural changes in French Guyana oxisoils and their relation with micro-agregation. CR congrès de micromorphologie des sols de Houston (Texas).

Tableau 1 : Tableau des trois premiers acteurs de l'analyse en composantes principales des eaux saturantes interceptées dans les fosses ; les variables sont les concentrations des éléments chimiques.

	1 # F	COR	CTR	2 # F	COR	CTR	3 # F	COR	CTR
pH	- 829	687	240	343	117	60	- 30	1	1
Al	670	448	156	- 564	318	163	- 85	7	5
Ca	- 641	411	143	64	4	2	- 294	87	60
Mg	166	28	10	- 590	348	179	- 479	229	160
K	- 323	104	36	- 311	97	50	- 709	503	351
Na	572	328	114	670	449	231	- 279	78	54
Cl	252	64	22	766	586	301	- 359	129	90
NO ₃	17	0	0	85	7	4	- 630	397	277
H ₄ SiO ₄	893	798	278	137	19	10	- 50	3	2

Tableau 2 : Comparaison de la composition chimique des eaux prélevées dans le talweg, à l'amont et à l'exutoire, à partir de quelques exemples (concentrations en mmole/l).

	Amont	Aval										
pH	4,56	4,80	4,55	4,77	4,30	4,71	4,56	4,70	4,45	4,72	4,59	4,75
Al	0,051	0,020	0,032	0,027	0,012	0,010	0,011	0,010	0,025	0,021	0,021	0,013
Ca	0,007	0,014	0,015	0,015	0,010	0,014	0,011	0,013	0,006	0,008	0,006	0,007
Mg	0,012	0,013	0,016	0,012	0,024	0,022	0,023	0,021	0,014	0,012	0,010	0,008
K	0,008	0,016	0,008	0,018	0,015	0,016	0,015	0,015	0,027	0,010	0,011	0,011
Na	0,083	0,092	0,100	0,113	0,179	0,165	0,169	0,161	0,107	0,105	0,077	0,067
Cl	0,048	0,039	0,065	0,043	0,195	0,151	0,195	0,162	0,107	0,085	0,067	0,054
NO ₃	0,015	0,007	0,011	0,012	0,013	0,019	0,014	0,019	0,026	0,023	0,027	0,020
H ₄ SiO ₄	0,018	0,009	0,027	0,016	0,025	0,016	0,025	0,018	0,027	0,025	0,014	0,011

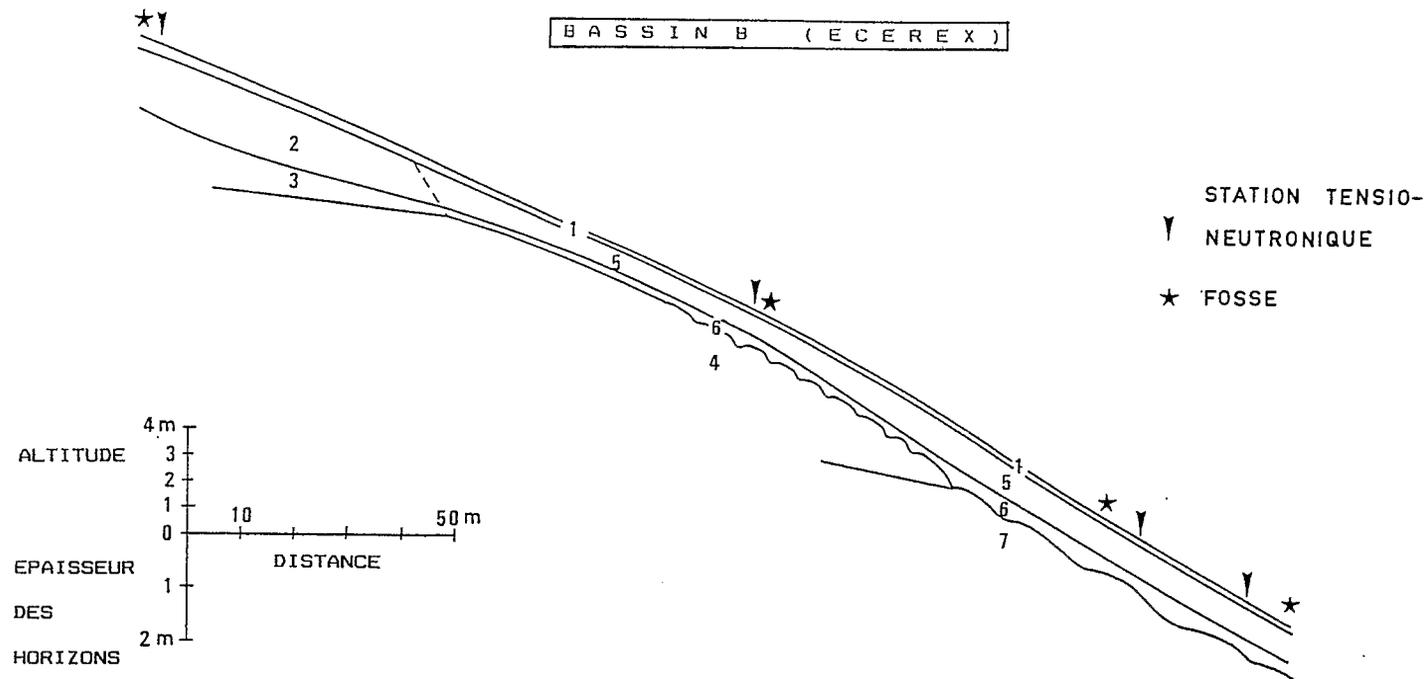


Figure 1

- a) Organisation en coupe de la couverture pédologique sur un versant du bassin ECEREX "B".
- b) localisation des fosses (prélèvement d'échantillons à structure non remaniée et recueil d'eau saturante) et des stations tensio-neutroniques.
- 1 : horizon humifère, brun grisâtre, sablo-argileux, poreux.
 - 2 : horizon brun-jaune, argileux, microagrégé, riche en nodules ferrugineux et gibbsitiques.
 - 3 : horizon jaune rougeâtre, argileux, microagrégé (moins que 2), riche en nodules ferrugineux.
 - 4 : horizon rouge, argileux, à volumes lithorelictuels rouge violacé, à structure polyédrique anguleuse, à porosité visible (tubules et fissures) faible, peu perméable.
 - 5 : ensemble d'horizons brun-jaune, argilo-sableux au sommet, argileux à la base, à structure polyédrique fine, macroporeux, riche en nodules ferrugineux.
 - 6 : horizon brun jaune vif, avec un réseau rouge plus développé à l'aval, argileux, structure polyédrique, à porosité visible faible.
 - 7 : horizon rouge violacé, sériciteux, limono-sablo-argileux, à structure massive, à porosité visible nulle.

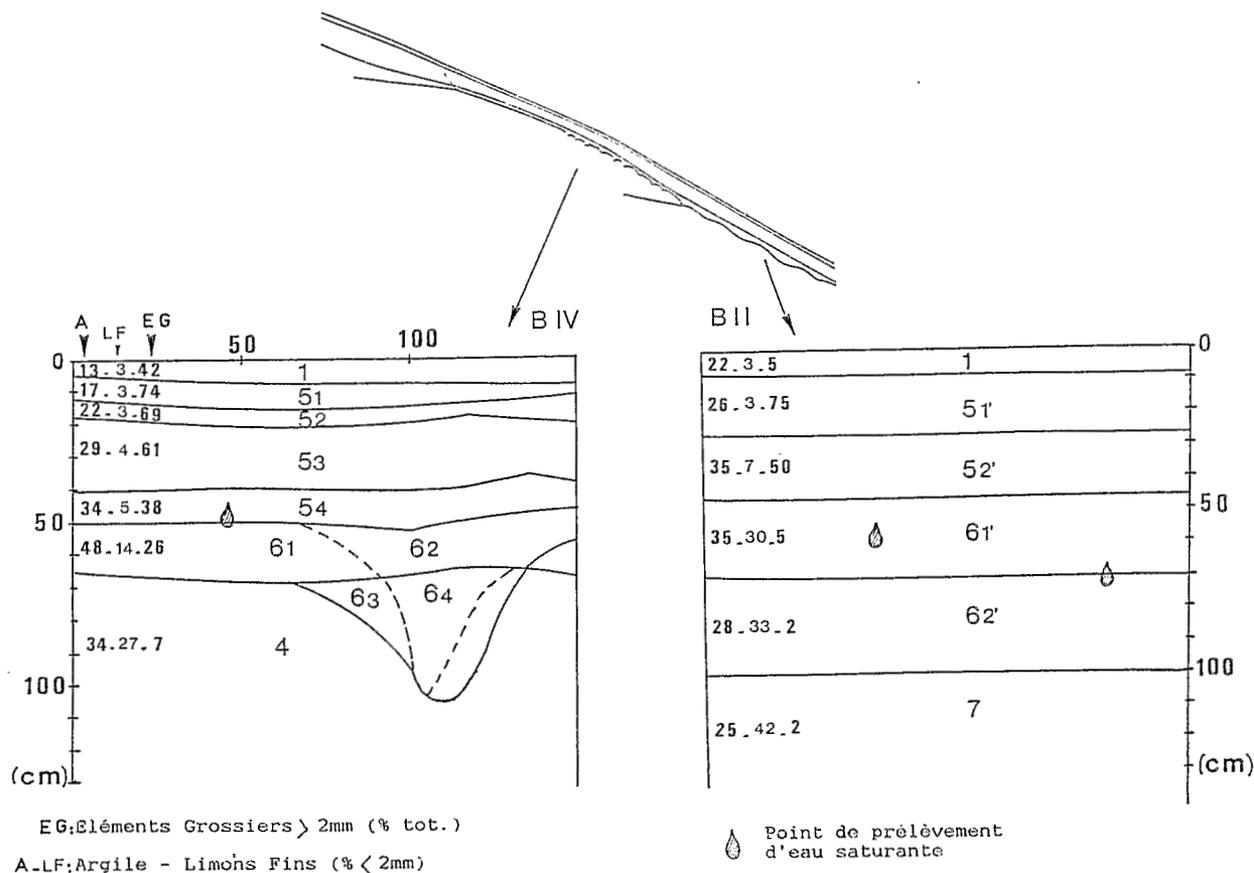


Figure 2 : Deux profils pédologiques du versant : B II, B IV (description morphologique en annexe I). Variation de la couleur (charte Munsell), de la teneur en éléments grossiers (nodules et volumes lithorelictuels indurés) et, rapportées à la terre fine, des teneurs en argile et en limons fins.

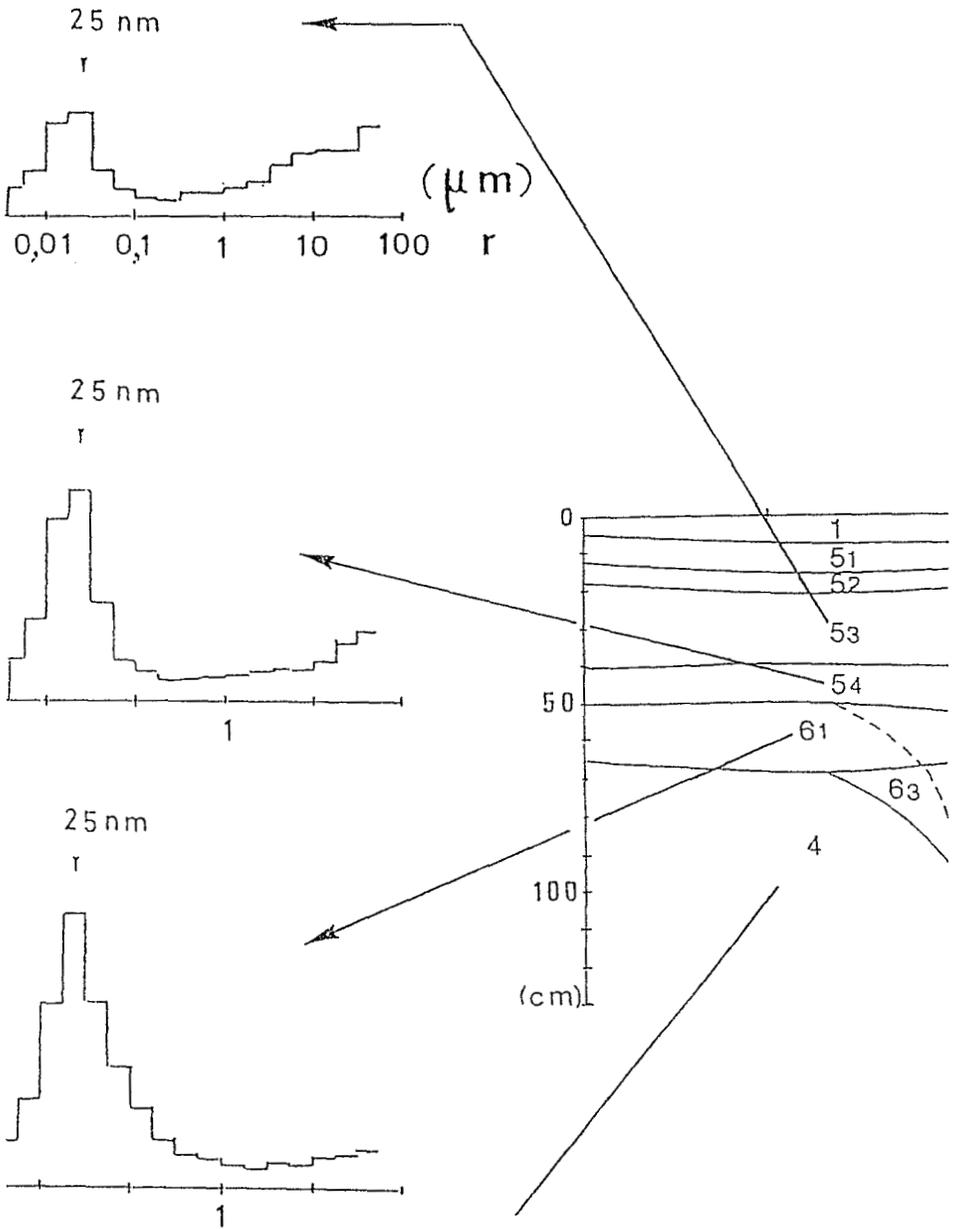


Figure 3 : Variation du spectre poral sur le profil B IV.

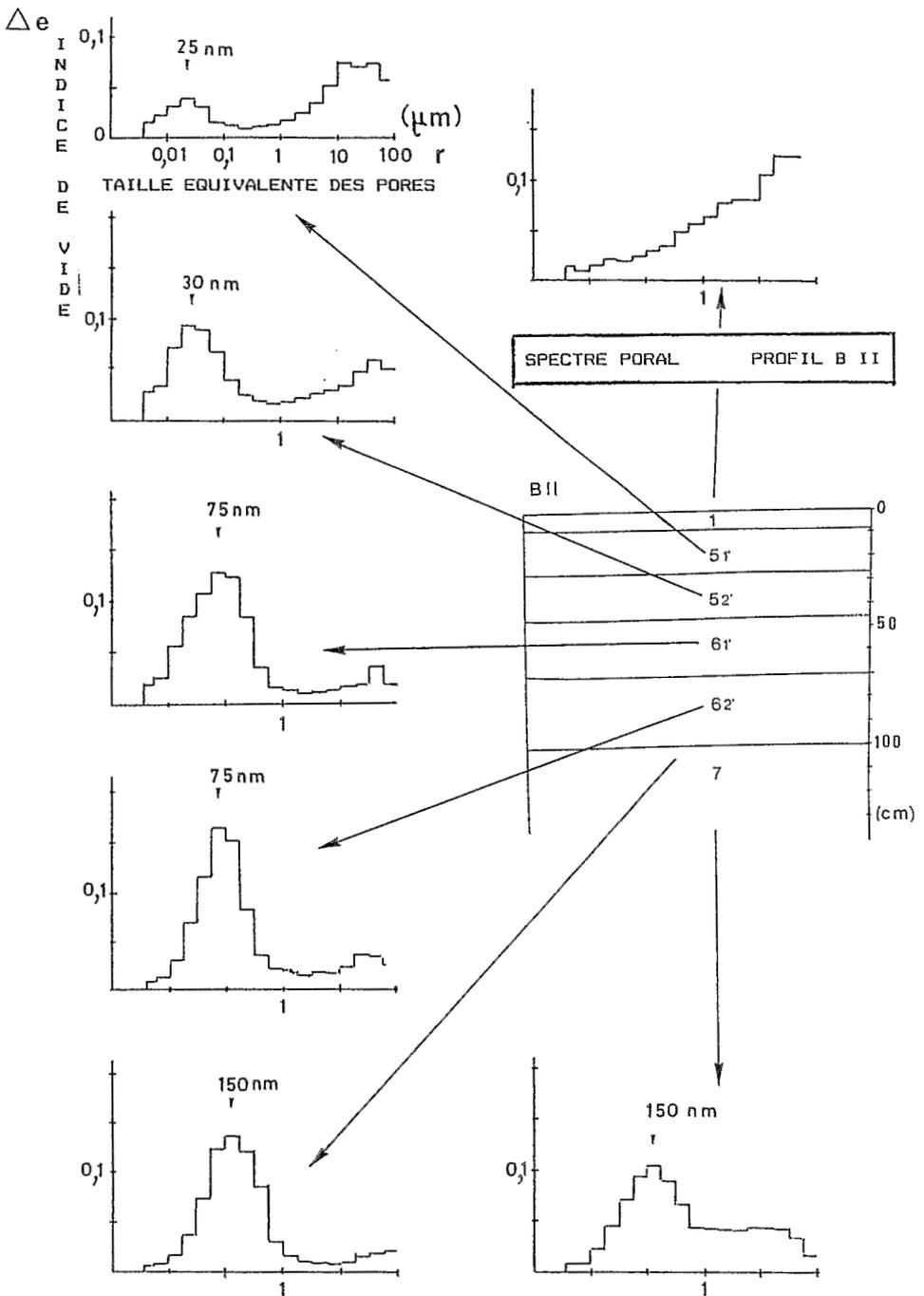


Figure 4 : Variation du spectre poral sur le profil B II.

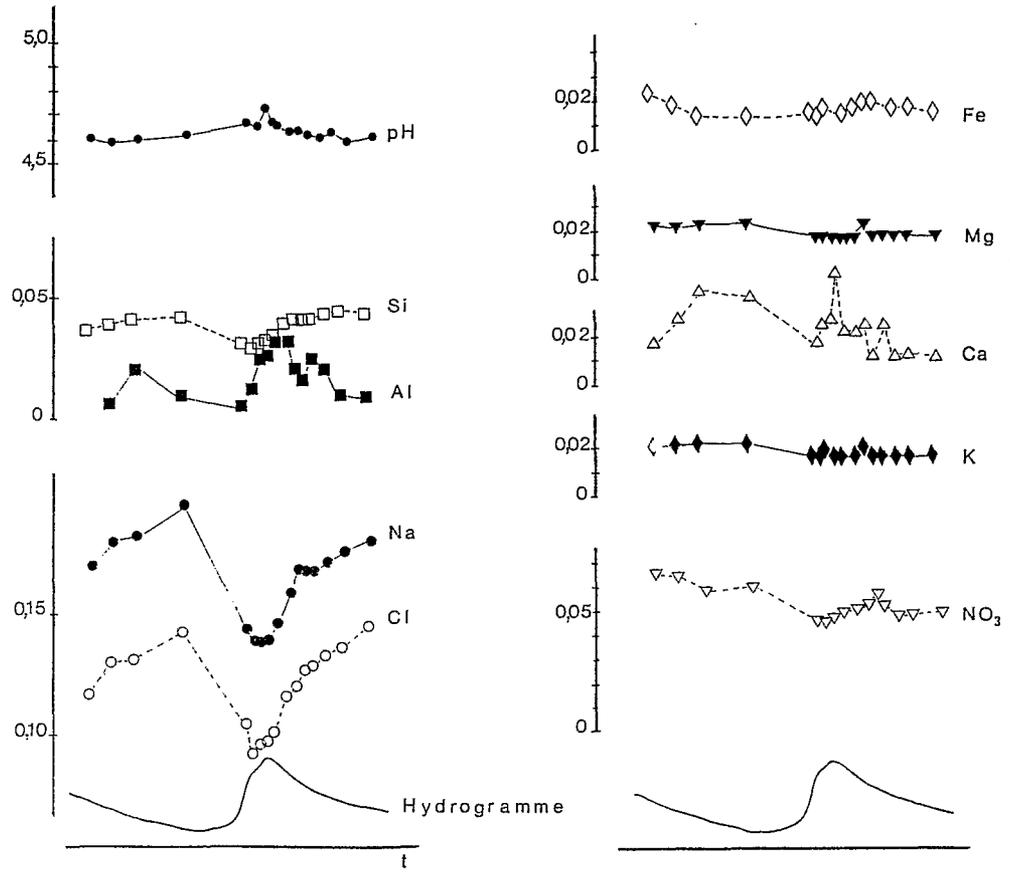
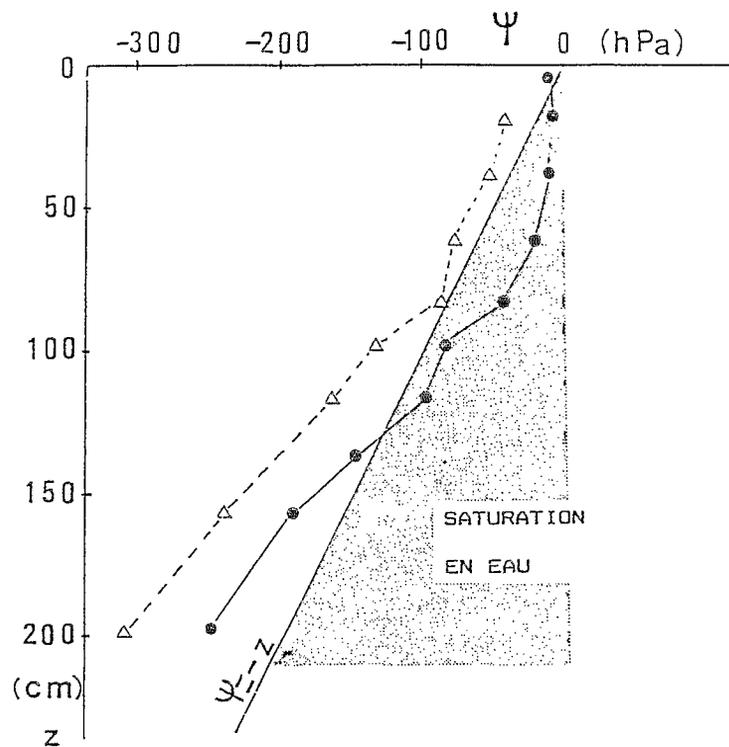
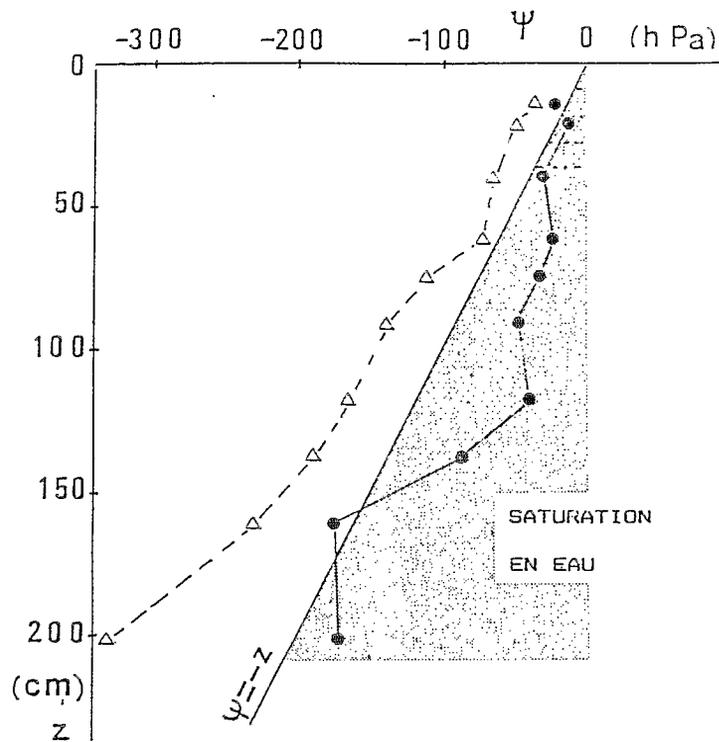


Figure 5 : Exemple de crue à l'exutoire du bassin B ; évolution de la composition chimique de l'eau (concentrations en mmole/l).



B IV



B II

△ hors averse

● fin d'averse

Figure 6 : Au cours d'une période pluvieuse, profils tensiométriques hors averse et en fin d'averse (décrue) sur les stations B II et B IV.

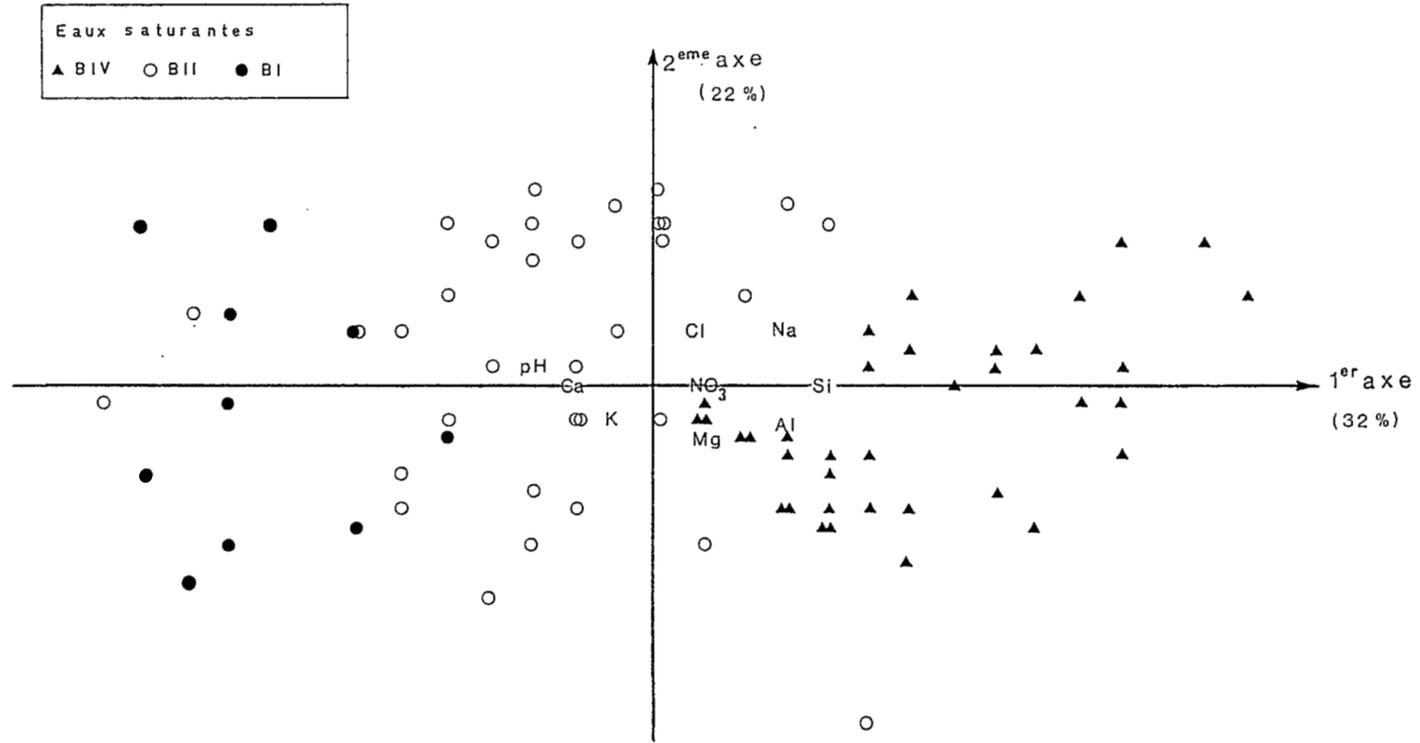


Figure 7 : Premier plan factoriel de l'analyse en composantes principales de la composition chimique des eaux saturantes prélevées sur le versant.

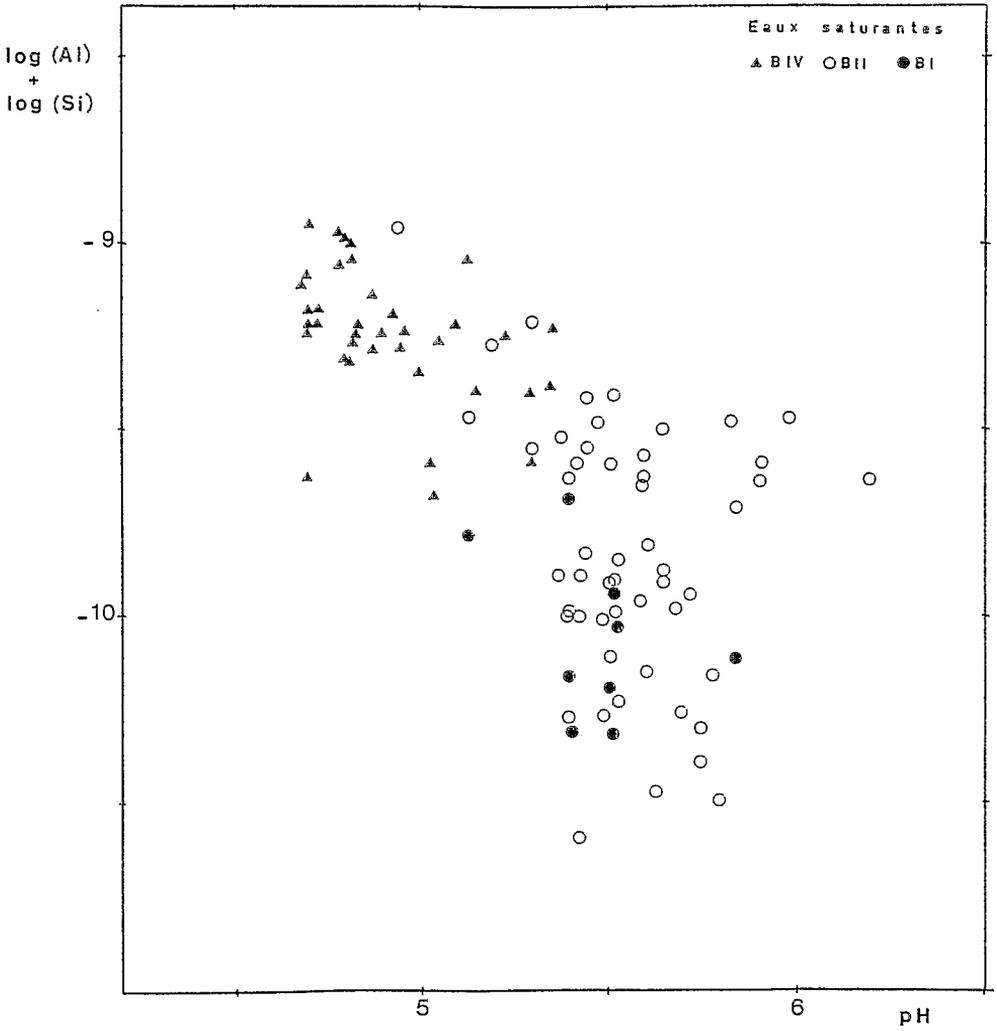


Figure 8 : Place des eaux dans le diagramme de solubilité de la kaolinite.

Annexe I : Description morphologique des profils B II et B IV

* Profil B II

- 1 : humifère ; brun grisâtre (10YR4/4) avec quelques nodules lithorelictuels violacés à micas et cuticule brune ; argilo-sableux ; racines horizontales très abondantes.
- 5-1 : très riche en nodules lithorelictuels centimétriques, à cuticule brun noirâtre lisse, associés à une terre fine brun jaunâtre (10YR5/5) et sablo-argileuse ; macroporeux ; racines assez nombreuses.
- 5-2' : brun jaunâtre vif (10YR6/7) ; nodules moins nombreux et à cuticule plus mince ; argileux ; macroporeux ; racines assez nombreuses.
- 6-1' : brun jaune vif (7,5YR6/8) devenant plus rouge vers le bas (apparition de volumes rouges et de volumes lithorelictuels meubles rouge violacé) ; argileux ; structure polyédrique ; porosité visible faible ; rares racines.
- 6-2' : brun jaune clair (10YR7/6) avec une phase rouge (2,5YR4/8) plus importante que dans 6-1' ; limono-sablo-argileux (riche en micas fins) ; structure massive à débit polyédrique ; peu de pores visibles.
- 7 : rouge violacé (2,5YR3/6) ; sériciteux ; limono-sablo-argileux ; structure massive ; porosité visible nulle ; volumes ferruginisés riches en micas et quartz grossiers.

* Profil B IV

- 1 : brun grisâtre foncé (10YR3,5/3) ; sablo-argileux ; structure polyédrique fine et grumeleuse ; porosité d'assemblage très forte ; racines très abondantes.
- 5-1 : brun jaunâtre (10YR4/4) ; argilo-sableux ; nodules nombreux assez pauvres en squelette, à section rouge violacé, avec cuticule brun noirâtre et petits micas blancs ; structure polyédrique fine ; porosité élevée ; racines nombreuses.
- 5-2 : brun jaune (entre 10YR et 2,5Y5/6) ; sablo-argileux ; forte concentration nodulaire (nodules jointifs) ; structure polyédrique ; porosité difficile à apprécier ; racines assez nombreuses.
- 5-3 : brun-jaune (10YR5/6) ; argilo-sableux ; nodules de taille variable (millimétriques ou plus gros) et non jointifs ; structure polyédrique ; macroporosité tubulaire et fissurale ; racines peu nombreuses.
- 5-4 : brun-jaune légèrement plus rouge que 5-3 (10YR6/6) ; argileux ; nodules moins abondants et plus tendres ; structure polyédrique ; pores tubulaires millimétriques et fissures bien développés ; quelques racines.
- 6-1 : transition vers 4 ; brun vif (7,5YR5/8) ; argileux ; petits nodules tendres rouge violacé ; structure polyédrique ; porosité visible faible ; bien humecté ; racines rares.

- 6-2 : brun jaune (entre 10 et 7,5YR5/8) ; argileux ; quelques nodules ; structure polyédrique peu nette ; porosité visible tubulaire faible ; peu de racines.
- 6-3 : transition vers 4 par interpénétration de brun jaune et de rouge ; argileux ; plus humecté (au toucher) que 4.
- 6-4 : brun vif (7,5YR6/8) avec volumes rouge violacé demi-centimétrique à peine indurés ; argileux ; structure polyédrique avec les faces des agrégats lisses ; porosité visible faible.
- 4 : rouge (2,5YR5/8) avec petits volumes jaunes peu contrastés et volumes rouge violacé à petits micas, peu indurés ; argileux ; structure polyédrique anguleuse bien développée, les faces des agrégats étant lisses ; sec au toucher ; peu de pores visibles ; pas de racines.