

Influence de la phase caillouteuse sur la réserve en eau des sols

Cas des sols de Petite Beauce du Loiret

C. Coutadeur⁽¹⁾⁽²⁾, I. Cousin⁽¹⁾ et B. Nicoullaud⁽¹⁾

(1) INRA – Unité de Science du Sol, Avenue de la Pomme de Pin, BP 20619, 45166 Ardon Cedex

(2) INRA-INAPG – Unité Mixte de Recherche " Environnement et Grandes Cultures ", BP 01, 78850 Thiverval-Grignon

RÉSUMÉ

Les sols caillouteux représentent 39 % de la surface des sols français. Leurs propriétés sont généralement déterminées sans la prise en compte explicite de la phase caillouteuse. Sur des Calcosols caillouteux de Petite Beauce (France), nous avons montré que la non prise en compte de la phase caillouteuse conduisait à des surestimations de la réserve en eau utile (RU) de 22 à 39 % mais que sa prise en compte comme une phase inerte (on tient compte du volume des cailloux mais pas de leur propriétés de rétention) conduisait à une sous-estimation de 8 à 34 % de la RU. Cette étude a donc mis en évidence que la phase caillouteuse participe au maintien d'une réserve en eau dans le sol accessible aux plantes : en présence d'une culture en période de forte croissance, la dessiccation des cailloux est plus rapide que celle de la terre fine car des racines sont présentes directement à la surface des cailloux. En revanche, en l'absence de culture, la dessiccation de la terre fine est plus rapide, que ce soit en profondeur dans le profil ou en surface sous l'effet de l'évaporation. En phase d'humectation, la teneur en eau de la terre fine croît plus vite que celle des cailloux.

Mots clés

Sols calcaires, cailloux, réserve utile, rétention en eau.

SUMMARY

ROLE OF ROCK FRAGMENTS ON THE AVAILABLE WATER IN SOILS : a case study from «Petite Beauce», France

Stony soils cover 39 % of the area in France. Their properties are usually determined without the explicit characterization of the rock fragments. On calcareous soils from Petite Beauce (Paris basin – France), it has been demonstrated that available water is overestimated by 22 to 39 % if the rock fragments are not taken into account and underestimated by 8 to 34 % if only their volume is considered. Nevertheless, rock fragments play an important role in terms of water availability in soils: in presence of growing plants, rock fragments dry before fine earth whereas it is the reverse without plant when evaporation is important. During the wetting phase, the water content of fine earth increases more rapidly than that of rock fragments.

Key-words

Calcareous soil, rock fragments, available water, water retention.

RESUMEN**INFLUENCIA DE LA FASE PEDREGOSA SOBRE LA RESERVA EN AGUA DE LOS SUELOS:
caso de la Pequeña Beauce del Loiret (Francia)**

Los suelos pedregosos representan 39% de la superficie de los suelos franceses. Sus propiedades son generalmente determinadas sin tomar en cuenta la fase pedregosa. Sobre "calcosols" pedregosos de la Pequeña Beauce (Francia), mostramos que de no tomar en cuenta la fase pedregosa la reserva hídrica aprovechable (R.U.) fue sobrestimada de un 22 hasta 39% pero de tomarla en cuenta como fase inerte (se cuantifica el volumen de las piedras pero no su capacidad de retención) la R.U. fue subestimada de un 8 hasta 34%. Este estudio demostró que la fase pedregosa participa al mantenimiento de la reserva en agua aprovechable por las plantas: en presencia de un cultivo en periodo de fuerte crecimiento, la desecación de las piedras es más rápida que de la tierra fina porque los raíces están localizados directamente sobre la superficie de las piedras. Sin embargo, en ausencia de cultivo, la desecación de la tierra fina es más rápida, en profundidad o en la superficie por acción de la evaporación. En fase de humectación, el contenido en agua de la tierra fina aumenta más rápidamente que de las piedras.

Palabras claves

Suelos calcáreos, piedras, reserva aprovechable, retención en agua.

Les sols dépourvus de cailloux sont recherchés pour la production agricole, car les opérations culturales y sont plus faciles. C'est pourquoi, mais aussi en raison d'une plus grande facilité d'étude, un très grand nombre de recherches ont concerné surtout les sols non caillouteux. Or, en Europe de l'ouest, les sols contenant une quantité significative d'éléments grossiers (fragments supérieurs à 2 mm) couvrent environ 30 % de la surface (Poesen, 1990) dont 60 % pour la région méditerranéenne, France exclue (Poesen., 1990). En France, 39 % de la surface est occupée par des sols caillouteux (Le Bas, com. pers.).

La présence de cailloux modifie les propriétés physiques des sols, notamment leur capacité de stockage d'eau et leur sensibilité au ruissellement et à l'érosion, leur infiltration, leurs propriétés chimiques, contribution à la réserve en carbone et en azote par exemple, et leurs propriétés agronomiques, effet sur le rendement des cultures en particulier.

Les analyses réalisées sur les sols omettent souvent la phase caillouteuse même dans le cas de sols où la fraction d'éléments grossiers n'est pas négligeable. Dans ce cas, les propriétés mesurées sont mal évaluées — surévaluées ou sous-évaluées selon les paramètres (Ugolini *et al.*, 1998) — car la masse de sol est considérée comme constituée uniquement de terre fine. Une alternative est de considérer les cailloux comme inertes et diluant la terre fine. Dans ce cas, les paramètres mesurés sont recalculés en tenant compte du pourcentage volumique de la fraction caillouteuse (Gras, 1994). Dès 1953, Coile montre que la quantité d'eau disponible pour les plantes est plus élevée si l'on tient compte de la phase caillouteuse que lorsqu'on la néglige, mettant ainsi en évidence des propriétés de rétention propres à la phase caillouteuse. Cette quantité d'eau disponible pour les plantes dépend de la nature des cailloux : Poesen et Lavee (1994) montrent que 24 % de l'eau accessible aux plantes est contenue dans la phase caillouteuse d'un sol de craie tandis que rien n'est stocké dans la phase caillouteuse d'un sol sur basalte. Cette contribution est également dépendante du pourcentage volumique de cailloux dans le sol : pour des sols sur granite, quartzites, grès par exemple, la teneur en eau gravitaire et la teneur en eau disponible pour les plantes diminuent lorsque le pourcentage de cailloux augmente mais on observe le contraire sur des sols sur schiste (Ingelmo *et al.*, 1994). De plus, les petits cailloux, normalement plus altérés que les gros dans les sols (Childs et Flint, 1990), peuvent absorber une plus grande quantité d'eau par unité de poids (Poesen et Lavee, 1994), ce qui met l'accent sur l'effet de la taille des éléments grossiers et leur porosité intrinsèque. La localisation des cailloux dans le profil de sol joue également un rôle de première importance : les cailloux localisés en surface interceptent l'eau de pluie, modifient le taux d'infiltration, le ruissellement, l'érosion et l'évaporation. Ils peuvent constituer un écran qui modifie entre autres, le bilan radiatif du sol, le régime hydrique et les tempé-

ratures. Par exemple, une couche de graviers de 5 cm d'épaisseur peut réduire l'évaporation annuelle de 80 à 85 % (Kemper *et al.*, 1994). Ce résultat est cependant à nuancer selon les types de climat : en climat méditerranéen, Danalatos *et al.* (1995) montrent qu'en conditions de léger stress hydrique, la présence de cailloux en surface du sol permet de maintenir une teneur en eau plus élevée que celle mesurée en sols non caillouteux. En cas de demande évaporatoire forte au contraire, l'échauffement du sol est plus élevé dans les sols avec cailloux en surface en raison de leur capacité calorifique plus élevée.

Pour que l'eau des cailloux soit disponible pour la plante, il doit y avoir des transferts entre la phase caillouteuse et la racine. Ces transferts peuvent être directs lorsque les radicelles au contact des cailloux les dessèchent directement ou indirects lorsque les plantes dessèchent la terre fine et qu'un équilibre entre terre fine et cailloux se produit. Dans ce second cas, les transferts ne sont possibles que lorsque les étendues de variation des largeurs de pores des cailloux et de la terre fine présentent un certain recouvrement et Gras (1994) a montré que la teneur en eau de la terre fine était plus élevée que celle des cailloux en phase d'humectation tandis que la teneur en eau des cailloux était plus élevée que celle de la terre fine en phase de dessiccation. En conséquence, entre une humectation et une dessiccation, les cailloux poreux retiennent une certaine quantité d'eau qui contribue à la réserve du sol.

En Petite Beauce, les sols superficiels caillouteux occupent 30 % du territoire. Du fait de leur faible épaisseur, ils sont très sensibles au lessivage hivernal des nitrates. Dans ce contexte, nous nous proposons de caractériser les propriétés de rétention de deux de ces sols caillouteux et d'analyser les transferts d'eau possibles entre les cailloux et la terre fine.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

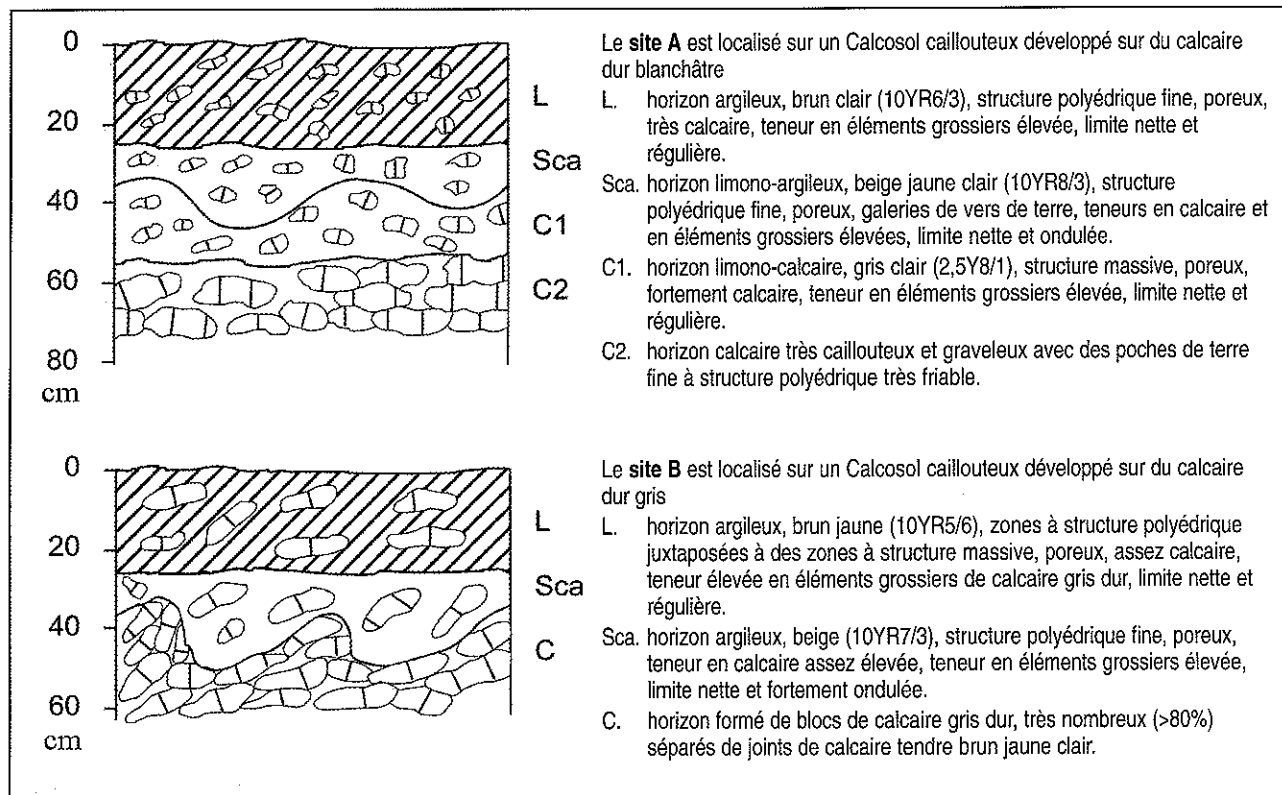
Le site d'étude

La parcelle d'étude est localisée dans la région naturelle dite "Petite Beauce", située au nord-ouest du Bassin Parisien. Cette région se caractérise par des parcelles de grande taille, de l'ordre de 25 hectares (Verbèque et Revalier, 1993). Le Calcaire de Beauce qui forme le substratum est recouvert par une couche argilo-limoneuse dont l'épaisseur très variable (Chéry, 1995), dépend de l'orientation de la pente (Bourennane, 1997). Le drainage y est essentiellement vertical (Ould Mohamed, 1995).

Les sols de la parcelle sont des variantes de ceux décrits par Ould Mohamed (1995). Il est possible d'y distinguer des sols argilo-limoneux plus ou moins calcaires développés sur des matériaux cryoturbés calcaires ou sur un matériel calcaire gris tendre (Calcoisols) et des sols argilo-limoneux très calcaires

Figure 1 - Description des profils de sols étudiés.

Figure 1 - Description of the studied soils.



plus ou moins caillouteux développés sur des calcaires durs (Calcisols). C'est sur ce dernier type de sol, sol calcaire caillouteux, que porte cette étude. Nous y avons choisi deux sites en faisant l'hypothèse que leurs propriétés hydriques étaient différentes: le premier site est localisé sur du calcaire dur blanc (site A) et le second sur du calcaire dur gris (site B) (figure 1).

Le site A est situé sous blé irrigué (variété Altria) et le site B sous blé non irrigué (variété Soisson). Dans les deux cas, le semis a été réalisé le 19 octobre 1998 à la volée avec un outil de type Semavator. Le premier apport d'azote (90 kg/ha) est effectué le 18 février 1999, le second (90 kg/ha) le 23 mars 1999 et le troisième (40 kg/ha) le 6 juin 1999.

Caractérisation des sols

Les sols caillouteux étudiés sont constitués de cailloux calcaires et de terre fine. Certaines caractéristiques physico-chimiques de la terre fine sont présentées dans le *tableau 1*. Nous avons caractérisé séparément ces deux phases pour en obtenir une description complète. Le pourcentage pondéral de cailloux de chaque horizon a été déterminé en prélevant sur le terrain des échantillons de 6 kg de sol (terre fine et cailloux).

Ce matériel récolté a été séché puis tamisé afin d'en extraire la fraction caillouteuse. La densité apparente de 15 cailloux par horizon a été déterminée par la méthode au pétrole (Monnier *et al.*, 1973). La densité apparente de la terre fine a été calculée à partir des données de densité apparente totale de chaque horizon déterminée sur le terrain au densitomètre à membrane et de densité apparente des cailloux déterminée au laboratoire. Le pourcentage pondéral de chaque phase et les valeurs de densité apparente nous ont permis de déterminer la fraction volumique respective de chaque phase.

Les propriétés de rétention en eau des horizons ont été mesurées à l'aide de presses à membrane de Richards (Bruand *et al.*, 1996) pour des potentiels compris entre -10 hPa (pF 1) et -15000 hPa (pF 4,2). Pour la terre fine, la détermination a été réalisée sur 12 mottes différentes pour chaque horizon. Pour la phase caillouteuse, ces propriétés ont été mesurées sur 10 à 15 cailloux d'environ 20-25 cm² chacun traités individuellement et saturés préalablement par capillarité durant 48 heures. Afin d'assurer une continuité hydraulique satisfaisante entre les cailloux et la plaque céramique, nous avons intercalé une fine couche de kaolinite entre les deux. Suite à une étude préliminaire, des temps de séjour de deux et

Tableau 1 - Données physico-chimiques des deux types de sol étudiés.**Table 1** - Physico-chemical data of the two soil types.

	Composition		Granulométrie de la terre fine tamisée à 2 mm					CaCO ₃ (%)	pH eau	MO (%)	Azote total (%)
	Terre fine (% poids)	Cailloux (% poids)	Argile < 2 µm	Limon fin 2-20 µm	Limon grossier 20-50 µm	Sable fin 50-200 µm	Sable grossier 200-2000 µm				
Site A											
0-27 cm	50,3	49,7	37,9	22,2	15,0	6,7	18,2	44,6	8,3	3,82	0,242
27-40 cm	37,1	62,9	24,2	25,2	5,3	2,0	43,3	82,6	8,8	2,34	
40-55 cm	39,0	61,0	16,3	23,0	3,4	4,2	53,1	93,6	9,1	0,36	
55-80 cm	34,0	66,0						95,0			
Site B											
0-27 cm	63,5	36,5	38,4	22,8	25,7	3,9	9,2	9,1	8,2	3,35	0,226
27-50 cm	42,6	57,4	37,7	22,0	20,0	6,7	13,6	27,7	8,4	2,32	

une semaine dans les presses à membrane ont été retenus afin d'atteindre l'équilibre dans les cailloux et la terre fine respectivement. Ces données nous ont permis en particulier de déterminer la réserve utile du sol et la contribution de chacune des deux phases à cette réserve.

Suivis d'humidité

Des suivis d'humidité ont été réalisés sur la terre fine et les cailloux, à deux pas de temps :

- Un suivi à pas de temps court, hebdomadaire, de l'humidité dans l'horizon de surface. Treize prélèvements de terre fine et cailloux ont été réalisés du 3 mars 1999 au 21 juillet 1999. Dix cailloux ont été prélevés dans le sous-horizon (0-5) cm et dix dans le sous-horizon (5-20) cm.

- Un suivi à pas de temps long sur l'ensemble du profil de sol (jusqu'à 80 cm sur le site A et 50 cm sur le site B). Des prélèvements de terre fine et cailloux ont été effectués en période hivernale (10/03/99), à la reprise de la végétation (08/04/99) et en fin de cycle cultural du blé (21/06/99). Afin d'avoir une représentation précise de l'évolution de l'humidité en surface, l'horizon de surface a été divisé en trois sous-horizons [(0-5) cm, (5-20) cm et (20-27) cm]. 10 cailloux ont été prélevés dans les sous-horizons de surface et 15 dans les autres. A chaque suivi d'humidité à pas de temps long, une caractérisation de l'enracinement du peuplement végétal a été réalisée par la méthode des cartes racinaires (Tardieu et Manichon, 1986) : une grille dont la maille carrée est de 2 cm de côté a été disposée contre le profil. Nous avons noté la présence ou l'absence de racines dans chaque case sur une largeur de 1 m et sur toute la profondeur du profil.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Caractérisation générale des deux phases

Dans l'horizon de surface, le pourcentage volumique de cailloux est élevé : 34,2 % sur le site A et 21,9 % sur le site B (figure 2). Cette proportion augmente avec la profondeur pour atteindre presque 50 % à 50 cm de profondeur et 56,9 % à 70 cm de profondeur sur le site A. La répartition de la phase caillouteuse sur chaque site est différente (figure 3) : dans l'horizon de surface, les cailloux du site A appartiennent essentiellement à la fraction 2-20 mm alors que ceux du site B appartiennent à la fraction supérieure à 20 mm. Au sein d'un même site, plus l'horizon est profond, plus le pourcentage des fractions de grande taille augmente. Les valeurs de densité apparente de la terre fine (figure 4) sont assez faibles (de l'ordre de 1,2) mais celles des cailloux, comprises entre 1,9 et 2,2.

Propriétés hydriques des cailloux

Les courbes de rétention en eau de la terre fine et des cailloux pour chaque horizon sont présentées sur la figure 5. Les teneurs en eau à un potentiel donné sont nettement plus faibles (à une exception près) dans les cailloux que dans la terre fine. Néanmoins, la quantité d'eau retrouvée dans les cailloux est loin d'être négligeable car elle est fréquemment de l'ordre de 10 % sur le site A. Sur le site B, les teneurs en eau dans les cailloux à un potentiel donné sont plus faibles, de l'ordre de 5 % et sont comparables pour les deux horizons caillouteux étudiés. Néanmoins, sur les deux sites, les écarts-types obtenus pour les valeurs de mesures sur les cailloux sont

Figure 2 - Pourcentages volumiques des deux phases (terre fine – cailloux) en fonction de la profondeur pour les deux sols étudiés
Figure 2 - Volumetric repartition of fine earth and rock fragments versus depth for the two soils.

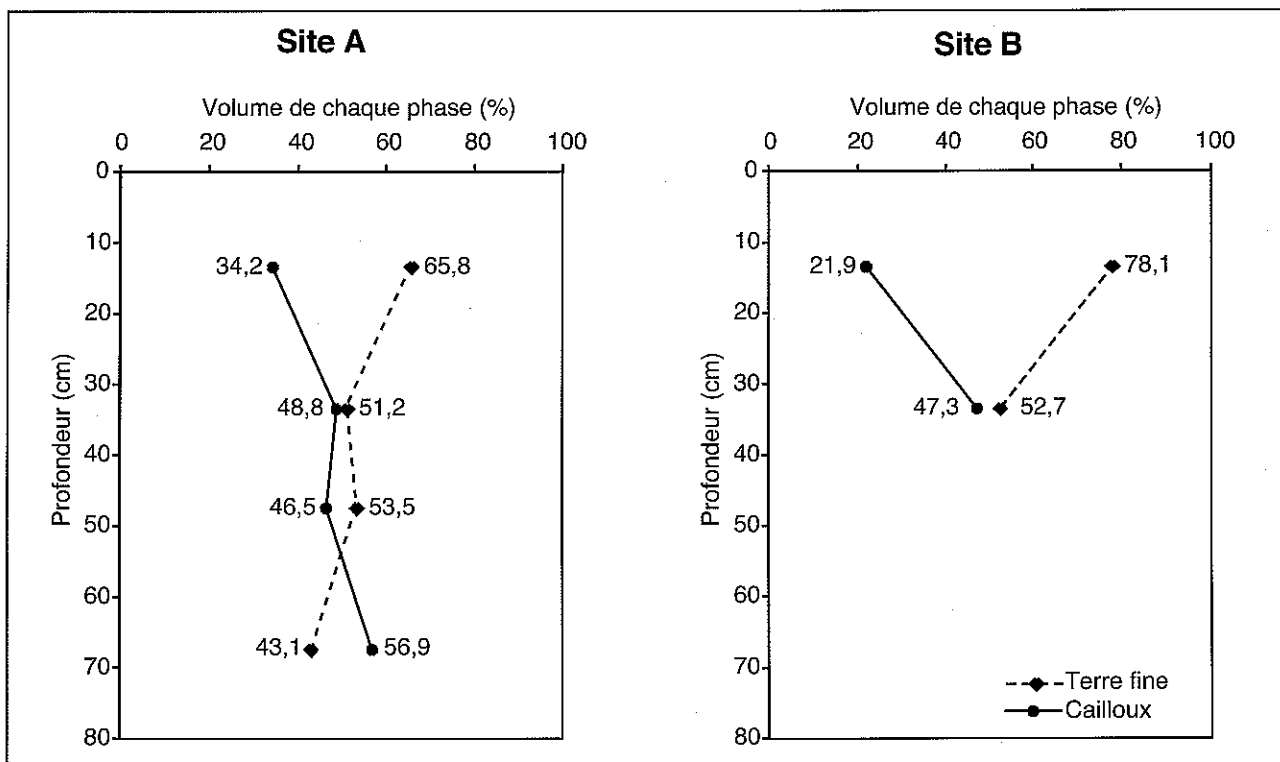


Figure 3 - Distribution granulométrique des cailloux
Figure 3 - Granulometric distribution of the rock fragments.

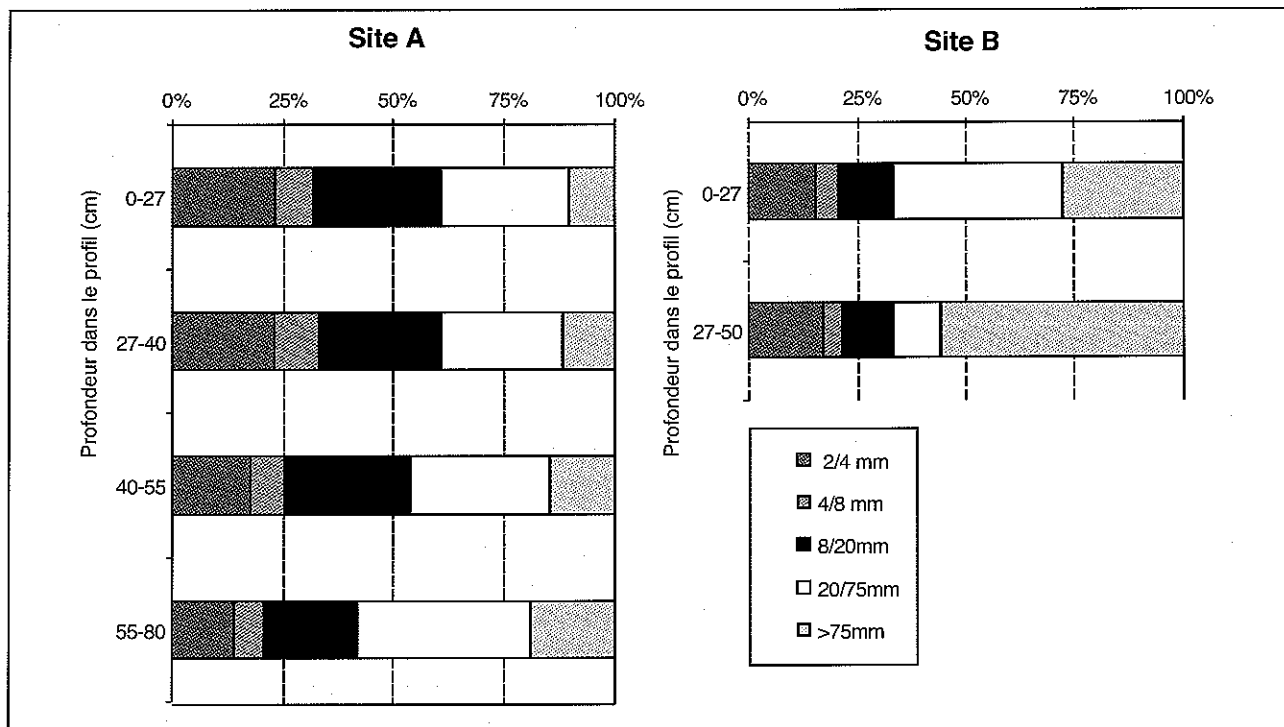


Figure 4 - Densité apparente des deux phases (terre fine – cailloux) en fonction de la profondeur pour les deux sols étudiés
Figure 4 - Bulk density of fine earth and rock fragments versus depth for the two soils.

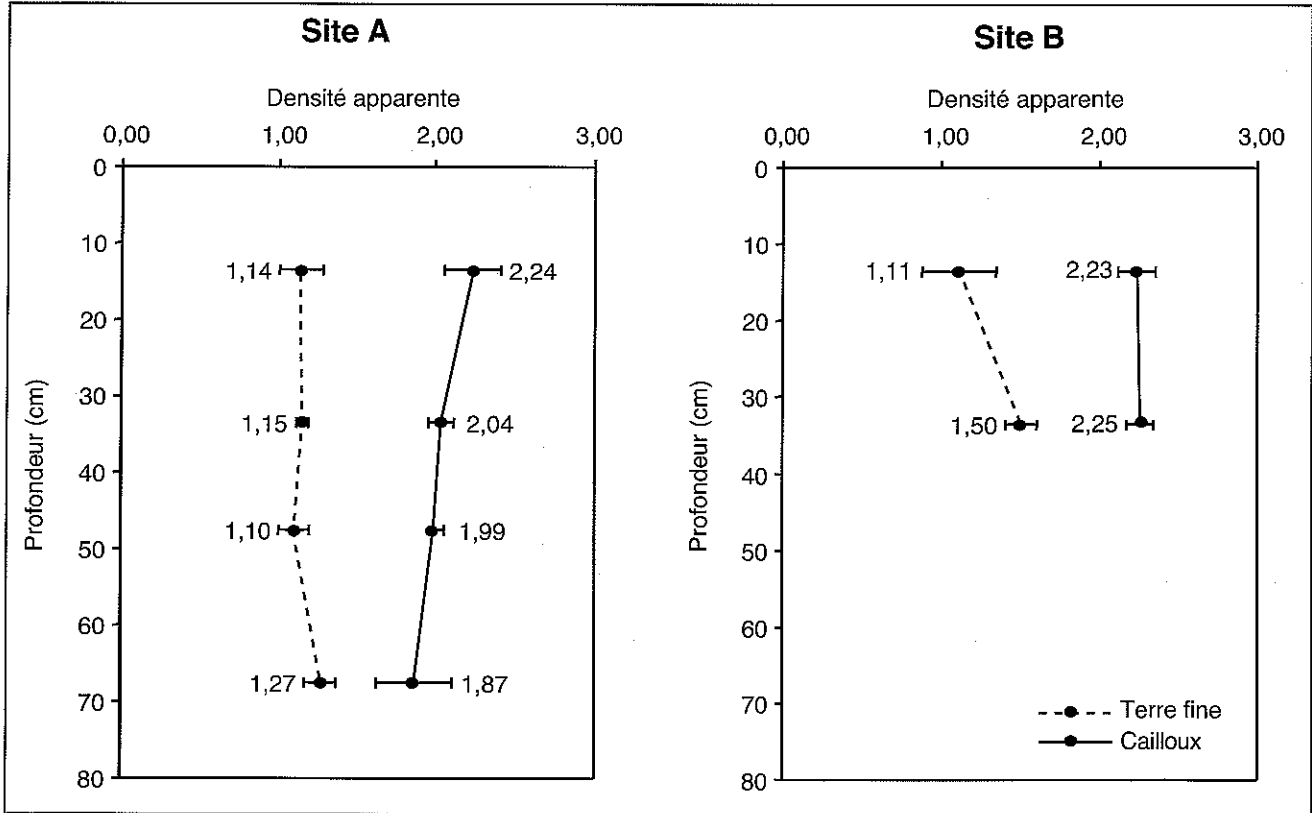
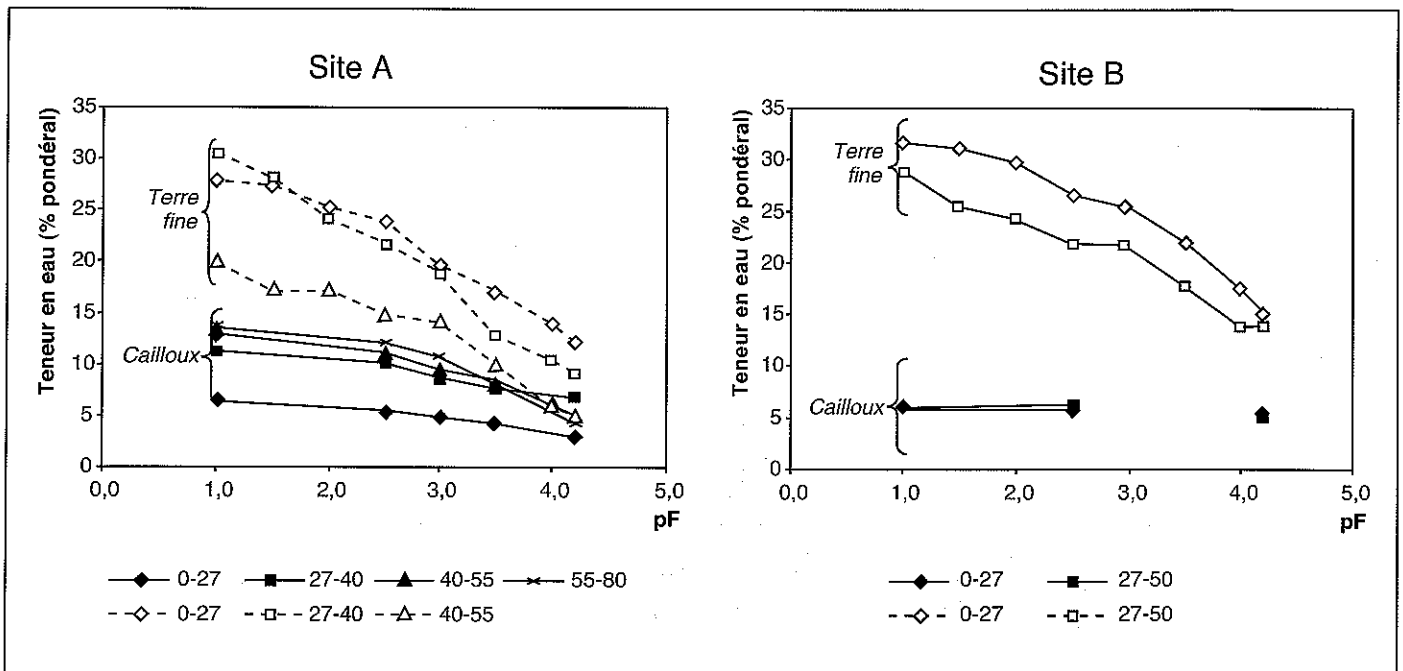


Figure 5 - Courbes de rétention de la terre fine et des cailloux sur les deux sites
Figure 5 - Water retention curves for the fine earth and the rock fragments.



élevées et montrent la grande hétérogénéité de la phase caillouteuse des deux sols étudiés (tableau 2).

Sur le site A, plus les horizons sont profonds et plus leur teneur en eau est élevée. Ce résultat est en accord avec les données de densité apparente, celles-ci diminuant avec la profondeur.

Caractérisation de la Réserve Utile (RU)

Dans les sols caillouteux, la RU est définie comme suit:

$$RU = \sum_i RU_i \quad (1)$$

$$RU_i = (Hcc_i - HpF4,2_i) \times da_i \times ep \times v_i \quad (2)$$

avec:

RU_i la Réserve utile de la phase i ,

Hcc_i : l'humidité pondérale (%) à la capacité au champ de la phase i ,

$HpF4,2_i$: l'humidité pondérale (%) à pF4,2 de la phase i ,

da_i : la densité apparente de la phase i ,

ep : l'épaisseur de l'horizon en dm

v_i : le pourcentage volumique de la phase i (terre fine ou cailloux) dans l'horizon.

L'humidité à pF 4,2 est déterminée au laboratoire par les mesures sur les presses à membranes de Richards et l'humidité à la capacité au champ est définie de façon experte par l'analyse des données de suivi temporel sur le terrain (figure 8): on retient comme valeur de capacité au champ l'humidité à la mi-mars lorsque le sol est ressuyé après une pluie.

La RU de la phase caillouteuse est très faible sur le site B, de l'ordre de 0,25 mm/cm sur toute l'épaisseur du profil de sol (figure 6). Sur le site A, la RU de la phase caillouteuse est plus élevée dans les horizons de surface (0,6 mm/cm jusqu'à 35 cm de profondeur) puis elle augmente jusqu'à 1,4 mm/cm à 70 cm

Tableau 2 - Données de rétention en eau sur les deux sols étudiés. Les valeurs de rétention sont données en pF dans la première ligne de chaque tableau. Les nombres en gras sont les valeurs moyennes de la teneur en eau massique à chaque pF et les valeurs en italiques sont les écart-types. Le nombre d'échantillons (n) est donné dans la première colonne.

Table 2 - Water retention data on the two soil types. The retention data are written as pF values in the first line of each table. The bold figures are mean values and the italic figures are standard errors values. The number of samples is given in the first column.

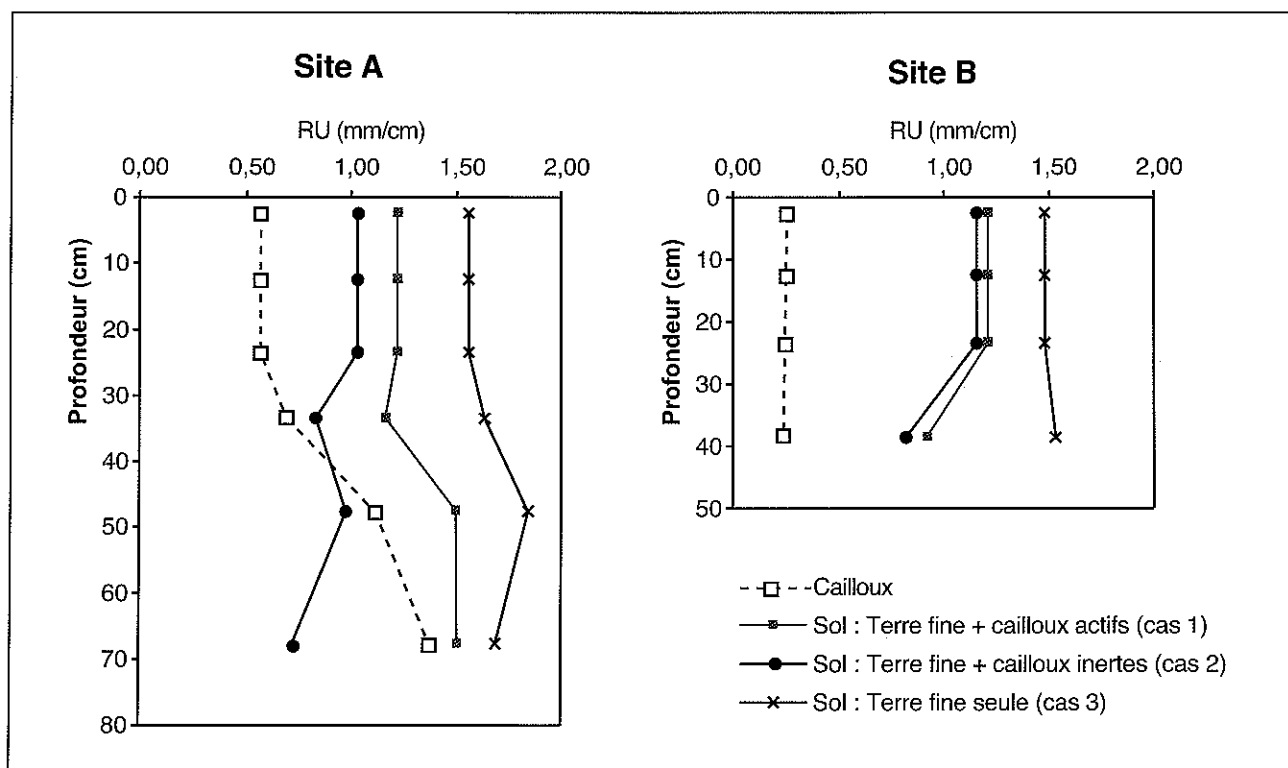
SITE A								
CAILLOUX	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,2
0-27 cm	6,54			5,51	4,82	4,21		2,95
(n=13)	2,86			2,51	2,41	1,76		0,86
27-40 cm	11,22			10,03	8,70	7,67		6,72
(n=13)	1,43			1,55	1,44	1,39		0,97
40-55 cm	12,98			11,12	9,55	8,39		5,15
(n=13)	1,26			1,14	1,05	1,11		0,64
55-80 cm	13,52			12,00	10,71	7,98		4,30
(n=13)	5,40			4,30	3,67	1,94		0,55
TERRE FINE								
	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,2
0-27 cm	27,86	27,36	25,25	23,78	19,58	16,99	13,95	12,15
(n=12)	2,32	1,91	2,11	1,23	1,47	1,56	0,95	1,58
27-40 cm	30,53	28,07	23,85	21,82	18,89	12,77	10,42	9,00
(n=12)	2,14	2,66	2,91	2,94	2,73	0,79	1,88	1,63
40-55 cm	19,92	17,12	17,10	14,82	14,14	9,99	5,97	5,25
(n=12)	2,16	1,66	1,04	2,03	1,55	1,21	0,6	0,7
SITE B								
CAILLOUX	1	1,5	2	2,5	3,0	3,5	4	4,2
0-27 cm	5,97			5,7				5,10
(n=9)	1,03			0,9				0,91
27-50 cm	5,73			6,2				4,82
(n=12)	1,00			1,1				0,51
TERRE FINE								
	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,2
0-27 cm	31,48	31,02	29,72	26,57	25,3	21,92	17,59	15,11
(n=12)	2,39	2,08	0,8	1,28	0,77	0,83	0,33	2,67
27-50 cm	28,98	25,46	24,10	21,72	21,55	17,74	13,75	13,75
(n=12)	1,68	1,32	1,87	1,15	0,75	0,80	0,79	1,03

Figure 6 - Evolution de la réserve utile (mm/cm) en fonction de la profondeur. Trois modes de calcul sont utilisés pour rendre compte de la phase caillouteuse :

- cas 1 : le sol est considéré comme un mélange de terre fine et de cailloux, chaque phase possédant des propriétés de rétention propres
- cas 2 : le sol est considéré comme un mélange de terre fine et de cailloux mais les cailloux sont inertes.
- cas 3 : le sol est considéré uniquement comme de la terre fine et on néglige complètement la phase caillouteuse

Figure 6 - Available water (mm/cm) versus the depth of the profile. Three cases are considered :

- case 1 : the soil is considered as a mixture of fine earth and active rock fragments.
- case 2 : the soil is considered as a mixture of fine earth and inert rock fragments.
- case 3 : the soil is considered only as fine earth.



de profondeur. La RU totale sur le site A est de 108,7 mm sur une profondeur de sol de 80 cm et sur le site B elle est de 54 mm sur une hauteur totale de 50 cm.

Pour discuter de l'influence de la phase caillouteuse sur la réserve utile totale du sol, nous avons effectué nos calculs sur la base de trois hypothèses : dans le premier cas, la RU est calculée selon l'équation 1 en considérant que la phase caillouteuse participe activement à la réserve, dans le second le pourcentage volumique de la phase caillouteuse est pris en compte mais on la considère comme inerte du point de vue de la rétention en eau et dans le troisième cas on néglige la phase caillouteuse et l'on considère que le sol est constitué uniquement de terre fine.

Sur le site A, la RU du sol (cas 1) est égale à 1,23 mm/cm dans l'horizon de surface et jusqu'à 35 cm de profondeur puis

elle augmente ensuite jusqu'à 1,50 mm/cm à partir de 50 cm de profondeur (figure 6). Cette valeur assez élevée de la RU en bas de profil est liée aux capacités de rétention élevées des cailloux en profondeur. Si l'on tient compte de l'occupation volumique de la phase caillouteuse mais que l'on néglige ses propriétés de rétention (cas 2), on sous-estime de 0,2 mm/cm la réserve dans l'horizon de surface et de 0,8 mm/cm en profondeur. En revanche, si l'on néglige complètement la phase caillouteuse (terre fine seule - cas 3), on surestime la RU de 0,3 mm/cm en surface et de 0,15 mm/cm en bas de profil.

Sur le site B, la RU du sol (cas 1) est de 1,21 mm/cm dans l'horizon de surface puis chute à 0,93 mm/cm à 40 cm de profondeur. Si l'on tient compte du pourcentage volumique de la phase caillouteuse mais que l'on néglige ses propriétés de rétention (cas 2), on ne sous-estime la RU que de 0,05 mm/cm

sur tout le profil. Cette faible différence est due à une RU de la phase caillouteuse très faible, qui ne participe finalement pas à la réserve totale. En revanche, si on ne tient pas compte du tout de la phase caillouteuse (terre fine seule – cas 3), on surestime de beaucoup la RU du sol (de 0,25 mm/cm). Ceci est dû au fait que le pourcentage volumique de la phase caillouteuse est non négligeable (figure 2).

Pour les deux sites étudiés, on conclut donc que la prise en compte des propriétés de rétention de la phase caillouteuse modifie le calcul de la RU dans un horizon de sol et en permet une estimation plus fiable. Cependant, la seule prise en compte des propriétés de rétention n'est pas suffisante. On constate par exemple, sur la figure 5, que la RU est à peu près constante sur l'ensemble du profil pour la terre fine seule et pour les cailloux seuls. L'évolution de la RU du mélange terre fine-cailloux en revanche n'est pas constante puisque la RU est nettement plus faible en profondeur que dans l'horizon de surface. Ceci est lié au fait que le pourcentage volumique de la phase caillouteuse est très élevé dans les horizons profonds, de l'ordre de 50 % (figure 1). De même, l'augmentation de la RU en profondeur sur le site A est due à des capacités de

rétenion élevées de la phase caillouteuse mais également à une teneur en cailloux supérieure à 50 %. Il est donc nécessaire de tenir compte à la fois des propriétés de rétention de la phase caillouteuse et de son pourcentage volumique. Dans le cas contraire, le calcul de la RU sur le profil d'un sol caillouteux peut être surestimé de 22 à 39 % si l'on néglige totalement la phase caillouteuse et sous-estimé de 8 à 34 % si l'on tient compte du volume de la phase caillouteuse mais que l'on néglige ses propriétés de rétention (figure 7).

Evolution de la teneur en eau dans l'horizon de surface

Nous avons effectué un suivi hebdomadaire de l'humidité dans la terre fine et dans les cailloux de l'horizon de surface (figure 8). Ces valeurs ont été comparées aux valeurs de l'humidité au point de flétrissement déterminées expérimentalement au laboratoire (figure 5) et de l'humidité à la capacité au champ (Nicoullaud, données non publiées). Sur le site A, l'humidité pondérale mesurée est supérieure à la valeur d'humidité à la capacité au champ jusqu'au 15 mars dans la terre fine et les cailloux. L'humidité des deux phases diminue pour atteindre

Figure 7 - Evolution de la réserve utile (mm) dans le profil. Trois cas sont envisagés pour le calcul (cf. figure 6)
 Figure 7 - Available water (mm) in the profile. The three same cases as in figure 6 are considered.

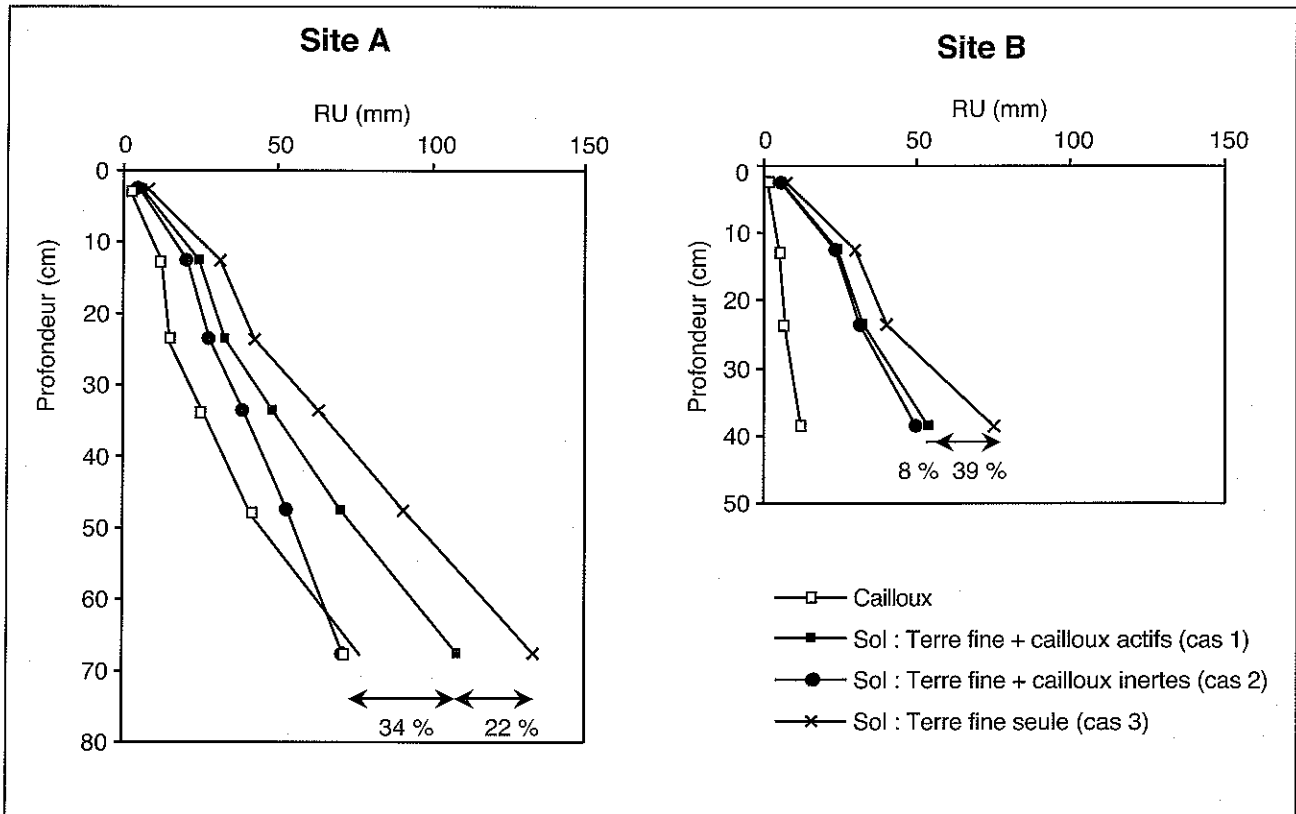


Figure 8 - Evolution temporelle de la teneur en eau dans les cailloux et la terre fine de l'horizon de surface
Figure 8 - Temporal variation of water content in fine earth and rock fragments in the upper horizon

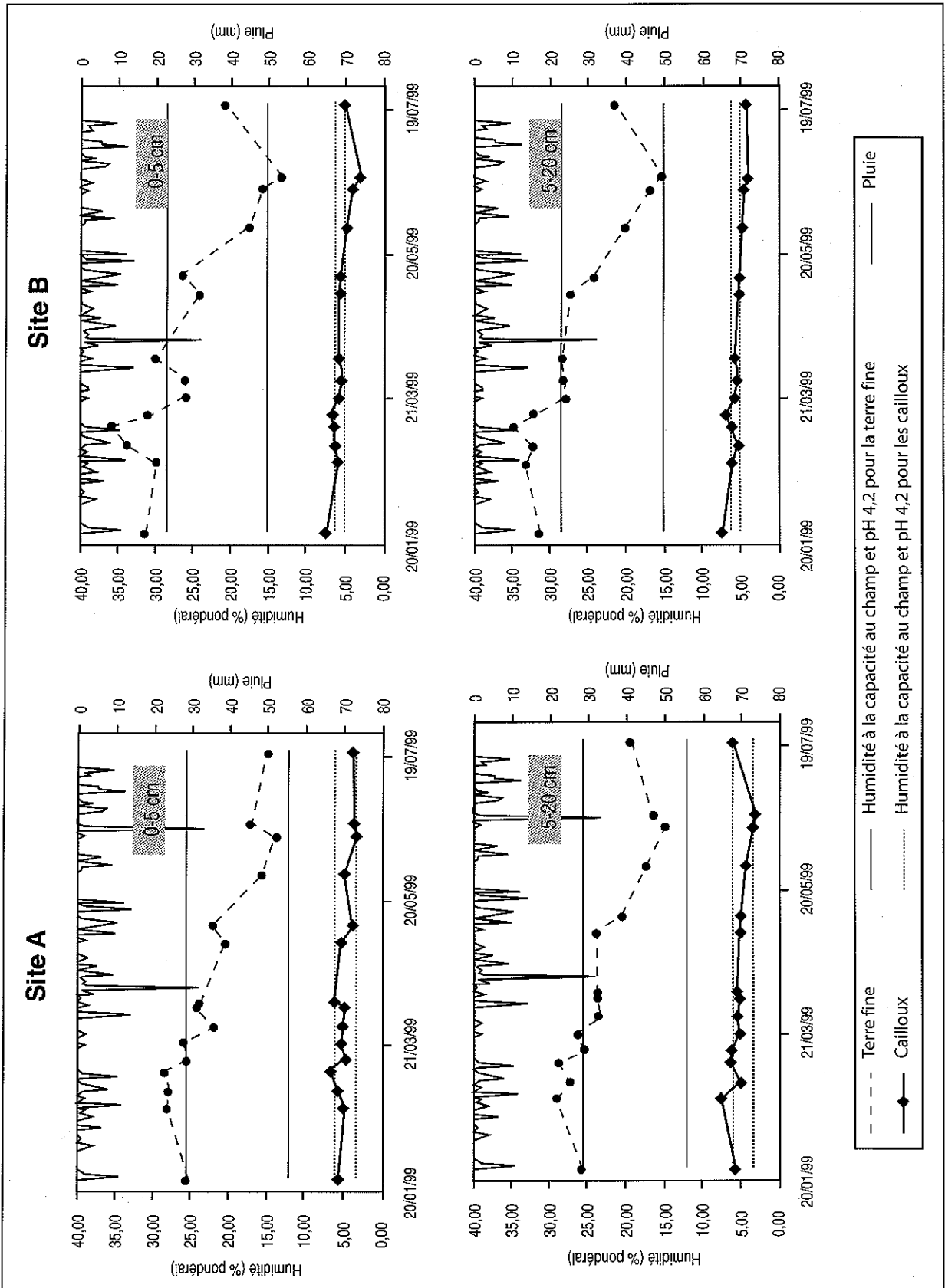
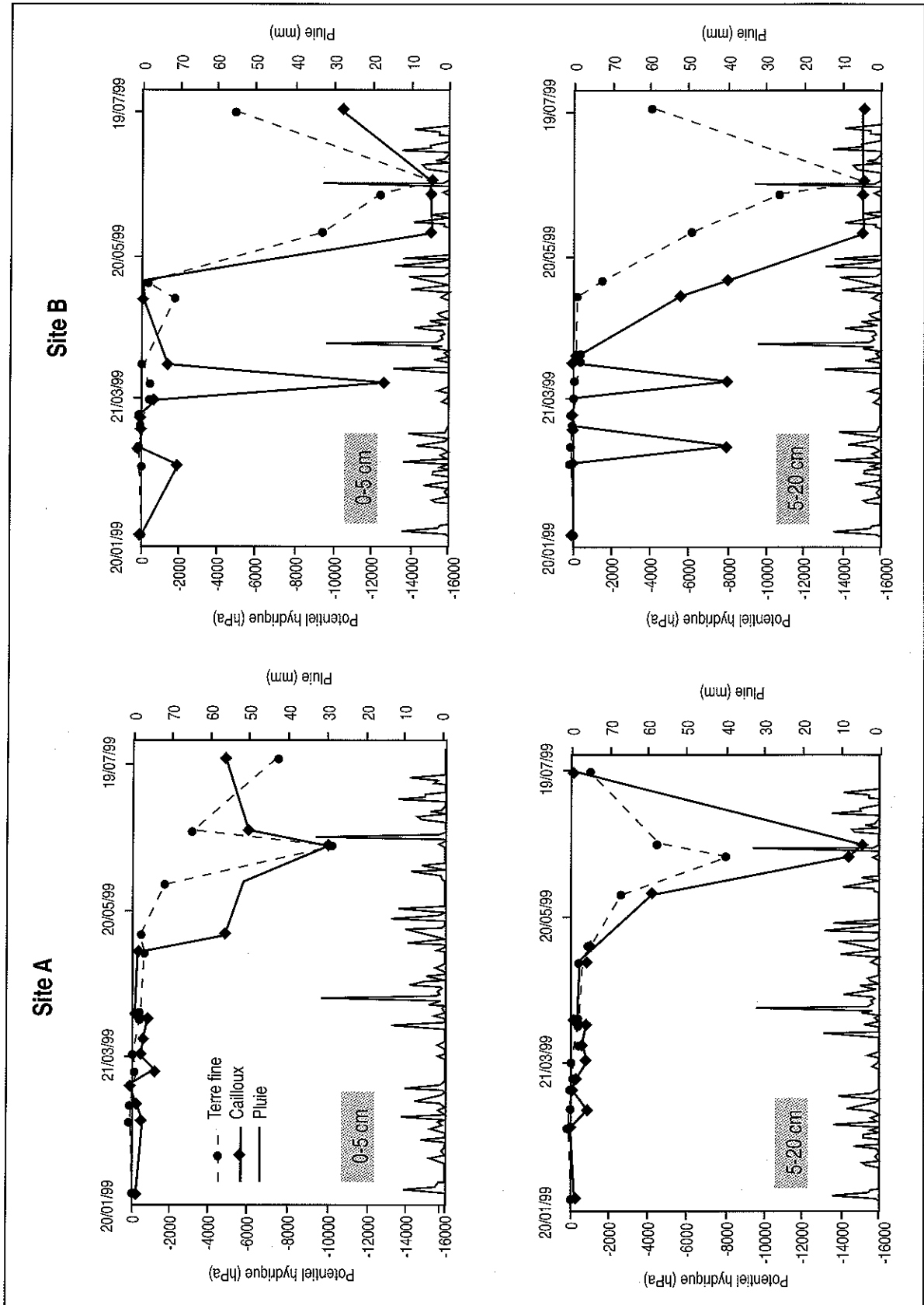


Figure 9 - Evolution temporelle du potentiel matriciel dans les cailloux et la terre fine de l'horizon de surface.
Figure 9 - Temporal variation of matrix potential in fine earth and rock fragments in the upper horizon.



la valeur au point de flétrissement le 21 juin 1999. Elle augmente ensuite dans la terre fine de l'horizon 0-5 cm. L'évolution de l'humidité sur le site B est comparable. On note cependant que l'humidité de la terre fine est inférieure ou égale à l'humidité à pF4,2 le 21 juin 1999.

L'étude seule de l'humidité pondérale ne permet pas de discuter des échanges entre les deux phases. Les courbes de rétention en eau établies au laboratoire sur la terre fine et les cailloux (*figure 5*) ont été utilisées pour déterminer l'évolution temporelle du potentiel matriciel correspondant à l'humidité mesurée au champ. Pendant la période étudiée, on distingue trois phases (*figure 9*) : la première commence au début du suivi et s'arrête début mai, la seconde s'étend de début mai au 21 juin et la troisième, postérieure au 21 juin 1999 correspond à la maturité du blé.

Lors de la première phase, les potentiels de la terre fine et des cailloux sont comparables. La valeur absolue du potentiel des cailloux est légèrement supérieure ou égale à celle de la terre fine mais on peut considérer globalement que les deux phases sont en équilibre. Les pics observés pour la terre fine aux dates du 2 et du 29 mars 1999 sur le site B sont vraisemblablement des artefacts expérimentaux dus à des erreurs de mesure.

Lors de la seconde période, les potentiels matriciels dans les cailloux et dans la terre fine diminuent et ils deviennent égaux le 16 juin. Dans le détail, on observe que les cailloux se dessèchent initialement plus rapidement (la pente de la courbe est plus forte) tandis que la terre fine se dessèche moins vite. Ensuite, la tendance s'inverse (la terre fine se dessèche plus vite que les cailloux) et les potentiels deviennent égaux le 16 juin 1999. Ce phénomène s'observe sur les deux sites et dans les deux sous-horizons de l'horizon de surface.

Lors de la troisième période, le potentiel matriciel des cailloux et de la terre fine augmente. Le potentiel de la terre fine augmente rapidement alors que celui des cailloux augmente avec un léger retard. Ce phénomène s'observe sur les deux sites mais sur le site A, suite à l'irrigation du 19 juin, les potentiels évoluent différemment dans le sous-horizon 0-5 cm : les cailloux sont toujours en phase d'humectation tandis que la terre fine commence déjà à se dessécher sous l'effet de l'évaporation.

En période hivernale et printanière, lorsque la demande évaporatoire reste faible et que les cultures sont en phase de faible croissance, on observe un équilibre entre les deux phases terre fine et cailloux. Sous des cultures en phase de forte croissance et de dessiccation, les cailloux se dessèchent plus rapidement que la terre fine, ce qui pourrait être attribué à l'activité de racines directement au contact des cailloux, ce que l'on a observé sur le terrain. Par contre, suite à une pluie ou une irrigation, en phase d'humectation, la teneur en eau de la terre fine augmente plus vite que celle des cailloux. Enfin,

lorsque la culture est mature (indice foliaire sénescent), la terre fine se dessèche plus vite que les cailloux, sous l'effet de l'évaporation.

Evolution de la teneur en eau dans les profils

Nous avons effectué un suivi de la teneur en eau sur l'ensemble des profils à trois dates. Nous présentons les résultats correspondant à la fraction de réserve utile remplie dans chaque horizon (*figure 10*).

Au 10 mars 1999, la réserve en eau est totalement remplie sur tout le profil pour les deux sites A et B et la teneur en eau de l'ensemble des horizons est même supérieure à la capacité au champ au moment du prélèvement.

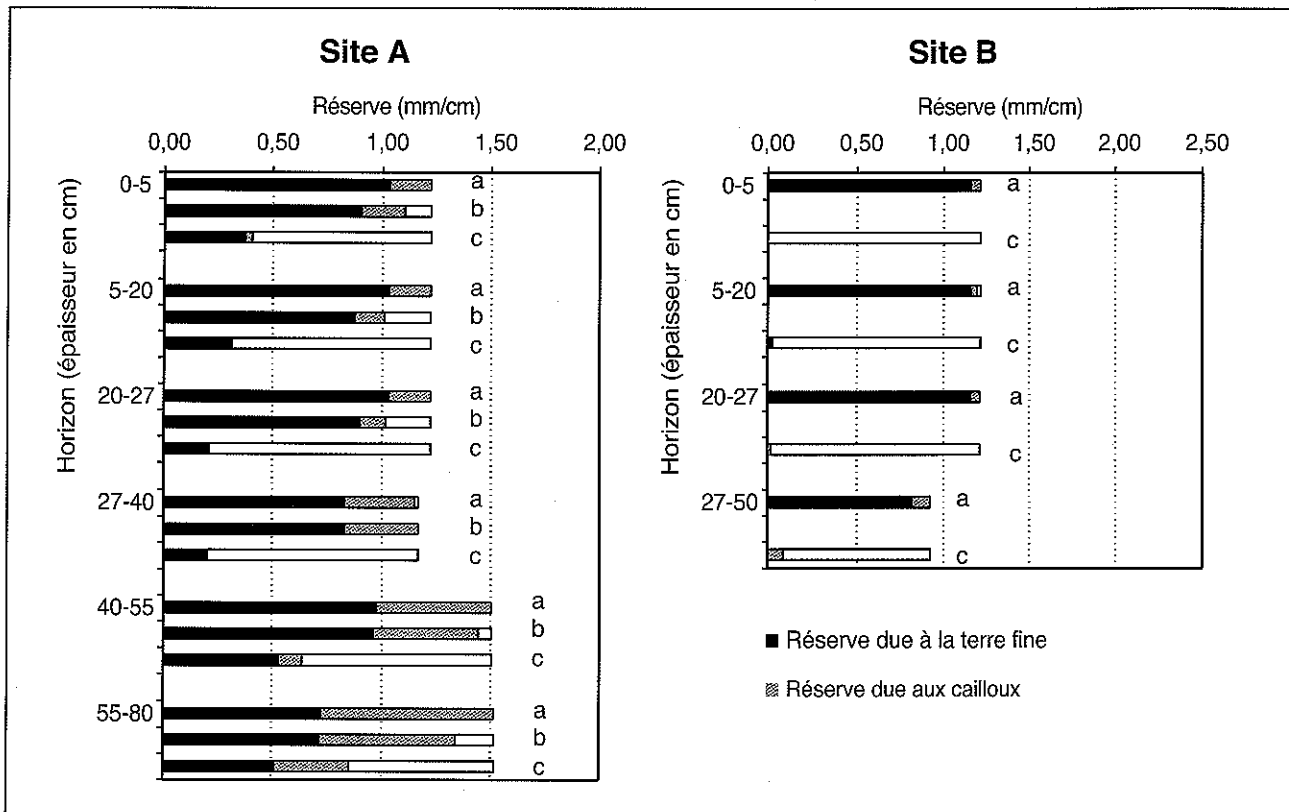
Au 8 avril 1999, sur le site A, la réserve en eau est légèrement inférieure à la réserve utile dans l'horizon de surface et elle a très peu varié dans les horizons sous-jacents. A cette date, l'enracinement se localise principalement dans l'horizon de surface (*figure 11*).

Au 21 juin 1999, sur le site A, les stocks d'eau de l'horizon de surface ont fortement diminué mais on n'atteint pas la teneur en eau au point de flétrissement en raison de l'irrigation du 19 juin 1999 (*figure 10*). Les cailloux ne fournissent plus aucune quantité d'eau disponible (sauf en très faible proportion dans l'horizon 0-5 cm). Le stock d'eau dans les horizons plus profonds diminue également mais la réserve est encore remplie à plus de la moitié dans l'horizon 55-80 cm. C'est seulement dans cet horizon qu'une part non négligeable de la réserve d'eau est contenue dans la phase caillouteuse. Par rapport au profil précédent, on constate que la diminution de la réserve dans les horizons profonds provient à la fois de la terre fine et des cailloux : la part de la réserve disponible due à la phase caillouteuse est quasiment nulle (sauf dans l'horizon 55-80 cm). A cette date, les racines se localisent principalement dans l'horizon de surface, puis leur fréquence décroît en profondeur, essentiellement à partir de 35 cm (*figure 11*). Sur le site B, la réserve est vide dans l'horizon de surface (la teneur en eau est même inférieure à l'humidité au point de flétrissement) et elle est quasiment vide dans l'horizon 27-50 cm (*figure 10*). A cette date, l'enracinement est important jusqu'à 50 cm (*figure 11*).

Dans les horizons plus profonds, où les racines ne pénètrent pas et où l'effet de la demande évaporatoire ne se fait pas sentir, les cailloux et la terre fine se dessèchent moins. Les racines absorbent vraisemblablement directement l'eau de la terre fine. Dans les horizons plus proches de la surface où les racines sont nombreuses et où les contacts entre les racines et les cailloux sont importants, l'eau des cailloux pourrait être directement utilisée par la plante sans passer par la terre fine.

Figure 10 - Evolution temporelle de la réserve en eau dans les cailloux et la terre fine le long du profil de sol à trois dates :
-a- 10/03/1999, -b- 08/04/1999, -c- 21/06/1999. (La longueur totale de chaque barre représente la réserve totale soit la RU)

Figure 10 - Temporal variation of available water in fine earth and rock fragments in whole profile for three dates :
-a- 10/03/1999, -b- 08/04/1999, -c- 21/06/1999. (The total length of each bar represents the total available water)



CONCLUSION

La détermination des propriétés de rétention de la phase caillouteuse de sols superficiels calcaires de Petite Beauce nous a permis de mettre en évidence le rôle non négligeable que jouent les cailloux dans la réserve en eau accessible aux cultures. Leur non prise en compte dans le calcul de la réserve utile sur un profil peut conduire à des sous-estimations qui atteignent parfois 40 %. Nous avons également mis en évidence que l'équilibre de teneur en eau entre phase caillouteuse et terre fine qui s'établit en période hivernale est modifié dès que les cultures deviennent actives ou que la demande évaporatoire est importante : en présence d'une culture en période de croissance active, les cailloux se dessèchent plus rapidement que la terre fine car les racines prélèvent l'eau directement à leur contact. Lorsque la culture est en phase de sénescence, c'est la terre fine qui se dessèche en premier sous l'effet de l'évaporation. Il est probable que ces échanges soient rapides et qu'ils ne concernent pas uniquement l'eau mais l'ensemble des éléments de la solution du sol. Stockage et relargage par

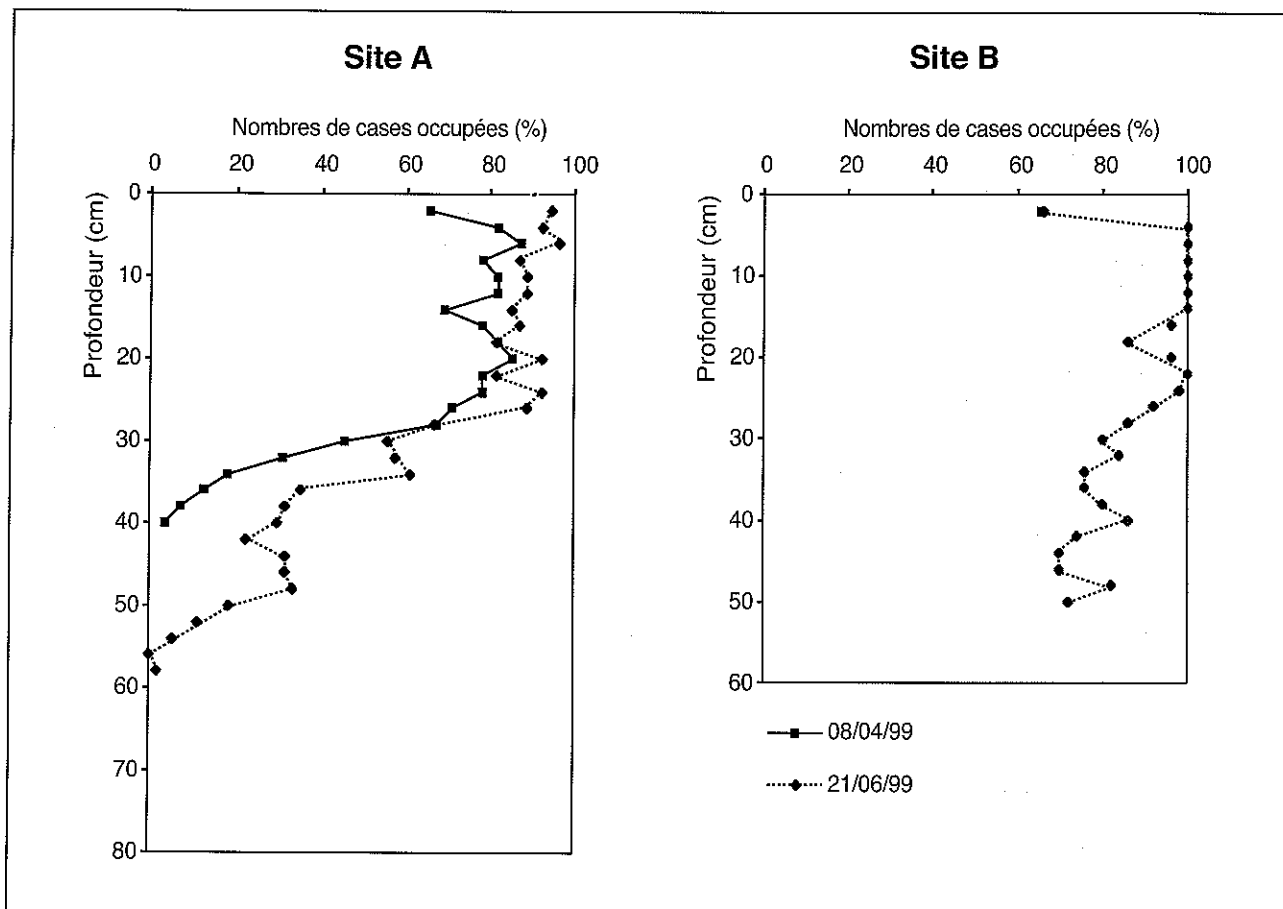
la phase caillouteuse sont donc à prendre en considération notamment dans les zones de grandes cultures où la conduite des cultures est fréquemment réalisée de façon indifférenciée par parcelle, voire sur un ensemble de parcelles, les intrants (eau et engrais) étant gérés de façon uniforme quelle que soit l'hétérogénéité du milieu. Leurs propriétés devront être prises en compte dans le cadre des techniques dites "d'agriculture de précision" qui peuvent permettre d'apporter des solutions novatrices de différenciation des apports (eau, azote...) en fonction des types de sol.

BIBLIOGRAPHIE

- Bourennane H., 1997 - Etude des lois de distribution des sols de Petite Beauce : application à la cartographie d'un horizon par couplage de méthodes morphométriques et géostatistiques. Thèse de doctorat, Orléans, 206 pp.
- Bruand A., Duval O., Gaillard H., Darhout R., Jamagne M., 1996 - Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols : importance de la densité apparente. *Etude et Gestion des Sols*, 3, 1, 27-40.

Figure 11 - Profils racinaires observés sur les deux types de sol.

Figure 11 - Root profiles in the two studied soils.



Chéry P., 1995 - Variabilité de l'épaisseur de la couverture de sol. Conséquences pour le bilan hydrique hivernal d'un secteur de Petite Beauce. Thèse de doctorat, Université Nancy I, 253 pp.

Childs S.W., Flint A.L., 1990 - Physical properties of forest soils containing rock fragments. In: S.P. Gessel, D.S. Lacate, G.F. Weetman, R.F. Powers (eds), Sustained productivity of forest soils. University of British Columbia, Faculty of Forestry publications, Vancouver, 95-121.

Coile T.S., 1953 - Moisture content of small stone in soil. *Soil Science*, 75, 203-207.

Danalatos N.G., Kosmas C.S., Moustakas N.C., Yassoglou N., 1995 - Rock fragments II. Their impact on physical properties and biomass production under Mediterranean conditions. *Soil Use and Management*, 11, 121-126.

Gras R., 1994 - Sols caillouteux et production végétale. (eds INRA), 175 pp.

Ingelmo F., Cuadrado S., Ibanez A., Hernandez J., 1994 - Hydric properties of some Spanish soils in relation to their rock fragment content: implications for runoff and vegetation. *Catena*, 23, 73-85.

Kemper W.D., Nicks A.D., Corey T., 1994 - Accumulation of water under gravel and sand mulches. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 56-63.

Monnier G., Stengel P., Fiès J.-C., 1973 - Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Annales Agronomiques*, 24[5], 533-545.

Ould Mohamed S., 1995 - Etude du fonctionnement hydrique hivernal d'un sol limono-argileux de Petite Beauce. Application d'un modèle d'infiltration et

incidence sur la lixiviation du nitrate. Thèse de doctorat, Université Orléans, 196 pp.

Poesen J., 1990 - Erosion processes research in relation to soil erodibility and some implications for improving soil quality. In *Soil degradation and rehabilitation in Mediterranean environmental conditions*. J. Albaladejo, M.A. Stocking, E. Diaz (eds). C.S.I.C., Murcia, Spain, 159-170.

Poesen J., Lavee H., 1994 - Rock fragments in top soil: significance and processes. In: *Rock fragment in soil: surface dynamics*. (eds J. Poesen and H. Lavee), *Catena* 23, 1-28.

Tardieu F., Manichon H., 1986 - Caractérisation en tant que capteur d'eau de l'enracinement du maïs en parcelle cultivée. II - Une méthode d'étude de la répartition verticale et horizontale des racines. *Agronomie*, 7 (5), 415-425.

Ugolini F.C., Corti G., Agnelli A., Piccardi F., 1998 - Under and overestimation of soil properties of rock fragments in stony soils. 16^e Congrès Mondial de Science du sol, Montpellier.

Verbègue B., Revalier, C., 1993 - Mise en œuvre d'une gestion raisonnée de l'azote en Petite Beauce. Secteur de Villamblain. Compte rendu 1^{re} année du projet Nitrates 1991-1992, Chambre d'Agriculture du Loiret, 67 pp.

