Principes généraux d'interprétation des diagrammes triangulaires
Application à la comparaison de matériaux pédologiques

Vincent ESCHENBRENNER

Orstom, BP 8006, 97259 Fort-de-France cedex

RÉSUMÉ

Les principes généraux permettant de comparer, à l'aide de diagrammes triangulaires, deux états d'un matériau idéal (solide homogène, poreux, multi-éléments) sont exposés. Cette comparaison de deux états est basée sur l'interprétation des positions relatives des points représentatifs (proportions relatives de trois des éléments) dans un système de diagrammes triangulaires. Différentes modalités sont examinées : addition et/ou soustraction (partielle ou totale) d'un ou de plusieurs éléments constitutifs, et/ou augmentation ou diminution du volume.

La manière dont ces principes généraux peuvent s'appliquer à la comparaison de matériaux pédologiques est ensuite examinée. Les principales limites d'application concernent les profils développés à partir d'un matériau originel complexe. Dans tous les autres cas, les règles d'interprétation peuvent être utilisées avec de très nombreux constituants (ou combinaisons de constituants), à condition d'une part, de préciser l'ordre de grandeur des volumes concernés, et d'autre part, d'utiliser des données provenant d'échantillons de dimensions comparables, c'est-à-dire intégrant une même échelle d'hétérogénéité.

À titre d'exemple, les différentes modalités conduisant à une augmentation des proportions relatives d'oxy-hydroxydes de fer d'un matériau pédologique constitué de kaolinite, de quartz, de goethite, d'hématite, de muscovite, de gibbsite et de rutile sont examinées. Ces modalités sont multipes (19) et certaines impliquent, paradoxalement, une soustraction d'oxy-hydroxydes de fer.

Dans un diagramme triangulaire, l'interprétation de la position relative des points représentatifs de deux états d'un matériau pédologique n'est jamais univoque. Elle permet toutefois de formuler, en termes très généraux (addition et/ou soustraction de matière), l'ensemble des hypothèses. Il est alors possible de faire un choix raisonné entre ces différentes hypothèses, en utilisant conjointement d'autres données ; celles qui proviennent de l'analyse micromorphologique sont généralement les plus discriminantes.

MOTS CLÉS : Diagramme triangulaire – Accumulation absolue – Accumulation relative.

ABSTRACT

GENERAL INTERPRETATION PRINCIPLES OF TRIANGULAR DIAGRAMS
APPLICATION IN COMPARISON OF PEDOLOGICAL MATERIALS

The general principles enabling the comparison of two states of an ideal material (homogeneous solid, porous, multi-elements) are set out using triangular diagrams. This comparison of two states is based on the interpretation of relative positions of representative points (relative proportions of three of the different elements) in a system of triangular diagrams. Different methods are studied : addition and/or subtraction (partial or total) of one or several constituent elements, and/or increase or decrease in volume.

The scope in which these general principles can serve as applications for comparison of pedological materials is then examined. The main limits of application are found with profiles developed from a complex original material. In all other cases, the interpretation rules can be used with very numerous components (or combinations of *components), providing that on the one hand a size order of concerned volumes is specified and on the other hand, data from samples of comparable dimensions are used, i.e. integrating a single of heterogeneousness scale.*

For example, the different modalities leading to an increase in the relative proportions of oxy-hydroxides of iron in a pedological material, composed of kaolinite, quartz, goethite, hematite, muscovite, gibbsite, and rutile are subjected to studies. These modalities are numerous (19) and paradoxically some of them imply a subtraction of oxy-hydroxides of iron.

In a triangular diagram, the interpretation of the relative position resulting from the representative points of two states of a pedological material is never univocal. However, this interpretation makes it possible to formulate the whole hypothesis in very general terms (addition and/or substraction of matter). It is then possible to make a considered choice between these different hypotheses, using other data as well ; data from micromorphological analysis are generally the most discriminant.

KEY WORDS : Triangular diagrams – Absolute accumulation – Relative accumulation.

INTRODUCTION

Les matériaux pédologiques, constitués par l'assemblage de particules dont la nature, la taille, la forme et l'organisation sont extrêmement variables, forment un milieu fort complexe. La représentation graphique de leur composition (granulométrique, chimique, minéralogique, etc.) se révèle donc très délicate.

Dans le domaine de la science du sol, l'utilisation de diagrammes triangulaires, qui permettent de représenter les proportions relatives de trois constituants, est généralement limitée à la figuration des résultats de l'analyse granulométrique. Cependant, le champ d'application de ce type de diagramme est beaucoup plus vaste.

Nous exposerons d'abord (§ 1.) les principes généraux permettant de comparer, à l'aide de diagrammes triangulaires, deux états d'un matériau idéal (solide homogène, poreux, multi-éléments). Nous envisagerons ensuite (§ 2.), en nous appuyant sur un exemple concret, la manière dont ces principes généraux peuvent s'appliquer à la comparaison de matériaux pédologiques.

1. CAS GÉNÉRAL

1.1. Données initiales

Soit un solide homogène, poreux, constitué des éléments A, B... X. Considérons un volume fini V, de poids P de ce matériau (fig. 1). Si dr(A), dr(B)..., dr(X), sont les densités réelles, V(A), V(B)..., V(X), les volumes des solides A, B,... X, et si V(p) est le volume des pores :

$V\ cm^3 = V(A) + V(B) + ... + V(X) + V(p)$

$Pg = V(A) \times dr(A) + V(B) \times dr(B) + ... + V(X) \times dr(X)$

Les teneurs pondérales (g/100 g) des divers éléments constitutifs sont alors :

(1) $Ap = 100 \times V(A) \times dr(A)/P$;

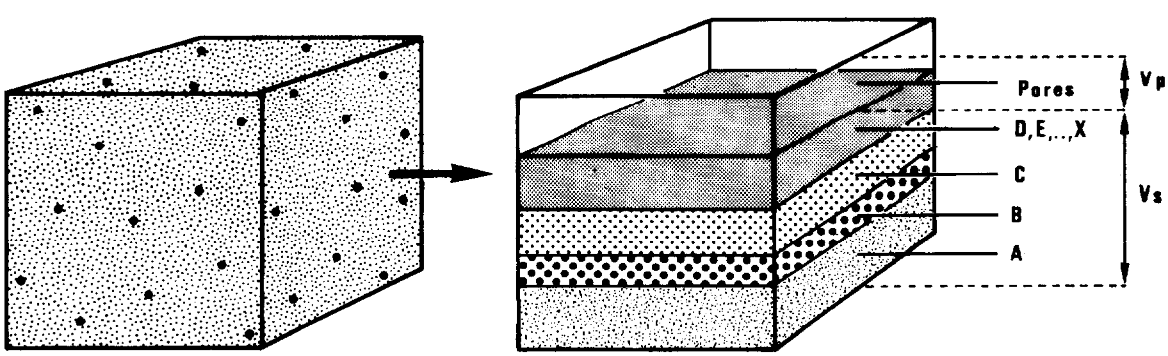


FIG. 1. – Solide homogène, poreux, constitué des éléments A, B,... X
Vs : volume du solide ; Vp : volume des pores.

Homogeneous solid, porous, composed of elements A, B,... X
Vs : volume of solid ; Vp : volume of pores.

$Bp = 100 \times V(B) \times dr(B)/P$; ... ;
$Xp = 100 \times V(X) \times dr(X)/P$

et les teneurs volumiques :

(2) $Av = 100 \times V(A) \times dr(A)/V$;
$Bv = 100 \times V(B)/V$; ... ;
$Xv = 100 \times V(X) \times dr(X)/V$

Si D (g/cm^3) = P/V est la densité apparente du solide poreux ;

$Av = Ap \times D$; $Bv = Bp \times D$; ... ; $Xv = Xp \times D$

La représentation, sur un même diagramme, des teneurs (pondérales ou volumiques) de tous les éléments constitutifs nécessiterait un espace multidimensionnel. Il est cependant possible de figurer dans un plan, à l'aide de diagrammes triangulaires équilatéraux, les proportions des éléments pris trois par trois ; par exemple, si l'on a choisi les éléments A, B et C :

$a = 100 \times A/(A + B + C)$;
$b = 100 \times B/(A + B + C)$;
$c = 100 \times C/(A + B + C)$ (fig. 2).

Il faut souligner que ces proportions, calculées à partir des teneurs pondérales (équation 1), ou des teneurs volumiques (équation 2), sont identiques :

$$ap = 100\ Ap / (Ap + Bp + Cp)$$
$$= 100\ [100\ V(A)\ dr(A)/P] / \{100\ [V(A)\ dr(A) + V(B)\ dr(B) + V(C)\ dr(C)]\ /P\}$$
$$= 100\ V(A)\ dr(A) / [V(A)\ dr(A) + V(B)\ dr(B) + V(C)\ dr(C)]$$
$$av = 100\ Av / (Av + Bv + Cv)$$
$$= 100\ [100\ V(A)\ dr(A) / V] / \{100\ [V(A)\ dr(A) + V(B)\ dr(B) + V(C)\ dr(C)] / V\}$$
$$= 100\ V(A)\ dr(A) / [V(A)\ dr(A) + V(B)\ dr(B) + V(C)\ dr(C)]$$

1.2. Étude des variations et de leur représentation

Considérons maintenant deux états de ce matériau. Par rapport à l'état 1, l'état 2 est caractérisé par l'addition et/ou la soustraction (partielle ou totale) d'un ou plusieurs éléments constitutifs, et/ou par l'augmentation ou la diminution de volume. Examinons la position des points représentatifs de ces deux états dans le système de diagrammes triangulaires.

Nous envisagerons d'abord les modalités simples (addition ou soustraction d'un seul élément, modification de volume), puis complexes (addition et/ou soustraction de plusieurs éléments, avec ou sans modifications de volume). Nous nous intéresserons, à titre d'exemple, aux trois éléments A, B, C, et utiliserons le triangle *abc* ; nous appellerons N un quatrième élément du système.

1.2.1. Modalités simples

1.2.1.1. Addition d'un seul élément (fig. 3, tabl. I)

- L'élément ajouté est l'un des trois pris en compte dans le triangle de référence (par exemple : + B)

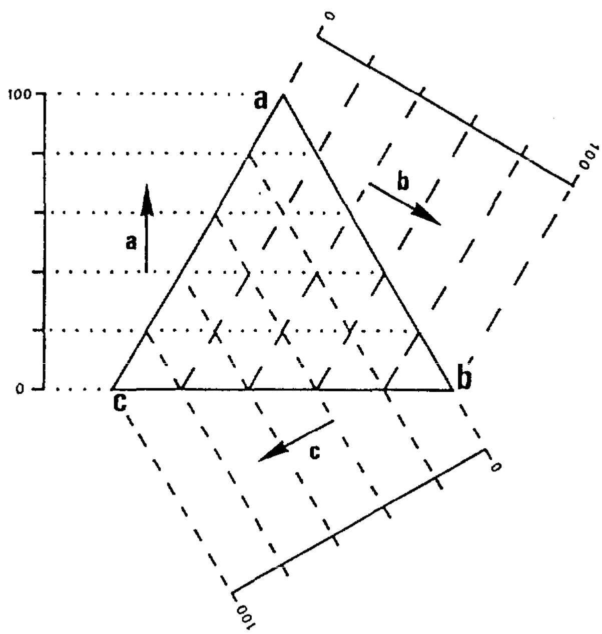


FIG. 2. – Représentation des proportions relatives a, b et c des éléments A, B et C (cf. fig. 1) dans un diagramme triangulaire
a = 100 A / (A + B + C) ; b = 100 B / (A + B + C) ;
c = 100 C / (A + B + C)
Le sens de rotation négatif (sens de rotation des aiguilles d'une montre) a été choisi, car il est très généralement utilisé par les pédologues lors de la représentation de la composition granulométrique de la terre fine des sols à l'aide de diagrammes triangulaires (USDA, FAO, ISSS ; cf. VERHEYE et AMERYCXS, 1984).

Representation of relative proportions a, b and c of elements A, B, C (cf. fig. 1) in a triangular diagram
a = 100 A / (A + B + C) ; b = 100 B / (A + B + C) ; c = 100 C / (A + B + C)
The negative rotation direction (clockwise) has been chosen, because it is very often used by pedologist, by the mean of triangular diagrams, to achieve a representation of particle-size composition of soil. (USDA, FAO, ISSS ; cf. VERHEYE and AMERYCXS, 1984).

La teneur volumique en B augmente, celles de tous les autres éléments restent constantes ; la densité apparente augmente et la porosité diminue. La teneur pondérale en B augmente, celles de tous les autres éléments diminuent.

La proportion relative de B par rapport à A + B + C (c.a.d. « *b* ») augmente ; les proportions relatives *a* et *c* diminuent, mais le rapport *a/c* reste constant. Le point représentatif de l'état 2 est donc situé sur le segment *a/c* = C[te], qui joint le point représentatif de l'état 1 au pôle *b* (fig. 3).

- L'élément ajouté n'est pas l'un des trois pris en compte dans le triangle de référence (par exemple : + N).

La teneur volumique en N augmente, celles de tous les autres éléments restent constantes ; la densité apparente augmente et la porosité diminue. La teneur

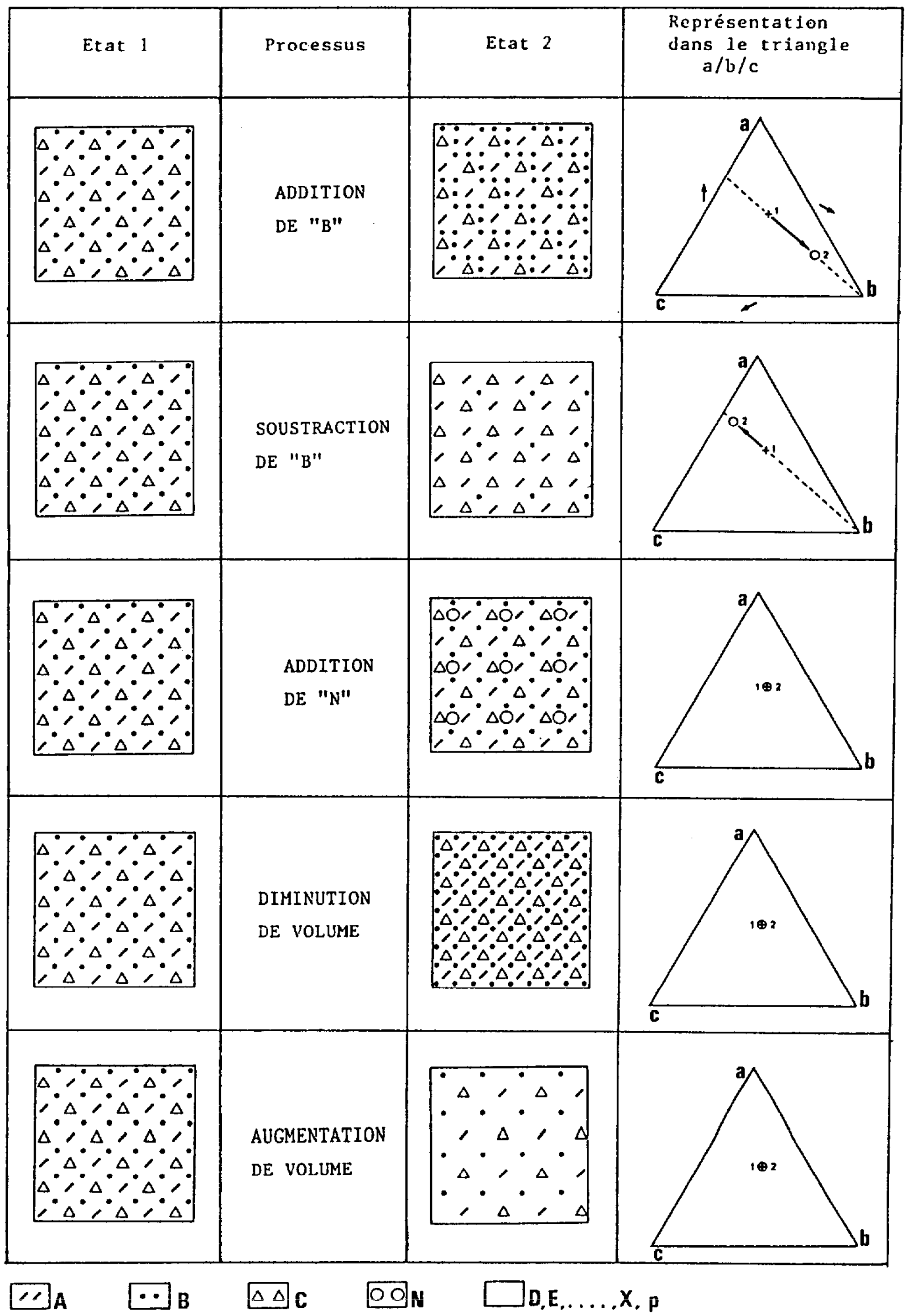


FIG. 3. – Modalités simples (addition ou soustraction d'un seul élément, modifications de volume).
Simple modalities (addition or subtraction of one single element, changes in volume).

TABLEAU I

Modalités simples (addition ou soustraction d'un seul élément, modification de volume d'un matériau A, B,... X). Évolution des teneurs pondérales et volumiques, de la densité apparente, de la porosité et des proportions relatives des éléments A, B et C)

Simple modalities (addition or subtraction of one single element, modification of volume of a material A, B,... X). Evolution of weighted and volume contents, of bulk density, of porosity, and of relative proportions of elements A, B and C

état 1-------> état 2	Teneurs pondérales				Teneurs volumiques				Densité apparente	Porosité	Rapports			Proportions		
Processus	Ap	Bp	Cp	Np	Av	Bv	Cv	Nv			a/b	b/c	a/c	a	b	c
Addition de B: (+B)	-	+	-	-	=	+	=	=	+	-	-	+	=	-	+	-
Addition de N: (+N)	-	-	-	+	=	=	=	+	+	-	=	=	=	=	=	=
Soustraction de B: (-B)	+	-	+	+	=	-	=	=	-	+	+	-	=	+	-	+
Soustraction de N: (-N)	+	+	+	-	=	=	=	-	-	+	=	=	=	=	=	=
Diminution de volume	=	=	=	=	+	+	+	+	+	-	=	=	=	=	=	=
Augmentation de volume	=	=	=	=	-	-	-	-	-	+	=	=	=	=	=	=

a = {Ap/(Ap + Bp + Cp)}100 = {Av / (Av + Bv + Cv)}100
b = {Bp/(Ap + Bp + Cp)}100 = {Bv / (Av + Bv + Cv)}100
c = {Cp/(Ap + Bp + Cp)}100 = {Cv / (Av + Bv + Cv)}100
Ap/Bp = Av/Bv = a/b; Bp/Cp = Bv/Cv = b/c; Ap/Cp = Av/Cv = a/c
+ : valeurs de l'état 2 supérieures à celles de l'état 1
- : valeurs de l'état 2 inférieures à celles de l'état 1
= : valeurs de l'état 2 égales à celles de l'état 1

pondérale en N augmente, celles de tous les autres éléments diminuent.

Les proportions relatives *a*, *b* et *c* restent constantes.

Les points représentatifs des états 1 et 2 sont donc confondus.

1.2.1.2. Soustraction d'un seul élément (fig. 3, tabl. I)

• L'élément soustrait est l'un des trois pris en compte dans le triangle de référence (par exemple : - B)

La teneur volumique en B diminue, celles de tous les autres éléments restent constantes ; la densité apparente diminue et la porosité augmente. La teneur pondérale en B diminue, celles de tous les autres éléments augmentent.

La proportion relative *b* diminue ; les proportions relatives *a* et *c* augmentent, mais le rapport *a/c* reste constant. Le point représentatif de l'état 2 est donc situé sur la droite *a/c* = C^{te} (qui passe par le pôle *b* et par le point représentatif de l'état 1), du côté des valeurs décroissantes de *b* (fig. 3).

• L'élément soustrait n'est pas l'un des trois pris en compte dans le triangle de référence (par exemple : - N)

La teneur volumique en N diminue, celles de tous les autres éléments restent constantes ; la densité apparente diminue et la porosité augmente. La teneur pondérale en N diminue, celles de tous les autres éléments augmentent.

Les proportions relatives *a*, *b* et *c* restent constantes. Les points représentatifs des états 1 et 2 sont donc confondus.

1.2.1.3. Changement de volume (fig. 3, tabl. I)

• Diminution de volume :

Les teneurs volumiques de tous les éléments augmentent dans les mêmes proportions ; la densité apparente augmente et la porosité diminue. Les teneurs pondérales de tous les éléments restent constantes.

Les proportions relatives *a*, *b* et *c* restent constantes.

Les points représentatifs des états 1 et 2 sont donc confondus.

• Augmentation de volume :

Les teneurs volumiques de tous les éléments diminuent dans les mêmes proportions ; la densité apparente diminue et la porosité augmente. Les teneurs pondérales de tous les éléments restent constantes.

Les proportions relatives *a*, *b* et *c* restent constantes.

Les points représentatifs des états 1 et 2 sont donc confondus.

En ce qui concerne l'ensemble des modalités simples, deux faits, bien que triviaux, doivent être soulignés :

– dans le cas d'un changement de volume, les points représentatifs des états successifs du matériau sont confondus, quel que soit le triangle de référence ;

– l'addition, ou la soustraction, d'un seul élément se traduit (dans les triangles où cet élément est pris en compte) par un déplacement des points représentatifs sur une droite passant par le pôle correspondant à cet élément.

1.2.2. Modalités complexes

Les modalités complexes sont nombreuses ; en limitant arbitrairement à trois le nombre d'éléments additionnés ou soustraits, on inventorie seize cas, qui sont les suivants :

1. Addition d'un seul élément et changement de volume.
2. Soustraction d'un seul élément et changement de volume.
3. Addition de deux éléments.
4. Addition de deux éléments et changement de volume.
5. Soustraction de deux éléments.
6. Soustraction de deux éléments et changement de volume.
7. Addition d'un élément et soustraction d'un deuxième.
8. Addition d'un élément, soustraction d'un deuxième et changement de volume.
9. Addition de deux éléments et soustraction d'un troisième.
10. Addition de deux éléments, soustraction d'un troisième et changement de volume.
11. Soustraction de deux éléments et addition d'un troisième.
12. Soustraction de deux éléments, addition d'un troisième et changement de volume.
13. Addition de trois éléments.
14. Addition de trois éléments et changement de volume.
15. Soustraction de trois éléments.
16. Soustraction de trois éléments et changement de volume.

Or, les changements de volume n'influent pas sur la position des points représentatifs ; les deux premiers cas se ramènent donc à des modalités simples (addition ou soustraction d'un seul élément : cf. § 1.2.1.1.) et les cas 3 et 4, 5 et 6..., 15 et 16 sont semblables. En définitive, seules sept modalités doivent être examinées.

1.2.2.1. Addition de deux éléments (cas 3 et 4)

• Les éléments ajoutés font partie de ceux pris en compte dans le triangle de référence (par exemple : + A et + B) :

Les teneurs volumiques (1) en A et en B augmentent ; celles de tous les autres éléments restent constantes ; la densité apparente augmente et la porosité diminue.

La teneur pondérale (1) en C et celles de tous les autres éléments (hormis A et B) diminuent. Quant aux teneurs pondérales en A et en B, soit elles augmentent toutes deux, soit l'une augmente et l'autre diminue, suivant les quantités respectivement ajoutées.

La proportion relative (1) *c* diminue ; *a* augmente, reste constante ou diminue ; il en est de même pour *b*. Le point représentatif de l'état 2 est situé dans un triangle dont les sommets sont le pôle *a*, le pôle *b* et le point représentatif de l'état 1 (fig. 4.1).

• Lorsque l'un des éléments ajoutés n'appartient pas à ceux pris en compte dans le triangle de référence, on est ramené à une modalité simple (addition d'un seul élément (fig. 3).

1.2.2.2. Soustraction de deux éléments (cas 5 et 6)

• Les éléments soustraits font partie de ceux pris en compte dans le triangle de référence (par exemple : - A et - B)

Les teneurs volumiques (1) en A et en B diminuent ; celles de tous les autres éléments restent constantes ; la densité apparente diminue et la porosité augmente. Les teneurs pondérales (1) en C et celles de tous les autres éléments (hormis A et B) augmentent. Quant aux teneurs pondérales en A et en B, soit elles diminuent toutes deux, soit l'une diminue et l'autre augmente, en fonction des quantités respectivement soustraites.

La proportion relative (1) *c* augmente ; *a* diminue, reste constante ou augmente ; il en est de même pour *b*. Le point représentatif de l'état 2 est situé dans un quadrilatère dont les sommets sont (fig. 4.2) :

- le pôle *c*,
- le point représentatif de l'état 1,
- l'intersection de la base *bc* et de la droite passant par le pôle *a* et par le point représentatif de l'état 1 ($b/c = C^{te}$),
- l'intersection de la base *ca* et de la droite passant par le pôle *b* et par le point représentatif de l'état 1 ($a/c = C^{te}$).

• Lorsque l'un des éléments soustraits n'appartient pas à ceux pris en compte dans le triangle de référence, on est ramené à une modalité simple (soustraction d'un seul élément ; fig. 3).

1.2.2.3. Addition d'un élément et soustraction d'un autre (cas 7 et 8)

• Les deux éléments font partie de ceux pris en compte dans le triangle de référence (par exemple : + A et + B)

La teneur volumique (1) en A augmente, celle en B diminue et celles de tous les autres éléments restent constantes ; la densité apparente augmente, reste

(1) Ces variations des teneurs volumiques ne correspondent qu'au cas où le volume reste constant ; en revanche, les variations des teneurs pondérales, ainsi que celles des proportions relatives, sont identiques, qu'il se produise ou non un changement de volume. Cette remarque s'applique aux paragraphes 1.2.2.1 à 1.2.2.7.

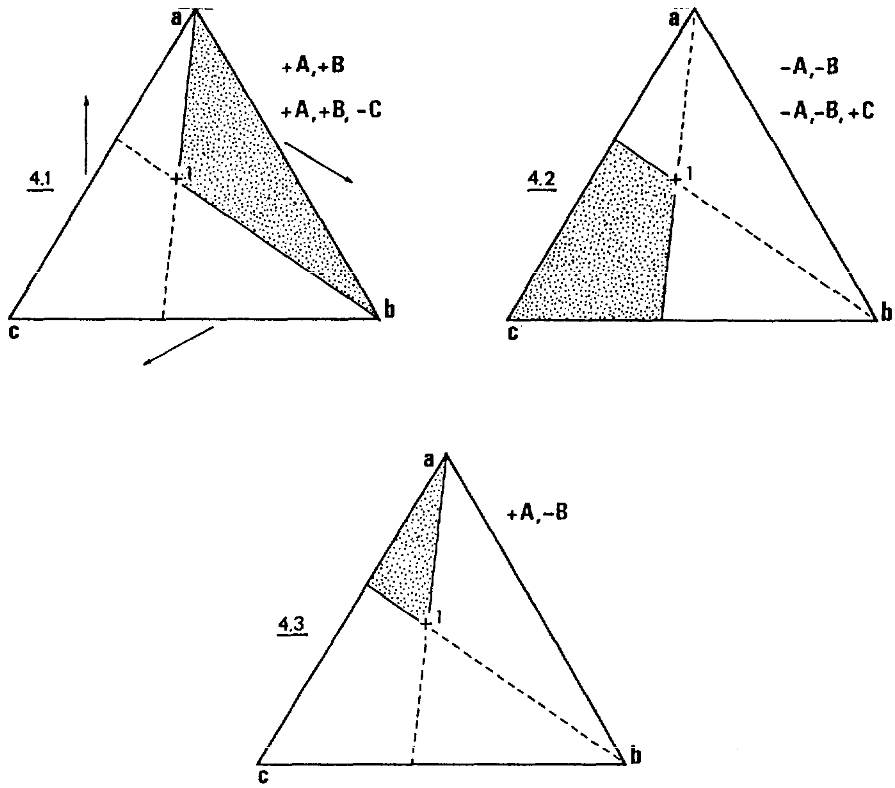


FIG. 4. – Domaines caractéristiques des différentes modalités :
4.1. – addition de deux éléments (avec ou sans changement de volume) ;
– addition de deux éléments et soustraction d'un troisième (avec ou sans changement de volume) ;
4.2. – soustraction de deux éléments (avec ou sans changement de volume) ;
– soustraction de deux éléments et addition d'un troisième (avec ou sans changement de volume) ;
4.3. – addition d'un élément et soustraction d'un autre (avec ou sans changement de volume).

Characteristical fields of different modalities :
4.1. – addition of two elements (with or without change in volume) ;
– addition of two elements and subtraction of a third one (with or without change in volume) ;
4.2. – subtraction of two elements (with or without change in volume) ;
– subtraction of two elements and addition of a third one (with or without change in volume) ;
4.3. – addition of one element and subtraction of another (with or without change in volume).

constante ou diminue, en fonction, d'une part, des quantités additionnées et soustraites, et des densités réelles des éléments A et B, d'autre part ; il en est de même de la porosité. La teneur pondérale (1) en A augmente, celle en B diminue et celles de tous les autres éléments augmentent, restent constantes, ou diminuent, en fonction de l'importance relative de la soustraction et de l'addition de matière.

La proportion relative (1) *a* augmente ; *b* diminue ; *c* augmente, reste constante (lorsque l'addition de A est égale à la soustraction de B), ou diminue. Le point représentatif de l'état 2 est situé dans un triangle dont les sommets sont le pôle *a,* le point représentatif de l'état 1, et l'intersection de la base *ca* et de la droite passant par le pôle *b* et par le point représentatif de l'état 1 (fig. 4.3).

• Lorsque l'un des éléments (additionné ou soustrait) n'appartient pas à ceux pris en compte dans le triangle de référence, on est ramené à une modalité simple (addition ou soustraction d'un seul élément ; (fig. 3).

1.2.2.4. Addition de deux éléments et soustraction d'un troisième (cas 9 et 10)

• Les trois éléments sont ceux pris en compte dans le triangle de référence (par exemple : + A, + B et - C)

Les teneurs volumiques (1) en A et en B augmentent ; celle en C diminue ; celles de tous les autres éléments restent constantes ; la densité apparente, ainsi que la porosité, augmente, reste constante, ou diminue, en fonction des quantités additionnées et soustraites, et des densités réelles des différents éléments. La teneur pondérale en C diminue ; celles en A et en B, soit augmentent toutes deux, soit l'une augmente et l'autre diminue ; lorsque l'addition de matière (+ A, + B) est supérieure à la soustraction (- C), les teneurs pondérales des autres éléments diminuent ; dans le cas contraire, ces teneurs augmentent.

La proportion relative *c* diminue ; *a* augmente, reste constante ou diminue ; il en est de même pour *b*. Le point représentatif de l'état 2 est situé dans le même triangle que celui qui correspond à l'addition de A et de B (fig. 4.1).

- Lorsque l'un des éléments (additionnés ou soustrait) n'appartient pas à ceux pris en compte dans le triangle de référence, on est ramené à l'une des modalités complexes suivantes : addition de deux éléments (cf. § 1.2.2.1.), ou addition d'un élément et soustraction d'un autre (cf. § 1.2.2.3.).

- Lorsque deux des éléments n'appartiennent pas à ceux pris en compte dans le triangle de référence, on est ramené à une modalité simple (addition ou soustraction d'un seul élément ; fig. 3).

1.2.2.5. Soustraction de deux éléments et addition d'un troisième (cas 11 et 12)

- Les trois éléments sont ceux pris en compte dans le triangle de référence (par exemple : - A, - B et + C)

Les teneurs volumiques (1) en A et B diminuent ; celle en C augmente ; celles de tous les autres éléments restent constantes ; la densité apparente, ainsi que la porosité, diminue, reste constante ou augmente en fonction des quantités soustraites ou additionnées, et des densités réelles des différents (1) éléments. La teneur pondérale en C augmente ; celles en A et en B, soit diminuent toutes deux, soit l'une diminue et l'autre augmente ; lorsque la soustraction de matière (- A, - B) est supérieure à l'addition (+ C), les teneurs pondérales des autres éléments augmentent ; dans le cas contraire, ces teneurs diminuent.

La proportion (1) relative *c* augmente ; *a* diminue, reste constante ou augmente ; il en est de même pour *b*. Le point représentatif de l'état 2 est situé dans le même quadrilatère que celui qui correspond à la soustraction de A et de B (fig. 4.2).

- Lorsque l'un des éléments (additionnés ou soustraits) n'appartient pas à ceux pris en compte dans le triangle de référence, on est ramené à l'une des modalités complexes suivantes : soustraction de deux éléments (cf. § 1.2.2.2.), ou addition, d'un élément et soustraction d'un autre (cf. § 1.2.2.3.).

- Lorsque deux des éléments n'appartiennent pas à ceux pris en compte dans le triangle de référence, on est ramené à une modalité simple (addition ou soustraction d'un seul élément ; fig. 3).

1.2.2.6. Addition de trois éléments (cas 13 et 14)

- Les trois éléments sont ceux pris en compte dans le triangle de référence (par exemple : + A, + B et + C)

Les teneurs volumiques (1) en A, en B et en C augmentent ; celles des autres éléments restent constantes ; la densité apparente augmente et la porosité diminue. La teneur pondérale (1) en A augmente, reste constante ou diminue ; il en est de même des teneurs en B et en C ; les teneurs pondérales des autres éléments diminuent.

Chacune des proportions relatives (1) *a, b* et *c* augmente, reste constante ou diminue. Le point représentatif de l'état 2 peut donc occuper la totalité du triangle *abc*.

- Lorsque l'un (ou deux) des éléments additionnés n'appartient pas à ceux pris en compte dans le triangle de référence, on est ramené à des modalités connues : addition de deux éléments (cf. § 1.2.2.1.), ou addition d'un seul élément (fig. 3).

1.2.2.7. Soustraction de trois éléments (cas 15 et 16)

- Les trois éléments sont ceux pris en compte dans le triangle de référence (par exemple : - A, - B et - C)

Les teneurs volumiques (1) en A, en B et en C diminuent ; celles des autres éléments restent constantes ; la densité apparente diminue et la porosité augmente. La teneur pondérale (1) en A diminue, reste constante ou augmente ; il en est de même des teneurs en B et en C ; les teneurs pondérales des autres éléments augmentent.

Chacune des proportions relatives (1) *a, b* et *c* augmente, reste constante ou diminue. Le point représentatif de l'état 2 peut donc occuper (comme dans le cas de l'addition des éléments A, B et C) la totalité du triangle *abc*.

- Lorsqu'un (ou deux) des éléments soustraits n'appartient pas à ceux pris en compte dans le triangle de référence, on est également ramené à des modalités connues : soustraction de deux éléments (cf. § 1.2.2.2.), ou soustraction d'un seul élément (fig. 3).

Dans les paragraphes précédents, nous avons arbitrairement limité à trois le nombre des éléments additionnés et/ou soustraits. Lorsque le nombre de ces éléments est plus élevé, deux cas doivent être envisagés.

– *Premier cas :* le volume reste constant. Les variations des teneurs volumiques des éléments pris en compte précédemment ne sont pas modifiées ; il en est de même des variations des proportions relatives ; en revanche, les variations des teneurs pondérales seront différentes.

– *Deuxième cas :* le volume ne reste pas constant. Les variations des teneurs volumiques et pondérales des éléments pris en compte auparavant seront modifiées ; seules les variations des proportions relatives resteront inchangées.

Dans ces deux cas, il faut souligner que les variations des proportions relatives sont identiques à celles exposées antérieurement (cf. § 1.2.2.1. à 1.2.2.7.). De ce fait, les conclusions relatives à la localisation des points représentatifs des états 1 et 2 dans le triangle *abc* conservent leur validité ; ces conclusions ont donc une portée très générale.

1.3. Signification des diverses positions relatives dans un diagramme triangulaire

Nous nous intéresserons, comme précédemment, aux proportions relatives *a %, b %* et *c %* (*a + b + c* = 100 %) des éléments A, B et C d'un solide homogène, poreux, constitué des éléments A, B,... X ; pour figurer les points représentatifs de deux états (1 et 2) de ce matériau, nous utiliserons le triangle équilatéral *abc* (fig. 2).

L'examen de l'ensemble des modalités possibles (cf. § 1.2.) concernant l'addition et/ou la soustraction d'un ou de plusieurs éléments (accompagnées, ou non, de modification de volume) permet alors de distinguer quatre cas.

1.3.1. Points représentatifs des états 1 et 2 confondus

Il existe quatre possibilités :
– augmentation de volume (2),
– diminution de volume (2),
– cas particulier de l'addition de A, de B et de C (avec ou sans changement de volume) (2),
– cas particulier de la soustraction de A, de B et de C (avec ou sans changement de volume) (2).

Dans ces deux cas particuliers, les trois éléments sont additionnés (ou soustraits) dans les mêmes proportions que celles qu'ils présentent dans l'état 1 : A2/B2 = A1/B1 ; B2/C2 = B1/C1 ; C2/A2 = C1/A1.

1.3.2. Points représentatifs des états 1 et 2 situés sur une droite passant par l'un des pôles du diagramme triangulaire

Deux types de situations doivent être considérées.

1.3.2.1. Le point représentatif de l'état 2 est situé sur l'un des segments 1a, 1b, ou 1c (fig. 5)

Il existe cinq possibilités :
– addition d'un seul élément (avec ou sans changement de volume) (2) ;
– cas particulier de la soustraction de deux éléments (avec ou sans changement de volume) (2) ;
– cas particulier de la soustraction de deux éléments accompagnée de l'addition du troisième (avec ou sans changement de volume) (2) ;
– cas particulier de l'addition des trois éléments (avec ou sans changement de volume) (2) ;
– cas particulier de la soustraction des trois éléments (avec ou sans changement de volume) (2).

1.3.2.2. Le point représentatif de l'état 2 est situé sur l'un des segments 1a', 1b' ou 1c' (fig. 5)

Il existe également cinq possibilités :
– soustraction d'un seul élément (avec ou sans changement de volume) (2) ;
– cas particulier de l'addition de deux éléments (avec ou sans changement de volume) (2) ;
– cas particulier de l'addition de deux éléments accompagnée de la soustraction du troisième (avec ou sans changement de volume) (2) ;
– cas particulier de l'addition des trois éléments (avec ou sans changement de volume) (2) ;
– cas particulier de la soustraction des trois éléments (avec ou sans changement de volume) (2).

L'ensemble de ces possibilités, ainsi que les conditions relatives aux teneurs (pondérales ou volumiques) et aux proportions, sont indiqués dans la fig. 5.

1.3.3. Points représentatifs des états 1 et 2 situés sur une droite parallèle à l'un des côtés du diagramme triangulaire (fig. 6)

Le point représentatif de l'état 2 peut être situé sur l'un des segments 1x, 1x', 1y, 1y', 1z ou 1z'. Pour chacune de ces localisations, il existe sept possibilités :

– cas particulier de l'addition d'un élément accompagnée de la soustraction d'un second élément (avec ou sans changement de volume) (2) ;

– cas particulier de l'addition de deux éléments (avec ou sans changement de volume) (2) ;

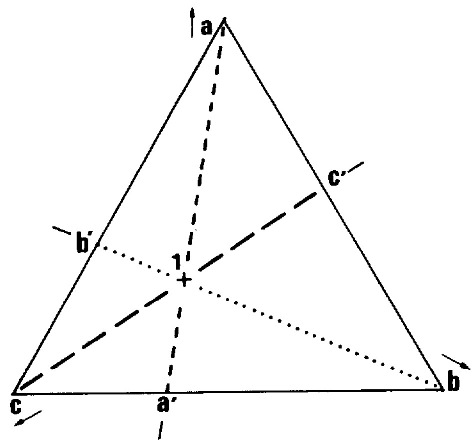
– cas particulier de la soustraction de deux éléments (avec ou sans changement de volume) (2) ;

– cas particulier de l'addition de deux éléments, accompagnée de la soustraction du troisième (avec ou sans changement de volume) (2) ;

– cas particulier de la soustraction de deux éléments, accompagnée de l'addition du troisième (avec ou sans changement de volume) (2) ;

– cas particulier de l'addition des trois éléments (avec ou sans changement de volume) (2) ;

(2) Avec (ou sans) addition (ou soustraction) d'éléments différents de A, B et C ; cette remarque s'applique à l'ensemble des possibilités exposées dans les paragraphes 1.3.1., 1.3.2., 1.3.3. et 1.3.4.



	La droite passe par le pôle:					
	a		b		c	
	$b / c = C^{te}$		$c / a = C^{te}$		$a / b = C^{te}$	
	Le point représentatif de l'état 2 est situé sur le segment:					
	1a	1a'	1b	1b'	1c	1c'
	($\Delta a > 0$)	($\Delta a < 0$)	($\Delta b > 0$)	($\Delta b < 0$)	($\Delta c > 0$)	($\Delta c < 0$)
modalités simples cas général	+A	-A	+B	-B	+C	-C
cas particuliers de modalités complexes	-B, -C	+B, +C	-C, -A	+C, +A	-A, -B	+A, +B
	-B, -C, +A	+B, +C, -A	-C, -A, +B	+C, +A, -B	-A, -B, +C	+A, +B, -C
	+A, +B, +C					
	$\Delta A > \Delta B+\Delta C$	$\Delta A < \Delta B+\Delta C$	$\Delta B < \Delta C+\Delta A$	$\Delta B < \Delta C+\Delta A$	$\Delta C < \Delta A+\Delta B$	$\Delta C < \Delta A+\Delta B$
	-A, -B, -C					
	$\Delta A > \Delta B+\Delta C$	$\Delta A < \Delta B+\Delta C$	$\Delta B < \Delta C+\Delta A$	$\Delta B < \Delta C+\Delta A$	$\Delta C < \Delta A+\Delta B$	$\Delta C < \Delta A+\Delta B$
conditions	$B_1/C_1 = \Delta B/\Delta C = \Delta b/\Delta c$		$C_1/A_1 = \Delta C/\Delta A = \Delta c/\Delta a$		$A_1/B_1 = \Delta A/\Delta B = \Delta a/\Delta b$	

ΔA, ΔB, ΔC : différences des teneurs pondérales, ou volumiques, des éléments A, B, C entre les états 2 et 1

Δa, Δb, Δc : différences des proportions relatives (a, b, c) des éléments A, B, C entre les états 2 et 1 ($\Delta a = a_2 - a_1$)

$a_1 = 100\ A_{1p} / (A_{1p}+B_{1p}+C_{1p})$

$\quad = 100\ A_{1v} / (A_{1v}+B_{1v}+C_{1v})$

$a_2 = 100 (A_1+\Delta A) / (A_1+B_1+C_1+\Delta A+\Delta B+\Delta C)$

FIG. 5. – Points représentatifs des états 1 et 2 situés sur une droite passant par l'un des pôles du diagramme triangulaire.
Representative points of states 1 and 2 situated on a straight line going through one of the poles of the triangular diagram.

– cas particulier de la soustraction des trois éléments (avec ou sans changement de volume) (2).

L'ensemble de ces possibilités, ainsi que les conditions relatives aux teneurs (pondérales ou volumiques) et aux proportions, sont indiqués dans la figure 6.

1.3.4. Points représentatifs des états 1 et 2 non confondus, non situés sur une droite passant par l'un des pôles du triangle, et non situés sur une droite parallèle à l'un des côtés du triangle

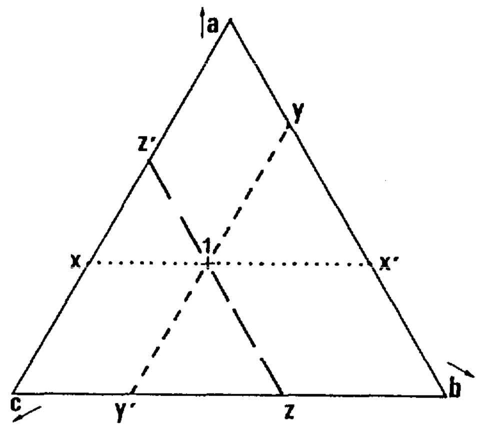
Le point représentatif de l'état 2 peut être localisé dans l'une des six régions représentées dans la figure 7. Pour chacune de ces régions, il existe sept possibilités :

– addition d'un élément et soustraction d'un autre (avec ou sans changement de volume) (2) ;

– cas particulier de l'addition de deux éléments (avec ou sans changement de volume) (2) ;

– cas particulier de la soustraction de deux éléments (avec ou sans changement de volume) (2) ;

– cas particulier de l'addition de deux éléments, accompagnée de la soustraction du troisième (avec ou sans changement de volume) (2) ;



	La droite est parallèle au côté:					
	a b		b c		a c	
	Le point représentatif de l'état 2 est situé sur le segment:					
	1z	1z'	1x	1x'	1y	1y'
cas particuliers de modalités complexes	-A, +B	+A, -B	-B, +C	+B, -C	-C, +A	+C, -A
	+B, +C	-B, -C	+C, +A	-C, -A	+A, +B	-A, -B
	+B, +C, -A	-B, -C, +A	+C, +A, -B	-C, -A, +B	+A, +B, -C	-A, -B, +C
	-A, -C	+A, +C	-B, -A	+B, +A	-C, -B	+C, +B
	-A, -C, +B	+A, +C, -B	-B, -A, +C	+B, +A, -C	-C, -B, +A	+C, +B, -A
	+A, +B, +C					
	-A, -B, -C					
conditons	$\Delta c= 0$; $\Delta a= -\Delta b$ $(\Delta A_p+\Delta B_p)C_{1p}=$ $\Delta C_p(A_{1p}+B_{1p})$ $(\Delta A_v+\Delta B_v)C_{1v}=$ $\Delta C_v(A_{1v}+B_{1v})$		$\Delta a= 0$; $\Delta b= -\Delta c$ $(\Delta B_p+\Delta C_p)A_{1p}=$ $\Delta A_p(B_{1p}+C_{1p})$ $(\Delta B_v+\Delta C_v)A_{1v}=$ $\Delta A_v(B_{1v}+C_{1v})$		$\Delta b= 0$; $\Delta c= -\Delta a$ $(\Delta C_p+\Delta A_p)B_{1p}=$ $\Delta B_p(C_{1p}+A_{1p})$ $(\Delta C_v+\Delta A_v)B_{1v}=$ $\Delta B_v(C_{1v}+A_{1v})$	

A_{1p}, B_{1p}, C_{1p} : teneurs pondérales des éléments A, B, C dans l'état 1
A_{1v}, B_{1v}, C_{1v} : teneurs volumiques des éléments A, B, C dans l'état 1
ΔA_p, ΔB_p, ΔC_p : différences des teneurs pondérales des éléments A, B, C entre les états 2 et 1
ΔA_v, ΔB_v, ΔC_v : différences des teneurs volumiques des éléments A, B, C entre les états 2 et 1
Δa, Δb, Δc : différences des proportions relatives (a, b, c) des éléments A, B, C entre les états 2 et 1 ($\Delta a= a_2 - a_1$)

$$a_1 = 100\, A_{1p} / (A_{1p}+B_{1p}+C_{1p})$$
$$= 100\, A_{1v} / (A_{1v}+B_{1v}+C_{1v})$$
$$a_2 = 100(A_1+\Delta A) / (A_1+B_1+C_1+\Delta A+\Delta B+\Delta C)$$

FIG. 6. – Points représentatifs des états 1 et 2 situés sur une droite parallèle à l'un des côtés du diagramme triangulaire.
Representative points of states 1 and 2 situated on a straight line, parallel to one side of the triangular diagram.

– cas particulier de la soustraction de deux éléments, accompagnée de l'addition du troisième (avec ou sans changement de volume) (2) ;
– cas particulier de l'addition des trois éléments (avec ou sans changement de volume) (2) ;
– cas particulier de la soustraction des trois éléments (avec ou sans changement de volume) (2).

L'ensemble de ces modalités, ainsi que l'indication de la (ou des) zone(s) correspondante(s) sont exposés dans la figure 7.

Modalités		Région
addition de deux éléments	+A, +B	1 et 2
	+B, +C	3 et 4
	+C, +A	5 et 6
soustraction de deux éléments	-A, -B	4 et 5
	-B, -C	6 et 1
	-C, -A	2 et 3
addition d'un élément et soustraction d'un autre	+A, -B	6
	+A, -C	1
	+B, -A	3
	+B, -C	2
	+C, -A	4
	+C, -B	5
addition de deux éléments et soustraction d'un troisième	+A, +B, -C	1 et 2
	+B, +C, -A	3 et 4
	+C, +A, -B	5 et 6
soustraction de deux éléments et addition d'un troisième	-A, -B, +C	4 et 5
	-B, -C, +A	6 et 1
	-C, -A, +B	2 et 3
addition de trois éléments	+A, +B, +C	1 à 6
soustraction de trois éléments	-A, -B, -C	1 à 6

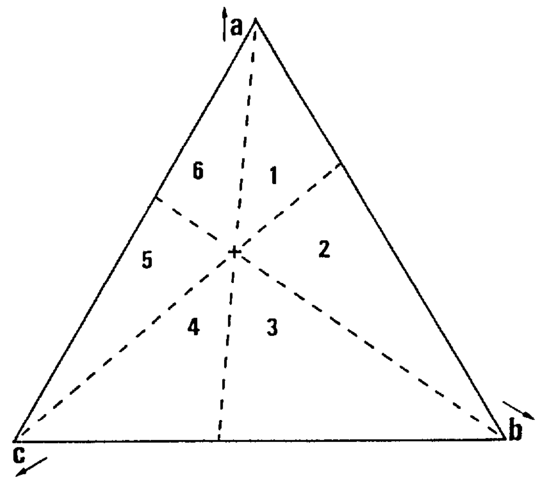


FIG. 7. – Modalités complexes. Cas général. Les points représentatifs des états 1 et 2 ne sont :
– ni confondus,
– ni situés sur une droite passant par l'un des pôles du diagramme triangulaire,
– ni situés sur une droite parallèle à l'un des côtés du diagramme triangulaire.

Complex modalities. General case. The representative points of states 1 and 2 are :
– not superposed,
– nor situated on one straight line going through one of the poles of the triangular diagram,
– nor situated on one straight line parallel to one side of the triangular diagram.

1.3.5. Conclusion

L'examen de l'ensemble des modalités envisageables montre clairement que, dans un diagramme triangulaire, une même position des points représentatifs de deux états d'un matériau donné peut résulter de plusieurs modalités distinctes, voire opposées.

• Dans le cas le plus général (fig. 5, 6 et 7), où les additions et/ou soustractions des éléments A, B, C s'accompagnent d'additions et/ou de soustractions d'autres éléments constitutifs (D,..., X), ainsi que de variations de volume, il n'est généralement pas possible de distinguer les différentes modalités correspondant à une situation donnée.

• En revanche, lorsque les seuls éléments additionnés (ou soustraits) font partie de ABC, la prise en compte des teneurs pondérales permet de réduire le nombre d'hypothèses, même lorsqu'une variation de volume intervient.

• Naturellement, dans le cas particulier où le volume n'est pas modifié, la prise en compte des teneurs volumiques lève tout ambiguïté (calcul « isovolume » ; MILLOT et BONIFAS, 1955 ; BONIFAS, 1959).

Soulignons cependant que, dans le cas le plus général, la signification de la position relative, dans un diagramme triangulaire, des points représentatifs de deux états d'un matériau poreux homogène n'est jamais univoque.

2. APPLICATION AUX MATÉRIAUX PÉDOLOGIQUES

Les considérations théoriques précédentes (cf. § 1.) permettent de comparer deux états d'un matériau solide, homogène, poreux, constitué de n éléments A, B..., X ; par rapport à l'état 1, l'état 2 est caractérisé par l'addition et/ou la soustraction (partielle ou totale), d'un ou de plusieurs éléments constitutifs, et/ou par l'augmentation ou la diminution du volume.

La comparaison des deux états est basée sur l'interprétation des positions relatives des points représentatifs (proportions relatives de trois des éléments) dans un système de diagrammes triangulaires.

Nous envisagerons tout d'abord (§ 2.1.), dans quelle mesure les termes utilisés (éléments constitutifs, matériau homogène, addition et soustraction d'éléments) peuvent s'appliquer aux matériaux pédologiques.

Nous préciserons ensuite (§ 2.2.), à l'aide d'un exemple numérique, les différentes modalités conduisant à une augmentation des proportions relatives d'oxy-hydroxydes de fer d'un matériau pédologique constitué de kaolinite, de quartz, de goethite, d'hématite, de muscovite, de gibbsite et de rutile.

La représentation graphique de ces modalités utilisera le diagramme triangulaire *k fe q* (proportions relatives de kaolinite, d'oxy-hydroxydes de fer et de quartz).

Enfin (§ 2.3.), nous examinerons le rôle de la micromorphologie dans l'interprétation des positions relatives dans un diagramme triangulaire.

2.1. Conditions d'application aux matériaux pédologiques

2.1.1. Eléments constitutifs

Dans tout matériau pédologique, les éléments, dont les proportions relatives peuvent être prise en compte, sont très divers. Il peut en effet s'agir :

– de composés chimiques (exprimés sous formes d'atomes ou d'oxydes) ou de minéraux normatifs (calculés à partir de la composition chimique) ;

– d'espèces minéralogiques déterminées quantitativement (analyse thermopondérale, compteur de points, etc.) ;

– ou de fractions granulométriques.

Un exemple correspondant au dernier cas est fourni par le classique triangle textural, qui représente les proportions relatives des fractions granulométriques argile, limon, sable ; d'autres fractions granulométriques, continues ou non, peuvent être utilisées ; par exemple : argile, limon, sable et éléments grossiers, ou : argile fine ($< 0{,}2\ \mu m$), limon fin ($2\text{-}20\ \mu m$), limon grossier ($20\text{-}50\ \mu m$), etc.

Signalons, en outre, qu'il est possible de prendre en compte :

– soit plusieurs « formes » distinctes d'un même élément (proportions relatives du carbone des acides humiques, des acides fulviques et de l'humine, par exemple) ;

– soit la combinaison d'un élément chimique (ou minéralogique) et de fractions granulométriques (proportions relatives du quartz des fractions limon grossier, sable fin et sable grossier, par exemple).

2.1.2. Addition, soustraction

Dans un matériau pédologique, des transferts de matière peuvent s'effectuer sous forme gazeuse (H_2O, CO_2...), liquide (eau et éléments en solution) et solide (éléments figurés). Les termes « addition » et « soustraction » doivent donc être précisés dans ce contexte, et, plus particulièrement, dans le cas des transferts sous forme soluble et sous forme figurée.

2.1.2.1. Transferts sous forme soluble

Suivant la nature et la concentration de l'élément (ou des éléments) en solution, l'addition correspond à un processus de précipitation, de néoformation, de transformation additive (agradation) et de saturation du complexe d'échange ; la soustraction recouvre les notions de dissolution, de transformation soustractive et de désaturation (lixiviation).

Soulignons que la dissolution (soustraction) du ciment de particules complexes (calcite de glébules carbonatés à squelette quartzeux, par exemple) contribue à la libération (addition) de particules initialement incluses dans ces particules complexes, et modifie donc la distribution granulométrique.

Inversement, la néoformation (addition) d'un élément peut contribuer à un phénomène de cimentation, qui modifiera, lui aussi, la distribution granulométrique ; il y aura, dans ce cas, addition des particules résultant de la cimentation (glébules) et soustraction des particules incluses dans ces glébules.

2.1.2.2. Transferts sous forme figurée

Deux cas peuvent être distingués :

– *Premier cas :* les éléments figurés sont transférés en suspension dans une phase aqueuse ; l'addition correspond alors au processus d'illuviation, et la soustraction à celui d'éluviation. Lorsque la compétence de la phase aqueuse augmente, des particules plus grossières peuvent être transférées ; la soustraction traduira un phénomène de lavage ou d'érosion interne, et l'addition une sédimentation grossière.

– *Deuxième cas :* le transfert s'effectue sans relation avec une phase aqueuse, soit par gravité (chute d'éléments dans des fissures ou des chenaux), soit par l'action d'animaux géophages ou fouisseurs. Dans ce dernier cas, la soustraction correspond au creusement de galeries et aux prélèvements sélectifs ; l'addition, au comblement de galeries.

Les termes « addition » et « soustraction », qui peuvent s'appliquer à l'ensemble des types de transferts envisagés, sans préjuger le (ou les) processus effectif(s), sont donc pertinents.

2.1.3. Homogénéité

La comparaison de « deux états d'un matériau homogène » implique que deux conditions soient remplies.

– *Première condition :* il doit s'agir de deux états d'un même matériau. La méthode ne s'applique qu'à l'étude de profils différenciés à partir d'un matériau originel unique (profils de type ABC, et non pas de type A, IIB, IIIC). Dans le cas de profils développés à partir de matériaux complexes, la méthode de comparaison peut cependant s'appliquer à l'étude de différenciations qui interviennent au sein du même matériau (par exemple, comparaison des horizons II A2 et II Bt, dans le cas d'un profil de type A, II A2, II Bt, III C). Cette méthode permet *a contrario*, de vérifier si les matériaux comparés résultent de l'évolution, sous l'action des facteurs de la pédogenèse, d'un même matériau originel.

– *Deuxième condition :* les matériaux pédologiques, constitués par l'assemblage de particules dont la nature, la taille, la forme et l'organisation sont extrêmement variables, ne constituent pas des milieux homogènes à toutes les échelles. De ce fait, il est absolument indispensable, pour comparer deux états d'un matériau pédologique :
– d'utiliser des données provenant de l'analyse d'échantillons de dimensions semblables, correspondant à des niveaux d'organisation identiques (plasma, squelette, fonds matriciels, traits pédologiques, horizons, etc.),
– et, naturellement, de spécifier l'ordre de grandeur des volumes pédologiques concernés.

2.1.4. Conclusion

Les principales limites d'application des règles d'interprétation exposées dans le paragraphe 1. concernent les profils développés à partir d'un matériau originel complexe.

Dans tous les autres cas, ces règles peuvent être utilisées avec de très nombreux constituants (ou combinaisons de constituants), à condition d'une part, de préciser l'ordre de grandeur des volumes concernés, et d'autre part, d'utiliser des données provenant d'échantillons de dimensions comparables, c'est-à-dire intégrant une même échelle d'hétérogénéité.

2.2. Application à un exemple : modalités conduisant à l'augmentation des proportions relatives d'oxy-hydroxydes de fer d'un matériau pédologique

Soit un matériau pédologique dont la densité apparente est de 1,3 g.cm^{-3} et la porosité 50 % ; il est constitué de kaolinite (K), d'oxy-hydroxydes de fer (goethite et hématite) (Fe), de quartz (Q), de muscovite (M), de gibbsite (Gi) et de rutile (R), avec les teneurs suivantes (tabl. II) :

Les proportions relatives *k, fe* et *q* de kaolinite (K), d'oxy-hydroxydes de fer (Fe) et de quartz (Q), calculées à partir des teneurs pondérales ou volumiques sont :

$k = 100\ K/(K + Fe + Q) = 60\ \%$;
$fe = 100\ Fe/(K + Fe + Q) = 10\ \%$;
$q = 100\ Q/(K + Fe + Q) = 30\ \%$.

TABLEAU II

Teneurs pondérales et volumiques du matériau considéré

Weighled and volume contents of the material in view

	Teneurs pondérales g/100 g	Teneurs volumiques g/100 cm³
(K)	54	70,2
(Fe)	9	11,7
(Q)	27	35,1
(M)	5,77	7,5
(Gi)	2,69	3,5
(R)	1,54	2
Total	100	130

Le point représentatif de ce matériau, dans un diagramme triangulaire *k fe q*, est représenté dans la figure 8 (* : 60 ; 10; 30).

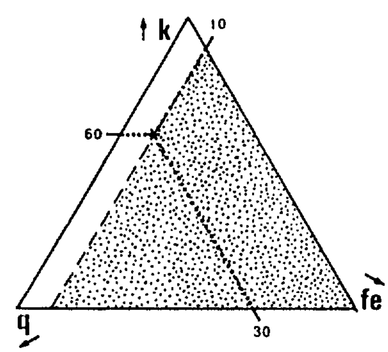


FIG. 8. – Augmentation des proportions relatives d'oxy-hydroxydes de fer (fe).
* : état initial (k = 60 % ; fe = 10 % ; q = 30 %).

Increase in the relative proportions of oxy-hydroxydes of iron (fe)
** : initial state (k = 60 % ; fe = 10 % ; q = 30 %).*

Examinons maintenant les différentes modalités conduisant à une augmentation des proportions relatives d'oxy-hydroxydes de fer *(fe)* de ce matériau. Cette augmentation se traduira par une localisation du point représentatif de l'état 2 dans le domaine grisé de la figure 8 (*fe* > 10 %).

En se référant aux figures 5 et 7, il est alors possible de déterminer l'ensemble de ces modalités. Il en existe 19. Sept d'entre elles (+ Fe ; - K ; - K et - Q ; + Fe et - K ; + Fe et - Q ; + Fe, - K et - Q) sont des cas généraux ; elles conduisent **toujours** à une augmentation des proportions relatives de fer, quelles que soient les quantités mises en œuvre.

En revanche, les douze autres modalités (+ Fe et + K ; + Fe et + Q ; + Fe, + K et + Q ; - Fe et - K ; - Fe et - Q ; - Fe, - K et - Q ; + K et - Q ; + Q et - K ; + K,

- Q et - Fe ; + Q, - K, - Fe ; + Fe, + K et - Q ; + Fe, - K et + Q) n'entraînent une telle augmentation que dans certains cas particuliers.

Nous exposerons en détail les sept modalités générales (cf. § 2.2., 1 à 7) et beaucoup plus sommairement les douze autres (cf. § 8). En ce qui concerne les modalités générales, nous présenterons, à l'aide d'exemples numériques, l'évolution des proportions relatives (*k, fe, q*) ainsi que celle des teneurs volumiques et pondérales des différents minéraux constitutifs ; nous envisagerons également les conditions limites ; nous examinerons, en outre, chaque modalité en référence aux concepts classiques d'accumulation absolue et d'accumulation relative définis par D'HOORE (1954 ; 1955).

2.2.1. Addition d'oxy-hydroxydes de fer (+ Fe)

Quatre cas doivent être envisagés :

– Premier cas : l'addition de fer ne s'accompagne, ni de modification de volume, ni d'additions et/ou de soustractions de muscovite, gibbsite ou rutile ;

– Deuxième cas : l'addition de fer s'accompagne d'une modification du volume (gonflement ou tassement) ;

– Troisième cas : l'addition de fer s'accompagne d'additions et/ou de soustractions de muscovite, gibbsite ou rutile ;

– Quatrième cas : l'addition de fer s'accompagne à la fois d'une modification de volume et d'additions (et/ou de soustractions) des minéraux précités.

Pour chacun de ces quatre cas, les teneurs (volumiques et pondérales) des différents minéraux, la densité apparente, ainsi que les valeurs des proportions relatives de kaolinite *(k2)*, de fer *(fe2)* et de quartz *(q2)*, sont présentées dans le tableau III.

TABLEAU III

Addition d'oxy-hydroxydes de fer

– Premier cas : addition de 20 g.100 cm^{-3} de fer ;
– Deuxième cas : addition de 20 g.100 cm^{-3} de fer (id. premier cas) et diminution de volume de 50 % ;
– Troisième cas : addition de 20 g.100 cm^{-3} de fer (id. premier cas) et de 2 g.100 cm^{-3} de gibbsite, soustraction de 6 g.100 cm^{-3} de muscovite et de 1 g/100 cm^3 de rutile ;
– Quatrième cas : combinaison du deuxième et du troisième cas (addition de 20 g.100 cm^{-3} de fer et de 2 g.100 cm^{-3} de gibbsite, soustraction de 6 g.100 cm^{-3} de muscovite et de 1 g.100 cm^{-3} de rutile, et diminution de volume de 50 %).

Addition of oxy-hydroxydes of iron

– First case : addition of 20 g.100 cm^{-3} of iron ;
– Second case : addition of 20 g.100 cm^{-3} of iron (idem first case) and volume reduction of 50 % ;
– Third case : addition of 20 g.100 cm^{-3} of iron (idem first case) and 2 g.100 cm^{-3} of gibbsite, subtraction of 6 g.100 cm^{-3} of muscovite and 1 g.100 cm^{-3} of rutile ;
– Fourth case : combination of the second and third cases (addition of 20 g.100 cm^{-3} of iron and 2 g.100 cm^{-3} of gibbsite, subtraction of 6 g.100 cm^{-3} of muscovite and 1 g.100 cm^{-3} of rutile, and volume diminution of 50 %).

	Teneurs volumiques g/100 cm^3						Densité apparente	Teneurs pondérales g/100 g						Proportions relatives
	K	Fe	Q	M	Gi	R		K	Fe	Q	M	Gi	R	K / Fe / Q
État 1	70,2	11,7	35,1	7,5	3,5	2	1,3	54	9	27	5,77	2,69	1,54	k_1 = 60 % fe_1 = 10 % q_1 = 30 %
État 2 1er cas	70,2	31,7	35,1	7,5	3,5	2	1,5	46,8	21,13	23,4	5	2,33	1,33	k_2 = 51,24 % fe_2 = 23,14 % q_2 = 25,62 %
État 2 2ème cas	105,3	47,55	52,65	11,25	5,25	3	2,25	46,8	21,13	23,4	5	2,33	1,33	k_2 = 51,24 % fe_2 = 23,14 % q_2 = 25,62 %
État 2 3ème cas	70,2	31,7	35,1	1,5	5,5	1	1,45	48,41	21,86	24,21	1,03	3,79	0,69	k_2 = 51,24 % fe_2 = 23,14 % q_2 = 25,62 %
État 2 4ème cas	105,3	47,55	52,65	2,25	8,25	1,5	2,175	48,41	21,86	24,21	1,03	3,79	0,69	k_2 = 51,24 % fe_2 = 23,14 % q_2 = 25,62 %

K: kaolinite; Fe: oxy-hydroxydes de fer; Q: quartz; M: muscovite; Gi: gibbsite; R: rutile

On constate ainsi, que les valeurs des proportions relatives *k2, fe2* et *q2* (état 2) sont respectivement identiques dans les quatre cas. Ceci signifie que, dans le triangle *k fe q*, l'addition de fer se traduit de la même manière, indépendamment des variations de volume et des additions et/ou soustractions d'éléments autres que K, Fe et Q.

De plus, la comparaison des états 1 et 2 montre que les valeurs des rapports des teneurs (volumiques et pondérales) en kaolinite et en quartz, de même que celles des rapports des proportions relatives de ces minéraux, sont constantes :

– état 1 : K/Q = 70,2/35,1 (vol.) = 54,0/27,0 (pond.) = 2
k1/q1 = 60/30 = 2

– état 2 : K/Q = 70,2/35,1 (vol., cas 1 et 3) = 105,33/52,65 (vol., cas 2 et 4)
= 48,60/23,40 (pond., cas 1 et 2) = 48,41/24,21 (pond., cas 3 et 4) = 2
k2/q2 = 51,24/25,62 = 2

Quel que soit le cas, et quelle que soit l'importance de l'addition de fer, le point représentatif de l'état 2 dans le triangle *k fe q* sera donc situé sur le segment qui joint le point représentatif de l'état 1 au pôle « *fe* » (fig. 9-A et § 1.2.4.).

La limite supérieure de l'addition de fer dépend de la porosité initiale du matériau (premier cas), modifiée par les additions (et/ou les soustractions) des autres éléments (troisième et quatrième cas), ainsi que par les variations de volume (deuxième et quatrième cas).

Ainsi, par exemple, dans le premier cas présenté dans le tableau III, où la porosité initiale (50 %) n'est modifiée que par l'addition de fer, cette addition ne pourra dépasser 195 $g.cm^{-3}$ (50 × 3,9 si 3,9 est la densité réelle des oxy-hydroxydes de fer) ; dans ces conditions, les proportions relatives *k, fe* et *q* (60 %, 10 %, 30 % dans l'état 1) deviendraient respectivement 22,5 %, 66,25 % et 11,25 % si le fer additionné comblait la totalité de la porosité. L'augmentation de la proportion relative de fer atteindrait alors 562,5 %, soit une multiplication par 6,625.

L'addition d'oxy-hydroxydes de fer correspond au processus d'accumulation absolue du fer.

2.2.2. Soustraction de kaolinite (- K)

Comme précédemment, on distingue quatre cas ; en effet, la soustraction de kaolinite peut intervenir seule (premier cas), ou être accompagnée :
– soit d'une modification de volume (deuxième cas),
– soit d'additions et/ou de soustractions de muscovite, gibbsite ou de rutile (troisième cas),
– soit, à la fois, d'une modification de volume et d'additions (et/ou de soustractions) des minéraux précités (quatrième cas).

Le tableau IV présente un exemple numérique de ces quatre cas. On y constate que :
– dans l'état 2 – les valeurs des proportions relatives de kaolinite *(k2)*, de fer *(fe2)* et de quartz *(q2)* sont respectivement identiques dans les quatre cas. En outre, la comparaison des états 1 et 2 montre que les valeurs des rapports des teneurs (volumiques et pondérales) en fer et en quartz, de même que celles des rapports des proportions relatives de ces minéraux, sont constantes :

– état 1 : Fe/Q = 11,7/35,1 (vol.) = 9,0/27,0 (pond.) = 0,333
fe1/q1 = 10/30 = 0,333

– état 2 : Fe/Q = 11,7/35,1 (vol., cas 1 et 3) = 17,55/52,65 (vol., cas 2 et 4) = 0,333
= 13,0/39,0 (pond., cas 1 et 2) = 13,76/41,29 (pond., cas 2 et 3) = 0,333
fe2/q2 = 15,19/45,58 = 0,333

Quel que soit le cas, et quelle que soit l'importance de la soustraction de kaolinite, le point représentatif de l'état 2 (dans le diagramme *k fe q)* sera situé sur la droite qui passe par le point représentatif de l'état 1 et par le pôle « *k* », du côté des valeurs décroissantes de *k* (fig. 9, B et § 1.2.1.).

La limite supérieure de l'augmentation des proportions relatives de fer, résultant de la soustraction de kaolinite dépend uniquement de la teneur initiale du matériau en kaolinite. La soustraction de la totalité de la kaolinite du matériau pris comme exemple (70,2 $g.100\ cm^{-3}$; 54 $g.100\ cm^{-3}$) se traduirait ainsi par une augmentation de la proportion de fer de 150 %, ce qui représente une multiplication par 2,5. Les teneurs pondérales en fer augmenteraient de 117,3 % (premier et deuxième cas : 19,56 $g.100\ g^{-1}$), ou de 137,2 % (troisième et quatrième cas : 21,35 $g.100\ g^{-1}$). Quant aux teneurs volumiques en fer, soit elles restent inchangées (premier et troisième cas : 11,7 $g.100\ cm^{-3}$), soit elles augmentent de 50 % (deuxième et quatrième cas : 17,55 $g.100\ cm^{-3}$), et ceci indépendamment de la soustraction de kaolinite.

La soustraction de kaolinite participe au processus d'accumulation relative. Cette accumulation relative concerne les oxy-hydroxydes de fer, mais aussi le quartz et tous les autres minéraux présents.

2.2.3. Soustraction de quartz (-Q)

Cette modalité est semblable à celle concernant la soustraction de kaolinite (cf. § précédent). Le tableau V présente un exemple numérique des quatre cas possibles.

Quel que soit le cas, et quelle que soit l'importance de la soustraction de quartz, le point représentatif de l'état 2 (dans le diagramme *k, fe, q)* sera situé sur la droite qui passe par le point représentatif de l'état 1 et par le pôle « *q* », du côté des valeurs décroissantes de *q* (fig. 9B et § 1.2.1.).

La limite supérieure de l'augmentation des proportions relatives de fer, résultant de la soustraction de quartz, dépend uniquement de la teneur initiale du matériau en quartz.

La soustraction de la totalité du quartz du matériau pris comme exemple (35,1 g.100 cm^{-3} ; 27,0 g.100 g^{-1}) se traduirait ainsi par une augmentation de la proportion de fer de 42,9 %. Les teneurs pondérales en fer augmenteraient de 37 % (premier et deuxième cas : 12,33 g.100 g^{-1}), ou de 44,6 % (troisième et quatrième cas: 13,01 g.100 g^{-1}). Quant aux teneurs volumiques en fer, soit elles restent inchangées (premier et troisième cas : 11,7 g.100 cm^{-3}), soit elles augmentent de 50 % (deuxième et quatrième cas : 17,55 g.100 cm^{-3}), et ceci indépendamment de la soustraction de quartz.

La soustraction de quartz participe au processus d'accumulation relative. Cette accumulation relative concerne les oxy-hydroxydes de fer, mais aussi la kaolinite et tous les autres minéraux présents.

2.2.4. Soustraction de kaolinite et de quartz (- K, - Q)

Cette modalité a été exposée précédemment (cf. § 1.2.2.2.). Quel que soit le cas, en fonction des quantités de kaolinite et de quartz soustraites, le point représentatif de l'état 2 sera situé dans un domaine constitué par un quadrilatère dont les sommets sont (fig. 9B) :

- le pôle « *fe* »,
- le point représentatif de l'état 1,
- l'intersection du côté *(q, fe)* et de la droite passant par le pôle « *k* » et par le point représentatif de l'état 1 *(q/fe* = C^{te}),
- et l'intersection du côté *(k, fe)* et de la droite passant par le pôle « *q* » et par le point représentatif de l'état 1 *(k/fe* = C^{te}).

Si la kaolinite et le quartz étaient entièrement soustraits, la valeur de la proportion relative de fer atteindrait 100 %, indépendamment des teneurs initiales.

Dans le matériau pris comme exemple, l'augmentation des proportions relatives de fer serait ainsi de 900 % ; les teneurs pondérales en fer augmenteraient de 426,3 % (premier et deuxième cas : 47,37 g.100 g^{-1}), ou de 559,9 % (troisième et quatrième cas : 59,39 g.100 g^{-1}) ; quant aux teneurs volumiques en fer, soit elles resteraient inchangées (premier et troisième cas : 11,7 g.100 cm^{-3}), soit elles augmenteraient de 50 % (deuxième et quatrième cas : 17,55 g.100 cm^{-3}), et ceci indépendamment de la soustraction de kaolinite et de quartz (l'augmentation, dans ces deux cas, ne résulte que de la diminution de volume).

Un cas particulier doit être examiné. Lorsque le rapport des quantités de kaolinite et de quartz soustraites est égal au rapport des teneurs (ou des proportions relatives) initiales de ces minéraux, le point représentatif de l'état 2 est situé sur le segment qui joint le point représentatif de l'état 1 au pôle « *fe* » (fig. 9B) ; or, cette disposition (*k/q* = C^{te}) correspond également à la modalité de l'addition de fer (fig. 9A).

De ce fait, une soustraction de kaolinite et de quartz peut être confondue (dans ce cas particulier) avec une addition de fer.

Un exemple numérique d'un tel cas, où la soustraction de kaolinite et de quartz « mime » une addition de fer, est présenté dans le tableau VI ; on y vérifie que :

- état 1 : K/Q = 70,2/35,1 (vol.) = 54,0/27,0 (pond.) = 2
  $k1/q1$ = 60/30 = 2
- état 2 : K/Q = 30,2/15,1 (vol., cas 1 et 3) = 45,3/22,65 (vol., cas 2 et 4) = 2
  = 43,14/21,57 (pond. cas 1 et 2) = 46,46/23,23 (pond., cas 3 et 4) = 2
  $k1/a2$ = 52,98/26,49 = 2
  et que, dans les quatre cas : soustraction de kaolinite/soustraction de quartz = 2.

La soustraction de kaolinite et de quartz participe au processus d'accumulation relative. Suivant l'importance respective de la soustraction de kaolinite et de quartz, l'accumulation relative concernera (outre tous les autres minéraux éventuellement présents) :

- soit les seuls oxy-hydroxydes de fer (fig. 9B, sous-domaine 1) ;
- soit le fer et la kaolinite (fig. 9B, sous-domaine 2) ;
- soit le fer et le quartz (fig. 9B, sous-domaine 3).

2.2.5. Soustraction de kaolinite et addition de fer (- K, + Fe)

Cette modalité a été exposée précédemment (cf. § 1.2.2.3.). Quel que soit le cas, en fonction des quantités de kaolinite et de fer respectivement soustraites et additionnées, le point représentatif de l'état 2 sera situé dans un domaine constitué par un triangle dont les sommets sont (fig. 9C) :

- le pôle « *fe* »,
- le point représentatif de l'état 1,
- et l'intersection du côté *(q, fe)* et de la droite passant par le pôle « *k* » et par le point représentatif de l'état 1 (*q/fe* = C^{te}).

La limite supérieure de l'augmentation des proportions relatives de fer, résultant de la soustraction de kaolinite et de l'addition de fer, dépend uniquement de la porosité totale disponible ; celle-ci comprend la porosité initiale du matériau, ainsi que celle créée par la soustraction de kaolinite (premier cas) ; cette porosité peut être modifiée par les additions (et/ou les soustractions) des autres éléments (troisième et quatrième cas), ainsi que par les variations de volume (deuxième et quatrième cas).

Dans le premier cas, par exemple, la soustraction de la totalité de la kaolinite créerait une porosité de 27 % (70,2 g.100 cm^{-3}/2,6 ; si 2,6 est la densité réelle de la

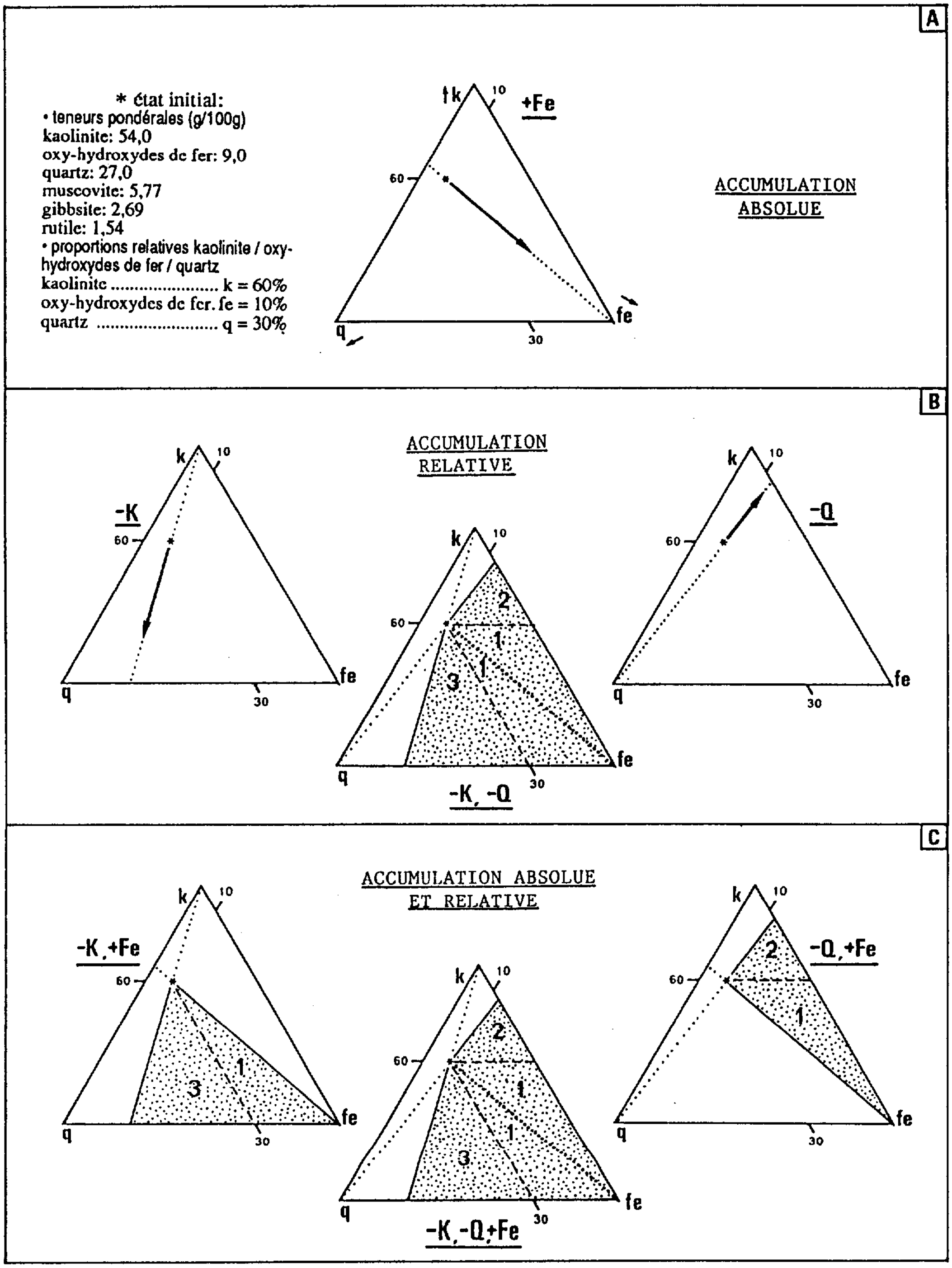


FIG. 9. – Modalités de l'augmentation des proportions relatives en fer d'un matériau pédologique. Cas généraux :

9A : + Fe — addition de fer = accumulation absolue de fer ;

9B : - K — soustraction de kaolinite = accumulation relative de fer et de quartz ;

: - Q — soustraction de quartz = accumulation relative de fer et de kaolinite ;

: - K, - Q — soustraction de kaolinite et de quartz = accumulation relative de fer (1), de fer et de kaolinite (2), ou de fer et de quartz (3) ;

9C : - K, + Fe — soustraction de kaolinite et addition de fer = accumulation absolue de fer et accumulation relative de fer (1), ou de fer et de quartz (3) ;

: - Q, + Fe — soustraction de quartz et addition de fer = accumulation absolue de fer et accumulation relative de fer (1), ou de fer et de kaolinite (2) ;

: - K, - Q, + Fe — soustraction de kaolinite et de quartz, addition de fer = accumulation absolue de fer et relative de fer (1), relative de fer et de kaolinite (2), ou relative de fer et de quartz (3).

TABLEAU IV

Soustraction de kaolinite.

– Premier cas : soustraction de 40 g.100 cm³ de kaolinite ;
– Deuxième cas : soustraction de 40 g.100 cm^{-3} de kaolinite (id. premier cas) et diminution de volume de 50 % ;
– Troisième cas : soustraction de 40 g.100 cm^{-3} de kaolinite (id. premier cas), de 6 g.100 cm^{-3} de muscovite et de 1 g.100 cm^{-3} de rutile, et addition de 2 g.100 cm^{-3} de gibbsite ;
– Quatrième cas : combinaison du deuxième et du troisième cas (soustraction de 40 g.100 cm^{-3} de kaolinite, de 6 g.100 cm^{-3} de muscovite et de 1 g.100 cm^{-3} de rutile, addition de 2 g.100 cm^{-3} de gibbsite, et diminution de volume de 50 %).

Subtraction of kaolinite

– First case : subtraction of 40 g.100 cm^{-3} of kaolinite ;
– Second case : subtraction of 40 g.100 cm^{-3} of kaolinite (idem first case) and volume reduction of 50 % ;
– Third case : subtraction of 40 g.100 cm^{-3} of kaolinite (idem first case), of 6 g.100 cm^{-3} of muscovite and 1 g.100 cm^{-3} of rutile, and addition of 2 g.100 cm^{-3} of gibbsite ;
– Fourth case : combination of the second and third cases (subtraction of 40 g.100 cm^{-3} of kaolinite, of 6 g.100 cm^{-3} of muscovite and 1 g.100 cm^{-3} of rutile, and addition of 2 g.100 cm^{-3} of gibbsite, and volume diminution of 50 %).

	Teneurs volumiques g/100 cm³						Densité apparente	Teneurs pondérales g/100 g						Proportions relatives
	K	Fe	Q	M	Gi	R		K	Fe	Q	M	Gi	R	K / Fe / Q
État 1	70,2	11,7	35,1	7,5	3,5	2	1,3	54	9	27	5,77	2,69	1,54	k_1 = 60 % fe_1 = 10 % q_1 = 30 %
État 2 1ᵉʳ cas	30,2	11,7	35,1	7,5	3,5	2	0,9	33,56	13	39	8,33	3,89	2,22	k_2 = 39,22 % fe_2 = 15,19 % q_2 = 45,58 %
État 2 2ᵉᵐᵉ cas	45,3	17,55	52,65	11,25	5,25	3	1,35	33,56	13	39	8,33	3,89	2,22	k_2 = 39,22 % fe_2 = 15,19 % q_2 = 45,58 %
État 2 3ᵉᵐᵉ cas	30,2	11,7	35,1	1,5	5,5	1	0,85	35,53	13,76	41,29	1,76	6,47	1,18	k_2 = 39,22 % fe_2 = 15,19 % q_2 = 45,58 %
État 2 4ᵉᵐᵉ cas	45,3	17,55	52,65	2,25	8,25	1,5	1,275	35,53	13,76	41,29	1,76	6,47	1,18	k_2 = 39,22 % fe_2 = 15,19 % q_2 = 45,58 %

K: kaolinite; Fe: oxy-hydroxydes de fer; Q: quartz; M: muscovite; Gi: gibbsite; R: rutile

Modalities concerning the increase in the relative proportions of iron of a pedological material. General Cases.

9A : + Fe — *addition of iron = absolute accumulation of iron,*
9B : - K — *subtraction of kaolinite = relative accumulation of iron and quartz,*
: - Q — *subtraction of quartz = relative accumulation of iron and kaolinite,*
: - K, - Q — *subtraction of kaolinite and quartz = relative accumulation of iron (1), of iron and kaolinite (2), or of iron and quartz (3),*
9C : - K, + Fe — *subtraction of kaolinite and addition of iron = absolute accumulation of iron and relative accumulation of iron (1) or of iron and quartz (3),*
: - Q, + Fe — *subtraction of quartz and addition of iron = absolute accumulation of iron, and relative accumulation of iron (1), or of iron and kaolinite (2),*
: - K, - Q, + Fe — *subtraction of kaolinite and quartz, addition of iron = absolute accumulation of iron and – relative accumulation of iron (1), – relative accumulation of iron and kaolinite (2), – or relative accumulation of iron and quartz (3).*

TABLEAU V

Soustraction de quartz

– Premier cas : soustraction de 20 g.100 cm^{-3} de quartz ;
– Deuxième cas : soustraction de 20 g.100 cm^{-3} de quartz (id. premier cas) et diminution de volume de 50 % ;
– Troisième cas : soustraction de 20 g.100 cm^{-3} de quartz (id. premier cas), de 6 g.100 cm^{-3} de muscovite et de 1 g.100 cm^{-3} de rutile, et addition de 2 g.100 cm^{-3} de gibbsite ;
– Quatrième cas : combinaison du deuxième et du troisième cas (soustraction de 20 g.100 cm^{-3} de quartz, de 6 g.100 cm^{-3} de muscovite et de 1 g.100 cm^{-3} de rutile, addition de 2 g.100 cm^{-3} de gibbsite et diminution de volume de 50 %

Subtraction of quartz

– First case : subtraction of 20 g.100 cm^{-3} of quartz ;
– Second case : subtraction of 20 g.100 cm^{-3} of quartz (idem first case) and volume diminution of 50 % ;
– Third case : subtraction of 20 g.100 cm^{-3} of quartz (idem first case), of 6 g.100 cm^{-3} of muscovite and 1 g.100 cm^{-3} of rutile and addition of 2 g.100 cm^{-3} of gibbsite ;
– Fourth case : combination of the second and third cases (subtraction of 20 g.100 cm^{-3} of quartz, and 6 g.100 cm^{-3} of muscovite and 1 g.100 cm^{-3} of rutile, addition of 2 g.100 cm^{-3} of gibbsite and volume reduction of 50 %

	Teneurs volumiques g/100 cm³						Densité apparente	Teneurs pondérales g/100 g						Proportions relatives
	K	Fe	Q	M	Gi	R		K	Fe	Q	M	Gi	R	K / Fe / Q
État 1	70,2	11,7	35,1	7,5	3,5	2	1,3	54	9	27	5,77	2,69	1,54	k 1 = 60 % fe 1 = 10 % q 1 = 30 %
État 2 1er cas	70,2	11,7	15,1	7,5	3,5	2	1,1	63,82	10,64	13,73	6,82	3,18	1,82	k 2 = 72,37 % fe 2 = 12,06 % q 2 = 15,57 %
État 2 2ème cas	105,3	17,55	22,65	11,25	5,25	3	1,65	63,82	10,64	13,73	6,82	3,18	1,82	k 2 = 72,37 % fe 2 = 12,06 % q 2 = 15,57 %
État 2 3ème cas	70,2	11,7	15,1	1,5	5,5	1	1,05	66,86	11,14	14,38	1,43	5,24	0,95	k 2 = 72,37 % fe 2 = 12,06 % q 2 = 15,57 %
État 2 4ème cas	105,3	17,55	22,65	2,25	8,25	1,5	1,575	66,86	11,14	14,38	1,43	5,24	0,95	k 2 = 72,37 % fe 2 = 12,06 % q 2 = 15,57 %

K: kaolinite; Fe: oxy-hydroxydes de fer; Q: quartz; M: muscovite; Gi: gibbsite; R: rutile

kaolinite) ; si la porosité totale disponible (50 % + 27 %) était entièrement comblée par les oxy-hydroxydes de fer (densité réelle : 3,9), l'addition de fer atteindrait 300,3 g.100 cm^{-3} ; dans ces conditions, les proportions relatives de fer s'élèveraient à 89,9 %, (teneur volumique : 312 g.100 cm^{-3} ; pondérale : 86,6 g.100 g^{-1} ; densité apparente : 3,601).

Cette modalité (soustraction de kaolinite associée à une addition de fer) relève à la fois des processus d'accumulation relative et absolue. L'accumulation absolue concerne les oxy-hydroxydes de fer ; elle est accompagnée de l'accumulation relative du fer (fig. 9C, sous-domaine 1) ou du fer et du quartz (fig. 9C, sous-domaine 3), suivant l'importance relative des quantités additionnées et soustraites.

Rappelons ici que l'« épigénie » de la kaolinite par le fer constitue un cas particulier de cette modalité ; cas particulier dans lequel le volume de kaolinite soustraite est remplacé par un même volume de fer.

2.2.6. Soustraction de quartz et addition de fer (- Q, + Fe)

Cette modalité est analogue à la précédente. Quel que soit le cas, en fonction des quantités de quartz et de fer respectivement soustraites et additionnées, le point représentatif de l'état 2 sera situé dans un domaine constitué par un triangle dont les sommets sont (fig. 9C) :
– le pôle « *fe* »,
– le point représentatif de l'état 1,
– et l'intersection du côté *(k, fe)* et de la droite passant par le pôle « *q* » et par le point représentatif de l'état 1 (*k/fe* = C^{te}).

La limite supérieure de l'augmentation des proportions relative de fer résultant de cette modalité, dépend uniquement de la porosité totale disponible. Un calcul similaire à celui présenté au paragraphe précédent montre que, lorsque la porosité totale disponible (50 %

TABLEAU VI

Soustraction de kaolinite et de quartz ; cas particulier où K/Q soustraits = K/Q initiaux
– Premier cas : soustraction de 40 g.100 cm^{-3} de kaolinite et de 20 g.100 cm^{-3} de quartz ;
– Deuxième cas : soustraction de 40 g.100 cm^{-3} de kaolinite et de 20 g.100 cm^{-3} de quartz (id. premier cas) et diminution de volume de 50 % ;
– Troisième cas : soustraction de 40 g.100 cm^{-3} de kaolinite, de 20 g.100 cm^{-3} de quartz (id. premier cas), de 6 g.100 cm^{-3} de muscovite et de 1 g.100 cm^{-3} de rutile, addition de 2 g.100 cm^{-3} de gibbsite ;
– Quatrième cas : combinaison du deuxième et du troisième cas (soustraction de 40 g.100 cm^{-3} de kaolinite, de 20 g.100 cm^{-3} de quartz, de 6 g.100 cm^{-3} de muscovite et de 1 g.100 cm^{-3} de rutile, addition de 2 g.100 cm^{-3} de gibbsite, et diminution de volume de 50 %)

Subtraction of kaolinite and quartz ; particular case when subtracted K/Q = initial K/Q
– First case : subtraction of 40 g.100 cm^{-3} of kaolinite and 20 g.100 cm^{-3} of quartz ;
– Second case : subtraction of 40 g.100 cm^{-3} of kaolinite and 20 g.100 cm^{-3} of quartz (idem first case) and volume diminution of 50 %) ;
– Third case : subtraction of 40 g.100 cm^{-3} of kaolinite, of 20 g.100 cm^{-3} of quartz (idem first case), of 6 g.100 cm^{-3} of muscovite and 1 g.100 cm^{-3} of rutile, addition of 2 g.100 cm^{-3} of gibbsite ;
– Fourth case : combination of the second and third cases (subtraction of 40 g.100 cm^{-3} of kaolinite, 20 g.100 cm^{-3} of quartz, 6 g.100 cm^{-3} of muscovite and 1 g.100 cm^{-3} of rutile, addition of 2 g.100 cm^{-3} of gibbsite, and volume reduction of 50 %)

	Teneurs volumiques g/100 cm^3						Densité apparente	Teneurs pondérales g/100 g						Proportions relatives
	K	Fe	Q	M	Gi	R		K	Fe	Q	M	Gi	R	K / Fe / Q
État 1	70,2	11,7	35,1	7,5	3,5	2	1,3	54	9	27	5,77	2,69	1,54	k_1 = 60 % fe_1 = 10 % q_1 = 30 %
État 2 1er cas	30,2	11,7	15,1	7,5	3,5	2	0,7	43,14	16,71	21,57	10,71	5	2,86	k_2 = 52,98 % fe_2 = 20,53 % q_2 = 26,49 %
État 2 2ème cas	4503	17,55	22,65	11,25	5,25	3	1,05	43,14	16,71	21,57	10,71	5	2,86	k_2 = 52,98 % fe_2 = 20,53 % q_2 = 26,49 %
État 2 3ème cas	30,2	11,7	15,1	1,5	5,5	1	0,65	46,46	18	23,23	2,31	8,46	1,54	k_2 = 52,98 % fe_2 = 20,53 % q_2 = 26,49%
État 2 4ème cas	45,3	17,55	22,65	2,25	8,25	1,5	0,975	46,46	18	23,23	2,31	8,46	1,54	k_2 = 52,98 % fe_2 = 20,53 % q_2 = 26,49%

K: kaolinite; Fe: oxy-hydroxydes de fer; Q: quartz; M: muscovite; Gi: gibbsite; R: rutile

+ 13,5 %, si la densité réelle du quartz est de 2,6) est entièrement comblée par les oxy-hydroxydes de fer, l'addition de fer atteint 247,65 g.100 cm^{-3} ; dans ces conditions, la proportion relative de fer s'élève à 78,7 % (teneur volumique : 259,35 g.100 cm^{-3} ; pondérale : 75,7 g.100 g^{-1} ; densité apparente : 3,425).

Cette modalité (soustraction de quartz associée à une addition de fer) relève à la fois des processus d'accumulation relative et absolue. L'accumulation absolue concerne les oxy-hydroxydes de fer ; elle est accompagnée de l'accumulation relative du fer (fig. 9C, sous-domaine 1), ou du fer et de la kaolinite (fig. 9C, sous-domaine 2).

Rappelons, comme précédemment, que l'épigénie du quartz par le fer constitue un cas particulier de cette modalité ; cas particulier dans lequel le volume créé par la soustraction de quartz est remplacé par un même volume de fer.

2.2.7. Soustraction de kaolinite, de quartz et addition de fer (- K, - Q, + Fe)

Cette modalité a été exposée antérieurement (cf. § 1.2.2.5.). Quel que soit le cas, en fonction des quantités de kaolinite et de quartz soustraites, et indépendamment des quantités de fer additionnées, le point représentatif de l'état 2 est situé dans un domaine constitué par le même quadrilatère que celui qui correspond à la soustraction de kaolinite et de quartz (fig. 9C).

La limite supérieure de l'augmentation des proportions relatives de fer dépend uniquement de la porosité totale disponible ; celle-ci comprend la porosité initiale du matériau, ainsi que celle créée par la soustraction de kaolinite et de quartz (premier cas) ; cette porosité totale peut être modifiée par les additions (et/ou les soustractions) des autres éléments (troisième et quatrième cas), ainsi que par les variations de volume (deuxième et quatrième cas).

Dans le premier cas, par exemple, la soustraction de la totalité de la kaolinite et du quartz créerait une porosité de 40,5 % ; si la porosité totale disponible (50 % + 40,5 %) était entièrement comblée par des oxy-hydroxydes de fer, l'addition de fer atteindrait 352,95 g.100 cm^{-3} ; dans ces conditions, les proportions relatives de fer s'élèveraient à 100 % (teneur volumique : 364,65 g.100 cm^{-3} ; pondérale : 96,6 g.100 g^{-1} ; densité apparente : 3,77).

Un cas particulier doit être examiné. Lorsque le rapport des quantités de kaolinite et de quartz soustraites est égal au rapport des teneurs initiales de ces minéraux, et quelle que soit la quantité de fer additionnée, le point représentatif de l'état 2 est situé sur le segment qui joint le point représentatif de l'état 1 au pôle « *fe* » (fig. 9C) ; or, cette disposition (k/q = C^{te}), qui peut être également réalisée lors de la modalité « soustraction de kaolinite et de quartz » (fig. 9B), correspond au cas général de la modalité « addition de fer » (fig. 9A).

Un exemple numérique d'un tel cas, où une soustraction de kaolinite et de quartz peut être « masquée » par une addition de fer, est présentée dans le tableau VII. On y vérifie que :

– état 1 : K/Q = $k1/q1$ = 2

– état 2 : K/Q = 30,2/15,1 (vol., cas 1 et 3) = 45,3/22,65 (vol., cas 2 et 4) = 2

= 33,56/16,78 (pond., cas 1 et 2) = 35,53/17,76 (pond., cas 3 et 4) = 2

$k2/q2$ = 2,

et que, dans les quatre cas : soustraction de kaolinite/soustraction de quartz = 2.

Cette modalité (soustraction de kaolinite, de quartz et addition de fer) relève à la fois des processus d'accumulation relative et absolue. L'accumulation absolue concerne le fer ; elle est accompagnée de

TABLEAU VII

Soustraction de kaolinite, de quartz, et addition de fer ; cas particulier où K/Q soustraits = K/Q initiaux

– Premier cas : soustraction de 40 g.100 cm^{-3} de kaolinite, de 20 g.100 cm^{-3} de quartz, et addition de 20 g.100 cm^{-3} de fer ;

– Deuxième cas : soustraction de 40 g.100 cm^{-3} de kaolinite, de 20 g.100 cm^{-3} de quartz, et addition de 20 g.100 cm^{-3} de quartz (id. premier cas) et diminution de volume de 50 % ;

– Troisième cas : id. premier cas et addition de 2 g.100 cm^{-3} de de gibbsite, et soustraction de 6 g.100 cm^{-3} de muscovite et de 1 g.100 cm^{-3} de rutile ;

– Quatrième cas : combinaison du deuxième et du troisième cas (soustraction de 40 g.100 cm^{-3} de kaolinite, de 20 g.100 cm^{-3} de quartz, de 6 g.100 cm^{-3} de muscovite et de 1 g.100 cm^{-3} de rutile, addition de 20 g.100 cm^{-3} de fer et de 2 g.100 cm^{-3} de gibbsite, et diminution de volume de 50 %)

Subtraction of kaolinite, quartz and addition of iron ; particular case when subtracted K/Q = initial K/Q

– First case : subtraction of 40 g.100 cm^{-3} of kaolinite, 20 g.100 cm^{-3} of quartz, and addition of 20 g.100 cm^{-3} de of iron ;

– Second case : subtraction of 40 g.100 cm^{-3} of kaolinite, 20 g.100 cm^{-3} of quartz (idem first case) and volume diminution of 50 %) ;

– Third case : idem first case and addition of 2 g.100 cm^{-3} of gibbsite, and subtraction of 6 g.100 cm^{-3} of muscovite and 1 g.100 cm^{-3} of rutile ;

– Fourth case : combination of the second and third cases (subtraction of 40 g.100 cm^{-3} of kaolinite, 20 g.100 cm^{-3} of quartz, 6 g.100 cm^{-3} of muscovite and 1 g.100 cm^{-3} of rutile, addition of 20 g.100 cm^{-3} of iron, and of 2 g.100 cm^{-3} of gibbsite, and volume reduction of 50 %)

	Teneurs volumiques g/100 cm³						Densité apparente	Teneurs pondérales g/100 g						Proportions relatives
	K	Fe	Q	M	Gi	R		K	Fe	Q	M	Gi	R	K / Fe / Q
État 1	70,2	11,7	35,1	7,5	3,5	2	1,3	54	9	27	5,77	2,69	1,54	k_1 = 60 % fe_1 = 10 % q_1 = 30 %
État 2 1er cas	30,2	31,7	15,1	7,5	3,5	2	0,9	33,56	35,22	16,78	8,33	3,89	2,22	k_2 = 39,22 % fe_2 = 41,17 % q_2 = 19,61 %
État 2 2ème cas	45,3	47,55	22,65	11,25	5,25	3	1,35	33,56	35,22	16,78	8,33	3,89	2,22	k_2 = 39,22 % fe_2 = 41,17 % q_2 = 19,61 %
État 2 3ème cas	30,2	31,7	15,1	1,5	5,5	1	0,85	35,53	37,29	17,76	1,76	6,47	1,18	k_2 = 39,22 % fe_2 = 41,17 % q_2 = 19,61 %
État 2 4ème cas	45,3	47,55	22,65	2,25	8,25	1,5	1,275	35,53	37,29	17,76	1,76	6,47	1,18	k_2 = 39,22 % fe_2 = 41,17 % q_2 = 19,61 %

K: kaolinite; Fe: oxy-hydroxydes de fer; Q: quartz; M: muscovite; Gi: gibbsite; R: rutile l'accumulation relative du fer (fig. 9C, sous-domaine 1), ou du fer et de la kaolinite (fig. 9C, sous-domaine 2), ou du fer et du quartz (fig. 9C, sous-domaine 3), suivant l'importance relative des différentes quantités additionnées ou soustraites.

L'épigénie de la kaolinite et du quartz par le fer constituerait un cas particulier de cette modalité : le volume créé par la soustraction de kaolinite et de quartz serait remplacé par un même volume de fer.

2.2.8. Autres modalités

Il existe douze autres modalités qui, sous certaines conditions, conduisent aussi à une augmentation des proportions relatives de fer. On peut les regrouper en cinq ensembles :

1. Addition de fer et addition de kaolinite et/ou de quartz (+ Fe et + K ; + Fe et + Q ; + Fe, + K et + Q) ;
2. Soustraction de fer et soustraction de kaolinite et/ou de quartz (- Fe et - K ; - Fe et - Q ; - Fe, - K et - Q) ;
3. Addition de kaolinite et soustraction de quartz, ou l'inverse (+ K et - Q ; - K et + Q) ;
4. *id.* 3 et soustraction de fer (+ K, - Q et - Fe ; - K, + Q et - Fe) ;
5. *id.* 3 et addition de fer (+ K, - Q et + Fe ; - K, + Q et + Fe).

Si K, Fe et Q sont les teneurs (volumiques ou pondérales) initiales du matériau en kaolinite, en fer et en quartz, et si ΔK, ΔFe, ΔQ représentent les variations des teneurs de ces minéraux ($\Delta > 0$ = addition ; $\Delta < 0$ = soustraction), dans le triangle *k fe q*, la droite *fe* = C[te] sera telle que : $\Delta Fe\ (K + Q) = Fe\ (\Delta K + \Delta Q)$.

Il est alors possible de déterminer, pour chacun des cinq ensembles de modalités précédemment définis, les conditions qui autorisent une augmentation des proportions relatives de fer. En posant $(K + Q)/Fe = Z$, ces conditions s'expriment ainsi :

- 1er ensemple : $\Delta Fe > (\Delta K + \Delta Q)/Z$
- 2e ensemble : $\Delta Fe < (\Delta K + \Delta Q)/Z$
- 3e ensemble : $\Delta K + \Delta Q < 0$
- 4e ensemble : $\Delta Fe < (\Delta K + \Delta Q)/Z$, et $\Delta K + \Delta Q < 0$
- 5e ensemble : $\Delta Fe > (\Delta K + \Delta Q)/Z$

2.2.9. Conclusions

Les modalités conduisant à une augmentation des proportions relatives d'oxy-hydroxydes de fer (3) (dans le système kaolinite, fer et quartz normatifs) sont multiples (19). Il en serait d'ailleurs de même, quel que soit le type d'élément constitutif pris en compte (fraction granulométrique, minéral, élément chimique...).

Il faut souligner que cette augmentation des proportions relatives de fer ne correspond pas nécessairement à une augmentation des teneurs (volumiques ou pondérales) en fer.

Ces dix-neuf modalités, qui conduisent à une augmentation des proportions relatives d'oxy-hydroxydes de fer se subdivisent en deux groupes.

– Le premier comprend sept modalités (cf. § 2.2.1. à 2.2.7. ; fig. 9), qui entraînent toujours, quelles que soient les quantités mises en jeu, et quels que soient les processus annexes (modification de volume, addition ou soustraction d'autres minéraux), une augmentation des proportions relatives de fer. Cette augmentation résulte alors de deux processus distincts, agissant seuls ou conjointement :

– addition de fer (accumulation absolue de fer), et/ou

– soustraction de kaolinite et/ou de quartz (accumulation relative de fer, ou de fer et de quartz, ou de fer et de kaolinite ; cf. fig. 9).

– Le second comprend douze modalités (cf. § 2.2.8.), qui n'entraînent une augmentation des proportions relatives de fer que dans certains cas particuliers. Cinq de ces modalités impliquent une soustraction de fer. Ce paradoxe (4) n'est qu'apparent, car ces modalités correspondent à des cas où la soustraction de fer est inférieure à la soustraction de kaolinite et/ou de quartz.

En définitive, la signification de la position relative des points représentatifs, dans un diagramme triangulaire, de deux états d'un matériau homogène, n'est jamais univoque. Il en est de même en ce qui concerne les matériaux pédologiques (fig. 9).

Dans ce cas cependant, il est souvent possible de faire un choix raisonné entre les différentes interprétations, en utilisant conjointement d'autres données ; celles qui proviennent de l'analyse micromorphologique sont généralement les plus discriminantes (ESCHENBRENNER, 1988).

2.3. Rôle de la micromorphologie dans l'interprétation des positions relatives dans un diagramme triangulaire

Les nombreuses modalités (19), qui conduisent à l'augmentation des proportions relatives de fer résultent de combinaisons de six modalités simples : addition ou soustraction de fer, de kaolinite et de quartz.

(3) Par rapport au matériau initial, toute soustraction (ou addition) de muscovite, et/ou de gibbsite, et/ou de rutile, et/ou d'autres matières minérales ou organiques, entraînerait une accumulation relative (ou une « dilution ») de la kaolinite, des oxy-hydroxydes de fer et du quartz, mais ne modifierait pas les proportions relatives de ces minéraux.

(4) De la même manière, dans le système argile, limon et sable, une augmentation des proportions relatives d'argile peut correspondre à une soustraction d'argile, lorsque cette soustraction s'accompagne d'une soustraction plus importante de limon et de sable.

Chacune de ces modalités simples a des incidences micromorphologiques, qui se manifestent au niveau du squelette, du plasma, des pores et des traits pédologiques (BREWER, 1964).

Ainsi, une soustraction de quartz se manifestera, lorsqu'elle résulte d'un phénomène de dissolution, par la présence de figures de décroissance cristalline sur les grains de squelette (ESCHENBRENNER, 1988). Inversement, une addition de quartz se traduirait par l'existence de cutanes de quartz (addition sous forme figurée), ou de cristallarias de quartz (auréoles de nourrissage autour des grains de squelette, dans le cas de l'addition sous forme soluble).

Une addition d'oxy-hydroxydes de fer, sous forme soluble, entraînera une modification des assemblages plasmiques (évolution du pôle insépique ou sépique vers le pôle isotique) et/ou l'apparition de cutanes ou néo-cutanes (ferranes, néoferranes), de cristallarias (goetharias, hématarias), ou de glébules ferrugineux orthiques. Sous forme figurée, cette addition de fer se manifesterait par la présence de glébules ferrugineux en relation avec des chenaux.

Une addition de kaolinite, sous forme figurée, se traduira par des argilanes illuviaux ; sous forme soluble (addition de silice et d'alumine), on pourrait observer (MEB) la présence de cristaux néoformés.

Pour le cas présenté dans la figure 9, lorsque les points représentatifs sont situés sur le segment qui joint le point représentatif de l'état 1 au pôle « *fe* », trois hypothèses principales sont en présence :

1. addition de fer,
2. cas particulier de la soustraction de kaolinite et de quartz,
3. combinaison de 1 et de 2.

L'analyse micromorphologique permet alors de trancher (ESCHENBRENNER, 1988).

L'analyse micromorphologique constitue donc un outil privilégié qui autorise, dans la majorité des cas, le choix de l'hypothèse la plus probable.

CONCLUSION

Les diagrammes triangulaires permettent, dans certaines conditions, de comparer deux états d'un matériau pédologique. L'analyse de la position relative des points représentatifs de ces deux états (fig. 5, 6, 7 et 9) aboutit à la formulation de plusieurs hypothèses concernant l'évolution de ce matériau ; ces hypothèses sont exprimées en termes d'addition (ou de soustraction) d'éléments constitutifs.

Dans la mesure où ces éléments sont très divers (éléments chimiques, minéraux, fractions granulométriques...), le champ d'application de ce type de représentation est vaste. Néanmoins, compte tenu de l'existence de plusieurs hypothèses, il est nécessaire de faire appel à d'autres méthodes ; c'est l'analyse micromorphologique qui se révèle la plus adaptée, car elle fournit, dans la majorité des cas, les éléments permettant le « bon choix ».

En définitive, la confrontation des hypothèses issues de l'interprétation des diagrammes triangulaires aux données résultant de l'analyse micromorphologique s'avère un outil bien adapté à la solution de problèmes d'ordre pédogénétique. Cette confrontation contribue à mettre en évidence la nature et l'importance des transferts de matière, à différentes échelles, dans les cas – fréquents en ce qui concerne les sols – où le raisonnement isovolumétrique (MILLOT et BONIFAS, 1955) ne peut s'appliquer.

BIBLIOGRAPHIE

BONIFAS (M.), 1959. – Contribution à l'étude géochimique de l'altération latéritique. *Mém. Serv. Carte Géol. Alsace-Lorraine*, n° 17.

BREWER (R.), 1964. – Fabric and mineral analysis of soils. J. Wyley and sons ed., New York, 470 p.

D'HOORE (J.), 1954. – L'accumulation des sesquioxydes libres dans les sols tropicaux. *Publ. Ineac*, sér. sci. n° 62.

D'HOORE (J.), 1955. – Essai de classification des zones d'accumulation de sesquioxydes libres sur des bases génétiques. *Sols Africains*, Vol. 3 : 66-81.

ESCHENBRENNER (V.), 1988. – Les glébules des sols de Côte-d'Ivoire. Nature et origine en milieu ferrallitique. Modalités de leur concentration. Rôle des termites. *TDM Orstom*, n° 39.

LEGROS (J.P.), 1982. – L'évolution granulométrique au cours de la pédogenèse. Approche par simulation sur ordinateur. Application aux sols acides sur matériaux cristallins en zone tempérée. Thèse Sciences, Université Montpellier II.

MILLOT (G.), BONIFAS (M.), 1955. – Transformations isovolumétriques dans les phénomènes de latéritisation et bauxitisation. *Bull. Serv. Carte Géol. Alsace-Lorraine*, Vol. 8 : 3-10.

VERHEYE (W.), AMERYCKX (J.), 1984. – Mineral fractions and classification of soil texture. *Pédologie*, Vol. 34 : 215-235.