
Perdus dans le triangle des textures

A. Richer de Forges₍₁₎, C. Feller₍₂₎, M. Jamagne₍₁₎ et D. Arrouays₍₁₎

1) INRA US 1106 Unité InfoSol, 2163, avenue de la Pomme de Pin, CS4001, Ardon, 45075 Orléans Cedex 02

2) IRD, UR Seqbio, ENSAM, Bâtiment 12, 2, place Viala, 34060 Montpellier Cedex 01

RÉSUMÉ

Il existe de par le monde de nombreux diagrammes triangulaires de texture différents. Beaucoup de triangles de texture sont adaptés au contexte pédologique de leur région d'origine. De plus, les fractions granulométriques utilisées peuvent aussi varier d'un pays ou d'un organisme à l'autre. Nous avons tenté de faire un inventaire des diagrammes de texture existant afin de les comparer. Il ressort que l'ensemble des triangles est approximativement en accord sur les extrêmes (argile, limon, sable) contrairement aux classes de leur centre. Quelques limites granulométriques semblent toutefois faire l'objet d'un consensus. L'harmonisation au niveau mondial apparaît cependant très délicate devant la difficulté d'imposer une norme. Bien que certains auteurs aient calculé des algorithmes de passage d'un triangle à un autre, aucune comparaison systématique de tous les triangles existants n'a été réalisée. Une autre méthode consisterait en l'établissement de formules de transfert par grands types de matériaux en utilisant des granulométries laser continues, mais cela nécessiterait un travail considérable. Par conséquent, en attendant de trouver une solution d'harmonisation de tous ces diagrammes de textures, il est important que la texture soit renseignée avec toutes les précisions possibles concernant son diagramme de référence dans les bases de données.

Mots clés

Sol, granulométrie, triangle de textures, textures.

SUMMARY**LOST IN TEXTURAL TRIANGLES**

There are numerous different triangular diagrams of soil texture in the world. Most of the texture triangles are adapted to the pedological context of their region of origin. Besides, particle-size fractions used also vary amongst countries and even among organisms within a country. We tried to do a stocktaking of the texture diagrams in order to compare them. Almost all the triangles are in agreement on extremes classes (classes where the dominant particle-size fraction is either clay, loam or sand). On the contrary, discrepancies are numerous in the classes of their centre, composed of ternary mixtures. Nevertheless, some particle-size distribution borders seem to reach a general agreement. The harmonization at worldwide level appears, however, very difficult faced to the difficulty to agree on a norm. Some authors succeeded in calculating algorithms of transfer from a triangle to another one, but these functions are far from general among all the triangles. Another method would consist in building transfer functions by parent material and pedogenesis classes using continuous laser particle-size distribution, but it would require a considerable work. As a result, and waiting to find a solution for harmonization, it is important that one gives full information on the texture triangle reference used in soil databases.

Key-words

Soil, particle-size distribution, texture triangle, soil texture classes.

RESUMEN**PERDIDOS EN EL TRIÁNGULO DE TEXTURAS**

Existe por el mundo numerosos diagramas triangulares de textura diferentes. Muchos triángulos de textura están adaptados al contexto pedológico de su región de origen. Además, las fracciones granulométricas usadas pueden cambiar de un país o un organismo al otro. Intentamos hacer un inventario de los diagramas de textura que existen afín de compararlos. Se muestra que el conjunto de los triángulos es, aproximadamente, en acuerdo en los límites (arcilla, limo, arena) contrariamente a los centros. Algunos límites granulométricos parecen no obstante hacer el objeto de un consenso. La armonización al nivel mundial se muestra sin embargo muy delicada frente a la dificultad de imponer normas. Aunque ciertos autores calcularon algoritmos de pasaje de un triángulo al otro, no se realizó ninguna comparación sistemática de todos los triángulos. Otro método consistiría en establecer formulas de transferencias por grandes tipos de materiales, usando granulometrías láser continuas, pero esto requeriría un trabajo enorme. Por lo tanto, en espera encontrar una solución de armonización de todos los diagramas de texturas, es importante que la textura sea indicada con todas precisiones posibles sobre el diagrama de referencia en las bases de datos.

Palabras clave

Suelo, granulometría, triángulo de textura, texturas.

La partie minérale du sol est un mélange hétérogène de particules de dimensions très variables. Une distinction est classiquement faite entre la terre fine (< 2 mm) et les éléments grossiers (> 2 mm). Sur le terrain, on estime la composition granulométrique de la terre fine par des tests tactiles. Cette composition granulométrique est généralement représentée par l'appartenance à une classe texturale située dans un diagramme triangulaire rectangle ou équilatéral. Pour ce faire, il convient au préalable de s'accorder sur le fait de considérer seulement 3 classes de particules (argile, limon, sable) et sur les limites à l'intérieur de ces classes.

À partir de données analytiques de laboratoire, on utilise aussi couramment les triangles de texture pour avoir une vision immédiate, à l'aide de la projection d'un seul point, de la granulométrie et la texture du sol représentent la même variable à un niveau de précision différent. En réalité, la texture déterminée tactilement est un test manuel de comportement mécanique du sol qui repose principalement sur l'adhésivité, l'abrasivité et la plasticité.

Corrélativement, la connaissance de la texture du sol est très importante car cette dernière conditionne le comportement du sol. Ainsi certaines propriétés chimiques et physiques du sol peuvent être déduites de la texture. La connaissance de la texture du sol permet de dériver d'autres propriétés du sol comme par exemple les propriétés de rétention en eau (Hall et Djerbib, 2006; Henderson *et al.*, 2005; Jensen *et al.*, 2005; Nemes et Rawls, 2006; Saxton et Rawls, 2006; Bruand *et al.*, 2002; Al Majou *et al.*, 2007), la conductivité hydraulique (Hwang et Hong, 2006) ou le potentiel de stockage de carbone dans les sols (Arrouays *et al.*, 2006). Des relations entre la texture et les comportements agronomiques ont été proposées dès 1976 : stabilité structurale, aptitude à la fissuration, risque d'asphyxie (Monnier et Stengel, 1982).

En terme d'étude de la pédogenèse, la granulométrie des horizons d'un profil, projetée dans un triangle textural, a été utilisée pour quantifier des évolutions ou pour juger de l'homogénéité des matériaux parentaux (Legros, 1982; Baize 1983; Eschenbrenner, 1991). Legros (1982), par exemple, suggère que pour déceler un lessivage pur au sein d'un matériau homogène à l'origine, il faut que les points représentatifs des horizons A et des horizons BT soient alignés sur une demi-droite passant par le pôle argile dans un triangle de texture rectangle de type GEPPA (rapport sable/limon inchangé). Certains auteurs utilisent une granulométrie indépendante de la fraction argileuse susceptible de migrer afin de tester l'homogénéité des matériaux. Baize, (1980) a proposé ainsi la notion de « squelette granulométrique ».

Enfin, la texture (tactile) est un des critères les plus fréquemment utilisés en cartographie (Legros, 2006) et en description des sols (Jamagne, 1968; Millar et Turk, 1951). Ce test, réalisé en grand nombre lors des prospections de terrain, peut également alimenter en données peu coûteuses les bases de données géographiques. Toutefois, dès lors que l'utilisation de ces bases est envisagée, se pose obligatoirement la question du triangle textural de référence.

L'objectif principal de cette note est de recenser dans un premier temps les modes de représentation des classes texturales. Dans un second temps, nous en réalisons une comparaison afin de mettre en évidence les divergences et/ou les convergences entre ces différentes représentations.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

À partir de recherches bibliographiques et de demandes adressées directement à des spécialistes de science du sol de divers pays et divers organismes, nous avons entrepris la réalisation d'une collection importante de triangles de texture (tableau 1).

Les recherches bibliographiques nous ont également permis de réaliser une analyse historique des notions de granulométrie et de texture des sols.

À partir des données recueillies, nous avons pu recenser et comparer tout d'abord les fractions granulométriques utilisées. Dans un second temps, et pour les triangles dont les fractions étaient sensiblement compatibles, nous avons numérisé ces triangles que nous avons ensuite traités au sein d'un système d'information géographique. Les triangles ont été transformés pour être projetés selon un référentiel identique (triangle équilatéral), puis superposés afin de permettre leur comparaison. L'ensemble résultant de cette superposition a également été converti en polygones que nous avons fusionnées et converties en polygones. Sur cet ensemble de polygones, nous avons appliqué une grille de maille fine, et calculé la densité de lignes au sein de chaque maille avec l'outil « spatial analyst » d'ArcGIS. L'objectif est d'obtenir une représentation des zones de convergence ou de divergence entre les triangles en ce qui concerne les limites de classes texturales. Les mailles de très forte densité représentent les lignes ou les nœuds pour lesquels les triangles présentent des fortes convergences, les zones à très faible densité représentent des « noyaux » ou des « pôles extrêmes » de classes texturales (les zones éloignées de toute limite), les zones caractérisées par des densités moyennes et hétérogènes représentent les zones du triangle ou les désaccords entre limites sont les plus nombreux.

RÉSULTATS

Définitions des différentes fractions

En fonction des auteurs, les dénominations « argile », « limon » et « sable » ne correspondent pas toujours à la même définition, ce qui pose des problèmes de vocabulaire.

La fraction « Argile »

Il s'agit ici de l'argile granulométrique et non de l'argile minéralogique. Selon les triangles, l'argile granulométrique correspond à

Tableau 1 - Ouvrages (depuis 1840 jusqu'aux années 50) consultés : avec présence (+, rectangle R ou équilatéral E) ou absence (-) d'un triangle de texture.

Table 1 - References (from 1840 to 1950's): including (+, rectangle R, equilateral E) a textural triangle or not (-)

Ouvrages français		Ouvrages étrangers	
Auteur(s), année	(+) ou (-)	Auteur(s), année	(+) ou (-)
Lagatu et Sicard, 1901	-		
Deherain, 1902	-	Hall, 1903	-
		King, 1904	-
Hall et Demolon, 1906	-	Hilgard, 1906	-
Dumont, 1907*	+		
André, 1913	-		
Diffloth, 1917	+R		
Gain, 1918	-	Lyon, 1918	+R
		Murray, 1919	-
Diffloth, 1927	+R	Glinka, 1926	-
André, 1930		Stebutt, 1930	
		Emerson, 1930	+E
		Lyon <i>et al.</i> , 1931	+R
Demolon, 1932	+R		
Demolon et Leroux, 1933	-	Wright, 1934	-
		Prescott <i>et al.</i> , 1934	+E
Agafonoff, 1936	-	Joffe, 1936	-
Erhart, 1935; Erhart, 1937	-	Ayres, 1936	-
		Bennett, 1939	-
		Taylor, 1948	+E
		Robinson, 1949	+E
Demolon, 1952	+E	Millar et Turk, 1951	+E
Bryssine, 1954	+E		

* Il s'agit ici d'un cercle de texture et non pas d'un triangle.

l'ensemble des particules dont le diamètre est inférieur à des valeurs pouvant aller de 1 à 5 μm .

La fraction « limon »

Le terme de limon a été employé avec des acceptions très diverses. Etymologiquement il s'agit de boues transportées et déposées par les rivières. Les limites de cette fraction granulométrique sont très variables selon les auteurs et sont comprises entre 1-5 μm (limite inférieure) et 20-63 μm (limite supérieure).

La fraction « sable »

Le terme de sable désigne les particules dont la taille est généralement comprise entre 20-63 μm (limite inférieure) et 1000-3000 μm (limite supérieure).

Dans le langage courant, on désigne à tort par sable les graviers extraits dans les vallées (Baize, 2000).

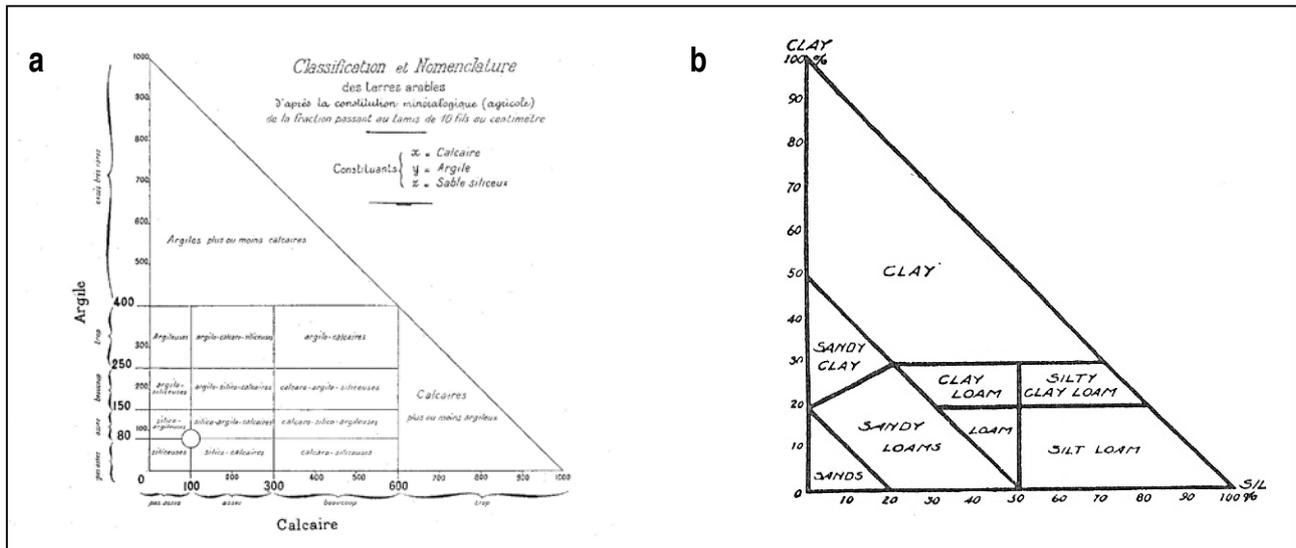
Histoire des analyses granulométriques et des triangles de texture

Il semble que la première « analyse mécanique » (séparation des particules de terre selon leur taille) qui soit quantitative ou semi-quantitative ait été faite par M. Houghton en Angleterre en 1681 (Houghton, 1681). L'information est rapportée par Mortimer (Mortimer, 1765) mais aussi par Keen (Keen, 1931). Il s'agissait d'une simple séparation des « sables » par tamisage. En 1772, Johannes Baptiste de Beunie pratiquait le lavage des terres en faisant une mise en suspension des « fines ». Ce lavage lui permettait de séparer « le sable de l'argile ». Il rapportait la fertilité des terres à la fraction argile. Dans l'article « Sable » du Cours Complet d'Agriculture (Rozière (l'abbé), 1796), une méthode quantitative de séparation des « sables » est décrite et permettant de distinguer, à l'aide d'une attaque acide, les sables siliceux des sables calcaires. Martin (Martin, 1829) utilise une méthode granulométrique plus élaborée pour le fractionnement de la matière organique du sol.

Diverses méthodes sont ensuite proposées dans la deuxième moitié du XIX^e siècle dont celle de Masure (Masure, 1860) par sédimentation, mais aussi des méthodes basées sur la lévigation (séparation par élutriation)¹ comme celles de Schöne, Hilgard, Yoder, Nöbel, Kopecky et Gollan (citées par Lyon *et al.*, 1931, Robinson, 1949 et/ou Demolon, 1952). Mais la méthode qui sera la plus couramment utilisée, et même recommandée en France par le « Comité Consultatif des Stations Agronomiques et des Laboratoires Agricoles » (1891, 1898), sera celle de Schloesing (aux environs de 1875) basée sur des séparations par tamisages, attaque nitrique pour dissoudre les carbonates, dispersion par l'ammoniaque et sédimentation. C'est d'ailleurs le même Schloesing qui publia, en 1874 (Schloesing, 1874), le premier fractionnement granulométrique de la matière organique

¹ L'élutriation est un procédé de séparation des particules légères des lourdes à l'aide d'un flux ascendant de gaz ou de liquide traversant la suspension eau-particules. Les particules les plus petites et/ou les plus légères se concentrent en haut de la colonne d'eau. Cette technique est utilisée pour la séparation des minéraux de poids spécifiques différents, mais aussi les méso-organismes du sol ou des eaux.

Figure 1 - Les deux premiers triangles : celui de Lagatu (a) et celui des USA (b).
Figure 1 - The two first triangles: from Lagatu (a) and from USA (b).



des sols (Feller, 1998). Nous ne détaillerons pas ici ces méthodes d'analyses mécaniques car elles sont décrites en détail dans de nombreux ouvrages comme Demolon (1932); Demolon (1952); Wright (1934) ou Robinson (1949).

Il faudra attendre les années 1920 (AISS/ISSS, 1926, 1934) pour qu'un accord international ait lieu sur la méthodologie de l'analyse mécanique avec proposition d'une Méthode internationale dite A. Cet accord précisera que : (i) seule la terre fine (sol 0-2000 µm) est concernée, (ii) les classes de particules séparées et leur granulométrie sont les suivantes : sable (2000-20 µm), limon (20-2 µm), argile (inférieur à 2 µm). La méthode internationale est basée sur une séparation quantitative et complète des différentes classes granulométriques, tandis que la méthode dite « Pipette » proposée par Robinson en 1922 ne met en œuvre, pour une estimation pondérale des classes argile et limon, que de simples prélèvements de parties aliquotes de la suspension sol-eau.

Cette normalisation permettait aussi de normaliser la classification des terres selon leur texture, et chaque ouvrage sur les sols à partir de cette période présente souvent de grands tableaux avec les proportions de chacune des classes de particule pour distinguer les terres sablo-argileuses, argilo-limono-sableuses, etc.

En 1903, la notion de limon est proposée et celle de texture apparaît un peu plus tard (Boulaïne, 1989). Nous avons récapitulé au *tableau 1*, les ouvrages, publiés entre 1900 et 1950, consultés pour ce sondage.

Un rapide survol des traités français et étrangers sur les sols (Gasparin, Boussingault, Gueranger, Malaguti, Pierre, Bobierre, Schloesing, Grandeau, parmi d'autres) montre que, avant 1900, il n'y a aucun ouvrage mentionnant un triangle de texture. Il en est pratiquement de même jusqu'en 1930, à quelques exceptions

remarquables que nous commenterons ci-dessous, alors qu'à partir de 1950 de nombreux ouvrages présentent des triangles de texture. On peut conclure que, de manière probablement indépendante, la notion de triangle de texture est apparue en France et aux USA entre 1906 et 1911, et sous la forme de triangle rectangle (*figure 1*), la paternité de la découverte revenant à Lagatu (1905). Mais cette notion ne se développera réellement qu'au mieux à partir de 1930, et sera classique à partir de 1950 sous forme de triangles équilatéraux.

Les classes granulométriques utilisées

Les méthodes d'analyses ne se différencient pas uniquement par les protocoles opératoires, mais aussi par la définition des particules séparées elles-mêmes. Il est important de connaître les tailles des particules retenues lors de la réalisation de la granulométrie en laboratoire. En effet, selon les auteurs, les limites entre les différentes classes varient (*tableau 2*). Parfois, des auteurs différents utilisent la même représentation triangulaire, rectangle ou équilatérale, mais avec des tailles de particules différentes.

La plupart des auteurs utilisent la norme internationale pour la limite supérieure de la fraction argile à 2 µm car elle correspond à l'apparition des propriétés colloïdales. Certains cependant la fixent à 5 µm (Rinne, Wollny 1902) et d'autres à 1 µm (Dupuis, 1963).

La limite entre limon et sable est bien plus variable. La classification internationale (International Soil Science Society (ISSS)) utilise une séparation à 20 µm entre les sables et les limons. Cette limite est mathématiquement logique puisqu'elle correspond à des intervalles égaux entre les logarithmes des vitesses de chute des particules. La majorité des triangles utilisent une séparation à 50 µm entre les sables et les limons mais d'autres mettent cette limite à

Tableau 2 - Limites supérieures de la taille des particules de chaque fraction (en μm)**Table 2** - Upper limits of particle size fractions (μm)

	Argile	Limon	Sable
Allemagne	2	63	2000
America Association of State Highway and transportation Officials (AASHTO)	5	80	2000
Atterberg 1905	2	20	2000
Australie	2	20	2000
Autriche	2	63	2000
Belgique	2	50	2000
Bulgarie	1	50	1000
Bureau des sols (1890-1895)	5	50	1000
Canada	2	50	2000
Danemark	2	63	2000
Ecosse	2	50	2000
Espagne	2	20	2000
Estonie	2	50	2000
Finlande	2	50	
France (Aisne)	2	50	2000
France (Demolon)	2	20	2000
France (GEPPA)	2	50	2000
France (Hénin)	2	50	2000
France (laboratoire de Versailles)	2	50	2000
France (Malterre)	2	50	2000
Grèce	2	50	2000
International Soil Science Society (ISSS)	2	20	2000
Irlande du Nord	2	60	2000
Italie	2	50	2000
Japon	2	20	2000
Lettonie		63	
Lituanie	1	50	1000
Malte		53	
MIT 1931	2	60	2000
Norvège	2	60	2000
ORSTOM / IRD	2	50	2000
Pays Bas	2	63	2000
Portugal	2	20	2000
Roumanie	2	50	2000
Royaume Uni	2	60	2000
SCET (Société Centrale pour l'Equipement du Territoire)	2	20	2000
Slovaquie	1	50	2000
Suède	2	60	2000
USDA	2	50	2000

60 µm voire 63 µm. Il a toutefois été démontré que la limite à 50 µm était la plus satisfaisante pour obtenir un classement rationnel des textures (Malterre et Alabert, 1963). C'est d'ailleurs la plus couramment employée dans le monde.

Récemment, le granulomètre laser nous permet d'obtenir une granulométrie continue. Cette méthode d'analyse présente l'avantage de pouvoir être utilisée dans n'importe quel référentiel et de pouvoir passer d'un triangle à l'autre (Shirazi *et al.*, 2001).

Les triangles texturaux, historique, modifications, diversité

Les compositions granulométriques sont pratiquement toujours réduites à trois fractions : argile, limon et sable. La somme de ces trois fractions est égale à 100 %. Il existe de nombreux modèles de représentation triangulaire mais le principe est toujours le même, que le triangle soit équilatéral ou rectangle (Baize, 2000). On positionne la composition granulométrique selon deux des trois fractions. La troisième fraction est égale au complément à 100 % et se trouve ainsi fixée. Chaque point du triangle correspond donc à une répartition granulométrique bien définie des constituants du sol.

Les triangles utilisés en France (planche I)

Les triangles anciens ou peu utilisés

Un triangle de texture a été défini par Malterre en 1961 (Malterre, 1961). Ce triangle repose sur 1035 analyses dont 99 correspondent à des sables fins, 68 à des limons, 55 à des argiles et 813 à des compositions intermédiaires diverses. Les échantillons analysés proviennent de la France entière. Ce triangle présente des zones en hachuré dans les argiles et les limons dont la légende est « textures non encore signalées en France ». De nombreux autres triangles ont été définis, mais sont actuellement peu utilisés [triangle de Demolon et de Duchaufour (cités par Dupuis, 1963); diagramme de Hénin (1976); diagramme de Tavernier et Maréchal (1958); diagramme de Chamley (1987)].

Les triangles utilisés actuellement

Le diagramme du GEPPA (Groupe d'Etudes des Problèmes de Pédologie Appliquée)

Il a été publié en 1963 et comporte 17 classes (Mathieu *et al.*, 1998). Il a été élaboré par un groupe d'une vingtaine de pédologues avertis à partir de sensations tactiles ressenties sur 150 prélèvements en provenance de tout le territoire de la France métropolitaine. Sa représentation la plus courante en triangle rectangle (*figure 10*) est d'un usage extrêmement simple aussi bien pour situer une composition granulométrique que pour sa lecture ou sa fabrication rapide. Le taux de sable ne se lit pas directement, mais on le déduit facilement par différence (Baize, 2000).

Le diagramme de Jamagne ou de la carte de l'Aisne

Ce triangle a été mis sur pied afin de mieux répondre aux problèmes posés par la cartographie des sols dans l'Aisne. Il a été réalisé en utilisant 3000 échantillons du département de l'Aisne. D'après Delaunois et Maucorps (1980), la limitation des échantillons utilisés à cette région a eu pour conséquence que ce triangle ne correspondait plus tout à fait aux besoins lorsqu'il était appliqué sur de plus vastes surfaces comme l'ensemble du Nord de la France. Selon ces auteurs, le limon moyen (limon lessivé appauvri en argile) aurait dû être plus étendu passant ainsi de 17,5 % à 20 % d'argile maximum. Les limites supérieures du limon argileux et de l'argile limoneuse auraient également dû être relevées. Par contre pour le sable, la limite de 87,5 % aurait dû être descendue à 92 % (soit 8 % d'argile maximum).

À l'origine, ce triangle comportait 14 classes. Puis il est passé à 15 classes avec la séparation du limon sableux et du limon moyen sableux. Un troisième triangle a vu le jour avec 15 classes également mais avec une modification de limite entre les sables et les sables limoneux. Ces changements dans le triangle sans changement du nom du triangle ont eu pour conséquence une confusion lorsqu'on parle du triangle de la carte de l'Aisne. De plus, certains regroupements de classes ont dû être effectués dans le cadre de travaux de cartographie à moyenne ou petite échelle, au niveau de ce qui a été intitulé « série de sols » et « famille de sols ». Une première simplification a été apportée au diagramme initial au niveau des séries de sols, conduisant à un triangle de 9 classes. Pour une cartographie des familles de sols, 6 classes ont été retenues pour ce nouveau triangle.

Ce triangle semble avoir donné satisfaction à tous ceux qui s'en sont servis pour les sols des régions tempérées, spécialement en domaine loessiques et sableux (Mathieu *et al.*, 1998). Il est encore très utilisé en France aujourd'hui.

Les triangles utilisés en Europe (planche II)

Dans cette partie, nous ne décrivons que les principaux triangles utilisés en Europe, et dont la construction traduit une particularité nationale.

Le diagramme belge

Ce triangle (*figure 20*) a été élaboré dans le cadre du levé cartographique de l'ensemble du territoire, et sur une base initiale constituée par la cartographie d'un certain nombre de zones témoins dans les différentes régions naturelles de la Belgique. Il comporte 7 classes (Dupuis, 1963). Entrepris en 1947, le levé systématique de la carte a pris immédiatement en compte les impressions de texture « tactile » des cartographes, conduisant très rapidement à la définition de limites. Il semble évident que l'importance prise par les couvertures pléistocènes quaternaires limoneuses et limono-sableuses d'apport éolien est à l'origine des classes « ternaires » où les proportions relatives de sable et limon apparaissent significatives.

Le diagramme britannique (UK)

Le Royaume Uni (*figure 22*) utilise un diagramme triangulaire qui ressemble au triangle USDA. La limite de taille de fractions utilisée entre les limons et les sables est à 60 μm au lieu de 50 μm comme c'est le cas aux USA. Il comporte 11 classes.

Le diagramme suisse

Le triangle textural suisse (*figure 21*) a été réalisé en 1979. Il a été modifié en 1993 car à l'usage il présentait certaines faiblesses. Un groupe de travail avait été mis en place pour améliorer la relation entre le résultat du test tactile et l'attribution d'une classe dans le triangle, pour corriger la largeur excessive de certaines plages et pour revoir la limite de 10 % d'argile entre sables et limons. En 1979, le triangle a été conçu de façon à présenter des droites longues et parallèles à l'un des côtés du triangle afin de favoriser la relation avec le test tactile. Or, il est apparu depuis que la variation des limites ressenties sous les doigts correspondrait plutôt à des courbes et non à des droites (Collectif, 1993).

Le diagramme roumain

Le triangle roumain (*figure 24*) présente une forte différenciation en classes vers le pôle sableux. Cela découle du fait que les sols de texture sableuse sont très présents en Roumanie.

Les triangles utilisés dans le monde (planche III)

Dans cette partie, nous ne décrivons que les principaux triangles utilisés dans le monde, et dont la construction traduit une particularité nationale ou continentale.

Le triangle USDA (United States Department of Agriculture)

Le diagramme textural utilisé aux Etats-Unis présente 12 classes (*figure 30*). Celles-ci ont été fixées dès 1951 (Collectif, 1951). Ce diagramme triangulaire fait référence dans le monde entier. Les limites des tailles des fractions ont été données par Osborne (Osborne, 1887) mais elles ont changé au cours du temps. Ainsi la limite séparant les argiles des limons est passée de 5 μm à 2 μm en 1927 (Shaw et Alexander, 1936). Pour des raisons analogues à celles qui se sont posées pour le triangle de l'Aisne, l'USDA a proposé deux simplifications successives de son triangle initial. Celui-ci a été limité à 5 classes par regroupement des différentes classes ternaires et en « isolant » les matériaux argileux. La dernière simplification en 3 classes (*figure 31*) seulement concerne essentiellement les pôles extrêmes sableux et argileux. Il convient cependant de remarquer qu'il ne s'agit pas ici de regroupements proprement dits, mais d'introduction de nouvelles limites.

Le diagramme de la carte mondiale des sols FAO-UNESCO (Food and Agriculture Organization of the United Nations)

Ce diagramme triangulaire est le même que le diagramme triangulaire de l'USDA (*figure 30*). Il a également été utilisé au niveau européen. Il est utilisé par l'Irlande, l'Estonie, l'Espagne et l'Irlande du Nord. Malheureusement, la taille des fractions a changé au cours du temps pour ce diagramme. La directive pour la description des sols de 1968 indiquait une limite entre les limons et les sables à 50 μm (Collectif, 1968). Or, en 1990 cette limite est passée à 63 μm (Collectif, 1990) ce qui génère actuellement une confusion. En effet, en 1993, on retrouve cette limite à 50 μm (Collectif, 1993) pour le programme SOTER.

Diagramme de l'INEAC (Institut National pour l'Etude Agronomique du Congo (ex-Belge))

Ce diagramme (*figure 20*), assez différent des autres représentations, a été mis au point après de très nombreux travaux de cartographie pédologique réalisés sur les territoires des pays d'Afrique centrale : Congo ex-Belge (Sijs, 1961), Ruanda, Burundi... Une caractérisation essentielle est que son élaboration a été basée sur l'importance prise dans ces régions à dominance ferrallitique, d'une part, de la faible teneur en fractions limoneuses, et d'autre part, de la répartition des fractions sableuses et argileuses (Jamagne, 1963).

Triangle canadien (*figure 22*)

Suivant leur diamètre, les particules élémentaires du sol sont classées en plusieurs fractions granulométriques correspondant aux intervalles du *tableau 2*.

Compatibilité des triangles français

Pour comparer les deux triangles utilisés le plus couramment en France aujourd'hui (GEPPA et Aisne), nous les avons superposés (*figure 2*). Il apparaît un certain nombre d'accords et de désaccords. Une première différence majeure concerne la prise en compte de la teneur en argile. Celle-ci s'organise sous la forme de droites parallèles à la base du triangle en ce qui concerne le triangle de l'Aisne (autrement dit, les classes texturales sont toutes définies par deux bornes fixes de teneur en argile), alors que dans le triangle du GEPPA, la prise en compte de la teneur en argile suit dans tous les cas une pente du pôle sableux au pôle limoneux. Autrement dit, à l'exception de la classe SS de ce dernier triangle, il faut plus d'argile pour passer d'une classe à l'autre lorsque le complément est à dominante sableuse que lorsqu'il est à dominante limoneuse. Une autre différence concerne l'apparition de classes supplémentaires aux pôles extrêmes sableux et argileux. La coïncidence la plus remarquable concerne les limites de teneur en argile des mélanges allant des limons légers aux limons argileux le long de l'axe Limon-Argile. Les difficultés de passage d'un triangle à l'autre sont maximales pour les mélanges ternaires de texture relativement équilibrée (zone en milieu/bas

informatifs (deux versions du triangle USDA selon que la coupure sable-limon est à 50 ou 60 μm , et le triangle GEPPA à 17 classes) mais ne formulent aucune recommandation pour un triangle normalisé. Le triangle de texture de la FAO est largement utilisé au plan international, mais les pédologues de terrain utilisent le plus souvent le triangle national ou régional dont ils ont l'habitude.

Face à cette constatation, des algorithmes de transfert d'un triangle à un autre ont été calculés (Legros *et al.*, 1981 ; Minasny et McBratney, 2001). Une autre possibilité pour établir des formules de transfert d'un triangle à un autre pourrait être de les établir par grands types de matériaux et de domaine pédogénétique en utilisant des données issues de granulométries laser continues mais cela représenterait un travail considérable. Conceptuellement, il serait intéressant de regarder si les granulométries laser font apparaître ou non des seuils « naturels ».

En tout état de cause, la texture tactile fournit une information différente de la granulométrie car elle prend implicitement en compte d'autres propriétés du sol (minéralogie des argiles, taille des sables fins...). Ces deux informations doivent être conservées et en aucun cas la texture tactile devrait être corrigée *a posteriori* avec les analyses granulométriques. Parfois, les différences entre la texture tactile et l'analyse granulométrique peuvent être assez grandes, notamment lorsqu'on se trouve dans le centre du triangle. De fait, ce sont généralement les textures les plus difficiles à appréhender sur le terrain car le mélange est ternaire. Il est probable que la taille des sables joue fortement sur la texture estimée au toucher. Par exemple, il est connu que les sables très fins peuvent donner la même sensation tactile que les limons. Aussi pour les détecter, le pédologue de terrain utilise généralement un autre sens que le toucher : la vue (il regarde si ça brille).

La texture (tactile et issue de l'analyse granulométrique) est un paramètre essentiel caractérisant le comportement des sols. Il est dès lors essentiel qu'elle soit correctement et précisément renseignée dans les bases de données sur les sols. Pour cela, les données devraient décrire sans ambiguïté le triangle de texture utilisé, indiquer la classe texturale dans ce triangle obtenue par test tactile, la méthode d'analyse granulométrique utilisée (préparation de l'échantillon, méthode, bornes des fractions...) ainsi que les résultats de cette analyse granulométrique avec indication de l'unité (% ou ‰).

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements à J.P. Legros pour ses remarques constructives (INRA et Sup-Agro) et pour la recherche des références originelles concernant Lagatu (1905), à André Desaules et Peter Weisskopf pour nous avoir fourni le triangle de texture Suisse, à Denis Angers pour nous avoir fourni le triangle canadien, au Dr Nagatsuka pour le triangle japonais. Nous remercions également J.P. Rossignol pour ses propositions d'amélioration de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR, 1998 - Norme française NF ISO 11259, X31-001, Qualité du sol. Description simplifiée du sol. Annexe D, pp. 31-32.
- Agafonoff V., 1936 - Les sols de France au point de vue pédologique. Paris. Dunod. 154 pp.
- AISS/ISSS, 1926, 1934 - Conclusions de la première commission de l'Ass. Intern. Sc. du Sol Physique du Sol, othamsted 1926, V. Novak président, Versailles 1934, G.W. Robinson président
- Al Majou H., Bruand A., Duval O. et Cousin I., 2007 - Comparaison de fonctions de pédotransfert nationales et européennes pour prédire les propriétés de rétention en eau des sols. *Etude et Gestion des Sols* 142. pp. 103-116.
- André G., 1913 - Chimie agricole. Chimie du sol. Paris. Baillière et Fils. 550 pp.
- Arrouays D., Saby N., Walter C., Lemerrier B. et Schwartz C. 2006 - Relationships between particle-size distribution and organic carbon in French arable topsoils. *Soil Use and Management*, 22. pp. 48-51.
- Ayres Q. C., 1936 - Soil erosion and its control. Mc Graw Hill Co. 365 pp.
- Baize D., 1980 - Granulométrie et homogénéité des profils. Application aux plansols de Champagne humide. *Science du Sol*, 2. pp. 83-112.
- Baize D., 1983 - Les plansols de Champagne Humide. Pédogenèse et fonctionnement. Thèse Université Nancy I. INRA éditions, Versailles. 360 pp.
- Baize D., 2000 - Guide des analyses en pédologie, INRA. seconde édition revue et augmentée. 257 pp.
- Bennett H. N., 1939 - Soil conservation. Mc Graw Hill Co. 993 pp.
- Boulaine J., 1980 - Pédologie appliquée. Collection Sciences agronomiques, Paris. 220 pp.
- Boulaine J., 1989 - Histoire des pédologues et de la science des sols. INRA. 285 pp.
- Bruand A., Pérez Fernández P., Duval O., Quélin P., Nicoulaud B., Gaillard H., Raison L., Pessaud J.-F. et Prud'Homme L., 2002 - Estimation des propriétés de rétention en eau des sols : Utilisation de classes de pédotransfert après stratifications texturale et texturo-structurale. *Etude et Gestion des Sols* 92. pp. 105-125.
- Bryssine G., 1954 - Contribution à l'étude des propriétés physique du sol suite - IV-Note sur l'appréciation de la structure du sol. Société des Sciences Naturelles et Physiques du Maroc. Travaux de la Section de Pédologie 8 et 9. pp. 33-71
- Chamley H., 1987 - Sédimentologie. Paris, Dunod, 175 p.
- Collectif, 1951 - Soil Survey Manual, USDA503
- Collectif, 1968 - Directives pour la description des sols, FAO58
- Collectif, 1990 - Guidelines for soil description. Rome, FAO70
- Collectif, 1993 - Global and national soils and terrain digital databases SOTER procedures manual, FAO122
- Collectif, 1993 - Texture du sol - modification du triangle textural SSP de 1979. *Bulletin BGS* 17. pp. 103-108
- Deherain P. P., 1902 - *Traité de chimie agricole*. Paris, Masson. seconde édition. 969 p.
- Delaunoy et Maucorps, 1980 - Présentation de la carte des sols de l'Aisne. Service de conseil agronomique - SUAD - Chambre d'Agriculture de l'Aisne. 12 p.
- Demolon A., 1932 - *La dynamique du sol*. Dunod, 1^e édition. 347 p.
- Demolon A., 1952 - *Principe d'agronomie*. Paris. Dunod, 5^e éd. 520 p.
- Demolon A. et Leroux D., 1933 - *Guide pour l'étude expérimentale du sol*. Paris. Gauthiers-Villars. 214 p.
- Diffloth P., 1917 - *Agriculture Générale*, 1. Le sol et les labours. Baillière et fils, 4^e édition. 572 p.
- Diffloth P., 1927 - *Agriculture Générale*. Le sol et l'amélioration des terres. Baillière et fils, 6^e édition. 406 p.
- Dumont R., 1907 - *La terre arable*. Paris.C. Amat. éd, Librairie Sciences Agricoles. 295 p.

- Dupuis M., 1963 - Directive pour l'étude des sols : sur le terrain et au laboratoire 6^e note - Bulletin de l'AFES 3. pp. 117-147
- Emerson P., 1930 - Principles of soil technology. N.Y. MacMillan Co. 402 p.
- Erhart H., 1935 - Traité de pédologie : pédologie générale. Strasbourg. Institut Pédologique. 260 p.
- Erhart H., 1937 - Traité de pédologie : pédologie agricole. Strasbourg. Institut Pédologique. 187 p.
- Eschenbrenner V., 1991 - Principes généraux d'interprétation des diagrammes triangulaires - Application à la comparaison de matériaux pédologiques. Cahiers de l'ORSTOM, série Pédologie XXVI1. pp. 63-86.
- Falipou P., Legros J.P. et Bertrand R., 1981 - Un algorithme général pour le calcul des textures à partir de l'analyse granulométrique. Sols, n°5. pp. 29-40.
- Feller C., 1998 - Un fractionnement granulométrique de la matière organique des sols en 1874. Etude et Gestion des Sols 53. pp. 195-200.
- Gain E., 1918 - Précis de chimie agricole. Paris. Baillière. 510 p.
- Glinka, 1926 - Treatise on soil science. 614 p.
- Hall A. D., 1903 - the Soil. An introduction to the scientific study of the growth of crops. London. J. Murray Ed. 231 p.
- Hall A. D. et Demolon A., 1906 - Le sol en agriculture. Paris, Baillière et fils, 428 p.
- Hall M. et Djerbib Y., 2006 - Moisture ingress in rammed earth : Part 2 - The effect of soil particle-size distribution on the absorption of static pressure-driven water. Construction and Building Materials 206 : 374 p.
- Henderson J. J., Crum J. R., Wolff T. F. et Rogers J. N., 2005 - Effects of particle size distribution and water content at compaction on saturated hydraulic conductivity and strength of high sand content root zone materials. Soil Science 1705: 315 p.
- Hénin S. 1976 - Cours de physique du sol. Paris, ORSTOM, 159 p.
- Hilgard E. W. 1906 - Soils, their formation, properties composition and relations to climate and plant growth in the humid and arid regions. London. MacMillan Co. 593 p.
- Houghton, 1681 - A collection of letters for the improvement of husbandry and trade.
- Hwang S. I. et Hong S. P., 2006 - Estimating relative hydraulic conductivity from lognormally distributed particle-size data. Geoderma 1333-4: 421 p.
- Jamagne M., 1963 - Contribution à l'étude des sols au Congo oriental. PEDOLOGIE XIII2. pp. 271-414
- Jamagne M., 1968 - Bases et techniques d'une cartographie des sols. Annales agronomiques. 18. numéro hors série. 142 p.
- Jensen N. H., Balstrom T. et Breuning-Madsen H., 2005 - The relations between soil water retention characteristics, particle size distributions, bulk densities and calcium carbonate contents for Danish soils. Nordic Hydrology 363: 235 p.
- Joffe J. S., 1936 - Pedology. Pedology Publ. New Jersey, 576 p.
- Keen B. A., 1931 - The physical properties of the soil. London, Longmans, Green and Co.
- King F. H., 1904 - The soil. Its nature, relations and fundamental principles of management. London. Mc millan. 303 p.
- Lagatu H., 1905 - Classification et nomenclature des terres arables d'après leur constitution mécanique. Compte rendu de l'académie des sciences: 1358-1361
- Lagatu H. et Sicard L., 1901 - L'analyse des terres et son utilisation agricole. Paris, 303 p.
- 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. Université des Sciences et Techniques du Languedoc. INRA. 436 p.
- Legros J.-P., 2006 - Mapping of the soils, Science Publishers, 412 p.
- Lyon T. L., 1918 - Soils and fertilizers. New York. the MacMillan Co. 255 p.
- Lyon T. L., Fippin E. O. et Buckman H. O., 1931 - Soils, their properties and management. New York. The MacMillan Co. 764 p.
- Malterre H., 1961 - Nomenclature rationnelle des textures des sols et des roches meubles ou calcaires. Bulletin de l'AFES n° spécial. pp. 27-40
- Malterre H. et Alabert M., 1963 - Nouvelles observations au sujet d'un mode rationnel de classement des textures des sols et des roches meubles - pratique de l'interprétation des analyses physiques. Bulletin de l'AFES 2. pp. 76-84
- Martin A. E., 1829 - Traité théorique et pratique des amendements et des engrais. Paris. Rousselon Libr. Ed. 576 p.
- Masure F., 1860 - Analyse physique des terres arables par la méthode et avec l'appareil de M. Masure. Extrait de la Revue des Sociétés Savantes. Imprimerie et Librairie Administratives de Paul Dupont, Paris, 15 p.
- Mathieu C., Pieltain F., Asseline J., Chossat J. C. et Valentin C., 1998 - Analyse physique des sols - méthodes choisies. Lavoisier. 275 p.
- Millar C. E. et Turk L. M., 1951 - Fundamentals of soil science. New York, John Wiley & sons, Inc. second edition. 510 p.
- Minasny B. et McBratney A. B., 2001 - The Australian soil texture boomerang : a comparison of the Australian and USDA/FAO soil particle-size classification systems. Australian Journal of Soil Research 396. pp. 1443
- Monnier G. et Stengel P., 1982 - La composition granulométrique des sols : un moyen de prévoir leur fertilité physique. Bulletin Technique d'Information 122370-372. pp. 503-512
- Mortimer, 1765 - Agriculture complete ou l'art d'améliorer les terres. Trad. de langlais sur la sixième édition. Paris. Saugrain Jeune. 505 p.
- Murray J. A., 1919 - Soils and Manures. London. Constable, 2^e édition. 354 p.
- Nemes A. et Rawls W. J., 2006 - Evaluation of different representations of the particle-size distribution to predict soil water retention. Geoderma 1321-2. pp. 47
- Osborne T. B., 1887 - The methods of mechanical soil analysis. Conn. Agric. Exp. Sta. Ann. Rept. pp. 141-158
- Prescott J. A., Taylor J. K. et Marshall J. J., 1934 - The relationship between the mechanical composition of the soil and the estimate of texture in the fiels. Physique du sol. Trans. 1st Comm. intern. Soil. Sci. Soc.. pp. 143-154
- Robinson G. W., 1922 - A new method for the mechanical analysis of soils and other dispersions. J. Agric. Sci. 12. pp. 287-291
- Robinson G. W., 1949 - Soils. Their origin, constitution and classification. London. Thomas Murby & Co, N.Y.J. Wiley & Sons Inc. 573 p.
- Rozier l'abbé, 1796 - Sable. Cours Complet d'agriculture théorique, pratique, économique et de médecine rurale et vétérinaire. Paris. tome 9. pp. 3-6.
- Saxton K. E. et Rawls W. J., 2006 - Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. Soil Science Society of America Journal 705. pp. 1569
- Schloesing T., 1874 - Etude sur la terre végétale. Annales de Chimie et Physique, 514 - pp. 546
- Shaw T. et Alexander L. T., 1936 - A note on mechanical analysis and soil textures. Soil Science Society America Proc. 1. pp. 303-304
- Shirazi M. A., Boersma L. et Johnson C. B., 2001 - Particle-size distribution : compaction texture systems, adding rock, and predicting soil properties. Soil Sci. Soc. Am. J. 65. pp. 300-310
- Sijs C., 1961 - La cartographie des sols au Congo, ses principes et ses méthodes. 66. pp. 149. INEAC, série Technique
- Stebutt A., 1930 - Lehrbuch der allgemeinen Bodenkunde. Berlin. Borntraeger. 518 p.
- Tavernier R. et Maréchal R., 1958 - Carte des associations de sols de la Belgique. Pédologie VIII. pp. 134-182.
- Taylor D. W., 1948 - Fundamentals of soil mechanics. New York. J. Wiley & sons. 700 p.
- Terzaghi K. et Peck R. B., 1961 - Mécanique des sols appliquée aux travaux publics et au bâtiment. Paris, 565 p.
- Wright C. H., 1934 - Soil Analysis. London. Th. Murby. 236 pp

PLANCHE I: TRIANGLES DE TEXTURE DE FRANCE

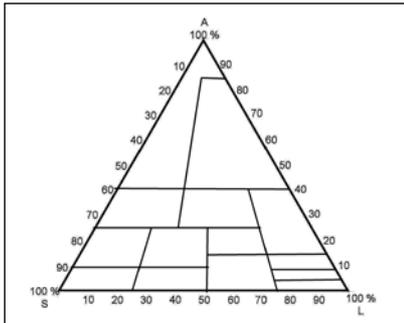


Figure 5 - Triangle de Malterre
Figure 5 - Malterre's triangle

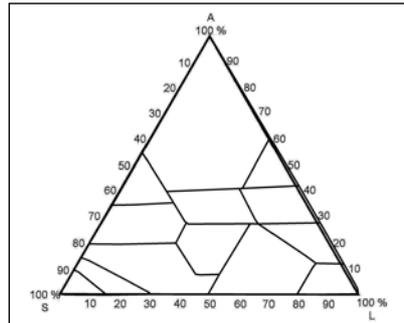


Figure 6 - Triangle de Tavernier et Maréchal (=USDA)
Figure 6 - Tavernier et Maréchal's triangle

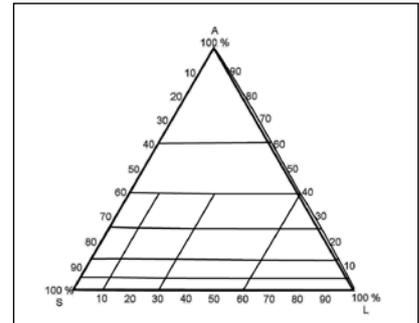


Figure 7 - Triangle de Hénin
Figure 7 - Hénin's triangle

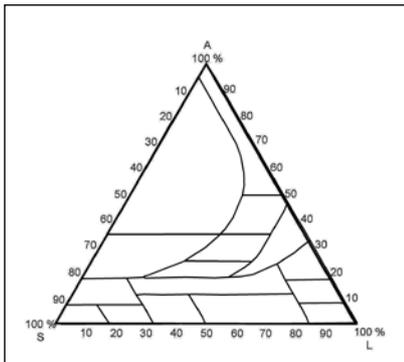


Figure 8 - Triangle de Duchaufour
Figure 8 - Duchaufour's triangle

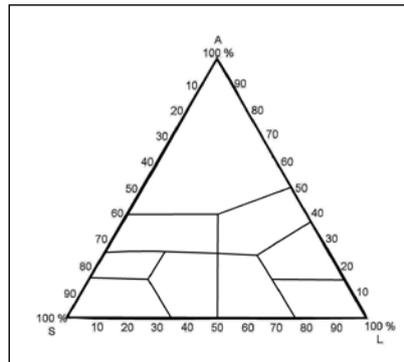


Figure 9 - Triangle de Demolon
Figure 9 - Demolon's triangle

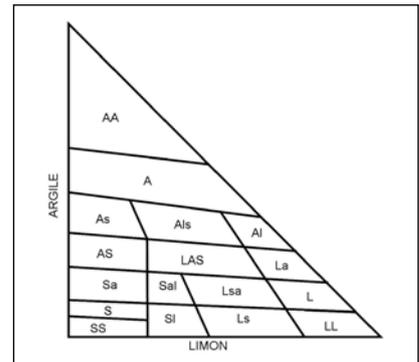


Figure 10 - Triangle de texture du GEPPA (17 classes) 1963
Figure 10 - GEPPA triangle (17 classes)

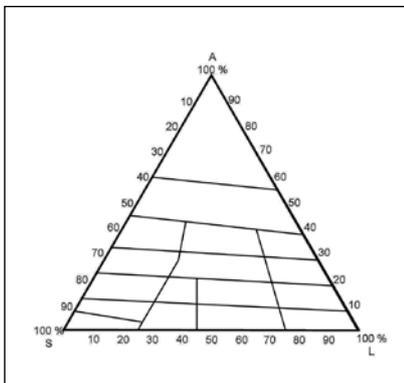


Figure 11 - Triangle de texture du GEPPA (17 classes) 1963, transformé en triangle équilatéral
Figure 11 - GEPPA triangle transformed as equilateral

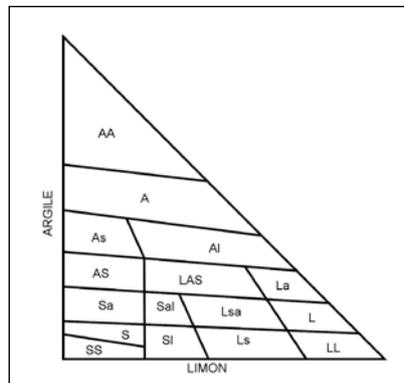


Figure 12 - Triangle de texture du GEPPA (16 classes)
Figure 12 - GEPPA triangle (16 classes)

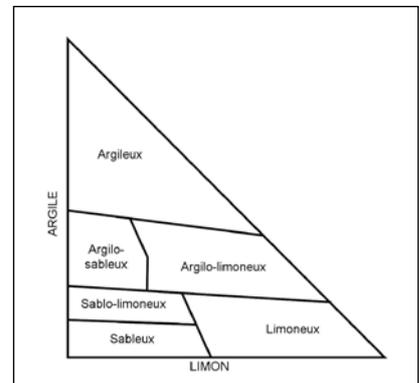


Figure 13 - Triangle de texture du GEPPA (6 classes)
Figure 13 - GEPPA triangle (6 classes)

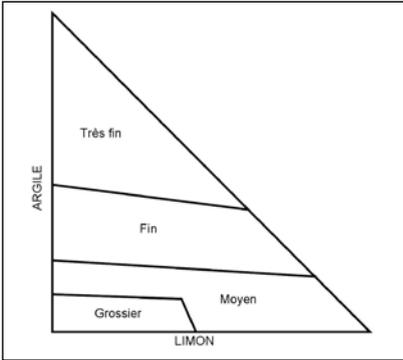


Figure 14 - Triangle de texture du GEPPA (4 classes)

Figure 14 - GEPPA triangle (4 classes)

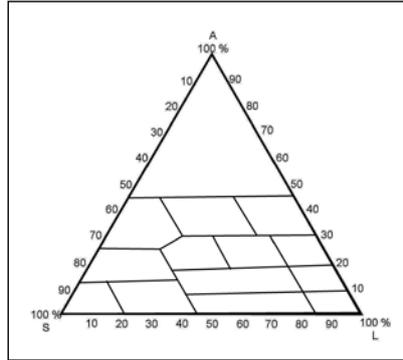


Figure 15 - Triangle de l'Aisne n°1 (14 classes) 1967

Figure 15 - Aisne n°1 triangle (14 classes) 1967

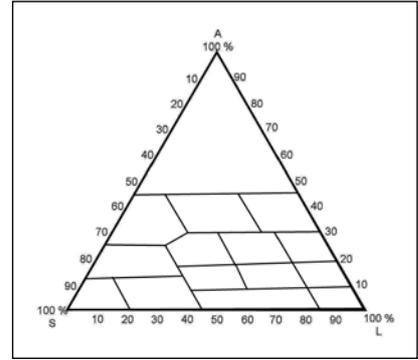


Figure 16 - Triangle Triangle de l'Aisne n°2 (15 classes)

Figure 16 - Aisne n°2 triangle (15 classes)

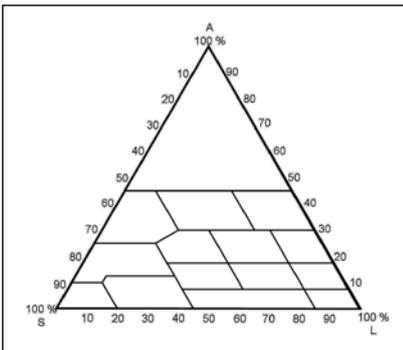


Figure 17 - Triangle de l'Aisne n° 3 (15 classes)

Figure 17 - Aisne n°3 triangle (15 classes)

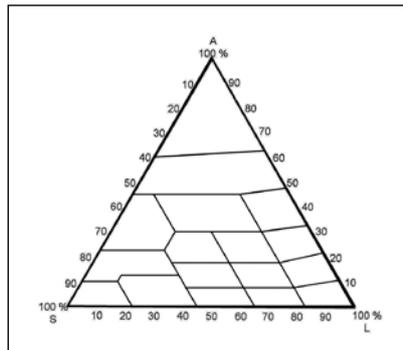


Figure 18 - Triangle de l'Aisne n° 4 (16 classes)

Figure 18 - Aisne n°4 triangle (16 classes)

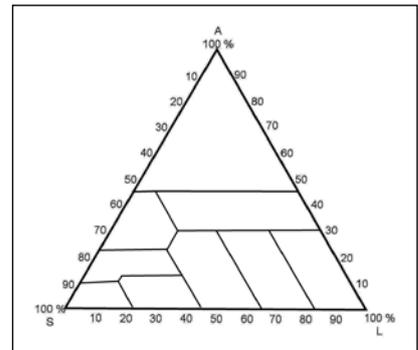


Figure 19 - Triangle de l'Aisne simplifié (9 classes)

Figure 19 - Simplified Aisne triangle (9 classes)

PLANCHE II : TRIANGLES DE TEXTURE UTILISÉS EN EUROPE

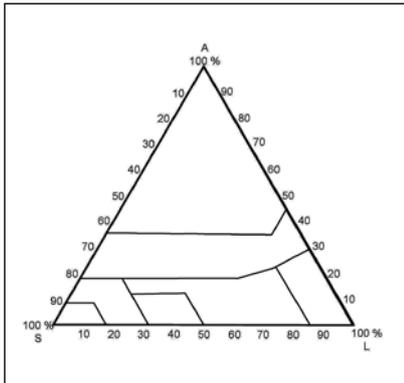


Figure 20 - Triangle belge (1950)
Figure 20 - Belgium triangle

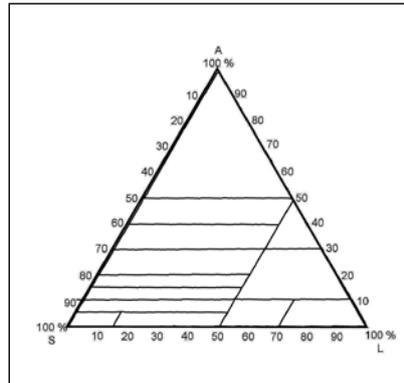


Figure 21 - Triangle suisse
Figure 21 - Swiss triangle

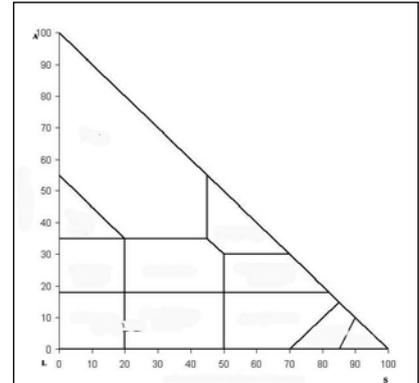


Figure 22 - Triangle britannique
Figure 22 - British triangle

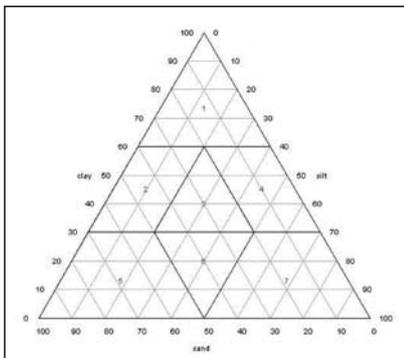


Figure 23 - Triangle finlandais
Figure 23 - Finish triangle

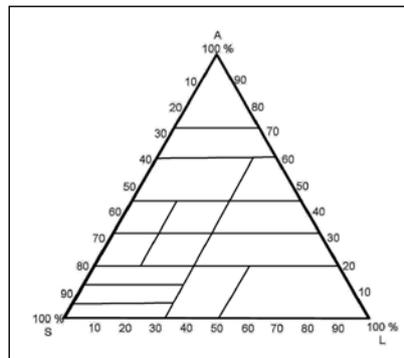


Figure 24 - Triangle roumain
Figure 24 - Romanian triangle

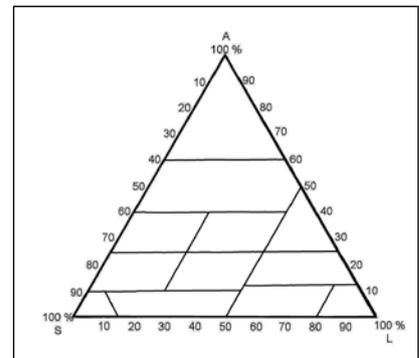


Figure 25 - Triangle norvégien
Figure 25 - Norwegian triangle

PLANCHE III : TRIANGLES DE TEXTURE UTILISÉS DANS LE MONDE

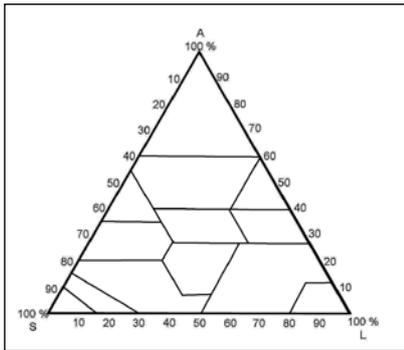


Figure 26 - Triangle canadien
Figure 26 - Canadian triangle

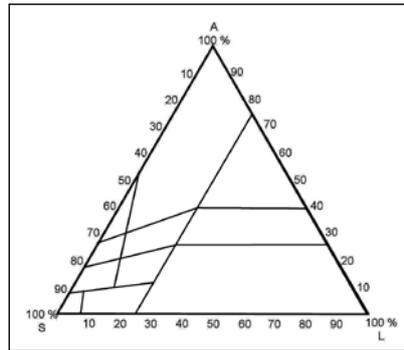


Figure 27 - Triangle australien
Figure 27 - Australian triangle

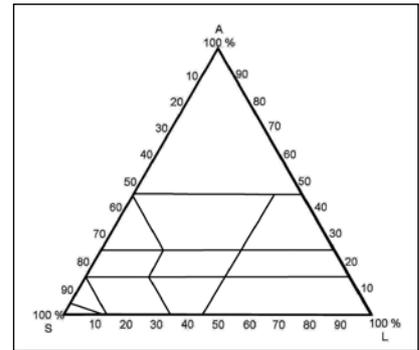


Figure 28 - Triangle japonais
Figure 28 - Japanese triangle

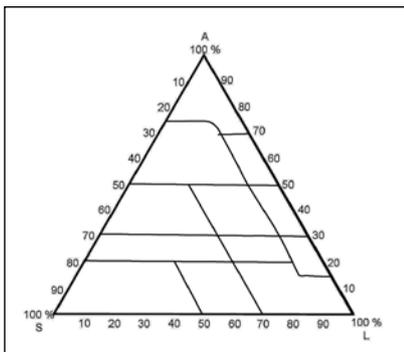


Figure 29 - Triangle de INEAC
Figure 29 - INEAC triangle

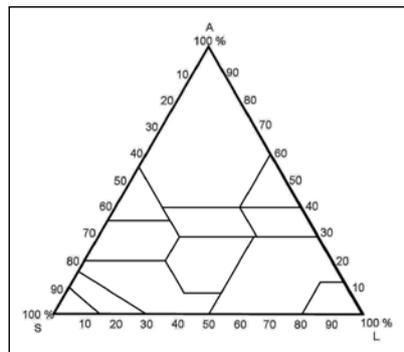


Figure 30 - Triangle américain (USDA)
Figure 30 - American (USDA) triangle

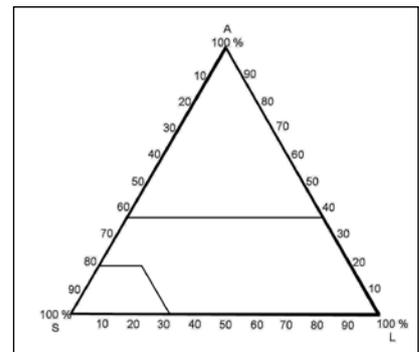


Figure 31 - Triangle FAO (3 classes)
Figure 31 - FAO triangle (3 classes)

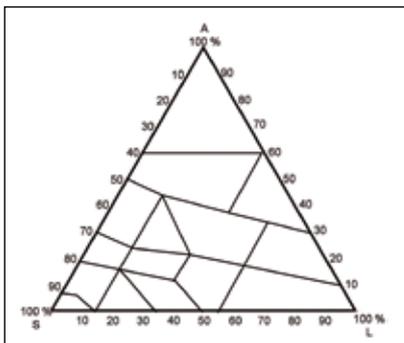


Figure 32 - Triangle SCET (1960)
Figure 32 - SCET triangle

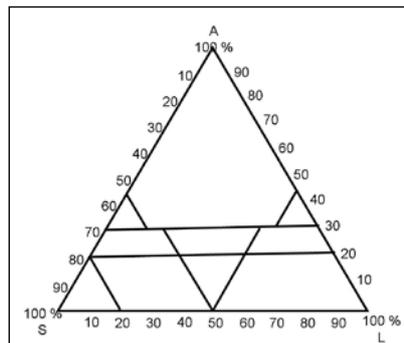


Figure 33 - Triangle de la Public Road Administration
Figure 33 - Public Road Administration triangle

