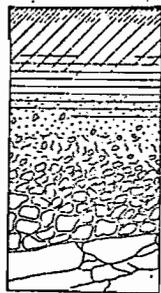


BOA DANIEL

**CARACTERISTIQUES HYDRIQUES DES
GRAVILLONS FERRUGINEUX DANS LES
SOLS FERRALLITIQUES**



OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE - MER

CENTRE D'ADIOPODOUMÉ - CÔTE D'IVOIRE

B.P.V 51 - ABIDJAN



Octobre 1983

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER
CENTRE D'ADIOPODOUME
BP. V-51, ABIDJAN (Côte d'Ivoire)

Laboratoire de Pédologie

CARACTÉRISTIQUES HYDRIQUES DES GRAVILLONS FERRUGINEUX
DANS LES SOLS FERRALLITIQUES

par

BOA Daniel

S O M M A I R E

	Pages
INTRODUCTION	1
LES MATÉRIAUX PEDOLOGIQUES	1
1. LA TYPOLOGIE DES GRAVILLONS	1
2. LES PROFILS ETUDIÉS	3
2.1. Généralités	3
2.2. Descriptions	3
3. COMPOSITION DES HORIZONS GRAVILLONNAIRES ETUDIÉS	6
MÉTHODOLOGIE - RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX	8
1. APPROCHE GÉNÉRALE	8
2. LA POROSITÉ TOTALE DES GRAVILLONS	8
2.1. Densité réelle	9
2.2. Densité apparente	11
2.3. Porosité totale	14
3. POROSITÉ OUVERTE	14
3.1. Généralités de l'approche	14
3.2. Humectation sous pression réduite	17
3.2.1. Méthodologie	17
3.2.2. Les résultats	17
3.3. Humectation à la pression atmosphérique	21
3.3.1. Méthodologie	21
3.3.2. Les résultats	21
3.4. Porosité ouverte - Porosité fermée	21
3.4.1. Porosité ouverte	23
3.4.2. Porosité fermée	23
4. ECHANGE D'EAU DU MATÉRIAU FIN VERS LES GRAVILLONS	26
4.1. Méthodologie	26
4.2. Les résultats	30
4.2.1. Indications générales	30
4.2.2. Significations des résultats	30
5. RESTITUTION DE L'EAU DES GRAVILLONS A LA FRACTION FINE	39
5.1. Méthodologie	39
5.2. Significations des résultats	43
CONCLUSION	47
BIBLIOGRAPHIE	49

INTRODUCTION

Les sols ferrallitiques comme nombre des sols des régions intertropicales renferment deux catégories principales d'éléments grossiers (taille supérieure à 2 mm) : d'une part ceux qui sont uniquement constitués de quartz et d'autre part, les éléments ferrugineux (concrétions pseudo-concrétions, nodules, noyaux indurés, débris plus ou moins ferruginisés de roche altérée, etc..) dont LEVÊQUE (1970) a défini dix types différents dans les sols du Togo. Pour la commodité d'expression, les éléments grossiers de cette seconde catégorie seront indifféremment dénommés gravillons lorsque ne se manifesterait pas la nécessité d'explicitier leur nature respective. De simples tests de terrain (dépôt de gouttes d'eau à leur surface, par exemple) montrent à la différence de la plupart des quartz grossiers, que ces gravillons présentent fréquemment une porosité ouverte non négligeable. Dans certains cas, la porosité ne se manifeste, d'une façon sensible, que sur les faces de cassure : il s'agit alors de gravillons présentant une cuticule dense occluant l'ensemble des pores. Au total, les volumes que constituent les gravillons paraissent pouvoir, dans de nombreux cas, présenter des possibilités d'échange de fluides et plus spécialement d'eau entre eux-mêmes et la matrice de l'horizon dont ils font partie. Il importe donc, dans l'étude de l'hydrodynamique des sols, de préciser leur rôle. Cet objectif se justifie d'autant plus que ces éléments grossiers représentent fréquemment une proportion majoritaire dans la partie du profil explorée par les racines. C'est la raison pour laquelle, après que leurs caractéristiques de porosité eurent été déterminées, une série de manipulations expérimentales fut effectuée, prenant en compte leur nature et celle de la terre fine en se fondant essentiellement sur les échanges hydriques réciproques des deux matériaux.

LES MATÉRIAUX PÉDOLOGIQUES

1. LA TYPOLOGIE DES GRAVILLONS

Plusieurs études, notamment celles de LEVÊQUE (1970, 1975) FAURE (1978), LE PRUN (1973) ESCHENBRENNER (1970) et de KALOGA (1976) ont contribué à la détermination, la définition et la dénomination de divers types d'éléments ferrugineux grossiers. Pour différencier ceux qui ont fait l'objet de la présente étude, référence sera faite ici à la nomenclature proposée par le premier auteur cité. Bien que son étude ait porté sur les seuls sols du Togo, il est apparu que les diverses catégories d'éléments grossiers ferrugineux récoltés en Côte d'Ivoire pour cette étude peuvent se situer facilement dans la gamme observée dans le premier pays. Cette gamme comporte les catégories suivantes :

I. Masses indurées : de formes nodulaires, sans dépôts superficiels concentriques, de couleur rouge plus ou moins sombre (à brunâtre-grisâtre quand elles se trouvent dans les horizons humifères).

I.a. : de formes assez régulières ou régulières, polyédriques adoucies à subsphériques ou subovoïdes plus ou moins mamelonnées, à patine superficielle, très modérément développée en général.

I.b. : mêmes caractéristiques que les précédentes, mais sans patine, un peu plus poreuses et de formes légèrement moins régulières.

I.c. : de formes régulières ou moins fréquemment anguleuses, parfois scoriacées, présentant des rentrants et pratiquement dépourvues de patine. Ce sont celles qui atteignent avec les types V et VI les dimensions maximales (jusqu'à 35 mm).

II. Concrétions * semi-pisolithiques, ovoïdes de formes plus ou moins régulières et parfois franchement sphériques, formées par la croissance d'une petite masse indurée, recouverte de dépôts successifs concentriques de sesquioxides de fer. Les concrétions pisolithiques vraies, formées presque uniquement

* Ici, le terme de "concrétion" ne comporte aucune acception génétique et se trouve utilisé pour une commodité d'expression.

de dépôts concentriques autour d'un germe ou nucléus de proportion négligeable, sont très rares.

II.a. : à patine superficielle (dans la majorité des cas brun foncé à noirâtre, plus rarement rouge ou brun-rouge). Elles sont, fréquemment, de petites tailles (inférieures à 7 mm) et présentent alors l'aspect de plomb de chasse. Elles ne se raient pas avec l'ongle et ne laissent aucune trace lorsqu'on les frotte sur un support rugueux.

II.b. : sans patine superficielle, de couleur beige-ocre à ocre-jaune dont le grattage superficiel fournit une poudre d'aspect argileux. Elles sont fréquemment plus volumineuses que les précédentes et peuvent atteindre 3 cm dans leur plus grande dimension.

III. Concrétions composites, formées de concrétions de petites tailles, appartenant aux types précédents (mais dans la majorité des cas, semi-pisolitiques et plus ou moins noyés dans un ciment ferrugineux, de teintes généralement plus claires. Il existe des termes de passage entre ce type morphologique et la carapace mais la gamme de variation aboutit par ailleurs fréquemment à des éléments bien individualisés, le ciment noyant alors complètement les concrétions primitives, d'où leur aspect boursofflé.

IV. Concrétions de formes moyennement irrégulières, tendres, poreuses, sans structure concentrique, ni patine superficielle, simples masses imparfaitement indurées, renfermant parfois des minéraux primaires altérables. Elles sont généralement jaunâtre ou rose.

V. Pseudo-concrétions : fragments de roche-mère altérée plus ou moins enrichis et (ou) enrobés de sesquioxides de fer. Elles se raient facilement avec l'ongle. Au toucher, elles sont salissantes et peuvent s'effriter entre les doigts.

VI. Concrétions de formes irrégulières, sans patine, à aspect rugueux dû au pointement hors de la masse de grains ou de petits graviers de quartz (anguleux ou émoussés) ou dans certains cas de feldspath. Leurs couleurs sont, en général, plus claires que celles des types précédents mais peuvent prendre des nuances grisâtres plus ou moins affirmés dans les horizons humifères. Elles se raient également avec l'ongle, mais un peu plus difficilement à cause des grains de quartz.

VII. Concrétions de formes régulières, dans la plupart des cas "en dragées", souvent de dureté plus forte que celle des types précédents et de couleur rouge-sombre à rouge violacé. Leur morphologie résulte manifestement d'un émoussement mécanique d'éléments de formes originelles plus irrégulières.

La plupart de ces catégories d'éléments ferrugineux grossiers est observée en Côte d'Ivoire. Notons toutefois que dans ce pays, 80 à 90 % de la surface sont couverts de sols ferrallitiques. Il existe donc, en la matière, une grande différence avec le Togo où la pédogenèse est nettement plus variée et les fréquences respectives de ces divers types de nodules ou concrétions sont loin d'être identiques. C'est ainsi que certains types de gravillons n'ont pu être récoltés en quantité suffisante pour les manipulations. Il s'agit essentiellement des catégories I, IIb, III, IV, VII.

Il est à signaler, au passage, que les caractéristiques des gravillons varient selon l'horizon concerné dans un même profil. C'est à propos de leur abondance, de leur forme et de leur granulométrie mais c'est dans le domaine de la couleur que cette variation est la plus sensible et notamment entre les horizons humifères et les horizons minéraux. Ce changement de couleur des éléments grossiers ferrugineux dans les horizons humifères sera dénommé, dans ce rapport, par le terme "brunification" pour le distinguer de la patine qui, à l'échelle microscopique, se traduit par l'existence d'une couche superficielle plus ou moins épaisse (ou cuticule) formée essentiellement de sesquioxyde de fer en dépôts concentriques ou non.

En résumé, la brunification résulte d'une imprégnation de produits vraisemblablement organiques et la patine, d'une précipitation de sesquioxides de fer à la surface des gravillons.

La brunification (dans le même sens que la présence d'une patine) exerce, on le verra plus loin, une action défavorable sur les mouvements de l'eau entre les gravillons et la matrice. Il est très vraisemblable que ce fait découle de la croissance de la tension superficielle due à la matière organique, responsable de cette brunification. Comme on peut le constater plus haut, des subdivisions de grands groupes de gravillons ont été définies en tenant compte, entre autres, de la présence ou non de patine : Ia ou Ib, IIa ou IIb. Dans le même esprit, la brunification fera, pour sa part, l'objet d'une attention soutenue. Les gravillons brunifiés seront également désignés par le symbole prime ('),

par exemple V' pour les pseudo-concrétions brunifiées. Aux catégories de gravillons précitées s'ajouteront donc les types V' et VI'. Au total, les manipulations concernent cinq ensembles d'éléments grossiers ferrugineux : les concrétions semi-pisolitiques patinées (IIa), les pseudo-concrétions simples (V) ou brunifiées (V') et les concrétions à aspect rugueux simples (VI) ou brunifiées (VI'). Ces divers types de gravillons présentant par ailleurs, une gamme de taille variée.

2. LES PROFILS ETUDIES

2.1. Généralités

La recherche des gravillons de différentes natures a donné lieu à une prospection dans diverses régions de la Côte d'Ivoire. Celles-ci seront mentionnées par le nom de la localité la plus proche : Sikensi, Tiassalé et Niellé. Les trois premières lettres du nom de chaque région désignera les profils. Les descriptions seront précédées d'un aperçu général du climat, de la géologie et de la végétation concernant chaque zone.

La classification des sols est fondée sur les travaux de la commission de pédologie et de la classification des sols (C.P.C.S., édition 1967) et sur les aménagements apportés par les pédologues de l'ORSTOM travaillant dans les pays tropicaux et plus particulièrement en Côte d'Ivoire (PERRAUD, 1968, de BOISSEZON, 1969), (ESCHENBRENNER, BADARELLO, 1978). Cependant, pour la présente étude, il convient d'apporter quelques précisions quand au sous-groupe remanié. Toutes les études menées en Côte d'Ivoire, et plus généralement en Afrique de l'Ouest, indiquent que le remaniement constitue le phénomène secondaire dominant, pratiquement généralisé. Il se caractérise dans les profils par la présence d'une nappe de gravats plus ou moins développée. Celle-ci est constituée, pour l'essentiel, de gravillons ferrugineux de natures diverses (masses indurées, concrétions semi-pisolitiques, pseudo-concrétions, etc.) et également par des fragments de roches ou de minéraux non ou peu altérables (essentiellement de quartz ferruginisé ou non). En se fondant uniquement sur la classification précitée, les sols caractérisés par un puissant et intense concrétionnement appartiennent tous à la même catégorie de sols : sols ferrallitiques remaniés sans autres indications concernant la nature des éléments grossiers, indicé caractéristique de remaniement. Or, si certaines catégories de gravillons présentent une large répartition géographique, on peut toutefois noter, d'une façon générale, que dans l'ensemble, les échantillons issus d'une même région naturelle présentent un type dominant : les concrétions semi-pisolitiques (II) à Sikensi, les pseudo-concrétions (V) à Tiassalé, les concrétions imparfaitement indurées (IV) et les concrétions à aspect rugueux (VI) à Niellé.

Les remarques qui précèdent prennent tout leur sens si l'on se reporte à ce que laissent pressentir les caractères morphologiques des gravillons quant à leur comportement vis-à-vis de l'eau. Autrement dit, toute estimation de l'hydrodynamique des sols, facteur important de leurs potentialités agronomiques, doit en première approche, se fonder sur la nature de ces éléments grossiers au même titre que sur d'autres paramètres plus couramment usités. Il convient donc, ici, de différencier les sols remaniés en tenant compte du type d'élément grossier dominant ; par exemple, à Tiassalé, on parlera de sols remaniés à pseudo-concrétions, de sols remaniés à concrétions semi-pisolitiques à Sikensi, de sols remaniés à concrétions à aspect rugueux à Niellé, etc... Dans la classification des sols ferrallitiques, cette information concernant le ou les types d'éléments grossiers paraît présenter une importance certaine dans la mesure où, et la suite le confirmera, les divers types morphologiques des gravillons présentent des valeurs assez étroitement spécifiques, pour leur porosité et particulièrement pour leur porosité ouverte.

2.2. Description des profils

REGION DE SIKENSI

Le climat de la région de Sikensi est caractérisé par deux saisons sèches dont la plus longue s'étend de novembre à février. Le déficit hydrique annuel moyen est compris entre 200 à 300 mm et la pluviométrie annuelle, entre 1.200 à 1.600 mm en moyenne.

La végétation naturelle est une forêt dense humide semi-décidue caractérisée par la chute quasi-simultanée de feuilles des grands arbres, les espèces des strates inférieures sont sempervirentes.

Le profil étudié (SI K₁) est développé sur la partie supérieure d'un versant long de 1,2 km, légèrement convexe sur sa partie supérieure et faiblement concave à rectiligne sur sa partie basse jusqu'au talweg. Il se raccorde au bas-fond par une courte section peu concave.

SI K₁

- 0 - 15 cm : A₁ brun-rougeâtre très foncé (10 YR 3/2), humide ; éléments grossiers estimés entre 15 à 20 % : très petites concrétions semi-pisolitiques noirâtres, patinées, de quelques millimètres, accompagnées de masses indurées, de quelques pseudo-concrétions et de quartz anguleux rarement émoussés ; la texture est sablo-limoneuse ; la structure est massive à tendance particulaire ; très friable ; très poreux, nombreuses radicelles et racines ; transition graduelle.
- 15 - 73 cm : A₁₋₂ fe ; brun-grisâtre (10 YR 4/2), humide ; éléments grossiers très abondants en profondeur (60 %) ; les éléments ferrugineux sont de même type que les précédents. Par contre, la taille des quartz est plus élevée, pouvant atteindre 15 à 20 mm ; la terre fine est sablo-limoneuse ; la structure est massive à éclats anguleux ou à tendance particulaire, friable, poreux ; quelques racines ; transition nette pour la couleur et diffuse pour les éléments grossiers.
- 73 - 125 cm : B fe ; rouge-jaunâtre (5 YR 5/8), humide ; éléments grossiers toujours très abondants : 70 % ; les masses indurées et les pseudo-concrétions semblent moins abondantes que les concrétions semi-pisolitiques ; la taille des quartz est identique à celle que l'on observe dans l'horizon précédent ; la fraction fine est argilo-sableuse ; la structure est massive à tendance polyédrique fine.

Ce profil se caractérise donc par la présence d'un niveau gravillonnaire et graveleux dont l'épaisseur dépasse le mètre. On note par ailleurs un gradient textural très net, les premiers 70 cm étant très pauvres en argile. La pédogenèse de ce profil est fortement marquée par le remaniement et l'appauvrissement ; ce qui permet de le ranger dans les sols ferrallitiques remaniés-appauvris, à concrétions semi-pisolitiques sur schistes quartziques.

Dans ce profil ont été prélevés les échantillons S₁, S₂ et S₃ aux profondeurs respectives suivantes : 10-20 cm, 40 à 60 cm, 100 à 120 cm.

REGION DE TIASSALE

Le climat et la végétation naturelle présente les mêmes caractéristiques que celles de Sikensi. Par contre, le soubassement géologique est constitué de schistes sériciteux du birrimien.

Le profil étudié (TIA₂) se situe à mi-pente d'un versant dont le sommet est faiblement convexe. Sa longueur ne dépasse pas 600 m.

Les principaux caractères morphologiques de ce profil sont les suivants :

- 0 - 5 cm : A₁₁, brun foncé (10 YR 3/4) humide ; pas d'éléments grossiers ; sablo-argileux ; structure massive à tendance particulaire localement grumeleuse de taille moyenne, peu nette ; horizon très friable, poreux ; nombreuses racines et radicelles ; transition distincte.
- 5 - 22 cm : A₁₂ brun foncé (7,5 YR 4/4) humide ; très peu d'éléments grossiers (3 %) à dominance de pseudo-concrétions de couleur brun-rouge, accompagnées de petits quartz hyalins ; structure massive à tendance nuciforme ; horizon friable et poreux ; racines nombreuses ; transition graduelle irrégulière.
- 22 - 120 cm : B fe ; rouge (10 R 4/6), humide ; forte concentration ferrugineuse (60 à 80 %), composée de masses indurées et surtout de pseudo-concrétions de couleur rouge, de grande taille (2-4 cm) avec présence de quartz anguleux rarement émoussés, la matrice est argileuse ; la structure est polyédrique, de taille fine ou moyenne ; cohésion d'ensemble : forte ; poreux. Quelques racines.

Ce profil se caractérise par l'existence d'un recouvrement de matériau fin, d'un niveau gravillonnaire, composé principalement de pseudo-concrétions, apparaissant dès 20 cm environ de la surface. A la différence du profil précédent (SI K₁) la texture argilo-sableuse en surface devient rapidement argileuse à très argileuse en profondeur. La structure massive, localement grumeleuse dans les horizons humifères, passe à polyédrique très fine et nette dans les horizons minéraux. Les caractéristiques morphologiques de ce profil permettent de le ranger parmi les sols ferrallitiques remaniés, modaux, à pseudo-concrétions sur schistes sériciteux.

Les échantillons T₁ (10-20 cm), T₂ (40-60 cm), T₃ (100-120 cm) furent prélevés dans ce profil.

REGION DE NIELLE

La région de Niellé appartient au domaine soudanais. Dans ce secteur, le climat est caractérisé par une seule saison sèche qui s'étend d'octobre à mai avec un déficit hydrique cumulé moyen de 750 à 800 mm.

De plus, l'harmattan, vent chaud et sec du Nord-Est, est responsable de la baisse brutale de l'humidité relative au cours de la saison sèche. La pluviométrie moyenne annuelle varie entre 1.300 à 1.400 mm.

Le soubassement est constitué de granites hétérogènes plus ou moins riches en biotite.

Le couvert végétal naturel est une savane dont les proportions respectives d'arbres et d'arbustes sont très variables.

Deux profils furent étudiés dans cette région. Les caractères morphologiques principaux du premier d'entre eux NIE₁ (L. 1342)* observé au quart inférieur d'un versant sont les suivants.

- 0 - 12 cm : A₁ Ap ; brun tendant à ocre, 8 % de nodules durs de formes moyennement régulières et de taille généralement comprise entre 7 à 13 mm, peu patinés ; la texture est sableuse ; structure massive à débit en micragrégats et en unités nuciformes atteignant 4 à 5 cm ; très friable ; très nombreuses à nombreuses racines, très meuble ; microporosité abondante ; passage en 2 cm.
- 12 - 19 cm : A₁-A₂ fe ; ocre sol à beige-brun ; 60 à 64 % de gravillons dont le tiers présente une dimension maximum inférieure à 8-9 mm et les deux tiers atteignant 30 mm, de formes assez régulières ou régulières et non patinés ; sableux ; structure massive particulière à tendance bouillante nette ; assez nombreuses à nombreuses racines ; meuble ; passage en 1-1,5 cm.
- 19 - 45 cm : A₂ fe ; rosâtre-ocre ; 70-75 % de nodules identiques aux précédents s'agglomérant, en partie, en ensembles atteignant 40 mm ; sablo faiblement argileux, structure massive à tendance particulière avec de moyennement nombreux microagrégats et de petites unités nuciformes inférieures à 7 mm au débit ; meuble ; racines peu nombreuses, micro-porosité assez abondante, passage en 3-4 cm.
- 45 - 110 cm : B₂ fe ; rose légèrement rose avec des zones de petite taille, de couleur rouge brique, peu meubles atteignant 15 à 20 mm de dimension maximum et accompagné de grains blanchâtres (altération de feldspath) ; 30 % de nodules identiques à ceux des horizons précédents, mais de dimension maxima inférieure à 18 mm et accompagnés de très petits graviers de quartz ; la matrice est argilo-sableuse ; structure massive à débit en éclats, de morphologie intergrade d'unités nuci-polyédrique et pouvant atteindre 60 mm ; l'ensemble de l'horizon est meuble à l'état humide ; microporosité très moyennement abondante ; racines rares puis très rares.

Ce profil est caractérisé par un niveau gravillonnaire très proche de la surface et par un net gradient textural positif jusqu'à une profondeur de 50 cm environ. Ce sol appartient donc à la classe des sols ferrallitiques remanié-appauvri, à concrétions imparfaitement indurées (IV) sur granite.

L'échantillon, NB₂, a été prélevé dans ce profil entre 50 à 100 cm de profondeur.

Le second profil, NIE₂ (L. 1.340), étudié dans la région de Niellé est développé en bas de pente d'un assez long versant. Ses principaux caractères morphologiques sont les suivants.

- 0 - 10 cm : A₁ Ap ; brun moyennement soutenu, pratiquement sans éléments grossiers, sableux à sables grossiers ; structure massive particulière à débit en microagrégats et en quelques éclats excessivement fragiles ; microporosité abondante, très nombreuses racines ; passage en 3 cm.
- 10 - 22 cm : A₁ - 2 ; ocre sol tendant à brun-beige 2 à 3 % de nodules durs, de formes assez régulières, texture sableuse ; même structure que l'horizon sus-jacent mais sans éclats ; racines moyennement nombreuses ; passage en 2-3 cm.
- 22 - 35 cm : A₂ fe ; ocre sale à ocre-rosâtre, 65 à 68 % de nodules de tailles inférieures à 20 mm pour environ 50 % d'entre eux, durs et de formes plus irrégulières pour les plus gros que pour les plus petits ; texture sableuse ; structure massive - particulière à débit en microagrégats nombreux excessivement fragiles ; nombreuses racines de diamètre moyen ; passage en 2-5 cm.
- 35 - 75 cm : B₂ t, sur fond rose-ocre assez bien représenté s'individualisent de petites zones rouge ou jaune-rose clair légèrement beige ou plus accessoirement brun peu soutenu à légèrement beige (humifères) ; 28 à 30 % de gravillons durs de formes assez régulières et de taille inférieures à 7 mm, la texture sablo-argileuse au sommet de l'horizon passe progressivement à argileuse à la base ; structure massive à débit intergrade entre des unités nuci-polyédriques et de simples éclats atteignant 45 mm dans leur plus grande dimension ; l'horizon est assez à moyennement meuble ; assez nombreuses racines assimilatrices ; microporosité moyennement abondante ; passage en 3-4 cm.

* Les deux dernières descriptions sont empruntées à A. LEVÊQUE.

57-110 cm et plus : B₃ C à zones d'altérite représentant 4 à 5 % de volume, assez induré (tendant vers la carapace tendre) à taches jaunes plus ou moins pâles, massives et à galeries de termites plus ou moins remplies de terre meuble rose-ocre, massive ; on ne voit pas de nodules individualisés ; texture argileuse ; structure massive à débit en éclats vaquement polyédriques aplatis ; l'ensemble présente une cohésion assez marquée ; pratiquement pas de racines, sauf quelques lignifiées.

Ce profil présente un niveau gravillonnaire, plus épais que celui du précédent : environ une quarantaine de centimètres. Le gradient texturale, positif, est net, ce qui permet de classer ce sol dans le groupe ferrallitique appauvri ; sous-groupe faiblement remaniés, à concrétions d'aspect rugueux, sur granite.

Ce profil a donné lieu au prélèvement des échantillons NA₁ et NA₂.

Les profils qui viennent d'être présentés sont à resituer dans le cadre des processus pédogénétiques dominants qui ont marqué la différenciation des sols à partir des matériaux ferrallitiques d'altération du socle ivoirien. Si l'on fait référence à l'ensemble des travaux de cartographie et de pédogenèse dans ce pays, il apparaît au total, du moins pour ce qu'il est convenu de nommer "Solum", que l'ordre d'importance spatiale décroissante de ces processus est le suivant : concrétionnement - nodulation des sesquioxydes de fer, appauvrissement, induration hydromorphie et rajeunissement. Ainsi pouvons-nous souligner que les profils sur lesquels se fonde l'étude offrent une représentativité correcte de l'essentiel de la pédogenèse ivoirienne et même ouest-africaine. Au surplus, leur roche-mère respective appartient à l'un des deux ensembles géologiques principaux des pays : schistes plus ou moins quartziques et granites. Et la nature de la roche-mère se répercute dans la composition et la structure du matériau au sein duquel se forment les éléments ferrugineux grossiers (LEVÊQUE, 1970, 1975, 1979). Ceux-ci présentent en définitive, soit un type, soit une gamme de types différant sensiblement de l'une à l'autre roche-mère. C'est précisément ce que nous pouvons vérifier ici.

3. COMPOSITION DES HORIZONS GRAVILLONNAIRES ETUDIÉS

L'étude morphologique des échantillons prélevés montre comme nous venons de le voir, dans la majorité des cas, la présence de deux ou plusieurs types de gravillons à l'échelle du profil ou de l'horizon. Il importe donc de préciser le détail de la composition des horizons gravillonnaires en notant que dans de nombreux cas, une catégorie d'éléments grossiers est nettement dominante sur les autres.

Le tableau 1 donne pour chacun des prélèvements, la granulométrie de la fraction fine et la constitution de la fraction grossière selon la typologie précédemment exposée. Cette constitution a été déterminée, en ce qui concerne les gravillons sur la classe de taille comprise entre 5 et 10 mm, la plus abondante. Ceci explique que l'importance des quartz grossiers, de taille fréquemment supérieure à 10 mm, est sous-estimée dans ce tableau à propos du profil de Sikensi. Enfin, notons au passage que les prélèvements effectués à diverses profondeurs ont permis de disposer d'une gamme assez étendue de proportions ainsi que de types de phases grossières et de phases fines.

Ce tableau donne l'occasion de rappeler que les masses nodulaires patinées et les pseudo-concrétions brunifiées ou non dominent dans le profil de Tiassalé, les concrétions semi-pisolitiques patinées et les masses nodulaires dans celui de Sikensi et dans les deux profils de Niellé, les concrétions d'aspect rugueux ainsi que les pseudo-concrétions ou les concrétions de formes moyennement irrégulières, tendres. A propos des échantillons des deux profils de Tiassalé et de Sikensi qui ont été prélevés dans trois niveaux successifs, on notera que la proportion du type dominant de gravillons augmente en profondeur et, bien entendu, inversement pour les types accessoires ou mineurs. Nous remarquons également à propos du premier profil de Niellé (NIE₁) que la diminution du taux de concrétions d'aspect rugueux au profit du quartz, en profondeur, s'explique par le fait que celui-ci est un constituant de ce type de gravillons (voir le paragraphe sur la typologie des gravillons). Et nous observons au passage que ces éléments quartzeux sont parfaitement anguleux, absolument pas ferruginisés, blanc opaque, tirant de toute évidence, leur origine de leur concentration relative dans les termes les plus évolués de l'altération de la roche sous-jacente.

Enfin, quelques dernières remarques sont à effectuer :

- D'une part, les gradients verticaux d'abondance des divers types de gravillons et les morphologies nettement spécifiques de ceux-ci en fonction du sol étudié sont autant d'indications pour penser à la formation autochtone de ces éléments grossiers et non à une simple accumulation après transport.

Origine	Désignation de l'horizon	Profondeur de prélèvement (cm)	Nomenclature de l'horizon	Taux de gravillons dans les échantillons (%)	les types de gravillons (pourcentages relatifs)													Granulométrie (%)					
					I a	I b	I c	II a	II b	III	IV	V	V'	VI	VI'	VII	Q	A	L _f	L _G	S _f	S _G	
TIASSALE	T ₁	10-20	A ₁	10,3	21,3	10,1	14,0	4,2				20,1	30,3					40,2	7,3	12,0	19,9	20,2	
	T ₂	40-60	B _{fe}	76,3	30,2	5,3	6,2	2,8				45,2	10,3					39,0	8,5	11,7	17,0	21,6	
	T ₃	100-120	B _{fe}	69,1	20,1	4,3	2,7	2,8				70,1						51,6	10,7	8,5	14,5	12,3	
SIKENSİ	S ₁	10-20	A _{1-2fe}	20,3	15,1		27,0	30,2	5,0			6,8	10,0					5,85	14,5	6,8	17,8	32,5	26,5
	S ₂	40-60	B _{fe}	73,4	8,3		20,4	39,5	5,5			13,3	6,9					6,1	12,5	7,7	17,3	30,7	31,2
	S ₃	100-120	B _{fe}	76,1	10,8		18,1	40,3	10,1			9,1	2,6					9,0	42,6	7,5	14,6	19,5	18,1
NIELLE	NA ₁	10-20	A _{2 fe}	75,2												93,2		6,8	11,4	6,8	3,7	11,2	66,8
	NA ₂	50-100	B _{fe}	58,0											89,5			10,5	29,5	8,0	3,3	7,5	51,7
	NB ₂	50-100	B _{fe}	30,5							84,3							15,7	27,8	8,5	3,5	8,8	51,4

N.B. : Q = graviers ou cailloux de quartz

TABLEAU 1 : Compositions des échantillons soumis à l'étude hydrodynamique.

- En second lieu, le tri de divers types de gravillons d'un même horizon met très généralement en évidence des formes de transition entre ces derniers. Autrement dit, nous pouvons retrouver plusieurs stades d'évolution des éléments ferrugineux grossiers, stades qui vont de la simple brunification à la "condensation" des sesquioxides de fer, qui aboutit à l'apparition d'une patine puis d'une cuticule plus ou moins épaisse.

Nous retrouvons dans ces deux premiers points ce que par ailleurs, LEVÊQUE (1970, 1975, 1979) note à propos du socle granito-gneissique du Togo, c'est à dire dans un milieu naturel analogue.

- Dans la quasi-totalité des cas, les gravillons d'un type donné (que celui-ci soit unique ou associé à d'autres) se retrouvent dans des horizons de natures très diverses qui se succèdent dans une partie d'un même profil. Toujours par référence à l'auteur sus-cité, nous expliquerons ce fait par la capacité de la matrice d'une évolution bien plus rapide que celle qui est permise aux volumes "figés" par la cristallisation des sesquioxides de fer. Et dans cette transformation de la phase fine interviennent, bien entendu, les processus pédogénétiques classiques que sont le remaniement par la mésofaune, l'appauvrissement en argile et en fer, l'accumulation de matière organique, l'amélioration ou la péjoration du drainage, etc. Cette coexistence de matériaux diversifiés a, en tout état de cause, motivé le choix d'une gamme texturale aussi large que possible des matériaux fins auxquels les gravillons furent incorporés pour l'étude des échanges d'eau.

MÉTHODOLOGIE - RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

1. APPROCHE GÉNÉRALE

Cette étude des échanges d'eau entre gravillons et matrice se proposait au départ de travailler sur l'évolution hydrodynamique des matériaux prélevés en saison de pluies et conservés jusqu'aux manipulations en leur état naturel d'humidité. Si l'on se réfère aux travaux de GRAS (1972), cette précaution apparaissait présenter quelque utilité dans la mesure où la saturation de l'eau des pores très fins peut s'effectuer très lentement. Ainsi pouvait-on espérer quelque économie de temps par cette procédure dans la partie de cette étude consacrée aux transferts d'eau des gravillons vers la matrice. Cependant diverses raisons firent écarter ce mode d'approche. En particulier, la coexistence de divers types de gravillons dans un même horizon nécessite leur tri. Ceci est pratiquement impossible à l'état humide, puisque les éléments grossiers sont entourés d'une gangue devenant rapidement pâteuse au cours des manipulations. D'autre part, cette manipulation, d'assez longue durée, aurait abouti à une dessiccation non négligeable des éléments grossiers. Il était, en outre, nécessaire de pouvoir séparer la fraction fine de la fraction grossière afin de faire varier leur proportion respective dans les expérimentations envisagées. En définitive, l'étude porta sur des matériaux préalablement séchés à l'air, puis tamisés à 2 mm et triés (pour les éléments grossiers).

2. LA POROSITÉ TOTALE DES GRAVILLONS

La rétention d'eau par les gravillons est, bien entendu, conditionnée par l'existence d'un système poral. Dans de nombreux cas, un simple examen à la loupe après fragmentation permet d'estimer grossièrement la proportion représentée par ces pores ou du moins par les plus grossiers d'entre eux. Mais un autre facteur est à prendre en considération, quand il s'agit de leur stockage d'eau à partir de leur environnement. Il s'agit de la configuration du système poral. On peut en effet retenir à la suite de GRAS (1972) que, certains conduits (simples ou en réseau) puissent être inclus dans les zones superficielles des gravillons ou se présenter sous forme de "doigts de gant" ou en "cul de sac" s'enfonçant plus dans la masse à partir de la surface. L'exemple le plus typique du premier cas est fourni par les concrétions semi-pisolithiques avec leur dense cuticule plus ou moins stratifiée et continue : la porosité est faible voire très faible. Le deuxième cas est beaucoup plus difficile à mettre en évidence, mais il est hors de doute que la pénétration de l'eau dans ces "doigts de gant" s'effectue d'autant plus difficilement que leur diamètre est réduit.

Quoiqu'il en soit, l'étude des caractères du comportement hydrodynamique des gravillons nécessite, en premier lieu, de quantifier leur porosité totale. Pour ce faire et comme pour la fraction fine des sols, le calcul prend en compte la densité réelle du matériau constitutif et leur densité apparente.

2.1. La densité réelle

Les mesures de densité réelle ont été effectuées par la méthode au pycnomètre sur les gravillons préalablement broyés à moins de 200 μ .

Le tableau 2 donne les différents résultats obtenus.

Ces valeurs sont largement supérieures à la valeur moyenne obtenue pour les matériaux fins des sols ferrallitiques (2.70) et pour le quartz (2.65). Ceci s'explique par le fait que les sesquioxydes de fer (goethite, hématite, etc..) qui sont les constituants majeurs des concrétions sont beaucoup plus denses : 4.3 et 4.2 à 5.2.

Le même tableau présente les valeurs moyennes des densités réelles pour chaque type morphologique, toutes classes granulométriques confondues. Ces valeurs moyennes permettent de souligner que les gravillons d'aspect rugueux (VI) présentent la plus faible valeur: 2.90. Et nous noterons à leur propos qu'ils s'observent dans les matériaux dérivés de granites qui se rangent parmi les roches les moins ferrifères du socle ivoirien. Par ordre de couleurs croissantes, viennent ensuite les pseudo-concrétions (V) puis les concrétions semi-pisolitiques (IIa) dont la densité absolue moyenne est de la plus élevée avec une valeur de 3.55. Les différences que ces valeurs entretiennent réciproquement peuvent être soumises au test U de MANN-WHITNEY qui permet de mettre en évidence les différences significatives entre deux groupes de données. De fait, toutes les comparaisons bilatérales effectuées entre les groupes de données respectives de divers types morphologiques de gravillons nous indiquent une différence significative à une probabilité de 0.95 ou plus.

Le développement d'une patine ou d'une brunification en surface ou dans une couche superficielle des gravillons, procède, tout comme la formation du cortex, d'une précipitation des composés préalablement en solution ou en suspension, précipitation qui s'effectue dans les périodes de dessiccation des sols (BACHELIER, 1952). Ces composés appartiennent à un ensemble dont l'un des deux termes extrêmes est exclusivement organique et l'autre, à large dominance ferrugineuse. Cet apport superficiel prend d'autant plus d'importance à l'échelle de chaque gravillon que celui-ci présente une surface spécifique élevée, c'est à dire des dimensions réduites. Cette remarque s'applique également aux gravillons dont l'observation macroscopique ne permet pas de discerner de différenciations superficielles. En effet, au fur et à mesure de leur enrichissement en sesquioxydes de fer, dont la densité absolue est beaucoup plus élevée que celle de la masse terreuse originelle, il apparaît logique que cet apport intéresse une partie superficielle proportionnellement plus forte pour les gravillons de dimensions réduites.

C'est dans l'ordre des idées qui précèdent que l'examen des données des tableaux 2 et 3 appelle les remarques suivantes :

- Le test de SPEARMAN, de corrélations des rangs, a été appliqué aux valeurs du tableau 2 enfin de dégager une éventuelle liaison négative entre la dimension des gravillons et leur densité absolue. La valeur obtenue pour le coefficient de corrélation est de -0,349. Elle n'atteint donc pas le seuil de signification à $p = 0,95$ qui est de -0,388. Toutefois, dans cette appréciation, nous tiendrons compte de deux faits. D'une part, le nombre de données est restreint et en particulier celui des classes dimensionnelles est limité à 4. D'autre part, l'influence de la granulométrie des gravillons est sensiblement masquée par la diversité des types morphologiques dont les valeurs de densité absolue sont assez spécifiques, comme nous l'avons noté. Aussi pouvons-nous retenir que la valeur du coefficient de corrélation, qui est égale à 90 % de celle qui correspond à une probabilité de 0,95 %, présente une signification non négligeable. En d'autres termes, la densité absolue des gravillons apparaît inversement proportionnelle à leurs dimensions.

- Les valeurs du tableau 3 montrent que la brunification des gravillons s'accompagne dans tous les cas d'un accroissement de la densité absolue. Nous pouvons donc en déduire que cette modification est davantage le fait d'apport ferrugineux que celui d'une simple imprégnation organique dont les composés présentent en moyenne une densité sensiblement inférieure à 2. D'autre part, le calcul du coefficient de corrélation entre cet accroissement de densité et la dimension des gravillons donne une valeur de -0,561 qui est égale à près de 90 % de celle qui correspond à une probabilité de 0,95. Les remarques

Types morphologiques	IIa			V				V'				VI				VI'			
Classes granulométriques	A	B	C	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
Densité réelle	3,62	3,49	3,54	2,99	2,97	2,95	2,98	3,16	3,18	3,12	3,06	2,89	2,91	2,89	2,89	3,00	3,00	2,97	2,94
Valeur moyenne par type morphologique	3,55			2,97				3,13				2,90				2,98			

N.B. - A = 2-5 mm ; B = 5-10 mm ; C = 10-15 mm ; D = 20-25 mm

TABLEAU 2 : Les valeurs de la densité réelle des gravillons.

	A	B	C	D
$\frac{V'}{V}$	1,057	1,071	1,058	1,027
$\frac{VI'}{VI}$	1,038	1,031	1,028	1,017

TABLEAU 3 : Rapport de la densité réelle des gravillons brunifiés et de celle des gravillons non brunifiés d'une même catégorie.

effectuées précédemment sur le degré de signification accordé par une telle valeur, restent valables ici. Nous retiendrons donc que le processus qui se traduit par une brunification (et qui consiste en une imprégnation de sesquioxides de fer selon toute vraisemblance) prend d'autant plus d'importance que la taille des gravillons est réduite.

2.2. Densité apparente

Les mesures de densité apparente ont été effectuées en utilisant la méthode classique de détermination du poids puis du volume de l'ensemble d'un nombre assez élevé de gravillon de chaque type. L'appareil le plus convenable pour la détermination du volume des gravillons est le volumétre à déplacement de mercure. La tension superficielle de ce liquide s'oppose en effet à sa pénétration dans les pores, généralement de diamètre suffisamment réduit de la plupart des gravillons. Cependant, étant donné l'indisponibilité d'un tel appareil, la détermination du volume fut effectuée au moyen d'un pycnomètre à eau. La difficulté de cette procédure tient au fait que ce liquide est absorbé en proportion non négligeable par la majorité des gravillons. Par conséquent, la détermination du volume directement sur les gravillons secs serait très erronée du fait de cette absorption. Pour pallier cette difficulté, la procédure classique préconisée est d'enrober chaque gravillon de paraffine en le trempant dans celle-ci lorsqu'elle est très légèrement au-dessous de sa température de fusion. La température plus faible de l'élément grossier fait qu'elle se fige rapidement à son contact sans pénétrer dans les pores. Par quelques calculs simples, tenant compte du poids de l'enrobage et de la densité de la paraffine, on obtient par différence la densité apparente des gravillons. Il s'est avéré malheureusement que cette méthode est loin de garantir la reproductibilité des résultats. La principale cause d'erreur semble tenir au fait qu'au contact de la paraffine relativement chaude, l'air contenu dans les pores ouverts (et en particulier les pores de gros diamètre) se dilate et crée une boursoufflure de l'enrobage de la paraffine, boursoufflure qui ne se résorbe pas complètement lors du refroidissement. Il en résulte une surestimation du volume calculé du gravillon. En résumé, cette méthode donne des résultats moins reproductibles que celle qui a été finalement adoptée. Celle-ci a consisté pour l'essentiel, à effectuer une saturation préliminaire par l'eau, de la porosité ouverte des gravillons en immergeant ceux-ci dans un cristallisoir maintenu sous dépression. L'étape suivante consiste à éliminer de la surface des gravillons retirés du cristallisoir, la pellicule d'eau qui s'adsorbe à leur surface. Pour ce faire, on dispose ces éléments grossiers sur un linge absorbant mais préalablement humidifié sur lequel ils sont roulés jusqu'à ce que la brillance de la pellicule d'eau disparaisse. Il faut, bien entendu, ne pas poursuivre l'opération au delà de ce stade, étant donné que l'eau des pores ouverts commencerait alors à être absorbée par le support. On détermine ensuite le volume des gravillons ainsi préparés en utilisant un pycnomètre.

Les dimensions élevées de certains gravillons, et le souci de réduire les erreurs par traitement d'une quantité relativement importante amena à utiliser un pycnomètre de fortune. On utilisa, en la matière, un pot à conserve en verre de 210 cc de contenance et à large orifice, se fermant par un couvercle à vis. Afin qu'aucune bulle d'air ne soit prise au piège entre les gravillons lors de la fermeture du récipient, l'opération s'effectue en immersion dans le cristallisoir et en agitant légèrement.

Il est inutile de préciser la suite des calculs, sauf de souligner les points de détails suivants :

- Le poids des gravillons utilisé est, dans chaque cas, de l'ordre de 40 à 50 g après séchage à l'air libre et non à l'étuve. Par expérience, il s'est avéré que le séchage à 105°C réduit la rétention hydrique des gravillons. Cette précaution apparaît utile car sur le même ensemble de gravillons est, en effet, déterminée également la porosité ouverte.

- Etant donné que le remplissage du pycnomètre et sa fermeture s'effectue sous l'eau, on doit veiller, bien entendu, à l'essuyage parfait des parois externes du récipient.

- Le calcul du volume de l'eau déplacée par les gravillons implique la connaissance du poids des gravillons humides. Cette pesée s'effectue après celle du pycnomètre contenant les gravillons humides et rempli d'eau. Il est indispensable de respecter cet ordre, car on a pu constater que la procédure inverse entraîne une sous-estimation du volume principalement pour les gravillons non brunifiés, ni patinés. En effet, ceux qui ne présentent ni l'un ni l'autre de ces aspects de surface sont assez fragiles lors des manipulations. Au ressuyage sur le linge absorbant, en particulier, ils perdent une partie de leur substance de leur zone superficielle. La somme d'erreur que représente cette perte de substance est, bien entendu, accrue à l'excès si les gravillons ne sont pas, au préalable, soigneusement débarrassés de leur gangue terreuse, ce qui implique des lavages répétés et même un brossage dans certains cas lors de la préparation des échantillons.

- Cette méthode de détermination de la densité apparente présente l'avantage de pouvoir déterminer sur le même ensemble de gravillons la porosité ouverte, leur pesée ultérieure après dessiccation permettant de calculer par différence leur teneur en eau au stade de la fin du ressuyage. Ceci permet de réduire l'erreur due à l'échantillonnage.

- La balance utilisée présente une portée de 1.200 g et une précision de $\pm 0,01$ g.

Les déterminations furent effectuées en cinq répétitions sur trois ou quatre classes granulométriques de diverses catégories de gravillons dominant dans les profils étudiés. Il n'en reste pas moins, et nous le garderons à l'esprit pour le traitement des données, que cette procédure, bien qu'étant apparue la seule possible en fonction des moyens, implique de nombreuses sources d'erreur. Les trois principales sont :

- le caractère subjectif de la détermination du stade de disparition de la pellicule d'eau entourant les gravillons après leur émergence du cristallisateur.

- les pertes de substance de certains gravillons fragiles au cours de la manipulation.

- l'imprécision de la balance nécessaire pour peser le modèle de pycnomètre utilisé, lorsque celui-ci contient les gravillons et rempli d'eau (le poids total étant de l'ordre de 350 g).

Pour ces diverses raisons, nous considérons les valeurs obtenues en matière de densité apparente, donc de porosité totale et de porosité ouverte, comme traduisant un ordre de grandeur.

Le tableau 4 regroupe les résultats de ces mesures de densité apparente. Le calcul du coefficient de variation ($\frac{s}{m} \%$) fut effectué, à titre indicatif, pour chaque classe granulométrique et pour chaque type morphologique. Les valeurs obtenues sont très faibles, inférieures à 2 %, ce qui semble indiquer une bonne reproductibilité de la méthode et une nette spécificité de la densité apparente de divers types et classes granulométriques des gravillons. A propos de cette spécificité, le test de MANN-WHITNEY a été utilisé dans toutes les comparaisons bilatérales possibles de groupe des données du tableau 4. Sur les 36 comparaisons effectuées entre les diverses catégories de gravillons, à classe granulométrique identique, 35 ont mis en évidence une différence significative à un risque égal ou inférieur à 5 % (en fait 2 % dans la plupart des cas). Seuls les résultats de la comparaison des deux catégories V' et VI' pour la classe granulométrique 2-5 mm échappent à cette règle. En outre les gravillons d'une même catégorie se différencient les uns des autres selon leur classe granulométrique respective, ceci pour 24 des 27 comparaisons ainsi effectuées. Ne font exception sur ce dernier point que les couples suivants :

- classes (2-5 mm) - (5-10 mm) de la catégorie V
- classes (10-15 mm) - (20-25 mm) de la catégorie V
- classes (5-10 mm) - (10-15 mm) de la catégorie VI'.

La classification des gravillons fondée, au départ, sur les critères uniquement morphologiques, puis sur leur granulométrie, trouve donc, dans les valeurs mesurées de leur densité apparente, une justification assez remarquable. En d'autres termes, comme pour la densité absolue, les divers gravillons présentent une densité apparente très nettement spécifique dans la grande majorité des cas.

On remarque, d'autre part, que de la classe la plus fine à la classe la plus grossière, la valeur médiane de la densité apparente décroît progressivement, cette règle n'étant mise en défaut que pour le type IIa. On note les mêmes indications en se fondant sur les valeurs moyennes. Enfin, à titre de détail, signalons qu'entre les éléments brunifiés (V' et VI') et leurs homologues qui ne le sont pas (V et VI), le rapport des valeurs respectives des diverses classes granulométriques présente des valeurs systématiquement supérieures à 1. Ces valeurs sont comprises entre 1.24 à 1.34 quand on compare le type V au type V' si l'on se fonde sur les valeurs médianes et entre 1.20 et 1.33 pour les valeurs moyennes. Pour les types VI et VI' ces valeurs ne varient pratiquement pas en fonction de la taille des gravillons (tableau 5). Une tendance se dégage à une évolution plus poussée de la brunification sur les pseudo-concrétions (type V).

Tout ce qui précède permet de retenir que la méthode utilisée pour la détermination de la densité apparente des gravillons fournit des résultats cohérents. Nous pouvons ajouter que les écarts observés ne découlent pas seulement des erreurs inévitables de manipulations. Il est en effet très vraisemblable que ces écarts intègrent des variations inhérentes à la constitution des divers gravillons composant chacun des cinq échantillons traités. En définitive, nous nous fonderons, par la suite, sur les valeurs médianes qui ont l'avantage d'être moins influencées que les moyennes par les valeurs extrêmes.

Type morphologique	II a			V				V'				VI				VI'			
Classe granulométrique	A	B	C	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
Densité apparente	3.122	3.053	3.170	1.952	1.941	1.884	1.881	2.593	2.436	2.309	2.223	2.288	2.248	2.207	2.060	2.629	2.556	2.504	2.406
	3.127	3.067	3.172	1.962	1.949	1.891	1.887	2.613	2.480	2.367	2.255	2.293	2.250	2.211	2.117	2.634	2.561	2.541	2.411
	3.127	3.074	3.183	1.971	1.954	1.904	1.892	2.635	2.493	2.377	2.281	2.315	2.251	2.215	2.118	2.637	2.568	2.511	2.413
	3.128	3.082		1.992	1.957	1.921	1.897	2.637	2.534	2.384	2.281	2.317	2.253	2.217		2.640	2.586	2.560	2.421
	3.129	3.097		1.997	1.966	1.924	1.928	2.637	2.536	2.393	2.314	2.327	2.254	2.219		2.651	2.586	2.566	2.437
Moyenne	3.127	3.075	3.175	1.975	1.953	1.905	1.897	2.613	2.496	2.366	2.271	2.308	2.251	2.214	2.098	2.638	2.571	2.530	2.418
Coefficient de variation	0,1	0,5	0,2	1,0	0,5	0,9	1,0	0,8	1,7	1,4	1,5	0,7	0,1	0,2	1,6	0,3	0,5	1,2	0,5

* A = 2-5 mm ; B = 5-10 mm ; C = 10-15 mm ; D = 20-25 mm

N.B. : Les valeurs soulignées sont les médianes

TABLEAU 4 : Densité apparente des gravillons étudiés.

Classe granulométrique		A	B	C	D
$\frac{V'}{V}$	médiane	1.34	1.28	1.25	1.21
	moyenne	1.32	1.28	1.24	1.20
$\frac{VI'}{VI}$	médiane	1.14	1.14	1.13	1.14
	moyenne	1.14	1.14	1.14	1.15

TABLEAU 5 : Rapport des densités apparentes des gravillons brunifiés et les non brunifiés.

2.5. Porosité totale

La détermination des caractéristiques précédentes (densité réelle, densité apparente) a permis de calculer la porosité totale, c'est à dire la proportion maxima du volume total des gravillons offerte à la circulation et aux stockages des fluides (eau et air notamment). Le tableau 6 résume, par les valeurs médianes et extrêmes, les données de cette porosité totale. On peut noter les principaux points suivants :

- les valeurs les plus élevées s'observent avec les pseudo-concrétions (V) : 34,08 à 36,51 %.
- les concrétions d'aspect rugueux (VI) viennent en second rang : 19,9 à 26,75 %
- les plus faibles valeurs concernent les concrétions semi-pisolitiques (IIa) : 10,40 à 13,62 %
- les valeurs concernant les gravillons prélevés dans les horizons humifères (V' et VI') sont systématiquement plus faibles que ceux issus des niveaux plus profonds ; cette différence généralement supérieure à 43 % est modulée par la taille des gravillons (tableau 7).

On constate, également, sur la figure 1, une liaison étroite entre les valeurs médianes de la porosité totale des gravillons et leur taille. Cette liaison est de signe positif sauf pour les concrétions semi-pisolitiques (IIa). Le fait que cette dernière catégorie de gravillons se distingue, ici, de toutes les autres, s'explique par sa morphologie, c'est à dire par ce que l'on peut déduire quant à leur genèse. En effet, chacun de ces éléments ferrugineux grossiers présentent deux parties. La première de celle-ci, centrale, est, selon toute vraisemblance à l'origine, un volume terreux qui présente une porosité propre et ultérieurement imprégnée de sesquioxides de fer. La seconde partie, périphérique, est formée de couches (plus ou moins régulières) concentriques, résultant de dépôts successifs de sesquioxides de fer. Il ne s'agit plus dans ce dernier cas, d'une oblitération plus ou moins poussée de la porosité d'un volume donné, mais de précipitations successives. Il est donc aisément concevable que cette seconde formation englobe un réseau poreux des plus réduits. Et au total, plus elle prend de proportion, c'est à dire, plus le volume du gravillon augmente, moins la porosité totale résiduelle de celui-ci est importante.

Comme les valeurs des deux paramètres précédents dont elles dérivent, celles de la porosité totale présentent une très nette spécificité non seulement selon le type morphologique général qui traduit les conditions de formation de ces éléments grossiers, mais également en fonction de l'état de surface et de la granulométrie de ces derniers.

A titre d'analogie, la porosité totale des gravillons correspond à la porosité texturale de la matrice, c'est à dire la porosité qui se maintient après destruction de la porosité lacunaire (vides grossiers entre les agrégats) et de la porosité fissurale. Si dans l'ensemble, les valeurs de la porosité totale des gravillons sont inférieures à celles de la matrice, elles ne semblent pas toutefois négligeables, surtout en ce qui concerne les pseudo-concrétions. La porosité totale des gravillons présentent, enfin, l'originalité d'être stable, étant donné le caractère "figé" de ces éléments grossiers, contrairement à celle de la terre fine qui se dégrade avec la péjoration des caractéristiques structurales après, en particulier, la mise en culture des sols (HUMBEL, 1974 ; de BLIC 1974 ; MOREAU 1978).

3. POROSITE OUVERTE

3.1. Généralités de l'approche

La porosité ouverte des gravillons qui est la partie du réseau poreux communiquant avec l'extérieur a été déterminée par humectation. L'estimation de cette porosité apparaît grossière quand on opère à la pression atmosphérique. En effet, une partie des pores dits ouverts est le siège d'un piégeage d'air. Cet air emprisonné dans les pores en "doigts de gant" diffuse ensuite lentement dans l'eau qui les occupe partiellement et ceci jusqu'à l'extérieur. Au fur et à mesure que cette diffusion s'effectue, l'eau emplit progressivement les pores. Mais ce processus est d'autant plus lent que le diamètre des pores est faible et à la limite, on peut supposer que le remplissage d'une partie du réseau est pratiquement impossible.

Sous vide, l'évacuation de l'air de ces pores est plus rapide et plus complète. C'est dans ces conditions que l'estimation de la porosité accessible aux fluides est la plus reproductible. Cependant, pour une étude comparative, les deux méthodes furent utilisées : l'humectation sous dépression et l'humectation sous la pression atmosphérique. Elles sont toutes deux fondées par l'immersion des gravillons.

	II a	V	V'	VI	VI'
2 - 5 mm	13,56	33,21	16,55	19,48	11,63
	<u>13,62</u>	<u>34,08</u>	<u>16,61</u>	<u>19,90</u>	<u>12,10</u>
	13,76	34,72	17,94	20,83	12,37
5 - 10 mm	11,26	33,80	20,25	22,54	13,80
	<u>11,92</u>	<u>34,21</u>	<u>21,60</u>	<u>22,65</u>	<u>14,40</u>
	12,52	34,65	23,40	22,75	14,80
10 - 15 mm	10,08	34,78	23,30	23,22	13,60
	<u>10,40</u>	<u>35,46</u>	<u>23,81</u>	<u>23,36</u>	<u>15,45</u>
	10,45	36,14	25,99	23,63	15,69
20 - 25 mm		35,30	24,38	26,71	17,11
		<u>36,51</u>	<u>26,46</u>	<u>26,75</u>	<u>17,93</u>
		36,88	27,35	28,72	18,16

TABLEAU 6 : Valeurs extrêmes et médianes de la porosité totale des gravillons.

	2 - 5 mm	5 - 10 mm	10 - 15 mm	20 - 25 mm
$\frac{V}{V'}$	2.052	1.584	1.489	1.434
$\frac{VI}{VI'}$	1.645	1.573	1.512	1.492

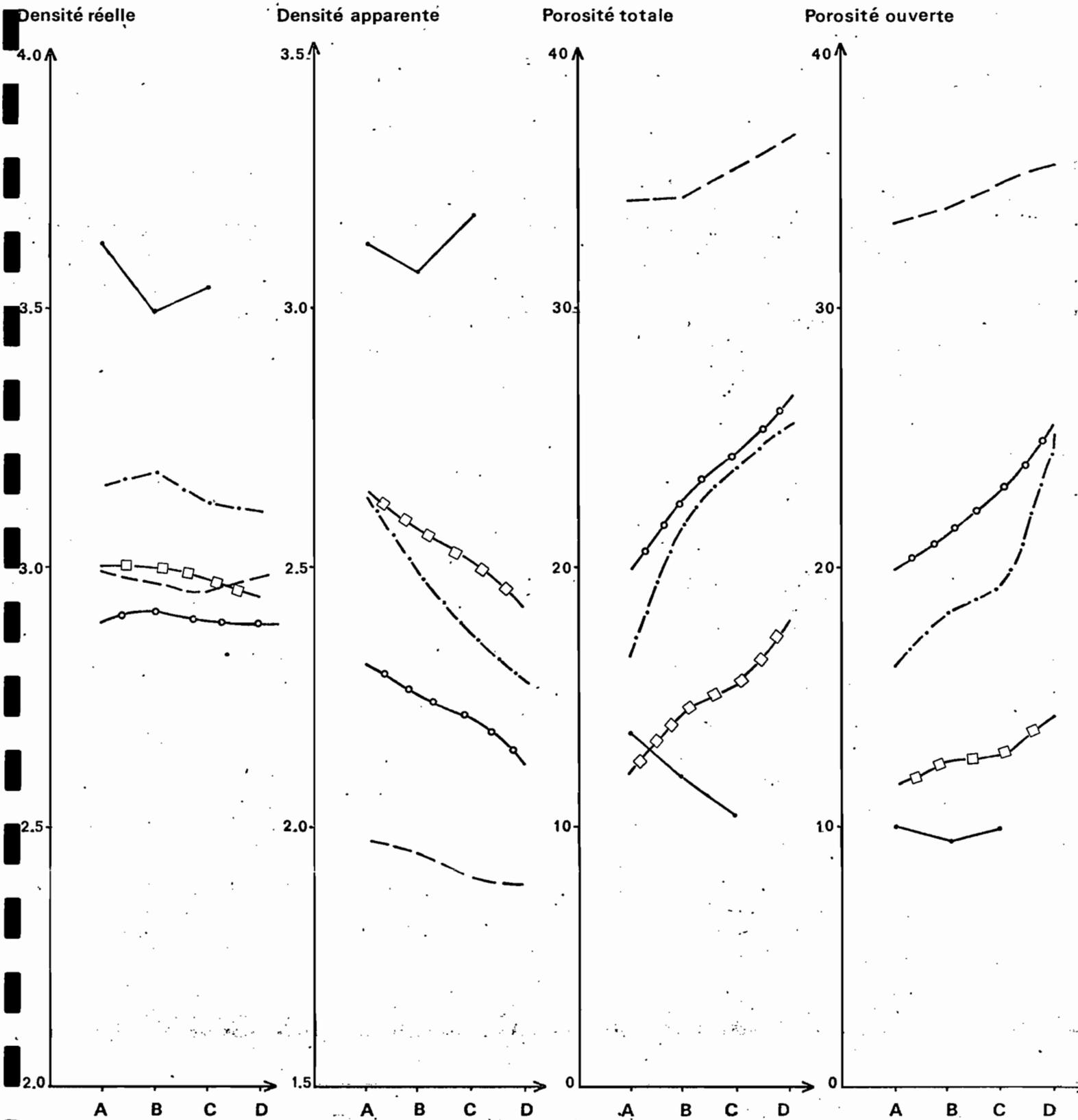
TABLEAU 7 : Rapport de la porosité totale des gravillons non brunifiés et de celle des gravillons brunifiés.

Fig 1 : variation de quelques caractéristiques physiques des gravillons en fonction des classes granulométriques

LEGENDE

- Concrétion semi pisolitique (II a)
- - - Pseudo concrétion (V)
- · - · Pseudoconcrétion brunifié (V')
- - ○ Concrétion à aspect rugueux (VI)
- - □ Concrétion à aspect rugueux brunifié (VI')

- A : 2 - 5 mm
- B : 5 - 10 mm
- C : 10 - 15 mm
- D : 20 - 25 mm



3.2. Humectation sous pression réduite

3.2.1. Méthodologie

La méthode consiste à immerger les gravillons dans l'eau sous cloche à vide afin que, comme ceci est précédemment signalé, la porosité accessible aux fluides soit amenée à saturation la plus complète possible. Le vide (pression de 200 millibars environ) est maintenu au delà du temps minimum qui permet l'échappement des bulles d'air visibles à l'oeil nu. En fait, les durées d'immersion furent très supérieures : 2 puis 4 et enfin 6 jours afin de s'assurer du remplissage le plus complet possible, ceci dans les limites de temps raisonnables. Bien entendu, il pleut rarement plus d'une journée et la majorité des horizons gravillonnaires étudiés ont le temps de se ressuyer entre deux averses. On ne peut toutefois exclure que dans certains sols le contact des gravillons et de masses terreuses saturées s'effectue sur des durées importantes. Ceci étant, après l'immersion, les gravillons sont retirés de l'eau et la pellicule adsorbée à leur surface est ressuyée à l'aide d'un linge humidifié afin, comme il a été mentionné antérieurement, de réduire au maximum la succion de l'eau retenue dans les pores ouverts des gravillons. Une série de légers frottements permet d'éliminer dans la plus grande mesure du possible la pellicule d'eau. Et, signalons au passage que plus la porosité des gravillons est faible, plus la pellicule d'eau est importante et difficile à éliminer.

La différence entre les pesées, la première à l'état humide après la manipulation qui vient d'être exposée, la seconde à la suite d'un séchage à l'étuve à 105°C, permet, par référence aux données de la densité apparente, de déterminer la porosité accessible aux fluides. Le respect de la succession dans le temps, la pesée à l'état humide, puis celle qui est effectuée après la dessiccation, présente quelque importance. En effet, malgré le nettoyage méticuleux et parfois le brossage des gravillons, une proportion non négligeable de terre fine dans certains cas peut, au cours de la préparation des échantillons, rester adhérente à la surface pour se disperser dans l'eau pendant l'immersion. Ceci entraîne une diminution du poids de la phase solide et par conséquent, une surestimation de la porosité ouverte si cette succession des deux pesées n'est pas respectée.

Le tableau 8 regroupe les pourcentages pondéraux d'eau retenue par les gravillons, après des durées d'immersion respectives de 2, 4 et de 6 jours, ceci pour les diverses catégories et classes granulométriques des gravillons. Pour les deux dernières durées, les pourcentages d'eau retenue sont accompagnés de pourcentages d'accroissement par rapport aux valeurs obtenues pour une durée d'immersion de 2 jours.

L'ensemble de ces données montre que, après deux jours d'immersion, c'est à dire largement après la fin du dégagement des bulles d'air visibles, le remplissage de la porosité ouverte n'est pas complet. En effet après 4 jours puis 6 jours d'immersion, le pourcentage d'accroissement de l'eau retenue par les gravillons dépasse 20 % pour certains gravillons. Cette poursuite de l'imbibition après 2 jours d'immersion concerne principalement les gravillons du type IIa (concrétions semi-pisolithiques) et des types V' et VI', présentant le trait commun d'une différenciation superficielle par concentration plus élevée de sesquioxides de fer. On peut donc supposer que cette concentration a oblitéré certains des pores communiquant auparavant avec l'extérieur, mais a, également réduit le diamètre de ces derniers.

Le test de corrélation de rangs de SPEARMAN permet de montrer que le pourcentage d'accroissement de l'eau, si l'on maintient les gravillons en immersion sous pression réduite pendant 2 jours, puis 4 jours supplémentaires, est en liaison inverse du pourcentage d'eau retenue à la fin des deux premiers jours. Les coefficients de corrélation respectifs de -0,752 (n = 17) et de -0,730 (n = 18) nous indiquent que cette liaison négative est vérifiée à une probabilité de 0,995. Toutefois, aucune liaison ne se dégage entre les valeurs de ce pourcentage d'accroissement et de la granulométrie des gravillons (figure 2 a et 2 b). Il apparaît ainsi, que la dimension des pores n'est pas liée à celle des gravillons. La rapidité du remplissage de la porosité ouverte dépend principalement de l'état de surface de ces éléments ferrugineux grossiers. Le tableau 9 illustre ce comportement en donnant les valeurs du rapport, pour les diverses granulométries, des pourcentages d'eau retenue respectivement par les gravillons brunifiés et ceux qui ne le sont pas, pour les catégories V et VI.

3.2.2. Les résultats

Les déterminations furent effectuées comme dans le cas de la densité apparente, en cinq répétitions. Le tableau 10 mentionne en détail les résultats de toutes les répétitions de la teneur pondérale

Type de gravillons	II a			V			V'			VI			VI'		
Nombre de jours d'immersion →	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6
2 - 5 mm	2.62	3.15 (20.2)	3.20 (22.1)	15.94	16.13 (1.2)	16.88 (5.9)	5.73	6.22 (8.6)	6.26 (9.4)	8.37	8.49 (1.4)	8.64 (3.2)	3.62	4.11 (13.5)	4.42 (22.1)
5 - 10 mm	2.54	2.71 (6.7)	3.10 (22.0)	16.49	17.47 (5.9)	17.31 (5.9)	5.97	6.73 (12.7)	7.26 (21.6)	9.67	9.74 (0.7)	9.94 (3.2)	4.00	4.38 (9.5)	4.89 (22.3)
10 - 15 mm	2.21	2.52 (14.0)	2.83 (28.1)	17.56	17.42 -	18.35 (4.5)	6.75	8.00 (48.5)	8.05 (19.3)	10.22	10.28 (0.6)	10.34 (1.2)	4.51	5.01 (11.1)	5.08 (14.6)
20 - 25 mm	-	-	-	17.74	17.74 (0.0)	18.94 (6.8)	10.68	11.00 (3.0)	11.09 (3.1)	-	11.31 (-)	12.17 (-)	4.59	5.14 (12.0)	5.62 (22.4)

Valeur entre parenthèse : pourcentage d'accroissement

TABLEAU 8 : Pourcentage pondéral de l'eau retenue par les gravillons en fonction du temps d'immersion et de leur granulométrie.

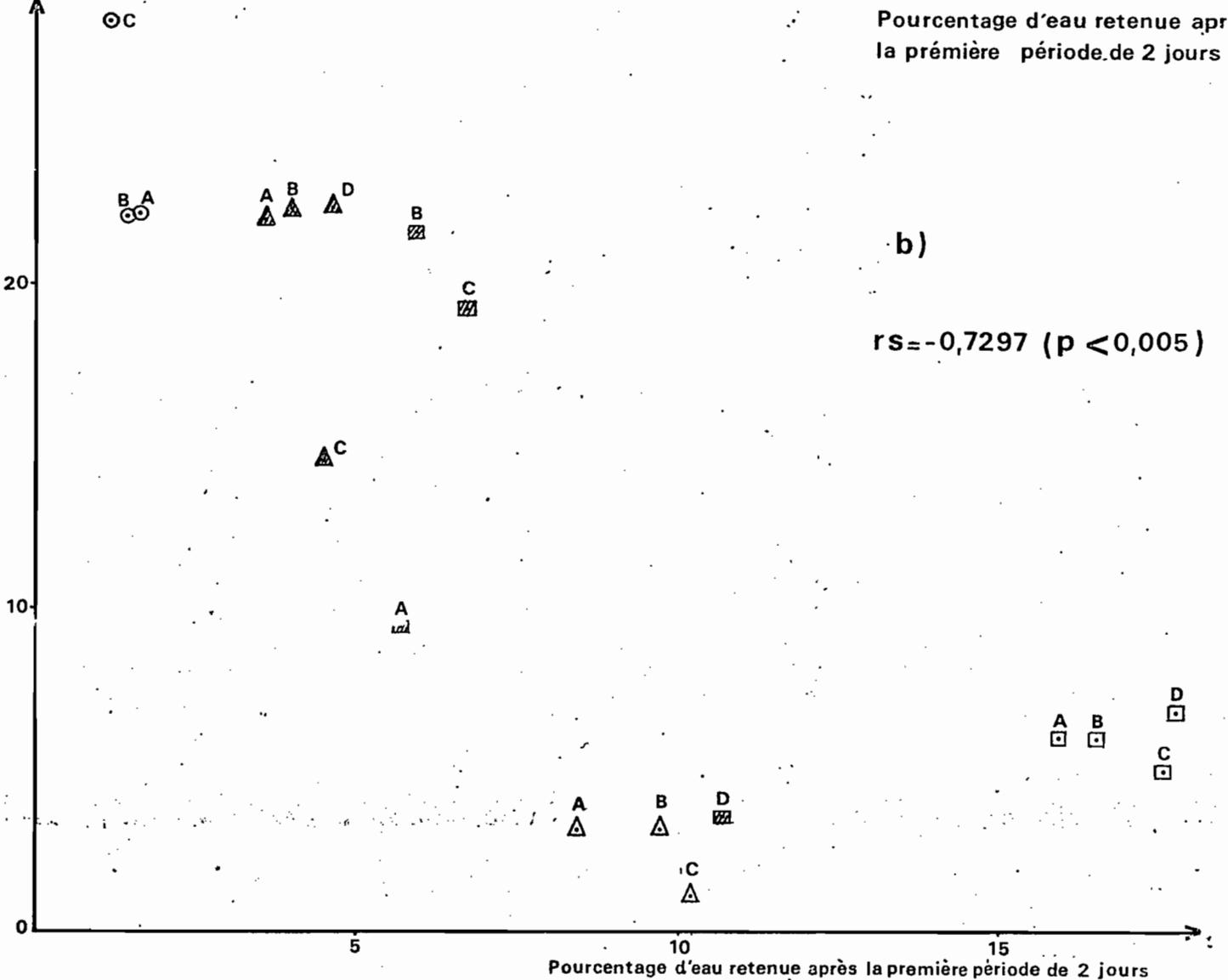
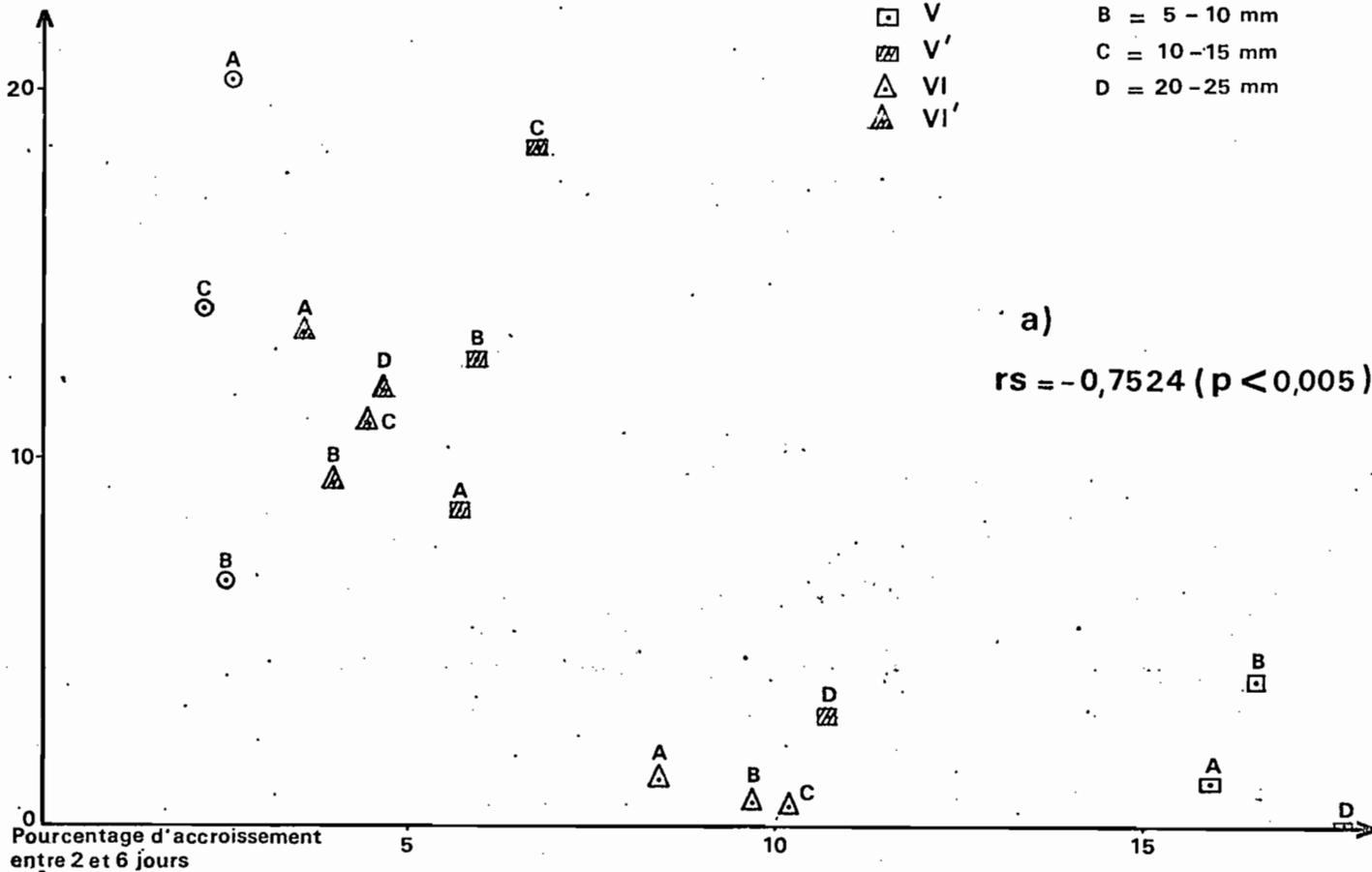
Nombre de jours d'immersion →	V / V'			VI / VI'		
	2	4	6	2	4	6
2 - 5 mm	2.78	2.59	2.69	2.31	2.07	1.95
5 - 10 mm	2.76	2.60	2.38	2.42	2.22	2.03
10 - 15 mm	2.60	2.18	2.28	2.27	2.05	2.04
20 - 25 mm	1.66	1.61	1.71	-	2.20	2.17

TABLEAU 9 : Rapport des pourcentages respectifs d'eau de remplissage de la porosité ouverte, à l'immersion sous vide, des gravillons non brunifiés et de ceux qui ne le sont pas en fonction du temps.

Fig 2 : Variation du pourcentage d'accroissement de l'eau retenue par les gravillons

Pourcentage d'accroissement entre 2 et 4 jours

- | | | |
|---|-----------------|----------------|
| ○ | II _a | A = 2 - 3 mm |
| □ | V | B = 5 - 10 mm |
| ▨ | V' | C = 10 - 15 mm |
| △ | VI | D = 20 - 25 mm |
| ▴ | VI' | |



Type morphologique	II a			V				V'				VI				VI'			
Classe granulométrique	A	B	C	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
Teneur pondérale en eau sous vide.	3.19	2.96	2.74	16.42	16.73	17.35	18.52	6.08	7.18	6.46	10.25	7.95	9.67	10.06	12.16	4.36	4.73	4.88	5.54
	3.20	2.96	2.83	16.43	17.24	17.57	18.54	6.12	7.23	7.84	10.67	8.19	9.74	10.29	12.17	4.39	4.82	4.89	5.54
	3.20	3.10	3.05	16.88	17.31	18.35	18.94	6.26	7.26	8.05	11.09	8.64	9.94	10.34	12.27	4.42	4.89	5.08	5.62
	3.21	3.11		17.05	17.36	18.72	18.96	6.27	7.42	8.27	11.09	9.14	9.98	10.34		4.55	4.91	5.16	5.97
	3.26	3.18		17.63	17.57	18.80	19.33	6.55	7.42	8.84	11.10	9.23	10.04	10.67		4.61	5.16	5.46	5.98
Moyenne	3.21	3.06	2.87	16.88	17.24	18.16	18.86	6.26	7.30	7.89	10.84	8.63	9.87	10.34	12.20	4.47	4.90	5.09	5.73
Coefficient de variation	0,9	3,2	5,6	3,0	1,8	3,7	1,8	2,9	1,5	11,2	3,5	6,5	1,6	2,1	0,5	2,4	3,3	4,7	3,9

A = 2-5 mm ; B = 5-10 mm ; C = 10-15 mm ; D = 20-25 mm

TABLEAU 10 : Teneur pondérale en eau des gravillons après 6 jours d'immersion sous pression réduite.

Classe granulométrique		A	B	C	D
$\frac{V}{V'}$	médiane	2.7	2.4	2.3	1.7
	moyenne	2.7	2.4	2.3	1.7
$\frac{VI}{VI'}$	médiane	2.0	2.0	2.0	2.2
	moyenne	1.9	2.0	2.0	2.1

TABLEAU 11 : Rapports des pourcentages respectifs d'eau de remplissage de la porosité ouverte, à l'immersion sous vide des gravillons non brunifiés et de ceux qui le sont.

en eau des gravillons pendant 6 jours d'immersion et d'autre part les coefficients de variation. Ces dernières valeurs sont inférieures à 5 % excepté pour la classe 10-15 mm du type IIa (5,6), pour la classe 10-15 mm du type V' (11,2) et pour la classe 2-5 mm du type VI (8,63). Elles peuvent donc être considérées dans la majorité des cas comme faibles.

Il est à signaler, également, que de la classe la plus fine à la classe la plus grossière, les valeurs médianes et moyennes augmentent progressivement. L'exception à cette règle porte, comme pour la porosité totale, sur le type morphologique IIa, ce qui s'explique par les conditions de genèse, déjà évoquées, de ces gravillons.

Notons, enfin, que le tableau 11 présente les valeurs du rapport de la teneur pondérale en eau des gravillons non brunifiés et celles de leurs homologues brunifiés. Les valeurs ainsi obtenues sont systématiquement supérieures à l'unité et dans la plupart des cas à 2. Comme celles de la densité apparente, elles décroissent progressivement avec la taille quand on compare le type V et V' et sont pratiquement constantes pour les types VI et VI'.

L'intérêt de ce qui précède serait limité si l'on se bornait seulement à la mention de ces observations. Quelques enseignements en découlent qui correspondent plus directement à l'optique méthodologique. Comme nous l'avons vu antérieurement pour la densité apparente, de nettes liaisons se dégagent ici, entre les valeurs de la porosité ouverte d'une part et la granulométrie ainsi que l'état de surface, d'autre part. Tout ceci permet de souligner que les valeurs obtenues s'ordonnent d'une façon répétitive, régulière et logique. Il nous est donc permis d'en conclure que la méthode utilisée bien que ne présentant pas, à priori, une rigueur absolue, apparaît en définitive, selon une bonne probabilité, adéquate.

3.3. L'humectation à la pression atmosphérique

3.3.1. Méthodologie

Pour se rapprocher des conditions naturelles, l'immersion des gravillons a été pratiquée dans un second temps à la pression atmosphérique. Elle a été effectuée progressivement afin d'éviter une humectation brutale qui placerait les gravillons dans des conditions défavorables au remplissage des pores (GRAS 1972). Pour ce faire, l'eau contenue dans une burette s'écoule lentement sur la paroi d'une capsule dans laquelle sont disposés les gravillons. Le niveau de l'eau remonte à la surface de la capsule, humectant progressivement les gravillons, ce qui limite autant que faire se peut, le piègeage de l'air dans les pores.

3.3.2. Les résultats

Les résultats sont consignés dans le tableau 12. Les variations des valeurs montrent les mêmes tendances que pour l'immersion sous pression réduite, ceci en fonction du type morphologique, de la granulométrie et de l'état de surface. Mais, comme nous devions le prévoir, la rétention d'eau sous pression atmosphérique, pour les divers types de gravillons, est systématiquement plus faible que sous pression réduite. Cependant, sauf dans quelques cas dont l'un présente un écart de plus de 20 %, la différence se situe en général en dessous de 10 % (tableau 13).

Nous noterons, enfin, que les valeurs du coefficient de variation sont, excepté pour les gravillons du type IIa, en général, plus élevées dans le cas de l'immersion sous pression atmosphérique que dans celui de l'immersion sous pression réduite. Et toujours pour les gravillons autres que ceux du type IIa, cette supériorité est systématique si nous comparons pour chaque type, les médianes à partir des valeurs obtenues pour les 4 (ou 3) classes granulométriques. Les résultats obtenus en procédant sous pression atmosphérique sont donc dans la grande majorité des cas, plus dispersés. Ce fait apparaît logique dans la mesure où, sous pression atmosphérique, le remplissage des pores est commandé par la tension superficielle qui dépend de la nature des constituants des parois, donc de leur composition chimique, celle-ci pouvant être relativement diversifiée lorsqu'il s'agit des corps organiques.

3.4. Porosité ouverte - Porosité fermée

La porosité ouverte des gravillons est l'ensemble des pores accessibles à l'eau, autrement dit l'équivalent de la teneur volumique en eau des gravillons dans les conditions optimales c'est à dire, dans le cas de notre étude, en immersion sous pression réduite.

Type morphologique	IIa			V				V'				VI			VI'			
Classe granulométrique	A	B	C	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	A	B	C	D
Teneur pondérale en eau à l'air libre	2.95	2.87	2.69	15.82	15.93	17.42	17.00	5.33	5.93	6.22	8.16	7.89	9.05	9.22	3.72	3.63	4.65	5.24
	2.99	2.87	2.71	16.06	16.03	17.71	17.55	5.40	6.15	7.40	8.40	8.22	9.08	9.40	3.77	4.33	4.86	5.30
	3.01	2.90	2.76	16.08	16.57	17.74	18.70	5.58	6.26	7.53	9.00	8.23	9.11	9.46	3.85	4.50	4.87	5.45
	3.02	2.94	2.94	16.78	16.68	17.85	19.08	5.85	6.29	7.93	9.54	8.25	9.14	10.03	3.91	4.54	4.89	5.73
	3.05	2.97	2.97	16.94	16.74	18.51	19.37	5.99	6.77	8.10	9.75	8.27	9.98	10.62	3.96	4.79	4.90	5.87
Moyenne	3.00	2.91	2.81	16.34	16.39	17.85	18.34	5.63	6.28	7.44	8.97	8.17	9.27	9.75	3.84	4.36	4.83	5.52
Coefficient de variation	1,2	8,5	4,7	3,0	2,2	2,3	5,6	5,1	4,9	9,9	7,7	1,9	4,3	5,9	2,6	10,1	2,2	4,9

A = 2 - 5 mm ; B = 5 - 10 mm ; C = 10 - 15 mm ; D = 20 - 25 mm

TABLEAU 12 : Teneurs pondérales en eau des gravillons après immersion sous pression atmosphérique.

Type morphologique	IIa			V				V'				VI				VI'			
Classe granulométrique	A	B	C	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
Teneur pondérale en eau sous vide (TV)	3.20	3.10	2.83	16.88	17.31	18.35	18.94	6.26	7.26	8.05	11.09	8.64	9.94	10.34	12.17	4.42	4.89	5.08	5.52
Teneur pondérale en eau à l'air libre (Ta)	3.01	2.90	2.76	16.08	16.57	17.74	18.70	5.58	6.26	7.53	9.00	8.23	9.11	9.46	-	3.85	4.50	4.87	5.45
$\frac{T_v}{T_a}$	1.06	1.07	1.03	1.05	1.04	1.03	1.01	1.12	1.16	1.07	1.23	1.05	1.09	1.09	-	1.15	1.09	1.04	1.03

TABLEAU 13 : Rapport des teneurs pondérales en eau après immersion sous 200 millibars et sous pression atmosphérique.

La porosité fermée est, bien entendu, la différence entre la porosité totale et la porosité ouverte et représente le volume de l'ensemble des pores inaccessibles à l'eau.

3.4.1. Porosité ouverte

A partir des deux tableaux 14 et 15 nous pouvons effectuer les remarques suivantes :

- Dans la grande majorité des cas (18/19), la fraction "ouverte" de la porosité totale est supérieure à 75 % et dans près des deux tiers des cas à 90 %. Pour les deux catégories IIa et VI', qui présente les plus faibles valeurs de porosité totale et de porosité ouverte, cette fraction varie en fonction de la granulométrie, la liaison apparaissant positive pour la première et négative pour la seconde. Dans les autres catégories (V, V' et VI) aucune liaison n'apparaît entre les valeurs de ce rapport porosité ouverte/porosité totale et la granulométrie des gravillons.

- Cette porosité ouverte représente, selon le type de gravillons et leur granulométrie, un pourcentage dont les valeurs varient entre 10 % et 37 %. Même si, en partie, elle est constituée de conduits dont le diamètre réduit sensiblement la rapidité des échanges de fluides, elle constitue une réserve potentielle d'eau non négligeable dans l'hydrodynamique des sols gravillonnaires. Mais il est indispensable de garder à l'esprit que cette importance relative varie grandement selon le type morphologique des gravillons.

Le test de SPEARMAN ne permet pas de dégager une liaison générale significative entre les valeurs médianes de la porosité ouverte et la granulométrie des gravillons. Toutefois la valeur obtenue par le calcul du coefficient de corrélation est de +0,321 pour un échantillon de $n = 19$ et représente 83 % de celle du seuil de signification à la probabilité de 0,95. D'autre part, pour chacun des catégories V, V', VI et VI', les valeurs médianes de la porosité ouverte croissent régulièrement en fonction de la granulométrie. En définitive, seule la catégorie IIa ne montre pas cette liaison. Pour toutes ces raisons, nous retiendrons que la porosité ouverte croît très généralement en fonction de la granulométrie des gravillons.

- Le test U de MANN-WHITNEY a été utilisé dans les comparaisons bilatérales des données, toutes granulométries confondues, entre les diverses catégories de gravillons. Il montre dans la plupart des cas, avec une probabilité supérieure à 0,98, que chaque type de gravillons présente une gamme spécifique des valeurs de la porosité ouverte. Par exception à cette règle quasi-générale, les valeurs perspectives des catégories V' et VI n'apparaissent pas significativement différentes les unes des autres.

- Enfin, nous retiendrons ici dans les valeurs de la porosité ouverte, comme nous l'avons vu à propos de la porosité totale (et de la densité réelle) l'influence déterminante de l'état de surface, ou plus précisément de ce que traduit celui-ci. En effet, nous voyons d'abord que les concrétions semi-pisolitiques (IIa), dont le cortex de dépôts concentriques de sesquioxides constitue le caractère spécifique essentiel, présentent les plus faibles valeurs. Et, en second lieu dans chacune des catégories V et VI, les gravillons brunifiés présentent une porosité ouverte très inférieure à celle des gravillons qui ne le sont pas. Le rapport des valeurs respectives de ces derniers à celle de leurs homologues brunifiés oscille entre 2,05 et 1,43 pour la catégorie V et entre 1,64 et 1,80 pour la catégorie VI. Pour cette dernière, on peut considérer que la valeur du rapport ne présente aucune liaison avec la granulométrie, alors que pour la catégorie V, il apparaît que cette influence négative de la brunification est d'autant plus marquée que la granulométrie est faible, c'est à dire que la surface spécifique développée par les éléments grossiers, est importante. Comme ceci a été déjà évoqué, à propos de la densité absolue et de la porosité totale, cette réduction de la porosité ouverte dans les gravillons brunifiés semble le fait d'apport de sesquioxides, apport qui réduirait le diamètre des conduits. Toutefois, il ne faut pas perdre de vue que le fer n'est mobilisable, en dehors des zones réductrices (gley) que sous forme de complexes organiques. Il est ainsi fort probable qu'une partie des fractions organiques de ces complexes ne soit pas totalement détruite et soit incluse dans ces dépôts. Et ces corps organiques comme CHASSIN (1976) l'a noté à propos des argiles, modifieraient le comportement hydrodynamique des matériaux auxquels ils s'associent, notamment par augmentation de la tension superficielle.

3.4.2. Porosité fermée (ou occluse)

A partir des données respectives de la porosité totale (tableau 6) et de la porosité ouverte (tableau 14) et en particulier des valeurs médianes, on peut calculer par différence, celles de la porosité occluse, c'est à dire du pourcentage volumique des conduits qui ne communiquent pas avec l'extérieur. Les résultats de ce calcul et les données du pourcentage de la porosité occluse par rapport à la porosité totale, sont mentionnés dans le tableau 16.

	II a	V	V'	VI	VI'	$\frac{V}{V'}$	$\frac{VI}{VI'}$
2 - 5 mm	10.00	32.71	16.03	18.42	11.56	2.05	1.64
	10.02	33.27	16.23	19.17	11.67		
	10.27	34.41	17.12	21.16	12.12		
5 - 10 mm	9.12	32.89	18.08	21.79	12.23	1.86	1.79
	9.46	33.82	18.19	22.37	12.50		
	9.75	33.89	18.34	22.95	13.21		
10 - 15 mm	8.72	33.33	15.40	22.24	12.49	1.83	1.80
	9.98	34.94	19.13	22.90	12.72		
	9.67	35.42	20.41	23.55	13.71		
20 - 25 mm	-	35.17	23.38	25.28	13.33	1.43	1.79
		35.71	25.01	25.75	14.41		
		36.48	25.69	25.76	14.55		

TABLEAU 14 : Valeurs médianes et extrêmes de la porosité ouverte des gravillons étudiés.

	II a	V	V'	VI	VI'
2 - 5 mm	73,6	97,6	97,7	96,3	96,4
5 - 10 mm	79,4	98,9	84,2	98,8	86,8
10 - 15 mm	96,0	98,5	80,3	98,0	82,3
20 - 25 mm	-	97,8	98,2	96,3	80,4

TABLEAU 15 : Fraction, en pourcentage de la porosité totale des conduits accessibles à l'eau (calculée sur les valeurs médianes).

	II a	V	V'	VI	VI'	$\frac{V'}{V}$	$\frac{VI'}{VI}$
2 - 5 mm	3.60 (1)	0.81	0.38	0.73	0.43	0.47	0.59
	26.43 (2)	2.38	2.29	3.67	3.55	0.96	0.97
5 - 10 mm	2.46	0.39	3.41	0.28	1.90	8.74	6.79
	20.64	1.14	15.79	1.24	13.19	13.85	10.64
10 - 15 mm	0.42	0.52	4.68	0.46	2.73	9.00	5.94
	4.04	1.47	19.64	1.97	17.67	13.36	8.97
20 - 25 mm	-	0.80	0.45	1.00	3.52	0.56	3.52
	-	2.19	1.77	3.74	19.63	0.81	5.25

1 : porosité occluse

2 : porosité occluse/porosité totale

TABLEAU 16 : Porosité occluse.

De l'ensemble de ces données, nous pouvons souligner les points suivants :

- Dans les deux tiers des cas, les valeurs de la porosité occluse sont inférieures à 2 % et celles de la proportion qu'elles représentent dans la porosité totale, sont inférieures à 15 %.

- Les plus fortes valeurs concernent, comme les paragraphes précédents le laissent prévoir, les gravillons caractérisés par une différenciation superficielle (cortex de pellicule, patine ou brunification).

- Contrairement aux valeurs de la porosité totale et de la porosité ouverte, celles de la porosité occluse n'apparaissent, n'entretenir avec la granulométrie, qu'une très lâche liaison.

Pour l'essentiel, nous retiendrons que les pores des gravillons sont organisés en un réseau qui permet le stockage et le départ d'eau dans l'ensemble du volume de chacun de ces éléments grossiers.

4. ECHANGE D'EAU DU MATERIAU FIN VERS LES GRAVILLONS

4.1. Méthodologie

Le principe de la méthode a consisté à mettre les gravillons secs en contact de matériaux fins amenés à divers stades d'humidification : pF 4.2, 3.4, 2.8, 2.5, 2.0. Les gravillons sont ensuite retirés, après un séjour plus ou moins long selon le pF, pour la détermination de leur teneur en eau.

Pour le détail de l'expérimentation, les gravillons après avoir été comptés pour éviter d'en oublier au moment de leur retrait, sont d'abord pesés. Ils sont ensuite disposés sans contact les uns avec les autres en une seule couche à la surface du matériau fin remplissant à mi-hauteur une boîte en carton*, imperméabilisée à la paraffine. Puis le remplissage de celle-ci par le matériau fin est complété, la manipulation étant effectuée en imprimant à la boîte une série de chocs verticaux modérés afin de tasser le tout et favoriser le contact avec les gravillons. L'ensemble est humidifié par une quantité d'eau calculée en fonction du pF auquel on veut amener la fraction fine. Enfin, la boîte est refermée par un couvercle et disposée dans un double emballage plastique pour éviter l'évaporation. Après une période de quatre à douze jours, dont la durée est fonction inverse du pF, les gravillons sont retirés enrobés de l'enrobement terreux qui s'est constitué à la suite de l'humidification. On effectue ensuite la pesée à l'état humide puis à l'état sec à 105°C de l'ensemble (gravillon + enrobement fin) et du matériau prélevé entre les gravillons. On détermine ainsi le taux d'humidité atteint respectivement, en fin d'expérimentation, par la fraction fine qui se trouve à leur contact et, en tenant compte du poids de leur enrobement, par les gravillons eux-mêmes.

Pour les diverses catégories et classes dimensionnelles des gravillons soumises à l'expérimentation, diverses textures de matériau fin ont été utilisées afin de tenter de saisir l'influence de la composition granulométrique de cette fraction dans les échanges d'eau. Le tableau 17 en donne la composition granulométrique.

L'apport d'eau s'effectue, comme cela a été mentionné antérieurement, en la répandant à la surface de l'échantillon, (terre fine + lit médian de gravillon) disposé dans une boîte. Il s'est, en effet, avéré présenter des inconvénients rédhibitoires en l'effectuant avant de disposer l'échantillon dans celle-ci. Ces difficultés tiennent principalement à la répartition de l'eau et à l'intégration des gravillons à la masse humide que la manipulation rend pâteuse. Il n'en reste pas moins que la procédure retenue n'élimine pas complètement l'inconvénient de l'inégale répartition de l'eau dans la masse de l'échantillon et, ceci, essentiellement dans la dimension verticale. La figure 3 donne à titre d'indication, la variation du taux d'humidité en fonction de l'éloignement de la surface de l'échantillon à tous niveaux : dans les 2 ou 3 centimètres superficiels, à mi-hauteur et à la base de l'échantillon, respectivement après 6, 9 et 12 jours. On constate que le taux d'humidité décroît, d'une manière systématique, graduellement du niveau supérieur jusqu'au niveau le plus profond, ce qui est d'ailleurs conforme à la conductivité hydrique.

* Ce matériel de fortune a dû être utilisé, étant donné le coût élevé des boîtes métalliques de dimensions suffisantes.

Echantillon	Appréciation texturale	Argile	Limos fins	Limos grossiers	Sables fins	Sables grossiers	H ₂ O 105°C	Humidité en fonction du pF					
								pF 2.0	2.5	2.8	3.0	3.4	4.2
NA ₁	sableux	11.4	6.8	3.7	11.2	66.8	0.5	18.18	12.97	11.96	10.92	10.09	3.97
S ₁	sablo-argileux	14.5	6.8	17.8	32.5	26.5	0.2	26.38	14.13	12.22	11.66	11.13	5.87
NB ₂	argilo-sableux	27.8	8.5	3.5	8.8	51.4	1.3	26.91	18.14	17.15	16.16	14.66	13.04
NA ₂	argilo-sableux	29.5	8.0	3.3	7.5	51.7	1.0	28.21	20.58	17.61	16.28	14.22	12.23
T ₁	argileux	40.2	7.3	12.0	19.9	20.2	1.8	27.41	18.03	15.79	14.77	13.82	10.57
T ₃	argileux	51.6	10.7	8.5	14.5	12.3	1.2	44.17	30.71	27.06	24.94	24.02	19.51

Tableau 17 : Composition granulométrique de la fraction fine et humidités des échantillons utilisés dans les expérimentations d'échange d'eau avec les gravillons.

pF 4.2 environ

	T ₁			T ₃			S ₁			NA ₁			NA ₂		
	S	M	B	S	M	B	S	M	B	S	M	B	S	M	B
6 jours	15.93	14.43 (14.56)	13.31	21.73	20.38 (20.65)	19.84	6.73	6.05 (5.92)	9.99	4.39	2.49 (3.02)	2.19	12.84	12.38 (12.51)	12.31
9 jours	14.83	14.68 (14.34)	13.50	20.86	20.1 (20.30)	19.95	6.06	5.45 (5.45)	4.85	4.86	3.56 (3.63)	2.48	12.60	12.24 (11.95)	11.02
12 jours	14.2	13.80 (13.34)	12.02	21.18	20.30 (20.43)	19.80	6.16	5.11 (5.36)	(4.80)	4.22	3.47 (3.41)	2.53	12.49	12.35 (11.95)	11.00

pF 2.0 environ

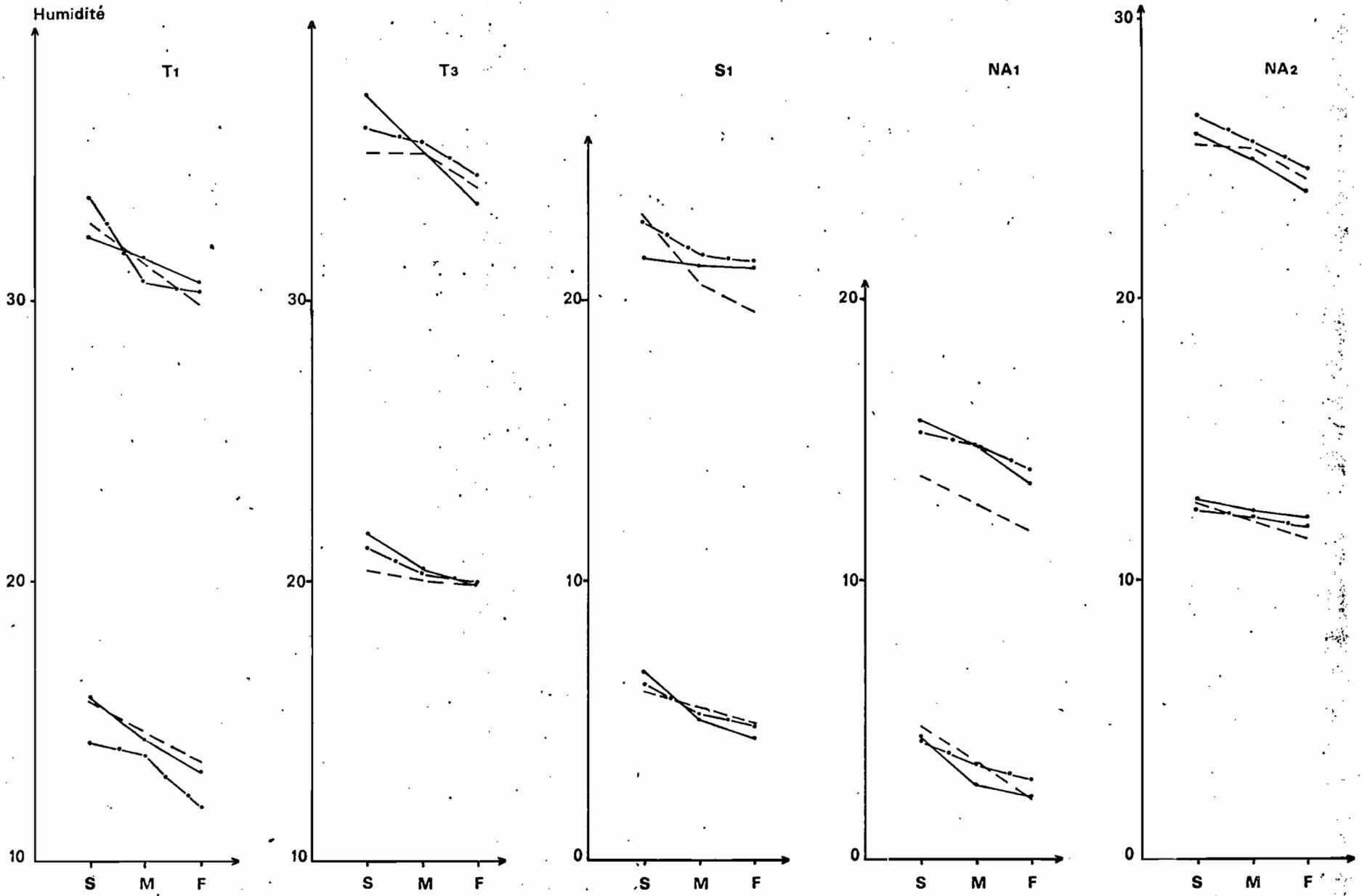
6 jours	32.28	31.7 (31.59)	30.78	37.36	35.14 (35.29)	33.36	21.66	21.24 (21.37)	21.21	15.68	14.65 (14.57)	13.38	25.92	23.99 (24.25)	22.84
9 jours	32.95	31.35 (31.42)	29.95	35.28	35.30 (34.87)	34.03	23.03	20.37 (21.01)	19.64	13.75	12.61 (12.73)	11.82	24.72	24.40 (24.05)	23.04
12 jours	33.74	30.7 (31.60)	30.36	36.07	35.7 (35.42)	34.5	22.92	21.65 (21.73)	20.63	15.08	14.75 (14.26)	12.96	26.58	24.67 (24.84)	23.27

valeur entre parenthèse : moyenne de l'ensemble de l'échantillon.

TABLEAU 18 : Variation de la teneur en eau des matériaux fins en surface (S) au milieu (M) et au fond (F) de la boîte.

FIG. 3 - EVOLUTION DE L'HUMIDITE PONDERALE DE LA TERRE FINE DANS LA BOTTE AUX PF 4.2 ET 2.0

— 6 jours S : surface
 - - - 9 jours M : milieu
 ···· 12 jours F : fond



Afin d'estimer cette hétérogénéité verticale de l'humidification, l'écart relatif par rapport à la moyenne du pourcentage d'humidité de l'ensemble de l'échantillon disposé dans la boîte a été calculé pour le sommet, le niveau médian et la base à partir des données du tableau 18. Pour des humidités correspondant à des pF de 1,8 à 2,5, cet écart relatif se trouve, comme il est toujours logique, le plus faible dans le niveau médian avec des valeurs absolues inférieures à 4 %. Pour des taux d'humidité nettement plus faibles, correspondant à des pF de 3.5 à 4.6 et toujours dans le niveau médian de l'échantillon, il ne dépasse pas, en plus ou moins, 5 % excepté un seul cas. Celui-ci correspond à un pF 4.2 de 3,97 % d'humidité (échantillon NA₁). Ceci justifie la disposition des gravillons dans un niveau médian, dans lequel l'humidité atteint de près, celle qui correspond au pF recherché en se fondant sur la valeur de l'humidité donnée par le laboratoire pour ce paramètre et sur le poids de l'échantillon mis en oeuvre.

D'autre part, une approche statistique simple (comparaisons bilatérales des groupes de valeurs pour le test U de MANN-WHITNEY) montre que le taux d'humidité atteint pour les trois niveaux considérés, après des périodes respectives de 6, 9 et 12 jours ne diffèrent pas significativement les uns des autres. On peut donc retenir de cette approche que la répartition de l'eau dans l'échantillon ne se modifie plus sensiblement après six jours au maximum, du moins quant à l'hydrodynamique de la seule fraction fine.

Enfin, les pesées préliminaire et finale des échantillons humidifiés disposés dans leur boîte munie de couvercle et sous double emballage plastique montrent que les pertes par évaporation sont négligeables et ceci, même après une période de 12 jours.

Tout ceci justifie la procédure adoptée. Il reste à préciser que l'eau d'humidification a été additionnée d'une faible proportion de sulfate de cuivre afin d'éviter le développement de moisissures ou d'algues susceptibles de perturber les échanges d'eau entre la fraction fine et les gravillons.

4.2. Les résultats

4.2.1. Indications générales

Les tableaux 19a à 19c regroupent les résultats obtenus pour les catégories IIa, V et VI de gravillons. Seule la classe granulométrique 5-10 mm a été retenue pour chacune de ces trois catégories car elle regroupe les dimensions les plus fréquentes de ces éléments grossiers. Enfin dans chaque cas, les données (trois répétitions) dont la valeur médiane est soulignée, concernent le taux pondéral (Tp), le taux volumique (Tv - calculé à partir du précédent) d'eau retenue par les gravillons et le taux correspondant de saturation de la porosité ouverte (Ts). C'est sur les valeurs médianes que nous nous fondons pour ce qui suit. Précisons que face à chacune de ces valeurs médianes, dans une colonne située à gauche, est mentionnée la valeur du pF à laquelle s'est stabilisée l'humidité de matériau fin au terme de l'expérimentation. Il serait en effet erroné de se fonder sur le pF théorique correspondant à la proportion d'eau apportée au matériau fin en début de manipulation, puisqu'une partie en a été absorbée par les gravillons.

A titre d'approche de la précision de la méthode, les écarts relatifs ont été calculés pour les valeurs de Ts. Ce paramètre est en effet le plus intéressant en la matière puisqu'il intègre les valeurs de la porosité ouverte et celles de l'eau absorbée au contact du matériau fin plus ou moins humide. Ces écarts ne dépassent pas 16 % (valeur maxima de 15,2 % pour le pF 4.2) et leur valeur moyenne se situe entre 0,8 % et 3,0 %, décroissant par ailleurs assez régulièrement des pF les plus élevés vers les plus faibles. Cet ensemble d'indications nous autorisent à souligner que les résultats obtenus sont répétitifs et présentent une cohérence assez remarquable du fait, en particulier, que la variabilité est fonction directe de la valeur du pF du matériau fin.

4.2.2. Signification des résultats

Pour chacun des trois types de gravillons soumis à l'expérimentation, les données (valeurs médianes des trois répétitions) ont été présentées sous forme de graphiques qui traduisent les liaisons entre les modifications d'humidité de ces éléments grossiers et les valeurs du pF du matériau fin (fig. 4).

Pourcentage volumique d'eau absorbée par les gravillons : Tv

La figure 5 regroupe les droites de régression dont l'équation a été calculée pour préciser les liaisons ressortant des graphiques qui viennent d'être évoqués. Ceux-ci nous indiquent que la liaison négative entre les valeurs de Tv et pF est linéaire mais présente deux modalités de part et d'autre des pF 3.1 et 3.7 environ selon le type de gravillons. Pour les valeurs supérieures, la décroissance de Tv

Type de terre fine	NA ₁				S ₁				NB ₂				NA ₂				T ₁				T ₃			
Taux d'argile (%)	11.4				14.5				27.2				29.5				40.2				51.6			
Durée de contact	PF	TP	TV	TS	PF	TP	TV	TS	PF	TP	TV	TS	PF	TP	TV	TS	PF	TP	TV	TS	PF	TP	TV	TS
12 j.	4.215	2.36 <u>2.45</u> 2.63	7.25 <u>7.53</u> 8.08	76.6 <u>79.6</u> 85.4	4.205	2.25 <u>2.29</u> 2.13	6.92 <u>7.04</u> 8.70	73.2 <u>74.4</u> 93.0	4.101	2.32 <u>2.35</u> 2.46	7.13 <u>7.22</u> 7.56	75.3 <u>76.4</u> 79.9	4.586	2.31 <u>2.35</u> 2.37	7.10 <u>7.22</u> 7.29	75.1 <u>76.4</u> 77.0	4.296	2.07 <u>2.30</u> 2.31	6.36 <u>7.07</u> 7.10	67.2 <u>74.7</u> 75.1	1.430	2.26 <u>2.30</u> 2.30	6.95 <u>7.07</u> 7.07	73.5 <u>74.7</u> 74.7
12 j.	3.644	2.47 <u>2.64</u> 2.76	7.59 <u>8.12</u> 8.48	80.2 <u>85.8</u> 89.6									4.195	2.71 <u>2.74</u> 2.76	8.33 <u>8.42</u> 8.48	88.1 <u>89.0</u> 89.7	3.617	2.57 <u>2.60</u> 2.63	7.90 <u>7.92</u> 8.08	83.5 <u>84.5</u> 85.5				
8 j.	3.494	2.65 <u>2.67</u> 3.08	8.76 <u>8.82</u> 9.47	92.6 <u>93.2</u> 100.1	3.242	2.52 <u>2.93</u> 3.12	7.75 <u>9.01</u> 9.59	81.9 <u>95.2</u> 101.4	3.032	2.73 <u>2.77</u> 2.84	8.39 <u>8.51</u> 8.73	88.7 <u>90.0</u> 92.3	3.275	2.69 <u>2.89</u> 3.05	8.27 <u>8.88</u> 9.38	87.4 <u>93.9</u> 99.2	3.464	2.76 <u>2.94</u> 3.24	8.48 <u>9.04</u> 9.96	89.7 <u>95.5</u> 105.3	1.748	2.76 <u>2.92</u> 3.08	8.48 <u>8.98</u> 9.47	89.7 <u>94.9</u> 100.1
8 j.	3.472	2.66 <u>2.93</u> 3.17	8.79 <u>9.01</u> 9.74	92.9 <u>95.2</u> 103.0									3.260	2.93 <u>2.95</u> 2.97	9.01 <u>9.07</u> 9.13	95.2 <u>95.9</u> 96.5	3.063	2.72 <u>2.84</u> 2.94	8.36 <u>8.73</u> 9.04	88.4 <u>92.3</u> 95.6				
4 j.	3.039	2.94 <u>2.95</u> 2.98	9.04 <u>9.07</u> 9.16	95.6 <u>95.9</u> 96.8									2.640	2.98 <u>2.98</u> 3.14	9.16 <u>9.16</u> 9.65	96.8 <u>96.8</u> 102.0	2.860	2.95 <u>3.06</u> 3.07	9.07 <u>9.41</u> 9.44	95.9 <u>99.4</u> 98.8				
4 j.	2.257	2.89 <u>2.99</u> 3.01	8.88 <u>9.19</u> 9.25	93.9 <u>97.1</u> 97.8	2.100	3.07 <u>3.08</u> 3.10	9.44 <u>9.47</u> 9.53	99.8 <u>100.1</u> 100.7	2.042	3.07 <u>3.15</u> 3.31	9.44 <u>9.68</u> 10.17	99.8 <u>102.3</u> 107.5	2.160	2.93 <u>3.13</u> 3.43	9.01 <u>9.62</u> 10.54	95.2 <u>101.7</u> 111.4	2.133	3.01 <u>3.05</u> 3.12	9.25 <u>9.38</u> 9.59	97.8 <u>99.2</u> 101.4	2.071	2.98 <u>2.99</u> 3.03	9.16 <u>9.19</u> 9.31	96.8 <u>97.2</u> 98.5

TABLEAU 19a: Rétenion en eau des gravillons en contact avec la terre fine de diverses textures portée à des teneurs en eau différentes.

a) Concrétions semipisolitiques IIa : 5-10 mm
densité apparente d_a : 3.074
porosité ouverte po : 9.46

TV : teneur pondérale
TP : teneur volumique
TS : degré de saturation.

Type de terre fine	NA ₁				S ₁				NB ₂				NA ₂				T ₁				T ₃			
Taux d'argile (%)	11.4				14.5				27.2				29.5				40.2				51.6			
Durée de contact	PF	TP	TV	TS	PF	TP	TV	TS	PF	TP	TV	TS	PF	TP	TV	TS	PF	TP	TV	TS	PF	TP	TV	TS
12 j.	4.207	<u>6.52</u> <u>6.72</u> 7.00	<u>12.74</u> <u>13.13</u> 13.68	<u>37.7</u> <u>38.8</u> 40.5	4.230	<u>6.89</u> <u>7.05</u> 7.22	<u>13.46</u> <u>13.78</u> 14.11	<u>39.8</u> <u>40.8</u> 41.7	4.091	<u>7.84</u> <u>8.00</u> 8.13	<u>15.32</u> <u>15.63</u> 15.89	<u>45.3</u> <u>46.2</u> 47.0	4.545	<u>6.74</u> <u>6.83</u> 7.27	<u>13.17</u> <u>13.35</u> 14.21	<u>38.9</u> <u>39.5</u> 42.0	4.545	<u>7.30</u> <u>7.51</u> 8.06	<u>14.26</u> <u>14.67</u> 15.75	<u>42.2</u> <u>43.4</u> 46.6	4.340	<u>5.40</u> <u>5.54</u> 6.02	<u>10.55</u> <u>10.83</u> 11.76	<u>31.2</u> <u>32.0</u> 34.8
12 j.	3.682	<u>19.92</u> <u>11.46</u> 11.65	<u>21.34</u> <u>22.39</u> 22.76	<u>63.1</u> <u>66.2</u> 67.3									4.075	<u>12.69</u> <u>12.95</u> 12.97	<u>24.80</u> <u>25.30</u> 25.34	<u>73.3</u> <u>74.8</u> 74.9	4.308	<u>10.69</u> <u>10.77</u> 11.15	<u>20.89</u> <u>21.04</u> 21.79	<u>61.8</u> <u>62.2</u> 64.4				
8 j.	3.544	<u>13.05</u> <u>13.17</u> 13.12	<u>25.50</u> <u>25.60</u> 25.64	<u>75.4</u> <u>75.7</u> 75.8	3.414	<u>13.12</u> <u>13.29</u> 13.66	<u>25.64</u> <u>25.97</u> 26.69	<u>75.8</u> <u>76.8</u> 78.9	3.021	<u>14.01</u> <u>14.05</u> 14.89	<u>27.38</u> <u>27.45</u> 29.10	<u>89.9</u> <u>81.2</u> 86.0	3.316	<u>13.95</u> <u>14.15</u> 14.61	<u>27.26</u> <u>27.65</u> 28.55	<u>80.6</u> <u>81.8</u> 84.4	3.671	<u>11.28</u> <u>12.08</u> 12.40	<u>22.04</u> <u>23.60</u> 24.23	<u>65.2</u> <u>69.8</u> 71.6	3.352	<u>8.53</u> <u>9.00</u> 9.06	<u>16.68</u> <u>17.59</u> 17.70	<u>49.3</u> <u>52.0</u> 52.3
8 j.	3.480	<u>14.03</u> <u>14.41</u> 14.65	<u>27.53</u> <u>28.14</u> 28.63	<u>81.4</u> <u>83.2</u> 84.7									3.192	<u>14.46</u> <u>14.90</u> 15.10	<u>28.25</u> <u>29.11</u> 29.51	<u>83.5</u> <u>86.1</u> 87.2	3.021	<u>12.40</u> <u>12.45</u> 13.02	<u>24.23</u> <u>24.33</u> 25.44	<u>71.6</u> <u>71.9</u> 75.2				
4 j.	2.348	<u>15.01</u> <u>15.21</u> 15.45	<u>29.33</u> <u>29.72</u> 30.19	<u>86.7</u> <u>87.9</u> 89.3									2.700	<u>14.71</u> <u>15.44</u> 15.68	<u>28.74</u> <u>30.17</u> 30.64	<u>85.0</u> <u>89.2</u> 90.6	2.826	<u>13.41</u> <u>13.76</u> 13.93	<u>26.20</u> <u>26.69</u> 27.22	<u>77.5</u> <u>78.9</u> 80.5				
4 j.	2.260	<u>16.93</u> <u>17.03</u> 17.23	<u>33.20</u> <u>33.34</u> 33.78	<u>98.2</u> <u>98.6</u> 99.9	2.146	<u>17.09</u> <u>17.16</u> 17.26	<u>33.39</u> <u>33.53</u> 33.73	<u>98.7</u> <u>99.1</u> 99.7	2.077	<u>17.20</u> <u>17.24</u> 17.30	<u>33.61</u> <u>33.69</u> 33.80	<u>99.4</u> <u>99.6</u> 100.0	2.159	<u>17.08</u> <u>17.22</u> 17.37	<u>33.37</u> <u>33.65</u> 33.94	<u>98.7</u> <u>99.5</u> 100.4	2.142	<u>17.08</u> <u>17.18</u> 17.22	<u>33.37</u> <u>33.57</u> 33.65	<u>98.7</u> <u>99.3</u> 99.5	2.07	<u>17.00</u> <u>17.03</u> 17.17	<u>32.22</u> <u>33.28</u> 33.55	<u>98.2</u> <u>98.4</u> 99.2

TABLEAU 19 b : Pseudoconcrétions V : 5-10 mm
densité apparente da : 1.954
porosité ouverte po : 33.82

Type de terre fine	NA ₁				S ₁				NB ₂				NA ₂				T ₁				T ₃			
Taux d'argile (%)	11.4				14.5				27.2				29.5				40.2				51.6			
Durée de contact	PF	TP	TV	TS	PF	TP	TV	TS	PF	TP	TV	TS	PF	TP	TV	TS	PF	TP	TV	TS	PF	TP	TV	TS
12 j.	4.213	5.81	13.06	58.1	4.241	6.20	13.96	62.1	4.160	6.72	15.13	67.4	4.676	6.20	13.96	62.1	4.449	5.09	12.81	57.0	4.393	5.31	11.73	52.2
		5.81	13.19	58.7		6.22	14.00	62.3		7.03	15.82	70.4		6.29	14.16	63.0		6.28	14.14	63.0		5.71	12.85	57.2
		6.41	14.52	64.6		6.49	14.61	65.0		7.09	15.96	71.1		6.74	15.17	67.5		6.70	15.08	67.1		5.78	12.97	57.7
12 j.	3.688	7.31	16.48	73.4									4.011	7.24	16.30	72.6	4.279	6.28	14.14	63.0				
		7.51	16.88	75.2										7.65	17.22	76.7		6.91	15.55	69.2				
		7.51	17.02	75.8										7.95	17.90	79.6		6.93	15.60	69.5				
8 j.	3.467	8.12	18.28	81.4	2.935	7.24	16.30	72.6	3.016	8.07	18.17	80.9	3.331	8.29	18.66	83.1	3.437	7.98	17.96	80.0	3.407	6.33	15.60	69.5
		8.31	18.71	83.3		7.53	16.95	75.5		8.79	19.79	88.1		8.38	18.86	84.0		8.02	18.05	80.4		7.10	15.98	71.1
		8.51	19.34	86.1		7.62	17.15	76.4		9.02	20.30	90.4		8.63	19.43	86.5		8.36	18.82	83.8		7.54	16.97	75.6
8 j.	3.416	8.21	18.46	82.2									3.236	7.87	17.72	79.9	3.139	8.00	18.01	80.2				
		8.71	19.58	87.2										8.64	19.45	86.6		8.12	18.28	81.4				
		8.71	19.78	88.0										8.91	20.06	89.3		8.15	18.35	81.7				
4 j.	3.058	8.61	19.38	86.3									2.707	8.17	18.39	81.9	2.799	8.15	18.35	81.7				
		8.61	19.43	86.5										9.06	20.39	90.8		8.32	18.73	83.4				
		8.71	19.58	87.2										9.61	21.63	96.3		8.36	18.82	83.8				
4 j.	2.246	8.61	19.52	86.9	2.117	9.77	21.99	97.9	2.105	9.66	21.74	96.8	2.191	9.39	21.14	94.1	2.138	8.63	19.43	86.5	2.050	9.44	21.25	94.6
		9.11	20.62	91.8		9.77	21.99	97.9		9.92	22.33	99.4		9.92	22.33	99.4		9.55	21.50	95.7		9.55	21.50	95.7
		9.11	20.69	92.1		9.84	21.15	98.6		9.94	22.37	99.6		10.95	24.65	109.8		9.72	21.88	97.4		9.64	21.70	96.6

TABLEAU 19 C : Concrétions d'aspect rugueux VI : 5-10 mm

densité apparente da : 2.251

porosité ouverte po : 22.46

Fig. 4 : Evolution du taux volumique d'eau absorbée par les gravillons en contact avec le matériau fin en fonction du taux d'argile

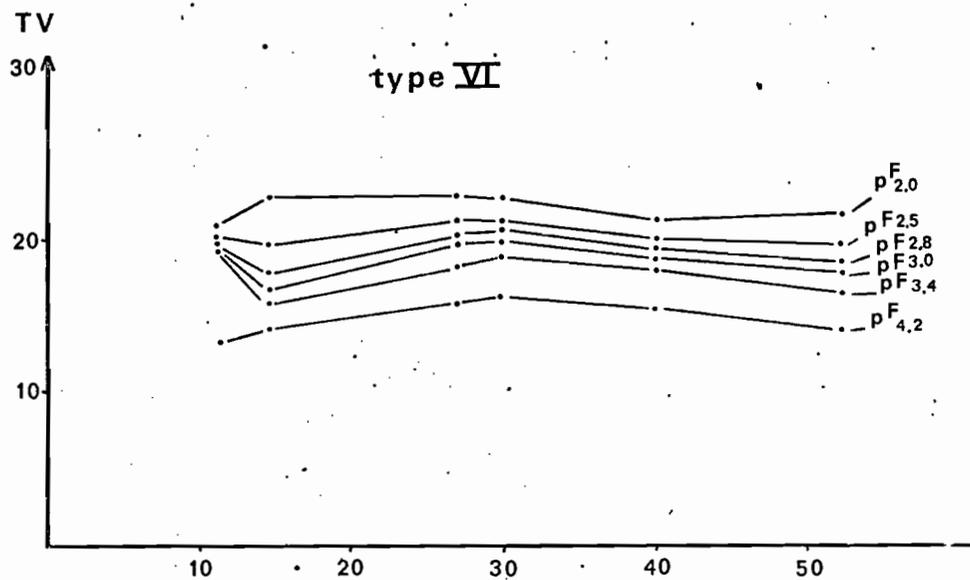
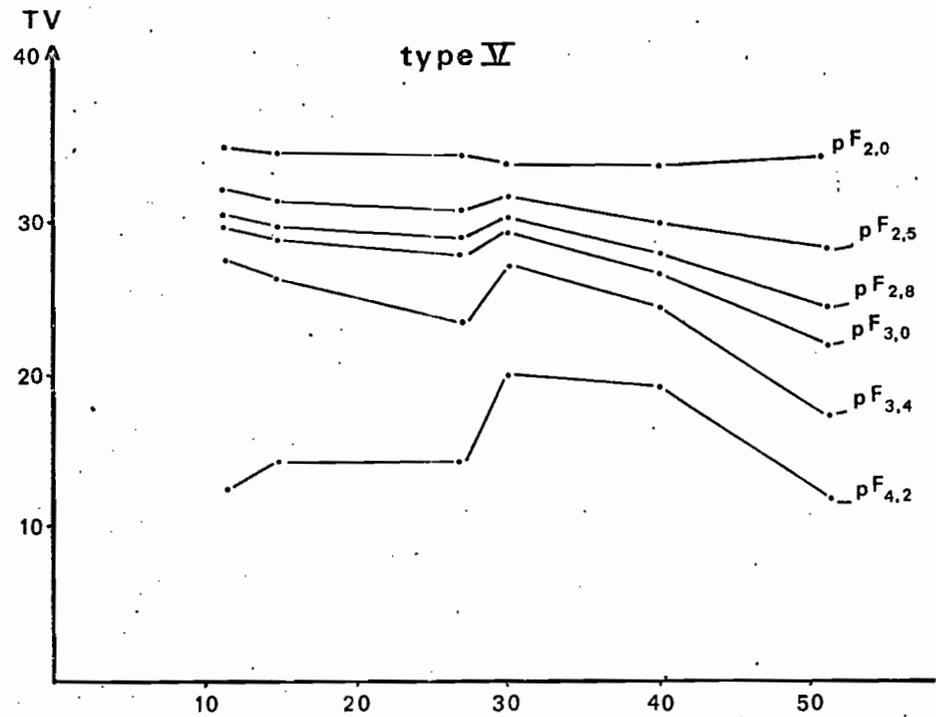
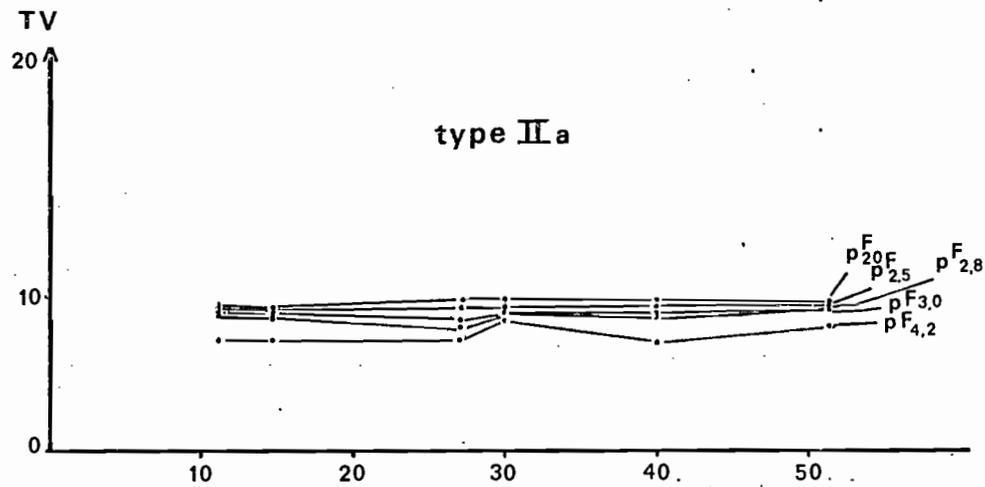
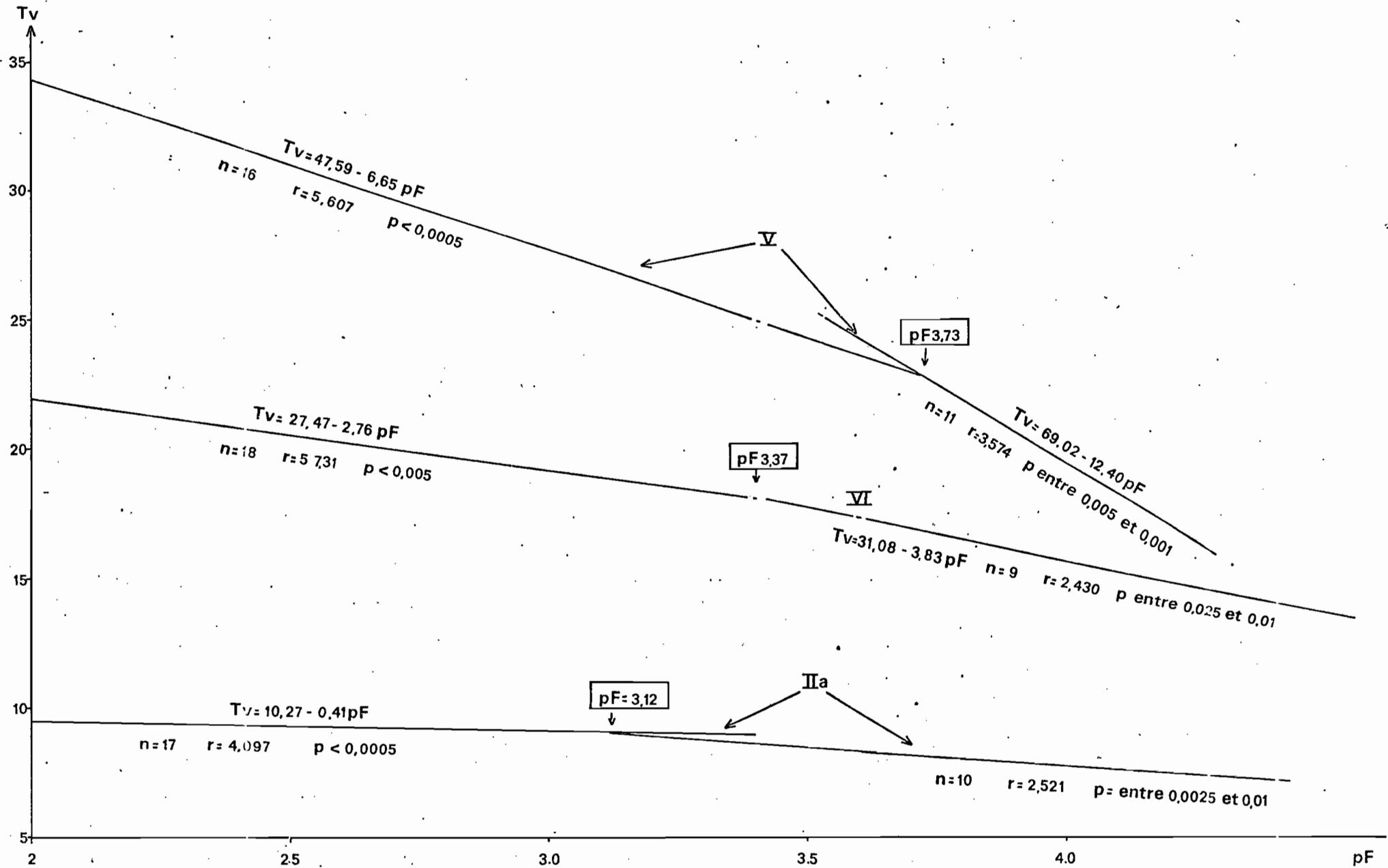


FIG.5 : DROITES DE REGRESSION DE LA TENEUR VOLUMIQUE D'EAU RETENUE PAR LES GRAVILLONS EN FONCTION DU pF



est plus rapide que les valeurs inférieures : elle est à peu près du double pour les gravillons de type V, du triple pour ceux du type IIa et multiplié par 1,4 pour le type VI. Les trois types de gravillons apparaissent présenter deux classes de pores, les premiers se saturant à des pF plus faibles que les seconds, c'est à dire présentant un diamètre minimum plus élevé. Le fait que IIa se distingue, en la matière, d'une façon très sensible des deux autres (V et VI) correspond par ailleurs à ce que nous pouvions supposer de la comparaison des valeurs respectives de la densité apparente, de la porosité ouverte, de l'état de surface et de leur structure en général. Tous ces éléments concordent pour traduire un colmatage important des vides et en particulier la réduction du diamètre des pores.

Par ailleurs, on note que la valeur des deux coefficients de régression varie en fonction directe de celle de la porosité ouverte respective des gravillons. Enfin nous remarquons que les points d'intersections des deux droites de régression obtenues pour chaque type de gravillon correspond à une valeur de pF qui est également la fonction directe de celle de la porosité ouverte respective : 3.1 pour le type IIa, 3.4 pour le type VI et 3.7 pour le type V.

Toutes ces indications convergent d'une façon assez remarquable pour que l'on puisse souligner la cohérence des données obtenues par l'expérimentation, ceci malgré les risques d'erreurs inhérentes à la manipulation.

Nous retiendrons donc, en accordant à ces valeurs, une probabilité de vérification relativement élevée que l'eau retenue par les gravillons varie en pourcentage volumique, lorsque le pF de la fraction varie de 2.0 à 4.2 : de 9.4 à 7.5, de 21.9 à 15.0 et de 34.3 à 16.9 % respectivement pour les types IIa, V et VI (tableau 20).

Mais dans la "recharge" de l'eau des gravillons, le pF n'est pas le seul paramètre de la fraction fine à intervenir. Comme le montre les trois séries de courbes de la figure 4 concernant respectivement les divers types de gravillons, le pourcentage volumique d'eau absorbée à partir de la fraction fine varie pour un même pF, selon la texture de celle-ci. Cette variation est en général peu accusée pour le type IIa mais l'est sensiblement pour le type V, le type VI présentant comme précédemment un comportement intermédiaire. D'autre part cette variation en fonction de la texture est d'autant plus accusée que le pF est élevé, se traduisant, par exemple, par des rapports de valeurs extrêmes de 1.72 et 1.24 pour le pF 4.2 et de 1.03 et 1.10 pour le pF 2.0 respectivement pour les types V et VI. Nous retiendrons, par ailleurs, des données qui ont abouti à ces graphes, que pour le type V de gravillon, le plus fort pourcentage d'eau est absorbé à partir du matériau NA₂ (29,5 % d'argile) apparaît le plus favorable. Inversement, toujours pour les gravillons du type V, le plus faible pourcentage d'eau est absorbé à partir du matériau les plus argileux (T₃ - 51,6 % principalement), ceci à tous les pF. D'un point de vue plus général, il apparaît que du type V au type VI puis au type IIa, l'absorption maxima d'eau s'effectue, pour un pF donnée, à partir de matériaux fins qui sont en moyenne, de plus en plus argileux. On retrouve donc ici une liaison avec les valeurs respectives de la porosité ouverte.

Taux de saturation de la porosité ouverte Ts

Comme pour le paramètre précédent, la figure 6 regroupe les droites de régression qui expriment pour chacun des trois types de gravillons, le taux de saturation Ts de la porosité ouverte en fonction du pF de matériau fin. Précisons au passage que ce paramètre présente tout son intérêt dans ce qu'il traduit la facilité avec laquelle la porosité des gravillons se remplit d'eau dans les diverses conditions physiques offertes par le matériau fin.

Nous noterons, tout d'abord, que pour chaque type de gravillon, nous retrouvons, comme pour Tv, qu'une liaison négative linéaire apparaît relier Ts à pF selon deux modalités. On passe de l'une à l'autre de celles-ci pour des valeurs de pF qui sont de 3.21 pour le type IIa de gravillon, de 3.38 pour le type VI et de 3.42 pour le type V, valeurs qui s'ordonnent en fonction directe de celles que nous avons obtenues pour la porosité ouverte.

Nous retiendrons pour l'essentiel que la porosité ouverte pour ces trois types de gravillons est pratiquement saturée lorsque le pF du matériau fin est amené à pF 2.0. Nous noterons cependant que ce taux de saturation est de 93,98 et 100% respectivement pour les types V, VI et IIa, ces valeurs s'ordonnent comme celles de la porosité ouverte respective. Ces différences s'accusent à mesure que le pF du matériau fin croît et à pF 4.2 nous avons pour Ts des valeurs respectives de 50, 67 et 79 %. L'ensemble

IIa

Tv

Matériaux fins	NA ₁	S ₁	NB ₂	NA ₂	T ₁	T ₃	
4.2	7.16	7.06	7.10	8.41	7.02	7.71	7.41 ⁽¹⁾ (7.13) ⁽²⁾
3.4	8.93	8.69	8.06	8.91	8.59	9.02	8.70 (8.80)
3.0	9.04	9.05	8.55	9.10	9.05	9.07	8.98 (9.05)
2.8	9.09	9.07	8.78	9.20	9.07	9.10	9.05 (9.06)
2.5	9.17	9.11	9.14	9.34	9.40	9.12	9.21 (9.16)
2.0	9.30	9.17	9.73	9.58	9.60	9.19	9.43 (9.44)

V

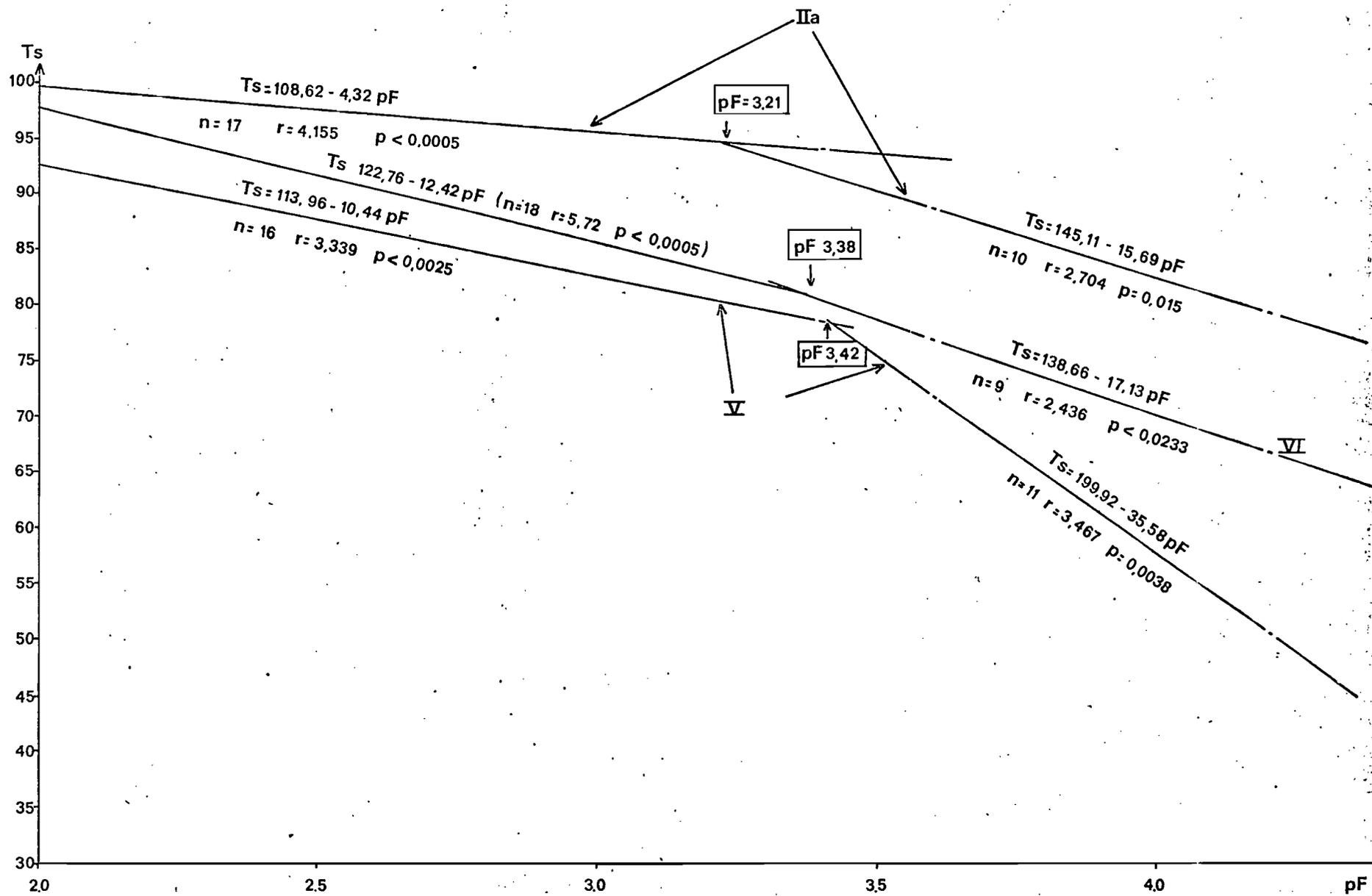
4.2	12.35	14.20	14.20	20.28	19.13	11.78	15.32 (14.20)
3.4	27.46	26.06	23.25	27.12	23.68	17.26	24.14 (24.87)
3.0	29.51	28.43	22.60	29.46	26.43	21.90	27.22 (28.02)
2.8	30.53	29.63	28.90	30.32	27.87	24.37	28.6 (29.26)
2.5	32.10	31.24	30.86	31.60	29.96	28.30	30.71 (31.14)
2.0	34.66	34.40	34.17	33.70	33.55	34.23	34.12 (34.19)

VI

4.2	13.00	14.10	15.70	16.15	15.35	13.38	14.61 (14.72)
3.4	19.20	15.88	18.47	18.76	17.80	16.01	17.69 (18.13)
3.0	19.60	16.78	19.82	19.90	18.82	17.63	18.75 (19.21)
2.8	19.81	17.75	20.38	20.68	19.31	18.44	19.35 (19.56)
2.5	20.12	19.60	21.23	21.20	20.02	19.66	19.48 (19.84)
2.0	20.63	22.68	22.64	22.52	21.24	21.70	21.90 (22.11)

Tableau 20 : Tableau mentionnant les taux volumiques d'eau, les valeurs moyenne (1) et médiane (2), toutes classes texturales confondues, des gravillons en contact avec les matériaux fins.

FIG.6 : DROITES DE REGRESSION DU TAUX DE SATURATION DE LA POROSITE OUVERTE EN FONCTION DU pF



de ces données concordent avec celles qui concernent le paramètre étudié précédemment. Elles nous permettent de souligner que, d'une part, chaque type de gravillons présente deux classes diamétrales de pores nettement distinctes et d'autre part les valeurs moyennes de ces porosités croissent du type IIa au type VI puis V, c'est-à-dire en fonction directe de la porosité ouverte respective.

Enfin, nous devons prendre en compte, pour Ts comme pour Tv, l'influence du taux d'argile du matériau fin, pour un pF donné, comme le montre l'ensemble des graphes de la figure 7. Nous notons, pour exemple, que pour le type V de gravillons, Ts à pF 4.2 et 3.4, atteint ses valeurs maxima (respectivement 60% et 80%) quand le matériau fin est argilo-sableux (NA₂ - 29,5% d'argile). Cette influence est cependant modulée en fonction du pF, puisque pour les trois types de gravillons étudiés, le rapport entre les valeurs maxima et minima décroît, en règle très générale, régulièrement des pF les plus élevés vers les plus faibles. Elle est modulée également en fonction du type de gravillon, ce rapport, pour pF 3.4 par exemple, étant respectivement de 1,57, 1,18 et 1,08 pour les types V, VI et IIa. Les graphes de la figure 7 nous indiquent enfin, que la fonction qui relie Ts au pourcentage d'argile du matériau fin est complexe et spécifique de chaque type de gravillons. Pour le type V par exemple, les valeurs à pF 4.2 passent par un maximum très accusé pour les matériaux argilo-sableux (NA₂ 29,5) et argileux T₁ (40,2%). Pour les pF 3.4 et 3.0 nous avons deux maxima, l'un toujours pour le matériau le plus sableux (NA₁ - 11,4%). Pour les pF 2.8 et 2.5, c'est pour cette dernière composition texturale que le maximum est plus accusé. Enfin à pF 2.0, toujours pour le type V de gravillon, la porosité ouverte est saturée à 100% ou presque, quelle que soit la texture du matériau fin. Pour dégager l'essentiel de cet ensemble de graphes, nous soulignerons que les matériaux argilo-sableux (NB₂ - 27,2% et NA₂ 29,5 d'argile) et dans une moindre mesure, le matériau le plus sableux (NA₁ - 11,4%) apparaissent les plus favorables à l'échange d'eau vers les gravillons principalement ceux du type V et VI et inversement pour les plus argileux.

En conclusion, nous noterons que proportionnellement à leur volume et à celui de leur porosité ouverte, l'importance du stock d'eau que peuvent constituer les gravillons dépend :

- . bien entendu, de la structure de ces éléments grossiers, en particulier de leur état de surface, et des caractères de leur porosité ouverte, du pF présenté par le matériau fin ;
- . mais également du taux d'argile de celui-ci et vraisemblablement des proportions de ses diverses fractions granulométriques.

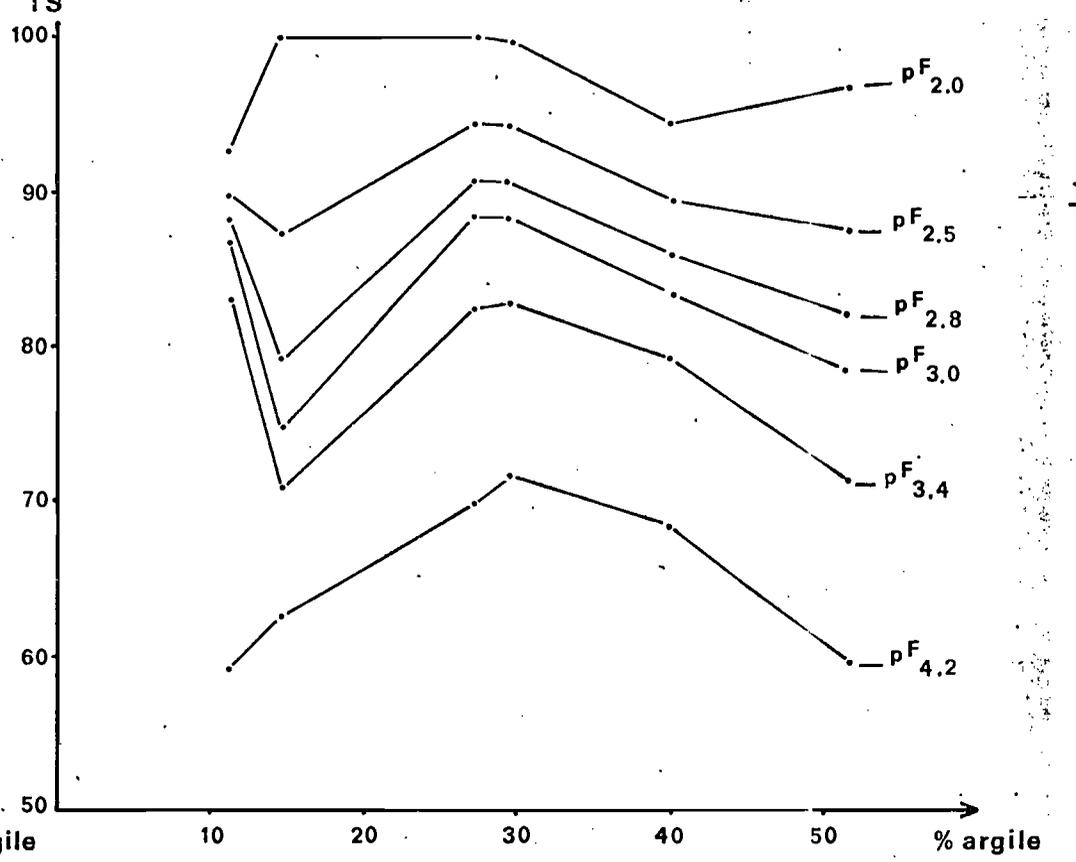
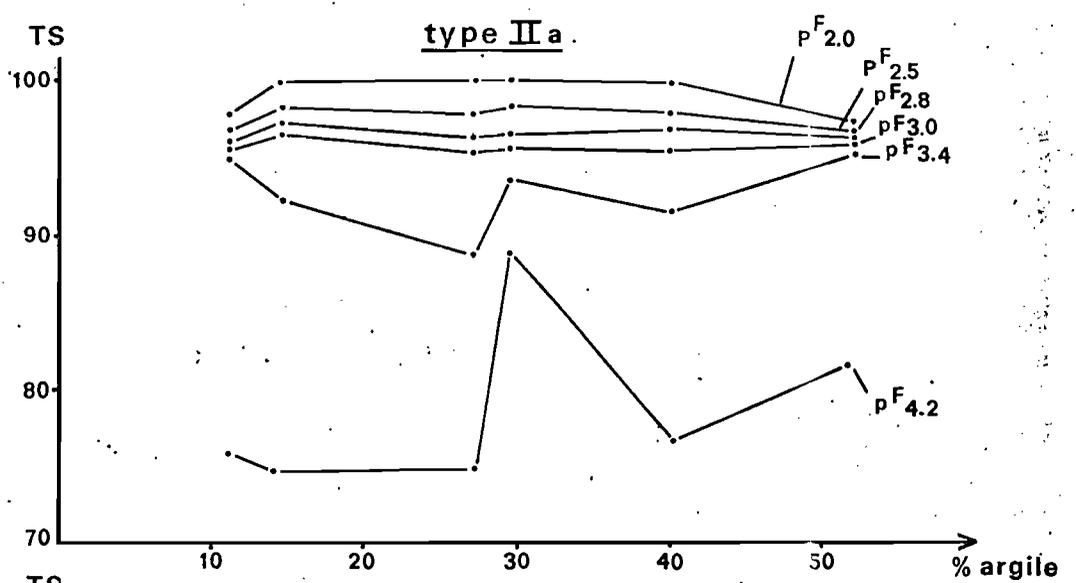
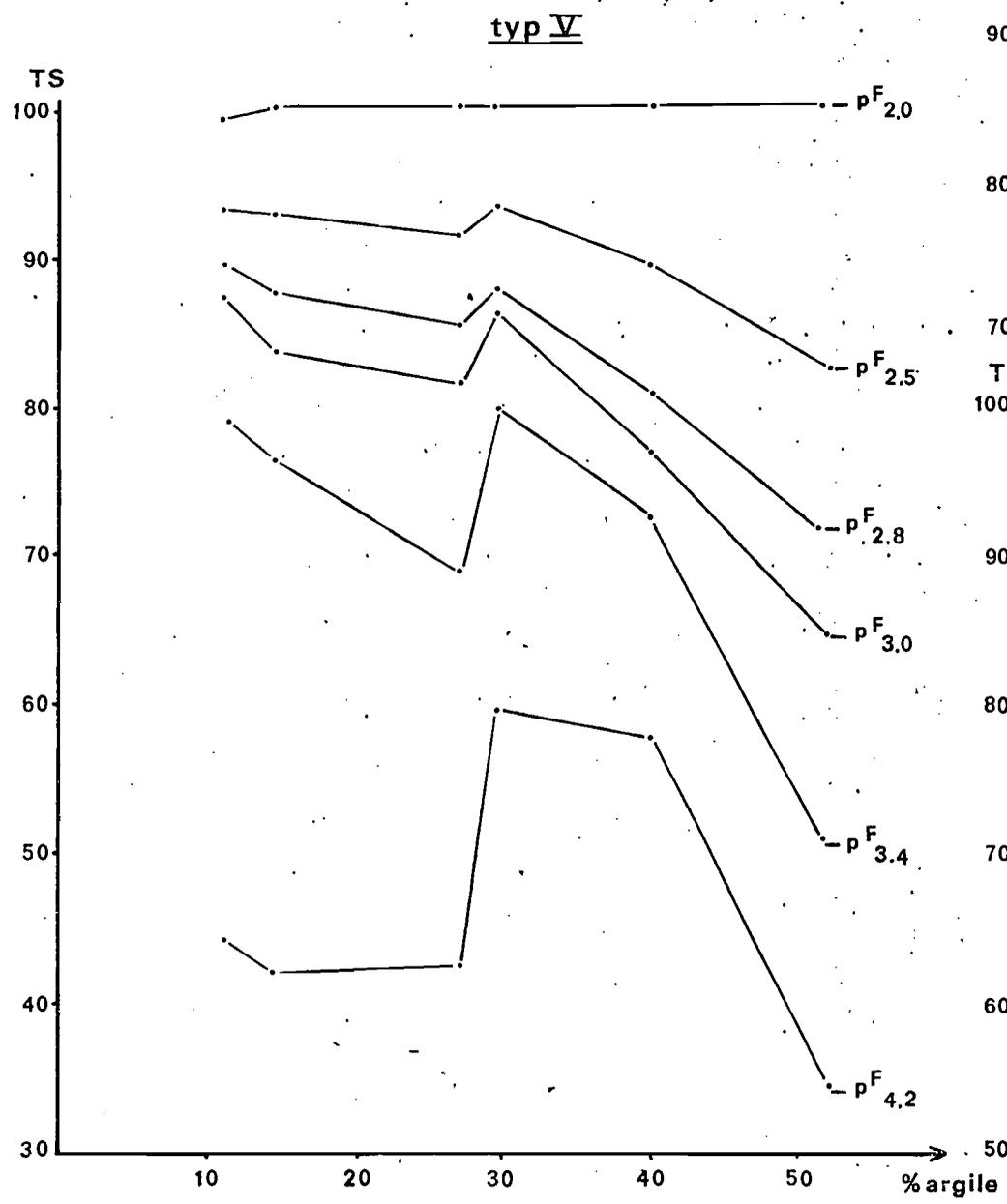
5. RESTITUTION DE L'EAU DES GRAVILLONS A LA FRACTION FINE

5.1. Méthodologie

Le principe adopté est, pour l'essentiel, de mettre des gravillons saturés d'eau au contact d'un matériau fin préalablement amené à un pF élevé, ceci pendant un laps de temps au-delà duquel aucun départ sensible ne s'effectue à partir des éléments grossiers. En plus de la durée, plusieurs facteurs interviennent dans cette expérimentation : le type morphologique, la granulométrie et le pourcentage de gravillons, la relation entre les valeurs du pF et les pourcentages d'humidité de la fraction fine, relation dépendant de la texture de celle-ci et de la minéralogie des argiles. En fait dans la présente étude, le critère minéralogique de la fraction argileuse n'a pas été pris en compte, étant donné la quasi-totalité de la kaolinite dans les sols représentatifs qui ont fourni les échantillons. L'expérimentation a donc porté sur diverses combinaisons des conditions suivantes :

- gravillons

- . Type morphologique : les cinq types morphologiques retenus dans la partie consacrée à la rétention d'eau par les gravillons ont été repris ici (IIa, V et V', VI et VI').
- . Deux classes granulométriques ont été utilisées : 5-10 mm et 20-25 mm, de manière à faire intervenir l'influence de la surface spécifique.
- . Les proportions des gravillons, en pourcentage pondéral de l'ensemble qu'ils forment à l'état sec, sont de 20, 30, 40, 50 et 60%, ceci afin d'aboutir en fin d'expérimentation c'est-à-dire à l'équilibre, à une gamme diversifiée de valeurs du pF du matériau fin.



- matériau fin : trois catégories de matériau fin ont été utilisées dont le tableau 21 ci-dessous donne respectivement la composition granulométrique et les valeurs des pourcentages d'eau à divers pF.

Matériau fin	Argile	Limon fin	Limon grossier	Sables fins	Sables grossiers	Teneur en eau aux différents pF					
						2.0	2.5	2.8	3.0	3.4	4.2
NA ₁	11.4	6.8	3.7	11.2	66.8	18.18	12.97	11.96	10.92	10.09	3.97
NB ₂	27.8	8.5	3.5	8.8	51.4	26.91	18.14	17.15	16.16	14.66	13.04
T ₃	51.6	10.7	8.5	14.5	12.3	44.17	30.71	27.06	24.94	24.02	19.51

Tableau 21 : Composition granulométrique et humidités aux différents pF des matériaux fins NA₁, NB₂ et T₃.

Pour préciser le détail de la manipulation, les gravillons après avoir été pesés à l'état sec à l'air, sont immergés sous pressions de 200 millibars. Après quelques jours, ils sont retirés de l'eau et mélangés au matériau fin séché à l'air. Ils sont laissés en contact avec celui-ci pendant 3 jours dans une boîte métallique fermée hermétiquement pour éviter toute perte par évaporation. Au terme de ces trois jours, on prélève, pour en déterminer l'humidité, un échantillon de la terre fine dans la masse de laquelle étaient disposés les gravillons. Cependant ceux-ci restent dans tous les cas entourés d'une gangue qui est, dans la majorité des cas, plus humide que le reste du matériau fin ayant donné lieu au prélèvement déjà mentionné. On sépare donc cette gangue par broissage, et ceci le plus rapidement possible pour réduire les pertes par évaporation et on en détermine également le taux d'humidité.

La vitesse du passage au matériau fin de l'eau contenue dans les gravillons a été estimée pour les gravillons du type V. Pour ce faire trois durées de contact ont été adoptées : 1, 24 et 72 heures, ceci pour environ 52% de gravillons en pourcentage pondérale de l'ensemble. Les tableaux 22a et 22b donnent les variations d'humidité respectives pour ces trois temps de contact et pour les trois catégories de matériaux fins, ceci pour la gangue entourant les gravillons et pour le reste de la terre fine dans laquelle ceux-ci ont été disposés.

L'ensemble des données pour préciser la dynamique de ces échanges d'eau est incomplet en ce sens que la distance entre les prélèvements du matériau fin et les gravillons n'est pas précisée. On retiendra cependant que, avec ces 52% de gravillons, cette distance est, pour la gangue, en moyenne de l'ordre de 1 mm et pour le reste du matériau fin de 1 cm. Les principaux points qui peuvent se dégager sont les suivants :

- Dans le matériau fin, exceptée la gangue entourant les gravillons.
 - . La vitesse d'accroissement de l'humidité est très élevée dans la première heure de mise en contact puis diminue d'une manière très sensible et assez régulière. On peut noter, pour illustrer ce fait, que le gain d'humidité représente au terme de la première heure, 30% ou plus de celui que l'on note au bout de trois jours, et de 75 à 95% de ce dernier au terme du premier jour.
 - . Les valeurs correspondantes du pF s'abaissent en-dessous de 4,2 après 1 jour de mise en contact pour le matériau fin le moins argileux (11,4% d'argile) mais restent supérieures à cette valeur pour les autres matériaux.
- Dans la gangue qui adhère aux gravillons.
 - . Dans cette partie du matériau qui est en contact direct des gravillons, l'humidité atteinte au terme des différents laps de temps déjà mentionnés est, dans la quasi-totalité des cas, nettement plus élevée que dans le reste du matériau fin. Ne fait exception que le matériau le plus argileux (T₃) où le calcul du rapport des gains d'humidité respectifs de ces deux parties de la fraction fine, donne les valeurs de 1,1 au terme de 1 jour et de 0,82 au terme de 3 jours. Le fait que cette dernière valeur soit inférieure à l'unité est contraire aux lois de diffusion de l'eau puisqu'elle traduirait un transfert vers les zones les plus humides donc à pF plus faible. Nous devons donc y voir la conséquence d'erreurs inhérentes à la manipulation et en particulier dans l'évaporation au cours du broissage des gravillons effectué pour recueillir la gangue qui les recouvre. En définitive il est très probable que ce rapport soit égal à 1 au terme de 3 jours pour ce matériau argileux.

Matériau fin	Teneur initiale en eau	1 heure	1 jour	3 jours
NA ₁	0.69	2.06 pF > 4.2	4.16 P = 4.18	5.24 pF = 4.03
NB ₂	1.45	6.22 pF > 4.2	8.87 pF > 4.2	9.35 pF > 4.2
T ₃	2.58	6.18 pF > 4.2	11.03 pF > 4.2	12.07 pF > 4.2

Matériau fin	Teneur initiale en eau	1 heure	1 jour	3 jours
NA ₁	0.69	13.37 pF = 2.46	11.69 pF = 2.95	10.07 pF = 3.4
NB ₂	1.45	19.72 pF = 2.44	13.77 pF = 3.84	13.49 pF = 3.98
T ₃	2.58	22.06 pF = 3.75	11.85 pF > 4.2	10.36 pF > 4.2

TABLEAU 22 : Variation en fonction du temps de l'eau retenue par le matériau fin de textures diverses en contact avec les pseudoconcrétions (V) de taille comprise entre 5 et 10 mm.

Matériau fin	Teneur initiale en eau	1 heure	1 jour	3 jours
NA ₁	0.69	14.06 pF = 2.40	14.13 pF = 2.39	15.52 pF = 2.26
NB ₂	1.45	21.17 pF = 2.35	21.42 pF = 2.79	22.20 pF = 2.80
T ₃	2.58	24.64 pF = 3.13	27.24 pF = 2.79	27.07 pF = 2.80

TABLEAU 23 : Teneur en eau de la terre fine constituant la gangue des gravillons isolés après le mélange : type morphologique V.

- . Les valeurs de pF atteintes après ces gains d'humidité de la gangue se situe nettement en-dessous de 4.2 pour les matériaux sableux et argilo-sableux (NA₁ et NB₂) même au terme de 3 jours de contact. Elles redeviennent par contre supérieures à cette valeur avant 24 heures pour le matériau argileux (T₃) le taux d'argile exerçant une influence positive sur la vitesse de diffusion vers la fraction fine.
- . Ceci étant, au fur et à mesure que l'ensemble de la matrice se réhumidifie, le taux d'humidité de la gangue décroît, ce qui permet de tracer le schéma de l'échange d'eau des gravillons vers la matrice à l'état sec à l'air de la façon suivante :
 - * premier stade : passage très rapide d'une importante parité de l'eau retenue par les gravillons dans une zone externe concentrique de faible épaisseur, zone qui acquiert ainsi une humidité élevée,
 - * puis, second stade pendant lequel l'eau de cette zone diffuse plus lentement dans l'ensemble du matériau fin dont même en présence de 50% pondéraux de gravillons amenés à saturation le pF reste, dans la majorité des cas, supérieur à 4,2 pour les matériaux argilo-sableux ou argileux.

Enfin, à titre exploratoire, puisque l'on s'écarte ici des conditions naturelles, aussitôt après leur mélange avec le matériau fin, les gravillons saturés d'eau ont été séparés de ce dernier recouverts de la gangue qui se constitue immédiatement de leur contact et, soustraits à l'évaporation. Au bout du même laps de temps que précédemment (1 heure, 1 et 3 jours) le taux d'humidité de la gangue s'abaisse entre 2.3 et 2.4 au terme du premier jour de contact et entre 2.2 et 2.3 au terme du 3ème jour respectivement pour les matériaux sableux (NA₁) et argilo-sableux (NB₂). Il se stabilise à 2.8 environ dès la fin du premier jour pour le matériau argileux (T₃). L'ensemble de ces indications nous confirment que le passage de l'eau des gravillons au matériau fin qui est à leur contact est rapide et, permet, du moins d'une façon locale et temporaire (puisque cette zone n'est, dans les conditions naturelles qu'un relais d'échange vers l'ensemble de la matrice) au pF de s'abaisser à des valeurs compatibles avec l'absorption de l'eau par les plantes.

5.2. Signification des résultats

Les dernières indications posent, en fait, le problème du rapport quantitatif entre les gravillons et la fraction de terre fine. Il est, en effet, évident que plus la proportion des premiers est élevée, plus le taux de réhumidification de la seconde l'est également. C'est de ce point de vue que des mélanges à proportions diverses de gravillons saturés et de matériaux fins préalablement desséchés à l'air ont été soumis à l'expérimentation. Le tableau 24 en présente les résultats pour deux classes granulométriques 5-10 et 20-25 mm. Celles-ci ont concerné cinq valeurs de pourcentages pondéraux de gravillons (20, 30, 40, 50 et 60, par rapport à la totalité du matériau mis en oeuvre dans chaque cas) pour des types de gravillons déjà étudiés : IIa, V, V', VI et VI'. Précisons d'autre part, que la durée de contact a été de 3 jours.

Ce tableau présente en premier lieu l'accroissement d'humidité de la fraction fine, exceptée la gangue qui adhère aux gravillons. Les valeurs de cette première série sont d'autant plus inférieures à celle de l'apport total à la fraction fine que le taux de gravillons est élevé, puisque la proportion représentée par la gangue, croît. Il est cependant très difficile d'estimer cette proportion de gangue et donc le bilan pondéré de l'apport d'eau à l'ensemble du matériau fin. En effet, il est pratiquement impossible de récupérer la totalité de la partie plus humide adhérent à chacun des gravillons soumis à l'expérimentation dans un délai suffisamment court pour éviter une évaporation sensible. Et cette difficulté est insoluble quand il s'agit de gravillons de petites tailles et présentant des concavités. L'approche doit, dans ces conditions, se limiter à prélever rapidement, pour en déterminer l'humidité, un échantillon de la gangue de l'ensemble des gravillons et estimer au cours de cette opération l'épaisseur moyenne qu'elle représente autour de chacun des éléments grossiers du type V et de la classe dimensionnelle 5-10 mm ; la gangue, d'épaisseur estimée de 1 mm environ, représente entre 25 et 30% de l'ensemble quand il s'agit du matériau fin sableux (NA₁). La prise en compte dans le calcul du gain d'humidité de l'ensemble n'est pas concernée par la formation de la gangue. Pour le matériau argilo-sableux (NB₂), l'équilibre d'humidité entre la gangue et le reste de la fraction fine s'effectue plus rapidement (potentiel matriciel plus élevé). On note en effet par un calcul analogue au cas précédent, toujours avec les mêmes types et pourcentages de gravillons et pour un même temps de contact, que le gain d'humidité de l'ensemble du matériau fin, c'est-à-dire en tenant compte de la gangue est multiplié approximativement par un facteur correctif de 1,07 (contre 1,33 pour le matériau NA₁, sensiblement moins argileux). Enfin, pour le matériau argileux (T₃ - 51,6 d'argile), bien qu'une pellicule de matériau fin adhère aux gravillons, son taux d'humidité n'apparaît pas supérieur à celui du reste de la fraction fine. L'eau cédée par les gravillons s'est alors répartie dans ce délai de 3 jours, d'une façon encore plus uniforme.

Type de gravillons		V					V'					VI					VI'					IIa				
Taux pondéraux de gravillons % →		20	30	40	50	60	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60
NA ₁	eau %	2,02	3,09	4,25	4,66	6,48	0,72	1,23	1,54	2,16	2,75	0,98	1,51	2,13	2,74	3,66	0,65	0,94	1,13	2,06	2,82	0,04	0,23	0,35	0,40	0,57
	pF	>4,2	>4,2	4,07	3,97	3,78	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,15	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2
	Pr %	46,7	41,7	36,8	26,9	25,0	39,7	39,5	31,8	29,8	25,3	34,4	35,4	32,1	27,6	24,5	53,2	44,9	34,7	42,1	38,4	5,2	17,3	16,9	12,9	12,3
NB ₂	eau %	3,85	6,77	8,19	10,24	10,82	0,98	1,85	2,20	3,74	4,37	1,81	2,65	3,80	4,87	6,67	0,86	1,26	1,89	2,77	3,72	0,78	0,80	0,94	1,10	1,48
	pF	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2
	Pr %	89,0	91,3	71,0	59,2	41,7	54,0	59,5	45,5	51,5	60,2	72,8	62,2	57,3	49,0	44,7	70,3	60,1	58,0	56,6	50,1	100,0	60,2	45,5	35,5	31,8
T ₃	eau %	3,64	6,18	8,62	11,93	12,20	1,51	2,78	3,27	4,69	6,01	1,85	2,72	4,20	5,59	8,07	1,13	1,74	2,47	3,12	4,66	0,45	0,61	0,84	1,16	1,69
	pF	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2
	Pr %	84,1	83,3	74,7	68,9	47,0	71,1	89,3	67,6	64,6	55,2	74,4	63,8	63,4	56,2	54,1	92,4	83,0	75,8	63,8	63,5	58,1	45,9	40,6	37,4	36,3

Classe granulométrique : 20 - 25 mm

NA ₁	eau %	2,29	3,58	4,58	5,60	6,65	1,29	1,64	2,59	3,23	3,51	1,31	1,77	3,59	4,60	5,15	0,93	1,23	1,68	2,65	3,16
	pF	>4,2	4,16	4,03	3,90	3,76	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	4,17	>4,2	>4,2	4,16	4,03	3,96	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2
	Pr %	48,4	44,1	36,3	29,6	23,4	46,5	34,5	35,03	29,1	21,1	43,1	33,9	44,2	37,8	28,2	66,2	51,1	44,8	47,2	37,5
NB ₂	eau %	3,85	4,89	6,17	10,95	12,99	1,74	3,52	4,46	5,75	7,03	1,85	2,05	4,26	5,89	7,65	1,26	2,15	2,95	3,07	5,67
	pF	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	3,51	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2
	Pr %	81,3	60,2	48,9	57,8	45,7	62,8	74,1	60,3	51,8	42,3	60,8	39,3	52,5	48,1	41,9	89,7	89,3	78,7	54,6	63,3
T ₃	eau %	4,07	5,78	6,69	11,72	19,27	3,09	4,26	5,56	6,03	7,28	1,89	2,37	4,83	6,33	9,52	1,26	2,33	3,51	4,97	6,0
	pF	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2	>4,2
	Pr %	86,0	71,2	53,0	61,9	46,7	100,0	89,6	71,2	54,4	43,8	62,1	45,4	59,5	52,0	52,2	89,7	96,7	93,7	88,4	72,4

Tableau 24 : Valeurs médianes :

- des teneurs pondérales en eau acquise par le matériau fin au dépens des gravillons
- du pF correspondant *
- de la proportion restituée à la matière (gangue non comprise) de l'eau saturant initialement les gravillons (Pr)

*Les estimations du pF correspondant tiennent compte de l'humidité préalable, c'est à dire de celle du matériau fin desséché à l'air

Le tableau 24 présente, en second lieu, les valeurs auxquelles s'abaisse le pF, après les divers gains d'humidité de la fraction fine, gangue des gravillons non comprise. Ces données nous indiquent que le pF ne s'abaisse au-dessus de 4,2 que lorsque certaines conditions sont réunies : pourcentage élevé de gravillons, absence de différenciation superficielle de ceux-ci, texture du matériau fin plus proche du pôle sableux que du pôle argileux. Enfin, quatrième élément à prendre en compte ici, la surface spécifique des gravillons constitue, dans la plupart des cas, un facteur négatif de cet échange. Ainsi le montre la comparaison des valeurs des deux parties du tableau, concernant respectivement les gravillons des classes granulométriques 5-10 mm et 20-25 mm, les premiers retiennent, comme nous l'avons vu antérieurement, un pourcentage d'eau moins élevé que les seconds à l'état de saturation.

Ce tableau 24 consigne, en outre, pour chaque valeur des gains d'humidité de la fraction fine après 3 jours (gangue non comprise), la proportion de l'eau restituée en pourcentage de celle que les gravillons contiennent initialement à l'état de saturation. Pour commodité d'expression, nous dénommerons cette proportion par le terme : "pourcentage de restitution". La figure 8 regroupe les droites de régression de cette proportion d'eau restituée, en fonction du pourcentage de gravillon, ceci pour chacun de trois types de matériaux fins et pour chacun des deux classes granulométriques de gravillons, soumis à l'expérimentation. La probabilité de vérification de ces relations est d'environ 0,95 pour le couple : matériau sableux - gravillon de la classe 5-10 mm, et supérieure à 0,95 dans tous les autres cas.

Illustrés par les graphes, les faits suivants méritent d'être soulignés même si certains d'entre deux tiennent à la plus simple logique :

- La proportion d'eau initialement stockée dans les gravillons, restituée en trois jours au matériau fin, excepté la gangue recouvrant ces éléments grossiers, est en fonction inverse de l'abondance relative de ces éléments grossiers. Ceci découle de l'abaissement du pF et donc du potentiel matriciel au fur et à mesure de la réhumidification du matériau fin. Et cette réhumidification est pour sa part, comme les données le montrent, en fonction directe de l'abondance relative des gravillons. Il n'en reste pas moins nécessaire de garder à l'esprit le rôle de la gangue dans le bilan de cet échange d'eau. Cette seconde composante voit en effet, son rôle croître en fonction de l'abondance de gravillons. Par exemple, pour une épaisseur moyenne de 1 mm sur ces éléments grossiers, cette gangue représente respectivement pour 20, 40 et 80% pondéraux de gravillons 1,95 de densité apparente, environ 7, 20 et 100% de l'ensemble du matériau fin. D'autre part, les tableaux 22b et 23 présentent pour le type V de gravillons, les gains d'humidité de cette gangue; respectivement avec et sans possibilité d'échange avec divers types de matériaux fins à pF plus élevé. Nous y notons, ce qui a d'ailleurs été effectué précédemment, que le gain d'humidité de cette gangue est dans le second cas, nettement plus élevé que par rapport au premier cas et pour ce premier cas le gain d'humidité de la gangue reste au terme de 3 jours supérieur à celui du reste du matériau fin (T, excepté). De l'ensemble de ces indications, nous retiendrons que la proportion de l'eau stockée par les gravillons, cédée à l'ensemble du matériau fin est dans la plupart des cas, sensiblement supérieure à ce que les graphes indiquent. Et ceci apparaît s'appliquer plus particulièrement aux matériaux fins argilo-sableux et aux pourcentages élevés de gravillons.
- Cette proportion d'eau stockée initialement dans les gravillons, qui est restituée à la fraction fine par l'intermédiaire de la gangue est, en général plus élevée pour les gravillons de la classe granulométrique 20-25 mm c'est-à-dire pour les plus volumineux de ces éléments grossiers. On peut donc en déduire que les forces de rétention dans ces derniers sont plus faibles, ceci indiquant que les conduits de la porosité ouverte présente un diamètre plus important. Ne semble faire exception à cette liaison positive que les cas où moins de 35% de gravillons sont en contact avec le matériau argilo-sableux NB₂ (27,2 d'argile).
- Si nous comparons les trois graphes entre eux, nous notons une relation positive entre le destockage de l'eau des gravillons et le taux de matériau fin. Cependant cette relation n'apparaît pas linéaire. En effet la différence de comportement dans cette restitution de l'eau par les gravillons est très sensible entre le matériau NA₁ (le plus sableux - 11,4% d'argile) mais faible entre celui-ci et le matériau T, le plus riche en argile avec 51,6%. Ce qui précède autorise à supposer que pour la majorité des gravillons, existe un seuil de potentiel matriciel du matériau fin en-dessus duquel la capacité de stockage c'est-à-dire la succion de l'eau au dépens des gravillons s'abaisserait rapidement. Il semble que ce seuil puisse être fixé très approximativement entre 12 et 27% d'argile.

Pr = Proportion restituée à la terre fine de l'eau stockée par les gravillons

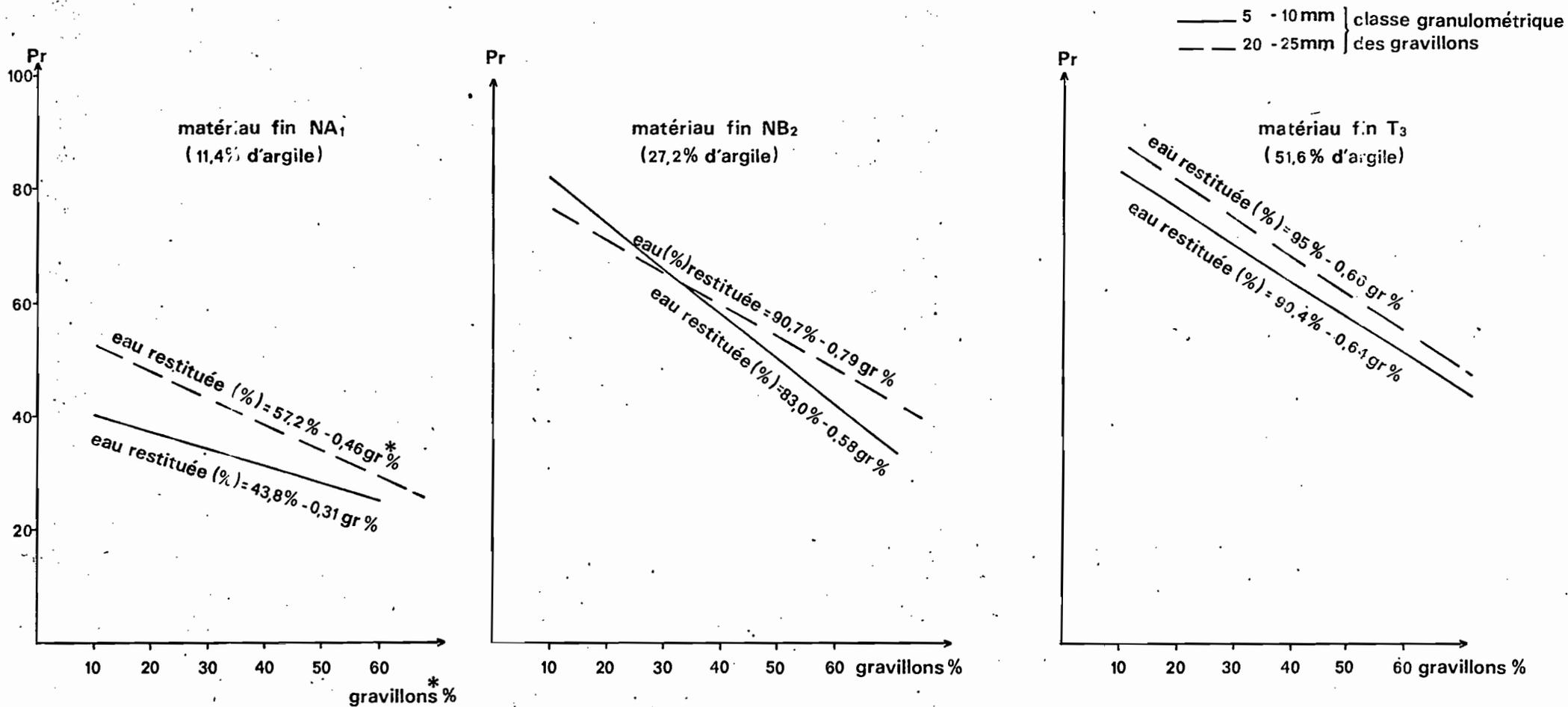


FIG. 8 : PROPORTION DE L'EAU STOCKEE PAR LES GRAVILLONS, CEDEE A DIVERS MATERIAUX FINS DESSECHES PREALABLEMENT A LAIR (pF < 4.2) GANGUE DES ELEMENTS GROSSIERS EXCEPTEE .REGRESSION CALCULEE A PARTIR DE L'ENSEMBLE DES DONNEES CONCERNANT LES TYPES IIa, V, V, VI ET VII DE GRAVILLON

D'autre part la comparaison des données respectives des gravillons sans différenciation superficielle et de leurs homologues brunifiés (V et V', VI et VI') permet de souligner les points suivants :

- . Dans la quasi totalité des cas, les valeurs du pourcentage d'eau acquise par le matériau fin est plus faible quand l'échange s'effectue au dépens des gravillons brunifiés.
- . Mais la situation s'inverse dans une majorité des cas, pour la proportion restituée, de l'eau saturant initialement la porosité ouverte, les gravillons brunifiés apparaissent les plus favorables au mouvement vers la fraction fine. Ceci se vérifie plus particulièrement pour les gravillons du type VI', quelle que soit la texture de cette dernière.

Ces indications apportent une confirmation de l'importance des modifications hydrodynamiques des gravillons qui traduit ce qui peut apparaître à première vue, une modification mineure.

Enfin, la question se pose de savoir si pour un même pF du matériau fin, correspond le même pourcentage de saturation de la porosité ouverte lorsque le mouvement de l'eau s'effectue en faveur des gravillons ou inversement. Pour répondre avec précision à cette question les données sont insuffisantes. En effet, nous ne pouvons en premier lieu nous fonder que sur la classe granulométrique 5-10 mm de gravillons car elle est la seule à avoir été prise en compte à la fois pour le passage d'eau du matériau fin vers les gravillons et réciproquement. D'autre part, les données du tableau 24 correspondant à cette classe granulométrique nous montre, comme ceci est souligné antérieurement, que l'abaissement en-dessous de 4,2 du pF du matériau fin initialement desséché à l'air, au contact des gravillons humides, concernent en définitive peu de cas. Il s'agit des gravillons de type V (taux de 40 à 60%) et de ceux du type VI (taux de 60%) et ceci uniquement pour le matériau sableux (NA₁). Ce n'est donc à partir de quatre données (et groupées dans une gamme assez étroite de pF) que nous pouvons trouver matière de réponse à la question. Un calcul tenant compte de l'humidité apportée à l'ensemble du matériau fin par la gangue a été effectué pour ces quelques cas. Il aboutit à des valeurs de Ts qui, pour un même pF, sont très voisines de celles que l'on obtient dans l'apport d'eau du matériau fin aux gravillons, le rapport entre les premières et les secondes variant de 1,04 à 1,1. Sous réserve de vérification dans d'autres cas, ceci pourrait indiquer que la restitution de l'eau par les gravillons se caractérise par une faible hystérésis.

6. CONCLUSION

La présente étude a permis l'approche de certaines caractéristiques hydriques et hydrodynamiques des types de gravillons les plus fréquents dans les sols ferrallitiques ivoiriens. Au terme de cette approche, il convient d'effectuer plusieurs remarques à la fois sur la méthodologie utilisée et sur les résultats obtenus.

- En matière de méthodologie, nous avons vu que des manipulations à caractère grandement "artisanal" ont dû être adoptées étant donné le manque de matériel adéquat. Elles n'ont pas moins permis d'acquérir des résultats répétitifs sur les divers paramètres étudiés.
- En matière de résultats, les principaux points suivants sont à souligner :
 - . Aux principaux traits morphologiques (forme, aspect de surface, couleur et dimension) adoptés au préalable pour distinguer diverses catégories et classes de gravillons, correspondent des caractères physiques et un comportement hydrodynamique très spécifiques comme l'indique l'analyse statistique. Nous avons vu, par exemple, à propos de la porosité ouverte, qui est le principal paramètre hydrique, que ce qui apparaît comme une simple brunification des gravillons des horizons humifères traduit une réduction pouvant atteindre 50% par rapport aux homologues non brunifiés de ces éléments grossiers.
 - . Cette porosité ouverte qui traduit la capacité maximale de stockage d'eau par les gravillons est très variable d'une catégorie à l'autre de ceux-ci. La gamme des valeurs s'étale, en effet de 10% environ dans les concrétions semi-pisolitiques (développés dans des sols argileux) à près de 37% dans les pseudo-concrétions (non brunifiés), qui sont des fragments de roche plus ou moins altérés enrichis en fer, prélevés dans des sols dérivés de schiste sericiteux. Les valeurs prises par ce paramètre sont

également liées à la dimension des gravillons et pour certaines catégories morphologiques, sont multipliées par 50% quand on passe de la classe granulométrique 2-5 mm à la classe 20-25 mm.

- . L'étude expérimentale des échanges d'eau entre la fraction fine et les gravillons a montré que le processus dépend, bien entendu, du pF développé par la première, mais également de sa composition texturale d'une part et du type morphologique ainsi que de la classe granulométrique des seconds d'autre part. La liaison qui s'établit entre le pF de la fraction fine et le taux de saturation en eau de la porosité ouverte des gravillons, est relativement simple, de type linéaire. Cependant, le fait qu'elle présente deux modalités de part et d'autre d'une certaine valeur du pF apparaît traduire l'existence de deux types de pores, et ceci dans chacun des divers types de gravillons étudiés. La relation qui s'établit entre le taux de saturation en eau de la porosité ouverte des gravillons et la texture de la fraction fine, pour un pF donné, présente par contre une complexité plus grande. Pour l'essentiel, il ressort que les matériaux argilo-sableux présentent, en général, les conditions optimales pour les échanges d'eau avec les gravillons et les matériaux les plus argileux les conditions les plus défavorables.
- . Enfin, bien que les données soient encore insuffisantes pour en affirmer la règle, il apparaît que pour un pF et un matériau fin donné, le taux de saturation de la porosité ouverte présente à peu près la même valeur dans les deux sens de l'échange entre les deux fractions, apparaît assez rapide et l'équilibre apparaît réalisé en quelques jours, même pour les valeurs relativement élevées pour un pF. Cependant, dans les matériaux fins sableux à argilo-sableux, la restitution de l'eau par les gravillons s'effectue par l'intermédiaire d'une zone concentrique à ces éléments grossiers, d'une épaisseur d'ordre millimétrique dans laquelle l'humidité est plus forte que le reste de la fraction fine et qui subisse au moins quelques jours. On peut penser que l'individualisation de cette zone est un élément favorable pour l'absorption d'eau par les plantes, étant donné que le pF y est plus faible. Elle semble pouvoir fournir une des éléments pour expliquer l'existence assez fréquente d'un feutrage de radicelles autour de gravillons de certains types.

L'ensemble de toutes les données indiquent enfin que l'étude hydrodynamique des sols doivent prendre en compte les gravillons. Cette nécessité concerne la majorité des sols de Côte d'Ivoire, de l'Afrique de l'Ouest en général et particulièrement de ceux des régions à saisons contrastées dans lesquelles les sols fortement gravillonnaires représentent la majorité.

Afin d'illustrer cette nécessité, nous retiendrons l'un des cas le plus fréquent qui est celui des sols ferrallitiques. Ces sols présentent (en rapport pondéral moyen) respectivement 30 et 70% de gravillon de 0 à 25 et de 25 à 100 cm de profondeur. En nous fondant sur les valeurs moyennes des caractéristiques hydriques, densimétriques et texturales de deux fractions fine et grossière de ce type de sol, un calcul simple permet d'estimer l'eau stockée dans chacune de celle-ci à différents pF. Les résultats de cette approche indiquent pour le premier mètre de ce type de sol, que l'eau stockée représente à pF 2.0 une lame de 131 mm pour les gravillons et de 167 mm pour la fraction fine. A pF 4.2 les valeurs respectives sont de 82 et 55 mm. On en déduit que de pF 2.0 à pF 4.2 la proportion revenant aux gravillons, au total de l'eau fournie à l'évapotranspiration par le premier mètre, est de 30% et correspond à une lame de 50 mm environ.

L'auteur adresse ses vifs remerciements à A. LEVEQUE, Chef de Service de Pédologie du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé, pour plusieurs raisons :

- d'abord pour sa contribution à l'élaboration et la mise en exécution du programme,
- ensuite pour ses encouragements pendant tous le temps qu'ont duré ces travaux,
- enfin, pour ses conseils et pour avoir consacré son temps précieux à lire, à critiquer le manuscrit et même à faire des propositions pour la rédaction.

Mes remerciements s'adresse également à tous les Garçons de laboratoire qui m'ont aidé à réaliser ce travail, en particulier feu JONAS ZOKOUA (paix à son âme).

BIBLIOGRAPHIE

- AUDRY (P.), COMBEAU (A.), HUMBEL (F.X.), ROOSE (E.J.), VIZIER (J.F.). 1973 - Essai sur les études de dynamique actuelle des sols. Bulletin du groupe de travail sur la dynamique des sols, ORSTOM Paris, n° 2, 126 p. + annexes.
- AVENARD (J.M.), ELDIN (M.), GIRARD (G.), SIRCOULON (J.), TOUCHEBEUF (P.), GUILLAUMET (J.L.), ADJANOHOUN (E.) PERRAUD (A.). 1971 - Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire ; mémoire ORSTOM, n° 50, 391 p.
- BLIC (Ph. de). 1976 - Le comportement des sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire après défrichement et mise en culture mécanisée : rôle des traits hérités du milieu ; Cah. ORSTOM, sér. Pédol., XIV, n° 2, pp. 113-130.
- BOULANGER (B.), DELVIGNE (J.), ESCHENBRENNER (V.). 1971 - Description d'échantillons indurés riches en oxydes et hydroxydes de fer. Adiopodoumé, ORSTOM, 4 p., dactyl.
- CHASSIN (P.). 1977 - Etude des interactions montmorillonite calcaïque-eau-diols. Hydratation des complexes montmorillonite-diols : II - Influence des diols sur les propriétés d'hydratation de la montmorillonite. An. Agro., 28 (1) pp 1-43.
- CHASSIN (P.). 1979 - Hypothèse sur la structure du complexe argilo-humique. Conséquence sur les processus d'humification.
- COLLINET (J.). 1969 - Contribution à l'étude des "stones lines" dans la région du Moyen Ogoué (Gabon). Cah. ORSTOM, sér. Pédol., Vol VII, n° 1, 21 p.
- COMMISSION DE PEDOLOGIE ET DE CARTOGRAPHIE DES SOLS. 1967 - Classification des sols, édition 1969, 06 p.
- COURAU (M.). 1969 - Etude expérimentale de la circulation de l'eau saturante dans les milieux poreux artificiels. An. Agro. 20 (1), pp 5-14.
- DUCHAUFOUR (Ph.). 1972 - Processus de formation des sols. Biochimie et Géochimie. C.R.D.P., Nancy.
- DUCHAUFOUR (Ph.). 1977 - Pédologie T1 : Pedogénèse et classification. Masson-Paris, 477 p.
- ESCHENBRENNER (V.), GRANDIN (G.). 1970 - La séquence de cuirasses et ses différenciations entre Agnibilekrou (Côte d'Ivoire) et Diebouyou (Haute Volta). Cah. ORSTOM, sér. Géol., II-2.
- ESCHENBRENNER (V.), BADARELLO (L.). 1978 - Etude pédologique de la région d'Odienné (Côte d'Ivoire). Carte des paysages morpho-pédologiques. Notice explicative n° 7 ; feuille d'Odienné à 1/200.000 ; ORSTOM-Paris.
- FAURE (P.). 1978 - Les formations pédogénétiques anciennes dans la région de la Kara (Nord-Est du Togo). 11è Conf. biennale de l'ASOA - WASA, p. 10.
- GRAS (F.). 1970 - Surfaces d'aplanissement et remaniement des sols sur la bordure orientale de Mayombe (Congo Brazzaville). Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol VIII, n° 3, 29 p.
- GRAS (R.). 1972 - Effets des éléments grossiers sur la dynamique de l'eau dans un sol sableux I : Comportement des éléments grossiers poreux vis-à-vis de l'eau. An. Agro. 23 (3), pp. 197-239.
- GRAS (R.). 1974 - L'emprisonnement d'air lors de l'humectation des corps poreux. Bull. Ass. Fr. pour l'état du sol, n° 1.
- HENIN (S.). 1976 - Cours de physique du sol. I : Texture - structure - aération. ORSTOM - Editest, Bruxelles, 158 p.

- HENIN (S.). 1977 - Cours de physique du sol. II : L'eau et le sol. Les propriétés mécaniques. La chaleur et le sol. ORSTOM - Editest, Bruxelles, 222 p.
- HUMBEL (F.X.). 1974 - La compacité des sols du Cameroun. Une zonalité dans ce milieu en relation avec la dessiccation saisonnière. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 12-1, pp. 73-101.
- KALOGA (B.). 1976 - Contribution à l'étude du cuirassement : relations entre les gravillons ferrugineux et leur matériau d'emballage. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XIV, n° 4, pp. 299-319.
- LEVEQUE (A.). 1969 - Les problèmes des sols à nappe de gravats au Togo. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. VII n° 1, 29 p.
- LEVEQUE (A.). 1970 - L'origine des concrétions ferrugineuses dans les sols du socle granito-gneissique du Togo. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. VII, n° 3, pp. 321-348.
- LEVEQUE (A.). 1978 - Les concentrations de fer dans les sols développés sur granito-gneissique du Togo. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. vol XVI, n° 1, 21 p.
- LEVEQUE (A.). 1979 - Pédogenèse sur le socle granito-gneissique du Togo. Differentiation des sols et remaniements superficiels. Travaux et Doc. ORSTOM, n° 108, Paris.
- LEVEQUE (A.). 1980 - Etude de la fertilité chimique de quelques sols sous reboisements en essences papetières. Premiers résultats sous *Pinus carebaea* et *Pinus oocarpa*. ORSTOM Adiopodoumé, 14 p.
- LEVEQUE (A.). 1981 - Etude de la fertilité chimique de quelques sols sous reboisements en essences papetières. Premiers résultats sous *Gmelina arborea*.
- LEVEQUE (A.). 1982 - Quelques aspects de la structure des sols ferrallitiques en saison humide. Implication agronomique concernant le cotonnier dans le Nord de la Côte d'Ivoire. ORSTOM-Adiopodoumé, 38 p.
- MAERTENS (C.), BLANCHET (R.), PUECH (J.). 1974 - Influence des différents régimes sur l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par les cultures. An. Agri. 25 (4), pp. 575-586.
- MOREAU (R.). 1978 - Influence de l'ameublissement et de l'infiltration d'eau sur la stabilité structurale d'un sol ferrallitique dans le Centre de la Côte d'Ivoire - Copyright ORSTOM, 15 p.
- NALOVIC (Lj), HUMBEL (F.X.). 1971 - Contribution à l'étude de la localisation des différentes formes de composés de fer au sein de quelques sols du Cameroun. Cah. ORSTOM, Vol IX, n° 3.
- RIQUIER (J.). 1969 - Contribution à l'étude des "stones lines" en régions tropicale et équatoriale. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol VII, n° 1, 43 p.
- ROOSE (E.J.), CHEROUX (N.). 1966 - Les sols du bassin sédimentaire de Côte d'Ivoire. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol IV, n° 2, 42 p.
- ROOSE (E.J.). 1979 - Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique issu de granite sous culture et sous une savane arbustive soudanienne au Nord de la Côte d'Ivoire (KORHOGO, 1967-1975). Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XVII, n° 2, 39 p.
- SEGALEN (P.). 1969 - Le remaniement des sols et la mise en place des "stones lines" en Afrique. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol VII, n° 1, 15 p.
- VIZIER (J.F.). 1978 - Etude de la dynamique du fer dans les sols évoluant sous un excès d'eau. Etude expérimentale sur des sols de rizière de Madagascar. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XVI, n° 1, 21 p.
- YACE (I.). 1967 - Géologie et pétrographie du birimien schisto-volcanique de la région de Toumodi, dans le Précambrien, thèse D.E.S. de Sc. de la terre.