



AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE ATOMIQUE

SEMINAIRE SUR LES TECHNIQUES D'ETUDE ET LES METHODES
D'EVALUATION DES SITES EN VUE DU STOCKAGE DEFINITIF
SOUTERRAIN DES DECHETS RADIOACTIFS

Sofia, Bulgarie, 6-10 février 1984

IAEA-SR-104/ 11

ETUDES DES POSSIBILITES DE STOCKAGE

DE DECHETS RADIOACTIFS EN FORMATIONS ARGILEUSES PROFONDES

par

G. LE POCHAT, M.J. LIENHARDT, P. PEAUDECERF, J.P. PLATEL, J.M. SIMON

Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, France.

P. BEREST, J.P. CHARPENTIER

Ecole Polytechnique, Laboratoire de Mécanique des Solides

Paris, France.

R. ANDRE-JEHAN

Agence Nationale pour la gestion des déchets radioactifs

Paris, France.

Ce polycopié reproduit le texte d'un mémoire qui sera présenté lors d'une réunion scientifique. Le texte en est provisoire et des changements de fond ou de détail pourront y être apportés avant publication. Il n'est communiqué qu'à la condition expresse de n'être cité ou reproduit sous sa forme actuelle dans aucun autre ouvrage. Les opinions et les thèses qui y sont avancées engagent uniquement la responsabilité des auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles des gouvernements des Etats Membres désignants ou celles des organisations désignantes. En particulier, l'AIEA et les autres organisations ou organismes patronnant éventuellement la réunion ne peuvent être tenus responsables de tout ou partie du texte qui y est reproduit.

ETUDES DES POSSIBILITES DE STOCKAGE
DE DECHETS RADIOACTIFS EN FORMATIONS ARGILEUSES PROFONDES

RESUME

La recherche de sites de stockages dans les formations argileuses profondes des grands bassins sédimentaires doit conduire à résoudre deux problèmes fondamentaux :

- le premier est la définition aussi précise que possible des structures géologiques dont la disposition régit les écoulements et les éventuelles migrations,
- la deuxième est la caractérisation géomécanique du matériau argileux qui conditionne la faisabilité même du stockage.

Des parties des grands bassins sédimentaires français, a priori favorables, ont fait l'objet d'études sur ces deux points essentiels. La sélection des zones les plus favorables a été entreprise à l'aide des données anciennes de prospections pétrolières : sismique, sondages avec diagraphie et échantillons parfois conservés.

Toutes ces données réinterprétées conduisent au tracé d'une série de coupes géologiques interprétatives figurant la géométrie des masses argileuses et de leurs épontes. Parallèlement, la lithologie des formations argileuses est précisée à partir d'études minéralogiques sur échantillons issus de sondages ou prélevés aux affleurements.

Des secteurs peuvent alors être retenus, leur intérêt résidant dans la forte surépaisseur des argiles et des marnes qui s'y sont déposées à cause de leur situation en zone subsidente. Cette zonation est précisée par l'analyse hydrodynamique des réservoirs aquifères qui existent aux épontes des masses argileuses et par une étude néotectonique permettant de confirmer la permanence du caractère subsident des zones retenues.

En ce qui concerne la caractérisation géotechnique des argiles profondes et avant la réalisation d'essais in situ, les mesures sont réalisées en laboratoire sur des échantillons obtenus de deux manières :

- à l'affleurement des argiles tertiaires. Ces échantillons ne sont certes pas tout à fait représentatifs de la couche profonde, mais ils sont utilisés pour des caractérisations physiques et minéralogiques.
- lors de l'exécution d'un forage pétrolier, par un carottage à 950 m de profondeur dans les couches argileuses. Ces échantillons sont soumis à des essais triaxiaux en extension et en compression sous contrainte élevée (jusqu'à 50 MPa), des essais de fluage de longue durée, la mesure de l'anisotropie de résistance et l'étude de l'influence de la température sur la compression simple. Les paramètres mesurés lors de ces essais sont introduits dans des calculs analytiques simulant le creusement et le revêtement des puits et galeries dans les argiles profondes.

Cette démarche est illustrée par les résultats des études réalisées sur les argiles tertiaires des Landes.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	2
METHODE D'ETUDE	3
1. INVENTAIRE SUR LE TERRITOIRE FRANCAIS	4
2. ETUDES REGIONALES DE CONFIRMATION DES CARACTERES FAVORABLES	4
2.1. Première phase : Etudes poussées des données disponibles	5
2.1.1. Etude des données de géologie profonde	5
2.1.2. Environnement hydrogéologique	6
2.1.3. Evolution à long terme	8
2.1.4. Comportement mécanique des argiles,	9
2.2. Deuxième phase : Travaux de reconnaissance	11
CONCLUSIONS	13

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION

Dans le cadre du programme national de gestion des déchets radioactifs, un inventaire des conditions géologiques favorables a été réalisé sur l'ensemble du territoire français.

Il s'agissait de mettre en évidence des formations géologiques qui dans leur contexte hydrogéologique propre pourraient a priori assurer le confinement des radioéléments. Or les argiles et plus généralement les formations argileuses peuvent être classées parmi les matériaux naturels les moins perméables ; de plus on peut attendre que leur qualité plastique limite la création et la pérennité des fractures ou fissures qui sont le siège d'écoulements privilégiés.

Mais relativement aux autres milieux naturels très peu perméables, les argiles présentent d'autres qualités très intéressantes pour l'objectif poursuivi :

- Elles contiennent une forte quantité d'eau (porosité 30 à 50 % en surface - 10 à 20 % en profondeur), (voir Fig. 1) ce qui entraîne une bonne capacité de dilution des matières dissoutes et diminue d'autant les vitesses réelles des transferts.
- Elles constituent pour les substances transportées par les eaux des pièges géochimiques très efficaces notamment pour les anions et ce d'autant plus que l'absence de fracture devrait favoriser le contact des eaux avec la masse rocheuse.

Cependant ce type de formation peut présenter un inconvénient majeur pour la faisabilité du projet de stockage : le comportement mécanique des matériaux argileux en profondeur est encore très mal connu. Permet-il le creusement de puits et galeries ? Peut-on assurer la stabilité des ouvrages souterrains par des techniques économiquement acceptables ? Cela reste à démontrer.

Ainsi, déterminer les possibilités de stockage dans les milieux argileux revient à donner des réponses objectives aux deux interrogations fondamentales :

- 1 - La première concernant la sûreté : existe-t-il des formations argileuses suffisamment homogènes et épaisses pour assurer le confinement du dépôt dans leur contexte hydrogéologique local ?

- 2 - La deuxième concernant la faisabilité du projet :
les caractéristiques géomécaniques des matériaux
permettent-ils le creusement d'ouvrages souterrains ?

Ces deux objectifs sont-ils accessibles simultanément pour un même type de matériau ou sont-ils fondamentalement incompatibles ? C'est aussi une question dont la réponse est encore en suspens.

METHODE D'ETUDE

Ces objectifs fondamentaux ne seront atteints qu'au terme d'un programme d'étude mettant en jeu des techniques très diverses.

Ces différentes études sont donc liées :

- 1 - par la convergence de leurs objectifs
- 2 - par leur localisation sur une même région, une même zone ou un même site.

En effet, elles doivent permettre de circonscrire par éliminations successives des aires géographiques favorables de plus en plus restreintes. Cette opération doit être réalisée en phases successives et convergentes :

1. Un inventaire sur le territoire français quasi-exhaustif des formations favorables dont les formations argileuses,
2. Des études régionalisées :
 - 2.1. Etudes des données disponibles sur la zone
 - 2.2. Travaux lourds de reconnaissance du milieu profond spécifiques au projet.

A ce stade, si les résultats des travaux et études sont favorables, on pourra aborder la phase de caractérisation du site éventuellement retenu.

On peut souligner que cette reconnaissance de sites aptes au stockage de déchets radioactifs utilise une approche très comparable à celle de la prospection pétrolière ou à celle de la recherche de structures favorables au stockage de gaz. C'est pourquoi il apparaîtra utile d'exploiter les données rassemblées pour la prospection d'hydrocarbures ou de mettre en oeuvre des techniques comparables.

Mais certains éléments essentiels à nos projets ne pourront être déduits de ces données ou techniques pétrolières. C'est le cas par exemple des caractéristiques hydrauliques ou mécaniques des argiles ou du comportement à long terme du site de stockage.

C'est pourquoi les données pétrolières devront être complétées, les techniques classiques devront être adaptées, des méthodes nouvelles devront être appliquées.

1 - INVENTAIRE SUR LE TERRITOIRE FRANCAIS

Cet inventaire sur l'ensemble du territoire français des formations géologiques et donc des formations argileuses a été réalisé en considérant des conditions peu contraignantes mais permettant de faire une première sélection. Pour ce qui concerne les formations argileuses favorables :

- 1.1. Sont considérées toutes les formations géologiques dans lesquelles les argiles sont prépondérantes,
- 1.2. élimination des zones instables de la France,
- 1.3. profondeur minimale 200 m,
- 1.4. profondeur maximale 1000 m,
- 1.5. épaisseur minimale 100 m,
- 1.6. prise en compte des grands accidents tectoniques régionaux,
- 1.7. élimination des zones où les aquifères proches susjacentes, sousjacentes ou latéraux sont les plus perméables.

Au terme de cet inventaire plusieurs niveaux des grands bassins sédimentaires de la France ont été retenus pour des études plus poussées (voir la Fig. 2). Ils concernent essentiellement le Bassin Parisien, le Bassin Aquitain et le Couloir Rhodanien.

2 - ETUDES REGIONALES DE CONFIRMATION DES CARACTERES FAVORABLES

Cette reconnaissance régionale beaucoup plus poussée ou étude de confirmation peut être conduite sur quelques zones présélectionnées. Pour illustrer la démarche on fera appel à l'exemple des argiles tertiaires du bassin méridional des Landes, dans le Sud-Ouest du Bassin Aquitain (cf. Fig. 3) région étudiée parmi d'autres. Les remarques que l'on peut faire à leur sujet ont souvent un caractère général applicable en d'autres secteurs des grands bassins sédimentaires.

En pratique, les opérations se déroulent en deux phases successives :

- . la première par la synthèse ou la réinterprétation des données disponibles concernant la surface et le milieu profond.
- . la deuxième par la mise en oeuvre de techniques lourdes de reconnaissance: forages profonds et campagne de mesures géophysiques.

2.1. Première phase : Etudes poussées des données disponibles

Les différentes études menées simultanément sont décrites dans les paragraphes ci-après. Leurs liaisons sont représentées sur l'organigramme de la figure 4.

2.1.1. Etude des données de géologie profonde

Dans le bassin sélectionné, il convient de préciser la limite des formations argileuses, la lithologie de ces formations et leur structuration.

a) *Les données disponibles*

Dans le cas des argiles tertiaires des Landes ont été réétudiés :

- quatre-vingt-dix forages de recherche et d'exploitation pétrolière, ces forages sont malheureusement pour la plupart, anciens. Les informations fournies par ces forages sont :
 - . la coupe lithologique des terrains traversés (voir Fig. 5)
 - . les coupes diagraphies différées classiquement utilisées à cette époque
 - . les cuttings et de rares carottes.
- de nombreuses campagnes de sismique réflexion

Ces travaux effectués dans d'autres buts ne sont pas toujours adaptés à notre objectif.

b) *Lithologie des formations argileuses tertiaires*

Le mur de ces argiles est formé par un ensemble calcaréo-dolomitique, le toit par des formations carbonatées et gréso-sableuses. Les argiles admettent certaines passées gréseuses dont la distribution est difficile à cerner.

Latéralement, elles passent à des formations carbonatées (zone de plate-forme), vers les bordures du bassin.

Au centre du bassin, les sédiments sont des argiles et des marnes très monotones souvent silteuses, micacées glauconieuses parfois pyriteuses. Leur composition pétrographique est assez homogène 10 à 40 % de CaCO_3 pour moins de 10 % de silts quartzeux.

Des couches peu épaisses de grès fins à ciment calcaire s'y intercalent parfois, mais elles apparaissent rarement sur les diagraphies pétrolières. Elles sont plus fréquentes dans les formations correspondant à l'Eocène supérieur et à l'extrême base de l'Oligocène.

Il faut souligner qu'à chaque grande formation stratigraphique correspond grossièrement un cortège minéralogique particulier dont l'évolution a été étudiée sur déblais de forage.

Quatre unités ont été distinguées de la base au sommet de la série qui enregistre une diminution de la kaolinite et une augmentation de la teneur en smectite (voir la Fig. 6).

c) Structure du bassin

La structuration du bassin a pu être étudiée à partir de la géophysique réinterprétée et recalée sur les forages.

Ce bassin est fortement structuré par l'intermédiaire du rejeu plus ou moins récent de masses salifères d'âge triasique.

L'étude de la géométrie du bassin nous a amenés à sélectionner les zones subsidentes pendant le Tertiaire où existe une surépaisseur des formations argileuses (supérieure à 1000 m), situées entre les structures salifères.

2.1.2. Environnement hydrogéologique

Cette étude est réalisée principalement à partir de l'exploitation des données des forages implantés sur la zone :

- les forages peu profonds d'exploitation d'eau pour la connaissance des nappes superficielles ;
- les forages de recherche d'hydrocarbures pour les niveaux aquifères au sein des argiles et en dessous.

Les données recueillies concernent :

- Les perméabilités des niveaux aquifères ou à défaut les débits spécifiques pour les nappes superficielles
- La composition chimique des eaux, indice de l'écoulement des eaux souterraines
- Les données piézométriques qui doivent être précises pour fournir les directions d'écoulement suivant les composantes verticale et horizontales. La nappe superficielle peut seule bénéficier d'une carte piézométrique complète à ce stade de l'étude.
- L'état actuel d'exploitation des eaux souterraines dans la zone.

En ce qui concerne le Tertiaire des Landes, cette étude hydrogéologique a conduit aux résultats suivants (Voir Fig. 7) :

- 1) Délimitation dans les aquifères superficiels de zones à moindre contraintes hydrauliques caractérisées par des débits spécifiques moins élevés. La foration de puits dans ces secteurs devraient être relativement plus aisée. Les captages publics se sont révélés peu nombreux.
- 2) Mise en évidence de trois niveaux aquifères de qualité hydraulique médiocre et inégaie dans la série argileuse. Il s'agit de petits aquifères sableux ou gréseux feuilletés, discontinus, à nombreuses fermetures latérales et intercalés dans les couches argileuses ou marneuses. Les rares perméabilités mesurées varient de 0,1 à 20 mdy. La salinité élevée des eaux confirme à la fois ces faibles caractéristiques et la fermeture latérale des réservoirs.

Ces niveaux plus perméables dans un ensemble essentiellement imperméable doivent être reconnus et testés au cours des reconnaissances futures pour préciser les paramètres hydrauliques et définir leur degré d'alimentation. Les corrélations lithologiques et les diagraphies devraient permettre à l'échelle d'un site, de vérifier la continuité ou la discontinuité latérale de ces niveaux.

- 3) Identification et définition des caractéristiques du substratum des formations argileuses tertiaires.

Ce substratum est constitué soit de calcaires, soit de dolomie.

L'âge et la nature du substratum peuvent varier d'un secteur à l'autre, ainsi que ses caractéristiques hydrauliques. Les structures ont également une incidence directe sur la perméabilité. En effet, les dolomies et les calcaires fracturés sont plus fréquents sur les structures anticlinales et sont généralement très aquifères et à eau douce.

Dans les zones synclinales, la qualité hydraulique des réservoirs diminue et les pertes de boue, indices d'une bonne productivité, se produisent le plus souvent entre 100 et 300 m du toit du substratum. Ceci constitue un argument favorable pour le choix des sites en position synclinale qui sont de plus ceux où l'on trouve une plus grande épaisseur d'argiles.

Les charges des nappes profondes sont mal connues ; leurs niveaux d'équilibre sont proches du sol ou artésiens jaillissants et la température des eaux devrait être de l'ordre de 55 à 70° C aux profondeurs de 1500 à 2000 m.

2.1.3. Evolution à long terme

L'étude des mouvements récents a une place prépondérante pour apprécier le caractère favorable pour le stockage dans une zone donnée : une instabilité qui se serait manifestée récemment dans un secteur donné risquerait de se perpétuer pendant la durée à considérer pour le stockage (100 000 ans).

Pour aborder ce problème des mouvements récents, diverses techniques ont été utilisées. Il est rare qu'une technique en elle-même apporte une preuve mais seulement des présomptions. On s'attache à mettre en évidence la convergence de ces présomptions.

Les éléments néotectoniques significatifs ont été déduits de l'analyse sédimentologique fine des formations continentales plio-quadernaires, de l'étude structurale du substratum anté-miocène, des apports des données morphologiques de surface, de l'analyse des images satellites, de la sismicité historique et de l'étude des variations dans les nivellements.

Pour le bassin méridional landais, deux types d'éléments ressortent de la comparaison des différents résultats : des zones à mouvements verticaux souples et les couloirs d'anomalies directionnelles :

- . Les zones où ont été reconnues des indices d'affaissement ou de surrection dans les formations continentales récentes se calquent assez bien avec les aires synclinales ou les structures diapiriques déduites de la tectonique profonde.

On peut estimer qu'il y a une permanence des mouvements verticaux liés à la tectonique salifère jusqu'au Quaternaire récent.

- . Les anomalies directionnelles sont d'interprétation plus délicates : toutefois on peut supposer, lorsqu'elles se superposent avec des accidents de socle, qu'elles traduisent en surface des accidents profonds.

Cette étude des mouvements anciens et récents a orienté le choix des secteurs retenus vers les zones subsidentes à l'écart des grands accidents tectoniques.

2.1.4. Comportement mécanique des argiles

En ce qui concerne la caractérisation géotechnique des argiles profondes et avant la réalisation d'essais in situ, les mesures sont réalisées en laboratoire sur des échantillons d'argile tertiaire, intacts de composition minéralogique voisine mais de provenances différentes :

- a) Prélèvement en carrière à l'affleurement des argiles tertiaires. Ces échantillons ne sont pas tout à fait représentatifs de la couche profonde, mais ils sont utilisés pour des caractérisations physiques et minéralogiques.
- b) Carottage d'un tronçon de 5 m à 950 m de profondeur lors de l'exécution d'un forage pétrolier. Ces échantillons sont soumis à des essais triaxiaux en extension et en compression sous confinement élevé (jusqu'à 50 MPa), des essais de fluage de longue durée et des mesures de l'anisotropie de résistance. Ces essais doivent permettre de définir la loi de comportement de cette argile dans les conditions du dépôt et de mener des calculs analytiques simulant le creusement et la stabilité des puits et galeries. Le programme d'essai prévoit de plus l'étude du comportement thermo-mécanique de l'argile nécessaire à la détermination de la charge thermique admissible.

Dans le cas des argiles tertiaires des Landes, il est trop tôt pour conclure tant sur les caractéristiques géotechniques et la rhéologie de l'argile que sur la représentativité des échantillons, d'autant que les données déjà existantes sur des argiles à cette profondeur sont très rares, mais il est dès à présent possible de présenter quelques résultats partiels.

En surface la teneur en eau de saturation (20 à 29 %) est sensiblement supérieure à la limite de plasticité (w_p : 17 à 22 %). A 950 m de profondeur, avec 6,5 à 10,5 %, la teneur en eau est sensiblement égale à la limite de retrait w_r . Ceci confère à l'argile profonde une absence de plasticité au sens de la mécanique des sols. En première analyse nous avons considéré que nous avions à faire à une roche plutôt qu'à un sol. Au vu des premiers résultats (essais) triaxiaux et de fluage, cette approche s'est avérée une partie insuffisante. Ainsi cette argile est très différente de celle rencontrée à 220 m de profondeur au Centre d'Etude Nucléaire de MOL en Belgique lors du creusement sous congélation du Laboratoire souterrain expérimental où la teneur en eau naturelle est sensiblement supérieure à la teneur en eau limite de plasticité, et il s'agit bien alors d'une argile plastique toujours au sens classique du terme.

Le long de la carotte prélevée à 950 m de profondeur, les variations de teneur en eau et de porosité sont importantes puisqu'elles atteignent 40 % (mesures décimétriques par Gammadensimétrie) et pourraient expliquer l'actuelle dispersion observée dans les essais mécaniques en laboratoire, sans que cette dispersion soit obligatoirement représentative du comportement global du massif in situ (voir tableau 1).

La porosité est relativement faible 15,5 à 22 % (34,6 à 44 % dans les argiles du laboratoire souterrain de MOL) et devrait aller de pair avec une perméabilité intrinsèque très faible. Par contre l'absence de plasticité de l'argile pourrait conduire à une certaine fissuration du massif et nécessite donc la mise en oeuvre d'essais in situ pour estimer cette possibilité (une recherche technologique sera prochainement engagée sur ce sujet).

Les caractéristiques des argiles prélevées en surface et en profondeur sont très différentes les unes des autres alors qu'au contraire en Belgique les argiles prélevées en surface dans les carrières de TERHAGEN et en profondeur à MOL avaient des caractéristiques assez semblables, au terme de cohésion près :

La cohésion, on le sait, dépend de la pression de consolidation auquel le sol est soumis. Pour les argiles des Landes, en surface, la cohésion C_u n'est plus que de 0,12 à 0,49 MPa alors qu'elle est d'environ 2 MPa à 950 m de profondeur.

Certains essais triaxiaux ont été effectués en extension et en compression sur des éprouvettes taillées dans la direction a priori la plus défavorable vis à vis du litage. Dans les deux cas, les courbes intrinsèques dans le plan de Mohr apparaissent voisines. (voir Fig. 8)

Les essais de fluage sont menés avec plusieurs valeurs de la contrainte de consolidation (jusqu'à 50 MPa).

Quelque soit la sophistication des essais de laboratoire il manquera toujours un paramètre fondamental en matière de travaux souterrains : l'état des contraintes in situ. Bien qu'une approche de K_0 , rapport des contraintes horizontales et verticales, soit possible en laboratoire (triaxial ou oedomètre instrumentés) seuls des essais in situ du type dilatomètre ou fracturation hydraulique permettront de déterminer la valeur et l'orientation des contraintes principales. C'est pourquoi de tels essais seront prévus dans les formations argileuses profondes après la mise au point des appareils nécessaires.

2.2. Deuxième phase : Travaux de reconnaissance

Après exploitation des données disponibles, l'acquisition de paramètres géologiques complémentaires sur les formations argileuses dans les zones réputées favorables ne peut être obtenue qu'à la faveur de travaux lourds de reconnaissance.

Les résultats de ces travaux lourds devront répondre aux deux objectifs fondamentaux :

- conforter la fiabilité du stockage des déchets radioactifs dans ce type d'argile situées
- établir la faisabilité géotechnique d'ouvrages souterrains (puits et galeries) dans ce type de matériaux.

Deux séries de travaux sont à effectuer :

1 - Géophysique

La géophysique a pour but de confirmer la structure et d'essayer d'établir la continuité d'éventuels corps gréseux dans des séries alternantes argilo-sableuses dans la masse argileuse.

Les essais de sondages électriques à grande profondeur n'ayant pas réussi à cerner les corps gréseux, il est proposé de procéder à des campagnes de sismique réflexion haute résolution par méthode vibroseis.

2 - Sondage de reconnaissance

Par secteur proposé, plusieurs types de forages seront réalisées :

a) Sondage à grande profondeur pour référence géologique et à but hydrogéologique

Un sondage sera réalisé à la suite de l'interprétation de la sismique pour reconnaître la lithologie précise de la série tertiaire et du sommet du substratum crétacé ainsi que pour caractériser les éventuels niveaux aquifères.

Sa profondeur devrait être de l'ordre de 2500 m. Des carottes seront prélevées dans ce forage au droit des formations argileuses.

En fin de foration, des tests de production seront effectués dans le réservoir aquifère du substratum et un jeu complet de diagraphies serviront de référence pour la conduite du programme de carottage des forages semi-profonds.

Enfin, un carottage sismique sera effectué pour permettre de recalculer l'interprétation de la sismique réflexion.

b) - Sondages semi-profonds à but hydrogéotechnique

Il sera ensuite réalisé des sondages semi-profonds (1 000 m) autour du forage profond (quatre seraient souhaitables) pour prélever en carottage semi-continu les formations argileuses et les alternances argilo-gréseuses ; le programme de carottage à fin géotechnique sera ajusté au mieux après l'interprétation des diagraphies du grand forage.

Ces ouvrages une fois tubés pourront servir pour effectuer des tests de perméabilité après perforation aux niveaux désirés.

c) - Sondages à faible profondeur

Quelques petits sondages à 200-300 m de profondeur pourront être nécessaires pour acquérir tous les paramètres hydrogéologiques concernant les aquifères superficiels. Des essais de pompage classiques seront alors effectués pour connaître la productivité de ces aquifères qu'il faudra obligatoirement traverser lors des travaux souterrains avant d'accéder au site de stockage.

CONCLUSIONS

Le présent exposé présente le programme d'étude de confirmation des caractères favorables de formations argileuses profondes pour l'enfouissement de déchets radioactifs de haute-activité et de longue période. Ce programme est orienté vers la démonstration de la faisabilité et de la sûreté du stockage.

Au terme de l'ensemble des opérations décrites, il sera possible d'évaluer l'intérêt de ce type de configuration pour l'enfouissement profond des déchets et donc de prendre la décision d'engager ou non la phase suivante de caractérisation du site.

Simultanément, les avant-projets des ouvrages pourront être conçus et une prétude de sûreté pourra être effectuée.

Dans l'ensemble du Tertiaire des Landes qui a servi d'illustration à cet exposé, comme pour les autres régions envisagées, les travaux de reconnaissance n'ont pas encore été réalisés et des questions fondamentales concernant ce milieu argileux profond sont encore sans réponse.

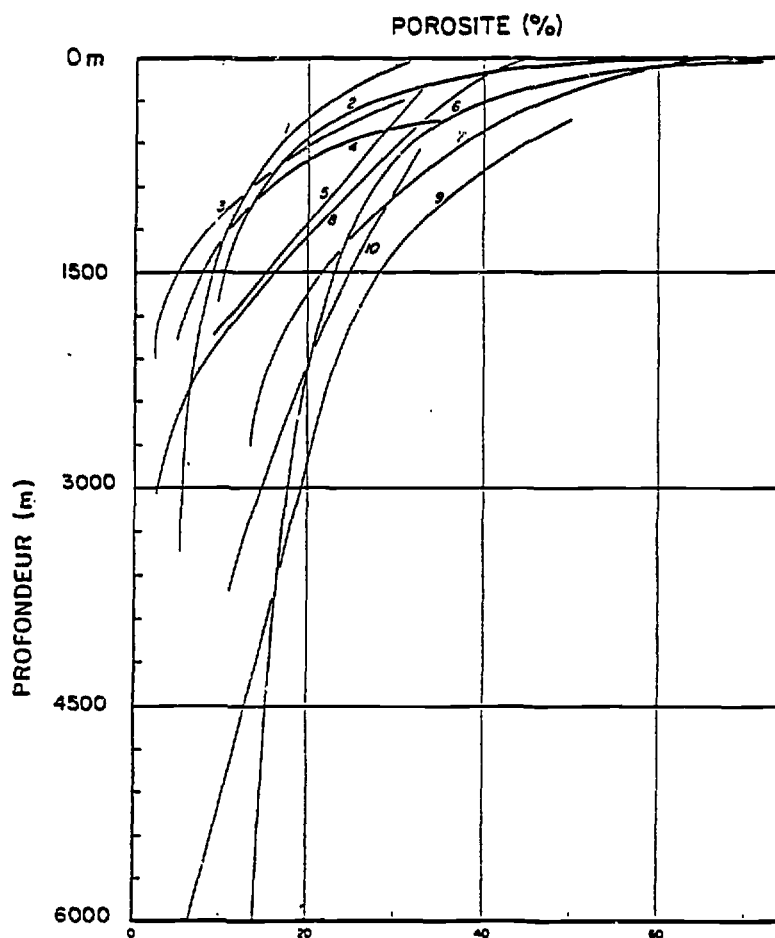
LISTE DES FIGURES

- FIGURE 1 - Relation entre la porosité et la profondeur pour des argiles sédimentaires
- Figure 2 - Inventaire des formations argileuses du territoire français (Extrait du catalogue CCE EUR 6891, 1980).
- Figure 3 - Géologie de la région des Landes
- Figure 4 - Possibilités de stockage en formations argileuses - 1ère phase des études
- Figure 5 - Coupe géologique du bassin méridional landais
- Figure 6 - Evolution minéralogique des argiles contenues dans les formations tertiaires du bassin méridional landais (dans différents forages pétroliers).
- Figure 7 - Coupe lithologique longitudinale du bassin méridional landais
- Figure 8 - Comportement mécanique d'argiles profondes en compression et en extension (essais triaxiaux)

TABLEAU N° 1 - Comportement instantané des argiles prélevées à 950 m.

FIGURE 1

RELATION ENTRE LA POROSITE ET
LA PROFONDEUR POUR DES ARGILES SEDIMENTAIRES

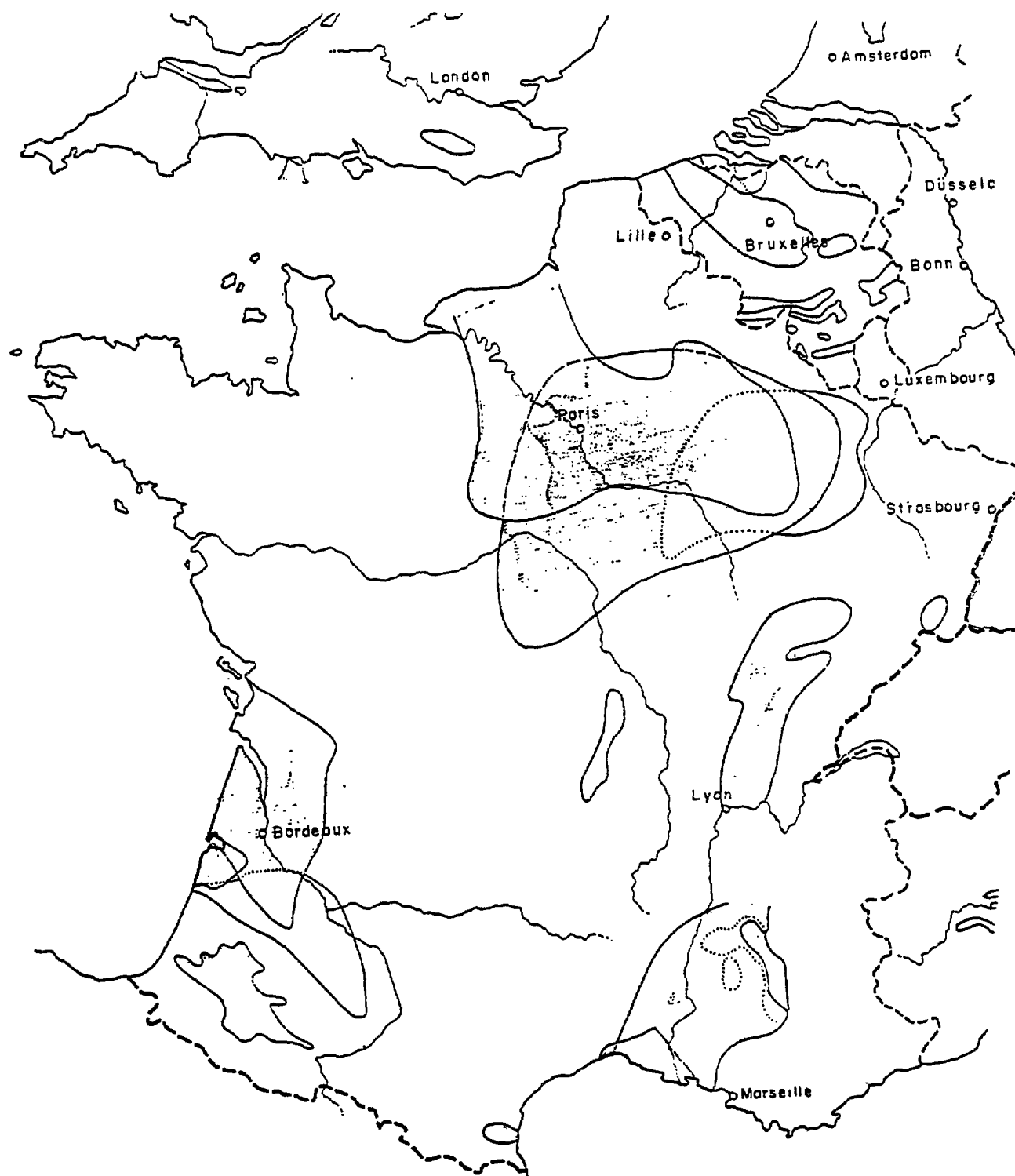


AUTEURS

PROVENANCE DES ARGILES

- | | |
|------------------------------|---|
| 1 - PROSHLYAKHOV (1960) | - Ciscaucas URSS |
| 2 - MEADE'S (1966) | - Californie |
| 3 - ATHY (1930) | - Argiles de Pennsylvanie et permien du Nord de l'Oklahoma |
| 4 - HOSOI (1963) | - Siltites tertiaires Akita et Yamagata (Japon) |
| 5 - HEDBERG (1936) | - Argile tertiaire du Venezuela |
| 6 - DICKINSON (1953) | - Argile tertiaire du golfe du Mexique |
| 7 - MAGARA (1968) | - Gaz de Shiunji, Nagaoka (Japon) |
| 8 - WELLER (1959) | - Moyenne de données de Terzaghi (1925), ATHY (1930), HEDBERG (1936). |
| 9 - HAM (1966) | - Courbe correspond à l'équation
$\phi = \frac{\rho_g - \rho_{bw}}{\rho_g - \rho_f}$ |
| | ϕ : porosité |
| | ρ_{bw} : poids spécifique du sol humide |
| | ρ_f : poids spécifique de l'eau interstitielle |
| | ρ_g : poids spécifique des grains |
| 10 - FOSTER et WHALEN (1966) | - Louisiane |

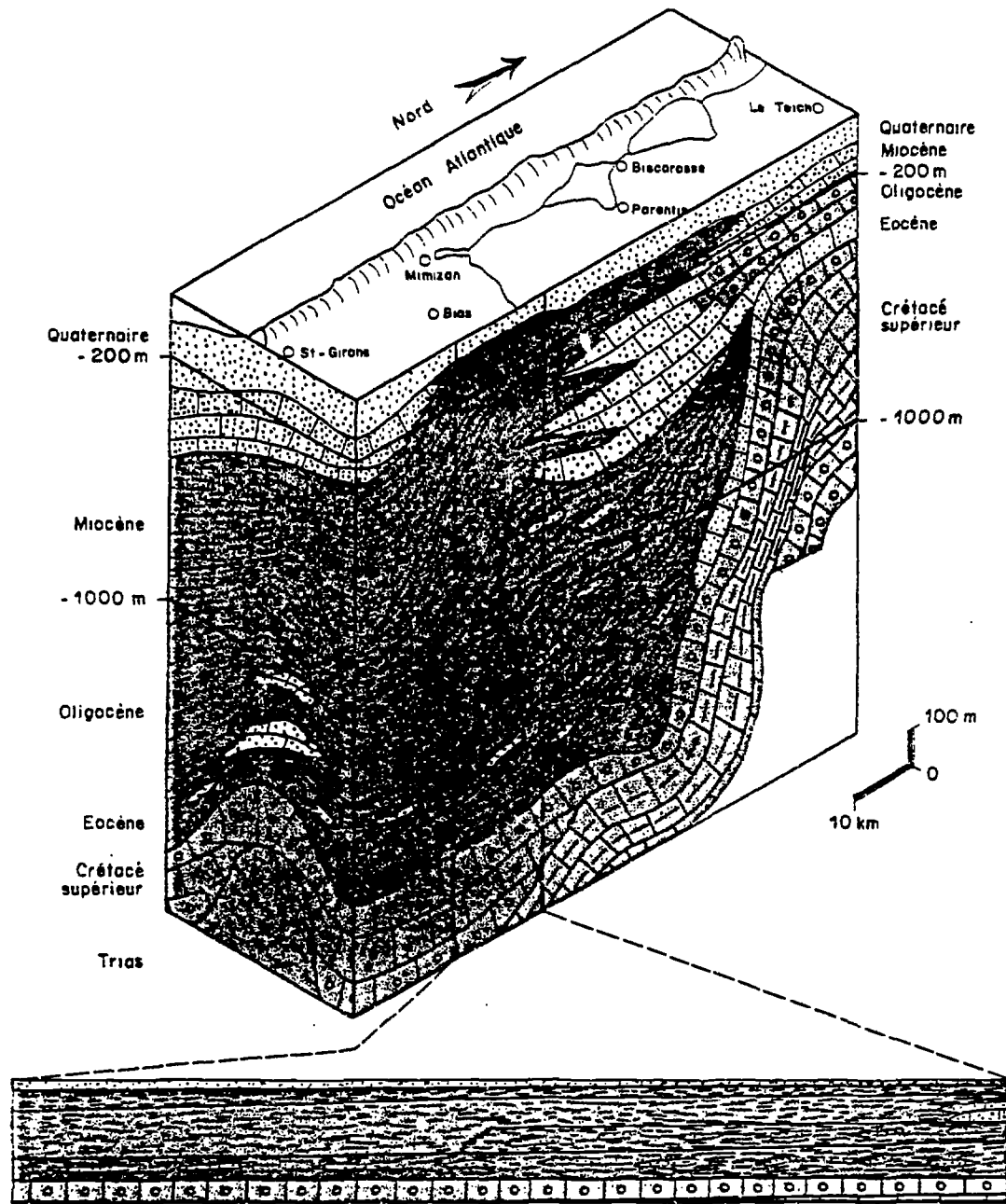
FIGURE 2
INVENTAIRE DES FORMATIONS ARGILEUSES DU TERRITOIRE FRANCAIS



Extrait du Catalogue européen des formations géologiques présentant les caractéristiques favorables à l'évacuation des déchets radioactifs solidifiés de haute activité et/ou de longue vie (Publication CCE 1980 EUR 6891 FR).

FIGURE 3

GEOLOGIE DE LA REGION DES LANDES



Echelle : 1 / 1000 000

bloc-diagramme de la région des Landes

Faciès dominants







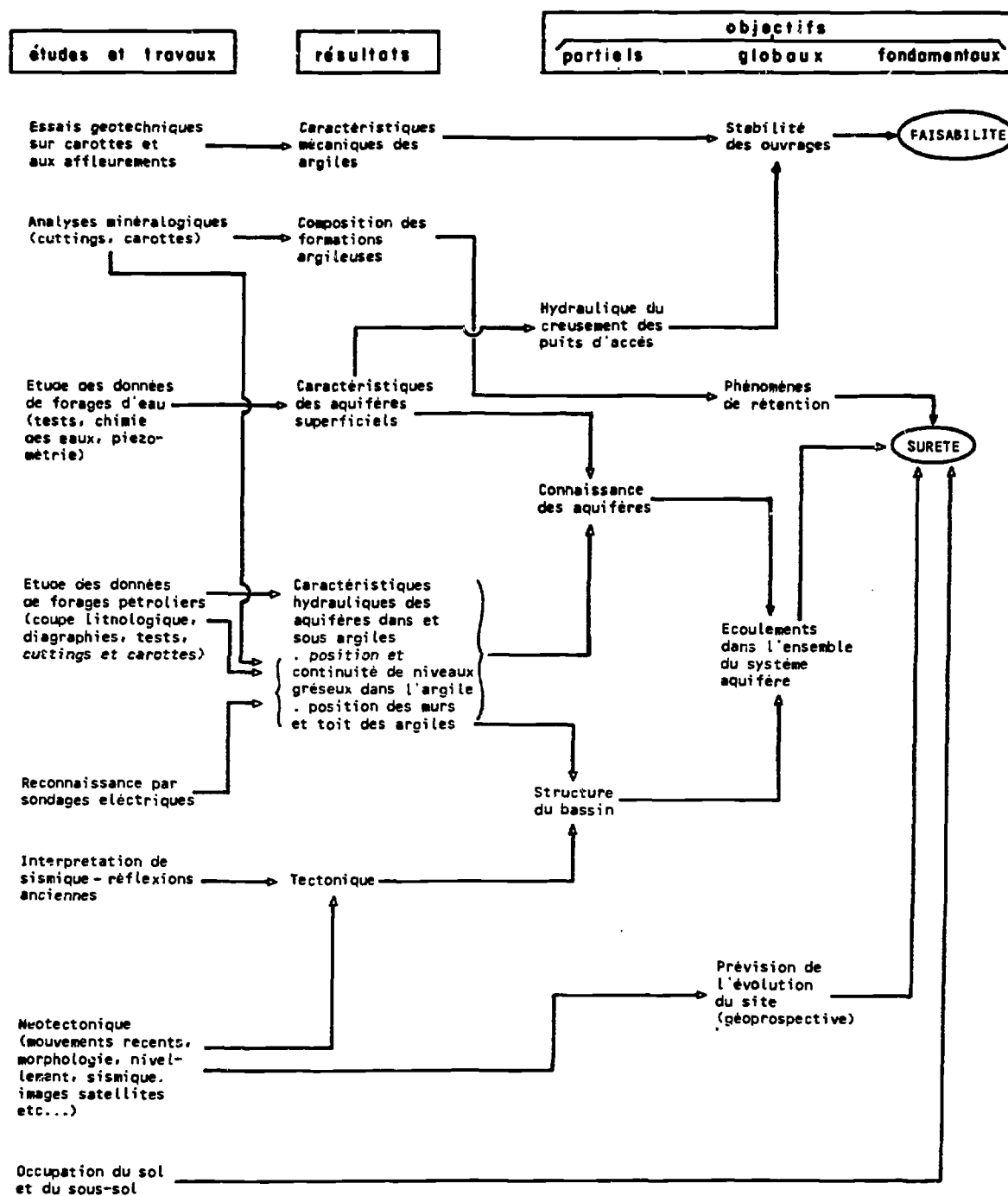
-  : sables à lentilles argileuses
-  : grès et calcaires gréseux
-  : calcaires bioclastiques
-  : argiles et marnes
-  : calcaires crayo-argileux
-  : sel et argiles

FIGURE 4



POSSIBILITES DE STOCKAGE EN FORMATIONS ARGILEUSES

1^{ère} phase des études

FIGURE 6

EVOLUTION MINERALOGIQUE DES ARGILES CONTENUES DANS LES
FORMATIONS TERTIAIRES DU BASSIN MERIDIONAL LANDAIS
(dans différents forages pétroliers)

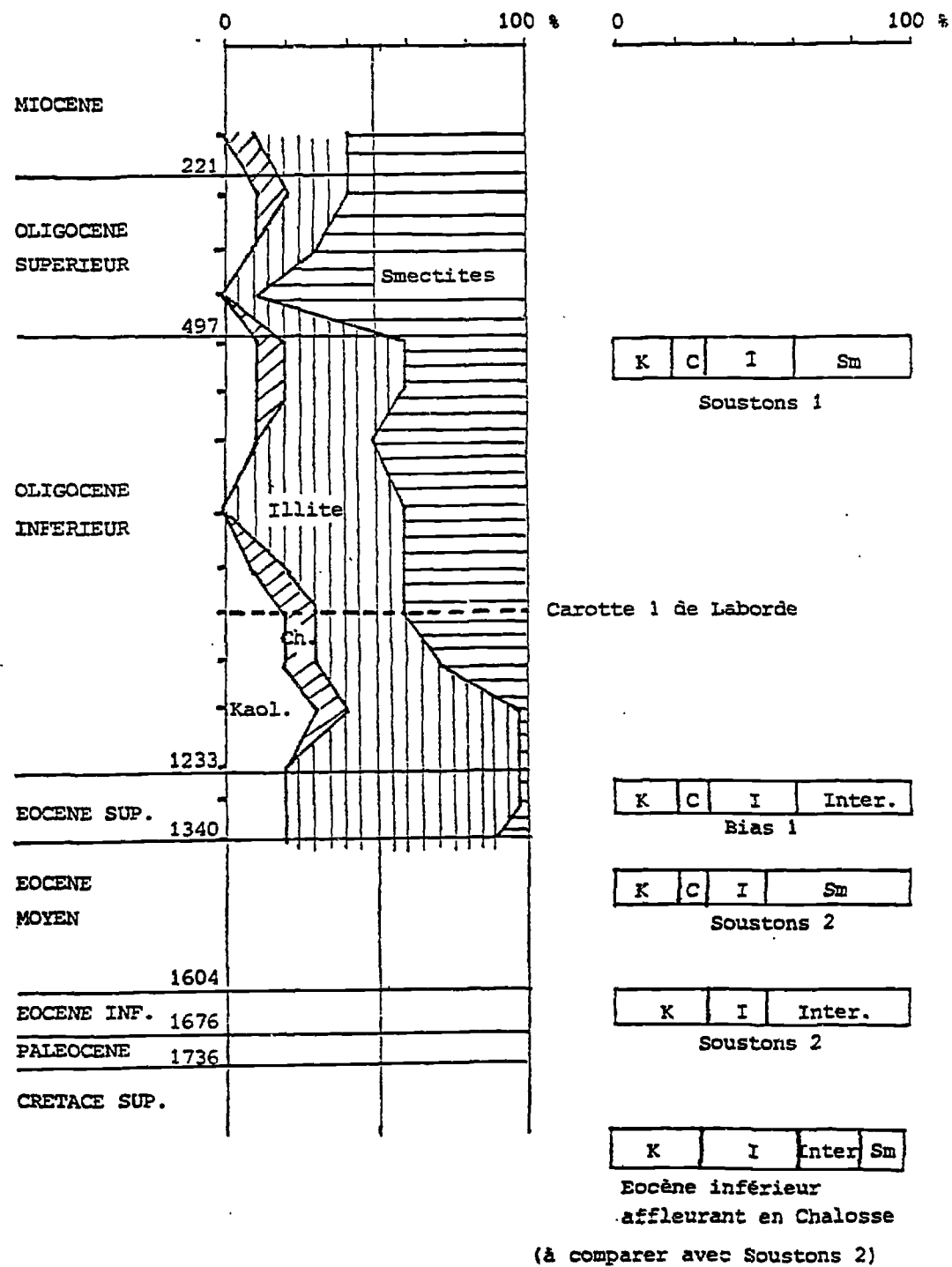
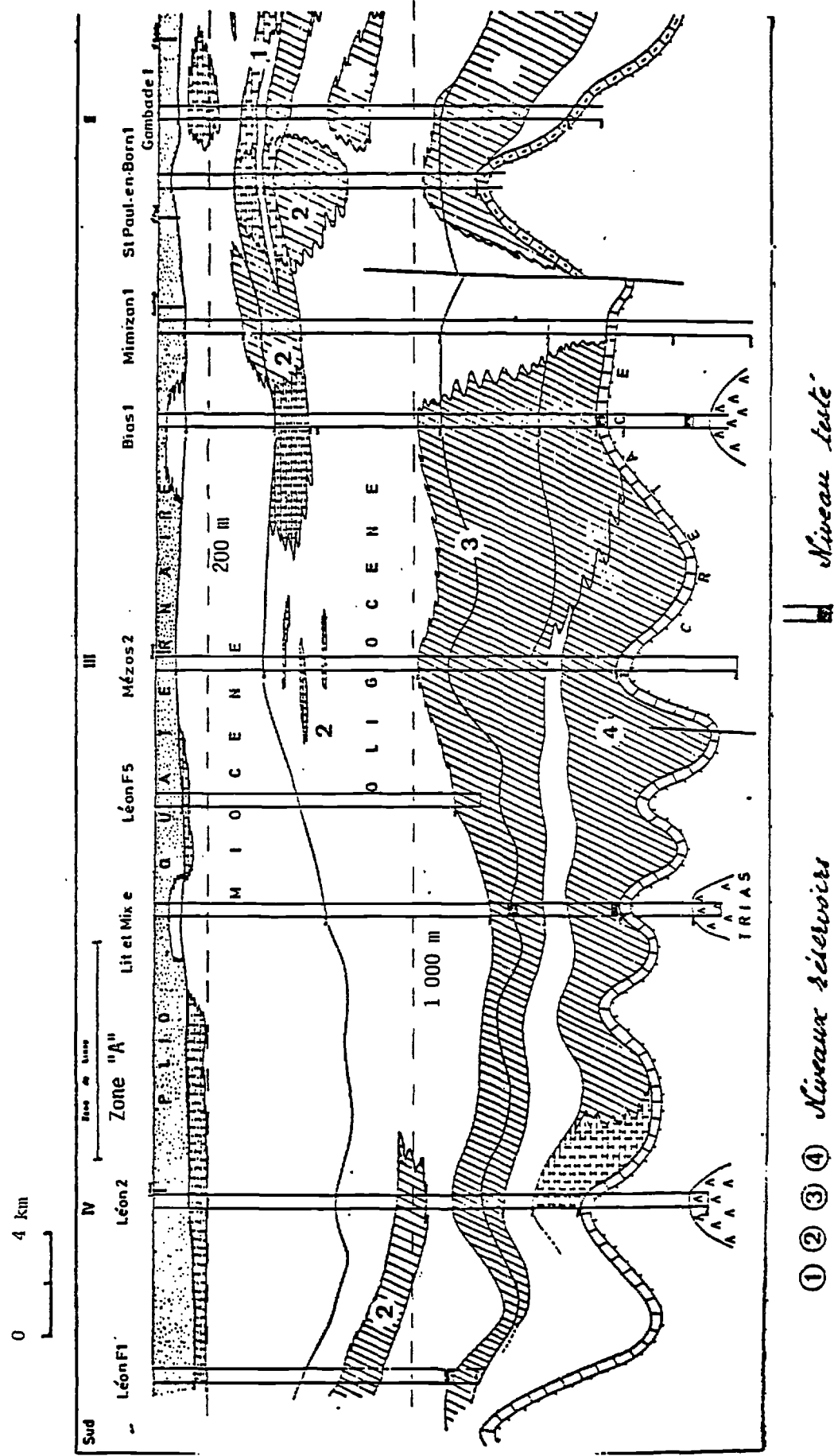


FIGURE 7

COUPE LITHOLOGIQUE LONGITUDINALE
DU BASSIN MERIDIONAL LANDAIS



① ② ③ ④ Niveau sévérien

▣ Niveau testé

FIGURE 8

COMPORTEMENT MECANIQUE D'ARGILES PROFONDES EN COMPRESSION
ET EN EXTENSION (essais triaxiaux)

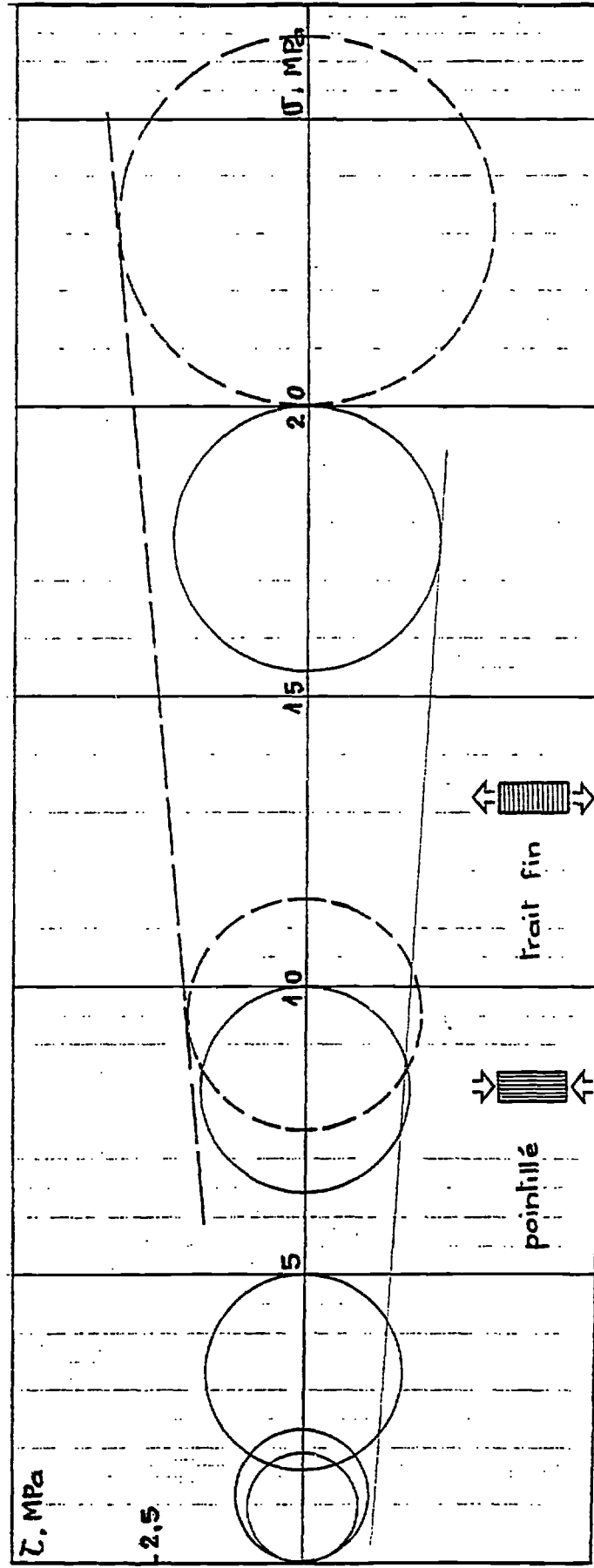


TABLEAU 1

COMPORTEMENT INSTANTANE DES ARGILES PRELEVEES A 950 m

Notation	ϕ, H : diamètres et hauteur de l'échantillon
	σ_c : résistance à la rupture en compression simple
	E_s : déformation correspondant à la contrainte σ_c
	E_b : module de déformation mesuré entre bases
	w : teneur en eau des échantillons

Cote (m)	ϕ, H (mm)	σ_c (MPa)	ϵ_s %	E_b (MPa)	w %
953,45	50;120	2,1	3	-	12,5
953,05	36;80	4,0	3,6	220	9
953,15	36;75	7,3	2,4	485	7
953,20	36;70	2,7	3,5	120	12
953,25	36;80	8,3	2,5	515	-
951,80	30;65	3,9	4	-	10
952,20	30;65	4,0	3,8	-	-
951,80	24;50	3,8	4,2	-	11,5
952,20	24;50	3,0	3,5	-	10
953,25	24;48	5,8	3,2	295	9
953,25	24;50	4,1	3,2	190	9
953,25	24 ;52	8,2	2,4	460	6