



**HAL**  
open science

## **Approche Scientifique et technique du matériau terre : identification et critères de sélection des terres**

Pascal Odul, Hugo Houben, Patrice Doat, Hubert Guillaud, Robert Cope

### ► **To cite this version:**

Pascal Odul, Hugo Houben, Patrice Doat, Hubert Guillaud, Robert Cope. Approche Scientifique et technique du matériau terre : identification et critères de sélection des terres. [Rapport de recherche] CRATerre; CSTB; Ministère de la Recherche et de la Technologie. 1986, pp.156. hal-03179709

**HAL Id: hal-03179709**

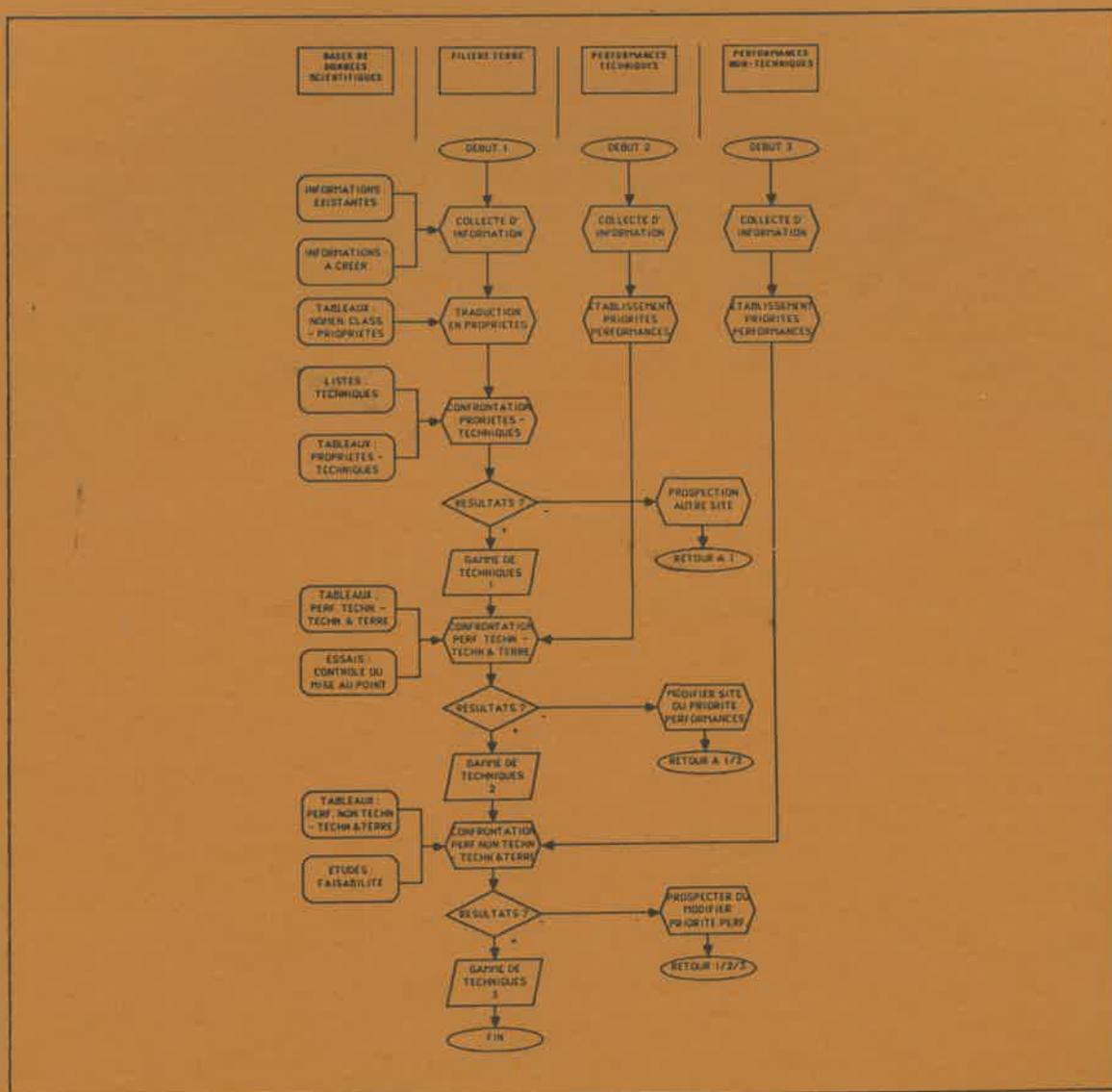
**<https://hal.univ-grenoble-alpes.fr/hal-03179709v1>**

Submitted on 24 Mar 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# IDENTIFICATION ET CRITERES DE SELECTION DES TERRES



CSTB

CRATerre

DECEMBRE 1986

MINISTERE DE LA RECHERCHE ET DE LA TECHNOLOGIE

ODUL, P. ; HOUBEN, H.  
et DOAT, P. ; GUILLAUD, H.

IDENTIFICATION ET CRITERES DE SELECTION  
DES TERRE

156 pp.

CRATerre, Villefontaine, décembre 86

Approche scientifique et technique du matériau terre

Décision d'aide n° 84.F.0475

Ministère de la Recherche et de la Technologie

Sous contrat CSTB

Matériau terre / Identification des terres / Critères de sélection des terres /  
Stratégies de décision / Collecte d'informations / Essais d'identification /  
Propriétés techniques / Propriétés non-techniques /  
Techniques de construction / Techniques de production

## APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU MATERIAU TERRE

### IDENTIFICATION ET CRITERES DE SELECTION DES TERRES

CSTB  
Centre Scientifique et  
Technique du Bâtiment  
4, avenue du Recteur Poincaré  
75782 PARIS CEDEX 16

CRATerre  
Centre de Recherche et  
d'Application Terre  
Les Rivaux  
Brié et Angonnes 38320 EYBENS

Responsabilité scientifique :

Hugo HOUBEN  
CRATerre  
et  
Robert COPE  
CSTB de Grenoble

Auteurs :

CRATerre  
Pascal ODUL  
Hugo HOUBEN  
et  
Patrice DOAT  
Hubert GUILLAUD

Collaborateurs :

Titane GALER, secrétariat  
Nathalie LEFEUVRE, trait. de texte  
Pierre-Eric VERNEY, informatique  
Fabrice LAFON, illustrations

Villefontaine, décembre 86

Décision d'aide n° 84.F.0475

Ce rapport constitue le rapport final d'une recherche financée par le Ministère de la Recherche et de la Technologie. Les jugements et opinions émis n'engagent que leurs auteurs.

## SOMMAIRE

## SOMMAIRE

---

### INTRODUCTION

INTRODUCTION .....	p.	5
--------------------	----	---

### STRATEGIE

STRATEGIES DE DECISION .....	p.	21
------------------------------	----	----

### COMPILATION

COLLECTE D'INFORMATIONS .....	p.	29
INFORMATIONS EXISTANTES .....	p.	34
INFORMATIONS A CREER .....	p.	48

### TRAITEMENT

TRADUCTION DE L'INFORMATION EN PROPRIETES .....	p.	91
TABLEAUX DE NOMEN., CLASS. <> PROPRIETES .....	p.	96

### DECISION

CONFRONTATION ENTRE PROPRIETES ET TECHNIQUES ...	p.	98
LISTES DES TECHNIQUES .....	p.	103
TABLEAUX DE PROPRIETES <> TECHNIQUES .....	p.	116

### REFERENCES

REFERENCES .....	p.	150
------------------	----	-----

## SOMMAIRE DETAILLE

---

<b>INTRODUCTION</b>	<b>p. 5</b>
Liminaire	p. 6
Préface	p. 8
Constats	p. 10
Méthode de travail	p. 19
Structure du rapport	p. 20
<b>STRATEGIES DE DECISION</b>	<b>p. 21</b>
Trois types de stratégie de décision	p. 22
Schéma global de décision	p. 24
Schéma spécifique de décision	p. 27
<b>COLLECTE D'INFORMATIONS</b>	<b>p. 29</b>
Collecte d'informations existantes	p. 30
Collecte d'informations à créer	p. 33
<b>INFORMATIONS EXISTANTES</b>	<b>p. 34</b>
Informations pédologiques	p. 35
Informations géologiques	p. 36
Informations géotechniques	p. 37
Critiques	p. 44
Propositions	p. 46
<b>INFORMATIONS A CREER</b>	<b>p. 48</b>
Prospection	p. 49
Essais d'identification	p. 55
Liste des essais d'identification	p. 57
Texture	p. 62
Consistance	p. 65
Compactibilité	p. 67
Cohésion	p. 69
Minéralogie	p. 71
Chimie	p. 74
Teneur en eau et poids spécifique	p. 77
Teneur en eau	p. 79
Poids spécifique	p. 82
Critiques	p. 84
Proposition	p. 88

<b>TRADUCTION DE L'INFORMATION EN PROPRIETES</b> .....	<b>p. 91</b>
Traitement des informations .....	p. 92
Critiques et propositions .....	p. 94
<b>TABLEAUX DE NOMEN., CLASS. &lt;&gt; PROPRIETES</b> .....	<b>p. 96</b>
Nature et adéquation des tableaux .....	p. 97
<b>CONFRONTATION ENTRE PROPRIETES ET TECHNIQUES</b> ...	<b>p. 98</b>
Contexte de la confrontation .....	p. 99
<b>LISTES DES TECHNIQUES</b> .....	<b>p. 103</b>
Nature du contenu des listes .....	p. 104
Procédés de production et de construction .....	p. 105
Liste des stabilisants .....	p. 109
Liste des modifiants .....	p. 114
<b>TABLEAUX DE PROPRIETES &lt;&gt; TECHNIQUES</b> .....	<b>p. 116</b>
Nature et adéquations des tableaux .....	p. 117
Texture, teneur en eau <> procédés de construction ..	p. 118
Texture <> procédé de production .....	p. 119
Consistance <> procédé de production .....	p. 122
Compactibilité <> procédé de production .....	p. 125
Cohésion <> procédé de production .....	p. 128
Texture <> stabilisant .....	p. 131
Consistance <> stabilisant .....	p. 134
Texture, consistance <> stabilisants .....	p. 137
Texture, température <> stabilisant .....	p. 141
Minéralogie <> stabilisant .....	p. 142
Texture, consistance, minéralogie <> stabilisants ...	p. 143
Texture, cohésion <> modifiants .....	p. 144
Critiques .....	p. 145
Propositions .....	p. 148
<b>REFERENCES</b> .....	<b>p. 150</b>
Bibliographie .....	p. 151

## INTRODUCTION

## LIMINAIRE

---

Le contenu de ce rapport doit être lu et interprété dans l'ombre d'une citation de Venuat M., à la page 35, dans "Le traitement des sols à la chaux et au ciment" édition Venuat, Chatillon sous Bagneux, France, 1980 :

"Les sols sont des matériaux difficiles à étudier car "ni les lois de la mécanique des solides, ni celles des fluides ne leur sont applicables - A. Mayer". Ils supportent mal les généralisations et il est souvent préférable d'effectuer des mesures sur un certain nombre d'échantillons représentatifs (plutôt que d'appliquer des formules mathématiques compliquées) ou de se reporter à des tableaux de chiffres. Selon P. Habib, "La rigueur mathématique et la précision des calculs numériques entretiennent l'illusion de l'exactitude des résultats tout en masquant l'impression des hypothèses sur lesquelles ils sont fondés dont notamment la valeur des coefficients mécaniques d'élasticité ou de plasticité".

Nous avons tenté d'élargir cette constatation, provenant de géotechniciens, au domaine de la construction en terre et ceci principalement concernant les essais d'identification et les tableaux de décision.

Nous avons également tenté de démanteler l'illusion concernant l'état d'avancement des connaissances sur la construction en terre et d'illustrer la situation quasi babylonienne, les confusions et parfois même les contradictions entre auteurs s'imaginant à tort de traiter les mêmes sujets dans les mêmes cadres conceptuels.

Afin de comprendre l'esprit de certaines critiques formulées, le lecteur devra prendre en considération la citation suivante : le savoir et le faire, 1979, pp 11-12 :

"Le développement a trop longtemps été l'apanage des économistes et des techniciens. La science économique est la plus perfectionnée des sciences sociales. La technique, par ailleurs, se suffit à elle-même, elle procure une satisfaction ludique à ceux qui la manient avec compétence. Ce sont peut-être là des raisons qui expliquent l'aveuglement des économistes et des techniciens devant la dimension socio-culturelle du développement, devant sa signification humaine. Le compartimentage du savoir, caractéristique du développement de la pensée dans les sociétés industrielles, fournit une légitimation idéologique à l'aveuglement des spécialistes."

Vouloir aller à l'encontre de cette critique dans le cadre de cette étude nécessite du technicien responsable du développement d'essais d'identification et stratégies de décision, une interrogation permanente des buts et objectifs poursuivis. Buts et objectifs qui ne peuvent rester l'unique responsabilité du technicien.

Nous espérons que ce document transgresse cette "certaine satisfaction ludique" dont il est question dans la citation ci-dessus.

ODUL Pascal

Décembre 1986

## PREFACE

---

L'objectif de cette étude est la mise au point d'une stratégie de décision concernant l'adéquation des terres aux procédés de production, stabilisation et modes de construction à partir des essais d'identification.

Afin de bien situer les limites de cette étude, une interprétation de la dernière partie de cette phrase s'impose.

En effet, le matériau terre peut être analysé et testé au travers d'une demi-douzaine de types d'essais :

- essais d'identification de la matière première terre,
- essais de mise au point du produit fini en terre,
- essais de performance du produit fini en terre,
- essais de caractérisation du produit fini en terre,
- essais de contrôle du produit fini en terre,
- essais d'acceptation du produit fini en terre.

Cette étude se limite aux seuls essais d'identification et critères de sélection des terres. Bien sûr, dans la pratique actuelle, les critères de sélection ne suffisent à eux seuls et d'autres essais s'imposent.

Cette façon de procéder à base d'essais d'identification n'est qu'une facette de la problématique de la construction en terre et des choix décisionnels que ceci impose, de même qu'elle n'est qu'une approche méthodologique de développement de solution parmi tant d'autres.

Il est à noter que cette méthode de travail n'est pas celle qui garantit dès à présent le succès d'une opération. Le point de départ essentiellement technique oriente de façon fondamentale le genre de solutions proposées. A ce sujet nous faisons référence à une étude issue du projet de recherche UNCHS "Earth construction technologies appropriate to developing countries" : "Synthesis of case studies on earth construction" du même auteur.

Dans l'approche de décision à partir de l'identification, les décisions de convenance des terres ont presque un caractère dogmatique inhérent à ce mode décisionnel. On se référera à des abaques, courbes idéales et/ou tableaux et on opérera selon, par exemple, des plages d'acceptabilités. Il est à noter que dans la réalité de la construction en terre, il est parfaitement possible qu'une terre, rejetée selon les critères de convenance, ait des caractéristiques mécaniques que l'on ne lui supposait pas.

Le présent document contient une description générale des paramètres et propriétés d'une terre, pouvant jouer un rôle déterminant dans la qualité du construit. Pourtant, construire en terre ne nécessite pas à priori d'identification de tous ces paramètres. En effet, selon les terres analysées, selon la facilité que l'on aura à les caractériser, selon les conditions de travail, selon l'expérience de l'utilisateur ou du constructeur, il sera possible d'ignorer l'une ou l'autre catégorie d'essais.

Concernant les essais mêmes, il ne faut jamais perdre de vue que :

1 - Dans beaucoup d'essais les résultats dépendent du coup de main de l'opérateur et l'interprétation des résultats obtenus est souvent délicate supposant une certaine expérience et une connaissance acquise.

2 - Les essais mêmes peuvent être divisés généralement en deux catégories :

- essais "physiques" : la valeur mesurée est définie par une loi physique et les modes opératoires sont indépendants de cette valeur.

- essais "techniques" : la valeur mesurée est définie par l'essai lui-même et dépend du mode opératoire. En principe, le résultat n'a de valeur de comparaison que pour des conditions de mesure identiques et est, stricto sensu, non généralisable.

Malheureusement, la plupart des essais sur la terre sont des essais "techniques", ce qui rend la comparaison de résultats (p.e. : entre essais plus ou moins similaires) d'autant plus difficile.

Malgré un nombre croissant de recherches effectuées dans le domaine de la construction en terre, les résultats effectifs utilisables restent très limités. Ceci est également dû à la quantité importante de facteurs qui déterminent les caractéristiques relevant du matériau terre. L'effet combiné d'interactions physico-chimiques se laisse pourtant bien identifier à partir de caractéristiques dérivées et facilement mesurables (p.e. : limites de consistance, cohésion,...). Une situation similaire s'observe dans la technologie du béton. Les mécanismes permettant au béton d'obtenir ses qualités de performance et de résistance ne sont également pas scientifiquement maîtrisés à ce jour. Néanmoins ceci n'a guère entravé le fait que la technologie du béton soit devenue une maille indispensable dans le savoir-faire en matière de construction, et les hypothèses de base sur lesquelles se fondent la technologie du béton ont permis de développer des schémas de décision, modes de production et de construction assez précis et fiables.

## CONSTATS

---

### CONSTATS GENERAUX

Toute recherche devrait en principe clairement définir ses points de départ, objectifs idéologiques et pratiques, groupe-cible des utilisateurs potentiels,...

Pourtant nous constatons dans le domaine de la recherche sur la construction en terre un vide à ce sujet, un manque que l'on retrouve au sein de documents existants et dans la formulation de certaines questions ou hypothèses de travail. Il manque justement une interrogation permanente explicitée : "Qui fait quoi, comment, pourquoi et où ?"

Quelques exemples simples et isolés illustrent cette constatation qui met en question la base de recherche sur lesquels sont fondés ces exemples :

- développement d'essais simplifiés : pourquoi, pour qui, où se trouve la démarcation entre simplifié et complexe ?
- conception d'équipement portatif : pourquoi, pour qui, où se trouve la démarcation entre portatif et fixe, quelle connotation donner au concept portatif, est-ce une question de poids ?
- seuil de précision requis : pourquoi, pour qui ?
- quelle corrélation existe-t-il entre essais de laboratoire et essais in situ, est-ce une simple question de statistiques ?

Sans choix décisionnel, reconnaissance d'objectifs et de groupes-cibles, il devient facile d'improviser des propositions et des recommandations (remarque à laquelle on pourrait aisément soumettre ce document et qui constitue donc également une autocritique).

Ceci a pour conséquence que, à ce jour, trop de recherches s'effectuent au hasard et mènent les chercheurs vers cette "satisfaction ludique" nourrie par la soif du savoir en oubliant ou négligeant le but principal : accompagner, fonder et normaliser la pratique.

Cette même remarque s'impose sur la demande de développement. d'une stratégie de décision à partir de l'identification : est-ce que le but est le développement coûte que coûte d'un système cohérent, universel, informatisable au service d'experts et consultants ou le développement d'un système servant d'indicateur et d'appui à l'utilisateur ?

Nous constatons également des manquements dans les points de départ des recherches : beaucoup de méthodes d'analyse, recherche et évaluation partent du principe de l'isolement du matériau terre. Le matériau terre doit remplir à lui seul toutes les fonctions désirées d'un matériau de construction unique dans un cadre préconçu du rôle que l'on veut lui faire remplir. On oublie trop souvent que le matériau fait partie d'une structure soit de gros oeuvre, soit de finition et fait partie intégrante d'un bâtiment, d'un environnement,...

Déjà, même au niveau technique, le simple fait qu'il existe des enduits protecteurs est une chose qui effraye certains chercheurs puisque ce fait n'est pas incorporé dans leur cadre préconçu, leur modèle d'approche scientifique et nécessite une méthode et une stratégie de décision modifiée.

Trop de recherches sont constituées et basées sur des systèmes de valeurs attribuant un rôle aux matériaux de construction et l'habitat en général au sein d'une société. Ceci n'est pas en soi dangereux mais le devient et rend impossible toute confrontation d'idées si l'on en est pas conscient et si ceci n'est pas explicité.

En appliquant le modèle scientifique de Kuhn, on pourrait dire que nous nous trouvons dans une période préparadigmatique ou période de transition. Chacun a ses propres points de départ concernant la nature des choses et sa propre méthode de recherche. Il y a un manque de bases communes, de valeurs communes, de collections d'expressions (définitions, lois, axiomes,...). Les embryons de paradigmes existants proviennent généralement d'autres disciplines et on oublie souvent les aspects irrationnels de la science, l'influence de la sociologie, de l'économie de la psychologie sur le développement des convictions théoriques elles-mêmes.

Nous constatons également une certaine frayeur pour l'abandon d'idées généralement admises qui pourtant pourraient permettre la mise en place d'alternatives et de renouvellements.

## CONSTATS CONCERNANT LES PERFORMANCES REQUISES

Nous constatons un manque de systématisation concernant les performances requises et leur traduction en propriétés d'une terre et caractéristiques d'une technique. Une telle systématisation devrait pourtant permettre de réduire le nombre de variables à introduire afin de faciliter la décision.

Une partie essentielle dans la décision est l'établissement de priorités parmi les performances requises, toutes les performances n'ayant pas le même poids. Bien qu'il existe des outils d'analyse matricielle (appelée analyse multivariable), ceux-ci sont rarement employés. Dans ce cas il est difficile de vérifier le bien fondé d'une proposition particulière et de déterminer le meilleur choix.

## CONSTATS CONCERNANT LA NOMENCLATURE

Nous constatons des confusions et parfois même des contradictions entre auteurs s'imaginant à tort de traiter les mêmes sujets dans les mêmes cadres conceptuels. Un choix cohérent et explicite de nomenclature devrait réduire ces confusions, ceci nécessitant à nouveau des choix décisionnels et la formulation précise des objectifs poursuivis.

Il est également absolument nécessaire de faire l'exercice de réinterprétation des nomenclatures et classifications existantes afin de permettre l'ajustement de tableaux de décision exploités et de contrôler la corrélation entre les tableaux à base de propriétés uniquement (p.ex : texture et bitume) et à base de classifications (p.e. : classification géotechnique et bitume). Ceci devrait également nous mener à l'établissement de tableaux de conversion facilitant la lecture et l'interprétation de documents étrangers.

## CONSTATS CONCERNANT L'IDENTIFICATION DES TERRES

La plupart des résultats des essais d'identification sont liés à un ou plusieurs des éléments suivants :

- degré de compacité
- teneur en eau
- degré de consistance
- le temps parcouru
- l'environnement : température, humidité relative

Afin d'obtenir des résultats fiables, il faudrait donc ou bien effectuer les essais dans des conditions normalisées constantes ou bien dans des conditions normalisées avec variation contrôlée de certains éléments permettant ainsi d'obtenir une évolution des caractéristiques en fonction de ces variables.

Ceci n'est pas toujours le cas et se remarque principalement dans la phase de préparation et de manipulation de l'échantillon. Les limites de consistance, par exemple, sont théoriquement fonction du degré de

compacité qui en soi est le résultat d'une manipulation; dans ce cas, le pétrissage de la terre par l'opérateur. Au sein d'un même laboratoire il est possible d'uniformiser cette manipulation mais rien ne permet de dire que les résultats de deux laboratoires différents sont comparables. Des essais tels que le Pfefferkorn et son mode opératoire très strict permettent de surmonter cette difficulté, mais sont rarement appliqués.

Dans le cadre d'une stratégie de décision à partir de l'identification, les essais d'identification devraient nous fournir des informations pertinentes pour toute une gamme de techniques disponibles. Ceci est rarement le cas d'autant plus que beaucoup d'essais retrouvent leur origine dans la spécificité d'une technique bien précise. Des recommandations concernant les essais classiques ou l'établissement d'essais de remplacement devraient en principe prendre en considération les éléments mentionnés ci-dessus.

Une autre question fondamentale se pose : sur quelle terre effectuer les essais ? Prenons l'exemple de la texture. Avant tout il est nécessaire de considérer deux aspects :

- pour les essais de sédimentométrie, on imprègne et déflocule la terre afin d'être sûr de mesurer vraiment la taille des grains, mais sur chantier, on ne triture pas la terre avec cette sophistication : des particules restent agglomérées.

- en chantier on broie et on tamise la terre. En observant le passant et le refus du tamis, on remarque aisément que le refus est composé en grande partie de congglomérés contenant beaucoup d'éléments cohésifs dont l'argile. Est-ce que le passant que l'on emploie à la production aura donc la même texture que la terre initiale ?

Ces deux aspects nous mènent à cette question fondamentale : est-ce que dans ce cas, l'identification de la texture est représentative pour ce qui se passe en réalité ?

Nous constatons également que trop de chercheurs s'obstinent à relater la rigueur scientifique de la procédure utilisée en oubliant le but poursuivi. L'exemple le plus typique se situe de nouveau dans l'analyse de la texture : la sédimentométrie. A quoi sert de connaître avec une précision de deux décimales la quantité et distribution exactes de particules fines si c'est plutôt leur qualité qui nous intéresse ? Ce sont également ces essais qui entretiennent l'illusion de l'exactitude des résultats tout en masquant l'imprécision des hypothèses sur lesquelles ils sont fondés notamment par exemple, l'application de la loi de Stokes. Et en général, à quoi sert de connaître les résultats à deux décimales près, si plus tard on introduit

dans les calculs des coefficients de sécurité allant parfois jusque 24 et déterminés de façon tout à fait arbitraire ?

A quoi servent des méthodes de laboratoire correctes si au chantier elles s'avèrent impossibles à appliquer afin d'effectuer des essais de contrôle de production.

## CONSTATS CONCERNANT LES CRITERES

Il existe différents types de critères :

- impératif <-> interdiction <-> conseil
- zones préférentielles <-> zones exclusives
- transitif <-> non cumulatif.

Deux exemples indiqueront qu'il est parfois difficile de déduire à quel type de critères on est confronté, ce qui pose des problèmes surtout quand il s'agit de combiner plusieurs éléments :

- il existe une zone préférentielle de texture pour la terre compactée et une zone préférentielle de texture pour l'emploi du ciment. Qu'elle est la zone préférentielle pour la terre comprimée stabilisée au ciment : la zone englobante des deux, la zone de superposition des deux ou une nouvelle zone préférentielle non identifiée ?

- on limite généralement la teneur en sulfates dans le cas de stabilisation à la chaux de même que la teneur en matières organiques. Que faire dans le cas d'une terre contenant des sulfates et des matières organiques ? Emploie-t-on les mêmes critères ?

Il serait donc préférable d'uniformiser, de standardiser et d'explicitier le type de critères employés, ce qui n'est généralement pas le cas.

Le cas de sulfates et matières organiques, entre autres, nous amène à une deuxième considération double :

- certains critères sont trop sévères,
- certains critères sont corrélés et nécessitent donc une approche simultanée.

Le US Air Force Weapon Laboratory a trouvé que, pour certains sols, il y a une interrelation entre différents éléments en vue des performances requises. Dans le cas de stabilisation à la chaux, on a remarqué que pour certaines terres la matière organique a un pouvoir neutralisant sur les

sulfates et que l'on pourrait pour ainsi dire parler d'une teneur en matières organiques optimale mais qu'en même temps ceci dépend des performances analysées (résistance à la compression immédiate ou après séchage, ou résistance à l'érosion gel - dégel).

Des analyses établissant des interrelations entre différentes propriétés en vue de certaines performances requises sont très rares. Il existe pourtant des méthodes d'analyse appropriées mais rarement appliquées : analyse par régressions multiples, méthode des moindres carrés, dont Hocking - La Motte - Leslie "Step - down regression technique" est un exemple.

### CONSTATS CONCERNANT LES DECISIONS

Une stratégie de décision à partir de l'identification est assez vaste et complexe. Nous constatons à ce jour que beaucoup de grilles d'analyse nécessaires à la décision sont incomplètes et que trop d'informations contenues dans ces grilles sont du type généralités et/ou spéculations et non des faits irrévocables.

Il est peut-être également illusoire de vouloir engendrer un tel type de stratégie de décision complet et cohérent.

Il serait peut-être utile de faciliter la tâche en éliminant dès le début toute une gamme de techniques à partir des performances techniques et non techniques requises.

Mais ceci ne peut en aucun cas être une légitimation ou une excuse pour se limiter aux seules choses que l'on connaît et cette élimination ne peut en aucun cas être basée sur une décision arbitraire, ce qui pourtant se fait couramment. En établissant au préalable de façon systématique les performances requises, on pourrait éliminer une gamme de techniques à partir d'études de faisabilité techniques et non techniques qui peuvent influencer et déterminer les éléments des études de faisabilité technique. Par la suite on pourra procéder à l'identification des propriétés d'une terre et la confronter à une gamme réduite de techniques.

Il serait également possible de faciliter la tâche en éliminant dès le début toute une gamme de techniques à partir d'une confrontation préliminaire des propriétés d'une terre aux techniques à l'aide de schémas de décision directifs indiquant des tendances (p.e. : Wagner, US Air Force Soil Stabilisation Index System, Pffefferkorn,...). Par la suite on pourra procéder à la confrontation plus détaillée à une gamme réduite de techniques. (Mais de nouveau, les schémas directifs cités ont l'inconvénient de ne pas couvrir la totalité de toutes les techniques possibles ; en son genre c'est peut-être Wagner qui recouvre le plus de possibilités et présente une simplicité exemplaire à suivre).

## CONSTATS CONCERNANT LES BANQUES DE DONNEES

Aucune décision ou confrontation ne peut se faire si l'on ne peut puiser dans une banque de données qui est le reflet des connaissances accumulées.

Ces banques de données sont à ce jour incomplètes, peu systématiques et pas uniformes.

Trop de données nécessitent encore d'être vérifiées et contrôlées. Cette vérification s'impose du fait que :

- Beaucoup d'affirmations trouvent leur origine dans d'autres disciplines et plus précisément la construction de routes et pistes et problèmes de fondations, disciplines ayant leurs propres spécificités et exigences (la construction de routes, par exemple, s'axe principalement vers la terre comprimée stabilisée de façon inhérente).

- Beaucoup d'affirmations trouvent leur origine dans des contextes spécifiques, ce qui influence déjà fondamentalement la façon d'identifier et d'interpréter les choses (autres normes, autres modes opératoires pour essais,...).

- Beaucoup d'affirmations trouvent leur origine dans une gamme de sols spécifiques et ne sont donc pas nécessairement généralisables (p.e. : Wagner a uniquement étudié les sols allemands ; la classification de Cassagrande a dû être étendue pour pouvoir inclure les sols britanniques,...).

- A ce jour on accentue trop les procédés du pisé, bloc comprimé et adobe ainsi que les stabilisants ciment, chaux et bitume et de surplus presque uniquement les procédés incorporant de façon inhérente la stabilisation. Il est donc évident que quasi toutes les données concernent ces techniques et ne sont donc pas nécessairement généralisables.

Trop de données nécessitent encore d'être identifiées :

- Il s'agira de trouver une classification cohérente englobant toutes les techniques disponibles.

- On pourrait éventuellement exiger des producteurs d'explicitier la conformité de leurs produits conformément à une méthode prédéfinie.

- Certains aspects nécessitent encore de la recherche dont notamment toutes les interrelations et certains tableaux décisionnels.

A ce jour, il manque également une méthode adéquate pour systématiser et inventorier les expériences accumulées pour ainsi créer un processus dynamique d'alimentation des banques de données, processus à deux composants : FEEDING et FEEDBACK.

A ce sujet nous mentionnons PCA, Soil Cement laboratory Handbook.

"A very helpful tool for the engineer in reducing soil-cement test work is the identification of soils by the Department of Agriculture soil classification system. In this classification system, soils are subdivided into groups called soil series... Identifying soils by series name is important in soil cement work because it has been found that soils of the same soil series and horizon require the same amount of cement for adequate hardening. Once the cement requirements of a given soil series and horizon has been determined by laboratory tests, another complete series of soil cement test is not needed for this particular soil series when it is again encountered. Thus by identifying soils by soil series, the need for conducting soil cement tests can be sharply reduced or eliminated for large areas. An increasing number of engineers is making use of this system of classification to reduce their soil cement testing work".

Nous croyons qu'une telle remarque est généralisable vers la construction en terre car celle-ci permettrait l'élaboration d'un fichier d'expérience et éviterait dans certains cas de refaire des essais ou même de refaire des erreurs déjà commises. Mais ceci n'a qu'un sens si les utilisateurs développent une certaine rigueur et systématique pour l'application et une certaine discipline afin de noter le suivi des expériences, notamment le comportement dans le temps. L'emploi de "soil series" permettrait également d'obtenir un outil idéal afin de juger la validité de certaines affirmations en effectuant des essais de contrôle sur toute une gamme de "soil series" préétablie. A ce jour, ceci semble utopique, mais sachant que des organismes tel que la FAO stimulent et incitent à l'établissement de cartes de sols (bien qu'à but agronomique) on pourrait étudier la compatibilité des cartes de sols pour leur emploi dans la construction en terre.

## CONSTATS CONCERNANT L'EAU

Une dernière remarque fondamentale s'impose :

La construction en terre est un mélange de terre, stabilisants, modifiants et d'eau que l'on va transformer en matériau de construction à l'aide d'un procédé de production et/ou de construction.

Chose étonnante, et les exceptions rares confirment cette règle, on ne retrouve quasi aucune information détaillée sur l'analyse et l'influence de la nature de l'eau employée qui constitue pourtant un des quatre composants primaires au sein du matériau de construction à produire.

## METHODE DE TRAVAIL

---

Cette étude est le résultat d'une analyse et interprétation critique partant d'une consultation bibliographique de documents, brochures, rapports et livres de différentes disciplines (agronomie, pédologie, géologie, géotechnique, construction en terre,...) et de différentes sources linguistiques (français, allemand, néerlandais, espagnol, anglais et portugais).

L'analyse et l'interprétation étaient principalement orientées vers la découverte de l'esprit des faits plutôt que vers la matérialité des faits et ceci parce que nous sommes convaincus que la connaissance des points de départ et objectifs idéologiques et pratiques est d'importance capitale pour permettre une appréciation des faits en tant que tels ainsi que pour formuler des recommandations. Négliger ces aspects, c'est comme errer dans les ténèbres.

Une telle lecture demande une interrogation permanente à l'aide d'une question simple et banale : QUI FAIT QUOI, COMMENT, POURQUOI ET OU ? Quel est le sujet, où veut-on en arriver, quels faits sont à l'origine de la recherche, qu'elle est l'origine de l'auteur, quelle discipline, quel contexte, pourquoi telle proposition et pas d'autres,... ? Bien entendu cette lecture "entre les lignes" fait appel à des impressions, spéculations et hypothèses. C'est "une façon de voir les choses".

Les résultats d'analyse et interprétation sont de longues listes et compilations concernant les essais d'identification, stratégies de décision et notions fondamentales ayant trait à la construction en terre et contenant des descriptions, confrontations entre auteurs, commentaires,...

Après la systématisation et structuration de l'information collectée par différentes tentatives de classification, nous avons procédé à l'établissement et le remplissage d'un organigramme de stratégie de décision à partir de l'identification, ce qui, compte tenu des remarques fondamentales formulées dans le liminaire et la préface, n'est pas chose évidente.

## STRUCTURE DU RAPPORT

---

La structure du rapport suit la logique d'un organigramme de stratégie de décision à partir de l'identification établi au courant de cette étude.

Chaque thème traité est premièrement situé au sein de cet organigramme qui servira de fil rouge. Ensuite le thème est pour ainsi dire radiographié séparément : descriptions, exemples, listes, commentaires et, où il s'est avéré nécessaire, recommandations et propositions, parfois même uniquement des recommandations et/ou propositions.

Le schéma de décision proposé transborde clairement des limites du cahier de charge de cette étude. C'est pourquoi le document reprend un deuxième diagramme ayant comme limite les termes du contrat.

Un organigramme, comme chaque compartimentage artificiel de réalités, de faits et de connaissances, déconnecte parfois certaines interrelations existantes et une ordonnance structurée place des phénomènes interactifs simultanés dans une suite logique également artificielle. Nous avons tenté au mieux de remédier cet artifice en incorporant suffisamment de renvois.

Puisque le rapport concerne plutôt l'esprit des faits que les détails des faits, nous avons cru opportun d'éliminer des descriptions détaillées de faits. Nous avons par exemple identifié 123 types d'essais d'identification. Un compte-rendu minutieux de ces essais ferait plutôt l'objet d'un autre type de document et nécessiterait par ailleurs une autre méthode de travail. Cette méthode consisterait à exécuter réellement les essais afin de mieux maîtriser la portée effective de leurs caractéristiques : durée, compétence nécessaire, degré de complexité, difficultés d'exécution et d'interprétation, représentation des résultats, disponibilité des ressources nécessaires,....

De plus, une appréciation de cette portée, nécessiterait au préalable un consensus général concernant les buts et objectifs idéologiques et pratiques poursuivis, ce qui, à ce jour, n'est pas le cas.

## STRATEGIES DE DECISION

## TROIS TYPES DE STRATEGIE DE DECISION

---

Il existe trois types de stratégie de décision, ayant chacun leur propre actualité, historique et potentialités de développement futur :

### **TYPE 1 : DECISION A PARTIR DE L'IDENTIFICATION**

Stratégie de décision concernant la convenance d'une terre aux procédés de construction, production et stabilisation à partir des essais d'identification de la terre.

### **TYPE 2 : DECISION A PARTIR DE "PROCEDE"**

Stratégie de décision concernant la convenance d'une terre à un procédé de construction et/ou production bien précis, avec ou sans apport de stabilisation, à partir des essais d'identification de la terre ou essais de mise au point.

Exemple : Dunlap W.A, US Air Force Soil Stabilisation.  
Index System, New Mexico, Air Force Weapons Laboratory 1975.

Ceci est un exemple de décision à partir de l'identification des propriétés d'une terre pour le procédé de compactage.

Cette méthode a pourtant comme inconvénient qu'elle part du point de départ qu'il faut ajouter des stabilisants et la gamme de stabilisants est réduite à l'emploi du ciment, chaux ou bitume.

### **TYPE 3 : DECISION A PARTIR DE "PROCEDE ET STABILISATION"**

Stratégie de décision concernant la convenance d'une terre à un procédé de construction et/ou production bien précis, avec apport inhérent de stabilisation (gamme de stabilisateurs bien précise, ou stabilisateur unique), à partir des essais d'identification de la terre ou essais de mise au point. Eventuellement on décidera pour l'emploi de modifiants.

Exemple : PCA, Soil-cement laboratory handbook, Stockie, PCA 1971.

Ceci est un exemple de décision à partir de l'identification des propriétés d'une terre et la confection d'éprouvettes pour le procédé de terre compactée stabilisée au ciment.

Bien que prévu initialement pour la construction de routes, elle pourrait éventuellement être transformée pour la construction en terre.

Bien entendu sous cette catégorie de type de stratégie de décision tombent tous les essais de mise au point directe p.e. : Proctor statique sur presse réelle et essais de performances,...

## SCHEMA GLOBAL DE DECISION

---

Il est possible de résumer le schéma global de la stratégie de décision à partir de l'identification des terres en grandes lignes comme suit :

### 1. COLLECTE D'INFORMATION A TROIS NIVEAUX

- propriétés de la terre,
- performances techniques requises du matériau mis en oeuvre,
- performances non techniques requises : éléments économiques, socio-culturels, typologies constructives, typologies architecturales,....

### 2. SELECTIONNER UNE GAMME DE TECHNIQUES POSSIBLES EN PARTANT DES PROPRIETES DE LA TERRE (GAMME 1)

- par techniques nous entendons : procédés de production et construction avec ou sans ajout de stabilisants et/ou modifiants,
- la sélection se fait à partir de tableaux de décision,
- si la confrontation entre les propriétés de la terre et les tableaux de décision ne mène à aucune technique envisageable, il faudra procéder à la prospection d'un autre site.

### 3. SELECTIONNER UNE GAMME DE TECHNIQUES POSSIBLES A L'INTERIEUR DE LA GAMME 1 EN PARTANT DES PERFORMANCES TECHNIQUES REQUISES (GAMME 2)

- la sélection se fait à partir de tableaux de décision confrontant d'une part la terre aux performances requises et d'autre part les techniques aux performances requises,
- si la confrontation ne mène à aucune technique envisageable, il faudra procéder à, ou bien, la prospection d'un autre site, ou bien, la modification de certaines priorités parmi les performances techniques requises.

#### 4. SELECTIONNER UNE GAMME DE TECHNIQUES A L'INTERIEUR DE LA GAMME 2 EN PARTANT DES PERFORMANCES NON TECHNIQUES REQUISES (RESULTATS FINAUX) (GAMME 3)

- la sélection se fait à partir de tableaux de décision,
- si la procédure ne donne aucun résultat, il faudra procéder à la prospection d'un autre site ou bien revoir les priorités parmi les performances aussi bien techniques que non techniques.

Dans la confrontation entre techniques et performances requises, il sera dans certains cas nécessaire d'effectuer des essais de contrôle de mise au point et une étude de faisabilité.

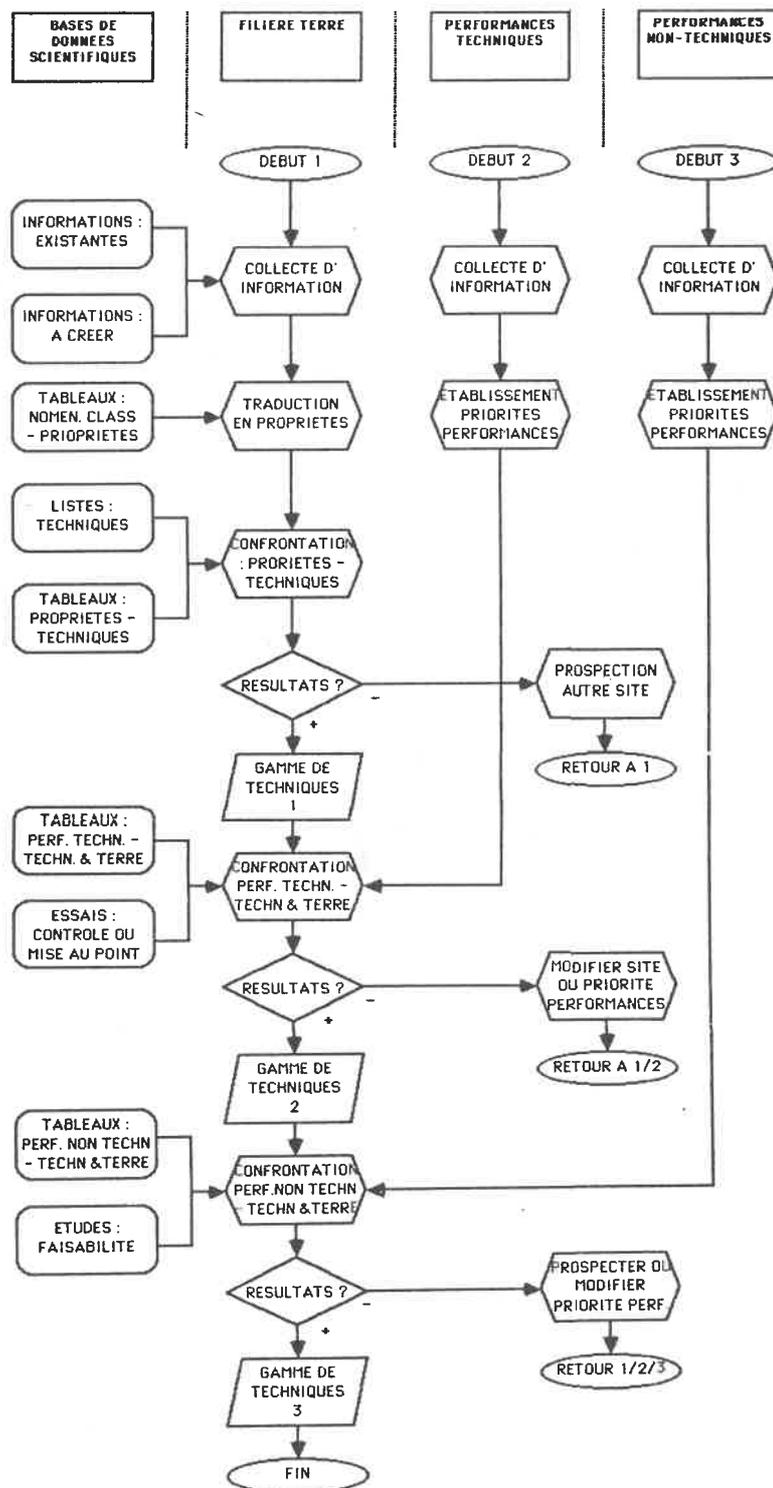
Il est important de faire remarquer ici que l'on ne peut limiter la valeur d'une technologie au seul caractère d'efficacité purement technique et c'est en questionnant consciencieusement le contexte d'application que l'on pourra situer les voies cohérentes de l'introduction d'une technologie selon une nature et des orientations résolument appropriées.

Des décisions ne devraient en aucun cas être prises, isolées de considérations économiques, commerciales, financières, organisationnelles, culturelles, écologiques etc... On peut être tenté de survoler le problème, voire même l'ignorer et se référer aux seuls critères plus aisément saisissables et à première vue plus rationnels d'efficacité technique et à un deuxième stade de viabilité économique.

Conscient de l'envergure de cette problématique, nous proposons pourtant de différencier ces critères en phases successives, ce qui va peut-être à l'encontre des constatations précédentes mais qui rend l'analyse plus facile et mieux structurée. C'est pourquoi nous traitons premièrement les critères technologiques pour ensuite en arriver aux critères non-technologiques qui regroupent les éléments économiques, sociaux, culturels et autres.

Les critères de la première phase sont donc essentiellement d'ordre technologique, les seconds d'ordre multidisciplinaire.

## SCHEMA GENERAL DE DECISION



## SCHEMA SPECIFIQUE DE DECISION

---

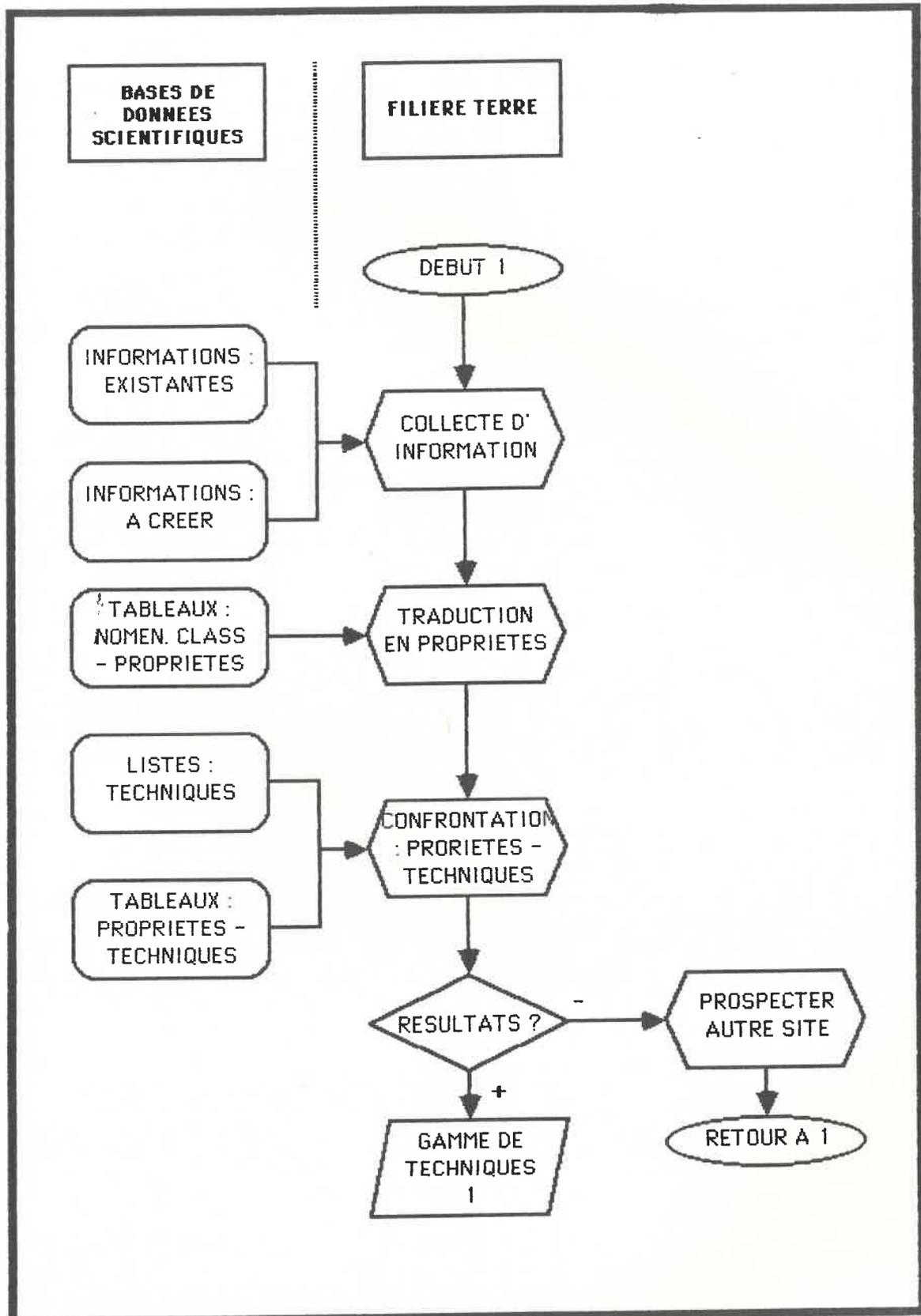
L'objet du contrat se situe au niveau du premier type de stratégie de décision :

### TYPE 1 : DECISION A PARTIR DE L'IDENTIFICATION

Stratégie de décision concernant la convenance d'une terre aux procédés de construction, production et stabilisation à partir des essais d'identification de la terre.

Le schéma général est donc fortement simplifié et se résume au schéma spécifique qui suit.

## SCHEMA SPECIFIQUE DE DECISION



## COLLECTE D'INFORMATIONS

## COLLECTE D'INFORMATIONS EXISTANTES

---

"Toute opération exige que l'on réalise une préétude de prospection sur le matériau utile : la recherche de carrière.

Une telle étude est à la fois basée sur la lecture d'un fonds documentaire, généralement disponible sous forme de cartes géologiques, pédologiques, etc... et sur une pratique de terrain et de laboratoire décrivant divers tests et essais réalisés sur des prélèvements d'échantillons. Les cartes géologiques et pédologiques donnent des indications précieuses sur la nature du substratum terrestre et décrivent les grandes familles de sols, permettant de situer des possibilités d'emploi des terres ou des inaptitudes fondamentales. Néanmoins, les informations issues de la lecture de cartes restent sommaires dans la mesure où elles ne font pas état des caractéristiques mécaniques qui intéressent directement la construction. Par ailleurs, la lecture des cartes requiert une compétence spécialisée de géologue ou de pédologue, au risque de faire des interprétations erronées. L'interprétation pour la construction est fondamentalement différente de celle qui prévaut pour l'agronomie ou l'écologie et bien qu'il y ait eu des tentatives visant l'établissement de codes d'interprétation des cartes pour la construction, celles-ci demeurent insuffisamment élaborées ou très peu connues des professions de la construction". (CRATerre-AGRA : Recherche exploratoire sur le matériau terre. Plan Construction. Ministère de l'Urbanisme et du Logement. Grenoble. 1983)

L'observation de l'environnement des facteurs générateurs de profils pédologiques (topographie, géologie, climat,...) ainsi que l'observation des résultantes des profils pédologiques (couverture végétale, eaux de surface,...) permettent également la reconnaissance des sols mais nécessitent une compétence qui à ce jour n'est pas encore mise sous forme compréhensive et systématique.

La collecte d'informations existantes est une phase préliminaire dans la stratégie de décision et consiste à chercher un maximum d'informations sans faire d'essais.

Dans le processus de décision, on sera confronté à :

- un site imposé,
- ou
- un site à choisir.

Dans les deux cas, on s'imposera de collecter un maximum d'informations existantes. Ceci permettra, ou bien de mieux connaître le site imposé et parfois même d'éviter de faire des essais d'identification, ou bien d'aider à la prospection d'un site approprié, s'il est à choisir.

Natures de l'information existante :

- géologie
- pédologie
- géotechnique
- hydrologie
- agronomie
- écologie

Formes de l'information :

- cartes,
- rapports,
- résultats,
- et/ou
- observation sur le terrain
- et/ou
- tests de labo
- tests de terrain
- et/ou
- nomenclature
- classifications

Exemples de formes d'informations :

- cartes géologiques
- cartes pédologiques
- résultats de sondages géologiques
- résultats de forage de puits d'eau
- cartes hydrologiques
- cartes agronomiques
- cartes géotechniques
- résultats d'analyses de champs de culture
- informations sur fondations
- observation du patrimoine
- résultats travaux publics
- intérieurs (agriculture, entrepreneurs,...)
- ...

Où se trouve cette information ? :

- offices publics
- internationaux
- nationaux
- et/ou
- locaux
- offices privés
- et/ou
- personnes privées

p.e. :

- FAO
- ministère des Travaux Publics
- ministère de l'Agriculture
- aménagements Publics
- office de préservation et de restauration du patrimoine
- entrepreneurs
- bureaux d'études
- ...

Dans ce qui suivra, nous traiterons uniquement les thèmes géologiques, pédologiques et géotechniques et ceci pour autant qu'ils ne recouvrent pas les essais d'identification d'une terre qui seront traités comme information à créer.

## COLLECTE D'INFORMATIONS A CREER

---

Dans le cas où l'information existante sur la terre d'un site spécifique est insuffisante ou inexistante, il faudra procéder à la création d'information à partir d'essais d'identification de la terre et prospecter sur le terrain même.

**INFORMATIONS EXISTANTES**

## INFORMATIONS PEDOLOGIQUES

---

La classification pédologique des sols est apparue à la fin du 19e siècle en Russie (entre autres par Dokuchaev) et fut ensuite plus développée aux Etats-Unis (ce qui explique la terminologie russe et anglaise), la France et l'Allemagne ayant également développé une terminologie propre.

Le Soil Survey des Etats-Unis a introduit en 1960 une nouvelle classification en partant de la constatation que les classifications existantes se basent principalement sur la génétique des sols (dont entre autres le climat) et qu'il est difficile de juger à partir d'un sol quels furent les facteurs déterminants de sa pédogénèse. Cette nouvelle classification, "7th Approximation", se base plus sur les caractéristiques visuelles qui ont bien entendu une origine génétique. Le 7th Approximation introduit tout en une série de nouveaux noms. D'autre part se développent des classifications similaires notamment FAO et Duchaufour. Il existe des tableaux de correspondance entre différents systèmes.

## INFORMATIONS GEOLOGIQUES

---

Les sources d'informations géologiques sont innombrables. Elles sont totalement hermétiques aux non professionnels, et leur utilisation pour des interprétations concernant la construction en terre demande une culture technique importante.

## INFORMATIONS GEOTECHNIQUES

---

Dans ce chapitre nous reprenons uniquement les éléments de prospection géotechnique qui ne recouvrent pas les essais d'identification repris plus loin et les cartes géotechniques et les classifications géotechniques. Ces deux dernières sont intéressantes car elles contiennent beaucoup d'informations utiles concernant les caractéristiques d'une terre.

Avant tout la question suivante doit être posée : mécanique des sols et construction en terre : une même cause ?

La construction en terre (sauf terre creusée et terre découpée) part d'un principe de remaniement de la terre.

La mécanique des sols part d'un sol non remanié comme donnée et ce n'est que dans certains cas que l'on procèdera à un remaniement soit en profondeur, soit dans une couche superficielle.

En mécanique des sols on est confronté à la présence d'une nappe phréatique maintenant à sa proximité la terre près de sa limite d'absorption ou de saturation. Cette nappe phréatique peut fluctuer ayant comme conséquence de larges variations de teneur en eau. En mécanique des sols, on doit également prendre en considération des mouvements verticaux et horizontaux d'eau. Pour la construction en terre, on est confronté à un tout autre régime concernant la teneur en eau. Il y a une certaine teneur en eau de fabrication et après séchage une teneur en eau qui, supposant que la production et la construction soient bien exécutées, sera plus faible ayant généralement comme conséquence que les tensions imposées à la terre ne subiront pas d'influence majeure de tensions interstitielles de l'eau. En principe la structure en terre ne devrait jamais se trouver à un stade de saturation.

Les contraintes tridimensionnelles diffèrent également : en mécanique des sols on est en présence d'une masse de terre capable de créer des tensions de contraintes de support ( $\sigma_2 = \sigma_3 \neq 0$ ) tandis qu'en construction en terre, on est confronté à des masses de terre ayant une des dimensions bien déterminée que l'on ne peut plus supposer indéfinie (ce qui revient presque à dire, toute exception prise en compte, que l'on pourrait considérer  $\sigma_2 = 0$ ).

En mécanique des sols, un sol sec pulvérulent présente une portance considérable, en construction en terre, un sol sec pulvérulent n'est pas stable sous son propre poids.

Transposer des conclusions et résultats de mécanique des sols à la construction en terre, impose donc une certaine prudence.

Exemple : Indice de groupe G basé sur le système de classification américaine des sols (Highway Research Board et ASTM).

L'on considère que dans des conditions moyennes avec un bon drainage ainsi qu'une mise en place correcte, un indice de groupe 0 indique que l'on a affaire à un très bon sol et un indice de groupe 20 un mauvais sol.

Les sols A.2.4 et A.3 seront donc considérés comme excellents à bons et un sol A.6 comme passable ou mauvais.

En construction en terre un sol A.6 (sol argileux) sera acceptable à bon (p.e. pour adobe) et le sol A.4 (sable fin) ne présentera presque aucune cohésion et ne sera pas stable.

On peut donc conclure que dans le domaine de l'identification, la construction en terre et la mécanique des sols présentent une convergence mais dans le domaine de stratégie de décision une divergence. Pourtant dans certains cas, on a littéralement transposé des résultats d'un domaine à l'autre. Exemple : le US Air Force Weapon Laboratory a développé une stratégie de décision pour la construction de pistes d'envol et quelques temps plus tard Dunlap W. propose ce même système pour la construction en terre.

## CARTES GEOTECHNIQUES

En Belgique, le "Rijksdienst voor Grondmechanica" établit des cartes géotechniques (p.e. : ville de Bruxelles). Ceci est un travail laborieux qui donne des résultats très intéressants au niveau local mais à notre sens, peu maniable à l'échelon national et international vu l'énorme quantité de documents nécessaires pour recouvrir un site (p.e. : 7 cartes par site plus manuel explicatif).

Ingles et Metcalf parlent également de l'existence de cartes spécifiques en Australie :

- Stephens : classification de sols australiens, 50 types, échelle 1 : 5 000 000 ; il existe pourtant des cartes plus détaillées qui peuvent intéresser les ingénieurs.
- Northcote : classification de sols australiens, échelle 1 : 2 000 000, utile pour l'ingénierie car la classification est principalement basée sur la texture des sols, couleur, acidité,...

- Grant : utilise les principes et concepts du Northcote mais spécialement pour l'ingénierie à une échelle plus réduite : 1 : 250 000. L'hypothèse fondamentale de ce système repose sur la constatation que des situations physiographiques de terrain similaires produisent des sols similaires (ce que l'on retrouve en pédologie).

L'emploi de cartes géotechniques est très intéressant mais également très restreint à cause de leur quasi inexistence en comparaison aux cartes pédologiques et géologiques.

## ELEMENTS DE PROSPECTION

Les essais d'identification sont à peu de choses près les mêmes pour la construction en terre et la mécanique des sols, mis à part que l'échantillon sur lequel on effectue les essais peut être différent.

Ce qui nous paraît très intéressant c'est la classification des sols et la prospection sur le site car il arrive fréquemment que des projets de construction en terre se situent près de chantiers routiers : la connaissance et l'interprétation des analyses routières peuvent déjà fournir assez d'informations afin d'éviter des recherches d'identification coûteuses.

ESSAIS DE TERRAIN spécifiques à la mécanique des sols :

- forage et sondage "terre" :

- tige de sondage simple
- sondage dynamique
- sondage statique
- vane-test
- pressiomètre
- essai de plaque
- ...

- essais géophysiques :

- méthode gravimétrique
- méthode magnétique
- méthode électrique
- méthode sismique

- forage "eau" :

- essais de Lugeon
- niveau d'eau dans le trou de forage : méthode hauteur constante, méthode hauteur variable
- essai de pompage

Les essais permettent d'apprécier la qualité du sol dans son environnement naturel non remanié. Il est donc possible d'obtenir une idée de la nature de la terre mais celle-ci ne coïncide pas nécessairement à celle d'une terre remaniée que l'on utilisera pour la construction en terre puisque jouant dans l'interprétation des effets de compacité et de teneur en eau dans le profil ainsi que des caractéristiques de site (fissures, nappe phréatique, anomalies,...).

ESSAIS DE LABORATOIRE (effets capillaires) spécifiques à la mécanique des sols :

- succion, pression atmosphérique,
- succion, pompe à vide
- succion, centrifuge
- dessiccation
- balance d'absorption
- khc (perméabilité et succion)

Ces essais effectués sur des échantillons non remaniés ont pour but d'identifier le comportement du sol dans son milieu naturel vis-à-vis de l'eau. Ils peuvent donner une idée de la nature du sous-sol mais nécessitent une interprétation et une traduction correctes des résultats vers des applications de construction en terre.

## CLASSIFICATIONS

Liste de classifications géotechniques :

- Rijkdienst voor Grondmechanica (B)
- US Corps of Engineers (USA)
- Highway Research Board (USA)
- Ni Tu 127 - 55 (USSR)
- Unified Soil Classification (USA)
- Northcote (AUS)
- Grant (AUS)
- Casagrande classification system (GB)
- US Public Roads Administration Classification (1945) (USA)
- Civil Aeronautics Administration Classification System (USA)

- Burminster's method of descriptive soil classification (American Society for Engineering Education) (USA)
- Textural classification charts :  
p. ex. : US bureau of soils systems, TNO, Meurice, Fitzmaurice, Meubauer, INRA,...
- AASHO (USA)
- USSCS (USA)
- P & C (F)
- Diagramme de Casagrande
- Diagramme de Hogentogler
- ASTM D 3282 - 73
- Classifications granulométriques :  
p. ex. : International Society of Soil Sciences, Atterberg, US Department of Agriculture, British Standards Institution, DIN,...

Parmi les classifications géotechniques diverses, nous retrouvons une quantité innombrable de noms, mais à peu de choses près, ils indiquent souvent la même chose.

Pourtant il est nécessaire de faire quelques remarques concernant :

- l'origine du système de classification
- le but initial du système de classification

Ingles et Metcalf illustrent le danger qu'il existe d'extrapoler un système de classification hors de son contexte d'origine (en Australie la teneur moyenne en matières organiques est plus basse qu'aux USA et nécessite donc une classification propre à l'Australie).

AASHO est initialement destiné au "Highway engineering" et USSCS à l'agriculture. L'indice de groupe ( $I_g$ ) de ASTM est destiné au traitement des sols dans des travaux routiers et perdrait son sens en construction en terre.

Il existe également plusieurs versions d'un même système, ce qui nécessite donc une certaine attention; : p.e. :

- US Public Roads Administration Classification, version 1942 et version 1945
- USSCS et P & CH : même système mais autres notations ( $G_M \neq G_m$ )
- USSCS et P & CH comparés à Casagrande révisé : ce dernier système contient cinq catégories de plus

Un document qui donne un aperçu des systèmes américains et anglais illustre parfaitement ces différences : "Soil mechanics for Road Engineers", RRL, Londres, 1952 :

Les divers systèmes de classification se basent principalement sur :

- texture
- texture et limites de consistance (limite de plasticité et de liquidité)

Quelques variantes intéressantes étudient également selon le cas :

- limite de plasticité et de liquidité dans les conditions naturelles et après séchage au four (Casagrande)
- limite de retrait, équivalent de teneur en eau naturelle et équivalent de teneur en eau centrifuge (US Public Roads Administration Classification, version 1942)
- changement de volume à l'équivalent de teneur en eau naturelle, remontée capillaire, California Bearing Ratio à l'immersion (Civil Aeronautics Administration, original 1945)
- densité sèche maximale (Compaction Classification Woods)
- coefficients de texture  $\frac{d_{30}}{d_{60} \cdot d_{10}}$        $\frac{d_{10}}{d_{60}}$   
(US Corps of Engineers)
- ...

Les caractéristiques suivantes ne sont généralement pas prises en considérations :

- cohésion
- minéralogie
- chimie (sauf matières organiques)
- indice d'activité

Selon "Stabilised Soil", Glasgow, UK 1979, les systèmes de classification selon le comportement mécanique peuvent être appliqués avec succès sur des sols de régions tempérées mais les modes d'essais peuvent induire des erreurs lorsqu'il s'agit de sols tropicaux et subtropicaux (p.e. : latérite).

Les systèmes P & CH et USSCS paraissent intéressants (exceptés pour les réserves exprimées plus haut) puisqu'ils permettent aussi bien l'analyse par essais de terrain (essais visuels et sensoriels) que l'analyse par essais de laboratoire. (Il faut pourtant reconnaître que le système de Casagrande (version modifiée) contient 5 subdivisions de plus et que ceci n'a pas été proposé de façon arbitraire mais pour mieux s'adapter aux sols britanniques. Il faudrait donc contrôler quels essais de terrain permettent de reconnaître ces nouvelles catégories). Ces systèmes de classification permettent donc d'obtenir une première impression rapide de la nature du sol et des applications possibles, mais nécessitent quand même une description plus détaillée pour mieux situer un sol à l'intérieur de son groupe.

Le "Earth manual" US Dep. of the Interior, 1974 USA propose l'emploi du Unified Soil Classification System dans sa version originale (15 types de sols), mais ce qui semble plus intéressant, ce sont les remarques formulées dans ce document :

- Le USCS ne doit pas être perçu comme en conflit avec d'autres systèmes. Au contraire, il faudrait encourager d'employer le USCS en complément avec des systèmes géologiques, pédologiques, texturaux et termes régionaux.

Le "Earth manual" propose une procédure générale de classification des sols composée de trois étapes :

I) Identification des propriétés de la terre

- méthode visuelle de terrain
- méthode de laboratoire

II) Le sol sera catalogué et désigné par un nom de groupe du USCS

III) Afin de différencier les sols faisant partie d'un même groupe on fera une description du sol et cette description dépendra de l'emploi auquel on veut destiner le sol.

Ces remarques sont assez capitales.

## CRITIQUES

---

Il y a des noms de provenance géotechnique, pédologique, géologique, agronomique et il y a des noms spécifiques (p.e. : terra Rossa, latérite,...) et des noms d'origine locale (p.e. : torba,...).

La plupart des noms employés proviennent d'un système de classification ayant un but bien précis. Exemples :

- géologie (but : propriétés d'exploitation de carrières,...) : reconnaissance de la disposition spatiale de différents types de sols reliée à une situation et origine temporelles. L'argile d'Ypres est une argile alluviale sédimentée dans une période bien précise et que l'on retrouve à certains endroits en découvert et à d'autres ensevelie par les déformations d'origine géologique. Argile de Boom,...
- géotechnique (but : stabilité, rhéologie, perméabilité, fondations, routes,...) : reconnaissance de types de sols pour l'emploi comme fondation et/ou base de routes, pistes, etc..., afin de permettre la construction d'oeuvres d'art : bâtiments, ouvrages routiers, ouvrages hydrologiques,... Exemples : sable propre bien gradué (USCS et P & ÇH), sols limoneux (AASHO), limon maigre (Wagner),...
- pédologie, agronomie (but : fertilité, perméabilité, complexe absorbant,...) : reconnaissance de types de sols pour emploi agronomique et/ou hydrologie (irrigation,...) exemple : podzol, histosol (FAO), sol fersialitique (Duchaufour).

Chaque nom donné correspond donc à des propriétés bien précises en vue d'un type de performances bien précises (texture, structure, capacité d'échange cationique, plasticité,...).

En principe ces propriétés (définition et principe de mesurage) pourraient être universelles à condition que :

- le seuil de précision soit le même,
- la dénomination de la propriété n'inclut pas de jugement sur cette propriété (p.e. : un sol stable a une autre connotation pour un géotechnicien que pour un agronome).

Ces deux conditions font qu'à ce jour, on ne peut parler de système universel puisque les classifications existantes sont trop liées à un but et emploi bien précis.

Exemple : classification géotechnique P & CH et USCS : "Sable propre bien gradué".

Le mot "sable" provient d'un critère de texture et n'est donc pas nécessairement égal au quartz.

Le mot "propre" comporte un jugement très spécifique parce que pour une base de route il est plus facile d'employer une terre ne contenant pas trop de particules fines (problèmes de compactage, stabilité, drainage,...).

Le mot "propre" a dans ce cas une connotation de "bien" et le mot "sale" de "mauvais". Pour la construction en terre, on pourrait imaginer l'inverse : ce que l'on appelle ci-dessus propre sera moins approprié que le sable sale (donc propre = mauvais et sale = bon).

Les mots "bien gradué" comportent un jugement. lié à une application précise.

Les mots "uniforme, continu, hétérogène" sont beaucoup plus neutres.

Autre exemple : classification AASHO

Les chiffres de 1 à 7 (A1, A2,... A7) n'ont pas été choisis de façon arbitraire, ils comportent également un jugement allant de bon à mauvais d'un point de vue géotechnique : construction de routes.

Un même sol, une même terre peut donc être caractérisée par différents noms. Ces différents noms peuvent subsister l'un à côté de l'autre à condition que :

- l'on mentionne l'origine du nom
- l'on soit conscient des propriétés reliées à ce nom
- l'on soit conscient des jugements reliés à ce nom

## PROPOSITIONS

---

### COURT ET MOYEN TERME

- Classification géotechnique : nous proposons à court terme la classification des Ponts et Chaussées puisque celui-ci permet une identification rapide de chantier et détaillée de laboratoire. Pourtant à moyen terme, il faudrait analyser si le "extended Cassagrande Soil Classification" n'offre pas plus de possibilités à cause de l'ajout de plusieurs classes. Ce système de classification ne doit pas être considéré comme en conflit avec d'autres systèmes de classification mais comme un complément. Il faudrait encourager l'emploi de dénominations supplémentaires du type géologique, pédologique, texture et noms locaux. Ce système ne doit pas être considéré comme une substitution de ces nomenclatures supplémentaires.

- Classification agronomique et pédologique : nous proposons de choisir le système offrant le plus de potentialités d'usage aussi bien à court terme qu'à moyen terme. Par exemple Duchaufour est peut-être plus exact mais il existe à ce jour plus de cartes selon le système FAO.

### LONG TERME

- Vérification des interrelations entre différents systèmes.

- Proposition d'un système universel : contenant plusieurs niveaux (niveau universel et niveau spécifique selon le but : pédologique, géotechnique). Le niveau universel ne peut contenir des connotations enfermant un jugement et doit contenir un seuil de précision universel offrant assez de flexibilité pour différents emplois.

- Elaboration d'un glossaire multilingue et de tableaux de conversion.

### PRODUIT FINAL

En général nous croyons que la classification pédologique et les cartes pédologiques sont des instruments qui offrent le plus de possibilités et de potentialités.

Les utilisateurs concernés ne seraient donc plus seulement les agronomes mais également des "constructeurs" (génie-civil + construction en terre).

"Ainsi, une telle orientation destinée à mettre au point un outil de prospection des terres par la lecture des cartes mériterait d'être développée et pourrait donner lieu à l'élaboration d'un manuel pratique rassemblant une codification originale des terres à bâtir et une méthode de lecture qui renverrait spécifiquement les professionnels aux exigences posées par la construction en terre sur la qualité des sols. Ce manuel ferait également état d'un effort visant à mettre à la portée du plus grand nombre des langages et un vocabulaire jusqu'à présent très hermétiques". (CRATerre-AGRA : Recherche exploratoire sur le matériau terre. Plan Construction. Ministère de l'Urbanisme et du Logement. Grenoble. 1983).

## INFORMATIONS A CREER



Et pour 100 maisons de :

80 m x 100 m                   jusque                   40 m x 50 m

Somme toute, la grandeur des sites à explorer est relativement faible.

La proposition consiste donc à déployer une trame d'analyse du site de 5 m sur 5 m avec la procédure suivante :

1 - On commence premièrement par l'extraction à l'aide d'une tarière à main, à un endroit central où l'on envisage de prospecter.

2 - Analyse visuelle et sensorielle de la terre extraite par la tarière à différentes profondeurs et classification de terrain provisoire (un prospecteur expérimenté peut déjà décider s'il faut continuer).

3 - Déploiement de la trame 5 m x 5 m

4 - Aux croisements de la trame autour du point central, on effectue des sondages à l'aide d'une tige que l'on enfonce dans le sol (nombre de coups de marteau pour faire descendre de 10 cm). On effectue ceci autant de fois que nécessaire par rapport à la grandeur du chantier à des intervalles de 10 m. Ceci permet de découvrir l'homogénéité du terrain.

En cas d'hétérogénéité flagrante, on cherchera un autre emplacement et on recommencera avec 1, sinon on continue.

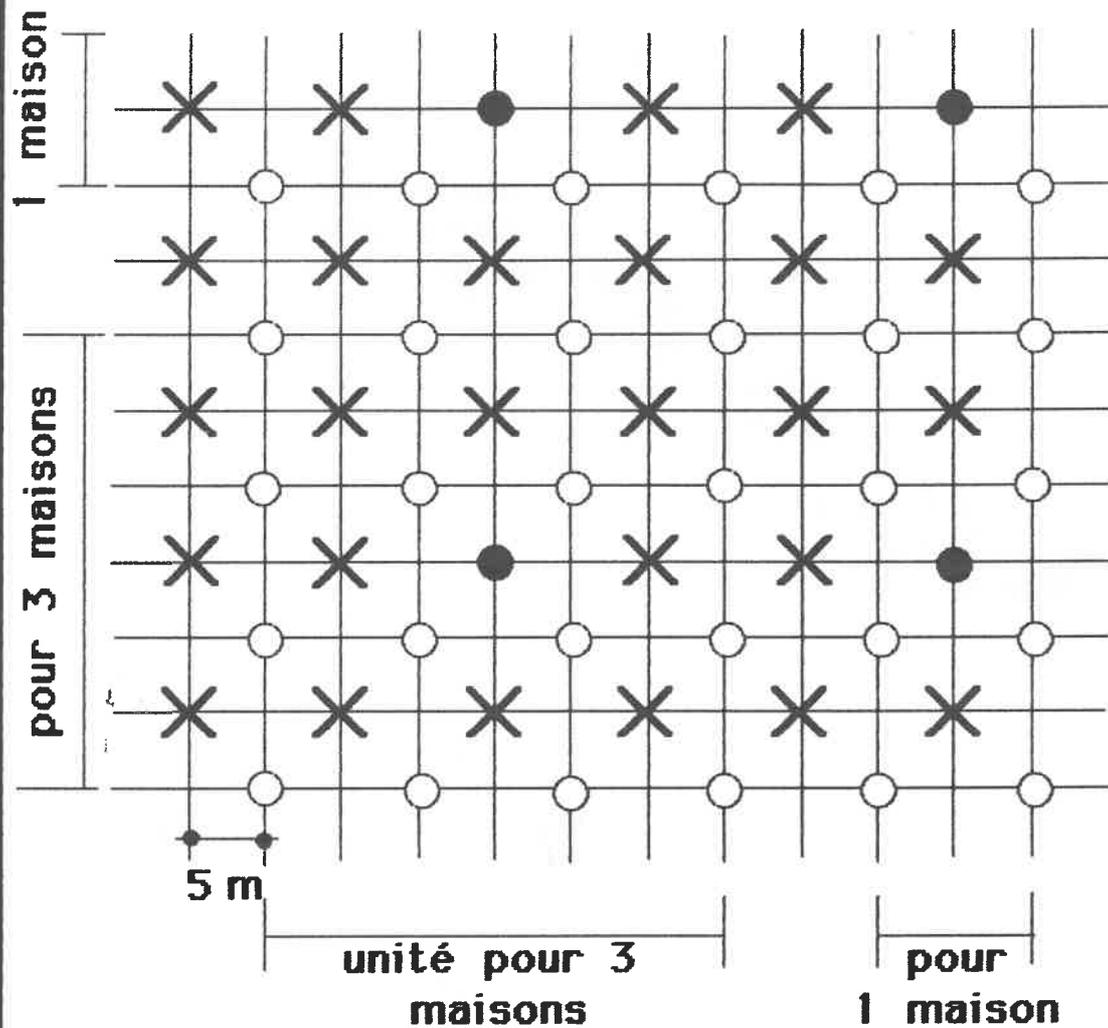
5 - Aux croisements restants de la trame à intervalles de 10 m, on effectue des extractions supplémentaires à l'aide de la tarière.

6 - Analyse par point, visuelle et sensorielle de la terre extraite et classification de terrain provisoire.

Si des essais complémentaires sont nécessaires afin d'identifier avec certitude la terre extraite, on passe à 7.

7 - On creuse un trou au point central (1 m x 1 m) afin d'extraire la quantité de terre nécessaire pour effectuer des essais et on observe le profil pédologique.

## METHODE DE PROSPECTION DE TERRAIN



### Légende :

- Creusage de puits :
  - Description de profil
  - extraction manuelle d'échantillon
- X Extraction d'échantillon par tarière
- O Sondage par tige

## ECHANTILLONS

Nous croyons inutile de gaspiller du temps, de l'énergie et de l'argent pour prélever des échantillons non remaniés dont nous ne reconnaissons pas l'utilité vu que, sauf quelques exceptions faites (terre creusée et terre découpée), tous les procédés de production et de construction en terre ont, comme principe inhérent de leur processus, un remaniement de la terre.

Nous retenons donc deux types de prélèvements :

- creusage de puit et prélèvement par extraction horizontale
  - forage par trarière à main
- (Dans le cas du creusage le puit servira également pour l'identification du profil)

L'outillage peut varier de la simple pelle (peu précis) à la trarière à main et au tube de prélèvement (principalement pour sols peu cohésifs).

Le prélèvement à l'aide d'une pelle est à rejeter dans le cas de profils très différenciés. Le forage par trarière à main est une procédure simple mais qui ne permet pas toujours de prélever suffisamment de quantité d'échantillon. C'est pourquoi nous proposons ce forage pour le contrôle rapide de l'hétérogénéité du site et une analyse visuelle et sensorielle de la terre extraite.

On prendra soin de repérer exactement le lieu de chaque prélèvement en trois dimensions et chaque échantillon devra être étiqueté. Il serait préférable d'examiner immédiatement certaines caractéristiques : aspect, couleur, teneur en eau,... et de remplir une fiche de prélèvement.

Pour la teneur en eau, il vaut mieux employer une méthode de terrain rapide et moins précise, que de prendre toutes les précautions nécessaires et difficiles afin d'éviter le dessèchement pour mesure au laboratoire. Dans ce cas il s'agit d'estimer si le but poursuivi légitime les moyens employés.

Quelle terre extraire ?

Le problème se pose dans le cas où le sol montre un profil différencié (différentes caractéristiques à différentes profondeurs).

1) Supposons que le sol montre trois couches très distinctes A, B, C (on élimine la couche végétale, humifère) avec épaisseurs successives X, Y, Z.

Selon une première méthode, on prend un échantillon de chaque couche et on effectue des essais sur chaque échantillon séparément (donc A, B, C).

Selon une deuxième méthode, on prend un échantillon de la couche A, B, et C et on effectue des mélanges proportionnés :

- mélange 1 : A uniquement
- mélange 2 : X fois A et Y fois B
- mélange 3 : x fois A, Y fois B et Z fois C

On effectue ensuite les essais sur les mélanges obtenus (donc 1, 2, 3).

Cette deuxième méthode a l'avantage de prendre en considération des réalités de chantier notamment la procédure d'extraction de terre :

- Si les essais démontrent que la couche A est à rejeter, sur le chantier on prendra rarement la peine de l'éliminer.
- Dans la plupart des cas le creusage et l'extraction se font dans un "trou" en première instance vertical ou dans une paroi que l'on évidera progressivement dans un sens horizontal. La terre de différentes couches sera donc mélangée.

II) S'il n'y a pas de couches très distinctes, on pourrait procéder de la façon suivante (après élimination de la couche végétale, humifère) :

- ± échantillon A : 0 - 50 cm
- échantillon B : 50 - 100 cm
- échantillon C : 100 - 150 cm

Selon la première méthode, on effectuera des essais sur A, B, et C selon la deuxième méthode sur des mélanges A, A + B, A + B + C.

Quantité de terre à prélever ?

La quantité à prélever dépend :

- des essais à effectuer
- de la précision désirée
- du coût et des frais de transport

Exemples : réf. Peltier : "manuel du laboratoire routier"

- D = dimension du plus gros élément en mm
- P = poids de l'échantillon à prélever en g

Essais groupés (analyse de texture, limites de consistance, poids spécifique, matières organiques)

300 D < P < 600 D  
minimun fraction mortier = 800 g

Proctor

Si D < 5 mm	=>	P = 2 700 g
S < D < 20 mm	=>	P = 5 500 g
D > 20 mm	=>	P = 10 000 g
(- 25 % > 20 mm)		

C.B.R.

D < 20 mm	=>	P = 5 500 g
D > 20 mm	=>	P = 10 000 g (- 25 % > 20 mm)

## ESSAIS D'IDENTIFICATION

---

Les essais d'identification repris dans ce chapitre sont essentiellement d'ordre géotechnique et pédologique.

Nous avons délibérément éliminé tous les essais que l'on effectue sur des éprouvettes confectionnées qui sont des essais de mise au point du produit final ainsi que tous les essais appartenant aux types de stratégies de décision à partir de "technique" ou "technique et stabilisation".

### NOMENCLATURE GENERALE

Nous constatons à ce jour une énorme confusion de langage entre les auteurs.

Il est absolument prioritaire de standardiser la nomenclature employée :

- définitions de mots et de notions
- choix de symboles pour indiquer certaines notions textuellement
- choix de symboles pour indiquer certaines notions graphiquement

Pourtant, l'élaboration d'une telle nomenclature n'est pas chose simple puisque celle-ci nécessite à priori un choix entre des options différentes s'adressant à des buts différents.

Exemple : Moisture content (RRL) (teneur en eau) : "the loss in weight, expressed as a percentage of the dry material, when a soil is dried to constant weight at 105° C." Principe fondamental de mesure : l'étuvage.

Dans le chapitre relatif aux essais de mesure de teneur en eau, nous indiquons que le résultat obtenu dépend de la façon de mesurer et que certains types d'essais s'apprêtent plus au chantier, d'autres plus au laboratoire.

Le choix de l'étuve est une option de laboratoire, mais on pourrait aisément opter pour une méthode de chantier rapide : le Speedy Moisture Tester.

Certains diront que cet essai n'est pas assez précis, c'est vrai, mais tout dépend du seuil de précision requis et de l'essai auquel on le compare : on compare le speedy moisture à l'étuvage (105°) qui a été défini comme étant correcte. Ceci dit, tout est relatif et dépend de choix décisionnels qui dépendent directement de la stratégie de développement de la construction en terre et donc des décideurs eux-mêmes.

Nous proposons donc à court terme de se référer aux normes existantes dans le domaine géotechnique et d'élaborer un glossaire multilingue. A moyen terme, il faudra procéder à des choix décisionnels entre options fondamentales. A long terme, on procédera au développement d'une nomenclature adaptée à la construction en terre et aux objectifs poursuivis. Cette nomenclature devrait également contenir des tableaux de concordance entre le système développé et le système en vigueur à ce jour.

## LISTE DES ESSAIS D'IDENTIFICATION

---

(NOTE PRELIMINAIRE : puisque beaucoup d'essais nécessitent la connaissance de la teneur en eau et le poids spécifique nous avons également inclus ces essais).

### TEXTURE

- examen visuel
- essai de morsure
- essai de toucher
- essai de lavage
- essai de l'éclat
- essai d'adhérence
- flacon de sédimentation
- décantation
- test de résistance à sec
- test de ressuage
- test du cordon
- test du ruban
- ‡ tamisage humide : essai classique
- ‡ sédimentométrie (aéromètre, Peltier, Boyoucos, Casagrande : essai classique)
- tamisage sec
- sédimentométrie calibrée
- méthode du siphonage
- sédimentométrie selon Atterberg
- méthode de la pipette (Andreassen)
- méthode de "goutte en chute"
- équivalent de sable
- équivalent de sable, essai modifié
- essai granulaire rapide (Tran)
- le granulomètre à laser
- coefficients dérivés : D10, D30, D50, D60, Cu, Cc, u,  $\bar{X}$
- module de finesse, teneur en filler, teneur en limon, surface spécifique U, diamètre spécifique  $d_s$
- essai de teneur en quartz (Meurice)
- méthode par lévigation
- cyclonage : cyclosizer
- élutriation - centrifugation
- balance Martin ou SEDIGRAPH 200
- SEDIGRAPH 5 000 : rayons X

- analyseur d'image avec comptage automatique des particules
- méthode densimétrique Mériaux
- méthode Coulter
- ...

## CONSISTANCE

- limite de retrait : essai classique
- limite de plasticité : essai classique
- limite de liquidité : essai classique
- limite d'absorption : essai classique
- limite d'adhérence : essai classique
- Pfefferkorn
- tube de plasticité
- pénétromètre de plasticité
- aiguille de consistance
- Alcock "box" test
- essai de retrait modifié
- limite de plasticité : essai modifié
- limite de plasticité : test du rouleau
- le rhéographe de Bomble
- coefficients dérivés :  $I_p$  (indice de plasticité), indice de consistance, indice de liquidité, coefficient d'activité
- ...

## COHESION

- essai du huit, traction humide : essai classique
- essai triaxial
- boîte de Casagrande
- appareil de Hvorslev
- scissomètre
- ...

## COMPACTIBILITE

- essai Proctor normal
- essai Proctor modifié
- essai CBR
- essai proctor statique
- méthode de Dieter
- méthode de Harvard
- méthode de vibration de Zane

- indice de compactage : coefficient dérivé
- ...

## MINERALOGIE

- test d'Emerson
- diffraction par rayons X (Mg - Saturated, air-dried)  
Mg - Saturated, glycerol - solvated)  
K - Saturated, air - dried)  
K - Saturated, heated (500°C))
- analyse thermique différentielle
- analyse thermogravimétrique
- dilatométrie
- microscope électronique
- absorption infrarouge
- microscope de polarisation
- capacité d'échange cationique (CEC) par percolation à l'acétate d'ammonium
- capacité d'échange cationique par percolation à HCl (0,05 N)
- surface spécifique par méthode de rétention éthylène-glycol
- bleu de méthylène
- observation de profil pédologique
- Δ observation de l'environnement :
  - facteurs générateurs (géologie, topographie, climat,...)
  - facteurs résultants (couverture végétale, eaux de surface,...)
- ...

## CHIMIE

- dosage du magnésium échangeable au jaune de titane
- calcimètre Bernard (calcaire total)
- méthode Drouineau (calcaire actif)
- dosage du fer libre (méthode DEB modifiée)
- dosage de l'alumine échangeable (Jackson)
- dosage de l'azote ammoniacal et nitrique (Drouineau et Gouny)
- dosage du phosphore assimilable (ENEF)
- méthode Barbier (K assimilable)
- dosage du manganèse échangeable (méthode Wilde et Vogt modifiée)
- mesure pH : papier pH
- mesure pH : méthode colorimétrique
- mesure pH : méthode électrométrique
- mesure sels solubles : lessivage et cristallisation
- mesure sels solubles : lessivage et perte de poids

- mesure sels solubles : lessivage et dépistage chimique (plusieurs méthodes)
- carbonates : méthode différence de poids
- méthode volumétrique (Dietrich - Fruhling - Bernard)
- carbonates : méthode titrimétrique (Schollenberg, Hutchinson et Mac Lemon)
- sulfates : méthode gravimétrique
- sulfates : méthode turbidimétrique
- chlorures :  $\text{Ag NO}_3$  et  $\text{HNO}_3$  (plusieurs variantes)
- humus : perte au feu
- humus : méthode du bichromate (titration)
- humus : NaOH
- humus : essai du cordon
- humus : chauffage
- humus : odeur
- pH sol ciment
- pH sol chaux
- ...

#### TENEUR EN EAU

- étuve 60 °C
- étuve 105 °C
- infrarouges (CENCO soil test moisture meter)
- brûlage à l'alcool
- brûlage poêle
- méthode du pycnomètre à air différentiel
- méthode du pycnomètre à eau
- carbure de calcium (speedy moisture)
- bain de sable
- méthode neutronique (humidimètre de sonde neutronique)
- résistance électrique (p.e. Boyoucos Moisture meter)
- méthode de mélange azéotropique
- méthode par séchage à l'air chaud
- méthode basée sur la relation : "Teneur en eau - succion"
- méthode par mesure de la diffusion de la chaleur
- ...

#### POIDS SPECIFIQUE

- pycnomètre à eau
- ...

Nous avons donc, au courant de cette étude, pu identifier 123 essais d'identification dont en pratique l'on retrouve encore pour chaque essai plusieurs variantes qui diffèrent selon l'appareillage employé ou le mode opératoire.

## TEXTURE

---

L'essai d'identification de la texture consiste en l'analyse et la représentation de la quantité centésimale (poids ou volume ; cumulée ou différentielle) des différentes fractions de grains donnant ainsi une idée de la texture de la terre analysée, la texture étant la composition granulaire d'une terre.

Il faut pourtant dès à présent indiquer que pour certaines terres l'identification de la texture est inadéquate (p.e. : tourbes, craies, marnes,...) car, pour ces terres, il n'existe aucune relation entre texture et composition chimique.

La texture telle que mesurée aujourd'hui ne donne à elle seule que deux informations :

- répartition des particules de terre non cohésive ( $> 60 \mu$ )
- répartition des particules de terre cohésive ( $< 2 \mu$ )

Les particules se trouvant entre ces deux limites nécessitent de l'information supplémentaire afin de juger leur qualité, notamment les qualités cohésives et de consistance.

Selon les essais classiques d'aujourd'hui, la texture d'une terre se mesure généralement par tamisage pour les fractions de grains grossiers et par sédimentométrie pour les fines argileuses. A côté de ces essais de laboratoire existent des essais de terrain permettant de juger de façon simple sur le terrain l'importance des différentes fractions. Ces essais de terrain restent indispensables pour obtenir une première idée des caractéristiques de la terre assez rapidement et sont donc intéressants pour la prospection.

Les essais de laboratoire classiques sont le tamisage par voie humide et la sédimentométrie.

Le tamisage humide a pour principal inconvénient que, pour estimer le poids des différentes fractions, il faut sécher ces fractions, ce qui est une opération de longue durée. Un deuxième inconvénient est d'ordre théorique : ce qui nous intéresse est plutôt le volume des fractions au lieu du poids.

L'essai sédimentométrique a pour inconvénient d'être de longue durée et d'employer un défloculant coûteux et parfois difficile d'obtenir dans certains contextes.

Pour le tamisage humide la principale alternative simple est celle de Tran permettant d'éviter le séchage en mesurant le volume.

Pour la sédimentométrie, les alternatives sont de simples variantes basées sur la loi de Stokes dont les plus intéressantes nous semblent la sédimentométrie calibrée et l'essai de l'équivalent de sable normal ou modifié (essai purement technique et conventionnel qui semble pourtant très intéressant).

Les principales exceptions à cette règle (et qui ne se basent donc pas sur la loi de Stokes) sont :

- granulomètre à laser : appareillage coûteux
- rayons X : coûteux
- méthode Coulter : coûteux
- analyseur d'images à comptage automatique : coûteux
- essai de teneur en quartz (Meurice) : analyse chimique

Les essais de sédimentométrie basés sur la loi de Stokes "entretiennent l'illusion de l'exactitude des résultats tout en masquant l'imprécision des hypothèses sur lesquelles ils sont fondés" :

- la loi Stokes a ces propres limites d'application
- l'hypothèse que la densité des particules est à peu près  $2,65\text{g/cm}^3$

Les essais basés sur d'autres principes de mesure présentent également des limitations :

Faudot D. " Etude de la finesse des poudres" :

"... on voit que l'analyse granulométrique est bien souvent un problème de langage et qu'il est extrêmement recommandé de spécifier, en même temps que les résultats, la méthode utilisée. En effet, si l'on considère le cas idéal, c'est-à-dire des particules sphériques, il est certain que l'on obtiendra entre ces méthodes, une corrélation acceptable. Par contre, dès qu'interviendra un certain facteur de forme, des différences notables entre les résultats pourront apparaître. Par exemple dans le cas d'un prisme à base rectangulaire de dimensions  $3\mu$ ,  $2\mu$  et  $1\mu$ , on trouvera un diamètre déduit de la surface de  $2,65\mu$  (dans le cas idéal d'absence de structure poreuse). Le diamètre déterminé par la méthode Coulter (diamètre déduit de la mesure volumétrique) serait de  $2,25\mu$  et enfin le diamètre d'ouverture de la maille (c'est-à-dire obtenu par mesure au tamis) serait de  $2\mu$ ".

Finalement il reste encore deux questions fondamentales :

Est-ce que l'identification de la texture est représentative pour ce qui se passe en réalité ? Est-il vraiment nécessaire de connaître la distribution

granulaire des particules fines ? Ces questions sont soulevées par les constatations suivantes :

- En sédimentométrie la terre a été imprégnée et défloculée (sauf équivalent de sable) afin d'être certain de mesurer vraiment la grandeur des grains séparés. Mais sur chantier on ne triture pas la terre jusqu'à ce point : des particules restent agglomérées.

- En chantier on broie et tamise la terre. En observant les passants et les refus du tamis on remarque aisément que les refus contiennent en grandes parties des agglomérés contenant certainement beaucoup d'éléments cohésifs dont l'argile. Est-ce que le passant que l'on emploie à la production aura donc la même texture que la terre initiale sur laquelle on a procédé aux essais d'identification ?

- Notons que c'est à partir de  $15\mu$  à  $20\mu$  que l'on retrouve les matériaux réalisant un pouvoir agglomérant (= cohésion). Admettons de trouver un essai simple permettant de connaître la quantité de particules  $< 20\mu$  ou même  $< 80\mu$  et que l'on fasse ensuite plutôt un essai permettant de mieux connaître la qualité de cette fraction et non la distribution en quantité dans cette fraction, n'aurions-nous pas assez d'informations ?

Si cette hypothèse paraît acceptable, pourquoi continuer les essais sédimentométriques qui nécessitent beaucoup de temps ? Pourquoi continuer les recherches pour trouver le défloculant idéal ?

## CONSISTANCE

---

La détermination des limites de consistance est généralement pratiquée sur la fraction "mortier fin" de la terre ( $\phi < 0,4$  mm) car se sont les seuls éléments sur lesquels l'eau agit en modifiant la consistance. En principe les limites ne donnent donc aucune indication directe sur la maniabilité d'une terre à construire mais donnent une indication de la qualité des particules fines.

On peut mesurer 5 limites de consistance : limite de liquidité, de plasticité, de retrait, d'absorption et d'adhérence.

L'indice de plasticité ( $I_p$ ) étant la différence entre la limite de liquidité et de plasticité. Ces limites sont exprimées en % ponéral de teneur en eau et sont également appelées limites d'Atterberg.

Les mesures de ces limites sont pour la plupart du temps déjà normalisées et largement appliquées mais connaissent selon le pays certaines variations dans l'interprétation.

Les résultats des limites d'Atterberg sont fortement tributaires d'un respect scrupuleux des modes opératoires et du "coup de main" de l'opérateur. On reproche à ces mesures leur caractère empirique et arbitraire mais ces essais rendent incontestablement d'immenses services.

Les limites de plasticité et de liquidité indiquent l'évolution du comportement rhéologique de la terre, fraction fine, pour différentes teneurs en eau. Le seul but est de mieux pouvoir apprécier la qualité de ce mortier fin. L'évolution de ce comportement rhéologique peut se mesurer en principe selon deux méthodes :

- La déformation sous l'influence d'une force connue pour différentes teneurs en eau
- La force nécessaire pour obtenir une déformation désirée pour différentes teneurs en eau.

Les essais alternatifs connus partent donc de ces principes de mesure. Exemple : - Déformation sous l'influence d'une force connue :

- mesure de la hauteur restante de l'échantillon après avoir laissé tombé un disque de poids connu et de hauteur connue sur l'échantillon (principe du Pfefferkorn) et les limites sont déterminées pour certaines hauteurs restantes,

- l'enfoncement d'un cône de poids connu qu'on laisse tomber d'une hauteur connue sur l'échantillon (principe du pénétromètre); ces limites sont reliées à certains enfoncements.

Exemple : - Force nécessaire pour obtenir une certaine déformation connue:

- la force nécessaire pour faire pénétrer un cône dans l'échantillon sur une certaine profondeur (principe de l'aiguille de consistance),
- le rhéographe de Bomble ; les limites sont reliées à certaines forces de seuil.

Pour les limites de retrait, adhérence et absorption, il existe également différentes variantes, mais surtout de la confusion. Nous pensons que, dans le stade de l'identification des terres, seul le retrait a un sens pour mieux connaître la qualité du mortier fin. Il vaudrait mieux connaître l'adhérence et l'absorption de la terre entière et ceci pour différents degrés de compacité.

Toutes les limites de consistance sont influencées par :

- nature minéralogique
- texture
- degré de compacité et teneur en air
- teneur en eau et nature de l'eau
- présence d'ions
- présence de matières organiques
- température
- ...

Les limites de consistance sont donc fortement influencées par le mode de préparation des échantillons et pour chaque mesure de limite on est confronté à un autre mode opératoire. Ces mêmes limites ne donnent que de l'information sur le mortier fin. Ces deux constatations nous mènent à dire que ces limites ne donnent en aucun cas de l'information correcte sur le comportement futur d'un mur en terre. Des prévisions imposant des exigences comme p.e. que la limite de retrait devrait être plus petite que la teneur en eau optimale Proctor, sont fausses (car pour déterminer la TEO on a fortement compacté la terre toute entière et pour la limite de retrait on a seulement pétri le mortier fin).

## COMPACTIBILITE

---

Le but de l'essai de compactibilité est de connaître l'aptitude de la terre à être compactée. L'idée de base est qu'en augmentant la densité sèche d'une terre, on augmente la résistance mécanique et s'il y a ajout de stabilisant, on augmente l'efficacité de la stabilisation.

Il s'avère que pour une certaine énergie de compactage, la densité sèche varie avec la teneur en eau de la terre au moment du compactage et que celle-ci présente un maximum à une certaine valeur de teneur en eau optimale. En principe celle-ci est également fonction du mode de compactage pour une même énergie (compactage statique  $\neq$  dynamique  $\neq$  vibration  $\neq$  pétrissage).

Cette teneur en eau optimale est déterminée classiquement par l'essai Proctor (compactage dynamique) dont il existe deux versions très répandues (standard et modifiée de AASHO).

Il existe également deux essais alternatifs qui partent d'autres hypothèses de base et de critiques sur l'essai Proctor :

- L'essai CBR part du principe que c'est la résistance qui nous intéresse et propose donc de mesurer cette résistance directement au lieu de mesurer indirectement par le biais de la densité. Néanmoins on mesure cette résistance sur un échantillon à une teneur en eau obtenue par l'essai Proctor.

- L'essai Proctor statique (mis au point par Mme Olivier à l'ENTPE) part du principe que le mode de compactage dynamique de l'essai Proctor n'est pas représentatif pour tous les modes de production dont notamment le bloc comprimé et propose donc un compactage statique.

Pourtant, quelques remarques fondamentales subsistent :

- On peut se demander si, au stade de l'identification d'une terre il est déjà nécessaire de connaître sa compactibilité sauf pour situer par le biais d'un indice de compactage, à quel état se trouve un échantillon.

- L'hétérogénéité des résultats due aux circonstances elles-mêmes de l'essai font qu'en principe l'essai n'est pas représentatif pour la réalité du compactage d'une terre et que les résultats eux-mêmes sont à relativiser.

Cette hétérogénéité est due à :

- La forme du moule : hauteur et diamètre influencent la profondeur du compactage et les pertes dues à l'adhérence moule-terre
- Le mode de compactage et la vitesse de compactage.

Ceci a pour effet une variation de la densité, la résistance et la teneur en eau dans l'échantillon en fonction de sa position dans l'échantillon.

Ces commentaires nous incitent à douter de :

- L'utilité de l'essai de compactibilité sauf si on arrive à interpréter et à relativiser les résultats obtenus.
- L'utilité des polémiques sur l'optimisation de l'essai Proctor puisque aucun des essais alternatifs proposés ou futurs ne seront capables d'être représentatifs pour ce qui se passe en réalité à l'intérieur du moule d'une presse ou à l'intérieur d'une banche à pisé.

Si l'on veut vraiment connaître la teneur en eau optimale pour un certain mode de production p.e. bloc comprimé nous ne pouvons qu'admirer la proposition faite par Mme Olivier au colloque de Vaulx-en-Velin de 1984 : "Si la presse et le matériau sont imposés, l'essai Proctor statique va se réduire à la fabrication d'une série de briques en faisant varier la teneur en eau et en incluant éventuellement un liant. La mesure de cette teneur en eau pourra se faire par les classiques poêles et réchauds. La densité sèche sera calculée à partir de la hauteur de la brique fabriquée, mais la courbe densité sèche - teneur en eau, pourra sans problème être remplacée par une courbe hauteur - teneur en eau. L'optimum Proctor statique se trouvera au maximum de cette courbe". Une telle proposition combine l'identification de la compactibilité de la terre aux réalités du chantier mais à une condition : que l'on trouve un moyen de contrôle efficace pour la quantité de terre sèche initiale que l'on introduit dans la presse. Mais ceci n'est plus en soi un essai Proctor mais purement et simplement un essai de mise au point.

## COHESION

---

La cohésion d'une terre exprime la capacité de ses particules fines à se maintenir ensemble lorsqu'on exerce sur le matériau une contrainte de cisaillement simple.

La cohésion d'une terre dépend des caractéristiques de collage ou de cimentation de son mortier grossier ( $\phi < 2$  mm) qui lie les grains inertes entre eux. Cette propriété est donc tributaire de la quantité et de la qualité collante des "argiles".

L'essai classique est celui du 8 (ou essai de traction humide). Comme son nom l'indique, on ne mesure pas directement la cohésion elle-même. Pourtant cet essai s'est avéré intéressant. L'essai du huit est effectué sur une terre d'une certaine consistance que l'on obtient en appliquant un mode opératoire très strict mais simple de pétrissage régulier.

Il existe des essais alternatifs mesurant directement la cohésion réelle (vraie ou apparente selon le cas) mais encore faut-il vérifier que leur mode opératoire soit aussi rigoureux que celui de l'essai du 8 (consistance et compacité) :

- essai triaxial
- boîte de Casagrande (cisaillement simple)
- appareil de Hvorslev (cisaillement par torsion)

Ces essais demandent un appareillage assez élaboré et devraient être adaptés aux exigences et contraintes spécifiques de la construction en terre car normalement ces essais s'appliquent sur des "échantillons de terre non remaniée et comprenant donc toutes les fractions.

Le principe devrait toujours être le même que pour l'essai du huit : la résistance en fonction d'une certaine consistance avec contrôle de la compacité par mesure de la force de rupture. Bref cette résistance peut se mesurer de diverses façons :

- résistance globale
- mesure de la cohésion et de l'angle de frottement séparément
- mesure de la cohésion seule

En principe il serait donc possible de se former une idée de cette résistance à la rupture par des essais autres que l'essai du huit :

- scissomètre
- pénétromètre de poche ou portatif

Néanmoins, il ne faut jamais oublier que le seul et unique but de cet essai devrait être de mieux pouvoir apprécier la qualité du mortier.

Ceci nous mène au problème de savoir sur quelle fraction de mortier on effectuera les essais. Nous nous interrogeons pourquoi par exemple pour l'essai du huit on travaille sur le mortier grossier et non sur le mortier fin.

Vu que ce sont surtout les particules grossières qui contribuent à la friction, il serait peut-être plus intéressant de prendre seulement le mortier fin surtout si le principe de mesure de la résistance ne donne qu'une idée globale et non décomposée (comme p.e. essai triaxial, pénétromètre de poche).

## MINÉRALOGIE

---

Il importe de connaître la minéralogie de la fraction fine d'une terre pour situer ses qualités en tant que telles et ses potentialités pour la stabilisation.

Parmi les centaines de minéraux inclus dans la fraction fine du matériau, moins d'une douzaine sont très importants et intéressent directement la construction en terre.

Il est pourtant dès à présent nécessaire de mentionner que la fraction "argileuse", après élimination des colloïdes humiques et des calcaires, se divise en trois parties :

- minéraux d'argile
- allophanes (colloïdes amorphes de silice et d'alumine)
- sesquioxides concrétionnaires ( $Fe_2 O_3$  et  $Al_2 O_3$ )

Il faut également mentionner le comportement spécifique de sols calcaires et argilocalcaires.

Parmi les minéraux d'argile on peut identifier :

- les phyllosilicates (minéraux constitués de feuillets)
  - minéraux 1 : 1 : kaolinite, halloysite,...
  - minéraux 2 : 1 : illite, montmorillonite, muscovite, chlorite, vermiculite,...
  - interstratifiés.
- les chaînes et tiges (minéraux constitués de chaînes ou tiges creuses)
  - tiges : sépiolite, polygorskite,...
  - chaînes : attapulгите,...

Parmi les minéraux d'argile les plus importants et les plus répandus, l'on retiendra les kaolinites, les illites et les montmorillonites.

Les allophanes, colloïdes amorphes de silice et d'alumine, influencent la susceptibilité d'une terre aux différents types de stabilisants et la capacité de rétention d'eau.

Les sesquioxides sous différentes formes cristallines jouent un rôle de cimentation du quartz et la kaolinite.

L'identification minéralogique se fait généralement de trois façons différentes, parfois complémentaires :

- Essais cristallographiques : basés sur l'observation directe de la minéralogie ou de la composition chimique ;
- Mesure indirecte : mesure du comportement physico-chimique de la fraction fixe. A partir de ces mesures, on identifiera le caractère de la fraction argileuse (on parlera par exemple d'une argile montmorillonitique);
- Observation de terrain : vu que la formation des différents composants est fortement affectée par des agents géographiques, climatologiques et géologiques, on partira de l'observation de ces agents afin d'établir le caractère d'une terre, ou bien l'on partira de l'observation du profil lui-même. L'observation d'éléments topographiques et de la couverture végétale naturelle permettent également des interprétations.

Parmi les essais cristallographiques, on peut citer la diffraction par rayons X, l'analyse thermique différentielle, l'analyse thermopondérale, la dilatométrie, Direct Scanning, l'absorption infrarouge, le microscope de polarisation et l'analyse chimique. Mais chaque essai a ces défauts :

- La plupart des essais ne permettent pas d'identifier les quantités (ce qui est pourtant très intéressant quand il s'agit de mélanges et d'interstratifiés).
- On n'observe pas souvent les allophanes, ou bien, pour les observer, il faut effectuer des essais combinés ou répétés.
- Se sont pour la plupart du temps des procédures de laboratoire compliquées, coûteuses et de longue durée.

Parmi les mesures indirectes, l'on retiendra le test simple d'Emerson, le bleu de méthylène ( qui nécessite pourtant d'être vérifié) et la corrélation avec d'autres propriétés ( teneur en eau hygroscopique, indice de plasticité et d'activité, l'indice de compression (sous certaines réserves), la compression sèche et surtout l'observation du retrait de séchage et la fissuration).

L'observation sur le terrain mérite plus d'attention qu'elle n'en reçoit à ce jour. Malheureusement cette méthode dépend de la connaissance active et passive et nécessite une certaine compétence d'interprétation. Fait

regrettable : les quelques experts possédant cette compétence, n'ont pas encore réussi à mettre par écrit de façon compréhensive et systématique leur expérience. Les quelques tentatives identifiées proviennent de PCA et de Ingles - Metcalf.

En général, on peut conclure qu'il est beaucoup plus facile d'éviter les essais minéralogiques compliqués en identifiant les effets combinés de toutes les interactions physico-chimiques en mesurant les caractéristiques qui intéressent directement le comportement futur et les potentialités pour la stabilisation. La connaissance de la composition minéralogique n'interviendrait alors que dans le cas de terres douteuses ou spécifiques (p.e. terres tropicales et subtropicales). Mais à nouveau, il serait possible d'effectuer des essais indirects tels que par exemple l'indice de réactivité vis-à-vis de la chaux, le retrait,...

## CHIMIE

---

L'analyse chimique des composants et réactions de la terre est fortement tributaire de la discipline scientifique d'application, que ce soit la pédologie, la géotechnique, ou l'analyse chimique pure et simple. Il en va de même pour l'interprétation des résultats : ce qui n'est pas "bon" pour un agronome ne l'est pas forcément pour un constructeur. Il est très important de connaître la qualification professionnelle des auteurs en parcourant la lecture sur l'analyse chimique.

Exemple : Interprétations différentes du mot "stabilisé".

Dans son précis de pédologie, Duchaufour mentionne : "le complexe argilo-humique est donc plus difficile à disperser, une fois la floculation acquise, que l'argile seule : c'est la raison pour laquelle l'humus constitue un ciment de choix pour la formation d'agrégats stables" et plus loin : "...mis en présence de l'eau, les colloïdes humiques gonflent et augmentent de volume en s'hydratant." Pour un agronome ou pédologue, un agrégat stable est un agrégat qui ne se disperse pas en présence d'eau mais il est autorisé de gonfler. Pour un constructeur, un agrégat stable est un agrégat qui supporte des charges et qui ne gonfle pas en présence d'eau (ou gonflement réduit au minimum).

Puisqu'on nous parle de construction en terre, constituée de terre remaniée à laquelle on ajoute de l'eau, une analyse chimique de la terre ne peut suffire à elle-même. L'analyse de l'eau employée est également obligatoire. Pourtant, presque personne n'en parle.

Il existe certaines interactions et confusions qui rendent l'interprétation difficile. Exemples :

- L'interaction entre l'humus et les sulfates
- Pour mesurer la quantité de sulfate, on ajoute  $BaCl_2$ , mais ceci peut former des carbonates qui éventuellement se précipiteront également
- Pour mesurer la teneur en chlorures, on ajoute  $AgNO_3$  et on interprètera le précipité obtenu. Pourtant, du point de vue purement chimique, l'ajout de  $AgNO_3$  créera également un précipité pour une solution contenant des anions de  $Br^-$ ,  $I^-$ ,  $AsO_3^{3-}$ ,  $PO_4^{3-}$ ;  $AsO_4^{3-}$
- Une solution de sel de fluor donnera également une précipitation en ajoutant  $BaCl_2$

## CHIMIE

---

L'analyse chimique des composants et réactions de la terre est fortement tributaire de la discipline scientifique d'application, que ce soit la pédologie, la géotechnique, ou l'analyse chimique pure et simple. Il en va de même pour l'interprétation des résultats : ce qui n'est pas "bon" pour un agronome ne l'est pas forcément pour un constructeur. Il est très important de connaître la qualification professionnelle des auteurs en parcourant la lecture sur l'analyse chimique.

Exemple : Interprétations différentes du mot "stabilisé".

Dans son précis de pédologie, Duchaufour mentionne : "le complexe argilo-humique est donc plus difficile à disperser, une fois la floculation acquise, que l'argile seule : c'est la raison pour laquelle l'humus constitue un ciment de choix pour la formation d'agrégats stables" et plus loin : "...mis en présence de l'eau, les colloïdes humiques gonflent et augmentent de volume en s'hydratant." Pour un agronome ou pédologue, un agrégat stable est un agrégat qui ne se disperse pas en présence d'eau mais il est autorisé de gonfler. Pour un constructeur, un agrégat stable est un agrégat qui supporte des charges et qui ne gonfle pas en présence d'eau (ou gonflement réduit au minimum).

Puisqu'on nous parle de construction en terre, constituée de terre remaniée à laquelle on ajoute de l'eau, une analyse chimique de la terre ne peut suffire à elle-même. L'analyse de l'eau employée est également obligatoire. Pourtant, presque personne n'en parle.

Il existe certaines interactions et confusions qui rendent l'interprétation difficile. Exemples :

- L'interaction entre l'humus et les sulfates
- Pour mesurer la quantité de sulfate, on ajoute  $BaCl_2$ , mais ceci peut former des carbonates qui éventuellement se précipiteront également
- Pour mesurer la teneur en chlorures, on ajoute  $AgNO_3$  et on interprètera le précipité obtenu. Pourtant, du point de vue purement chimique, l'ajout de  $AgNO_3$  créera également un précipité pour une solution contenant des anions de  $Br^-$ ,  $I^-$ ,  $AsO_3^{3-}$ ,  $PO_4^{3-}$ ;  $AsO_4^{3-}$
- Une solution de sel de fluor donnera également une précipitation en ajoutant  $BaCl_2$

- Certains parlent de teneur en matières organiques, d'autres de teneur en humus. On fixe parfois, faute de mieux, à 2 % la limite en matière organique à ne pas dépasser pour le traitement d'un sol. Pourtant c'est surtout l'acide fulvique contenu dans les matières organiques qui est néfaste.

- Il y a parfois confusion entre la teneur en chaux et la teneur en calcaire

- Il y a parfois confusion entre différents essais portant le même nom p.e. :

- perte au feu (matières organiques  $\leftrightarrow$  Ca O)

- test pH (pH d'un sol, pH d'un sol traité à la chaux, pH d'un sol traité au ciment)

- ...

Dans beaucoup de cas une analyse qualitative ne suffit pas pour l'interprétation, il faut donc employer des essais d'analyse quantitative.

Parmi les essais parcourus, nous retenons surtout :

- Teneur en humus dans sa définition géotechnique, donc attaque à  $H_2O_2$ . Pourtant cet essai nécessite de connaître le poids sec initial et après l'essai et nécessitera donc deux cycles de séchage. La méthode Na OH exige également au moins 24 heures. Pour avoir une vue assez rapide de la teneur en humus la méthode du bichromate semble très intéressante.

- Sels solubles : différence de poids avant et après lessivage

- Chlorures : précipitation à l'aide de  $AgNO_3$  et dosage (l'emploi de phénolphthaléine et d'acide oxalique font partie de la méthode standardisée).

- Carbonates : attaque à HCl et lessivage

- Sulfates : attaque et précipitation à l'aide de  $BaCl_2$ . Des tubes de référence permettent le dosage

- pH : nous proposons d'employer l'électrométrie pour mesurer le pH surtout si l'on décide d'effectuer le test pH au ciment et à la chaux. Le test pH au ciment pourrait être un essai de remplacement pour le dosage de l'humus mais puisque pour beaucoup d'essais on doit tout de même traiter l'échantillon préalablement à  $H_2O_2$  afin d'éliminer l'humus, nous croyons que le test pH au ciment ferait double emploi.

Il existe à ce jour des kits portatifs pour l'analyse chimique d'une terre. Ceux-ci proviennent de l'application agronomique mais contiennent généralement les essais nécessaires pour la construction en terre, p.e. : La Motte Soil Testing Set (Soil test) contient un équipement complet pour 13 essais individuels : pH, nitrate, phosphore disponible, azote, potasse disponible, calcium échangeable, sulfates, chlorures,...

L'analyse du profil pédologique permet déjà dans beaucoup de cas de prévoir la composition chimique et le pH à condition que l'on puisse aisément cataloguer le sol sous une classe pédologique bien précise.

## TENEUR EN EAU ET POIDS SPECIFIQUE

---

Pourquoi une analyse des méthodes d'essais de teneur en eau et poids spécifique ?

Ces éléments interviennent à différents stades :

- identification de la terre (texture, cohésion, compactibilité,...)
- application de la terre (processus de production,...)
- contrôle de qualité (essais de résistance humide, absorption,...)
- expertise (évolution de la teneur en eau dans un mur,...)

Nous sommes donc confrontés à différentes nécessités :

- avant : identification de la terre et analyse de l'évolution et le comportement en fonction de différents paramètres
- après : identification rapide de chantier, contrôle de qualité, analyse non destructive de contrôle de qualité ou analyse du comportement dans des bâtiments existants (après connaissance des caractéristiques de la terre, on pourra se contenter de méthodes d'essais indirectes qui se basent justement sur les dérivations de l'observation de caractéristiques plus rapides à déterminer).

Nous sommes confrontés à plusieurs confusions existantes.

En matière de constituants liquides d'une terre, on remarque plusieurs descriptions de la nature de l'eau dans un sol ou une terre. Exemple :

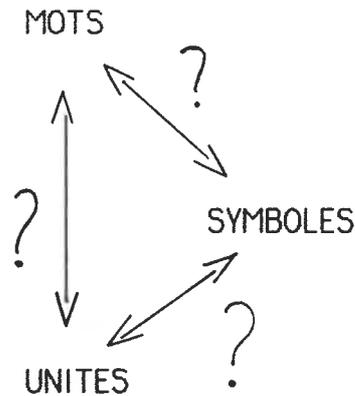
eau libre eau interstitielle eau de solution	←	eau libre eau capillaire films adsorbés	peut être éliminée à des températures ambiantes normales
eau adsorbée eau de structure	→	eau cristalline hydroxiles	

Confusions dans l'emploi des mots, symboles et unités. Exemples :

- densité apparente
- densité sèche
- densité spécifique
- masse volumique
- poids spécifique

- $\gamma \rightarrow \gamma_a, \gamma_s, \gamma_d, \dots$
- $\rho \rightarrow \rho_w, \rho_a, \rho_s, \rho_e, \dots$
- $\delta \rightarrow \delta_w, \delta_a, \delta_s, \delta_e, \dots$

- unités kg
- kgf
- N



- Exemple : densité sèche =  $\frac{\text{poids des solides (unité N)}}{\text{volume total (unité m}^3\text{)}}$  en kg/m<sup>3</sup>

Cette confusion provient du fait qu'en unités pratiques on emploie kg, en unités scientifiques, le N et en unités techniques le kgf (parfois kg).

## TENEUR EN EAU

---

Il y a différentes méthodes.

La méthode de référence est :

- L'étuve (méthode de référence ; 105 °C; 24 heures ; une variante maintient la température à 60 °C)

Parmi les méthodes directes, on trouve :

- mesure du poids des solides et différence (les différentes méthodes varient selon le mode de séchage) : brûlage à l'alcool, brûlage poêle, infrarouge, bain de sable, air chaud,...
- mesure du poids ou volume du liquide : carbure de calcium (Speedy Moisture Tester ; méthode indirecte par mesure de pression développée); méthode neutronique, mélange azéotropique,...
- mesure du volume des solides : pycnomètre à eau (nécessite la connaissance du poids spécifique du sol)
- <sup>2</sup> mesure du volume d'air : pycnomètre à air différentiel

Les méthodes indirectes sont :

- résistance électrique
- à partir des limites de consistance
- à partir du Proctor

Pour toutes ces méthodes, le résultat n'est pas nécessairement fiable, dû à l'influence de certains paramètres.

- Influence de la température de séchage.

Exemple : pour toutes les méthodes basées sur des températures plus élevées que 105 °C, on élimine progressivement à partir de certaines températures non seulement l'eau (l'eau adsorbée, l'eau de structure,..) mais également, selon le cas, une partie des matières organiques, des carbonates, des hydroxides de calcium.

- Influence de l'air confiné dans les vides.

Exemple : pour le pycnomètre à eau, on mesure le volume des solides par immersion dans l'eau. La présence de bulles d'air peut affecter les résultats obtenus. Pour le pycnomètre à air différentiel la teneur en eau est le rapport entre le poids de l'eau et le poids des solides. Pour un même

poids de solides, le volume d'air peut varier selon la manipulation. Pour la mesure de la résistance électrique on se base sur le comportement hygroscopique d'un élément de plâtre placé dans la terre. Le volume d'air présent joue une influence sur le comportement hygroscopique de l'élément de plâtre. De plus la relation entre la teneur en eau et le comportement hygroscopique n'est pas linéaire. La méthode neutronique compte la quantité de noyaux H pour un certain volume de terre. Un même poids de terre contenant un même poids d'eau (donc teneur en eau constante) peut se trouver à différents stades de densité apparente selon la manipulation. Un même volume de terre contenant un même poids d'eau peut donc contenir différents poids de solides.

- Influence du type de sol (cohérent <-> non cohérent).

Exemple : Pour les méthodes suivantes la perméabilité du sol joue un rôle non négligeable : méthode du pycnomètre, brûlage à l'alcool, hydrocarbure du calcium, méthode azéotropique,....

- Influence de l'hypothèse de base de la méthode employée.

Exemple : Dans la méthode neutronique tous les noyaux H sont considérés comme de l'eau.

- Influence de la présence de matières volatiles et de sels solubles.

Exemple : Est-ce que les éléments solubles font partie du poids des solides ou du poids des liquides ?

Les méthodes où l'on sèche le matériau vont cristalliser les sels (=> poids des solides ?). Les méthodes où l'on trempe le matériau vont dissoudre les sels solubles (=> poids des liquides ?). Les matières volatiles seront éliminées au cours d'un séchage mais que faire dans le cas d'une émulsion bitumineuse ou d'un cutback ?

On peut donc constater que différentes méthodes ne donnent pas les mêmes résultats et nécessitent par conséquent un étalonnage par rapport à une méthode de référence.

Exemple : Le Speedy Moisture Tester ne donne pas de résultats corrects pour l'analyse de sols cohérents (construction en terre) mais a l'avantage d'être simple et rapide. Un étalonnage du Speedy, basé sur les résultats de l'étuvage serait donc possible et permettrait, avec des facteurs de correction, son emploi sur le chantier.

Mais pourquoi ne pas prendre le Speedy comme méthode de référence ? (même s'il n'est, soi-disant pas correct, mais tout est relatif).

La méthode neutronique n'est, de par son hypothèse, pas conforme à la définition géo-technique de la teneur en eau. Mais un étalonnage permettrait son emploi de façon non destructive pour effectuer un contrôle de chantier ou une analyse de l'évolution de la teneur en eau à l'intérieur d'un mur de terre.

Nous constatons une dichotomie entre les exigences de laboratoire et de terrain.

Exemple : L'essai Proctor démontre que pour une certaine teneur en eau et énergie de compactage, il existe une densité sèche maximale. On remarquera aisément que (chiffres fictifs) une diminution de 2 points de la teneur en eau entraîne une chute considérable de la densité sèche qui peut se traduire par une chute de 30 % de la résistance sèche. Conclusion de beaucoup de chercheurs : il faut appliquer sur le chantier un suivi rigoureux de la teneur en eau. Première remarque : le Proctor n'est pas représentatif pour le comportement de la terre à l'intérieur de par exemple une presse spécifique. Deuxième remarque, même en considérant que le Proctor soit représentatif : le technicien responsable du contrôle de production ne peut se permettre d'attendre 24 heures (étuvage) pour les résultats et emploiera donc une méthode rapide par exemple le Speedy. Des essais ont démontré que l'écart entre l'étuvage et le speedy peut être de 5 points. Résultat : baisse spectaculaire de la résistance ou même au contraire, augmentation puisque l'étuvage lui-même et le Proctor présente déjà une erreur intrinsèque.

Nous ne pouvons donc que conclure qu'une normalisation de méthodes simples et rapides s'impose ou si nécessaire deux méthodes en incluant dans la norme le mode opératoire pour l'étalonnage.

## POIDS SPECIFIQUE

---

Par définition le poids spécifique ( $\gamma_s$ ) exprime la relation entre le poids des solides et le volume des solides :  $\gamma_s = \frac{P_s}{V_s}$  en  $\frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$  ( $\frac{9,81\text{N}}{\text{m}^3}$ )

La connaissance du poids spécifique intervient par exemple dans l'analyse de texture (p.e. : pour convertir les résultats obtenus par lévigation) et pour connaître la teneur en eau d'un sol à l'aide du pycnomètre à eau.

On prend généralement comme valeur moyenne 2 650 kgf/m<sup>3</sup> pour la terre bien qu'il puisse se produire de grandes variations (important pour la sédimentométrie) :

- sable gravier	2 650 kgf/m <sup>3</sup>
- loess	2 750
- argiles (moyenne)	2 720
- gypse	2 320
- kaolinite	2 600
- muscovite	2 850
- limonite	3 800
- hématite	5 200
- les matières organiques font diminuer le poids spécifique	
- les minéraux de fer ou ferriques l'augmentent	

Nous avons déjà indiqué les confusions existantes entre les termes masse et poids et les unités kg, kgf et N.

Mais il existe même des confusions dans les définitions.

Exemple : ASTM D 854-58 " Specific gravity of soils" : le poids spécifique est égal au rapport entre le poids à l'air d'un certain volume de matériau (poids sec des solides) et du poids à l'air du même volume d'eau distillée à la même température. La définition elle-même crée déjà des confusions car l'on pourrait croire qu'il s'agit de la densité sèche. Deuxièmement, l'unité que l'on obtient n'est pas  $\frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$  mais pas d'unité.

Pourtant nous comprenons pourquoi on a pris cette définition car elle est dérivée directement de l'essai du pycnomètre que l'on a standardisé.

Le pycnomètre est un ballon de verre que l'on pèse à l'état vide ( $P_1$ ). On remplit le pycnomètre d'eau distillée jusqu'à un repère et on pèse le pycnomètre et l'eau ( $P_2$ ). On prend approximativement 25 g de sol étuvé pendant 24 heures à 105 °C et on remplit le pycnomètre vide avec cet

échantillon et on pèse le poids pycnomètre et terre ( $P_3$ ). On remplit le pycnomètre contenant la terre avec de l'eau distillée jusqu'au repère et on pèse le pycnomètre contenant terre et eau ( $P_4$ ).

Le rapport  $\frac{P_3 - P_1}{P_2 + P_3 - P_1 - P_4}$  est une INDICATION du poids spécifique car il faut encore connaître la densité de l'eau (problème évité par ASTM).

La densité de l'eau est fonction de la température, de la pression atmosphérique et, cela personne ne le mentionne, la présence de sels solubles et ions échangeables.

Un contrôle de la température et de la pression atmosphérique s'impose, mais que faire de l'influence des matériaux solubles ? De nouveau l'ASTM évite ce problème.

Les sels solubles contenus dans la terre font-ils partie du poids des solides?

Afin de ne pas falsifier le résultat, il faut à tout prix éliminer l'air contenu dans l'échantillon. Il y a pour cela plusieurs méthodes :

- pompes à vide (mais il faut s'assurer que la pression ne baisse pas trop)
- agitateur mécanique (alors  $P_1$  est égal au poids du pycnomètre et agitateur et  $P_2$  est égal au poids du pycnomètre, agitateur et eau et ainsi de suite)
- faire bouillir l'eau (ensuite refroidir et rétablir le niveau)
- léger vide à l'aide d'un courant d'eau

L'échantillon doit rester complètement sec au premier pesage ( $P_3$ ).

La détermination du poids sec à l'étuve dure 24 heures : la mesure exige donc beaucoup de temps. On pourrait envisager d'autres méthodes mais toutes les remarques formulées dans la section détermination de la teneur en eau restent valables.

## CRITIQUES

---

La plupart des essais d'identification des terres sont des essais techniques c'est-à-dire : la grandeur mesurée est définie par l'essai même et dépend donc du mode opératoire. Les résultats sont donc, in strictu sensu, seulement valables dans des conditions de mesure identiques et pas généralisables. Ceci rend la comparaison de résultats entre essais plus ou moins similaires difficile et l'interprétation parfois même dangereuse.

Exemples : Le principe de la mesure de la limite de plasticité est bien connu. Pourtant, dans la littérature, nous avons retrouvé une demi-douzaine de façon d'interpréter le moment où l'on arrive au stade de liquidité selon Casagrande. Le Pfefferkorn part déjà d'un tout autre principe mais emploie néanmoins la notion de limite de liquidité.

Les hypothèses de base sur lesquelles sont basées les différentes mesures et méthodes sont souvent des simplifications de la réalité et contiennent parfois des falsifications inhérentes.

Exemple : La loi de Stokes dans les essais de sédimentométrie. La méthode de mesure de teneur en eau part du principe que tous les noyaux H sont considérés comme faisant partie de l'eau.

Beaucoup d'essais ne mesurent pas vraiment la grandeur désirée.

Exemple : L'essai Proctor mesure la variation de la densité au lieu de la résistance. En analyse de texture on mesure le poids des fractions au lieu du volume.

Certaines mesures identifient des caractéristiques que l'on ne retrouve pas dans la réalité du chantier.

Exemple : En analyse de texture on humidifie la terre et on la déflocule, mais en chantier on ne triture pas la terre de la même façon : des particules restent agglomérées. Le Proctor n'est pas représentatif pour ce qui se passe à l'intérieur d'une presse ou d'une banche, ni pour les différents modes de compactage.

On sous-estime, parfois involontairement, parfois délibérément, certaines falsifications possibles.

Exemple : Pour la mesure de teneur en eau on sous-estime l'influence de la température de séchage, l'influence de l'air retenu, l'influence du type de terre et la présence de matières volatiles et de sels solubles. Pour la mesure de teneur en "matières organiques", on se limite délibérément à l'attaque par  $H_2O_2$  bien que d'autres matières peuvent être influencées et une partie des "matières organiques" peut rester indifférente.

Parfois il existe confusion dans les définitions de la grandeur mesurée.

Exemple : Qu'entend-on par matières organiques : humus, acides fulviques, fibres non décomposées, ... ?

Teneur en calcaire et teneur en carbonates, calcaire actif, ... ?

On sous-estime l'influence du coup de main de l'opérateur.

Exemple : La mesure de limite de plasticité, la vitesse de manipulation, la façon de pétrir, ...

On néglige parfois certains effets secondaires.

Exemple : L'influence de la nature de l'eau employée au courant des essais sur par exemple les limites de consistance.

Il existe une dichotomie entre les exigences de laboratoire et les exigences de chantier.

Exemple : La mesure de teneur en eau au laboratoire se fait principalement à l'étuvage (105 °C, 24 heures). Les nécessités de chantier font que l'on a besoin d'essais simples et rapides (p.e. : contrôle de production) : on emploie donc par exemple le Speedy Moisture Tester ou le brûlage à l'alcool. Pourtant ces essais ne donnent pas les mêmes résultats.

On parle rarement de l'échantillonnage et de sa préparation.

Exemple : Dans "Soil mechanics for road engineers", RRL, UK, on mentionne que pour l'essai sédimentométrique, il faut soigneusement préparer l'échantillon : la terre doit premièrement être traitée avec  $H_2O_2$  afin d'éliminer les matières organiques, ensuite avec HCl afin d'éliminer les carbonates et le gypse. On mentionne également de contrôler le pH car autrement les argiles risquent à nouveau de flocculer mais après ajout d'un défloculant. En parcourant la littérature, on remarquera aisément que ce sont quasi les seuls à parler de cette préparation. Alors, pour le reste, est-ce que cette procédure est sous-entendue comme étant évidente ou est-ce que cette procédure ne se fait qu'en Grande-Bretagne ?

On sous-estime l'hétérogénéité des échantillons et par conséquent l'hétérogénéité des mesures selon l'endroit de la prise.

Exemple : Des contrôles sur échantillons comprimés ont démontré que la densité et la teneur en eau varient (en sens inverse) avec la profondeur. Le point de mesure dans l'échantillon est donc très important. Dans d'autres essais, de trop petites quantités d'échantillons peuvent fortement affecter les résultats obtenus. Ceci peut être dû à un mauvais malaxage, mauvaise manipulation, hétérogénéité de la terre elle-même, ...

Certains essais s'effectuent, par exemple, sur des quantités inférieures au gramme.

Pour beaucoup de méthodes et essais d'identification, on entretient donc :

- l'illusion de l'exactitude des résultats tout en masquant l'imprécision des hypothèses sur lesquelles ils sont fondés, le coup de main de l'opérateur, les effets secondaires et influences externes, les buts poursuivis,...

- l'illusion de la précision des résultats tout en oubliant qu'après ces résultats seront indirectement sujets à l'application dans certains cas de coefficients de sécurité allant jusqu'à 24 et déterminés parfois totalement de façon arbitraire.

Pourtant, ces constatations ne doivent pas nous mener à condamner tous les essais. Malgré leur imprécision du point de vue scientifique, beaucoup d'entre-eux restent valables parce que utiles. Néanmoins, certaines corrections seront nécessaires afin de mieux juger et interpréter les qualités d'une terre en tenant compte des falsifications possibles et en éliminant le plus possible l'impact de l'opérateur.

Nous sommes donc confrontés à un paradoxe : jusqu'où augmenter la "précision" d'essais "imprécis" ?

Malheureusement, nous ne pouvons répondre de façon directe à cette question car ceci dépend des objectifs poursuivis à identifier et de la stratégie de décision à mettre au point.

Pourtant, nous pouvons avancer quelques indications :

- Compte tenu de l'exactitude relative nous devons travailler avec des zones d'acceptabilité comme critères de sélection.

- Puisque les résultats de différents essais ne peuvent être comparés, il faudra choisir quelques méthodes et les normaliser en tenant compte pour le choix que :

- les essais choisis doivent permettre à la fois une compatibilité entre le "laboratoire" (essais d'identification), le "bureau" (décision) et le "chantier" (essais d'identification sur le site, contrôle de production, essais de mise au point, mise en oeuvre,...)

- pour cela les essais doivent être simples, rapides, peu coûteux, peu d'appareillage, peu d'encombrement, faciles à interpréter

- il faut normaliser l'échantillonnage, l'équipement, la procédure, l'interprétation, la terminologie et la représentation des résultats

- La quantité d'échantillons doit être suffisante afin d'éviter le problème d'hétérogénéité de l'échantillon même.

- Les essais proposés doivent avant tout permettre une facilité d'interprétation et d'emploi, offrir une certitude dans la décision et ne doivent donc pas nécessairement être corrects au sens scientifique le plus strict.

## PROPOSITIONS

---

Les essais qui suivent semblent les plus indiqués.

Pour les essais de mise au point et pour les essais de contrôle , on peut employer les mêmes essais (compactibilité et mesures sur la fraction fine) après ajouts éventuels de stabilisants et/ou modifiants

### TEXTURE

- méthode de Tran jusqu'aux particules 0,08 mm ou 0,06 mm (selon les limites des fractions que l'on aura standardisées)

### CONSISTANCE

- Pfefferkorn

On procède à la confection de deux séries de démonstration selon le mode opératoire de Pfefferkorn. Sur la première série, on observe le retrait par simple mesurage de la longueur avant et après séchage. La deuxième série servira à observer les limites de plasticité et de liquidité.

### COHESION

- Essai du huit, scissomètre ou pénétromètre de poche

Pour une valeur de degré de consistance bien précise, on effectuera des essais de cohésion selon un mode opératoire choisi standardisé. Dans ces essais, l'énergie de compactage (par pétrissage) doit de préférence être la même que dans l'essai du Pfefferkorn.

### COMPACTIBILITE

Ce qui nous intéresse c'est l'évolution de la résistance pour divers degrés d'énergie de compactage, divers teneurs en eau et à différentes profondeurs du moule aussi bien à l'état sec que dans les conditions immédiates, c'est-à-dire humide.

Puisque cet essai est assez proche du processus de transformation du matériau terre, on pourrait l'appliquer également après ajouts éventuels de stabilisants et/ou modifiants.

Ainsi nous obtenons une impression du comportement ultérieur du matériau. L'étude dans les conditions immédiates nous intéresse pour connaître le comportement immédiatement après la mise en oeuvre (p. e. : démoulage) ; l'étude dans les conditions à sec pour connaître le comportement final du matériau mis en oeuvre.

On préparera des échantillons de manière identique que pour l'essai Proctor avec le même appareillage manuel. Le contrôle de teneur en eau pourrait se faire à l'aide du Speedy Moisture Tester.

La mesure de la résistance peut se faire de différentes façons :

- mesure de résistance pour faire pénétrer un cône à vitesse constante (genre aiguille Proctor ou C.B.R)
- mesure de résistance à la torsion (genre vanestest)

Sur une autre gamme d'échantillons préparés de la même façon on effectuera après séchage des mesures de retrait et éventuellement des mesures de résistance à l'abrasion à l'aide d'une brosse métallique par des cycles de trempage, séchage et des mesures de résistance à la compression.

Si l'on veut vraiment connaître la teneur en eau optimale pour un certain mode de production, nous proposons de ne pas employer l'essai Proctor ou Proctor statique en tant que tel mais de faire un essai de mise au point employant le matériel et le mode de production choisie.

## CHIMIE ET MINERALOGIE

Tests sur la terre :

- test d'Emerson
- bleu de méthylène
- pH -> méthode électrométrique
- sels solubles par lessivage et double pesée
- carbonates -> HCL
- matières organiques -> H<sub>2</sub> O<sub>2</sub>
- chlorures -> Ag NO<sub>3</sub>
- sulfates -> Ba Cl<sub>2</sub>
- pH - test sur mélange terre-chaux
- pH - test sur mélange terre-ciment
- pH - test sur l'eau
- pH -> méthode électrométrique

commercialisés

- matières organiques -> titration bichromate  
ou Na OH
- sels solubles -> cristallisation
- sulfates -> Ba Cl<sub>2</sub>
- chlorures -> Ag NO<sub>3</sub>

kits portatifs

commercialisés

### TENEUR EN EAU

- bain de sable
- brûlage à l'alcool
- Speedy Moisture Tester
- pycnomètre à eau

### POIDS SPECIFIQUE

- pycnomètre à eau

## TRADUCTION DE L'INFORMATION EN PROPRIETES

## TRAITEMENT DES INFORMATIONS

---

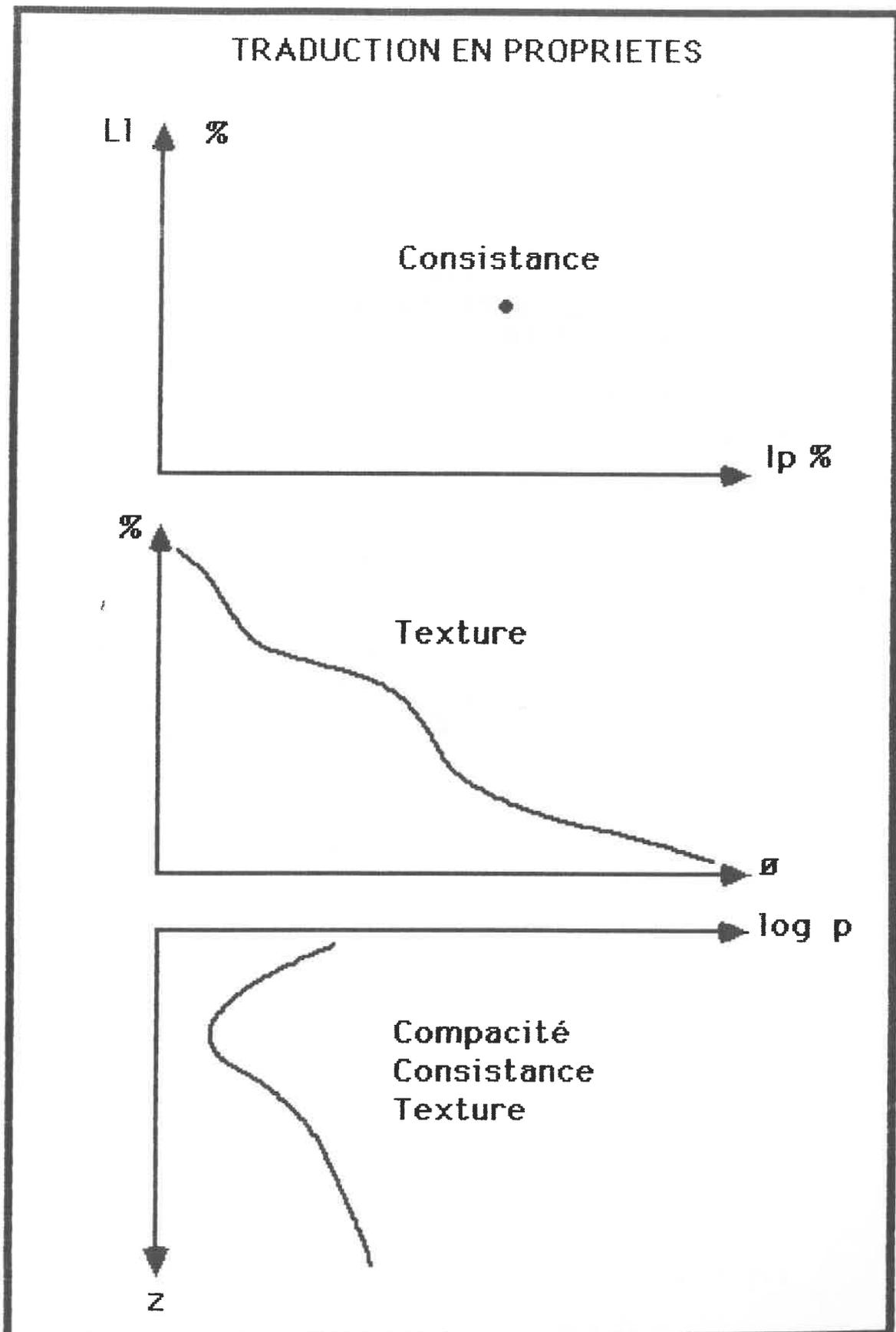
### RESULTATS

La collecte d'informations a pour résultat :

- cartes, rapports, résultats
- et/ou
- observation sur le terrain
- et/ou
- tests labo, terrain

Ces résultats doivent être traduits en propriétés relatives à l'identification d'une terre ou peuvent rester en tant que telle :

- "CHIFFRES" p.e. : IP = 10 => consistance
- et/ou
- K = 2 m/sec => texture, compacité,...
- "NOTIONS" p.e. :
  - A-2-7 => texture, consistance,...
  - GM,SA => texture, consistance,...
  - podzol => texture, minéralogie, chimie,...
  - argile d'Ypres => texture, minéralogie,...
  - Torba => texture, minéralogie, chimie,...
- et/ou
- "INDICES ET COEFFICIENTS"
- p.e. : coefficient d'activité => consistance, texture
- degré de consistance => consistance
- coefficient de courbure => texture
- et/ou
- "GRAPHIQUES" p.e. :



## CRITIQUES ET PROPOSITIONS

---

Afin de faciliter le traitement de l'information collectée, le nombre de propriétés doit de préférence être réduit au minimum. Ceci permettra d'arriver à des schémas de décision simples et bien structurés. Pour cela il sera nécessaire de découvrir toutes les interrelations possibles de propriétés et leur corrélation.

Un exemple permet d'illustrer cette stratégie : les chercheurs se bornent à trouver un essai sédimentométrique simplifié de très courte durée. On pourrait facilement s'imaginer qu'une analyse granulométrique jusque 0,4 mm accompagnée de l'analyse de la limite de liquidité et de plasticité ainsi que l'essai de traction humide rendent complètement superflus l'analyse sédimentométrique.

Une remarque identique pourrait se formuler sur les recherches d'essais de remplacement pour le Proctor ou les recherches sur le bleu de méthylène, sans pour autant sous-estimer ou dénigrer les efforts de ces chercheurs. Dans ce qui suit, nous illustrons comment il est possible de réduire le nombre de propriétés à étudier.

Les résultats que l'on peut déduire des essais de remplacement (voir plus haut) sont les suivants :

- pH
- carbonates
- sulfates
- chlorures
- matières organiques
- texture : on pourrait retenir six fractions de l'essai de tamisage, ce qui nécessite donc d'introduire 5 chiffres (le sixième étant le résultat des cinq autres)
- compactibilité :
  - on fait 10 essais (2 énergies de compactage et cinq teneurs en eau) et pour chaque essai deux mesurages (surface et fond), ce qui nécessite 20 chiffres à introduire
  - on mesure 10 fois le retrait de séchage
- essais sur la fraction fine (qualité du "mortier")
  - 2 échantillons (2 teneurs en eau) pour essai de retrait
  - 2 échantillons (2 teneurs en eau) pour la consistance

- 1 échantillon (une teneur en eau) pour essai de résistance (cohésion) ; ce qui nécessite 5 chiffres à introduire

Ceci nous donnerait 45 chiffres pour caractériser une terre, ce qui en soi est déjà trop. Il serait pourtant facile de réduire le nombre de chiffres pour la texture, compactibilité et essais sur la fraction fine :

- texture : au lieu de 5 chiffres -> 2 chiffres p.e.

d 30 et  $\frac{d_{10} \times d_{60}}{d_{30}}$

- compactibilité : au lieu de 30 chiffres -> 8 chiffres p.e.  
la résistance et la TEO pour résistance maximale de surface et  
la résistance et la TEO pour résistance maximale au fond  
et ceci pour deux énergies de compactage

- essais sur la fraction fine : 5 chiffres

Ceci nous donnerait 20 chiffres pour caractériser une terre.

En remplaçant les chiffres par des graphiques ou ceci est possible, on pourrait encore réduire le nombre de données pour caractériser une terre :

- texture : 1 graphique
- compactibilité : 1 graphique
- essais sur la fraction fine : 1 chiffre (cohésion) que l'on peut même introduire dans 1 graphique (Pfefferkorn + retrait)

Ce qui nous donnerait 3 graphiques et 5 chiffres pour caractériser une terre. Les cinq chiffres sont principalement d'importance concernant l'ajout éventuel de stabilisants et/ou modifiants.

A première vue, il serait donc possible de se limiter à trois graphiques comme point de départ et 5 chiffres à titre d'informations complémentaires que l'on n'utilisera qu'à un stade ultérieur.

Ainsi, nous avons résumé le nombre de données à trois, ce qui est beaucoup plus maniable pour l'interprétation et l'application de critères de convenance.

**TABLEAUX DE NOMENCLATURE,  
CLASSIFICATION < > PROPRIETES**

## NATURE ET ADEQUATION DES TABLEAUX

---

Une partie de l'information existante collectée désigne les caractéristiques d'une terre sous forme d'une nomenclature ou classification qui sont en elles-mêmes déjà une interprétation dirigée vers une application bien précise que ce soit l'agronomie, la géotechnique, la construction de routes et pistes ou problèmes de fondation.

D'autre part, certains critères de décision confrontant les caractéristiques d'une terre aux applications possibles contiennent les propriétés d'une terre sous forme de nomenclature ou classification. La traduction de propriétés d'une terre vers une nomenclature ou une classification ne pose généralement pas de problèmes. Par contre la traduction d'une nomenclature ou classification vers les propriétés d'une terre ou si nécessaire la mutation vers un autre système de classification ou nomenclature n'est pas une sinécure.

Les deux constatations précédentes nous mènent à formuler la proposition suivante :

Il est absolument nécessaire de faire l'exercice de réinterprétation de nomenclature et classifications existantes.

p.e. : classification géotechnique AASHO M 145 (USA) : quel est le fuseau granulométrique du groupe A-2-7 ?

p.e. : classification selon Casagrande : il existe deux versions, le "normal" et le "extended". Le groupe ML, CL, OL a été étendu en deux groupes ML, CL et MI, CI, OI. Quel est le poids de cette extension en termes de propriétés d'une terre : fuseau granulométrique, zone de plasticité, etc.... ?

Nous estimons cette réinterprétation primordiale car de simples tableaux de conversion ne permettront pas de décisions approfondies, p.e. : A-7 (AASHO) = OH, MH, CH (USCS) car chaque classification est construite sur une autre base.

Il faut donc essayer de reconvertir les classifications existantes dans des fuseaux limites que l'on peut par exemple introduire dans les trois graphiques mentionnés précédemment.

**CONFRONTATION ENTRE PROPRIETES  
ET TECHNIQUES**

## CONTEXTE DE LA CONFRONTATION

---

Pour arriver à une décision, il faut confronter des propriétés d'une terre à la gamme théorique de techniques possibles et même des groupes de propriétés à des groupes de techniques. Pour cela on utilisera des tableaux de décision existants ou à développer.

A la suite de cette confrontation, on arrive à une gamme de techniques possibles c'est-à-dire : procédés de production, construction ET/OU stabilisants ET/OU modifiants p.e. :

- terre comprimée avec fibres
- terre comprimée stabilisée à la chaux après modification granulométrique
- ...

Durant cette confrontation entre propriétés d'une terre et techniques, nous sommes également confrontés aux performances technologiques requises, inhérentes aux procédés de production et/ou construction et à l'ajout de stabilisants et/ou modifiants.

## PERFORMANCES REQUISES

### STABILITE STRUCTURALE IMMEDIATE

Pendant la production ou la construction, la terre est soumise à des contraintes spécifiques p.e. :

- pisé : la terre du pisé doit, durant la construction pouvoir supporter son propre poids ainsi que le poids des banches et ouvriers. Pourtant, à ce stade, le pisé n'a pas encore sa résistance maximale
- bloc comprimé : le bloc sortant de la presse doit avoir une résistance minimale permettant la manipulation et le transport.

Ceci nécessite donc la connaissance des caractéristiques de résistance à la teneur en eau de fabrication.

## COMPACTIBILITE

Beaucoup de techniques partent du principe de compression à différents degrés ayant pour effet l'augmentation de la cohésion et l'angle de friction interne.

Ceci nécessite donc la connaissance des caractéristiques de compactage pour différentes teneurs en eau, différentes énergies de compactage et différents types de compactage.

## MANIABILITE

Afin de faciliter la production, on exige du matériau une certaine maniabilité qui dépend de la consistance du mélange et de l'adhérence du matériau à l'équipement de production. Cette consistance et l'adhérence sont bien entendu fonction de la nature de la terre et des ajouts éventuels mais dépendent également de la compacité et de la teneur en eau.

Cette exigence de maniabilité influence les performances requises p.e. : la courbe idéale granulométrique est fonction de la maniabilité recherchée car  $Y_d = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}}$

D

avec A' étant une constante, fonction de la maniabilité désirée et de la forme des grains (rond ou carré).

(Cette formule provient de la technologie du béton et a été reprise pour la construction en terre sans l'introduction de A).

On peut se demander et s'interroger si oui ou non, et à quel stade et quel degré ces performances requises inhérentes à la technique sont incorporées dans les schémas décisionnels actuels.

## RECOMMANDATIONS

L'on comprend aisément que :

- vu le grand nombre de propriétés identifiables
- vu le grand nombre de modes d'utilisation (procédés de production, construction ; stabilisants ; modifiants)
- vu le grand nombre de combinaisons possibles, aussi bien du côté propriétés que du côté techniques,

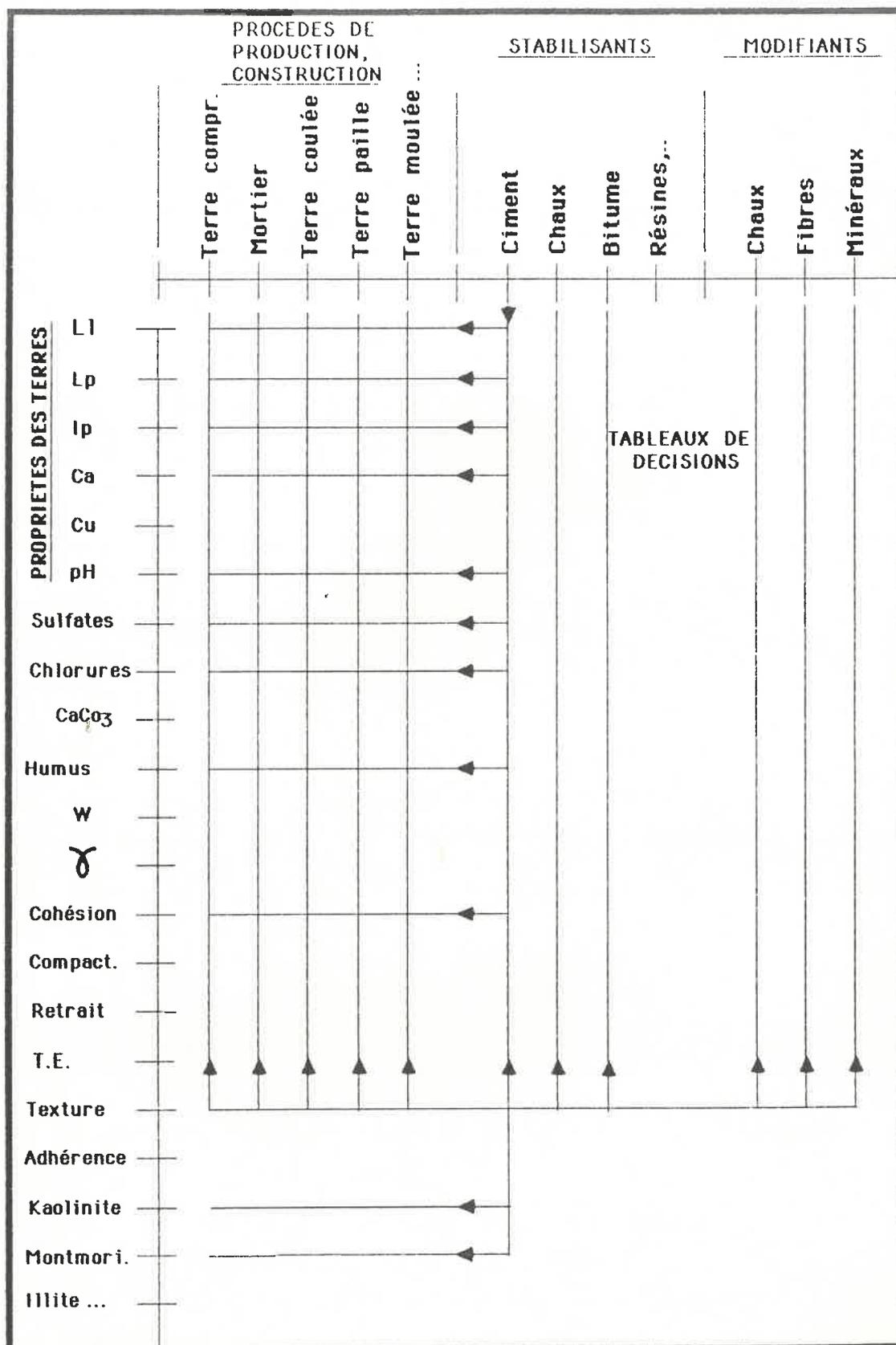
à ce jour cette confrontation entre propriétés et techniques n'est qu'au stade préliminaire, ne couvre en aucun cas la multitude de combinaisons possibles et troisièmement contient un trop grand nombre de généralités et spéculations.

Il est donc absolument nécessaire de réduire le nombre de variables :

- réduire le nombre de propriétés à identifier aux propriétés fondamentales, indépendantes
  
- réduire le nombre de techniques en caractéristiques fondamentales et indépendantes.

Ceci nécessitera une systématisation de la connaissance actuelle et une orientation profonde de la recherche à venir.

On pourrait éventuellement réduire la gamme technique à étudier en éliminant par une analyse préliminaire de certaines techniques en se basant sur des éléments de performances techniques et non techniques requises. En procédant de cette façon, on se rapproche considérablement du type 2 et 3 des stratégies de décision.



## LISTES DES TECHNIQUES

## NATURE DU CONTENU DES LISTES

---

Par technique nous entendons les procédés de production et construction avec ou sans ajout de stabilisants ou modifiants.

Par stabilisants nous entendons :

- les stabilisants qui créent un squelette inerte qui s'oppose à tout mouvement et enchaîne les particules (liants)
- les stabilisants qui forment des liaisons chimiques stables entre les particules (liants)
- imperméabilisants (hydrophobants)
- hydrofugeants (hydrophobants)

Par modifiants nous entendons :

- les stabilisants inertes : minéraux, fibres
- la chaux en quantité insuffisante pour intégralement lier les particules, mais modifiant la consistance

## PROCEDES DE PRODUCTION ET DE CONSTRUCTION

---

Il existe une vaste panoplie de techniques de production et de construction en terre. Afin de structurer cette diversité, une classification s'impose. Les différentes technologies peuvent être classées selon divers paramètres.

### TEXTURE DU MATERIAU TERRE

- organique : p.e. la tourbe
- graveleux : majorité de graviers et de cailloux
- sableux : majorité granulométrique sableuse
- limoneux : " " limoneuse
- argileux : " " argileuse

### ETAT HYDRIQUE DE LA TERRE

- conglomérat compact ou friable (agglomération)
- terre sèche : concrétion solide ou friable (en gros morceaux, mottes ou complètement pulvérisé)
- terre humide : teneur en eau 5 à 15 % selon la nature de la terre
- terre plastique : " " 15 à 30 % " " " "
- terre molle : " " 15 à 35 % " " " "
- terre liquide : boue ou barbotine

### STRUCTURE CONSTRUCTIVE DE LA TERRE

- sous forme de composants (p.e. : blocs) employés en maçonnerie pour la construction de structures portantes
- sous forme d'éléments ou entités structurelles monolithes
- sous forme de remplissage, recouvrement ou revêtement de structures portantes construites en d'autres matériaux de construction

- sous forme de mortier pour la maçonnerie

## METHODE DE MANIPULATION

Cette classification détermine les technologies selon la méthode de manipulation de la terre durant la production ou la construction

Terre creusée : l'habitation est creusée dans l'épaisseur de l'écorce terrestre

Terre couvrante : la terre recouvre une structure construite avec un autre matériau

Terre remplissante : la terre remplit des matériaux creux employés comme enveloppe

Terre découpée : des blocs de terre sont directement découpés dans la masse du sol

Terre comprimée : des éléments sont réalisés avec une terre comprimée dans des moules ou des coffrages (pisé ou blocs comprimés)

Terre façonnée : la terre plastique est façonnée à la main pour dresser des murs minces

Terre empilée : des boules de terre sont empilées pour constituer des murs épais

Terre moulée : la terre est moulée à la main à l'aide de moules en formes diverses

Terre extrudée : la terre est extrudée par une puissante machine

Terre coulée : la terre est coulée dans des coffrages ou dans des moules comme un béton

Terre-paille : une barbotine argileuse lie des fibres (de paille) et constitue un matériau léger

Terre-garnissage : la terre mêlée à des fibres est appliquée en couche mince pour garnir un support

Terre-mortier : la terre est employée comme mortier de maçonnerie

Terre-enduit : la terre est employée comme enduit de finition

## NOM GÉNÉRIQUE

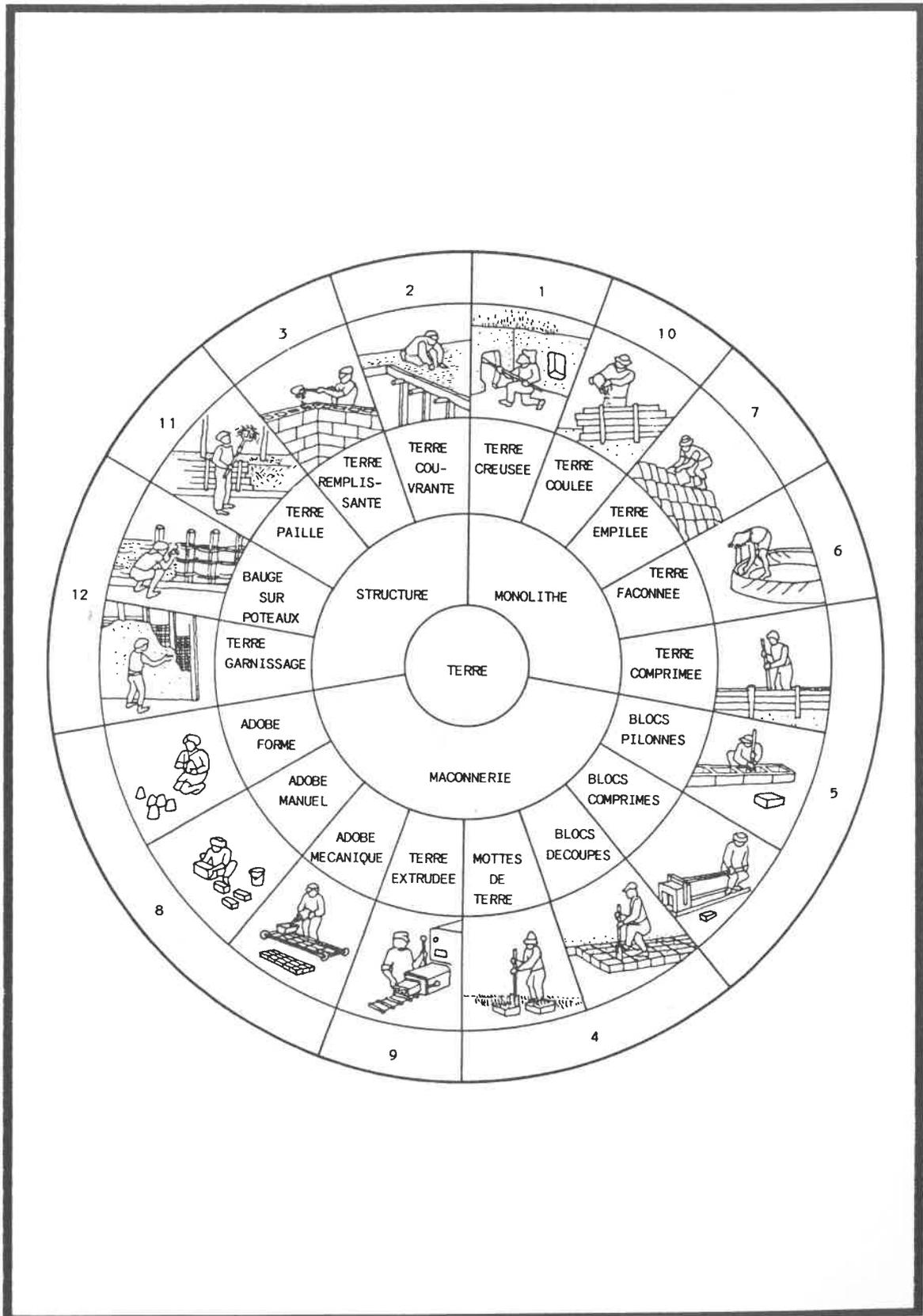
- Blocs compressés
- Adobe
- Pisé
- Terre-paille
- Torchis
- Bauge
- Façonnage direct
- Terre coulée
- ...

La structuration de ces techniques est faite selon des critères du type :

- type de structure: maçonnerie ou monolithe; porteur ou non porteur
- type de contraintes à résister
- exigences de stabilité volumétrique
- exigences de stabilité structurale : immédiate ou après cure
- exigences de maniabilité : immédiate ou après cure
- exigences de durabilité

Bien entendu, il existe au sein de chaque technique des dizaines de variantes et des techniques mixtes qui combinent plusieurs matériaux ou techniques.

PROCEDES DE CONSTRUCTION ET DE PRODUCTION



LISTE DES STABILISANTS

---

## CIMENT

## CIMENTS

CPA 250

CPA 350

CPAL

CPAC

CPAZ

## ADDITIFS

Acétate d'amine

Mélamine

Aniline

Chlorure de fer

Chaux

Chlorure de calcium

Bitume

Additifs sodiques

Soude caustique

Sulfate de sodium

Métasilicate de sodium

Carbonate de sodium

## CHAUX

## CHAUX AERIENNES

Chaux vive

Chaux éteinte

## CHAUX HYDRAULIQUE

XHN

XHA

## CHAUX AGRICOLES

## ADDITIFS

Additifs sodiques

Soude caustique

Sulfate de sodium

Métasilicate de sodium

Carbonate de sodium

Ciment

Sulfate de magnésium

Sulfate de potassium

Bitume

Produits hydrofuges

**BITUME****CUT-BACKS**

Rupture lente

SC 0

SC 1

SC 2

SC 3

Rupture moyenne

MC 0

MC 1

MC 2

MC 3

Rupture rapide

RC 0

RC 1

RC 2

RC 3

**EMULSIONS**

Anionique

Rupture lente SSI

Rupture lente SS IH

Rupture moyenne MSI

Rupture moyenne MSIH

Rupture rapide RSI

Rupture rapide RS IH

**ADDITIFS**

Ciment

Chaux

Amines quaternaires

Cires

Anhydride phosphorique

**RESINES****PRODUITS NATURELS TRANSFORMES**

Gomme arabique

Palmo-copal

Résine de Wallaba

Colophane

Vinsol

Lignine

Mélasses

Ethylcellulose

Cellulose carboxyméthylque

Gomme-laque

## RESINES A BASE DE FURFUROL

- Aniline furfural
- Alcool furfurylique
- Resorcinol-furfurool
- Urée-furfurool et phénol-furfurool

## RESINES A BASE DE FORMALDEHYDE

- Résorcinol-formaldéhyde
- Phénol-formaldéhyde
- Urée-formaldéhyde
- Phénol-formol
- Calcium-sulfamate-formaldéhyde
- Mélatamine-formaldéhyde

## RESINES A BASE DE COMPOSES ACRYLIQUES

- Acrylate de calcium
- Nitrite acrylique
- Polyacrylamides

## RESINES A BASE D'UREE

- Résine polyuréthane
- Urée-formol
- Méthyle-urée
- Diméthylol-urée

## RESINES A BASE DE POLYVINYLE

- Alcool polyvinylique
- Acétate de polyvinyle

## AUTRES PRODUITS

- Composés d'aluminium
- Résine époxyde

## PRODUITS NATURELS

## PRODUITS D'ORIGINE ANIMALE

- Excréments
- Sang d'animaux
- Caséine
- Chaux
- Colles animales
- Cornes
- Ossements
- Sabots
- Peaux
- Poissons

- Termitières
- Huiles, graisses

## PRODUITS D'ORIGINE VEGETALE

- Cendres
- Huiles et Graisses végétales
- Ricin
- Lin

Coco  
Coton  
Kapok  
Karite  
Acide Palmitique  
Tannins  
Nere  
Chêne  
Châtaignier  
Acacia scorpioide  
Acides humiques ou polyphénols  
Sèves et latex  
Bananier  
Euphorbe  
Hévéa

#### **PRODUITS SYNTHETIQUES**

ACIDES

SOUDES

SELS

DERIVES D'AMINES QUATERNAIRES

SILICATES

STEARATES

PARAFFINE

CIRES

LATEX

COLLES SYNTHETIQUES

SAVONS

DECHETS INDUSTRIELS

Huile de vidange

Laitiers de hauts-fourneaux

Lignine et lignosulfates

Mélasses

Autres produits divers

PLATRE

#### **PRODUITS COMMERCIAUX**

Adogen 422

Aliquad H 226

AM 8

AM 9

Armeen

Arquad 2 TH

Bloc sol

Conservex SCX 444

Consolid SC 444

Crétasol

Dynasolo DS 328

Earth-pak  
Fixa-T  
Géopolymère  
Landscape  
Lytron  
Mitsui stopper  
NSP 121  
NSP 252  
Nux  
Paczyme  
Plasmofalt  
Plastic B  
Résine 321  
Résorcibond  
RRP  
Stabilonia  
Stabinol  
Stabiram 677 N  
Stasol  
SIS  
Tacss  
Terbec  
Terrabind A  
Terrabind B  
Terrabind C  
Terrabind D

LISTE DES MODIFIANTS

---

**CHAUX****CHAUX AERIENNES**

Chaux vive

Chaux éteinte

**CHAUX HYDRAULIQUES**

XHN

XHA

**CHAUX AGRICOLES****PRODUITS MINERALOGIQUES****PRODUITS D'ORIGINE GEOLOGIQUE**

Graviers lourds

Graviers légers

Pierre ponce

Sables

Argiles

**PRODUITS D'ORIGINE SYNTHETIQUE**

Scories

Argile expansée

Verre expansé

Poudre de verre

**FIBRES****FIBRES VEGETALES**

Paille

Orge

Seigle

Blé

Froment

Escourgeon

Lavande

Balle de céréales

Riz

Blé

Orge

Sciure de bois

Copeaux de bois

Foin

Chanvre

Mil

Bagasse

Coco

Sisal

Manille

Herbe d'éléphant  
Fanés de pommes de terre  
Bruyère  
Palmier bambou  
Hibiscus  
DEBRIS DE TEILLAGE  
Lin chanvre  
FIBRES ANIMALES  
Poils  
Crins  
FIBRES SYNTHETIQUES  
Nylon  
Acier  
Fibres de verre  
Textiles

**TABLEAUX DE PROPRIETES < > TECHNIQUES**

## NATURE ET ADEQUATIONS DES TABLEAUX

---

Les tableaux de décision confrontant les propriétés d'une terre aux techniques possibles contiennent différents types d'informations :

- "FAITS" : p.e. pour stabiliser au ciment, il faut une texture bien précise
- "GENERALITES" p.e. les montmorillonites sont mal compressibles
- "SPECULATIONS" : p.e. - il faut "amaigrir" les terres tropicales noires

Les tableaux actuels contiennent également différents types de paramètres : p.e. des propriétés ou des notions ou des coefficients, ces derniers étant une évaluation ou interprétation de propriétés données.

Les critères sont parfois bien délimités ou parfois vagues, exclusifs ou préférentiels.

Les critères sont parfois transitifs et accumulables, parfois non. Il existe à ce sujet un grand nombre d'incertitudes. Un exemple peut illustrer facilement cette constatation :

Il existe un fuseau granulométrique limite pour le procédé de production : blocs de terre comprimée.

Il existe également un fuseau granulométrique limite pour le stabilisant ciment.

Ceci veut-il nécessairement dire que pour faire des blocs de terre comprimée stabilisés au ciment, la terre doit posséder une courbe granulométrique qui s'inscrit à l'intérieur du recouvrement des fuseaux granulométriques limites ? Est-ce que le fuseau granulométrique limite pour blocs de terre comprimée est nécessairement le même avec ou sans ajout de stabilisants de modifiants ?

Dans ce qui suit, nous reprenons des tableaux contenant des faits et non des généralités et spéculations.

# TEXTURE, TENEUR EN EAU < > PROCEDES DE CONSTRUCTION

ETAT HYDRIQUE DE LA TERRE						TEXTURE	ETAT HYDRIQUE DE LA TERRE					
CONGLOMERAT		SECHE		HUMIDE			PLASTIQUE		MOU		LIQUIDE	
COMPACT	FRIABLE	CONCRETION SOLIDE	CONCRETION FRIABLE	TERRE PEU HUMIDE	TERRE HUMIDE		PATE FERME	PATE MI-FERME	PATE MI-MOLLE	PATE MOLLE	BOUE	BARBOTINE
1	4	3	2	4	5	ORGANIQUE						
						GRAVELEUX			7		10	
						SABLEUX		9	8			
						LIMONEUX	6			12		
						ARGILEUX					11	

	<b>1 - TERRE CREUSEE</b> L'habitation est creusée dans l'épaisseur de l'écorce terrestre : habitat troglodytique.
	<b>2 - TERRE RECOUVRANTE</b> La terre recouvre une structure construite avec un autre matériau.
	<b>3 - TERRE REMPLISSANTE</b> La terre remplit des matériaux creux employés comme enveloppe.
	<b>4 - TERRE DECOUPEE</b> Des blocs de terre sont directement découpés dans la masse du sol.
	<b>5 - TERRE COMPRIMEE</b> Des éléments sont réalisés avec une terre comprimée dans des moules ou des coffrages.
	<b>6 - TERRE FACONNEE</b> La terre plastique est façonnée à la main pour dresser des murs minces.
	<b>7 - TERRE EMPILEE</b> Des boules de terre sont empilées pour constituer des murs épais.
	<b>8 - TERRE MOULEE</b> La terre est moulée à la main ou à l'aide de moules en formes diverses.
	<b>9 - TERRE EXTRUDEE</b> La terre est extrudée par une puissante machine.
	<b>10 - TERRE COULEE</b> La terre est coulée dans des coffrages ou dans des moules comme un béton.
	<b>11 - TERRE-PAILLE</b> Une barbotine argileuse liée des fibres et constitue un matériau léger.
	<b>12 - TERRE GARNISSAGE</b> La terre mêlée de fibres est appliquée en couche mince pour garnir un support.

**CONGLOMERAT COMPACT :**  
agglomération monolithique de matériaux grossiers; terre compacte et lourde que l'on découpe difficilement.

**CONGLOMERAT FRIABLE :**  
agglomération de matériaux friables ou décomposés que l'on découpe facilement, incluant la tourbe ou les mottes de gazon.

**CONCRETION SOLIDE :**  
terre complètement sèche, en gros morceaux ou en mottes solides.

**CONCRETION FRIABLE :**  
terre complètement sèche sous forme pulvérisée.

**TERRE PEU HUMIDE :**  
terre dont l'humidité naturelle est peu élevée (4-10 %); sensation tactile sèche plutôt qu'humide.

**TERRE HUMIDE :**  
terre dont le toucher donne une sensation d'humidité réelle (8-18 %); ne peut être façonnée par manque de plasticité.

**PATE FERME :**  
une forte pression des doigts est nécessaire pour former une boule de terre (15-25 % de teneur en eau) qui ne se déforme presque pas quand on la laisse tomber d'une hauteur de 1 mètre.

**PATE MI-FERME :**  
une légère pression des doigts suffit pour former une boule de terre (15-30 % de teneur en eau); en tombant d'une hauteur de 1 mètre, la boule s'affaisse légèrement sans se désagréger.

**PATE MI-MOLLE :**  
on peut façonner très facilement une boule de terre homogène, non collante ni salissante (15-30 % de teneur en eau); lâchée d'une hauteur de 1 mètre, cette boule s'affaisse notablement sans se désagréger.

**PATE MOLLE :**  
il est très difficile, voire impossible de former une boule avec cette terre qui est très collante et salissante (20-35 % de teneur en eau).

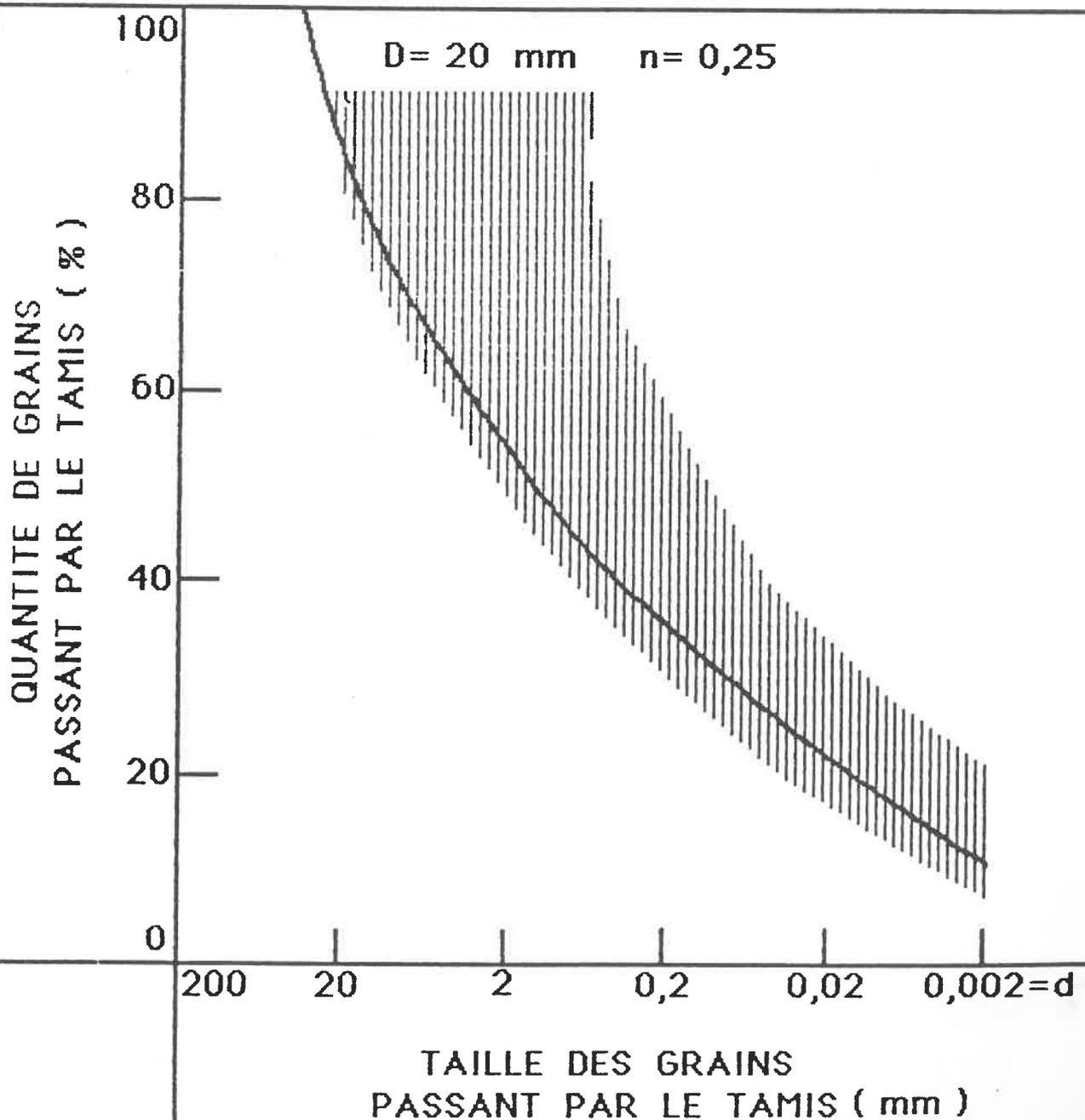
**BOUE :**  
cette terre est détrempée d'eau et forme une masse visqueuse plus ou moins liquide.

**BARBOTINE :**  
la terre argileuse est totalement dispersée dans l'eau et constitue un liant très liquide, coulant.

TEXTURE < > PROCEDE DE PRODUCTION

CRITERE DE CONVENANCE DE LA TEXTURE  
POUR LA QUALITE DES PRODUITS

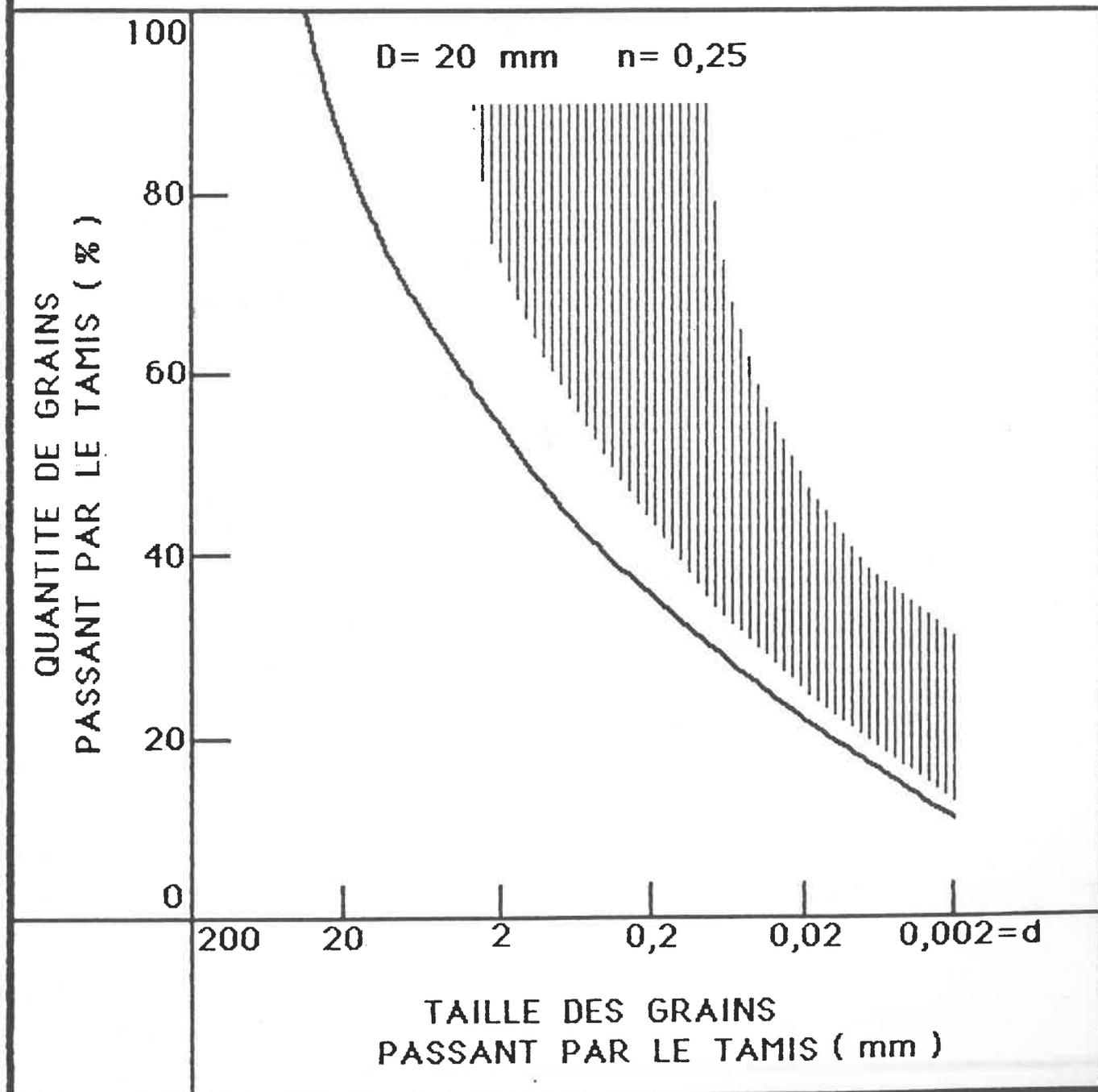
BLOCS COMPRIMES



TEXTURE < > PROCEDE DE PRODUCTION

CRITERE DE CONVENANCE DE LA TEXTURE  
POUR LA QUALITE DES PRODUITS

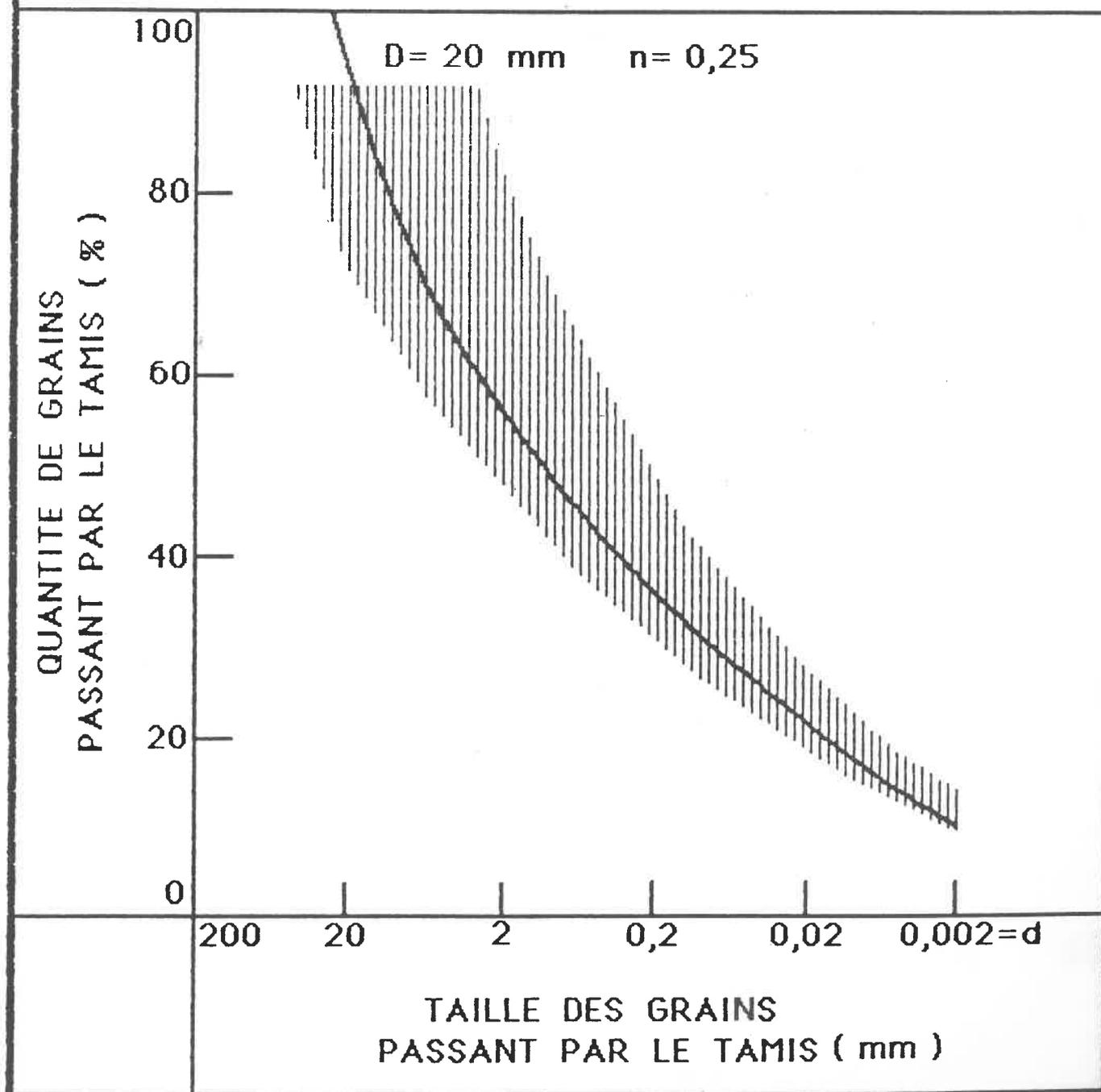
ADOBE



TEXTURE &lt; &gt; PROCEDE DE PRODUCTION

CRITERE DE CONVENANCE DE LA TEXTURE  
POUR LA QUALITE DES PRODUITS

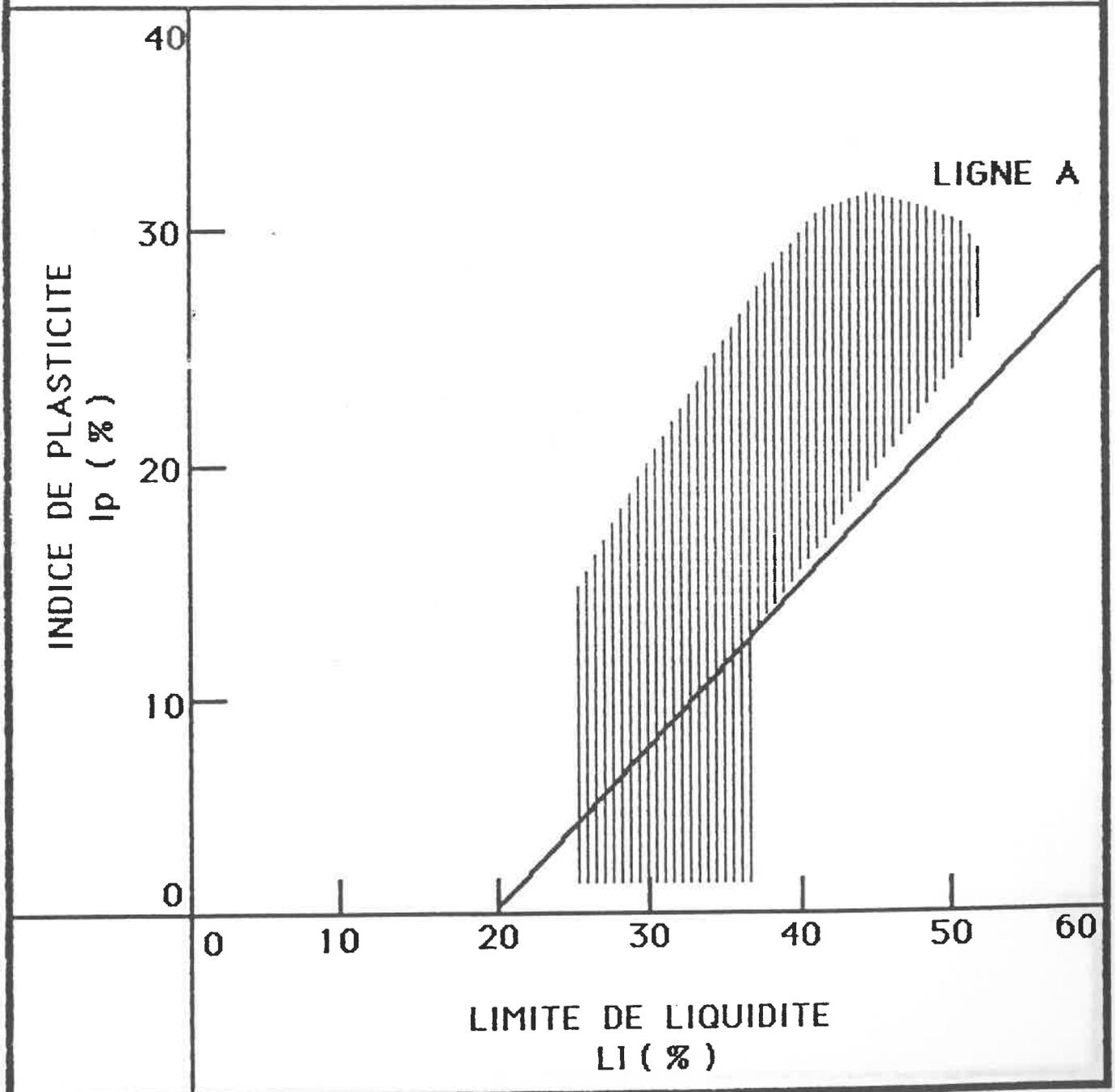
PISE



CONSISTANCE &lt; &gt; PROCEDE DE PRODUCTION

CRITERE DE CONVENANCE DE LA PLASTICITE  
POUR LA QUALITE DES PRODUITS

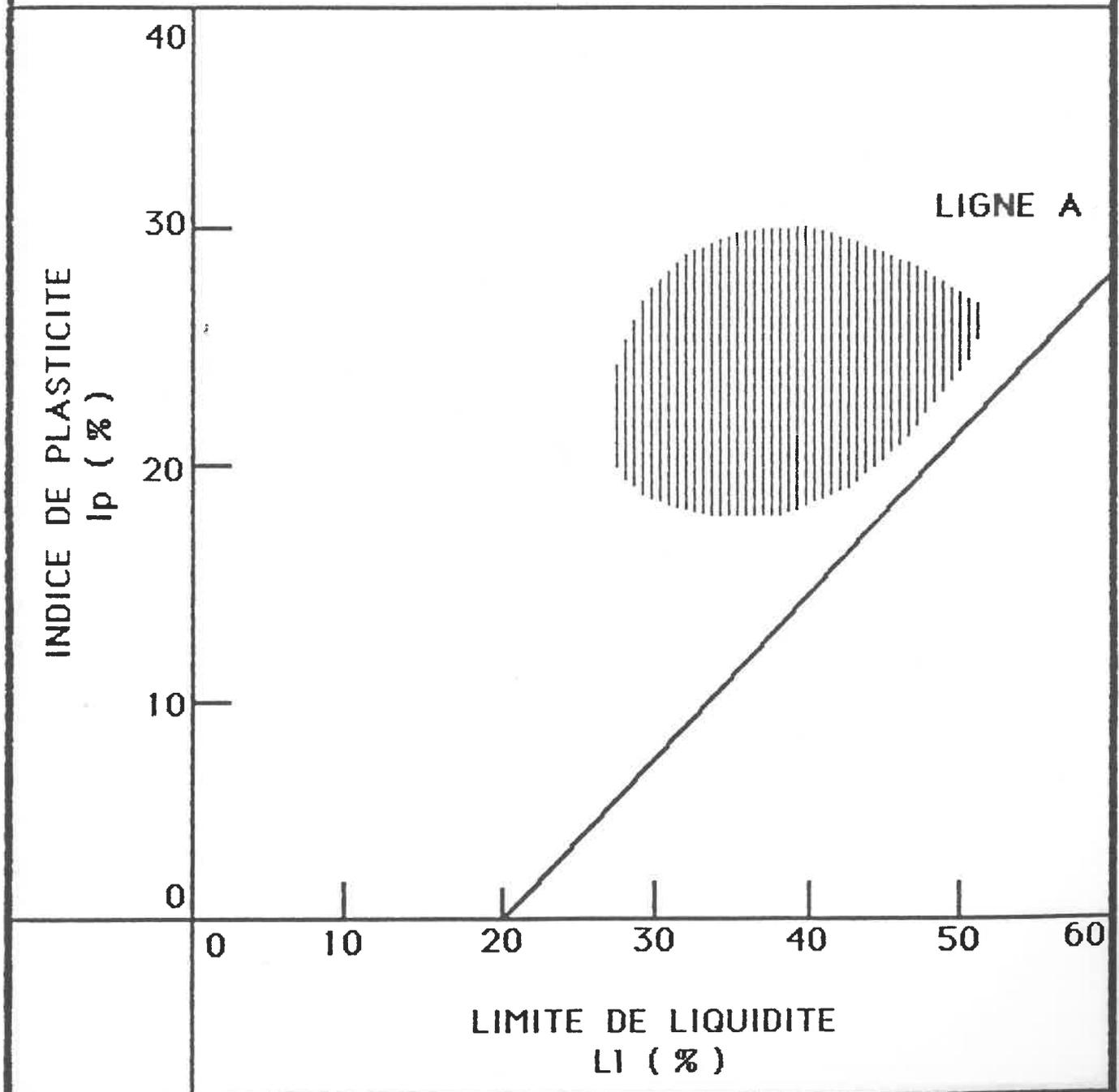
## BLOCS COMPRIMES



CONSISTANCE &lt; &gt; PROCEDE DE PRODUCTION

CRITERE DE CONVENANCE DE LA PLASTICITE  
POUR LA QUALITE DES PRODUITS

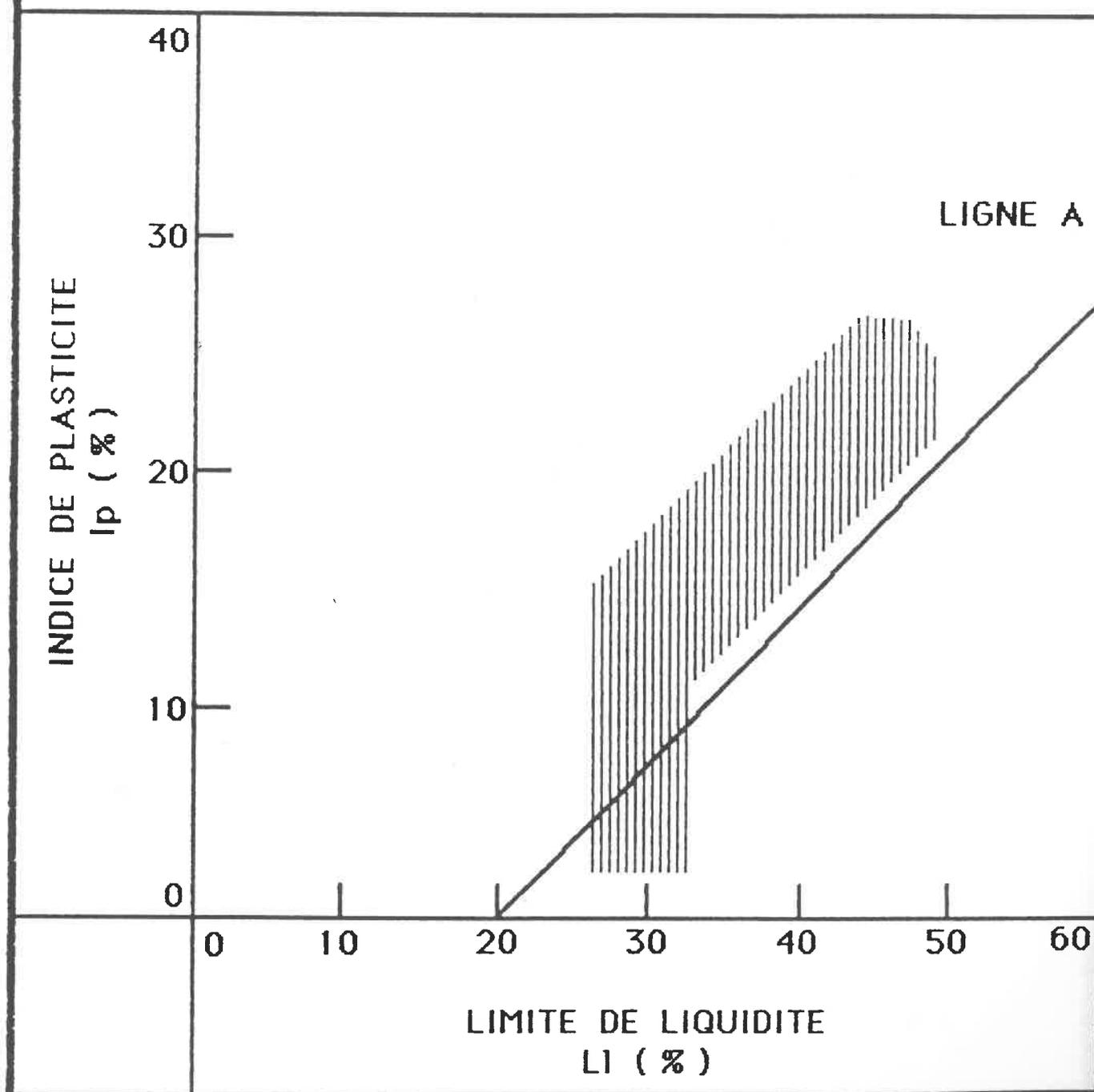
ADOBE



CONSISTANCE &lt; &gt; PROCEDE DE PRODUCTION

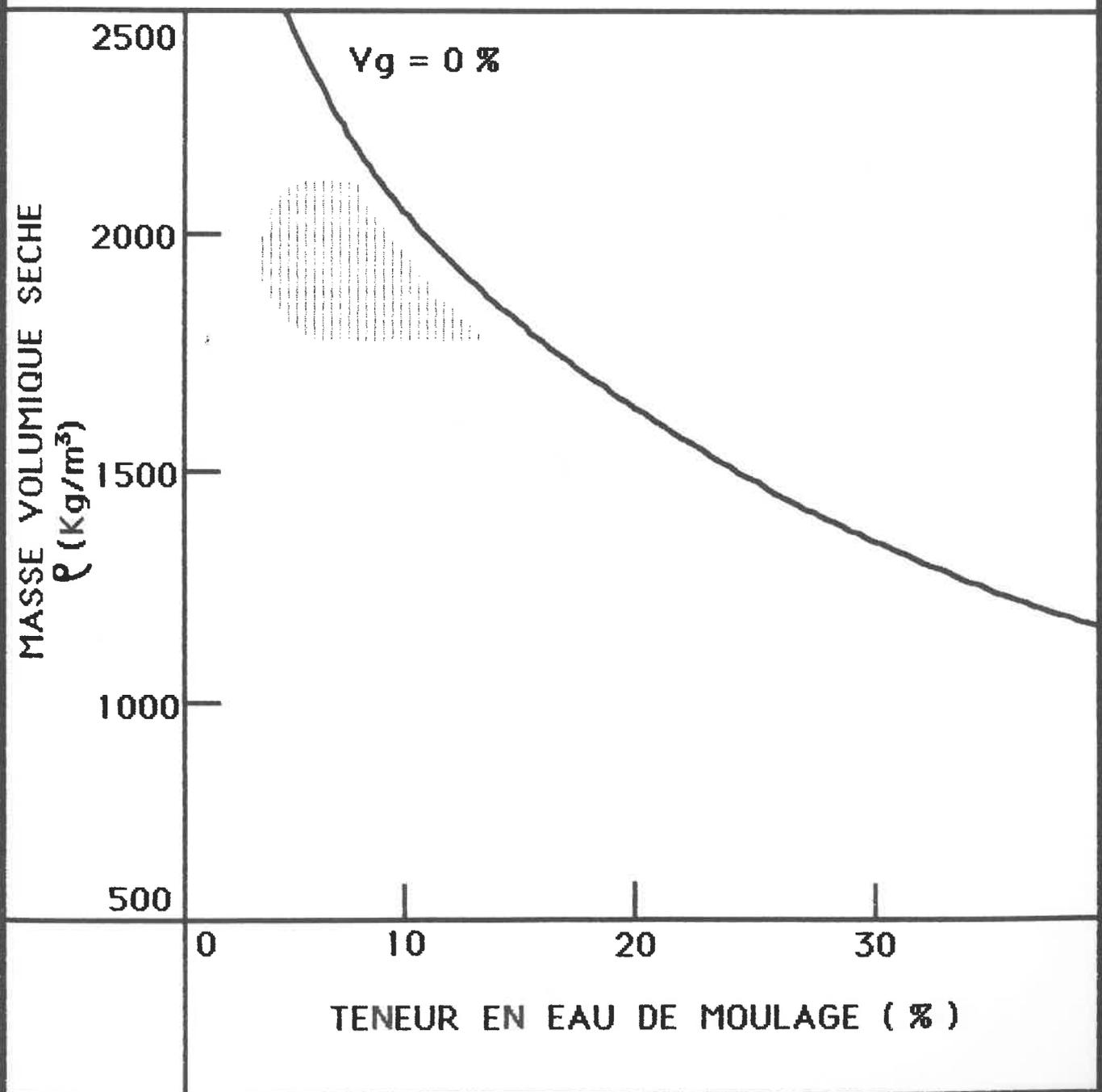
CRITERE DE CONVENANCE DE LA PLASTICITE  
POUR LA QUALITE DES PRODUITS

PISE



CRITERE DE CONVENANCE DE LA COMPRESSIBILITE  
POUR LA QUALITE DES PRODUITS

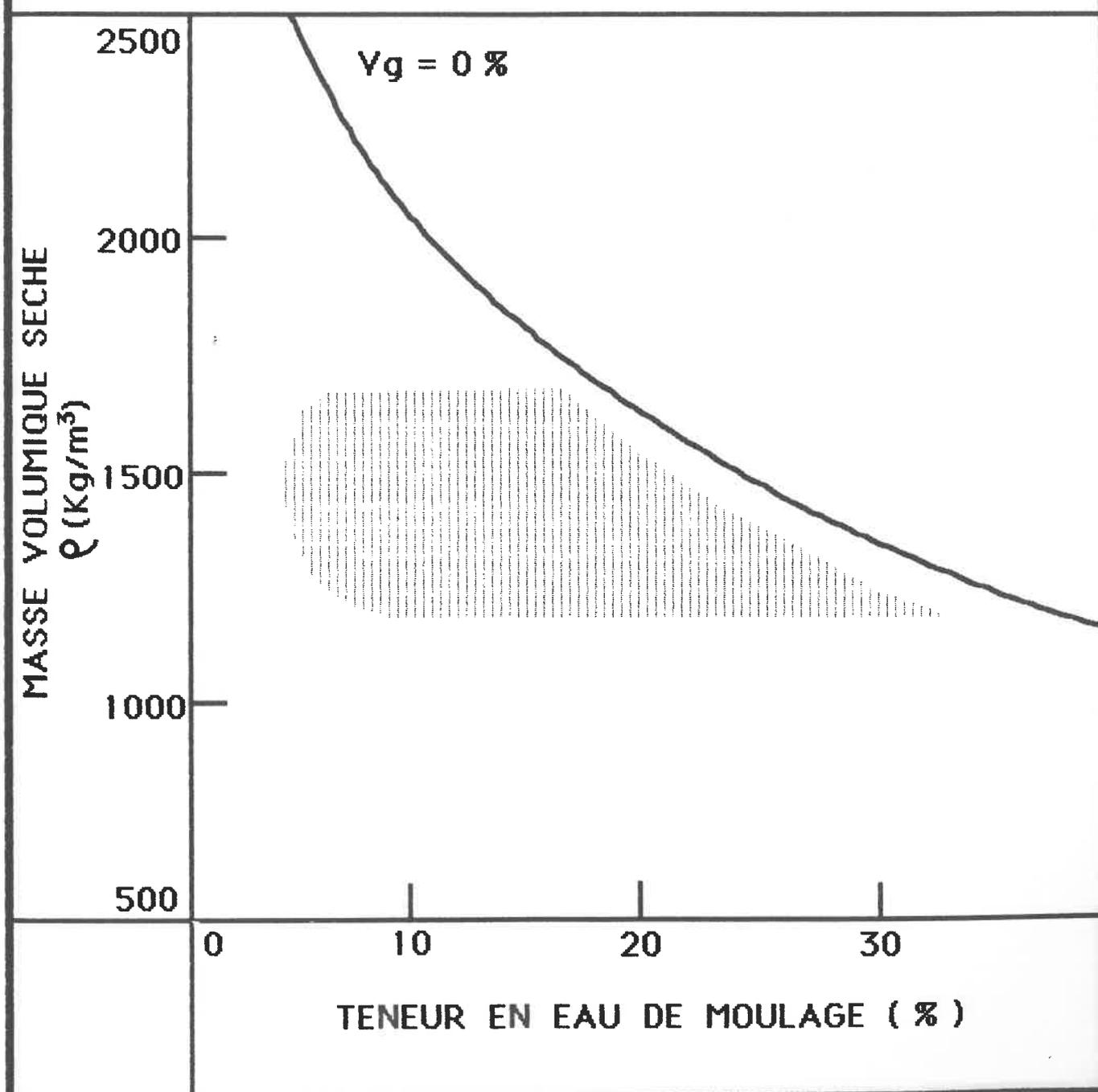
## BLOCS COMPRIMES



## COMPACTIBILITE &lt; &gt; PROCEDE DE PRODUCTION

CRITERE DE CONVENANCE DE LA COMPRESSIBILITE  
POUR LA QUALITE DES PRODUITS

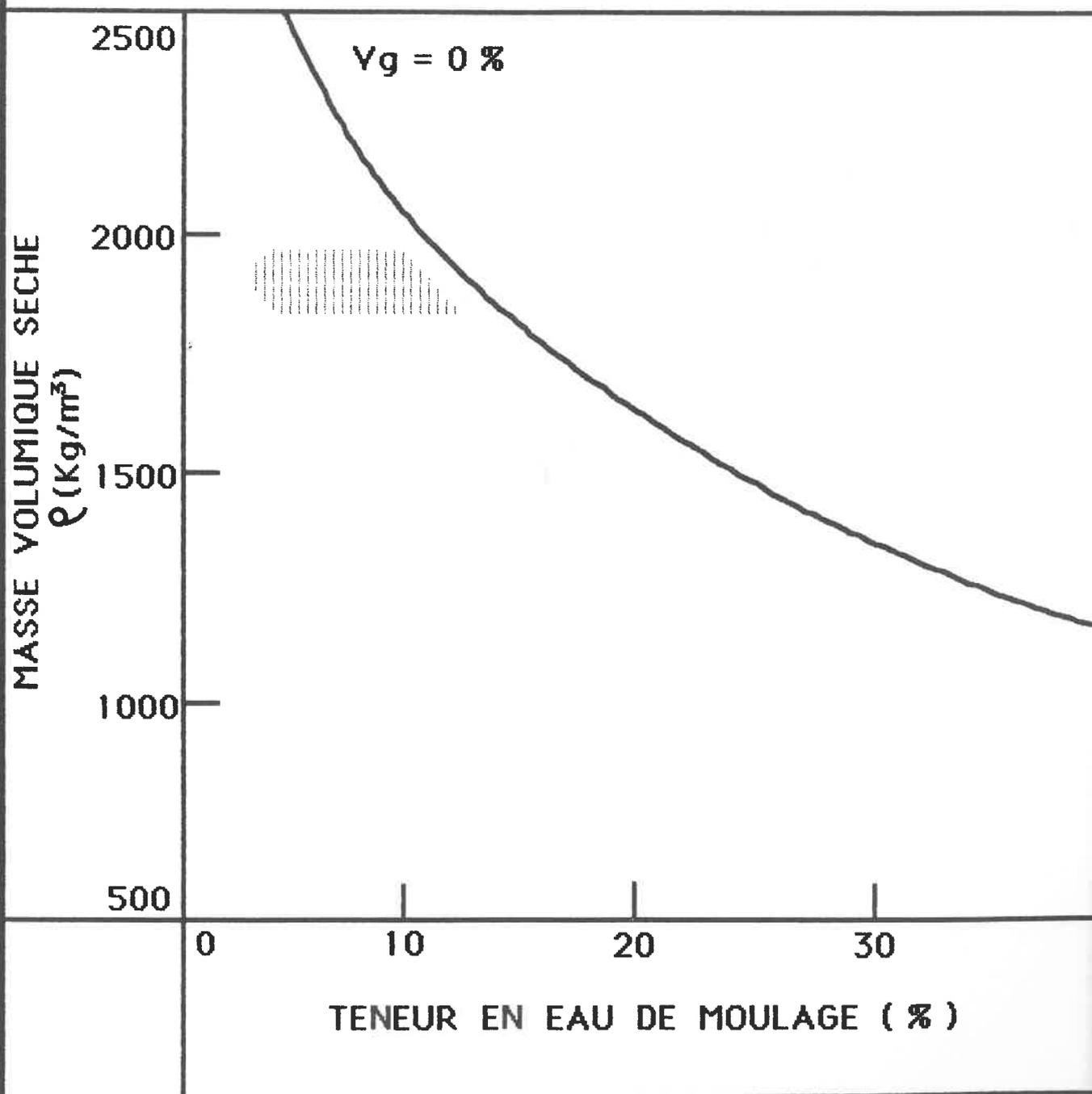
## ADOBE



## COMPACTIBILITE &lt; &gt; PROCEDE DE PRODUCTION

CRITERE DE CONVENANCE DE LA COMPRESSIBILITE  
POUR LA QUALTE DES PRODUITS

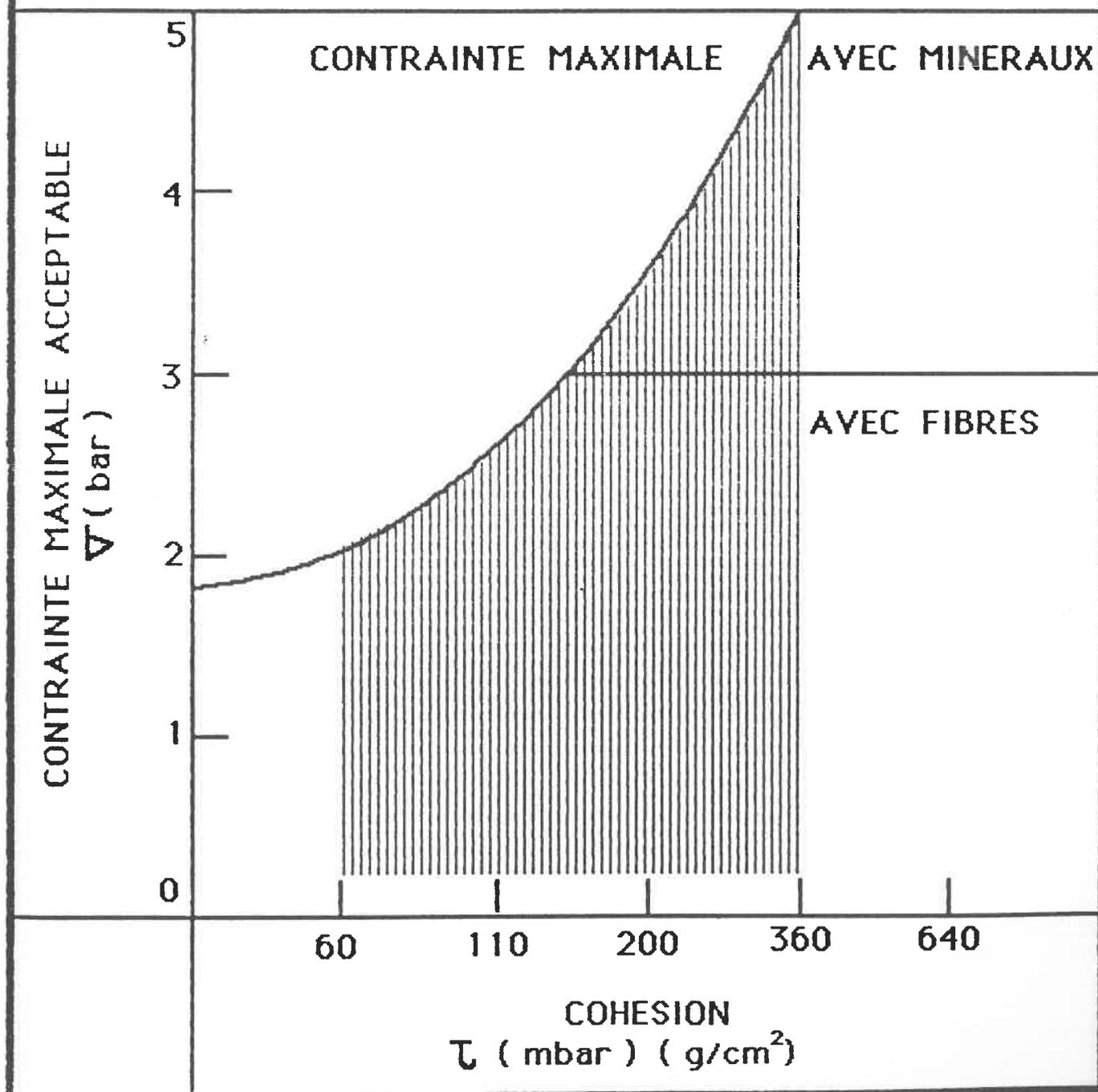
PISE



## COHESION &lt; &gt; PROCEDE DE PRODUCTION

CRITERE DE CONVENANCE DE LA COHESION  
POUR LA QUALITE DES PRODUITS

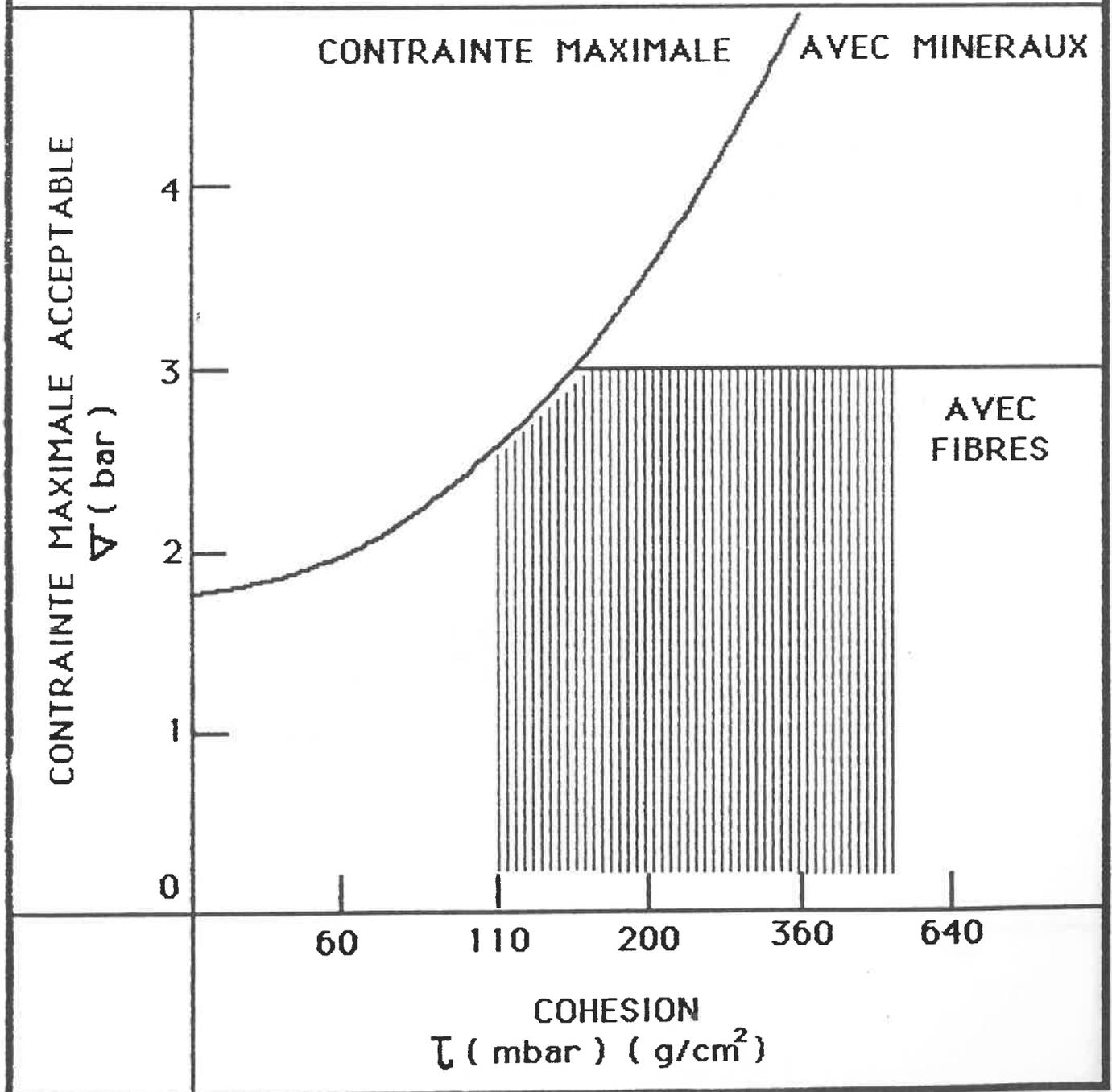
## BLOCS COMPRIMES



## COHESION &lt; &gt; PROCEDE DE PRODUCTION

CRITERE DE CONVENANCE DE LA COHESION  
POUR LA QUALITE DES PRODUITS

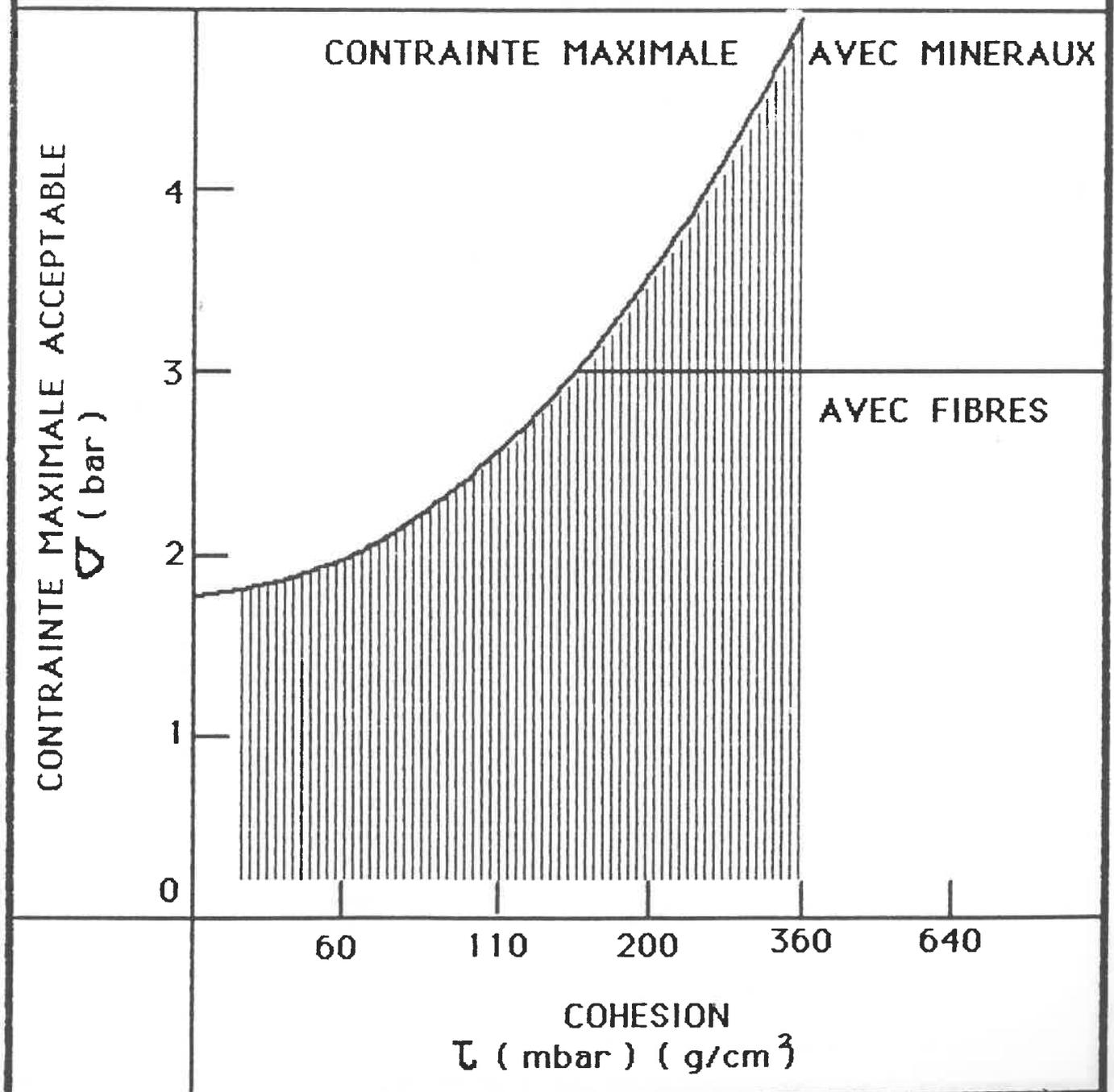
## ADOBE



## COHESION &lt; &gt; PROCEDE DE PRODUCTION

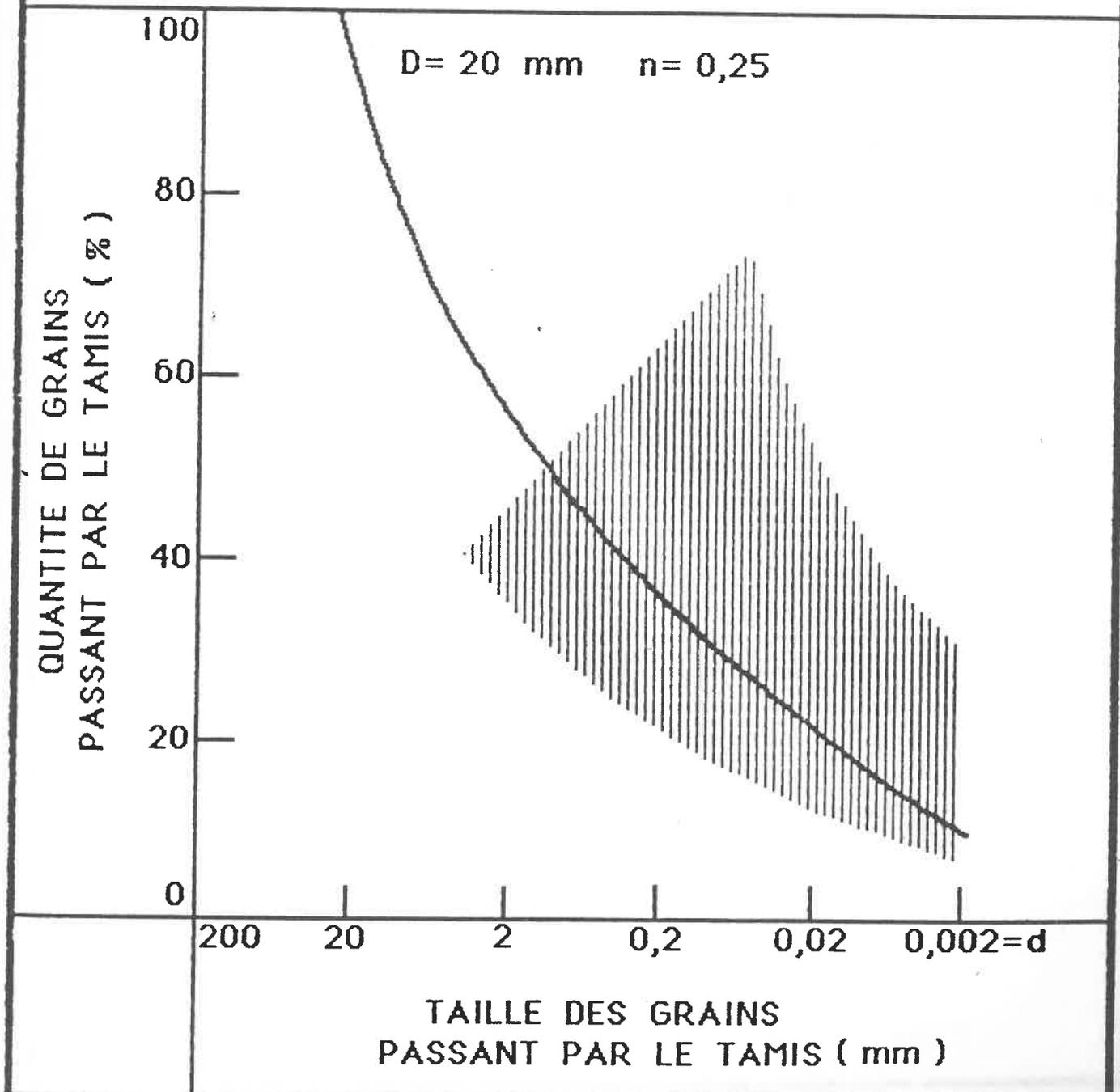
CRITERE DE CONVENANCE DE LA COHESION  
POUR LA QUALITE DES PRODUITS

PISE

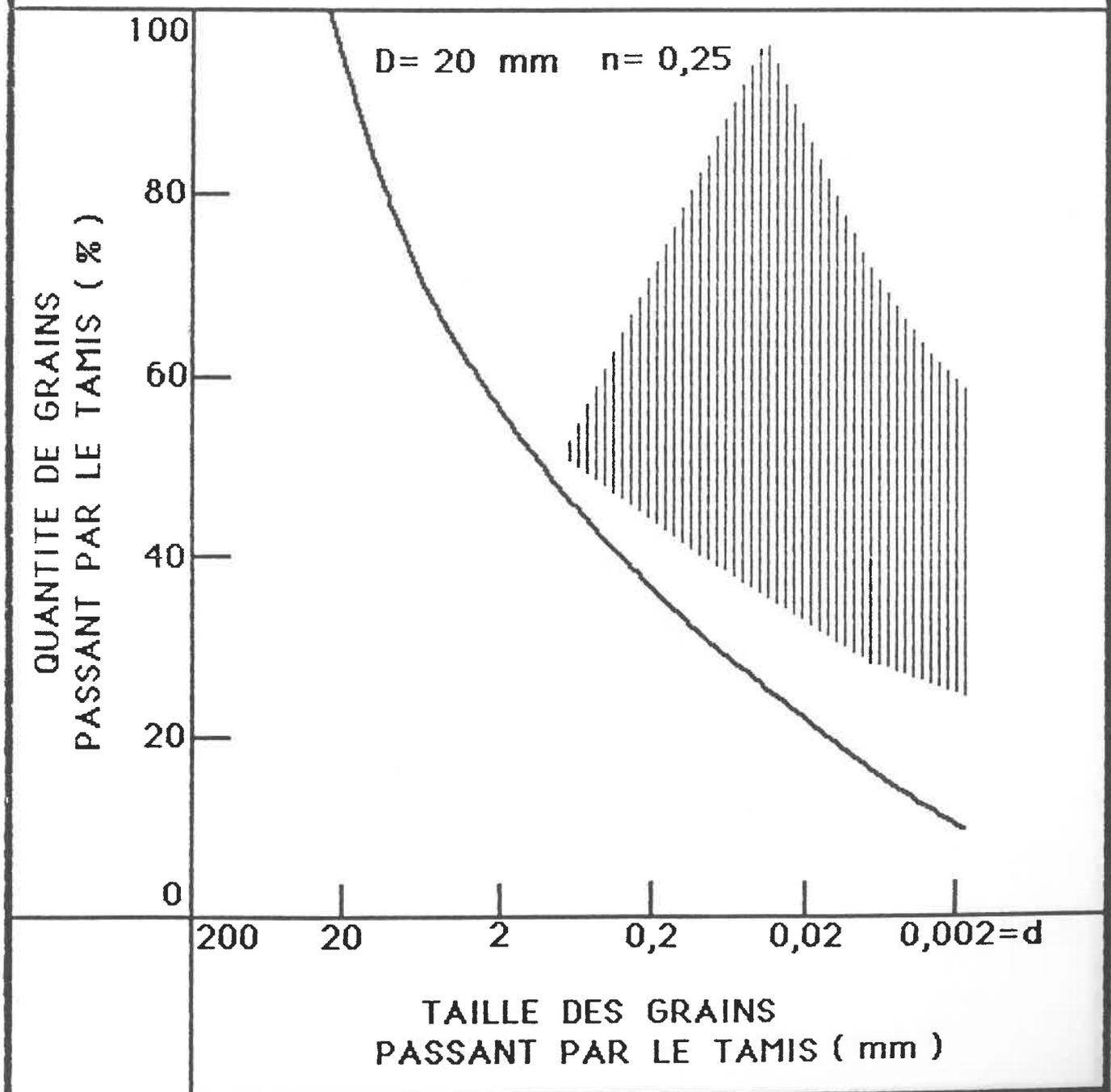


TEXTURE < > STABILISANT

CRITERE DE CONVENANCE DE LA TEXTURE  
POUR LA STABILISATION AU CIMENT

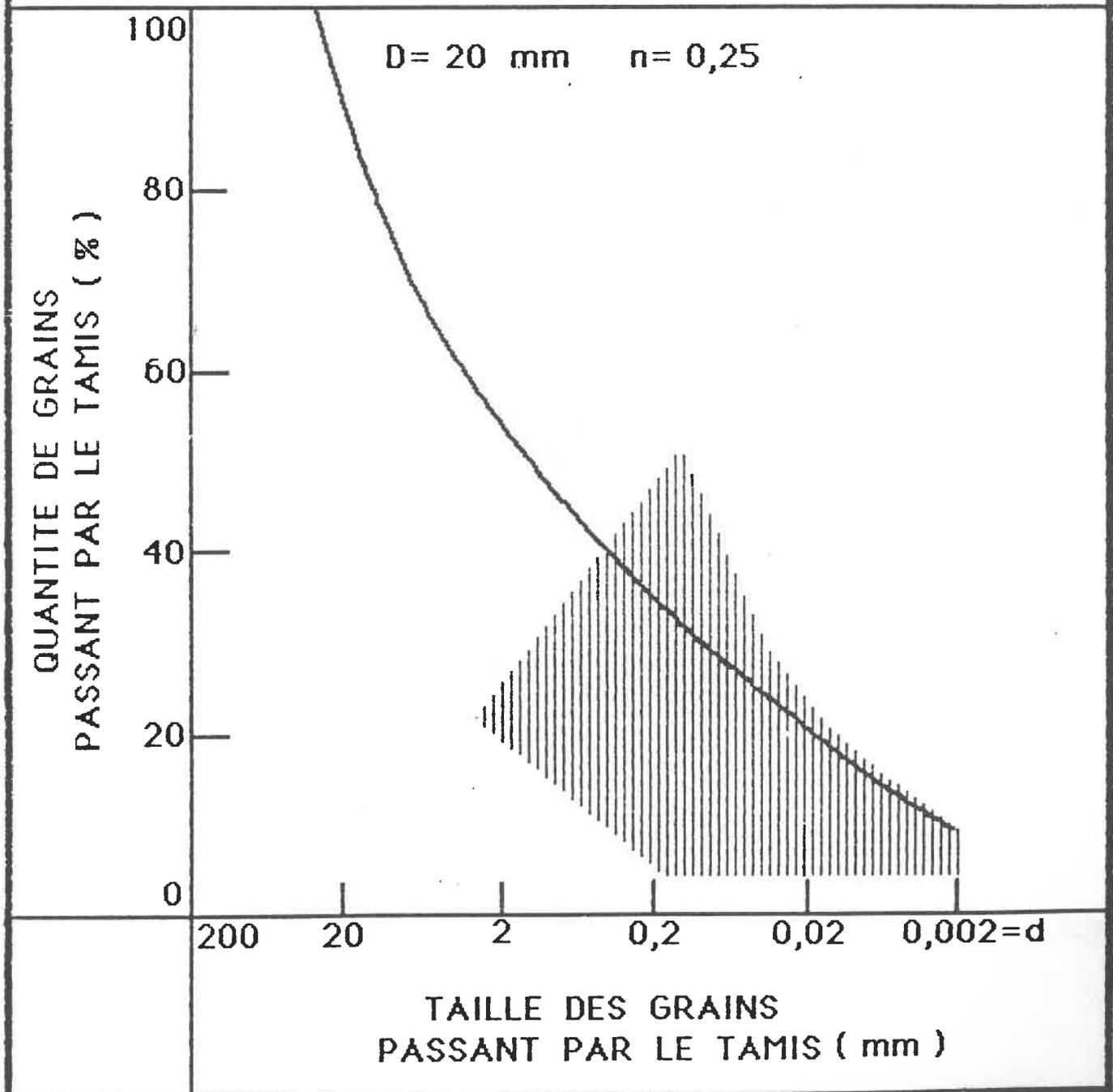


## TEXTURE &lt; &gt; STABILISANT

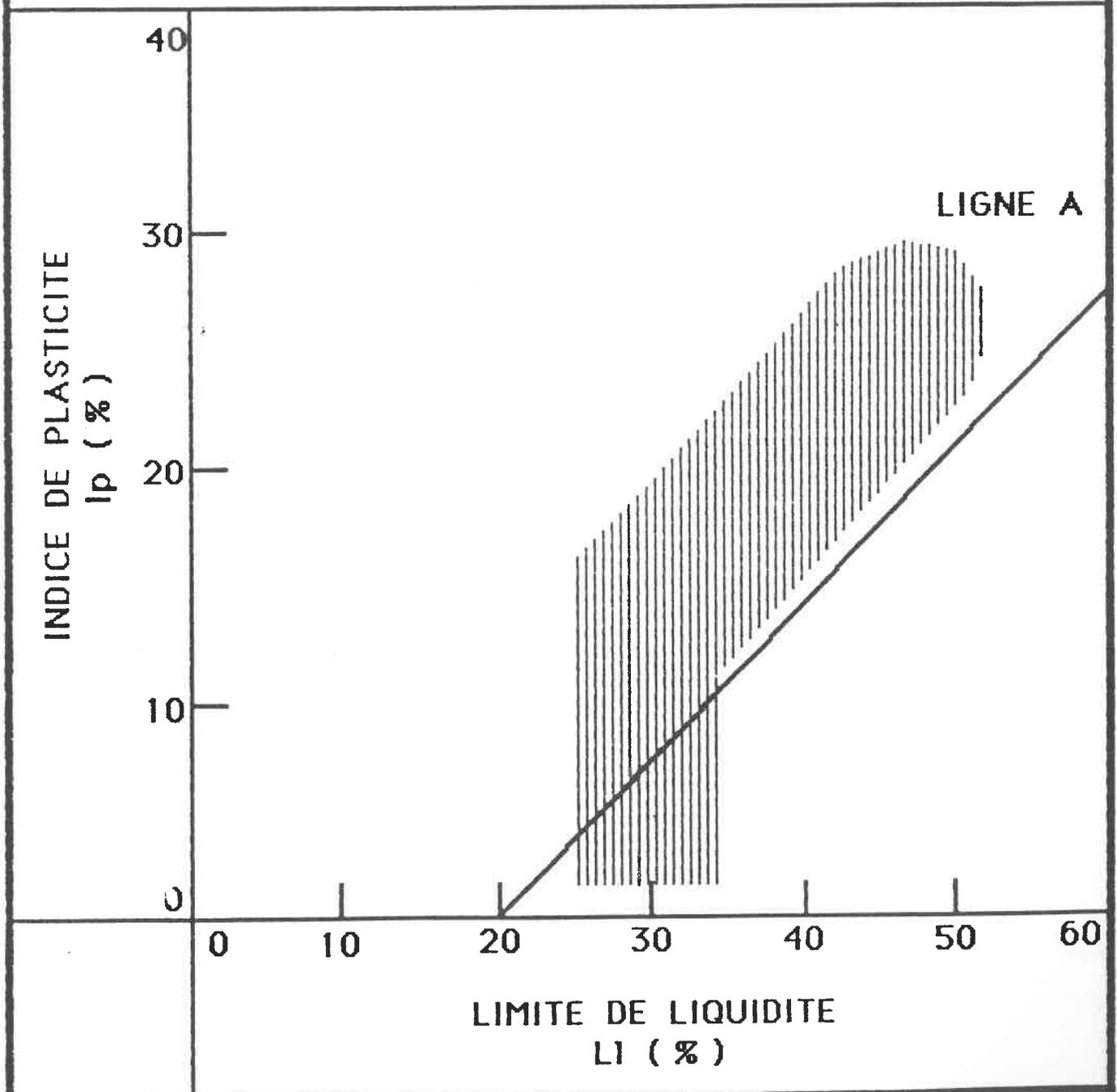
CRITERE DE CONVENANCE DE LA TEXTURE  
POUR LA STABILISATION A LA CHAUX

TEXTURE &lt; &gt; STABILISANT

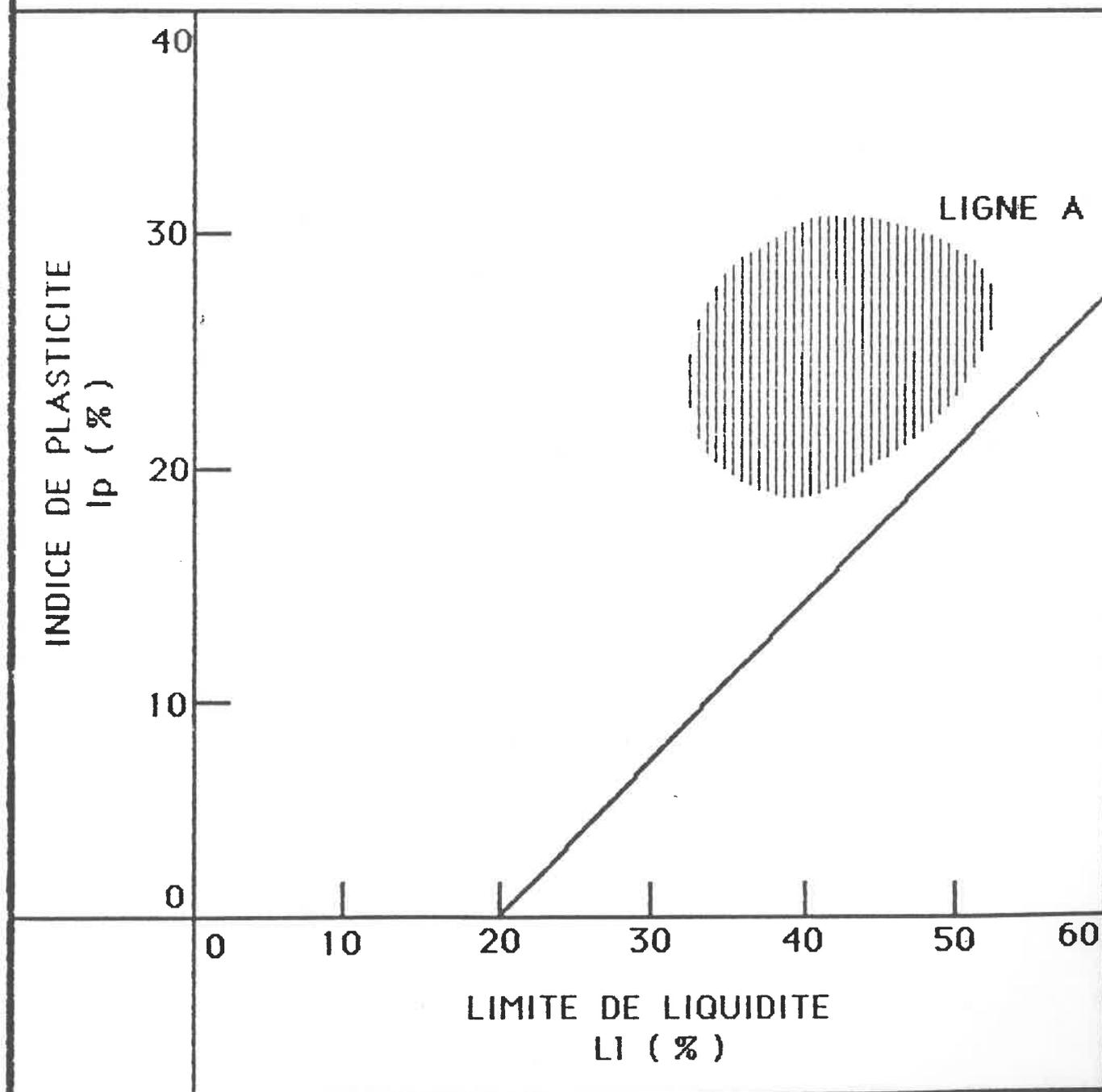
CRITERE DE CONVENANCE DE LA TEXTURE  
POUR LA STABILISATION AU BITUME



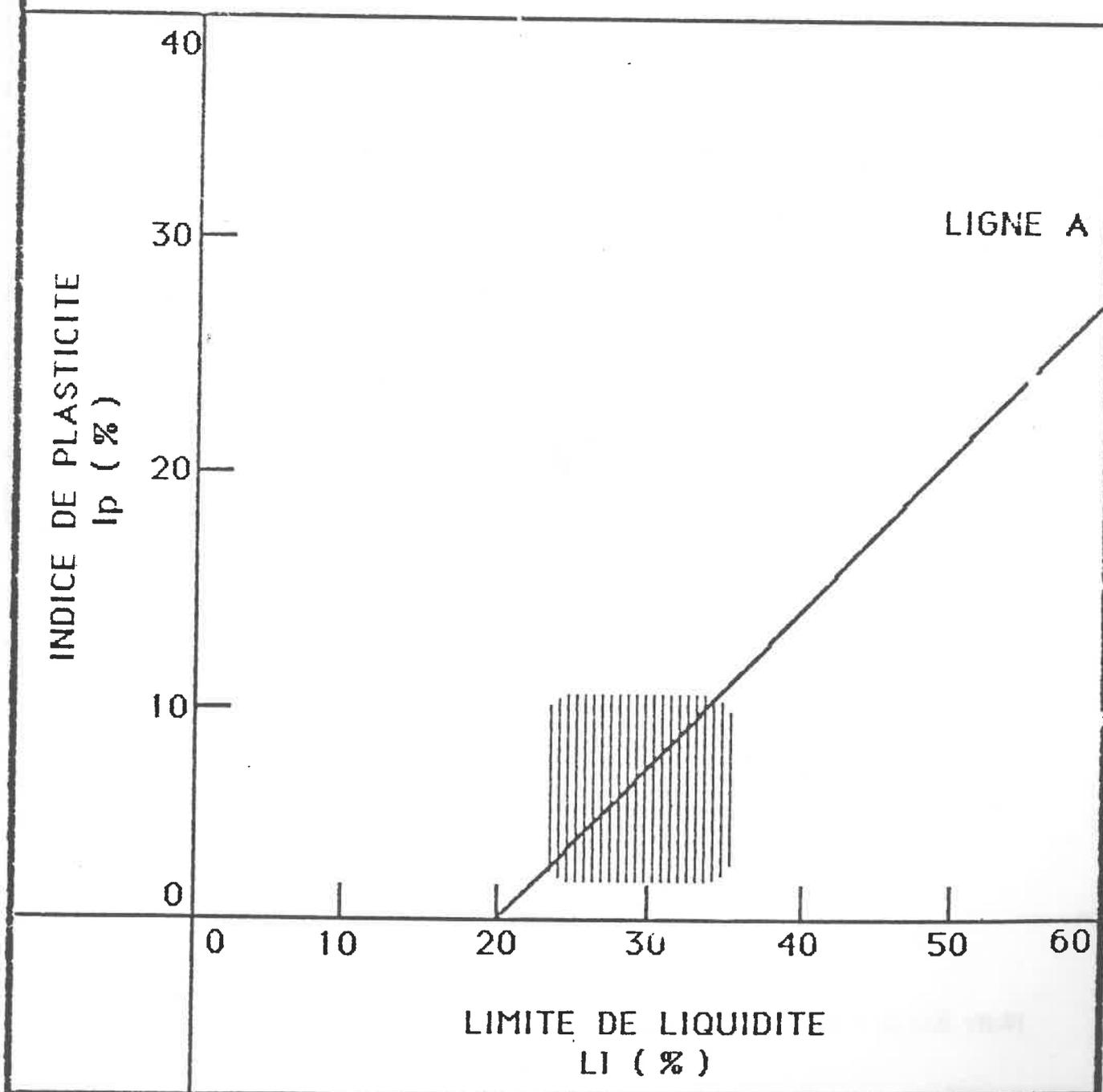
CONSISTANCE &lt; &gt; STABILISANT

CRITERE DE CONVENANCE DE LA PLASTICITE  
POUR LA STABILISATION AU CIMENT

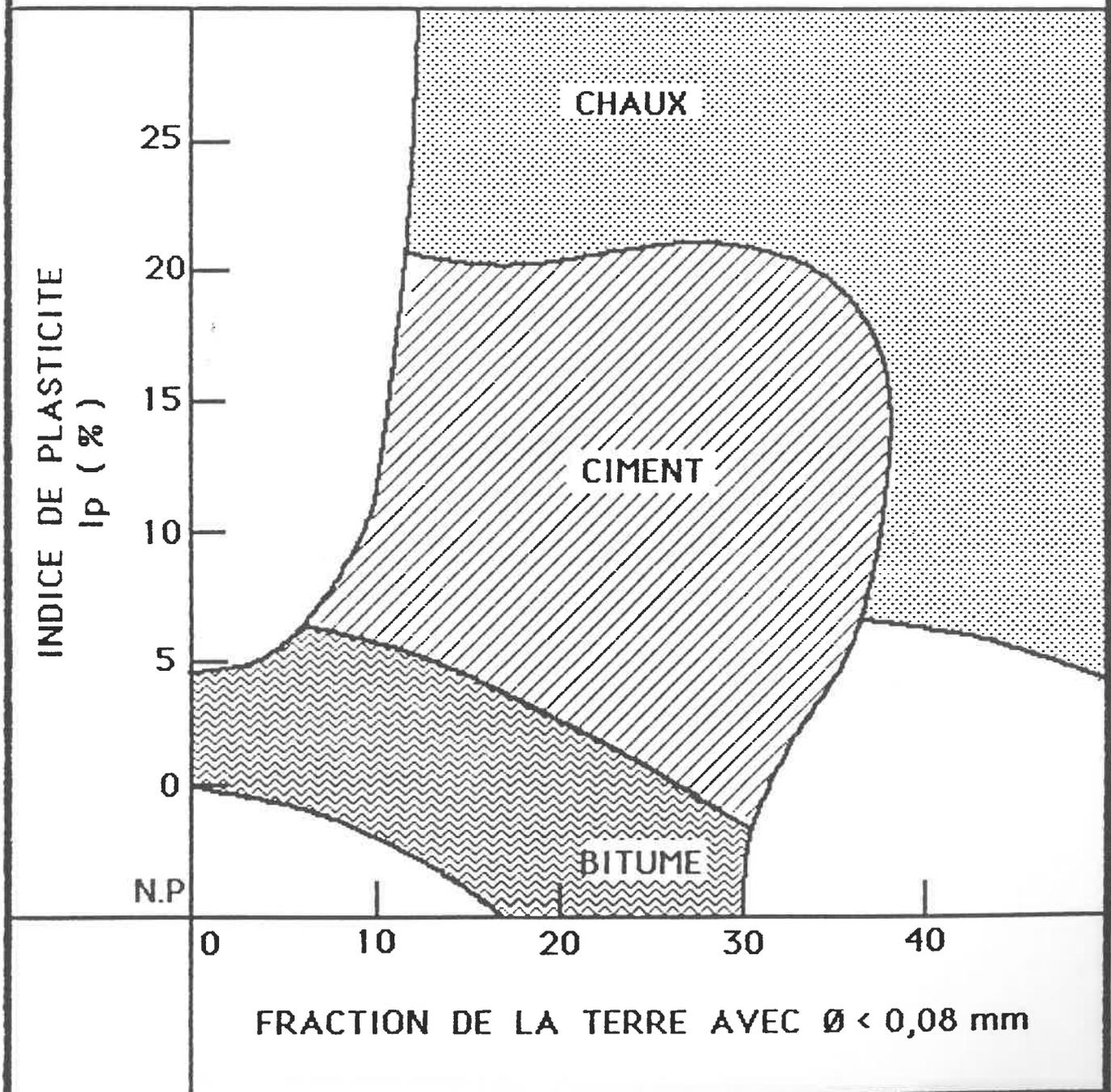
CONSISTANCE &lt; &gt; STABILISANT

CRITERE DE CONVENANCE DE LA PLASTICITE  
POUR LA STABILISATION A LA CHAUX

CONSISTANCE &lt; &gt; STABILISANT

CRITERE DE CONVENANCE DE LA PLASTICITE  
POUR LA STABILISATION AU BITUME

## TEXTURE, CONSISTANCE &lt; &gt; STABILISANTS

CRITERES DE CONVENANCE  
POUR LA STABILISATION

# TEXTURE, CONSISTANCE < > STABILISANTS

CLASSE DE TERRE	QUANTITE DE CHAUX NECESSAIRE POUR MODIFIER (% POIDS)		QUANTITE DE CHAUX NECESSAIRE POUR STABILISER (% POIDS)	
	ETEINTE	VIVE	ETEINTE	VIVE
GRAVIERS ARGILEUX BIEN GRADUES	1 - 3		3 ET PLUS	
SABLE	PAS REC		PAS REC	
ARGILE SABLEUSE	PAS REC		5 ET PLUS	
ARGILE SILTEUSE	1 - 3		2 - 4	
ARGILE PLASTIQUE	1 - 3		3 - 8	
ARGILE TRES PLASTIQUE	1 - 3		3 - 8	
TERRE ORGANIQUE	PAS REC		PAS REC	
GA, GL - GA (A-2-6, A-2-7)			2 - 4	2 - 3
Ap (A-6, A-7-6)			5 - 10	3 - 8
At (A-6, A-7-6)			3 - 8	3 - 6

TEXTURE, CONSISTANCE < > STABILISANTS

CLASSIFICATION DES TERRES		STABILISATION AU CIMENT						CLASSIFICATION DES TERRES			
ASTM								USCS			
		CHAUX									
		BITUME									
TERRES GREUDES	A1	A-1-a	o					o	Gb	TERRES GREUDES	
		A-1-b	o					o	Gm		
	A2	A-2-4	o				o	o	GL		
		A-2-5	o				o	o	GA		
		A-2-6	o	o			o	o	Sb		
		A-2-6	o	o			o	o	Sm		
		A-2-7	o	o			o	o	SL		
A3		o		o	o		o	SA			
TERRES FINES	A4		o	o			o	o	Ap	TERRES FINES	
	A5		o	o				o	Lp		
	A6		o	o				o	Op		
	A7	A-7-6	o	o				o	o		At
		A-7-5	o						o		Lt
			o					o	Ot		

## TEXTURE, CONSISTANCE < > STABILISANTS

CLASSE DE TERRE AASHO	CLASSE DE TERRE USCS	QUANTITE DE CIMENT *		POIDS (%) POUR ESSAIS PROCTOR	POIDS (%) POUR ESSAIS GEL - DEGEL
		% EN VOLUME	% EN VOLUME		
A-1-a	Gb, Gm, GL, Sb, Sm, SL	5 - 7	3 - 5	5	3 - 5 - 7
A-1-b	GL, Gm, SL, Sm	7 - 9	5 - 8	6	4 - 6 - 8
A-2	GL, GA, SL, SA	7 - 10	5 - 9	7	5 - 7 - 9
A-3	Sm	8 - 12	7 - 11	9	7 - 9 - 11
A-4	Ap, Lp	8 - 12	7 - 12	10	8 - 10 - 12
A-5	Lp, Lt, Ot	8 - 12	8 - 13	10	8 - 10 - 12
A-6	Ap, At	10 - 14	9 - 15	12	10 - 12 - 14
A-7	Ot, Lt, At	10 - 14	10 - 16	13	11 - 13 - 15

\* Pour la plupart des terres de l'horizon A, la quantité de ciment doit être augmentée de 4 points pourcentils si la terre est de couleur gris foncé ou grise, et de 6 points pourcentils, si la terre est de couleur noire.

## TEXTURE, TEMPERATURE &lt; &gt; STABILISANT

BITUME	TYPE DE CUTBACK			CLASSE DE CUTBACK
	RC	MC	SC	
60				5
46				4
32				3
18				2
5				1
	0	12,5	25	
	FRACTION DE TERRE AVEC $\emptyset < 0,08$ mm (%)			

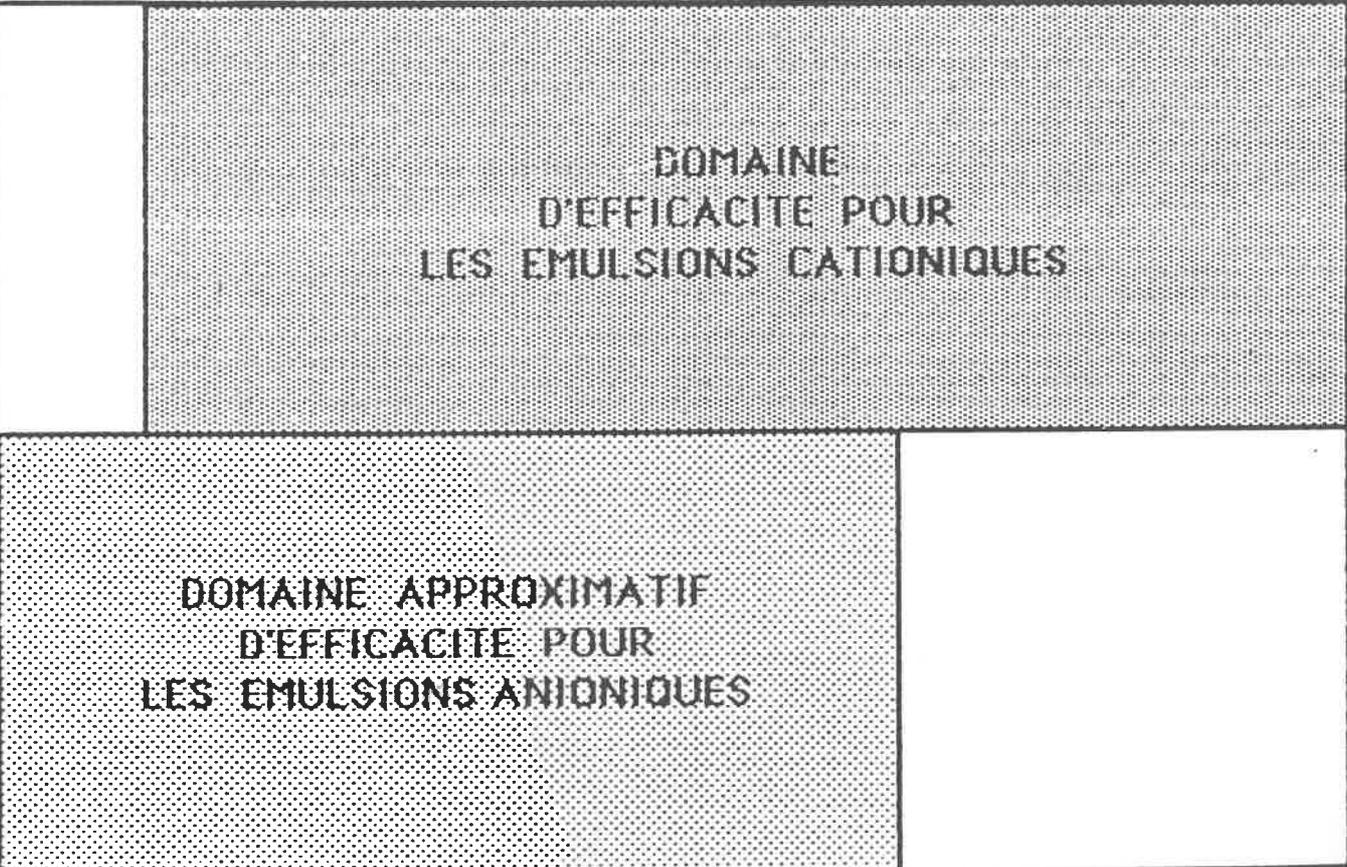
## MINERALOGIE &lt; &gt; STABILISANT

BITUME

TENEUR EN SILICE  
(%)

0

100



DOMAINE  
D'EFFICACITE POUR  
LES EMULSIONS CATIONIQUES

DOMAINE APPROXIMATIF  
D'EFFICACITE POUR  
LES EMULSIONS ANIONIQUES

100

0

TENEUR EN ALCALINS OU  
EN TERRE ALCALINE (%)

TEXTURE, CONSISTANCE, MINERALOGIE < > STABILISANTS

CIMENT	CHAUX	BITUME	ORGANIQUE POLYMERE	MECANIQUE	COMPOSANT DOMINANT DE LA TERRE	STABILISANT RECOMMANDE	RAISONS
o		o		o	SABLES GROSSIERS	ARGILE CIMENT BITUME	POUR STABILITE MECANIQUE POUR DENSITE ET COHESION POUR COHESION
o		o	o	o	SABLES FINS		
o			o	o	SILTS GROSSIERS		
o	o		o	o	SILTS FINS		
o	o		o	o	ARGILES GROSSIERS		
o	o				ARGILES FINES		
					ALLOPHANES	CHAUX CHAUX+GYPSE	POUR REACTION POZZOLANIQUE ET DENSIFICATION
					KAOLIN	CIMENT CHAUX	POUR RESISTANCE INITIALE, AISANCE DE TRAVAIL ET RESISTANCE FINALE
					ILLITES	CIMENT CHAUX	POUR RESISTANCE INITIALE, AISANCE DE TRAVAIL ET RESISTANCE FINALE
					MONTMORIL- LONITES	CHAUX	POUR RESISTANCE INITIALE ET AISANCE DE TRAVAIL
					CHLORITES		

# TEXTURE, COHESION < > MODIFIANTS

RESULTATS DE L'ESSAI DE COHESION	STABILISATION AVEC FIBRES (kg/m <sup>3</sup> TERRE FOISONNEE)					STABILISATION AVEC ELEMENTS MINERAUX (VOLUME)			
	PISE	ADOBE	BLOCS COMPRES	BAUGE	TERRE PAILLE	PISE	BLOCS COMPRESSES	TERRE COULEE (700 kg/m <sup>3</sup> )	TERRE COULEE (300 kg/m <sup>3</sup> )
T  (cN/cm <sup>2</sup> )  (g/cm <sup>3</sup> )	LONGUEUR FIBRE 5 - 10 cm	LONGUEUR FIBRE 8 - 12 cm	LONGUEUR FIBRE 4 - 12 cm	LONGUEUR FIBRE 30 - 40 cm	LONGUEUR FIBRE 30 - 40 cm	β max=60 mm	β max=20 mm	kg CENDRES/m <sup>3</sup> FOISONNE	kg PONCE/m <sup>3</sup> FOISONNE
40 - 60					45 - 70				
60 - 80			4		45 - 70				
80 - 110			4	(20)	45 - 70			(125)	(60)
110 - 150	4 - 5*	3 - 5	4 - 5	22 - 23	45 - 70	1:5 - 1:4*	1:5 - 1:4	200	90
150 - 200	6 - 8*	6 - 8	6 - 8	24 - 25	50 - 70	1:4 - 1:3,5	1:4 - 1:3,5	350	150
200 - 270	8 - 11	9 - 10	8 - 10	25 - 26	60 - 70	1:3 - 1:2	1:3 - 1:2	500	225
270 - 360	10 - 14	12 - 14	10 - 12	26 - 28	70	1:2 - 1:1,5	1:2 - 1:1,5	700	300
360 - 480	(14) ∞	15	(12) ∞		80	(1:1,5) ∞		1000	450
480 - 640					90			1400	600
640 - PLUS					90			1400	600

## CRITIQUES

---

- Les tableaux confrontant propriétés et techniques ne recouvrent à ce jour que :

En ce qui concerne les propriétés : texture, consistance, compactibilité, cohésion et très sommairement : kaolinite, montmorillonite, illite, sels solubles, chlorures, carbonates, sulfates, humus

En ce qui concerne les techniques :

- PROCÉDES DE PRODUCTION, CONSTRUCTION : blocs comprimés, pisé, adobe, terre-paille et très sommairement quelques autres techniques

- STABILISANTS : ciment, chaux, bitume

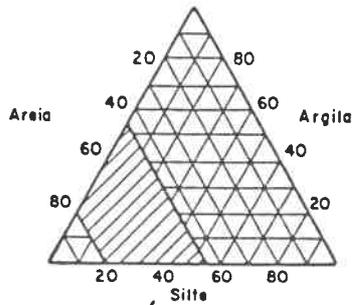
- MODIFIANTS : fibres, minéraux, chaux

A ce jour, il est donc impossible de connaître toutes les possibilités. Un approfondissement est donc nécessaire.

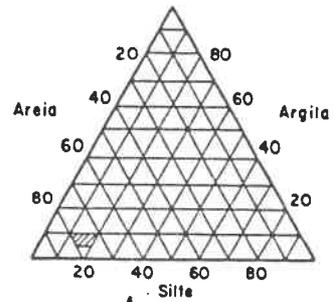
- Les tableaux sont d'ordre général et peu spécifiques : p.e. le ciment est un type de liant, dénominateur de toute une gamme de produits existants : CPA, CPJ, CAF, CLK, CPMF, ajouts de filler, de cendres volantes, différentes classes de résistance, finesse, ciments, hydrophobants,.... La compactibilité terre-ciment dépend donc également du type de ciment. Ce n'est que pour les bitumes que l'on retrouve une certaine spécificité. Une systématisation s'impose.

- L'application et l'interprétation de tableaux de décision nécessitent souvent une analyse critique des points de départ.

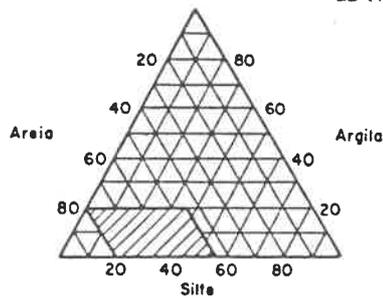
Exemple : CEPED, Manual de construção com solo-cimento, Brésil.



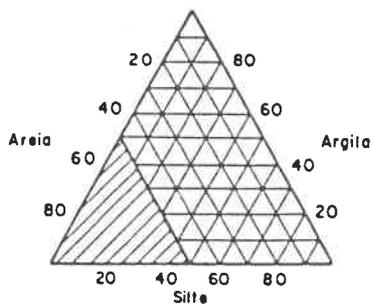
**CRITÉRIO CINVA**  
SOLO - CIMENTO COMPACTADO  
OU PRENSADO



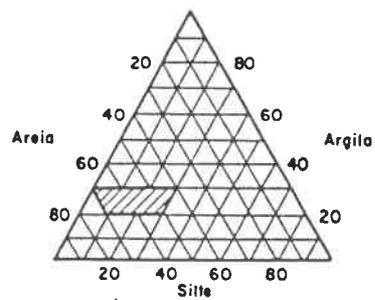
**CRITÉRIO ICPA**  
SOLO - CIMENTO COMPACTADO  
OU PRENSADO



**CRITÉRIO CEPED**  
SOLO - CIMENTO COMPACTADO



**CRITÉRIO DE MERRYL**  
SOLO COMPACTADO E  
SOLO - CIMENTO COMPACTADO



**CRITÉRIO DE HOUBEN**  
SOLO - CIMENTO COMPACTADO

**CRITÉRIOS DE ESCOLHA DO SOLO (I)**

Cette figure illustre différents tableaux de critères de décision concernant la texture. On remarque que :

- 1) Ces tableaux ne parlent pas nécessairement de la même technique.
- 2) Les dénominations argile, sable, silt ne sont pas définies.
- 3) les zones préférentielles varient énormément : ceci est dû à la différence d'interprétation de faisabilité technique et acceptabilité.
- 4) L'origine des tableaux est variable : chaque pays ayant ces propres méthodes de mesures, standards,...

Alors, parlent-ils de la même chose ? Quelle est alors la valeur de cette comparaison ? Prenons par exemple les dénominations argile, sable, silt.

<b>CLASSIFICATION DES FRACTIONS GRANULAIRES</b>				
<b>Echelle logarithmique en mm</b>				
2,0	1,0	0,5	0,25	0,10
				0,05
				0,02
				0,005
				0,002
		0,6	0,20	0,06
				0,006
				0,001
<b>SABLE</b>		<b>SILT</b>		<b>ARGILE</b>
<b>International Society of Soil Sciences, Aldeberg</b>				
<b>GRAVIER</b>	<b>SABLE</b>	<b>SILT</b>		<b>ARGILE</b>
<b>U.S. Department of Agriculture</b>				
	<b>SABLE</b>	<b>SILT</b>	<b>ARGILE</b>	<b>COL- LOIDES</b>
<b>A.S.T.M.</b>				
<b>GRAVIER</b>	<b>SABLE</b>	<b>SILT</b>		<b>ARGILE</b>
<b>U.S. Bureau of Soil Systems</b>				
	<b>SABLE</b>	<b>SILT</b>		<b>ARGILE</b>
<b>M.I.T.; British Standard Institution</b>				

## PROPOSITIONS

---

- Nous constatons trop de généralités et spéculations et pas assez de faits. Remédier à cela permettra une informatisation et évitera que le jugement repose, comme c'est le cas aujourd'hui, sur l'expérience et le savoir-faire accumulés par des décideurs expérimentés et donc difficile à vulgariser.

- Il faudra uniformiser et réduire le nombre de propriétés à prendre en considération ainsi que standardiser les techniques.

- Il faudra uniformiser et standardiser le type de critères : p.e. critères de base de plages d'acceptabilité (zones préférentielles) et transitifs c'est-à-dire superposables (si terre est acceptable pour les blocs comprimés et acceptables pour la stabilisation au ciment, alors elle est automatiquement acceptable pour les blocs comprimés stabilisés au ciment).

- Bon nombre de critères sont trop limitatifs et excluent des terres qui pourtant en réalité paraissent acceptables. Un approfondissement de certains critères s'impose donc. P e. dans le cas de stabilisation à la chaux, il est apparu que l'humus peut avoir un pouvoir neutralisant sur les sulfates; pourtant on limite la quantité d'humus et de sulfates sans pour autant prendre en compte cette interrelation;

- Bon nombre de critères trouvent leurs origines dans des contextes bien précis ou pour des applications bien précises et pourtant sont généralisés. Des essais de vérification et de contrôle s'imposent dans beaucoup de cas. Exemple :

- les tableaux combinant cohésion et texture sont d'origine allemande et étaient prévus pour application en Allemagne

- les tableaux à base de classification géotechnique sont pour la plupart du temps destinés pour l'application de problèmes routiers où l'on emploie une technique bien précise : compactage et ajout inhérent de stabilisants et modifiants.

La confrontation entre propriétés d'une terre et techniques devrait automatiquement aboutir à une gamme de techniques pour laquelle la terre est appropriée.

Si ce n'est le cas, ceci peut être dû à deux raisons :

- 1) La connaissance actuelle ne permet pas d'apprécier les possibilités potentielles de cette terre faute de manque de connaissance.
- 2) Cette terre ne possède pas de potentialités envisageables.

Dans ce deuxième cas, ceci implique qu'il faudra choisir une autre terre donc prospecter un autre site et recommencer le processus de décision. Dans le cas d'un site imposé, ceci implique qu'il vaut mieux envisager la prospection vers d'autres matériaux de construction.

A ce stade-ci, il y a pourtant peu de chance que cette confrontation ne mène à aucun résultat. Il y aura soi-disant toujours des solutions mais qui ne sont pas nécessairement performantes ou acceptables du point de vue coût. C'est à cela que servent les étapes suivantes de la décision : éliminer progressivement les techniques non faisables.

**REFERENCES**

BIBLIOGRAPHIE

---

- DUCHAUFOUR P., "Atlas écologique des sols du monde", Paris, Masson 1976
- DUNLAP. W.A., "US Air Force soil stabilization index system", New Mexico, Air Force Weapons Laboratory, 1975
- INGLES A.G., METCALF J.B., "Soil stabilization", Sydney, Butterworths, 1972
- MUKERJI K., BAALMANN H., "Laterit Zum Bauen", Starnberg, IFT, 1978
- PCA, "Soil-cement laboratory handbook", Stokie, PCA, 1971
- ROAD RESEARCH LABORATORY DSIR, "Soil mechanics for road engineers", London, HMSO, 1958
- BUREAU OF RECLAMATION, "Earth manual", Washington, US Department of the Interior, 1974
- CINVA, "Le béton de terre stabilisé, son emploi dans la construction", New York, Nations-Unies, 1964
- DEPARTMENT OF HOUSING AND URBAN DEVELOPMENT, "Earth for homes" in "Ideas and methods exchange", Washington, office of International Affairs, 1955
- DOAT P. et al., "Construire en terre", Paris, édition Alternatives et Parallèles, 1979
- HOUBEN H., "Technologie du béton de terre stabilisé pour l'habitat", Sidi Bel Abbes, CPR, 1974
- MARKUS T. et al, "Stabilised soil", Glasgow, University of Strathclyde, 1979
- PELTIER R., "Manuel du laboratoire routier", Paris, Dunod, 1969
- POLLACK E., RICHTER E., "Technik des Lehmbaues", Berlin, Verlag Technik, 1952
- VOLHARD F., "Leichtlehmbau", Karlsruhe, CF Müller GmbH, 1983

- WAGNER W., "Anleitung zur Untersuchung und Beurteilung von Baulehmen, Dotzheim", Hessischen Lehrbaudienst Wiesbaden, 1947
- WOLFSKILL L.A., et al, "Bâtir en terre", Paris, CRET
- AGRA, "Recherche terre", Grenoble, AGRA, 1983
- DUNLAP W.A., "Soil analysis for earthen buildings", 2nd regional conference on earthen building materials, Tucson, University of Arizona, 1982
- GRESILLON J.M., "Etude de l'aptitude des sols à la stabilisation au ciment. Application à la construction" in "Annales de l'ITBTP", Paris, ITBTP, 1976
- STULZ R., "Appropriate building materials", St Gallen, SKAT, 1981
- NIEMEYER R., "Der Lehm- und seine praktische Anwendung", Grebenstem, OKO, 1982
- AGRA, "Recommandations pour la conception des bâtiments du village terre", Grenoble, AGRA, 1982
- CRET, "Maisons en terre", Paris, CRET, 1956
- HERNANDEZ RUIZ L.E., MARQUEZ LUNA J.A., "Cartilla de pruebas de campo para seleccion de tierras en la fabricacion de adobes", Mexico, CONESCAL, 1983
- SIMONNET J., "Recommandations pour la conception et l'exécution de bâtiments en géobéton", Abidjan, LBTP, 1979
- FAUTH W., "Der praktische Lehm- und seine praktische Anwendung", Singen-Hohentrüel, Weber, 1948
- MILLER T. et al, "Lehm- und seine praktische Anwendung", Weimar, Forschungsgemeinschaften Hohshule, 1947
- PLINY FISK III, "Earth Block manufacturing and construction techniques", 2nd regional conference on earthen building materials, Tucson, University of Arizona, 1982
- DIN, "DIN Lehm- und seine praktische Anwendung 18951 - 18957", Berlin, Din, 1956
- HUGHES R., "Material and structural behavior of soil constructed walls" in "Techniques and materials", 1983

- FITZMAURICE, "Manuel de constructions en béton de terre stabilisée", New York, Nations-Unies, 1958.
- MIDDLETON G.F., "Earth wall construction", Sydney, Commonwealth experimental building station, 1952
- SCOGGINS H., "The portalab manual", Alomogordo, N.M. Appropriate Technology program, 1982
- HOUBEN H., GUILLAUD H., "Earth Construction Primer", CRATerre, PGC, CRA, UNCHS, AGCD, Brussels, 1984
- CEPED, "Manual de construção com solo-ciment", Brasil
- ODUL P., "Synthesis of case studies on earth construction : factors influencing the success or failure and the acceptability of earth as a building material", PGC-HS, KULeuven, Leuven, 1984
- URIEN R., VESVROTTE F., BEN AHMED A., ELFALAH M., "L'énergie incorporée dans la construction : la Tunisie" in "Journal of CIB, Building Research and Practice" volume 13, Number 4, July/August 1985, CIB, 1985
- PLINY FISK III, "Availability and spatial coincidence of indigenous building materials" in "2nd regional conference on earthen Building materials", Tucson, Arizona, 1982
- VERNEY P.E., "Computerre", ou l'informatisation des études de faisabilité technico-économique des projets d'habitats en terre dans les pays en développement, Ecole d'Architecture de Grenoble, 1985
- HOUBEN H., LIEBAERT A., ODUL P., THEUNISSEN Ph., "Proceedings of the International Colloquium on Earth construction Technologie Appropriate to Developing Countries", ABOS-AGCD, UNCHS, Brussels, 1985
- THEUNISSEN Ph., "Etude de cas : Côte d'Ivoire, utilisation du matériau terre", CRA, UCL, Louvain-La-Neuve, 1983
- APERS J., "Case study Thailand : introduction of soil-cement in Thailand : an evaluation", PGC-HS, KULeuven, Leuven, 1984
- THEUNISSEN Ph., "Etude de cas Mayotte : Evaluation de l'utilisation du matériau terre", CRA-UCL, Louvain-La-Neuve, 1983
- BEKKER P.C.F., Stichting Waalsteen, Netherlands
- SCHEYS I.G., "Regionale bodemkunde "I", KULeuven, Leuven

- VANDER VELDEN J.H., "Evaluation and adjustment of raw materials mixtures for the manufacture of woodburning clay stoves", TNO, Apeldoorn, 1983
- BUISSON M., "Essais de géotechnique, 1, caractéristiques physiques et mécaniques des sols", DUNOD, Paris, 1942
- SIMON D., MICHEL Ph., "Essais simplifiés pour l'identification et la qualification des terres à construire, rapport final", Ministère de la Coopération et du Développement, Ministère de l'Urbanisme et du Logement, Paris, 1985
- DUCHAUFOR P., "Précis de pédologie", Masson & Cie ed., Paris, 1960
- CANAPUM DE CARVALHO J. et al., "Problèmes de reconstitution des éprouvettes en sol en laboratoire. Proposition d'une méthode" in "Bulletin de liaison des laboratoires des P & CH", n° 135, jan./fév., France, 1985
- VERDEYEN J. et al., "Applications de la mécanique des sols 1", Brussels, Dunod, Paris, 1971
- ARQUIE G., "Le compactage, routes et pistes d'envol", Eyrolles, Paris, 1970
- D'HOORE J., "Inleiding tot de pedologie, IIe deel", ACCO, Leuven, 1976-1977
- FERREIRA H.N., "A Influência da percentagem de Argila na plasticidade dos solos", Laboratorio de Engenharia, Luanda, Angola, 1970
- BOMBLED J.P., "Evaluation technique d'un certain nombre de matériaux adaptés aux ressources des PVD" in "Compte rendu du Colloque International MTEC", presses de l'école nationale des P & CH, Paris, 1983
- PANNEKOEK A.J. et al., "Algemene Geologie", H.D.T Jeenk Willink, Groningen, 1976
- PETITJEAN A., MARTENS G., "Le béton d'argile stabilisé dans la construction au Congo Belge", in "Problèmes d'Afrique Centrale, III", 1954
- CORDIER Y., "L'argile de Kinshasa en tant que matériau adobe" in "vol 11 n° 62, matériaux et construction"
- BUELENS P., BREYNE T. "Studie van de gedroogde aarde als bouwmetaal met toepassing in Taureif (Tunisie)", PGC-HS, KULeuven, 1978

- DE BRUYN Ph., "Kleionderzoek voor gedroogde aarden blokken", PGC-HS, KU Leuven, 1979
- VAN VOOREN J., "Aardige architectuur : bouwen met aarde en de gevolgen daarvan voor het ontwerp", PGC- HS, KU Leuven, Leuven, 1981
- DUFRAIMONT Y., PUTMAN C., "Aarde, een alternatief bouw materiaal Studie in Marokko", PGC-HS, KU Leuven, Leuven, 1982
- VERACKX H., "Literatuurstudie in verbond met de produktie - en gebruiksmogelijkheden in de ontwikkelings landen van het bouw materiaal aarde gestabiliseerd met bitumineuse produkten", PGC-HS, KU Leuven, Leuven, 1982
- VENUAT M., "Le traitement des sols à la chaux et au ciment", ed. Venuat, Chatillon-sous-Bagneux, 1980
- An, "Third International Symposium on mudbrick (adobe) preservation", Icomos, Ankara, 1980
- An, "Papers of the International Colloquium on Earth Construction Technologies Appropriate to Developing Countries", Brussels, 1984
- ANDERSSON L.A., "Torba stabilisée au ciment", Université de Lund, Lund, 1982
- DURIEZ M. ARRAMBIDE J., "Nouveau traité de matériaux de construction, tome 1", DUNOD, Paris, 1961
- PONTS ET CHAUSSEES, LABOR. REG. D'AUTUN, "Méthode de dosage de la chaux par pH métrique dans les mélanges sols/laitiers"
- RAEDSCHELDERS H., "Elementen van de grondmechanica i.v.m. techniek en stabiliteit der funderingen voor gebouwen", ACCO, Leuven
- RAEDSCHELDERS H., "Grondmechanica deel 1", KU Leuven, Leuven
- An, "Practicum grondmechanica", KU Leuven, Leuven
- MORTELMANS F., "Béton", KU Leuven, Leuven
- MORTELMANS F., "Berekening van konstrukties, deel 1, lasten, spanningen en vervormingen", ACCO, Leuven, 1978

gl

Si/SfB \_\_\_\_\_