

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHES SCIENTIFIQUES POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

(ORSTOM)

Centre d'Adiopodoumé

B.P. Y-51 ABIDJAN (Côte d'Ivoire)

Laboratoire de Pédologie

**MODELISATION DE LA RELATION ENTRE LE TAUX PONDERAL
ET LE TAUX VOLUMIQUE DES SOLS GRAYILLONNAIRES**

par

Daniel BOA

Janvier 1988

SOMMAIRE

INTRODUCTION

I. METHODOLOGIE

I.1. Généralités

I.2. Matériaux pédologiques

I.3. Constitution des pots

I.3.1. Expression pondérale

I.3.2. Expression volumique

I.3.3. Correspondances pondérales et volumiques

II. RESULTATS

II.1. Expression pondérale

II.2. Expression volumique

III. DISCUSSION

III.1. Commentaires des résultats

III.2. Modélisation des expressions pondérale et volumique

III.3. Application des modèles

IV. CONCLUSION

V. BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION

Les éléments grossiers ont fait l'objet de divers travaux parmi lesquels on peut citer ceux de GRAS (1972, 1974), GRAS et MONNIER (1963). Ces auteurs se sont intéressés aux éléments grossiers de nature pétrographique. D'autres auteurs (LEVEQUE, 1969, 1970 ; MULLER et al., 1981 ; POSS, 1983) ont étudié les éléments grossiers ferrugineux sous divers aspects.

En dépit de ces nombreux travaux, les éléments grossiers ferrugineux continuent d'être considérés, à tout point de vue, comme une contrainte physique et hydrique de mise en valeur agricole.

Depuis quelques années, nous essayons d'apporter notre contribution (BOA, 1983, 1987 ; BOA et CAMARA, 1984) à la connaissance des éléments grossiers ferrugineux abondamment présents dans la majorité des sols du Nord de la Côte d'Ivoire (ESCHENBRENNER et BADARELLO, 1978 ; BEAUDOU et SAYOL, 1980 ; LEVEQUE, 1980 ; VIENNOT, 1980 ; YORO, 1982 ; POSS, 1983 ; CAMARA, 1983). Notre attention est portée sur les caractéristiques physico-hydriques et surtout sur la mise en évidence des échanges hydriques entre la matrice et les éléments grossiers afin de savoir dans quelle mesure l'eau cédée par ce type de gravillon profite à la plante.

Pour mieux apprécier l'influence physique et hydrique des gravillons ferrugineux sur le développement des végétaux, notre approche se fonde sur les expérimentations en pots contenant des mélanges binaires de terre fine et de gravillons ferrugineux. La détermination des quantités des matériaux à utiliser pour la constitution des pots a posé quelques difficultés, entre autres, le choix d'une méthode appropriée (expression pondérale ou expression volumique) qui a nécessité cette étude préliminaire.

I. METHODOLOGIE

I.1. Généralités

La méthodologie de l'expérimentation est fondée sur la constitution, dans des pots, de mélanges binaires de terre fine et d'éléments grossiers dans des proportions variables de 10 à 10 jusqu'à 90 %. Sur les mélanges obtenus, des graines d'arachide sont semées. La plante issue de la germination des graines est régulièrement alimentée en eau jusqu'à la floraison. Les apports hydriques sont calculés en fonction, d'une part, des proportions des matériaux fins et grossiers et, d'autre part, de la rétention en eau à un pF donné.

L'évolution des plantes est suivie par des mensurations hebdomadaires des tiges principale et secondaire. La fanaison ou le flétrissement des feuilles et la mort de la plante marquent la fin de l'expérimentation.

1.2. Matériaux pédologiques

Matériaux fins et grossiers	Densité	Granulométrie				
		A	LF	LG	SF	SG
Matériau sableux(S)	1,515	14,5	6,8	17,6	32,5	26,5
Matériau argilo-sableux(AS)	1,137	29,5	8,0	3,3	7,5	51,7
Matériau argileux(A)	1,062	40,2	7,3	12,0	19,9	20,2
Gravillons concrétionnés (C)	3,074					
Gravillons à quartz érisés (Q)	2,251					
Gravillons altéritiques (A)	1,954					

Tableau 1 : Caractéristiques physiques des matériaux fins et grossiers.

Les caractéristiques des matériaux utilisés pour le présent travail sont consignées dans le tableau 1. Les échantillons de la fraction fine sont de nature **sableuse (S)**, **argilo-sableuse (AS)** et **argileuse (A)**; leurs teneurs respectives en argile sont : 14,5, 20,5 et 40,2 %. Le matériau sableux présente la plus forte densité (1,515) et le matériau argileux, la valeur la plus faible (1,062).

La fraction grossière comprend trois types de gravillons essentiellement ferrugineux, de taille comprise entre 5-10 mm, dimension la plus représentative. Ce sont :

- **les gravillons concrétionnés (C)** avec une forme plus ou moins régulière, ovoïde ou franchement sphérique, de petite taille, caractérisés par une intense différenciation superficielle ou cortification marquée à la surface par un lissage ;

- **les gravillons à quartz érisés (Q)** qui se distinguent par une composition hétérogène :

- . un matériau fin de couleur variable (rouge, ocre, jaune et blanchâtre),
- . un squelette de quartz hyalin ou à imprégnation ferrugineuse.

Ces gravillons sont marqués par une cortification plus ou moins affirmée.

- **les gravillons altéritiques (A)** qui présentent ici une forme généralement polyédrique ; ils se particularisent essentiellement par une absence quasi totale de cortification et une dureté faible (quelquefois friable entre les doigts), la coloration est également hétérogène ou homogène.

Les données densitométriques montrent que les gravillons altéritiques sont moins denses (1,954), contrairement aux gravillons concrétionnés très massifs (3,074) (tabl. 1).

En résumé on peut retenir que les matériaux utilisés sont de nature nettement différenciée du point de vue morphologique, granulométrique et densitométrique. Ils sont ainsi représentatifs.

1.3. Constitution des pots d'expérimentation

Chaque matériau fin a été mélangé à tous les types de gravillons pour constituer des mélanges binaires, soit au total neuf combinaisons possibles. Toutefois, la constitution des pots exige la connaissance des quantités de matériaux fins et grossiers. Pour ce faire, deux possibilités s'offrent à nous pour déterminer les proportions des matériaux : l'expression pondérale ou l'expression volumique.

1.3.1. Expression pondérale

L'expression pondérale, comme son nom l'indique, se fonde sur la détermination des poids des matériaux. Si tous les pots devaient contenir seulement un seul type de matériau, il aurait suffi de se fixer un poids déterminé et de peser ensuite le matériau. Mais, étant donné le caractère binaire de la contenance des pots, un calcul relatif aux diverses proportions des deux catégories de matériaux est à envisager. La formule proposée est alors la suivante :

$$T = p/P \quad (1)$$

p = poids des gravillons

P = poids total des matériaux fins et grossiers

T = taux pondéral des gravillons.

Le poids total a été fixé à dix kilogrammes (10 kg). Cette valeur, en même temps qu'elle facilite les calculs permet d'éviter de trop trasser les matériaux. Pour les différents taux, les poids proportionnels des matériaux fins et grossiers (tableau 2) ont été calculés à partir de la formule dérivée de la précédente :

$$p = T.P.$$

Taux %	Poids total (g)	Poids des gravillons (g)	Poids de la terre fine (g)
10	10.000	1.000	9.000
20	10.000	2.000	8.000
30	10.000	3.000	7.000
40	10.000	4.000	6.000
50	10.000	5.000	5.000
60	10.000	6.000	4.000
70	10.000	7.000	3.000
80	10.000	8.000	2.000
90	10.000	9.000	1.000

Tableau 2 : Poids des matériaux fins et grossiers en fonction des différents taux.

On constate qu'à un taux donné, les valeurs pondérales sont identiques pour la même catégorie de matériaux, fin ou grossier. Ainsi à 30 % le poids de tous les gravillons est, par exemple, 3.000 g et celui des éléments fins 7.000 g. Cependant la constitution des pots a révélé que les volumes des mélanges binaires sont nettement disproportionnés, comme on le verra ultérieurement. Dans certains cas, le reliquat de matériau, après la constitution des pots, est trop important. Aussi avons-nous pensé à l'expression volumique.

1.3.2. Expression volumique

La présente forme d'estimation des quantités de matériaux est relative au volume. La formule utilisée est :

$$T = v/Y \quad (2)$$

v = volume des gravillons

Y = volume total des matériaux fin et grossier

T = taux volumique des gravillons.

Comme dans le paragraphe précédent, l'approche a consisté à fixer un volume total et à calculer ensuite les volumes respectifs des matériaux à partir de la forme induite de la précédente.

$$v = T.Y.$$

Le volume total retenu est 4.750 cm³. A ce volume on tasse moins les matériaux dans les pots utilisés. Le tableau 3 montre les valeurs volumiques proportionnelles de chaque type de matériau aux différents pourcentages. Ce tableau mentionne d'autres valeurs dont nous tenterons d'expliquer l'origine dans le prochain paragraphe.

DONNÉES INITIALES				DONNÉES PONDERALES CORRESPONDANTES					
Taux (%)	Volume total (cm ³)	Volume de gravillons (cm ³)	Volume de la terre fine (cm ³)	Poids correspondants des gravillons (g)			Poids correspondants de terre fine (g)		
				C	Q	A	S	AS	A
10	4750	475	4275	1460,2	1069,2	928,2	6476,6	4860,7	4540,1
20	4750	950	3800	2920,3	2138,5	1856,3	5757,0	4320,6	4035,6
30	4750	1425	3325	4380,5	3207,7	2784,5	5037,4	3780,5	3531,2
40	4750	1900	2850	5840,6	4276,9	3712,6	4317,8	3240,5	3026,7
50	4750	2375	2375	7300,8	5346,1	4640,8	3598,1	2700,4	2522,3
60	4750	2850	1900	8760,8	6415,4	5568,9	2878,5	2160,3	2017,8
70	4750	3325	1425	10221,1	7484,6	6497,1	2158,9	1620,2	1513,4
80	4750	3800	950	11681,2	8553,8	7425,2	1439,5	1080,2	1008,9
90	4750	4275	475	13141,4	9623,0	8353,4	719,6	538,1	504,5

Tableau 3 : Volumes et poids correspondants des matériaux fins et grossiers relatifs aux divers taux.

1.3.3. Correspondances pondérales et volumiques

Pour un taux donné, ce sont les quantités volumiques des matériaux du tableau 3 qui devraient être mélangées pour constituer les pots. Par exemple, au taux volumique de 20 % on aurait dû incorporer 950 cm³ de gravillons à 3.600 cm³ de terre fine. Toutefois il faut noter que dans la pratique, la détermination des volumes des gravillons s'est avérée difficile et trop fastidieuse. Aussi, connaissant les densités de tous les matériaux (tableau 1), les données volumiques ont été converties en poids ou correspondances pondérales à la faveur de la formule de la densité apparente (AUDRY et al., 1973).

$$D = P/Y \quad \text{===} \quad P = D \cdot Y.$$

D est la densité et Y le volume, à un pourcentage donné, d'un matériau considéré. Comme exemple, au taux volumique de 10 %, les volumes des gravillons et de la terre fine sont respectivement 475 cm³ et 4.275 cm³. Les produits de ces valeurs volumiques et des densités respectives des matériaux sableux et de gravillons concrétionnés ont pour résultat 6476,6 g et 1460,2 g. Ces correspondances pondérales qui figurent également dans le tableau 3 varient pour les matériaux pédologiques précités de 6476,6 à 719,6 et de 1460,2 g à 13141,4 g de 10 à 90 %.

Cette conversion des volumes des matériaux en poids a donné des résultats très satisfaisants. En effet les différents poids correspondants des matériaux ont permis, dans les mêmes conditions, de reconstituer dans les pots, des mélanges binaires de volume identique à celui qui est initialement fixé (4750 cm³). Cette

disposition nous a encouragé à traduire en données volumiques les poids proportionnels calculés dans le cas de l'expression pondérale. En d'autres termes, les données du tableau 2 ont été converties en volumes (tableau 4) à partir de la formule :

$$Y = P/D.$$

DONNEES PONDERALES INITIALES				DONNEES VOLUMIQUES CORRESPONDANTES					
Taux (%)	Poids total (g)	Poids des gravillons (g)	Poids de la terre fine (g)	Volume des gravillons (cm ³)			Volume des terres fines (cm ³)		
				C	Q	A	S	AS	A
10	10000	1000	9000	325,3	444,2	511,6	5940,6	7915,6	8474,6
20	10000	2000	8000	600,6	888,5	1023,5	5280,5	7036,1	7533,0
30	10000	3000	7000	975,9	1332,7	1935,3	4620,5	6156,6	6591,3
40	10000	4000	6000	1301,2	1777,0	2047,1	3960,4	5277,0	5649,7
50	10000	5000	5000	1626,5	2221,2	2558,9	3300,3	4397,7	4708,1
60	10000	6000	4000	1951,9	2665,5	3070,6	2640,3	3518,0	3766,5
70	10000	7000	3000	2277,2	3103,7	3582,4	1980,2	2638,5	2824,9
80	10000	8000	2000	2602,5	3554,0	4094,2	1320,1	1759,0	1883,2
90	10000	9000	1000	2927,8	3998,2	4605,9	660,1	879,5	941,6

Tableau 4 : Données pondérales et leurs correspondances volumiques.

Somme toute, les données pondérales de l'expression pondérale ont été traduites en volumes correspondants et les valeurs volumiques de l'expression volumique en poids correspondants. Il a été ainsi possible de calculer, pour chaque forme d'expression, le taux pondéral ou taux volumique correspondant (tableaux 5 et 6). A titre d'exemple, l'expression pondérale à 10 % donne 1000 g pour les gravillons concrétionnés et 9000 g pour la fraction fine. La conversion de ces valeurs pondérales en volumes a pour résultat 325,3 cm³ et 5940,6 cm³. Le taux volumique correspondant du mélange d'échantillons sableux et gravillons concrétionnés (S.C) est le rapport du volume des gravillons (325,3 cm³) sur le volume total (6265,9 cm³). Ce taux calculé est de l'ordre de 5,2 (tableau 5).

Taux pondéral	Taux volumique correspondant des mélanges binaires								
	SC	SQ	SA	AS.C	AS.Q	AS.A	AC	AQ	AA
10	5,2	7,0	7,9	3,9	5,3	6,1	3,7	5,0	5,7
	<u>4,8</u>	<u>3,0</u>	<u>2,1</u>	<u>6,1</u>	<u>4,7</u>	<u>3,9</u>	<u>6,3</u>	<u>5,0</u>	<u>4,3</u>
20	11,0	14,4	16,2	8,5	11,2	12,7	8,0	10,6	12,0
	<u>9,0</u>	<u>5,6</u>	<u>3,8</u>	<u>11,5</u>	<u>8,8</u>	<u>7,3</u>	<u>12,0</u>	<u>9,4</u>	<u>8,0</u>
30	17,4	22,4	24,9	13,7	17,8	20,0	12,9	16,8	18,9
	<u>12,6</u>	<u>7,6</u>	<u>5,1</u>	<u>16,3</u>	<u>12,2</u>	<u>10,0</u>	<u>17,1</u>	<u>13,2</u>	<u>11,1</u>
40	24,7	31,0	34,1	19,8	28,2	28,0	18,7	23,9	26,6
	<u>15,3</u>	<u>9,0</u>	<u>5,9</u>	<u>20,2</u>	<u>14,8</u>	<u>12,0</u>	<u>21,3</u>	<u>16,1</u>	<u>13,4</u>
50	33,0	40,2	43,7	27,0	33,6	36,8	25,7	32,1	35,2
	<u>17,0</u>	<u>9,8</u>	<u>6,3</u>	<u>23,0</u>	<u>16,4</u>	<u>13,2</u>	<u>24,3</u>	<u>17,9</u>	<u>14,8</u>
60	42,5	50,2	53,8	35,7	43,1	46,6	34,1	41,4	44,9
	<u>17,5</u>	<u>9,8</u>	<u>6,2</u>	<u>24,3</u>	<u>16,9</u>	<u>13,4</u>	<u>25,9</u>	<u>18,6</u>	<u>15,1</u>
70	53,5	61,9	64,4	46,3	54,1	57,6	44,6	52,4	55,9
	<u>16,5</u>	<u>8,9</u>	<u>5,6</u>	<u>23,7</u>	<u>15,9</u>	<u>12,4</u>	<u>25,4</u>	<u>17,6</u>	<u>14,1</u>
80	66,5	72,9	75,6	59,7	66,9	69,9	56,0	65,4	68,5
	<u>13,7</u>	<u>7,1</u>	<u>4,4</u>	<u>20,3</u>	<u>13,1</u>	<u>10,1</u>	<u>22,0</u>	<u>14,6</u>	<u>11,5</u>
90	81,6	85,8	87,6	76,9	82,0	84,0	75,7	80,9	83,0
	<u>8,4</u>	<u>4,2</u>	<u>2,4</u>	<u>13,1</u>	<u>8,0</u>	<u>6,0</u>	<u>14,3</u>	<u>9,1</u>	<u>7,0</u>

Tableau 5 : Correspondances volumiques des taux pondéraux et leur différence (valeurs soulignées).

Taux
volumique

Taux pondéral correspondant des mélanges binaires

	SC	SQ	SA	AS.C	AS.Q	AS.A	AC	AQ	AA
10	18,4 <u>8,4</u>	14,2 <u>4,2</u>	12,5 <u>2,5</u>	23,1 <u>13,1</u>	18,0 <u>8,0</u>	16,0 <u>6,0</u>	24,3 <u>14,3</u>	19,1 <u>9,1</u>	17,0 <u>7,0</u>
20	33,7 <u>13,7</u>	27,1 <u>7,1</u>	24,4 <u>4,4</u>	40,3 <u>20,3</u>	33,1 <u>13,1</u>	30,1 <u>10,1</u>	42,0 <u>22,0</u>	34,6 <u>14,6</u>	31,5 <u>11,5</u>
30	46,5 <u>16,5</u>	38,9 <u>8,9</u>	35,6 <u>5,6</u>	53,7 <u>23,7</u>	45,9 <u>15,9</u>	42,4 <u>12,4</u>	55,4 <u>25,4</u>	47,6 <u>17,6</u>	44,1 <u>14,1</u>
40	57,5 <u>17,5</u>	49,8 <u>9,8</u>	46,2 <u>6,2</u>	64,3 <u>24,3</u>	56,9 <u>16,9</u>	53,4 <u>13,4</u>	65,9 <u>25,9</u>	58,6 <u>18,6</u>	55,1 <u>15,1</u>
50	67,0 <u>17,0</u>	59,8 <u>9,8</u>	56,3 <u>6,3</u>	73,0 <u>23,0</u>	66,4 <u>16,4</u>	63,2 <u>13,2</u>	74,3 <u>24,3</u>	67,9 <u>19,9</u>	64,8 <u>14,8</u>
60	75,3 <u>15,3</u>	69,0 <u>9,0</u>	65,9 <u>5,9</u>	80,2 <u>20,2</u>	74,8 <u>14,8</u>	72,1 <u>12,11</u>	81,3 <u>21,3</u>	76,1 <u>16,1</u>	73,4 <u>13,4</u>
70	82,6 <u>12,6</u>	77,6 <u>7,6</u>	75,1 <u>6,5,1</u>	86,2 <u>16,2</u>	82,2 <u>12,2</u>	80,0 <u>10,0</u>	87,1 <u>17,1</u>	83,2 <u>13,2</u>	81,1 <u>11,1</u>
80	89,0 <u>9,0</u>	85,6 <u>5,6</u>	83,8 <u>3,8</u>	91,5 <u>11,5</u>	88,8 <u>8,8</u>	87,3 <u>7,3</u>	92,0 <u>12,0</u>	89,4 <u>9,4</u>	88,0 <u>8,0</u>
90	94,0 <u>4,0</u>	93,0 <u>3,0</u>	92,1 <u>2,1</u>	96,1 <u>6,1</u>	94,7 <u>4,7</u>	93,9 <u>3,9</u>	96,3 <u>6,3</u>	95,0 <u>5,0</u>	94,3 <u>4,3</u>

Tableau 6 : Equivalences pondérales des taux volumiques et leur différence (valeurs soulignées).

Toujours pour le même taux (10 %) et les mêmes matériaux, les poids correspondants (tableau 3) sont estimés à 1460,2 g et 6476,6 g soit au total 7936,8 g. Le rapport donne comme résultat 18,4 (tableau 6) qui est le taux pondéral correspondant. Toutes les données obtenues dans les tableaux 5 et 6 ont été déterminées sur la base : Conversion des données pondérales et volumiques initiales en volume et en poids et ensuite rapport des valeurs relatives des gravillons sur l'ensemble binaire.

II. RESULTATS

Dans cette partie du rapport, nous allons essayer par l'étude comparative des données volumiques et pondérales, de faire des interprétations et de dégager des conclusions.

II.1. Expression pondérale

Rappelons que les données de cette forme d'expression des gravillons sont

regroupées dans le tableau 4. Dans le tableau, on peut se rendre compte que les poids des éléments grossiers passent de 1000 g à 9000 g aux diverses proportions de 10 à 90 %. Ces valeurs évoluent dans le sens contraire au regard des éléments fins (9000 à 1000 g). A un taux donné, le poids de tous les gravillons ou de tous les échantillons de terre fine est le même. Cependant, les volumes correspondants apparaissent dissemblables. Ces volumes varient de 325,3 à 2927,8, 444,3 à 3998,2 et 551,8 à 4605 respectivement pour les gravillons concrétionnés (C), cortifiés (Q) et altéritiques (A). Les gravillons concrétionnés sont par conséquent moins volumineux que les gravillons cortifiés et ensuite que les gravillons altéritiques. Rappelons que les premiers éléments grossiers sont en revanche plus denses (3,074) que les derniers (2,251 et 1,954).

En ce qui concerne les éléments fins, le matériau argileux présente les données volumiques, les plus importantes (941,6 à 8474,6) alors que le matériau sableux ont les plus faibles valeurs (660,1 à 5940,6). Comme pour les éléments grossiers, la relation densitométrique est inversée. Les éléments fins les plus denses sont les moins volumineux. En définitive, le volume des fractions fine et grossière est lié à leur densité et à leur granulométrie. Il apparaît donc que la différenciation superficielle des gravillons (cortification, concrétionnement) qui occasionne leur densification (BOA, 1983) explique leur faible volume.

Sur la figure 1 sont portées en abscisse le taux pondéral et en ordonnée la teneur volumique. Sur les figures, les lignes en pointillées sont les bissectrices qui correspondent au cas où les deux taux sont équivalents. Mais, en réalité, les courbes des valeurs volumiques calculées en trait plein se situe en-dessous des bissectrices ce qui dénote que le taux pondéral reste, dans tous les cas, supérieur à la correspondance volumique. A preuve, au taux pondéral de 40 % (tableau 5) les correspondances volumiques sont comprises entre 18.7 et 34.1. Pour le taux pondéral de 60 % les taux volumiques oscillent entre 34,1 et 53,8. Les valeurs minimales concernent les mélanges d'argile et de gravillons concrétionnés. Les valeurs maximales, quant à elles, sont observées au niveau des matériaux sableux associés aux gravillons altéritiques.

Le tableau 7 mentionne les données des pourcentages volumiques des gravillons par rapport à la seule fraction fine. L'objectif de cette démarche est d'appréhender, à un taux donné, la proportion volumique des gravillons au regard de la terre fine au lieu de mélange total. Les données exprimées en pourcentages sont représentées sur la figure 2 sur laquelle a été tracée la ligne qui représente la proportion volumique équitable de terre fine et de gravillon. Cette ligne qui correspond à la valeur 100 % indique le cas où le volume des gravillons est égale à celui des matériaux fins. Elle coupe les courbes à des points qui correspondent en abscisse au taux pondéral. Les valeurs observées sur l'axe des abscisses sont différentes suivant la nature des matériaux. Elles sont comprises par exemple entre 55 et 70 %, d'une part, et 65 et 75 % d'autre part, pour les matériaux sableux et les échantillons argileux, toute nature des gravillons confondue.

FIG.1 : RELATION ENTRE LE TAUX PONDERAL ET LE TAUX VOLUMIQUE CORRESPONDANT

Légende : Courbes

--- : Bissectrices
 — : Courbes du taux volumique en fonction du taux pondéral

Terre fine

S = Sableuse

AS = Argilo.sableuse

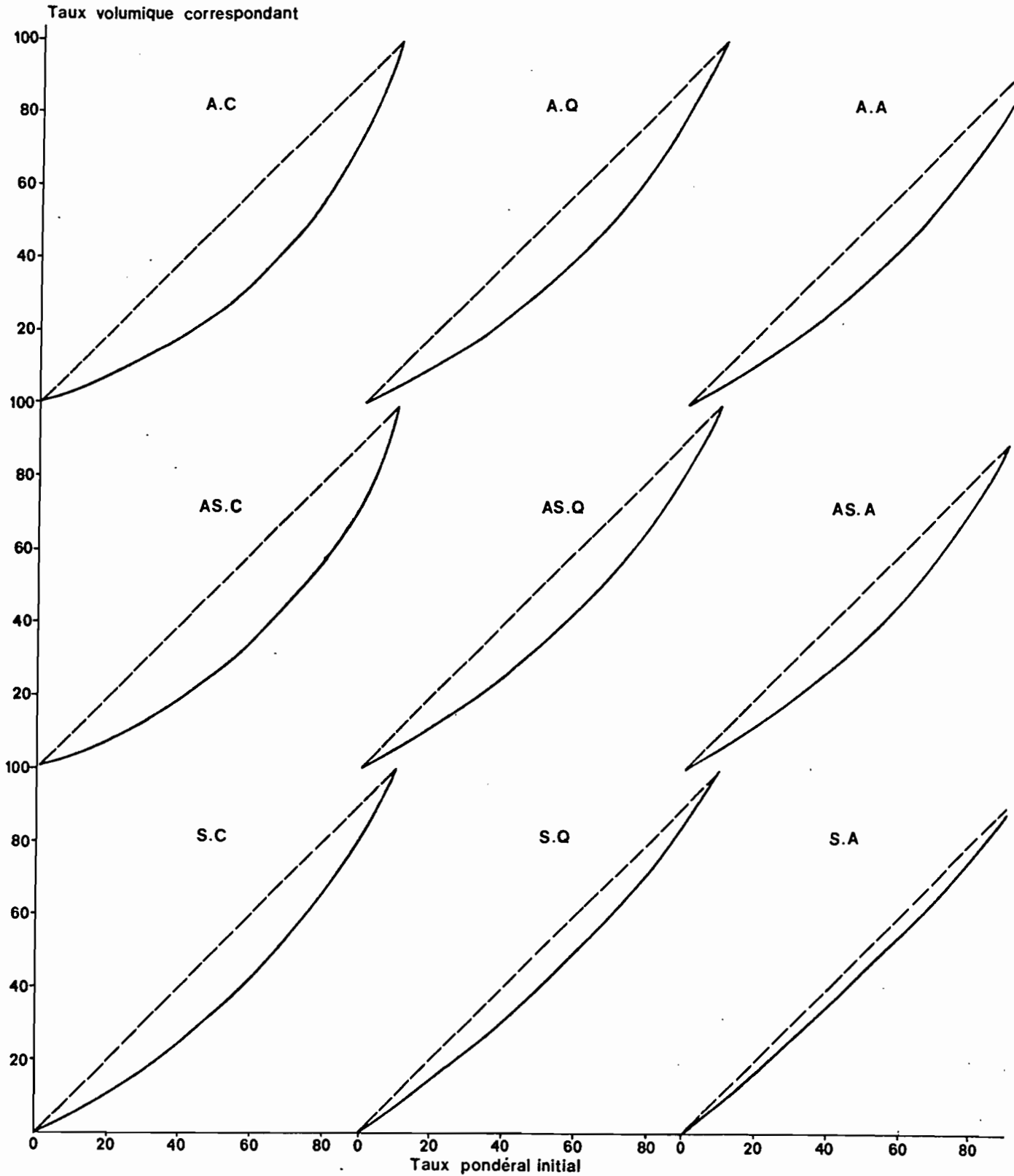
A = Argileuse

Gravillons

C = Concrétionné

Q = Cortifié

A = Altéritique



	C/S	Q/S	A/S	C/AS	Q/AS	A/S	C/A	Q/A	A/A
10	5,5	7,5	8,6	4,1	5,6	6,5	3,8	5,2	6,0
20	12,3	16,8	19,4	9,2	12,6	14,5	8,6	11,8	13,6
30	21,1	28,8	33,2	15,9	21,6	24,9	14,8	20,2	23,3
40	32,9	44,9	51,7	24,7	33,7	38,8	23,0	31,5	36,2
50	49,2	67,3	77,5	37,0	50,5	58,2	34,5	47,2	54,4
60	73,9	101,0	116,3	55,5	75,8	87,3	51,8	70,8	81,5
70	115,0	157,0	180,9	86,3	117,9	135,8	80,6	110,1	126,8
80	197,1	269,2	310,1	147,9	202,0		232,8	138,2	188,7
90	443,1	605,7	697,8	336,3	459,3		529,1	310,9	424,6

Tableau 7 : Pourcentage volumique des gravillons par rapport à la terre fine.

En définitive, lorsque les volumes des fractions fine et grossière sont équilibrés, l'expression pondérale montre des valeurs supérieures à 55 %. Cet équilibre est atteint à des teneurs pondérales beaucoup plus élevées pour les matériaux argileux à gravillons concrétionnés.

Toujours sur la figure 2, on peut remarquer que le taux pondéral de 40 % correspond dans le cas des matériaux sableux à gravillon altéritique à un rapport volumique de 50 %. Au contraire, ce dernier est estimée à 25 % seulement pour les mélanges d'argile et de gravillon concrétionné. Ceci semble traduire une diversité comportementale des matériaux exprimés par la forme pondérale, comportement qui s'explique par la présence de volume nettement inégaux des gravillons à un taux donné.

Soulignons aussi que la différence entre le taux volumique et le taux pondéral est conditionnée par le dernier cité. En effet, les différences représentées sur la figure 3 augmente d'abord et décroît ensuite en fonction du taux pondéral. L'inflexion des courbes est amorcée aux environs de 60 %. Les différences maximales s'observent à ce taux pondéral pour tous les mélanges. La valeur maximale peut atteindre 26 % en ce qui concerne les mélanges de matériaux argileux et de gravillons concrétionnés, lesquels présentent les écarts les plus prononcés.

C'est également à partir de ce taux (60 %) que le volume des gravillons commence à dominer celui de la fraction fine. En deçà de cette valeur, les taux volumiques sont inférieurs à 50 % c'est à dire que le volume des gravillons est moindre par rapport à la terre fine.

En résumé, on note une différence quelque fois très significative entre le taux pondéral et le taux volumique. Elle varie d'une part, en fonction du pourcentage car elle augmente et décroît ensuite. L'inflexion observée à partir de 60 % marque l'instant où le volume des gravillons tend à dominer celui de la terre fine. D'autre part, la disparité entre les deux taux dépend de la nature des fractions fine et grossière. Les écarts les plus accusés concernent les mélanges d'argile et de gravillons concrétionnés. Cette différence sensible s'explique par la disproportionnalité notable

FIG.2 : EVOLUTION DES RAPPORTS VOLUMIQUES DES GRAVILLONS AU REGARD DE LA SEULE FRACTION FINE

Gravillons
 C = Concrétionné
 Q = Cortifié
 A = Altéritique

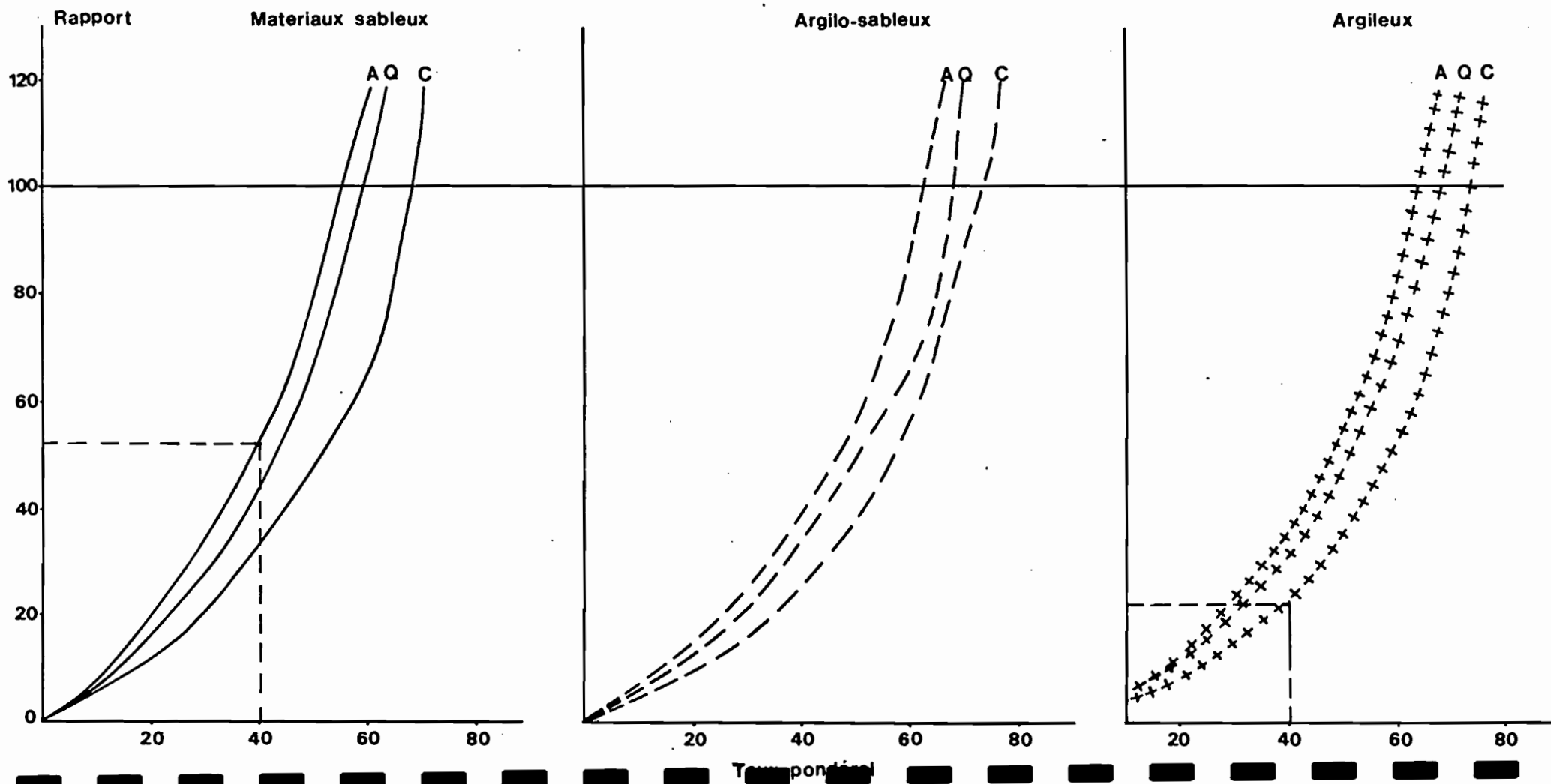
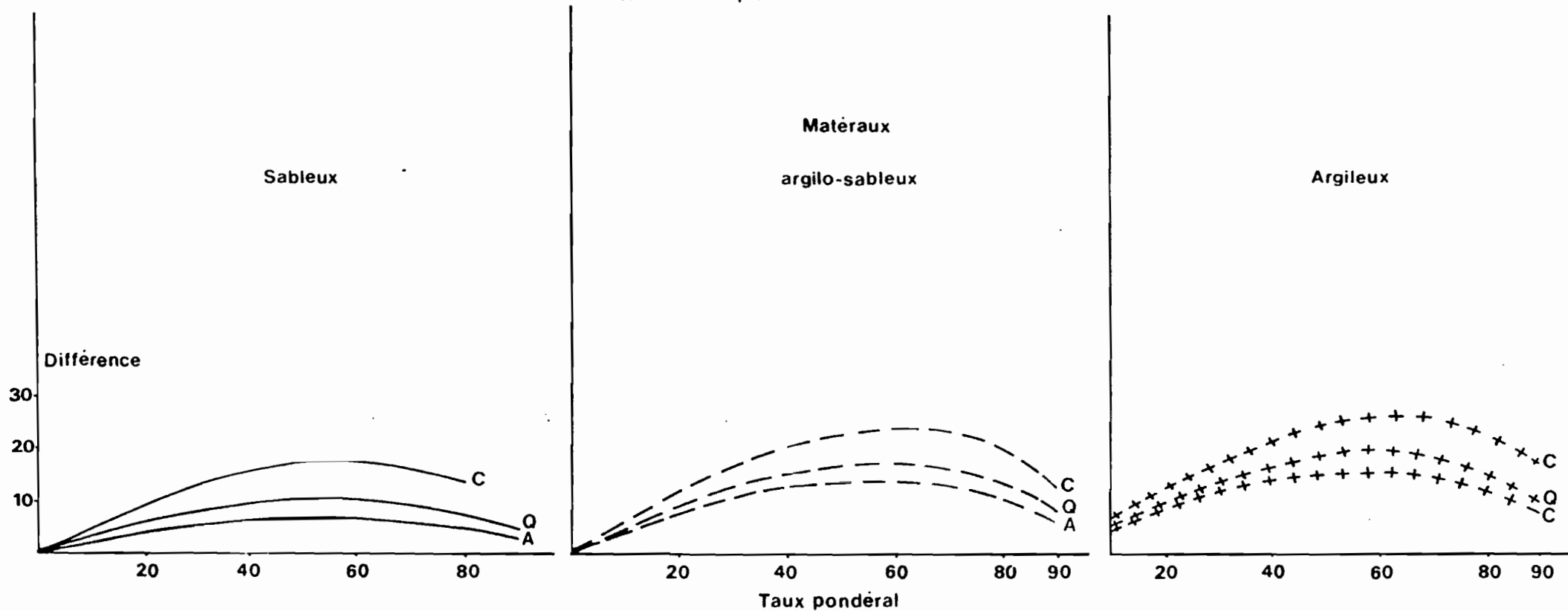


FIG.3 : EVOLUTION DES DIFFERENCES ENTRE LE TAUX PONDERAL ET LE TAUX VOLUMIQUE

Gravillons
 C = Concrétionné
 Q = Cortifié
 A = Altéritique



entre les valeurs de densités des éléments fins et grossiers. Aussi pour un volume réduit, les éléments grossiers, à cause de leur densité élevée, offrent des masses pondérales plus importants et par voie de conséquence des taux pondéraux élevés.

II.2. Expression volumique

Les valeurs initiales sont exprimées en volume. Elles sont identiques d'une part, pour les éléments grossiers (475 à 4 275) et, d'autre part, pour les matériaux fins (4 275 à 475), lorsque les proportions varient de 10 à 90 %. Le mélange de terre fine et des éléments grossiers aboutit, pour un taux donné, à un volume total semblable (4 750 m³).

Le tableau 3 mentionne également, après conversion, les correspondances pondérales des volumes aux différents pourcentages. Les valeurs pondérales relatives aux gravillons concrétionnés, cortiflés et altéritiques passent de 1460,2 à 13141,4 g, de 1069,2 à 9623,0 g et de 928,2 à 835,3 g pour les proportions variables de 10 à 90 %. Dans le même sens de variation des pourcentages précédents, les poids diminuent de 6476,6 à 719,6 g, de 4860,7 à 538,0 g et 4540,1 à 504,5 g respectivement pour les matériaux sableux, argilo-sableux et argileux.

On peut noter que les valeurs les plus élevées des correspondances pondérales des données volumiques concernent les échantillons gravillonnaires concrétionnés pour les éléments grossiers et le matériau sableux pour la fraction fine. Suivant la nature fine ou grossière, ces deux matériaux sont les plus denses. Par conséquent, le poids est ici proportionnel à la densité des matériaux mais inversement liée à la granulométrie des éléments fins.

Les taux pondéraux correspondants des pourcentages volumiques sont consignés dans le tableau 6. On peut citer par exemple, qu'au taux volumique de 20 %, les proportions pondérales équivalentes sont comprises entre 24,4 et 33,7, 30,1 et 40,3 %, 31,5 et 42,0 % respectivement pour les matériaux sableux, argilo-sableux et argileux mélangés d'une part aux gravillons altéritiques et d'autre part aux gravillons concrétionnés.

Comme on peut le constater, **les mélanges binaires à gravillons concrétionnés montrent, à volume identique, des taux pondéraux plus importants**, ce qui est conforme à leur densité très élevée. On note également que dès le taux volumique de 20 %, certains mélanges binaires surtout à base de gravillons concrétionnés présentent des teneurs pondérales supérieures à 40 %. En d'autres termes, **ces échantillons de gravillons atteignent à un volume réduit la limite dite remaniée des sols** (BOISSEZON, 1969 ; ESCHENBRENNER et BADARELLO, 1978 ; POSS, 1982).

Signalons d'autre part, au vue de l'exemple antérieur, que les valeurs des taux pondéraux équivalents sont ici aussi supérieurs aux taux volumiques comme lors de l'expression pondérale ; on relève également ici une inégalité entre les deux formes d'expression. Cette inégalité est traduite sur la figure 4. On remarque en effet que les courbes en trait plein se situent au-dessus de la bissectrice en pointillés, ce qui montre qu'il existe une différence entre les taux volumique et pondéral correspondant. Les valeurs maximales de cette différence se remarquent pour tous les mélanges à partir

FIG.4 : RELATION ENTRE LE TAUX VOLUMIQUE ET LE TAUX PONDERAL CORRESPONDANT

Légende : Courbes

--- Bissectrices

— Courbes du taux pondéral correspondant la fonction du taux volumique

Terre fine

S = Sableuse

AS = Argilo.sableuse

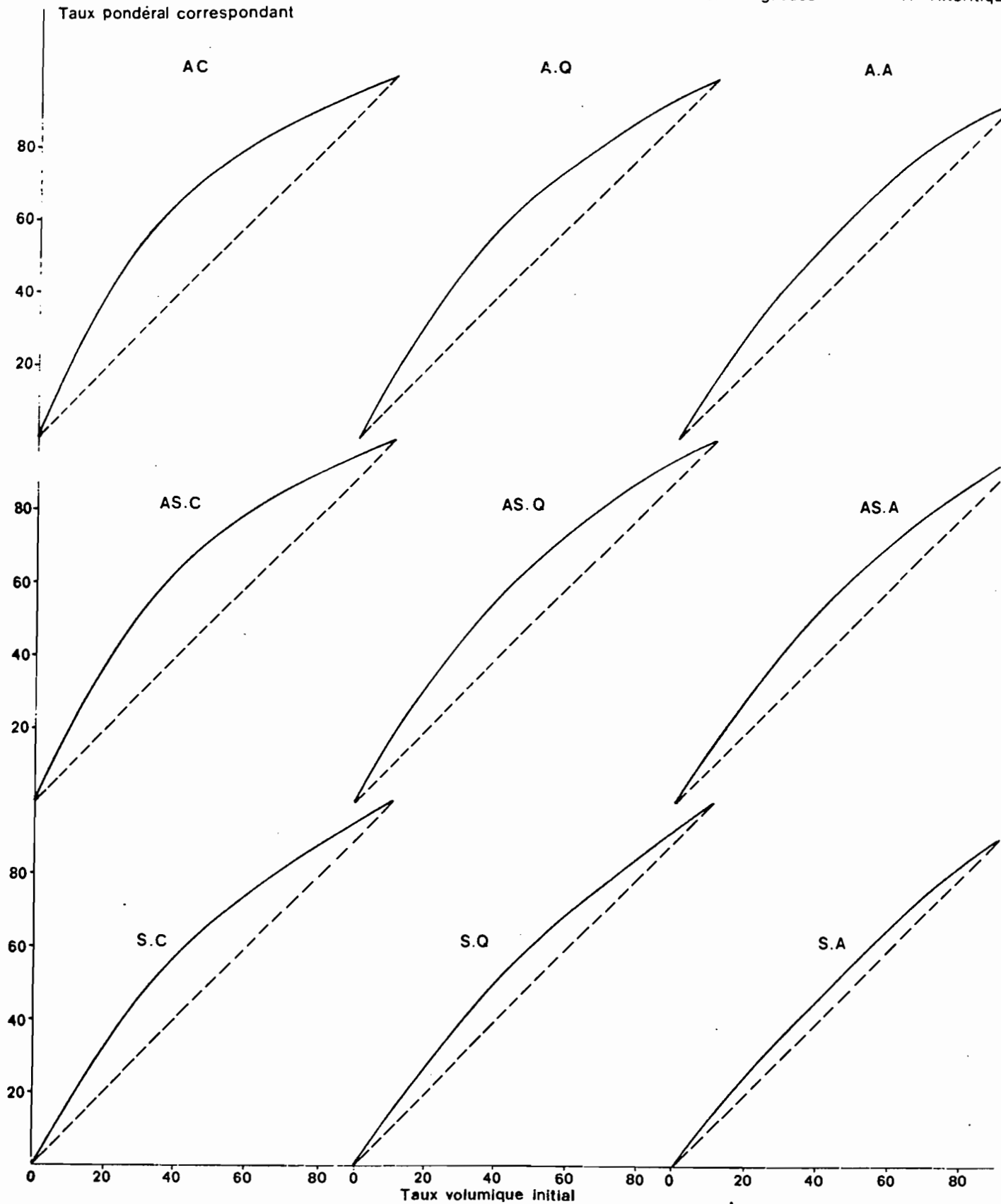
A = Argileuse

Gravillons

C = Concrétior

Q = Cortifié

A = Altéritique



de 40 %, taux volumique à partir duquel l'inflexion des courbes est observée. Ces valeurs sont semblables, à celles de l'expression pondérale mais à des taux complémentaires. En effet, les différences à 10 % dans le cas de l'expression pondérale sont identiques à celles de l'expression volumique à 90 %. Ensuite les différences au taux pondéral de 20 % correspondent également à celles de la représentation volumique de 80 % ainsi de suite (tableau 8). Ainsi le taux d'inflexion des courbes diffère d'un mode d'expression à l'autre. Il est de 60 % pour l'expression pondérale et 40 % pour l'expression volumique c'est à ce taux que le volume des gravillons tend à dominer celui de la terre fine.

Expression pondérale	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Expression volumique	90	80	70	60	50	40	30	20	10
MELANGES BINAIRES									
S.C.	4,8	9,0	12,6	15,3	17,0	17,5	16,5	13,7	8,4
S.Q.	3,0	5,6	7,6	9,0	9,8	9,8	8,9	7,1	4,2
S.A.	2,0	3,8	5,1	5,9	6,3	6,2	5,6	4,4	2,6
AS/IC	6,1	11,5	16,3	20,2	23,0	24,3	23,7	20,3	12,9
A.S/Q	4,7	8,8	12,2	14,8	16,4	16,9	15,9	13,3	7,9
AS/A	3,9	7,3	10,0	12,0	13,2	13,4	12,4	10,1	5,9
A.C.	6,3	12,0	17,1	21,3	24,3	25,6	25,4	22,0	14,3
A.Q.	5,0	9,4	18,2	16,1	17,9	18,6	17,6	14,6	9,1
A.A.	3,3	8,0	11,2	13,4	14,8	15,1	14,1	11,5	7,0

Tableau 8 : Valeurs de la différence entre le taux pondéraux et volumiques dans les deux formes d'expression des gravillons.

III. DISCUSSION

III.1. Commentaires des résultats

On peut retenir des résultats précédents que **le taux pondéral est**, quel que soit le mode d'expression des gravillons, **supérieur au taux volumique**. Dans le cas de l'expression pondérale, **les matériaux à base de gravillons concrétionnés présentent les valeurs les plus élevées** conformément à leur densité. Sur le plan volumique, ces mêmes matériaux ont une représentation plus réduite. **Ceci est d'autant plus accusé que le matériau fin associé est de nature argileuse**. En d'autres termes, l'expression pondérale surestime la teneur volumique car, **en réalité, les volumes sont nettement plus faibles que le laisse envisager le taux pondéral**. De manière générale, le taux pondéral est proportionnel à la densité des matériaux mais il est inversement corrélié à la granulométrie. Au contraire il existerait d'une part, une relation inverse entre le taux volumique et la densité, et d'autre part, une liaison positive entre le même taux et la granulométrie.

Notons que si la différence entre les deux formes d'expression des gravillons (pondérale et volumique) varie en fonction de la nature des matériaux fins ou grossiers, elle l'est également selon le pourcentage considéré. Très faible au départ, celle-ci augmente et décroît par la suite. Dans les deux cas, la différence s'accorde mais à des taux complémentaires. Elle est maximale à l'approche de l'équilibre volumique entre les deux catégories de matériaux fins et grossiers. C'est ainsi que sur le plan volumique, les différences maximales pour tous les mélanges binaires s'observent à partir de 40 %, et pour l'expression pondérale, aux environs de 60 %. Cette disparité entre les deux taux diminue lorsque le volume des gravillons domine celui de la terre fine. Elle est estimée au minimum à 2 % et au maximum à 26 %.

Les échantillons à base de gravillons concrétionnés, à raison de leur densité élevée, offrent, à volume identique, des pourcentages pondéraux plus importants par rapport aux autres éléments gravillonnaires. On remarque en effet que le taux volumique est pareil (34,1) pour les matériaux sableux à gravillons altéritiques d'une part et argileux à gravillons concrétionnés d'autre part aux taux pondéraux de 40 % pour les premiers et 60 % pour les seconds, soit une différence de 20 %. En conséquence, les sols renfermant les gravillons concrétionnés semblent être pénalisés pour une représentation volumique plus faible lorsque la pénalisation se réalise au même taux pondéral estimé à 50 % en poids du sol en place (LEVEQUE, 1980 ; BOYER, 1982). Par ailleurs la densité apparente des gravillons concrétionnés étant inversement proportionnelle à leur taille (BOA, 1983) les sols contenant les éléments grossiers de dimension plus petite atteignent le taux pondéral limitant à un volume encore beaucoup plus réduit. Ce préjudice aux sols à gravillons concrétionnés est d'avantage remarquable avec les matériaux plus argileux.

De manière générale, **l'expression pondérale défavoriserait sur le plan volumique, les mélanges des matériaux fins à faible densité et les éléments grossiers plus denses**. Au taux pondéral de 40 %, taux référentiel pour caractériser le phénomène de remaniement (BOISSEZON, 1969 ; ESCHENBRENNER, 1978 ; POSS, 1982) le pourcentage volumique représente, parfois, moins de la moitié de l'équivalence pondérale : cas des matériaux argilo-sableux ou argileux mélangés aux gravillons concrétionnés (19,8 et 18,7). En tout état de cause, ces taux volumiques

apparaissent relativement faibles. Autrement dit, le volume des gravillons est très réduit pour constituer une contrainte. Il semble, pour résoudre le problème, **considérer une marge de taux contraignants, le taux devant être plus élevé en ce qui concerne les matériaux plus argileux à base de gravillons concrétionnés.** Mais l'idéal est de trouver une formule qui permette de convertir le taux pondéral, facilement calculable sur le terrain, en taux volumique qui représente la réalité de la masse exploitable par les racines. C'est ce que nous tentons de faire dans le prochain paragraphe.

III.2. Modélisation des expressions pondérale et volumique

Avant la proposition des formules, il convient de rappeler que le taux pondéral est, dans tous les cas, plus important que le taux volumique. La différence observée entre les deux formes d'expression des gravillons varie en fonction de la nature des fractions fine et grossière et du pourcentage exprimé. Elle augmente d'abord et décroît par la suite.

C'est en tenant compte des considérations précédentes que nous proposons les formules suivantes pour la conversion des données d'un mode d'expression à l'autre.

Expression pondérale

$$TY = Tp + (100 - Tp) \text{Log} (1 - Tp/100) (G + A/100) \quad (1)$$

Expression volumique

$$Tp = TY - TY \text{Log} (TY/100) (G + A/100) \quad (2)$$

Dans ces formules TY et Tp correspondent respectivement aux taux volumique et pondéral. A et G représentent les paramètres liés à la nature de la terre fine et aux éléments gravillonnaires. A est précisément la valeur granulométrique de la fraction fine. G est une constance spécifique à un type de gravillon donné. Les valeurs estimées de la constance G sont de l'ordre :

- Gravillons altéritiques	:	0,30 ± 0,5
- Gravillons cortifiés	:	0,55 ± 0,5
- Gravillons concrétionnés	:	1,00 ± 0,5

La constance G est proportionnelle à la densité apparente des gravillons. Sa valeur peut augmenter ou diminuer suivant la variation des données densitométriques, précisément, suivant le degré d'intensité des phénomènes caractéristiques des différents types de gravillons (altérisation, cortification, concrétionnement) et leur taille.

L'application de la première formule (1) suppose la connaissance du taux pondéral des gravillons. Cette détermination est plus facile sur le terrain et donc plus régulière. Cette formule permet de calculer l'équivalence volumique.

La seconde formule (2) exige la connaissance préalable du pourcentage volumique. Cette pratique est un peu plus difficile sur le terrain en particulier la détermination du volume des gravillons. Cette deuxième formule traduit en données pondérales les taux volumiques.

III.3. Application des modèles

Les résultats de l'application des formules précédentes sont consignés dans les tableaux 9 et 10. Tp et Ty représentent les pourcentages pondéraux et volumiques initiaux.

Taux pondéral (Tp)	MELANGES BINAIRES								
	SC	SQ	SA	AS/C	AS/Q	AS/A	AC	AQ	AA
10	6,5	7,0	7,9	3,9	5,3	6,1	3,7	5,0	5,7
	<u>5,5</u>	<u>7,2</u>	<u>8,2</u>	<u>4,7</u>	<u>6,5</u>	<u>7,5</u>	<u>6,2</u>	<u>6,1</u>	<u>7,1</u>
20	11,0	14,4	16,2	8,5	11,2	12,7	8,0	10,6	12,0
	<u>11,1</u>	<u>14,6</u>	<u>16,6</u>	<u>10,0</u>	<u>13,4</u>	<u>15,4</u>	<u>9,1</u>	<u>12,6</u>	<u>14,6</u>
30	17,4	22,4	24,9	13,7	17,8	20,0	12,9	16,8	18,9
	<u>17,6</u>	<u>22,5</u>	<u>25,2</u>	<u>16,0</u>	<u>20,8</u>	<u>23,5</u>	<u>14,8</u>	<u>19,7</u>	<u>14,6</u>
40	24,7	31,0	34,1	19,8	25,2	28,0	18,7	23,3	26,6
	<u>24,8</u>	<u>30,7</u>	<u>34,1</u>	<u>22,8</u>	<u>28,8</u>	<u>32,1</u>	<u>21,3</u>	<u>27,3</u>	<u>30,7</u>
50	33,0	40,2	43,7	27,0	33,6	36,8	25,7	32,1	35,2
	<u>32,8</u>	<u>39,5</u>	<u>43,3</u>	<u>30,5</u>	<u>37,3</u>	<u>41,0</u>	<u>28,9</u>	<u>35,7</u>	<u>39,4</u>
60	42,5	50,2	53,8	35,7	43,1	46,6	34,1	41,4	44,9
	<u>41,8</u>	<u>48,9</u>	<u>52,9</u>	<u>39,4</u>	<u>46,5</u>	<u>50,5</u>	<u>37,7</u>	<u>44,8</u>	<u>48,8</u>
70	53,5	61,1	64,4	46,3	54,1	57,6	44,6	52,4	55,9
	<u>52,0</u>	<u>59,1</u>	<u>63,0</u>	<u>49,7</u>	<u>56,7</u>	<u>60,7</u>	<u>48,0</u>	<u>55,1</u>	<u>55,0</u>
80	66,5	72,9	75,6	59,7	66,9	69,9	58,0	65,4	68,5
	<u>64,0</u>	<u>70,3</u>	<u>73,8</u>	<u>61,9</u>	<u>68,2</u>	<u>71,7</u>	<u>60,4</u>	<u>66,7</u>	<u>70,2</u>
90	81,6	85,8	87,5	76,9	82,0	84,1	75,7	80,9	83,0
	<u>78,6</u>	<u>83,1</u>	<u>85,6</u>	<u>77,1</u>	<u>81,6</u>	<u>84,1</u>	<u>76,0</u>	<u>80,5</u>	<u>83,0</u>

Tableau 9 : Taux volumiques correspondants (Tvc) comparée à ceux acquis par l'application de la formule 1 (Tvf).

NB : Tpc : Valeurs non soulignées
Tpf : Valeurs soulignées

MELANGES BINAIRES

Taux volumique (Tv)	SC	SC	SA	AS/C	AS/C	AS/A	AC	AG	AA
10	18,4	14,2	12,5	23,1	18,0	16,0	24,3	19,1	17,0
	<u>21,5</u>	<u>17,0</u>	<u>14,5</u>	<u>23,0</u>	<u>18,5</u>	<u>16,0</u>	<u>24,0</u>	<u>16,5</u>	<u>17,0</u>
20	33,7	27,1	24,4	40,3	33,1	30,1	46,0	34,6	31,5
	<u>36,0</u>	<u>29,7</u>	<u>26,2</u>	<u>38,1</u>	<u>31,8</u>	<u>28,3</u>	<u>39,6</u>	<u>33,3</u>	<u>29,9</u>
30	46,5	38,9	36,5	53,7	45,9	42,4	55,4	47,6	44,1
	<u>48,0</u>	<u>40,9</u>	<u>37,0</u>	<u>50,3</u>	<u>43,3</u>	<u>39,3</u>	<u>52,0</u>	<u>44,9</u>	<u>41,0</u>
40	57,2	49,8	46,2	64,3	56,9	53,4	65,9	58,6	55,1
	<u>58,2</u>	<u>51,1</u>	<u>47,1</u>	<u>60,6</u>	<u>53,5</u>	<u>49,5</u>	<u>62,3</u>	<u>55,2</u>	<u>51,2</u>
50	67,0	59,8	56,3	73,0	66,4	63,2	74,3	67,9	64,8
	<u>67,2</u>	<u>60,5</u>	<u>56,7</u>	<u>69,5</u>	<u>62,7</u>	<u>59,0</u>	<u>71,9</u>	<u>64,3</u>	<u>60,6</u>
60	75,3	69,0	65,9	80,2	74,8	72,1	81,3	76,1	73,4
	<u>75,2</u>	<u>69,3</u>	<u>65,9</u>	<u>77,2</u>	<u>71,2</u>	<u>67,9</u>	<u>76,7</u>	<u>72,7</u>	<u>69,3</u>
70	82,6	77,6	75,1	86,3	82,2	80,0	87,1	83,2	81,1
	<u>82,4</u>	<u>77,5</u>	<u>74,8</u>	<u>84,0</u>	<u>79,2</u>	<u>76,5</u>	<u>85,2</u>	<u>80,3</u>	<u>77,6</u>
80	89,0	85,6	83,8	91,5	88,8	87,3	92,0	89,4	88,0
	<u>88,9</u>	<u>85,4</u>	<u>83,4</u>	<u>90,0</u>	<u>86,6</u>	<u>84,6</u>	<u>90,7</u>	<u>87,4</u>	<u>85,4</u>
90	94,0	93,0	92,1	96,5	94,7	93,9	96,3	95,0	94,3
	<u>94,7</u>	<u>92,9</u>	<u>91,8</u>	<u>95,3</u>	<u>93,5</u>	<u>92,5</u>	<u>95,8</u>	<u>93,9</u>	<u>92,9</u>

Tableau 10 : Teneurs pondérales correspondantes (Tpc) comparées à celles acquises par l'application de la formule 2 (Tpf)

N.B. : Tpc : valeurs non soulignées
Tpf : valeurs soulignées

Tpc et Tvc sont les correspondances pondérales et volumiques des teneurs initiales. Enfin, Tpf et Tyf sont les valeurs obtenues par l'application des formules (1) et (2).

Pour une bonne compréhension des comparaisons, les correspondances Tpc et Tvc et les données acquises à la faveur de l'application des formules (Tpf et Tyf) ont été représentées sur les figures 5 et 6. Dans les deux cas de figures, on remarque quelquefois une différence entre les deux types de données. Cependant, il faut souligner que ces écarts ne sont pas significatifs. La détermination de valeurs du paramètre G sur des bases plus scientifiques, se fondant sur la valeur des densités apparentes des gravillons, aurait probablement abouti à un resserrement des résultats. Toutefois, nous avons préféré attribuer des constances aux grands ensembles de gravillons, altéritiques, cortifiés et concrétionnés, pour éviter que l'utilisation des présentes formules engendre la détermination obligatoire de la densité apparente des gravillons, laquelle exige de difficiles manipulations au laboratoire. Au contraire, sur le terrain, il apparaît aisé d'apprécier l'importance de l'une des grandes catégories de gravillons à l'instar de la texture de la terre fine.

FIG.5 : COMPARAISON DES TAUX VOLUMIQUES CORRESPONDANT (T_{vc}) ET ACQUIS PAR L'APPLICATION DE LA FORMULE (T_{vf})

Légende : Courbes

T_{vc} = —

T_{vf} = - - -

Terre fine

S = Sableuse

AS = Argilo. sableuse

A = Argileuse

Gravillons

C = Concrétionné

Q = Cortifié

A = Altéritique

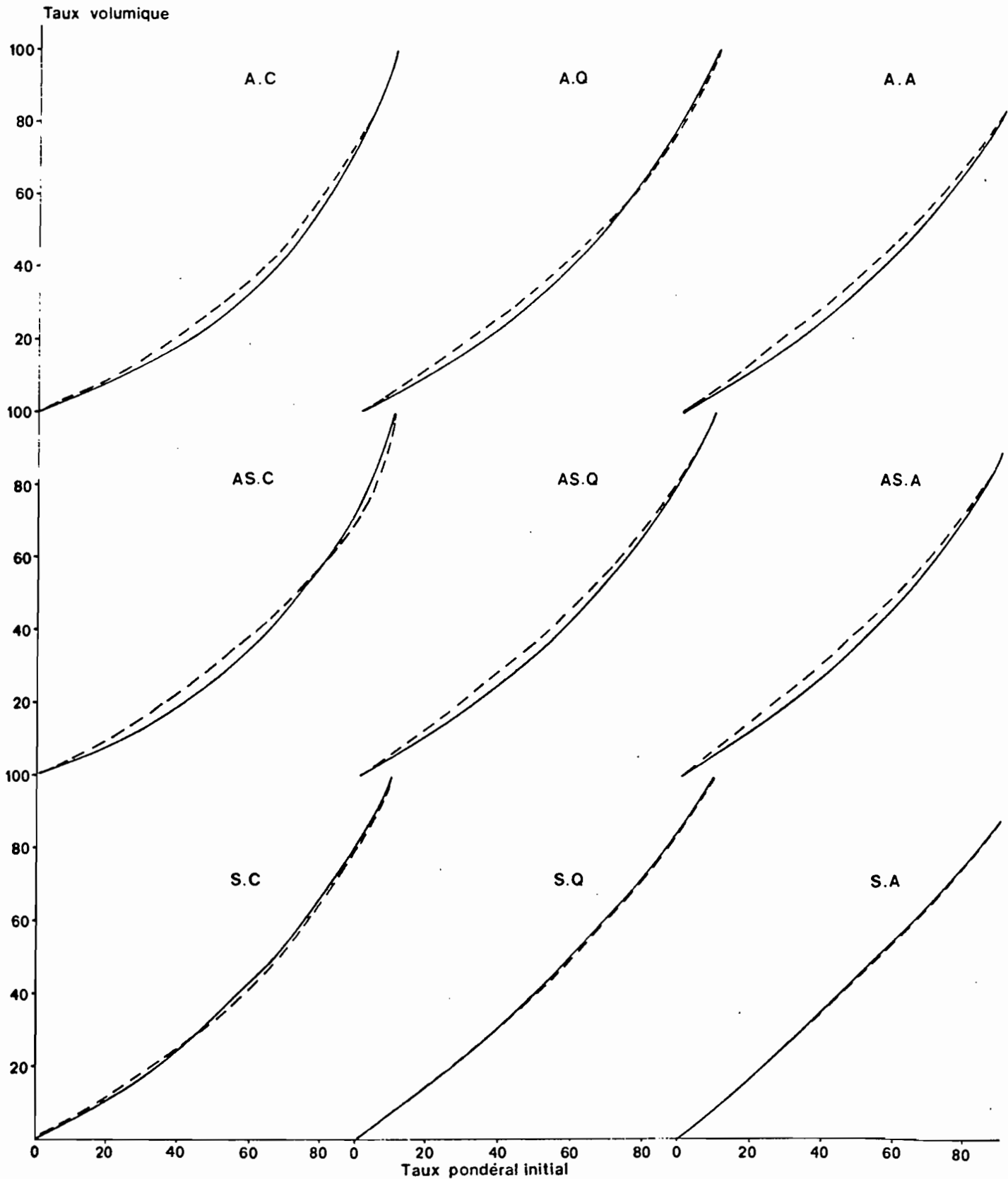
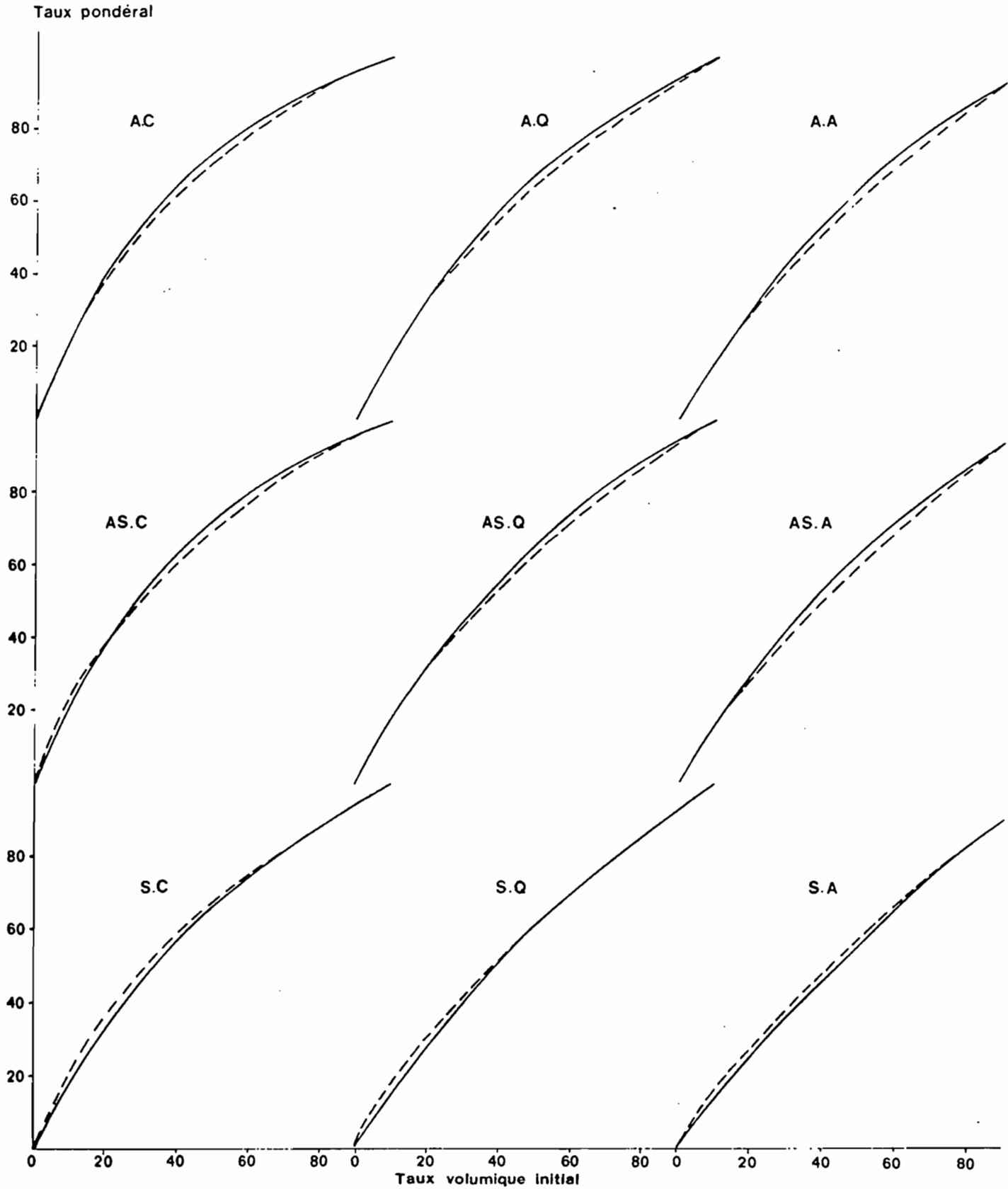


FIG. 6 : COMPARAISON DES TAUX PONDERAUX CORRESPONDANT (T_{pc}) ET ACQUIS PAR L'APPLICATION DE LA FORMULE (T_{pf})

Légende : Courbes
 T_{pc} : ———
 T_{pf} : - - -

Terre fine
 S = Sableuse
 AS = Argilo-sableuse
 A = Argileuse

Gravillons
 C = Concrétionné
 Q = Cortifié
 A = Altéritique



En conclusion, les formules proposées, bien qu'elles ne soient pas bien précises, donnent une idée très proche surtout de la correspondance volumique des données pondérales. Ce qui permet de mieux apprécier la masse volumique de terre fine à la disposition des racines des plantes.

CONCLUSION

Il ressort de cette étude comparative que le taux pondéral surestime le taux volumique. La différence entre ces deux formes d'expression des gravillons est fonction de la nature de la terre fine, des éléments grossiers et du pourcentage considéré. Cette disparité semble s'expliquer par la disproportionnalité entre les densités des fractions fine et grossière. C'est ainsi que les mélanges d'échantillons argileux et dans une moindre mesure, argilo-sableux aux gravillons concrétionnés présentent les écarts les plus prononcés.

Au taux pondéral de 40 %, taux de référence de certains pédologues à l'ORSTOM pour caractériser le phénomène de remaniement des sols, **les gravillons concrétionnés** incorporés aux mêmes types de matériaux fins précités **représentent moins de 20 % en volume**. En revanche, les mélanges à base de gravillons altéritiques montrent des taux volumiques plus importants.

Il apparaît anormal de pénaliser les sols gravillonnaires à un taux pondéral unique. Il y a lieu, plutôt, de considérer une marge de taux pondéral. Toutefois l'idéal est d'exprimer les proportions des gravillons dans le sol en données volumiques. C'est pourquoi nous proposons dans le présent rapport **deux formules qui permettent la conversion des données d'une forme d'expression à l'autre.**

Mais l'existence de ces formules ne résoud pas le problème de limite contraignante pour les plantes au regard de la présence des gravillons dans les sols. C'est donc ce qu'on peut attendre ultérieurement des expérimentations en pots.

BIBLIOGRAPHIE

- AUDRY (P.), COMBEAU (A.), HUMBEL (F.X.), ROOSE (E.J.), YIZIER (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.
- BEAUDOU (A.G.), SAYOL (R.), 1980. Etude pédologique de la région de Boundiali-Korhogo (Côte d'Ivoire). Cartographie et typologie sommaire des sols. Feuilles de Boundiali et de Korhogo à 1:200.000. ORSTOM-Paris. Notice explicative N° 84, 47 p.
- BOA (D.), 1983. Caractéristiques hydriques des gravillons ferrugineux dans les sols ferrallitiques. ORSTOM, Adiopodoumé, 50 p., multigr., 8 fig. 27 tabl.
- BOA (D.), 1987. Terminologie et caractérisation des gravillons ferrugineux (glébules) du bassin versant de Booro-Borotou (région de Touba, Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire), 12 p., 10 photos.
- BOA (D.), CAMARA (M.), 1984. Principaux types de sols et gravillons du bassin versant de Booro-Borotou (région de Touba, Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). ORSTOM, Adiopodoumé, 16 p., multigr., 1 tabl.
- BOISSEZON (de P.), 1969. Notice sur la classification des sols ferrallitiques. ORSTOM-Adiopodoumé, 13 p., multigr.
- BOYER (J.), 1982. Les sols ferrallitiques. Facteurs de fertilité et utilisation des sols. Doc. tec. n° 52, ORSTOM, Paris, 384 p.
- CAMARA (M.), 1983. Etude pédologique et représentation cartographique à 1:50.000 de la région de Tiéningboué (Centre Nord de la Côte d'Ivoire). Contraintes et potentialités agronomiques des types de sols reconnus dans la zone ORSTOM-Adiopodoumé, 50 p.
- ESCHENBRENNER (Y.), BADARELLO (L.), 1978. Etude pédologique de la région d'Odienné (Côte d'Ivoire). Carte des paysages morpho-pédologiques. Feuille d'Odienné à 1:2.00.000. ORSTOM-Paris, notice explicative n° 74, 119 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.
- GRAS (R.), MONNIER (G.), 1963. Contribution de certains éléments grossiers du sol à l'alimentation en eau des végétaux. Sc. du Sol n° 1, pp. 13 à 30.

- LEVEQUE (A.), 1980. Etude pédologique et ressources en sols de la région du Nord du 10^e parallèle en Côte d'Ivoire. Carte des unités morpho-pédologiques et des paysages morpho-pédologique. Partie Ivoirienne des feuilles de Nielle, de Tingrela et Tienko - ORSTOM - Adiopodoumé 118 p., multigr.
- LEVEQUE (A.), 1969. Les problèmes des sols à nappe de gravats au Togo. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., Vol. VII, n° 1, 23 p.
- LEVEQUE (A.), 1970. L'origine des concentrations ferrugineuses dans les sols du socle granito-gnessique du Togo. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., Vol. VII, n° 3, pp. 321-348.
- MULLER (D.), BOCQUIER (G.), NAHON (D.), PAQUET (H.), 1980-1981. Analyse des différenciations minéralogiques et structurales d'un sol ferrallitique à horizons nodulaires du Congo. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., Vol. XVIII, n° 2, p. 87-109.
- POSS (R.), 1982. Etude morpho-pédologique de la région de Katiola (Côte d'Ivoire). Carte des paysages et des unités morpho-pédologiques. Feuille de Katiola à 1/200.000. ORSTOM, Paris, notice explicative n° 94, 142 p.
- POSS (R.), 1983. La modélisation de la porosité des horizons gravillons à partir des lois d'assemblage. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., Vol. XX., n° 2, p. 147-153.
- YIENNOT (M.), 1980. Etude pédologique de la région de Touba (Côte d'Ivoire). Carte des paysages et des unités morpho-pédologiques. Feuille de Touba à 1/200.000. ORSTOM-Adiopodoumé, 79 p.
- YORO (G.), 1982. Etude pédologique et perspectives agricoles de la région de Touba (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). ORSTOM-Adiopodoumé, 150 p.