

collect 1

F918i

# LES ALTÉRITES À SILEX DE L'OUEST DU BASSIN DE PARIS

## CARACTÉRISATION LITHOLOGIQUE, GENÈSE ET UTILISATION POTENTIELLE COMME GRANULATS

B. Laignel



Documents du BRGM 264

**LES ALTÉRITES  
À SILEX DE L'OUEST  
DU BASSIN DE PARIS**

**CARACTÉRISATION LITHOLOGIQUE,  
GENÈSE ET UTILISATION POTENTIELLE  
COMME GRANULATS**



**Benoît Laignel**

**Documents du BRGM 264**

**1997**

**Éditions BRGM**

**3, avenue Claude Guillemin, B.P. 6009**

**45060 Orléans cedex 2, FRANCE**

**Tél. : 02.38.64.30.28**



# Thèse de Doctorat de l'Université de Rouen

**Spécialité : Sciences de la Terre**

**Soutenu le 28 janvier 1997  
devant la commission d'examen  
composée de :**

**MM.**

<b>R. MEYER</b>	Professeur à l'Université de Rouen	Directeur de thèse
<b>J.J. MACAIRE</b>	Professeur à l'Université de Tours	Rapporteur
<b>M. VILLEY</b>	Directeur du Service Géologique Régional, BRGM	Rapporteur
<b>C. DUPUIS</b>	Professeur à la Faculté Polytechnique de Mons	Examineur
<b>D. LEFEBVRE</b>	Maître de conférence à l'Université de Rouen	Examineur
<b>G. ALLAIN</b>	Ingénieur, représentant de l'UNICEM	Membre invité

© BRGM 1997

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans la présente publication (ou le présent ouvrage) , faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'oeuvre dans laquelle elles sont incorporées.

(Loi du 11 mars 1957 - Art. 40 et 41 et Code Pénal Art . 425).

## PREFACE

De longue date, les altérites à silex du Bassin de Paris ont suscité la curiosité, l'intérêt, mais plus rarement la passion des géologues : il faut dire que le sujet est rébarbatif, les investigations souvent peu gratifiantes. A travers les écrits que les meilleurs spécialistes leur ont consacrés, il est facile de saisir leur diversité et leurs variations extrêmes, et toute la difficulté qu'il peut y avoir à synthétiser des observations, des analyses ou des mesures nécessairement ponctuelles.

La réalisation d'une synthèse était l'ambition des travaux de recherche entrepris et conduits en parallèle par Florence QUESNEL\* et Benoît LAIGNEL. Cette synthèse concerne l'ouest du Bassin de Paris, là où les altérites à silex sont les plus développées, et aussi probablement les plus variées.

Ces travaux s'appuient sur une analyse critique des écrits antérieurs, sur le dépouillement de nombreux documents inédits tels que les coupes de sondages réalisés sur les chantiers d'aménagement, enfin sur une panoplie de techniques actuelles et variées allant de la cartographie numérique 3D, des S.I.G. à la géophysique de surface, à la géotechnique et à des essais grandeur nature d'exploitabilité des matériaux.

Florence QUESNEL a appliqué les techniques les plus récentes de la cartographie numérique aux données recueillies. La superposition de différents niveaux d'information lui permet de définir plusieurs grands domaines présentant des faciès spécifiques. Ce fait est d'autant plus important que la micropaléontologie appliquée aux silex des altérites permet de démontrer l'autochtonie des processus d'altération. Elle peut ainsi proposer des taux d'altération évoluant dans le temps et une estimation de la composante verticale de la déformation finie depuis le Thanétien supérieur.

Benoît LAIGNEL a optimisé les bilans d'altération des différentes craies ; il a identifié la contamination par les formations superficielles des altérites vraies. Enfin il présente des analyses géotechniques systématiques des faciès reconnus et des silex , ce qui lui permet de proposer les éléments techniques nécessaires à une étude socio-économique d'exploitabilité de ces matériaux.

Les deux mémoires sont liés et complémentaires. Ils présentent une synthèse faisant le point des connaissances actuelles sur le sujet.

\* cf. document du BRGM n° 263.

Robert MEYER

## AVANT PROPOS

La présentation de ce mémoire est pour moi l'occasion d'exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué d'une façon ou d'une autre à sa réalisation.

Je tiens à remercier tout particulièrement Monsieur R. Meyer, Professeur à l'Université de Rouen, de m'avoir proposé ce sujet de recherche et de l'avoir encadré. Je le remercie également pour l'accueil chaleureux qu'il m'a réservé dans son laboratoire et pour le dynamisme et l'optimisme qu'il a su partager tout au long de ce travail.

Ce travail est le fruit d'une collaboration entre l'Université de Rouen, l'UNICEM et la Région Haute-Normandie. Je remercie ces différents organismes de m'avoir accordé leur confiance et tout particulièrement Mesdames A. Merzy et N. Marchand du Service Recherche de la Région Haute-Normandie, Messieurs G. Schmitt et O. Guinet respectivement Président et Secrétaire général de l'UNICEM Haute-Normandie et Messieurs R. Waller et S. Viennot de la DRIRE Haute-Normandie.

Je témoigne une profonde reconnaissance à Monsieur P. Juignet, Professeur à l'Université de Caen, de m'avoir mis en contact avec Messieurs R. Meyer et P. Lebret, les instigateurs de cette thèse, alors que je n'étais qu'un "petit" étudiant de maîtrise de géologie.

Un grand merci à Monsieur P. Lebret, du B.R.G.M. d'Orléans, qui me suit dans mes travaux et me conseille depuis le D.E.A.

Je suis très reconnaissant à Monsieur J. J. Macaire, Professeur à l'Université de Tours, d'avoir guidé mes premiers pas en D.E.A. dans les domaines des formations superficielles et des processus d'altération. Je le remercie d'autant plus d'avoir accepté d'être rapporteur dans ce jury.

Je tiens à remercier Monsieur M. Villey, Directeur du Service Géologique Régional de Haute-Normandie, pour ses conseils lors de la rédaction de ce mémoire et pour sa participation en tant que rapporteur dans ce jury.

Merci à Monsieur G. Allain, Ingénieur chez G.S.M., de m'avoir accordé du temps pour m'expliquer les rouages d'un monde totalement nouveau pour moi, celui des exploitants de granulats. Merci également d'avoir accepté de participer à ce jury.

Un très grand merci à Dominique Lefebvre, Maître de Conférence à l'Université de Rouen, pour ses conseils et interrogations sur cette formation, l'argile à silex, à laquelle il a été confronté à maintes reprises. Je le remercie également pour ses corrections lors de la rédaction de ce mémoire et pour sa participation à ce jury.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Monsieur C. Dupuis, Professeur à la Faculté Polytechnique de Mons, de m'avoir fait l'honneur de participer à ce jury.

Mes remerciements chaleureux à Chris Spencer, Ingénieur géologue au B.R.G.M. d'Orléans, avec qui j'ai travaillé sur l'utilisation des formations résiduelles à silex comme granulats. Je le remercie également pour ses traductions de texte en anglais, même si cela ne lui pose aucune difficulté comparativement à moi.

J'exprime une grande reconnaissance à M. Garnier d'avoir mis à ma disposition le matériel du laboratoire de géotechnique appliquée aux granulats du C.E.T.E. de Rouen. Merci aux techniciens du C.E.T.E. pour leur excellente formation à la géotechnique et pour leur disponibilité.

Mes remerciements vont également :

- à Messieurs J. P. Lautridou, J. C. Ozouf et J. P. Coutard, respectivement Directeur et Ingénieurs de recherche au Centre de Géomorphologie de Caen (C.N.R.S.), pour leur aide sur les formations périglaciaires de versant ;
- à Monsieur F. Ménillet pour ses précieux conseils sur la géologie du Bassin de Paris ;
- aux entreprises Jean Lefebvre et Breton Jeannot, et tout particulièrement à Monsieur Margou, Directeur de Breton Jeannot, et à Thierry Bosvy, pour leur aide matériel lors de la campagne de sondage à la pelle mécanique concernant les biefs à silex ;
- à Monsieur Voiment, Ingénieur géologue au C.E.T.E. de Rouen, de m'avoir permis de consulter les travaux du C.E.T.E. concernant l'utilisation des argiles à silex comme granulats ;
- à M. N. Le Coustumer, J. Quillard et Y. Delehay, du Centre de Géomorphologie de Caen (C.N.R.S.), pour les nombreuses analyses minéralogiques, chimiques et les mesures de porosité et de densité ;
- à Monsieur M. Thiry, Maître de Recherche à l'E.N.S.M.P. de Fontainebleau, pour les compléments d'analyses minéralogiques qu'il a daigné réaliser ;
- à Isabelle Friard et Sabine Di Trani, sans qui la quantification des insolubles dans les craies de l'ouest du Bassin de Paris n'aurait pu être réalisée sur un nombre aussi important d'échantillons.

Il m'est impossible de citer toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à ce travail. Cependant, je voudrais chaleureusement remercier tous les membres du Laboratoire de Géologie de l'Université de Rouen.

Je ne saurais à quel point remercier Florence Quesnel. Ce travail n'a pu être accompli qu'avec la collaboration complice et de multiples discussions passionnées et fructueuses avec Florence.

Enfin, mes pensées, à l'heure de l'achèvement de cette étude, vont à mes parents et à mon frère pour leur soutien moral, si essentiel lors de la réalisation d'un tel travail.

## RÉSUMÉ

La caractérisation lithologique des formations résiduelles à silex (en abrégé RS : résidus à silex) ou altérites à silex de l'ouest du Bassin de Paris montre que ces matériaux se subdivisent en deux grands ensembles : les RS de plateau et les RS de versant, également appelés biefs à silex. Les RS de plateau s'organisent en six familles géographiques aux caractéristiques lithologiques bien distinctes. Les biefs à silex ne s'organisent pas de manière régionale, mais en fonction de la nature et de la pente du versant. On distingue : les biefs à silex situés à l'extrémité des interfluves ; les biefs à silex localisés sur les versants des vallées sèches et drainées dont la pente est supérieure ou égale à  $19^\circ$  (ces versants présentent deux biefs, les biefs 1 et 2, sous la forme géométrique d'un double biseau) ; les biefs à silex localisés sur les versants des vallées sèches et drainées dont la pente est inférieure ou égale à  $18^\circ$  (ces versants ne présentent qu'un seul bief, le bief 1, sous la forme d'un simple biseau).

La genèse des RS aux dépens des craies commence dès l'émersion fini-crétacée. La réalisation d'un bilan d'altération entre les craies à silex et les RS indique que les RS ne sont pas uniquement un résidu d'altération des craies. Si l'origine autochtone des silex est incontestable, les rapports fraction silicatée fine / silex de  $1/4$  à  $1/9$  dans les craies contre  $1/1$  à  $1/1,5$  dans les RS montrent que les matrices présentent une part allochtone importante. L'allochtonie diminue avec la profondeur, pour devenir nulle vers 20 mètres.

Au Quaternaire, la dynamique périglaciaire et le creusement des vallées va entraîner des remaniements de type solifluxion des RS sur le rebord des plateaux. Ceci conduit à la formation des biefs à silex. La mise en évidence d'une géométrie en double biseau implique au moins deux phases de mise en place. La similitude de ces formations avec les heads et leur relation avec le creusement de la vallée de la basse Seine permet de proposer une datation de ces phases de mise en place : la première matérialisée par le bief 1 serait datée vers - 800 000 ans, tandis que le bief 2 se serait mis en place au Weichsélien.

La caractérisation lithologique et la compréhension de la genèse des RS permet d'établir une typologie de ces matériaux adaptée à leur utilisation comme granulats. Les biefs à silex, malgré leur teneur élevée en silex, présentent des gisements avec des volumes trop faibles pour envisager des exploitations à l'échelle industrielle. Seuls les RS de plateau dans le centre et le sud de l'Eure et le nord de l'Eure-et-Loir avec des gisements considérables apparaissent intéressants pour l'exploitation. Ces formations présentent, néanmoins, des teneurs en silex relativement faibles dans les dix premiers mètres, nécessitant la mise au point de nouvelles méthodes de séparation silex/matrice. Des essais de traitement à sec de ces matériaux ont été réalisés et ont donné des résultats encourageants, montrant ainsi la nécessité de poursuivre ce type de recherche.

## ABSTRACT

Lithological characterisation of the clay with flints (abbreviated in French to RS: "résidus à silex") in the western part of the Paris Basin shows that these deposits can be divided into two major units: plateau RS and slope RS, also known as "biefs à silex". The plateau RS are made up of six geographical families, each with distinct lithological characteristics. The slope RS show no geographical pattern but can be classified, according to nature of the slope, into (1) "biefs à silex" at the extremities of the interfluves, (2) "biefs à silex" on the flanks of dry and well-drained valleys with slopes of  $19^\circ$  or more (these slopes show two "biefs", known as "bief" 1 and 2, which geometrically form a double wedge), and (3) "biefs à silex" on the flanks of dry and well-drained valleys with slopes of  $18^\circ$  or less (these slopes show only the "bief" 1, which geometrically forms a single wedge).

The genesis of the RS at the expense of chalk began with end-Cretaceous emergence. A weathering balance between the chalk and the RS indicates that the RS is not composed exclusively of material originating from the chalk. Whilst an autochthonous origin for the flint is undisputed, the ratio of fine-grained siliceous material / flint is 1/4 to 1/9 for the chalk and 1/1 to 1/1.5 for the RS. This indicates that the matrix is composed of a significant allochthonous fraction which diminishes with depth and disappears below 20 m.

Periglacial dynamics and valley incision during the Quaternary brought about solifluction reworking in the RS at the plateau edges, leading to formation of the "biefs à silex". The double wedge geometry indicates at least two phases of development. The similarity of these formations with the "heads" and their relationship with the incision of the lower Seine valley make it possible to date the phases: "bief" 1 is dated at around 800 000 bp and "bief" 2 is considered as Weichselian.

The lithological characterisation and the understanding of the genesis of the RS has made it possible to establish a typology of these deposits adapted to their use as aggregate. The "biefs à silex", despite being rich in flint, form deposits which are too small for exploitation at industrial scale. Only the plateau RS in the centre and south of the Eure Department and in the north of the Eure-et-Loir Department seem to be of interest for exploitation. However, these deposits have a relatively low flint content in the upper 10 m, which would call for the development of new methods of flint/matrix separation. Dry process separation tests have provided encouraging results and demonstrate the necessity of pursuing this type of research.

# SOMMAIRE

	Page
<b>INTRODUCTION</b>	1
<b>CHAPITRE I : METHODOLOGIE</b>	5
<b>1. RECHERCHE DE SITES D'ETUDES</b>	6
<b>2. METHODES DE CARACTERISATION DES MATERIAUX CONSTITUANT LES RS</b>	8
2.1. Granulométrie	8
2.2. Méthodes de caractérisation des matrices des RS	10
2.3. Méthodes de caractérisation des silex des RS	11
<b>CHAPITRE II : LES FORMATIONS RESIDUELLES A SILEX DE PLATEAU</b>	16
<b>1. CARACTERISATION LITHOLOGIQUE DES FORMATIONS RESIDUELLES A SILEX DE PLATEAU</b>	17
1.1. Distribution géographique et géométrie des RS de plateau de l'ouest du Bassin de Paris	17
1.2. Faciès observés à partir des coupes de terrain et des sondages	17
1.3. Granulométrie des RS de plateau	24
1.4. Caractérisation des matrices	30
1.5. Caractérisation des silex des RS de plateau	39
1.6. Typologie des RS de plateau	46
<b>2. APPORTS DES BILANS D'ALTERATION DANS LA COMPREHENSION DE LA GENESE DES RS</b>	50
2.1. Problématique	50
2.2. Définition et caractérisation lithologique des roches-mères crayeuses des RS	52
2.3. Estimation de la dissolution des silex au cours de l'altération	65
2.4. Reconstitution des épaisseurs de craies dissoutes	75

<b>2.5. Bilan granulométrique</b>	78
<b>2.6. Bilan minéralogique de la fraction argileuse</b>	85
<b>2.7. Bilan géochimique</b>	86
<b>2.8. Origine des apports extérieurs</b>	93
<b>2.9. Conclusion sur le bilan d'altération craies à silex / RS</b>	98
<b>CHAPITRE III : LES FORMATIONS RESIDUELLES A SILEX DE VERSANT OU BIEFS A SILEX</b>	<b>100</b>
<b>1. CARACTERISATION LITHOLOGIQUE DES BIEFS A SILEX</b>	<b>101</b>
1.1. Présentation des sites de biefs à silex étudiés	101
1.2. Granulométrie des biefs à silex	105
1.3. Caractérisation des matrices des biefs à silex	105
1.4. Caractérisation des silex des biefs à silex	110
1.5. Géométrie des gisements de biefs à silex	114
1.6. Typologie des biefs à silex	120
<b>2. GENESE DES BIEFS A SILEX</b>	<b>128</b>
2.1. Processus de mise en place des biefs à silex	128
2.2. Age de mise en place des biefs à silex	138
<b>3. CONCLUSION SUR LES BIEFS A SILEX</b>	<b>148</b>
<b>CHAPITRE IV : UTILISATION DES RS COMME GRANULATS</b>	<b>149</b>
<b>1. QUALITE ET UTILISATION DES FORMATIONS RESIDUELLES A SILEX</b>	<b>150</b>
1.1. Typologie des formations résiduelles à silex	150
1.2. Caractérisation géotechnique et utilisation des silex des RS (argiles à silex de plateau et biefs à silex)	163
1.3. Synthèse des données géologiques et géotechniques sur l'utilisation des RS comme granulats	179

<b>2. DONNEES TECHNICO-ECONOMIQUES</b>	181
<b>2.1. Traitement des RS</b>	181
<b>2.2. Valorisation des matrices des RS</b>	186
<b>3. DONNEES ENVIRONNEMENTALES</b>	188
<b>4. CONCLUSION SUR L'UTILISATION DES FORMATIONS RESIDUELLES A SILEX COMME GRANULATS</b>	190
<b>CONCLUSION</b>	192
<b>Références bibliographiques</b>	195
<b>Liste des figures</b>	204
<b>Liste des tableaux</b>	208
<b>Annexes</b>	212

## **INTRODUCTION**

Depuis ces dernières années, l'industrie des matériaux de carrière a vu apparaître un certain nombre de difficultés qui se traduisent par :

- un épuisement progressif des gisements des carrières alluvionnaires en cours d'exploitation,
- des contraintes liées à la protection de l'environnement qui tendent à limiter les exploitations en domaine alluvial.

Il est donc nécessaire de trouver des matériaux de substitution ou de complément des granulats alluvionnaires.

C'est dans cette optique que la Région Haute-Normandie, l'UNICEM et l'Université de Rouen ont signé une convention de recherche afin qu'une étude sur l'utilisation potentielle des formations résiduelles à silex (ou argiles à silex) comme matériaux de substitution ou de complément des granulats alluvionnaires soit réalisée. Cette étude a été conduite en collaboration avec Florence Quesnel dont le travail, effectué pour le BRGM d'Orléans, a porté sur la cartographie numérique et thématique des formations résiduelles à silex.

Les formations résiduelles à silex affleurent :

- dans l'ouest du Bassin de Paris depuis la Picardie jusqu'au Perche et au Pays Chartrain,
- dans le sud du Bassin de Paris (Touraine, Vendômois, Berry, Sancerrois, Pays d'Othe),
- dans le nord du Bassin de Paris (Artois, Thiérache).

Elles sont également présentes dans le Bassin d'Aquitaine (Callot et Pedro, 1977a, 1977b), dans le Bassin de Londres (Jukes-Browne, 1906 ; Catt, 1986), sur les bordures du Bassin de Mons, dans le Pays de Hervé (Belgique), au sud du Limbourg (Pays Bas) et en Rhénanie (Allemagne) (Calembert et Monjoie, 1979 ; Albers et Felder, 1981a, 1981b). La description de ces formations est donnée dans la thèse de F. Quesnel.

Ces matériaux meubles à silex ont été et sont encore désignés sous de multiples appellations : argiles à silex, formations résiduelles à silex, résidus à silex (en abrégé RS), altérites à silex, argiles de décarbonatation à silex, biefs à silex. Cette multiplicité de terme ne fait que compliquer une discussion sur une unité géologique déjà bien complexe en elle-même. Dans ce mémoire, les termes de formations résiduelles à silex et de résidus à silex sont considérés comme synonymes et sont abrégés en RS (à lire sous la forme masculine : Résidus à silex).

Les RS (Résidus à silex) ont fait l'objet de nombreuses études depuis plus d'un siècle. Les scientifiques se sont penchés sur les problèmes de la genèse de ces formations et de nombreuses théories, plus ou moins divergentes, ont été émises. Nous ne reviendrons pas sur l'histoire des concepts et théories relatifs aux RS qui a été retracé en détail par M. Thiry et N. Trauth (1976a).

Les travaux de E. Van den Broeck (1881) sur le rôle des agents météoriques dans l'érosion continentale sont repris et appliqués à l'argile à silex par G. F. Dollfus (1891) et J. Gosselet (1891) : l'eau de pluie, chargée d'acide carbonique et d'oxygène atmosphérique, renforcés par la circulation en terre végétale, est douée d'un grand pouvoir dissolvant vis à vis des calcaires et des craies. Les éléments solubles des craies sont évacués par les eaux de percolation et il reste des dépôts résiduels. Cette hypothèse d'une origine superficielle de l'argile à silex est admise aujourd'hui.

Cependant, de nombreuses divergences demeurent sur les modalités exactes de la genèse des RS. En effet, les chercheurs se séparent en deux grands groupes :

- les partisans de l'allochtonie, pour qui les RS ne peuvent être uniquement le résidu de décalcification des craies. Ils supposent alors un apport allochtone important (Grossouvre de, 1901 ; Bauer, 1964 ; ... ) ;
- les partisans de la subautochtonie, pour qui les RS sont essentiellement un résidu de décarbonatation de la craie (Klein, 1970 ; Dewolf, 1976, 1982 ; ... ) ; ces RS ayant pu subir des remaniements plus ou moins importants et une pollution par des éléments étrangers. Dès qu'il s'agit de déterminer l'importance de la phase résiduelle de la craie et de la phase apportée, les désaccords subsistent.

Ces difficultés nous semblent liées à un manque de synthèse à échelle régionale ou multirégionale des observations portant sur les RS. En effet, la plupart des hypothèses sur la genèse des RS sont le fruit d'observations ponctuelles dans différentes régions du Bassin de Paris. Or, il n'existe pas un RS, mais des RS qui se ressemblent. Ces RS, malgré leur ressemblance, ont pu évoluer dans des contextes tout à fait différents.

Le seul essai de synthèse est l'oeuvre de Y. Dewolf (1982), dont les travaux portent sur 7 cartes géomorphologiques à 1/50000 centrées sur la vallée de l'Eure. Y. Dewolf distingue trois grandes classes de RS :

- les argiles à silex de surface,
- les argiles à silex de décarbonatation,
- les biefs à silex.

Cet essai apparaît toutefois inadapté pour les préoccupations des géotechniciens et des exploitants de granulats, pour qui la typologie des RS doit être fondée sur la composition des matériaux. Actuellement, les géotechniciens ont tendance à regrouper toutes les formations à silex sous le vocable "Argile à silex" et à conclure qu'il s'agit d'un matériau très hétérogène (Evrard et Vigier, 1982).

La typologie des RS doit alors s'appuyer sur une caractérisation analytique des matériaux constitutifs des RS. Or, lorsqu'on parcourt la bibliographie, on s'aperçoit qu'à l'exception de la minéralogie de la fraction argileuse abondamment étudiée (Brajnikov et Furon, 1934 ; Brajnikov et Urbain 1934, 1936 ; Brajnikov 1938 ; Douillet *et al.*, 1967 ; Elhai, 1967 ; Klein, 1967 ; Pomerol et Bauer, 1967 ; Lucas *et al.*, 1974 ; Thiry *et al.*, 1977), les travaux analytiques sur les RS font le plus souvent défaut. Lorsqu'ils existent, ils se limitent à quelques échantillons ponctuels. De plus, les auteurs n'ont pas toujours localisé les prélèvements avec précision, ce qui rend impossible toute synthèse.

**L'objectif de notre étude est de réaliser une synthèse sur les RS de l'ouest du Bassin de Paris depuis le sud de la Picardie jusqu'au Perche et au Pays Chartrain (fig. 1). Cette synthèse porte sur la caractérisation des matériaux constituant les RS et sur la compréhension de la genèse de ces formations. Le but final est de répondre au problème de l'utilisation des RS comme granulats.**

Les RS se rencontrent dans deux domaines morphologiques bien distincts que sont les plateaux et les versants. Au fil de nos travaux, il s'est avéré que les RS de versant et notamment de haut de versant étaient des matériaux totalement différents des RS de plateau. C'est pourquoi, bien qu'il s'agisse déjà d'un résultat important, nous avons décidé, pour plus de clarté, de diviser ce mémoire en quatre chapitres consacrés à la méthodologie, aux RS de plateau, aux RS de versant (ou biefs à silex) et enfin à l'utilisation potentielle de ces formations comme granulats.

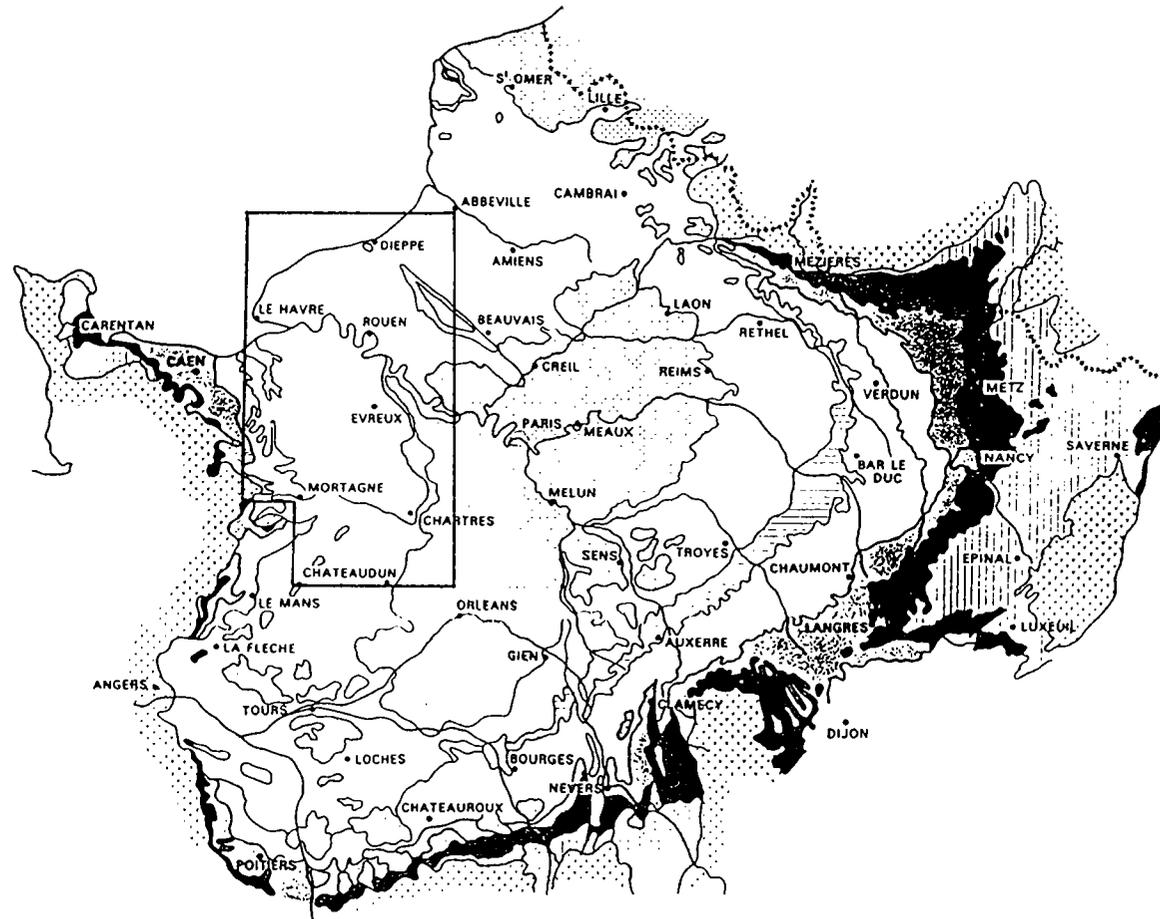


Figure 1 : Localisation géographique de l'étude sur les formations résiduelles à silex.

**CHAPITRE I :**  
**METHODOLOGIE**

## 1. Recherche de sites d'études

La première phase de l'étude a consisté à répertorier les affleurements de RS pouvant exister à l'ouest du Bassin de Paris, qu'il s'agisse d'anciennes carrières, de talus de routes, d'autoroutes ou de fondations. Pour ce faire, nous avons réalisé une synthèse de la bibliographie existant sur les RS, étudié les cartes géologiques à 1/50 000 (au nombre de 49 pour l'ouest du Bassin de Paris, cf. annexe 1) et enquêté auprès des exploitants de granulats et divers organismes tels que le BRGM de Rouen, d'Orléans, le CETE de Rouen...370 sites furent ainsi répertoriés.

Les sites répertoriés ont alors fait l'objet de visites sur le terrain afin d'établir des fiches descriptives de terrain dans lesquelles on a défini tout particulièrement les caractéristiques (tabl. 1) :

- de l'affleurement,
- de la carrière, si l'indice correspond à une carrière,
- de la formation résiduelle à silex,
- des autres formations (cénozoïques),
- d'un certain nombre de paramètres économiques et environnementaux.

Les observations de terrain permirent alors de réaliser un tri des sites en fonction de la qualité des affleurements. Beaucoup de sites ne sont plus observables à cause du remblaiement et de la couverture végétale. La plupart des extractions indiquées par les cartes géologiques sont non seulement abandonnées, mais aussi comblées et totalement oubliées.

Les sites présentant des RS dont l'épaisseur visible était supérieure ou égale à 4 mètres furent retenus pour la caractérisation analytique des RS. Les sites avec une épaisseur de RS visible inférieure à 4 mètres ne furent retenus que lorsque le contact avec la craie était apparent.

<b>AFFLEUREMENT</b>	carte géologique	
	n° site	
	localisation	
	coordonnées	
	confirmation et qualité de l'indice	
	nature de l'indice	
	autres indices	
	position morphologique	
	contexte géologique	
	orientation affleurement	
	hauteur affleurement	
	longueur	
nature de la formation exploitable		
<b>CARRIERE</b>	remblayée ou non ?	
	nature matériel exploité	
	exploitation artisanale ou industriel	
	épuisée ou non ?	
	épaisseur et superficie exploitées	
<b>RS</b>	épaisseur visible supposée	
	homogénéité du faciès	
	organisation	
	zones ou figures particulières	
	<u>silex</u> : % visuel disposition dimension teinte forme fragmentation cortex altération cavité variabilité	
	<u>matrice</u> : nature teinte variation	
	<u>extension</u> : indices probabilité direction	
<b>AUTRES FORMATIONS (découverte)</b>	<u>tertiaires</u> : nature position épaisseur	
	<u>quaternaires</u> : nature position épaisseur	
<b>ECONOMIE</b>	conditions d'accès	
	distance et caractéristiques de la route la plus proche	
	disponibilité en eau	
<b>ENVIRONNEMENT</b>	zone rurale ou urbaine	
	occupation du sol	
	habitation la plus proche	
	autres contraintes	

Tableau 1 : Fiche descriptive de terrain.

## 2. Méthodes de caractérisation des matériaux constituant les RS

Si on réalise une description sommaire des RS, on peut dire que ces formations sont constituées par des silex emballés dans une gangue ou matrice présentant des proportions variables d'argiles, de limons et de sables suivant les cas.

La caractérisation lithologique des RS peut alors se faire, dans un premier temps, par une identification du tout-venant à l'aide d'analyses granulométriques, puis dans un second temps, par des études analytiques séparées de la matrice et des silex (fig. 2).

### 2.1. Granulométrie

Dans ces formations, il n'est pas rare de trouver des dalles ou des blocs de 30 à 50 cm de longueur. De ce fait, la masse de l'échantillon à prélever pour réaliser une granulométrie représentative doit être de 100 kg, selon la norme NF P 18-560 utilisée par les géotechniciens :

$$m = 0,2 \times D$$

avec  $m$  : masse de l'échantillon à prélever en kg,

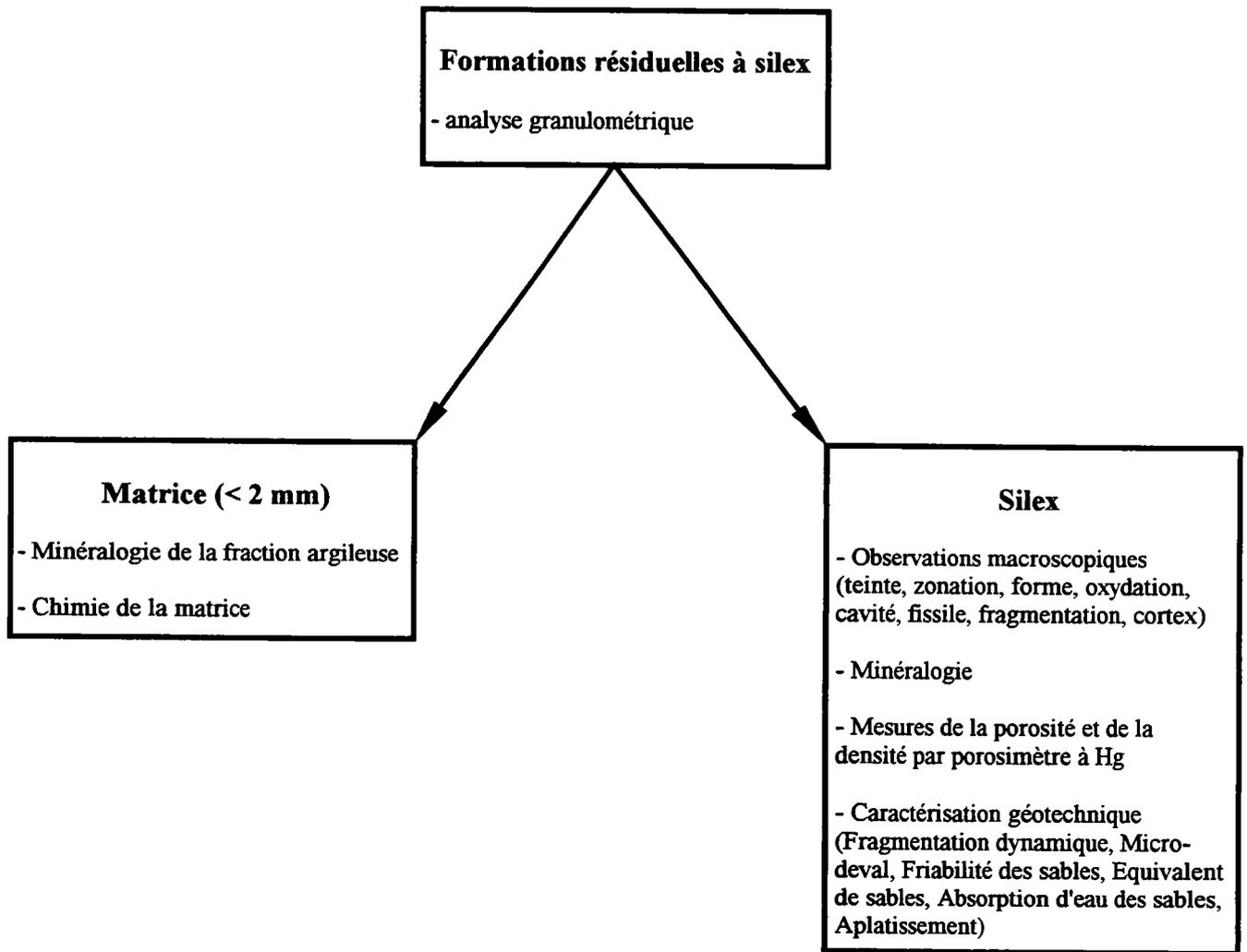
$D$  : dimension du plus grand élément du matériau à prélever, en mm.

Or, dans notre cas il n'était pas possible matériellement de prélever cette quantité sur chaque site étudié. Nous avons alors choisi de prélever un échantillon de 20 kg de la fraction inférieure à 100 mm, tandis que celle supérieure à 100 mm est traitée par analyse photographique, selon la méthode mise au point par E. Mathey (1992). La fiabilité de cette méthode a été vérifiée sur 7 sites où le CETE et le BRGM ont prélevé un minimum de 100 kg de matériaux, conformément à la norme NF P 18-560. La coupure à 100 mm offre le meilleur compromis entre le poids de l'échantillon à prélever et la fiabilité de l'analyse photographique. Pour une coupure inférieure à 100 mm les granulométries par analyse photographique ne sont plus assez précises, tandis que pour une coupure supérieure à 100 mm le poids de l'échantillon à prélever devient trop important.

La fraction inférieure à 100 mm a été traitée par tamisage classique jusqu'à 40  $\mu\text{m}$  (tamis norme AFNOR) et celle inférieure à 40  $\mu\text{m}$  a été analysée par microgranulométrie laser (microgranulomètre CILAS) au Laboratoire de Géologie de l'Université de Tours.

La granularité des matériaux est exprimée en cinq classes : cailloux ( $d > 20$  mm), graviers ( $2$  mm  $< d < 20$  mm), sables ( $50$   $\mu\text{m} < d < 2$  mm), limons ( $2$   $\mu\text{m} < d < 50$   $\mu\text{m}$ ), argiles ( $d < 2$   $\mu\text{m}$ ).

On distingue également la classe des fines ( $d < 80$   $\mu\text{m}$ ) qui correspond, pour les exploitants de granulats, à la fraction non utilisable du matériau.



**Figure 2 : Méthodes utilisées pour caractériser les formations résiduelles à silex.**

## **2.2. Méthodes de caractérisation des matrices des RS**

Deux techniques d'identification ont été choisies pour caractériser les matrices :

- l'analyse minéralogique de la fraction argileuse (fraction inférieure à 2  $\mu\text{m}$ ) par diffraction des rayons X, réalisée par M. N. Le Coustumer au Centre de Géomorphologie de Caen et M. Thiry à l'Ecole des Mines de Fontainebleau ;
- l'analyse chimique des matrices (fraction inférieure à 2 mm), effectuée par J. Quillard au Centre de Géomorphologie de Caen.

### **2.2.1. Minéralogie de la fraction argileuse par diffraction des rayons X**

Un échantillon de 10 grammes de matrice de RS (fraction inférieure à 2 mm) est délité dans de l'eau permutée, à laquelle on ajoute un dispersant (tripolyphosphate de sodium). Après 95 minutes de repos, les deux centimètres supérieurs sont siphonnés (valeurs fournies d'après la loi de Stokes). La floculation, ainsi que la saturation des échantillons sont obtenues par l'adjonction de chlorure de magnésium. Une centrifugation permet ensuite de récupérer un culot d'argile qui est déposé puis étalé sur une lame de verre. Les échantillons sont alors analysés par diffraction des rayons X avant et après chauffage (520° C pendant deux heures) et saturation à l'éthylène glycol.

L'interprétation des spectres est effectuée à partir des travaux de G. Brown (1961). L'estimation semi-quantitative des minéraux est accomplie en mesurant la hauteur de la raie 101 de chaque minéral sur le diffractogramme à l'état glycolé, en lui attribuant un coefficient de correction qui tient compte de la forme de la raie, puis en sommant à 100 % et en calculant la part qui revient à chaque minéral. Les coefficients de correction sont ceux de T. Holtzapffel (1985).

### **2.2.2. Analyse chimique des matrices**

- Les différentes méthodes d'analyses chimiques des éléments majeurs sont les suivantes :
- pour la silice, dosage gravimétrique (fusion alcaline), avec une précision des dosages de 2 % ;
  - pour l'aluminium et le titane, dosage colorimétrique (spectrocolorimètre à flux continu), avec une précision des dosages de 2 % ;
  - pour le calcium, le magnésium, le manganèse et le fer, dosage par absorption atomique (spectromètre d'absorption atomique), avec une précision des dosages de 1 % pour le manganèse et de 2 % pour les autres éléments ;
  - pour le sodium et le potassium, dosage par émission (spectromètre d'absorption atomique), avec une précision des dosages de 2 %.

### 2.3. Méthodes de caractérisation des silex des RS

Quatre techniques d'identification ont été choisies pour caractériser les silex :

- l'observation macroscopique ;
- l'analyse minéralogique par diffraction des rayons X, réalisée par G. Even au Laboratoire de sédimentologie de l'Université de Nancy I, et par observation microscopique ;
- les mesures de la porosité et de la densité par le porosimètre à mercure, effectuées par Y. Delahaye au Centre de Géomorphologie de Caen ;
- la caractérisation géotechnique, réalisée par moi-même au Laboratoire du CETE de Rouen.

#### 2.3.1. Observation macroscopique des silex

Les silex sont le plus souvent identifiés grâce à des critères descriptifs et subjectifs qui engendrent une prolifération de termes. C'est pourquoi nous avons limité le nombre de critères macroscopiques à ceux qui nous semblaient les plus appropriés pour classer les silex des RS.

Huit caractéristiques descriptives ont ainsi été retenues :

- teinte (noir, gris, brun, rouge),
- présence ou non de zonation,
- forme (rognon, parallélépipède, irrégulier = branchu ou lobé, caverneux, nodule) (fig. 3),
- présence ou non de marques d'oxydation,
- présence ou non de cavité(s) à l'intérieur du silex,
- silex fissile ou non,
- pourcentage de fragmentation,
- pourcentage de cortex.

Pour chacune de ces caractéristiques, une quantification est effectuée à partir de l'échantillonnage de 50 silex pour chaque faciès de RS.

Pour calculer le pourcentage de fragmentation, on mesure, pour chaque silex, la surface totale et les surfaces présentant des cassures. Afin d'obtenir la surface totale du silex, on assimile celui-ci à un parallélépipède et on mesure sa longueur, sa largeur et son épaisseur. Le pourcentage de fragmentation pour un silex correspond au rapport entre la somme des surfaces de cassures du silex sur sa surface totale, multiplié par 100. On réalise alors une moyenne sur les 50 silex pour déterminer le pourcentage de fragmentation des silex d'un faciès considéré.

Pour calculer le pourcentage de cortex, on mesure, pour chaque silex, la longueur (L), la largeur (l), l'épaisseur (e) et l'épaisseur du cortex (c) du silex. On calcul ensuite :

- le volume du silex (V)

$$V = L \cdot l \cdot e$$

- le volume du silex sans cortex (Vs)

$$V_s = (L - 2c) \cdot (l - 2c) \cdot (e - 2c)$$

- le volume du cortex (Vc)

$$V_c = V - V_s$$

- le pourcentage de cortex pour un silex

$$\% \text{ cortex silex} = V_c \cdot 100 / V$$

On réalise alors une moyenne sur les 50 silex pour déterminer le pourcentage de cortex des silex d'un faciès considéré.

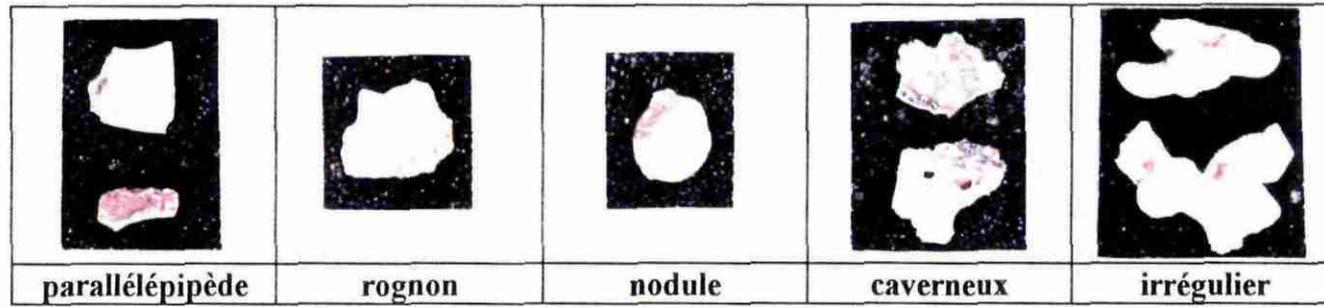


Figure 3 : Photo illustrant les différentes formes de silex rencontrées dans les RS (d'après Laignel, 1993).

### 2.3.2. Minéralogie des silex

La minéralogie des silex a été étudiée par diffraction des rayons X et par observation au microscope optique.

Deux passages aux rayons X ont été réalisés, un pour des angles  $2\theta$  de  $79^\circ$  à  $84^\circ$ , l'autre pour des angles  $2\theta$  de  $22^\circ$  à  $32^\circ$ . A partir des diagrammes de diffraction des rayons X, nous avons alors étudié la minéralogie des silex, mais également la cristallinité du quartz selon la procédure décrite par K. J. Murata et M. B. Norman (1976) et reprise par P. Pangalos (1984).

La diffraction des rayons X permet de distinguer le quartz de l'opale CT et A (Meyer et Dos Reis, 1985). Le quartz se caractérise par deux raies situées à  $3,34 \text{ \AA}$  et  $4,26 \text{ \AA}$ , soit respectivement à des angles  $2\theta$  de  $31,04^\circ$  et  $24,24^\circ$ . La présence d'opale se manifeste par trois raies à  $4,32 \text{ \AA}$ ,  $4,10 \text{ \AA}$  et  $2,50 \text{ \AA}$ .

Pour mettre en évidence la tridymite, il est nécessaire d'utiliser l'analyse thermo-différentielle (ATD) (Vilas Boas, 1975). Dans notre étude, cette méthode n'a pas été utilisée, dans la mesure où l'opale est absente de nos échantillons de silex.

Le microscope optique sert à différencier le quartz macrocristallin, le quartz microcristallin et la calcédoine

### 2.3.3. Mesures de la porosité et de la densité des silex

Les mesures de porosité et de densité des silex ont été effectuées par un porosimètre à mercure de type MAREP.

Le principe du porosimètre à mercure est d'injecter du mercure à des pressions variées dans un échantillon de roche afin de connaître la porosité totale et la granulométrie des pores de celle-ci (Lautridou et Ozouf, 1987a, 1987b). La densité de la roche peut également être caractérisée par cette méthode.

### 2.3.4. Caractérisation géotechnique des silex

On distingue trois domaines d'utilisation des granulats :

- la construction des routes ou viabilité, au sein de laquelle on différencie le terrassement et la construction des chaussées ;
- la confection des bétons hydrauliques pour le bâtiment ;
- le ballastage des voies de chemins de fer.

Les différentes utilisations des granulats répondent à un certain nombre de spécifications qui font références à des essais normalisés. Il existe en France une norme qui a pour objet de définir les granulats et de les classer en plusieurs catégories, selon leur origine, leurs caractéristiques et leur utilisation (norme NF P 18-101). Cette norme fait référence à 33 autres normes qui décrivent les modes opératoires des essais de granulats.

Si l'on se rapporte à l'ensemble des normes françaises et étrangères, on s'aperçoit que le nombre d'essais de granulats dépasse la centaine.

Ces essais se répartissent en deux groupes :

- les essais d'identification de la nature du granulat, au sein desquels on peut citer les essais classiques de résistance mécanique (Los Angeles, Fragmentation Dynamique, Microdeval, Friabilité des sables),
- les essais de fabrication (granularité, propreté, aplatissement, angularité).

Les essais d'identification donnent des résultats qui ne sont pas interchangeables, tandis que pour les essais de fabrication, il est possible de jouer sur la formulation du granulat pour améliorer ses caractéristiques.

Dans le cadre de notre étude, il n'était pas possible de réaliser la totalité des essais. Ceci nous a conduit à privilégier les essais de bases, à savoir les essais de résistance mécanique Los Angeles, Fragmentation Dynamique, Microdeval en présence d'eau, Friabilité des sables, mais également les essais d'équivalent de sable, d'absorption de l'eau et de mesure du coefficient d'aplatissement.

#### ***2.3.4.1. Essais Los Angeles et de Fragmentation Dynamique (normes NF P 18-573 et NF P 18-574)***

Ces deux essais permettent de mesurer la résistance à la fragmentation d'un échantillon de granulats.

L'essai Los Angeles (LA) consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés dans la machine Los Angeles. L'essai de Fragmentation Dynamique (FD) consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs d'une masse normalisée.

La FD a tendance à être délaissée au profit du LA, mais ce dernier nécessite de recueillir une quantité d'échantillon plus importante que dans le cas de la FD. C'est pourquoi, nous avons privilégié la FD, après avoir cependant vérifié sur trois échantillons de silex de RS que les résultats des essais de FD et LA étaient similaires (Tabl. 2)

échantillons 10-14 mm	FD	LA
Cha	28	30
Vas p1	24	25
Con 2	18	19

Tableau 2 : Comparaison des résultats de résistance à la fragmentation des silex des RS entre les essais de fragmentation dynamique (FD) et Los Angeles (LA).

La granularité du matériau soumis à la FD est choisie parmi les trois classes granulométriques : 4 - 6,3 mm ; 6,3 - 10 mm ; 10 - 14 mm. Traditionnellement une seule classe est choisie en fonction de la courbe granulométrique du granulat soumis à l'essai.

Or, P. Le Berre (1977) a souligné que pour les silex des RS les résultats pouvaient être différents en fonction de la fraction granulométrique soumise à la FD. C'est pourquoi, nous avons retenu les classes granulométriques extrêmes, 4 - 6,3 mm et 10 - 14 mm pour effectuer cet essai.

#### **2.3.4.2. Essai d'usure Micro-Deval en présence d'eau (norme NF P 18-572)**

L'essai Micro-Deval permet de mesurer la résistance à l'usure des roches. Il consiste à mesurer l'usure des granulats produite dans un cylindre en rotation par frottements réciproques entre les granulats et une charge abrasive. L'essai peut être réalisé à sec ou en présence d'eau. Nous avons opté pour le Micro-Deval en présence d'eau (MDE).

Pour les mêmes raisons que la FD, le MDE a été effectué sur les deux classes granulométriques 4 - 6,3 et 10 - 14 mm.

#### **2.3.4.3. Mesure du coefficient de Friabilité des sables (norme NF P 18-576)**

L'objet de cet essai est de déterminer la résistance à la fragmentation des sables (0,2 - 4 mm). Il consiste à mesurer l'évolution granulométrique des sables produite par la fragmentation dans un cylindre en rotation à l'aide d'une charge abrasive en présence d'eau. L'évolution granulométrique est caractérisée par la quantité d'éléments inférieurs à 0,1 mm produite au cours de l'essai.

#### **2.3.4.4. Equivalent de sable (norme NF P 18-598)**

Cet essai permet de mesurer la propreté d'un sable. Il est effectué sur la fraction d'un granulat inférieure à 5 mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent.

#### **2.3.4.5. Coefficient d'absorption d'eau des sables (norme NF P 18-555)**

Le coefficient d'absorption d'eau est défini comme le rapport de l'augmentation de masse d'un échantillon de sable (0 - 4 mm) entraînée par une imbibition partielle en eau, sur la masse sèche de l'échantillon. Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 h à 20 °C et à la pression atmosphérique.

#### **2.3.4.6. Mesure du coefficient d'aplatissement (norme NF P 18-561)**

Cet essai permet de déterminer le coefficient d'aplatissement d'un échantillon de granulats dont les dimensions sont comprises entre 4 et 50 mm. Il consiste à effectuer un double tamisage :

- un tamisage sur des tamis à mailles carrées pour classer l'échantillon en différentes classes granulaires,
- puis un tamisage des différentes classes granulaires sur des grilles à fentes parallèles.

**CHAPITRE II :**  
**LES FORMATIONS RESIDUELLES A SILEX**  
**DE PLATEAU**

## **1. Caractérisation lithologique des formations résiduelles à silex de plateau**

### **1.1. Distribution géographique et géométrie des RS de plateau de l'ouest du Bassin de Paris**

Les formations résiduelles à silex étudiées se développent d'ouest en est, de la cuesta du Pays d'Auge au Vexin Normand, et du nord au sud depuis le sud-ouest de la Picardie et le Pays de Caux jusqu'au Perche et la Beauce (fig. 4). Elles couvrent une surface de 14 069 km<sup>2</sup> et concernent entièrement ou en partie 10 départements : le Calvados, l'Orne, la Sarthe, la Seine-Maritime, l'Eure, l'Eure et Loir, la Somme, l'Oise, les Yvelines et le Loir et Cher.

Les sondages rassemblés principalement à la banque des données du sous-sol du BRGM ont permis à F. Quesnel d'établir des cartes des épaisseurs de RS de plateau (fig. 5 et 6). C'est près de 2500 sondages qui ont servi à la réalisation de ces cartes.

Elles mettent en évidence plusieurs grands ensembles à l'ouest du Bassin de Paris :

- la partie orientale de la zone étudiée (Talou, est du Pays de Caux et est de l'Eure) présente des épaisseurs de RS inférieures à 10 m ;
- le Pays de Caux (excepté l'est) se caractérise par des épaisseurs de RS variables. Elles sont en moyenne de 10 à 15 m, mais peuvent dépasser 30 m au sein des grands puits ;
- le RS localisé sous les alluvions des hautes terrasses de la Seine et de l'Eure a une épaisseur très faible, de 2 à 3 m ;
- le petit secteur restreint au sud du Lieuvin et au nord-ouest du Pays d'Ouche montre des épaisseurs de RS inférieures à 10 m ;
- la partie occidentale de la zone étudiée (Pays d'Auge et Perche) a des épaisseurs de RS inférieures à 10 m ;
- le reste de la zone étudiée (Eure et Eure et Loir, excepté l'est) présente des épaisseurs de RS supérieures à 10 m, pouvant atteindre 20 m et plus dans la partie centrale (orientée selon un axe N-S à NNW-SSE).

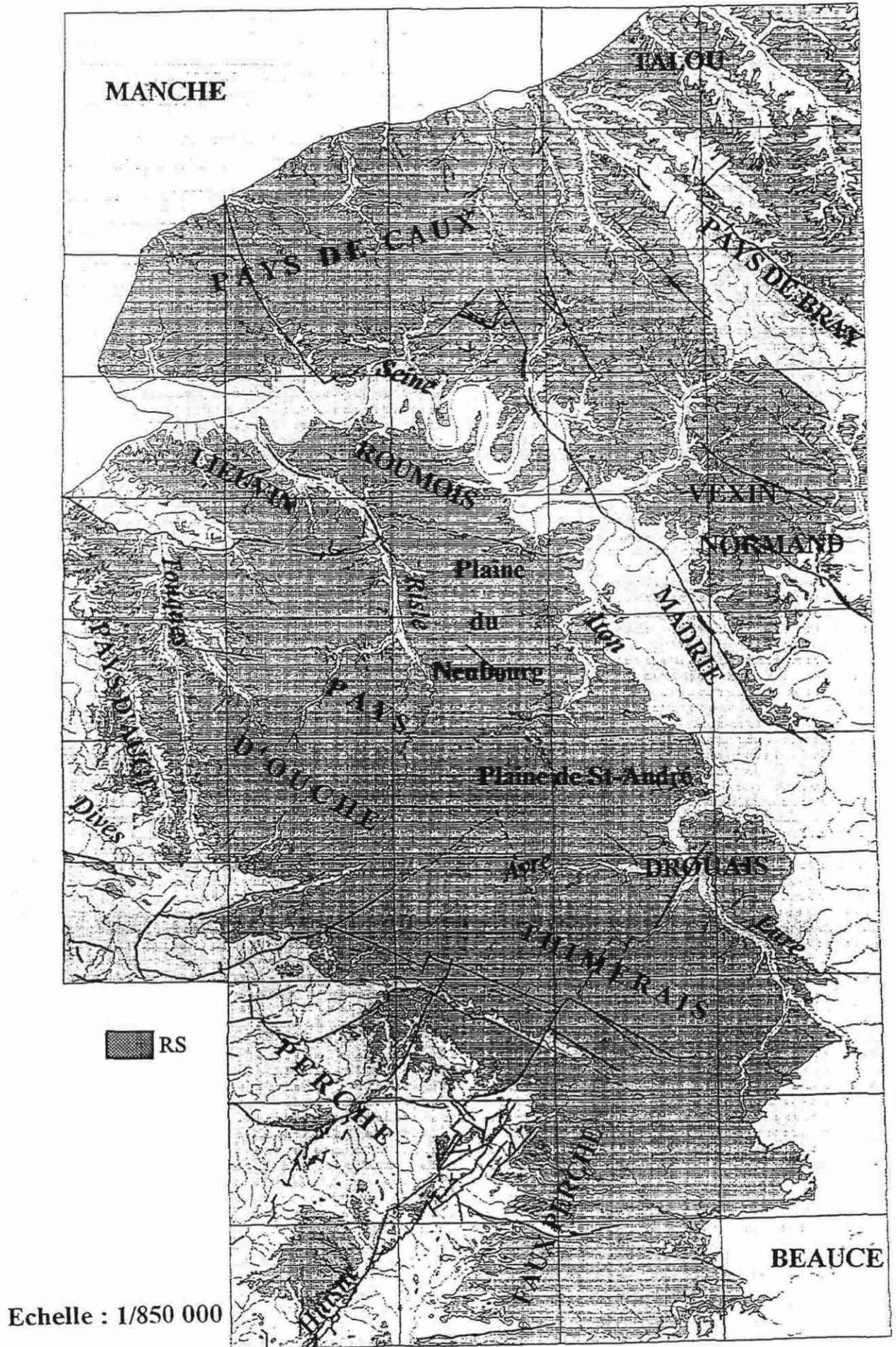
### **1.2. Faciès observés à partir des coupes de terrain et des sondages**

Une fois ces grands ensembles mis en évidence (à partir des épaisseurs des RS), plusieurs coupes par ensemble ont été étudiées à l'aide d'observations de terrain et d'analyses afin de déterminer s'il existe réellement, du point de vue de la composition lithologique des RS, des familles géographiques différentes.

21 sites de RS situés en plateau ont été étudiés (fig. 7) :

- Bertreville St Ouen (BSO), Neufchâtel en Bray (Neu) et Blangy sur Bresle (Bla) pour l'est de la Seine-Maritime ;

Figure 4 : Cadre géographique régional de l'étude sur les formations résiduelles à silex.



Quadrillage rectangulaire : découpage des feuilles 1/50 000

**Figure 5 :**  
**Epaisseurs moyennes régionales de RS (krigeage SynerGIS)**  
 Echelle : 1/1 000 000 - projection Lambert I nord

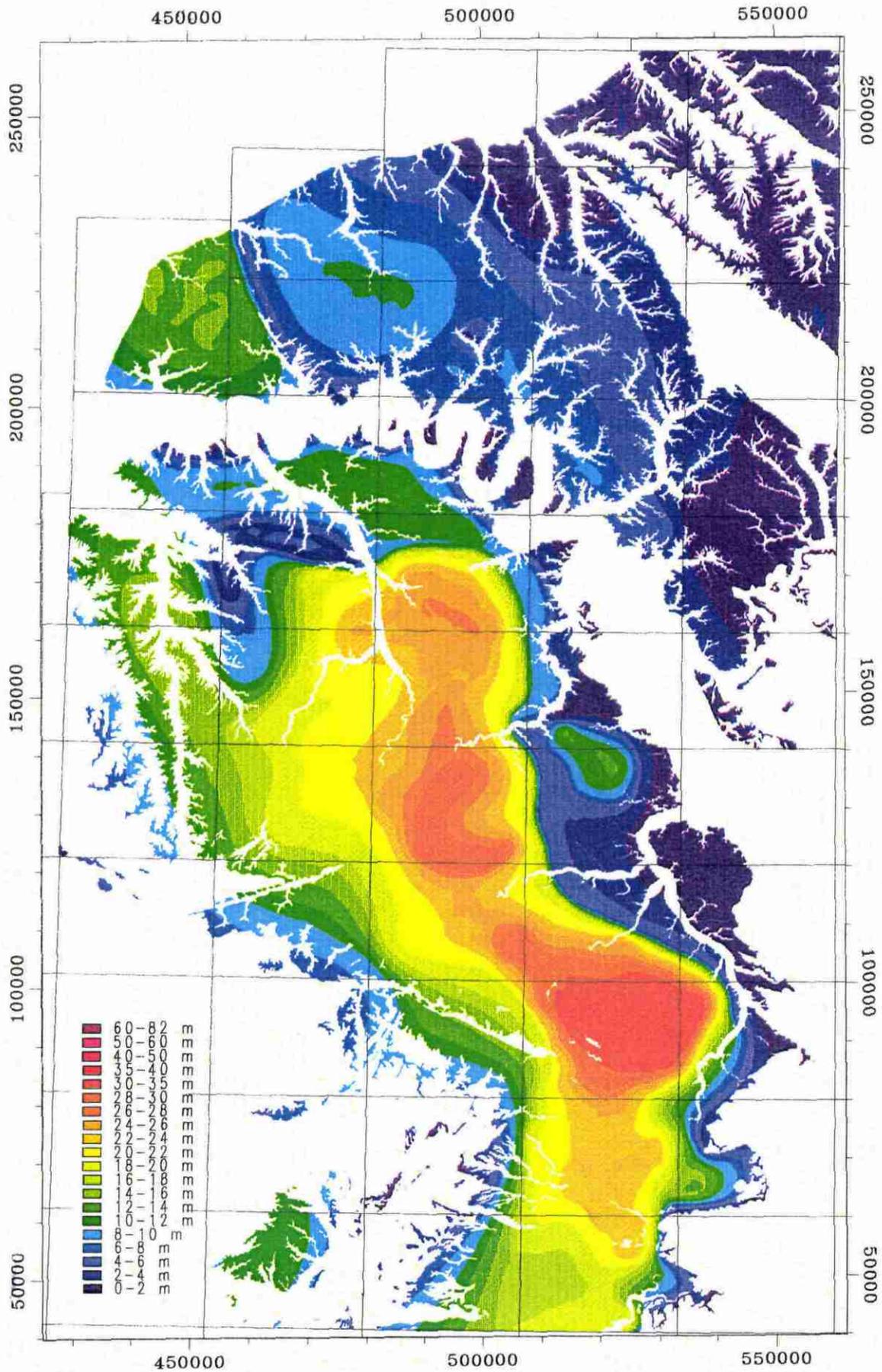
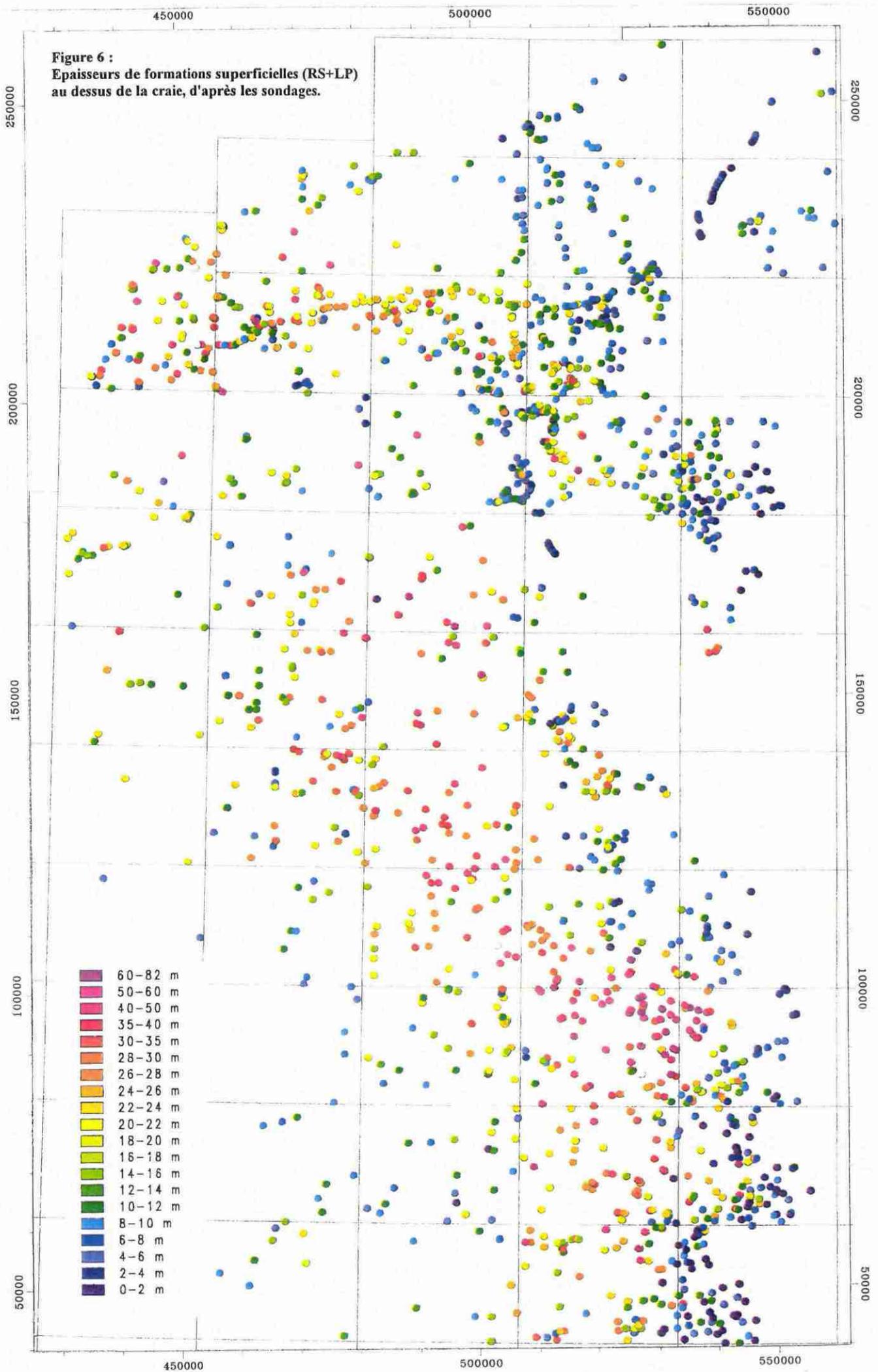


Figure 6 :  
Epaisseurs de formations superficielles (RS+LP)  
au dessus de la craie, d'après les sondages.





**Figure 7 : Localisation géographique des sites de RS de plateau étudiés.**

Echelle 1 / 850 000

Bla : Blangy sur Bresle, Neu : Neufchâtel en Bray, BSO : Bertreville St Ouen, Yv : Yvetot, A29 : A 29, Bc : Bolbec, San : Sandouville, Oct : Octeville, MtS : Les Monts Sud, Beu : Beuzeville, Lie : La lièverrie, CDE : Courtonne les Deux Eglises, SJT : St Jean du Theney, Vas : La Vasserie, MtM : Mont Mal, Mol : Les Mollands, By : Bernay, Aub : Aubé, Ven : La Ventrouze, A/C : A/C, Cha : Challet.

- Yvetot (Yv), A 29, Bolbec (Bc), Sandouville (San) et Octeville (Oct) pour le Pays de Caux ;
- Les Monts Sud (MtS), Beuzeville (Beu), La Lièverrie (Lie), Courtonne les Deux Eglises (CDE) et St Jean du Theney (SJT) pour le nord et l'ouest de l'Eure ;
- La Vasserie (Vas), Mont Mal (MtM), Les Mollands (Mol) et Bernay (By), pour le centre de l'Eure ;
- La Ventrouze (Ven) et Aubé (Aub) pour le Perche ;
- A/C et Challet (Cha) pour le nord de l'Eure et Loir. Dans un souci de confidentialité, le nom du site A/C ne peut pas être mentionné ici, dans la mesure où les données lithologiques concernant le RS proviennent d'une société privée productrice de granulats.

D'après l'ensemble des coupes de RS de plateau figurées dans l'annexe 2, quel que soit le secteur considéré, verticalement (de haut en bas), on retrouve la coupe schématique suivante :

- **limons des plateaux**, plus ou moins épais suivant la région considérée (0 à 5 m, voire plus) ;
- **RS limoneux à limono-argileux**, sur une épaisseur de 0,5 à 2 m. Ce faciès est pauvre en silex (inférieur à 40 %, d'après évaluation visuelle), lesquels sont cassés. Ce faciès de RS est souvent appelé bief à silex de plateau et il correspond en réalité au passage entre les limons et le RS sous-jacent ;
- **RS argileux à argilo-limoneux**. Il s'agit du RS proprement dit, et donc du **faciès dominant** qui constitue l'essentiel des coupes depuis le faciès limoneux du sommet jusqu'au liseré argileux brun foncé situé au contact des craies. Il est composé d'une matrice de teinte variable suivant les secteurs étudiés et de silex peu ou pas cassés ;
- **liseré argileux brun foncé, noir ou gris vert à silex**. Il se trouve systématiquement à la base des coupes de RS, **au contact de la craie**. Son épaisseur est en général de l'ordre de 0,5 m, mais peut atteindre parfois 2 m. Seul le RS reposant sur les Sables du Perche ne présente pas de liseré argileux brun foncé.

Les différences d'un site à un autre se situent au niveau du RS argileux à argilo-limoneux, mais également au niveau de l'association des RS avec les formations sableuses cénozoïques. Ces formations sableuses sont conservées sporadiquement en poches au sein des RS et elles contaminent ces derniers localement.

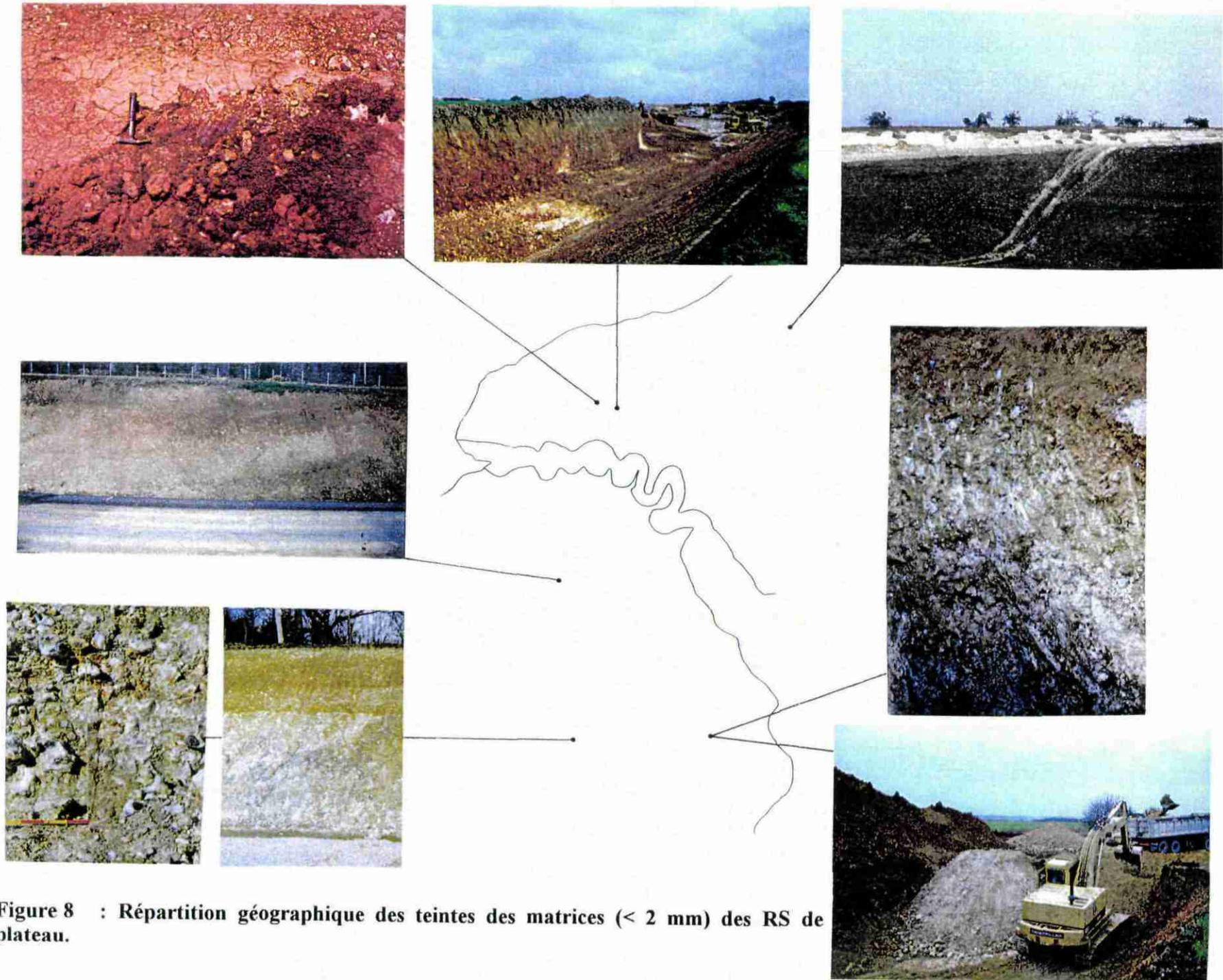
A l'observation, les différences au niveau des RS argileux à argilo-limoneux se marquent essentiellement par des variations de couleur de la matrice. Trois provinces ressortent nettement (fig. 8):

- l'est du Pays de Caux et le Talou, avec un RS de couleur généralement brun, pouvant être ocre, voire brun rouge localement ;
- le Pays de Caux (à l'exception de l'est) où la couleur du RS est généralement rouge, voire brun rouge ;
- le sud de la Seine (l'Eure, le nord de l'Eure et Loir et le Perche), avec des RS rouges au sommet des coupes s'éclaircissant rapidement en profondeur pour devenir marbré beige, ocre, rose et blanc. Le RS le plus clair se rencontre sur les Sables du Perche, avec une couleur bigarrée rouge et blanche, voire entièrement blanche.

L'étude de 2500 sondages, réalisée par F. Quesnel, permet d'affiner et de compléter cette zonation pour les secteurs où il n'existe pas de coupes permettant des observations.

Les sondages confirment :

- le faciès de RS brun, parfois ocre, de l'est du Pays de Caux et du Talou. Celui-ci peut être étendu au Vexin Normand, à l'exception de sa bordure sud-ouest ;
- le faciès de RS rouge à brun-rouge du Pays de Caux (excepté l'est). Celui-ci se rencontre également dans le Roumois, la région d'Evreux et le sud-ouest du Vexin Normand ;



**Figure 8** : Répartition géographique des teintes des matrices (<math>< 2 \text{ mm}</math>) des RS de plateau.

- le faciès de RS rouge au sommet et s'éclaircissant en profondeur pour l'Eure (excepté le Roumois et l'est de l'Eure), le Perche et le nord de l'Eure et Loir. Celui-ci peut être étendu à la bordure est du Calvados et à l'ensemble de l'Eure et Loir.

De plus, ces sondages mettent en évidence deux nouveaux faciès de RS :

- le RS sous les alluvions des hautes terrasses de la Seine et de l'Eure. Ce faciès a été décrit par D. Lefebvre (1984) à la Pointe de la Roque. Le RS est de couleur brun-rouge ;
- le RS du Drouais, de couleur brune, brun rouge ou brun ocre. Il est décrit par F. Ménillet *et al.* (1994) dans la carte géologique à 1/50000 de Dreux.

En ce qui concerne l'association des RS avec les sables cénozoïques, six faciès de sables peuvent se retrouver en poches au sommet des RS. L'étude de ces sables est difficile, car il s'agit de formations le plus souvent azoïques que l'on ne corelle à des dépôts types que par le faciès. On distingue (par ordre chronologique) :

- les sables du Thanétien (sables fins à moyens), localisés essentiellement à l'est du Pays de Caux et dans le Talou (avec cailloutis de silex verdis à la base) ;
- les sables de l'Yprésien (sables fins du Cuisien), situés principalement dans le Pays de Caux (excepté le Sud-Ouest) et dans le Talou ;
- les Sables du Thimerais (sables moyens à grossiers), d'âge éocène probable, localisés dans le Thimerais, le sud du Pays d'Ouche et le Faux-Perche ;
- les sables à faciès type Fontainebleau du Rupélien supérieur (sables fins), localisés essentiellement dans l'Eure et le nord de l'Eure et Loir ;
- les Sables de Lozère du Pliocène (sables souvent grossiers à rares passées de sables moyens à fins, pouvant être argileux), situés au sud du Pays de Caux, dans le sud-ouest du Vexin Normand, dans le Roumois, dans l'est et le nord des plaines du Neubourg et de St André ;
- les Sables de St Eustache du Pliocène (sables fins), avec une localisation identique à celle des Sables de Lozère.

Sur le terrain, la contamination des RS par les sables à faciès type Fontainebleau semble plus importante que pour les autres types de sables. Celle-ci reste toutefois limitée à la proximité des poches de sables. En effet, on observe généralement au contact des poches de sables un sable à silex qui passe progressivement, en s'éloignant de la poche, à un sable argileux à silex, puis à une argile sableuse à silex et enfin à une argile à silex. Un gisement important de sable à silex nécessite donc une poche de sable de très grande taille. Seul le site de St Jean du Theney présente cette caractéristique avec deux poches de sables couvrant plusieurs hectares. Ce cas de figure, bien qu'observé sur un site, est très difficile à mettre en évidence, et nous pensons d'après nos recherches que ceci reste a priori très ponctuel et par conséquent assez exceptionnel. En effet, la taille des poches de sables est le plus souvent décamétrique à métrique.

### **1.3. Granulométrie des RS de plateau**

Etant donné la méthode mise en oeuvre pour déterminer la granularité des RS (cf. I.2.1.), il était impossible de réaliser des analyses granulométriques sur l'ensemble des faciès rencontrés. C'est pourquoi, nous avons privilégié les faciès dominants de chaque site qui sont les seuls à représenter un intérêt pour une éventuelle exploitation des RS en tant que granulats.

Ainsi, seuls les faciès dominants argileux à argilo-limoneux ont été analysés. Nous n'avons pas tenu compte du premier mètre du RS contaminé par les limons et du liseré argileux au contact de la craie. Les faciès sableux à argilo-sableux localisés à proximité des poches de sable n'ont pas non plus été retenus.

Les granularités des RS de plateau sont relativement homogènes (tabl. 3) avec :

- des teneurs en cailloux comprises entre 39 et 54 %,
- des teneurs faibles en graviers, de 1 à 14 %,
- des teneurs en matrice (< 2 mm) comprises entre 38 et 57 %, dont les pourcentages en argiles, limons et sables oscillent respectivement entre 15 et 34 %, entre 9 et 31% et entre 2 et 13 %.

Dans le détail, on remarque quelques variations d'ordre géographique.

Les teneurs en cailloux se répartissent différemment entre le nord et le sud de la Seine (fig. 9). Les valeurs sont plus homogènes au nord qu'au sud, avec des pourcentages compris entre 42 et 47% pour le nord contre 39 et 54 % pour le sud de la Seine.

Les teneurs en matrice permettent de distinguer trois secteurs différents (fig. 10) :

- le Talou et l'est du Pays de Caux, avec des pourcentages élevés et homogènes entre 52 et 57 %,
- le Pays de Caux (à l'exception de l'est), avec des quantités homogènes comprises entre 44 et 49 %,
- le sud de la Seine, avec des teneurs hétérogènes comprises entre 38 et 55 %.

Les matrices ont une composition relativement homogène : elles sont argileuses à argilo-limoneuses. Toutefois, dans le détail, les trois secteurs géographiques mis en évidence précédemment se retrouvent (fig. 11) :

- le Talou et l'est du Pays de Caux, avec des matrices argilo-limoneuses à dominante limoneuse,
- le Pays de Caux (à l'exception de l'est) dont les matrices sont argilo-limoneuses à dominante argileuse,
- le sud de la Seine. Les matrices, bien que toujours argileuses à argilo-limoneuses, sont un peu plus hétérogènes que dans les deux secteurs précédents. Les matrices présentent des teneurs en argiles tantôt supérieures, tantôt très proches, de celles des limons. Les teneurs en sables restent faibles, mais sont plus hétérogènes que celles des deux autres secteurs, avec des valeurs oscillant entre 5 et 24 %.

Cependant, les granulométries figurées dans le tableau 3 ont été effectuées sur des échantillons de RS prélevés généralement entre 5 et 10 m de profondeur. Sur un site localisé dans le nord de l'Eure et Loir (A/C) une campagne de sondages et des granulométries réalisées (par une société privée productrice de granulats) sur des échantillons prélevés à différents niveaux ont révélé que **la teneur en silex (> 2 mm) augmente avec la profondeur** (fig. 12) :

- de 0 à 10 m, la quantité de silex varie entre 50 et 60 % ;
- de 10 à 15 m, la teneur en silex est comprise entre 60 et 70 % ;
- au delà de 15 m, le pourcentage de silex est de 70 à 80 % et peut atteindre jusqu'à 90 %.

Ceci a été mis en évidence systématiquement sur la totalité des sondages (6 sondages pour une surface de 500 000 m<sup>2</sup>). Des sondages à la pelle mécanique et des prélèvements d'échantillons dans deux fosses (de 10 m et 13 m de profondeur) ont permis de vérifier la fiabilité des granulométries accomplies sur les *cuttings* obtenus lors des forages. Compte tenu du volume prospecté et de la reproductibilité des mesures, il est vraisemblable que ceci soit extrapolable à la totalité des régions dont les épaisseurs de RS sont supérieures à 10 m. Ceci est d'ailleurs confirmé par de nombreux sondages localisés dans l'Eure et l'Eure et Loir, avec des descriptions indiquant des argiles à silex très charpentées (très riches en silex) au-delà de 10 à 15 m de profondeur. C. Klein (1970) avait également souligné ce fait, en disant qu'il

	cailloux	graviers	matrice		
			sables	limons	argiles
Neu	42	1	2	31	24
BSO 1	45	3	5	27	20
Yv	46	6	5	16	27
A29	44	7	5	17	27
Bc p1	45	10	5	17	23
San 1	47	9	8,5	20	15,5
Beu 2	54	8	8	11	19
MtS	46	8	7	15	24
Lie 2	42	3	3	18	34
CDE 1	50	8	3	22	17
CDE 2	51	5	8	18	18
By 2a	48	11	4	18	19
BY 2b	43	12	5	19	21
Mol p1	42	13	8	12	25
Vas p1a	48	12	7	13	20
Vas p1b	44	12	8	15	21
MtM p1a	43	14	7	10	26
MtM p1b	46	13	7	9	25
SJT 3	49	11	7	15	18
Ven 2	53	3	4	10	30
A/C 3	51	11	4	15	19
Cha	39	7	13	19	22
<b>moyenne</b>	<b>46,3</b>	<b>8,5</b>	<b>6,1</b>	<b>16,7</b>	<b>22,5</b>
<b>écartype</b>	<b>3,8</b>	<b>3,7</b>	<b>2,4</b>	<b>5,2</b>	<b>4,4</b>
<b>max</b>	<b>54</b>	<b>14</b>	<b>13</b>	<b>31</b>	<b>34</b>
<b>min</b>	<b>39</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>9</b>	<b>15,5</b>

Tableau 3 : Granulométries des RS de plateau (%massique).

Cailloux : > 20 mm, Graviers : 20 à 2 mm, Sables : 2 mm à 50 µm,

Limons : 50 à 2 µm, Argiles : < 2 µm.

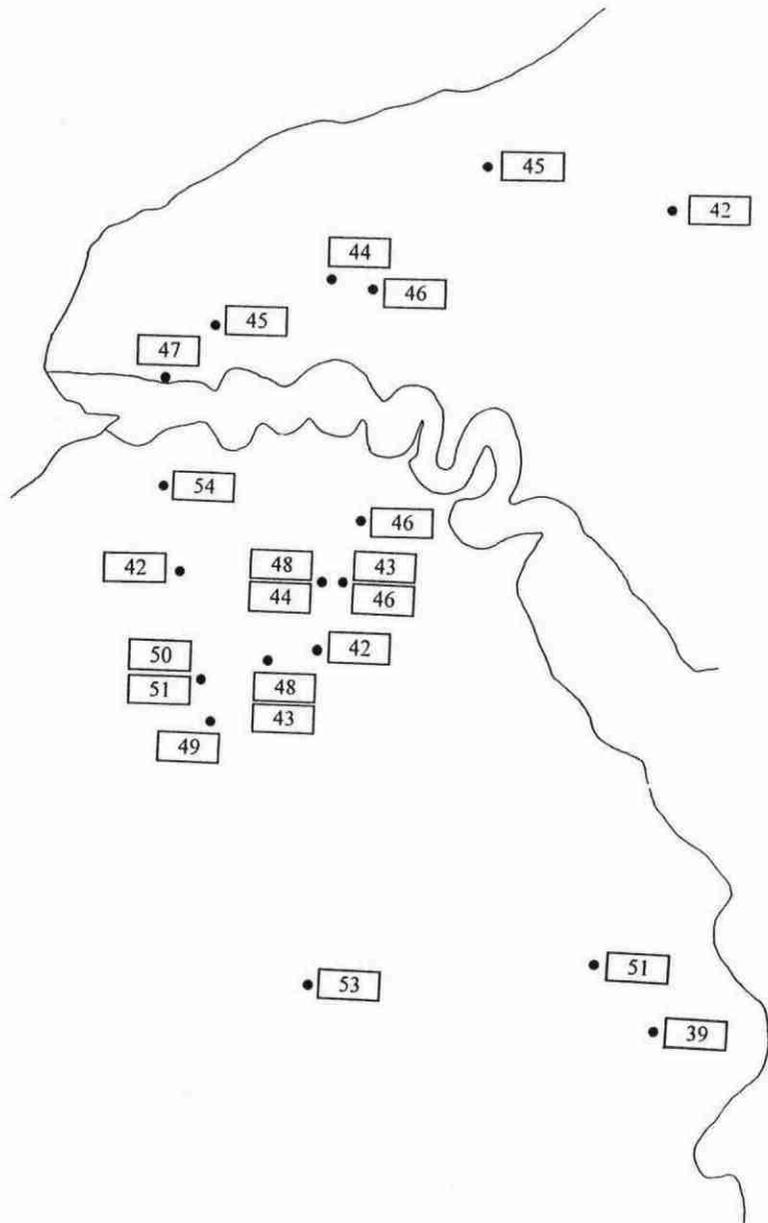


Figure 9 : Répartition géographique des teneurs en cailloux de silex (> 20 mm) des RS de plateau (en %m).

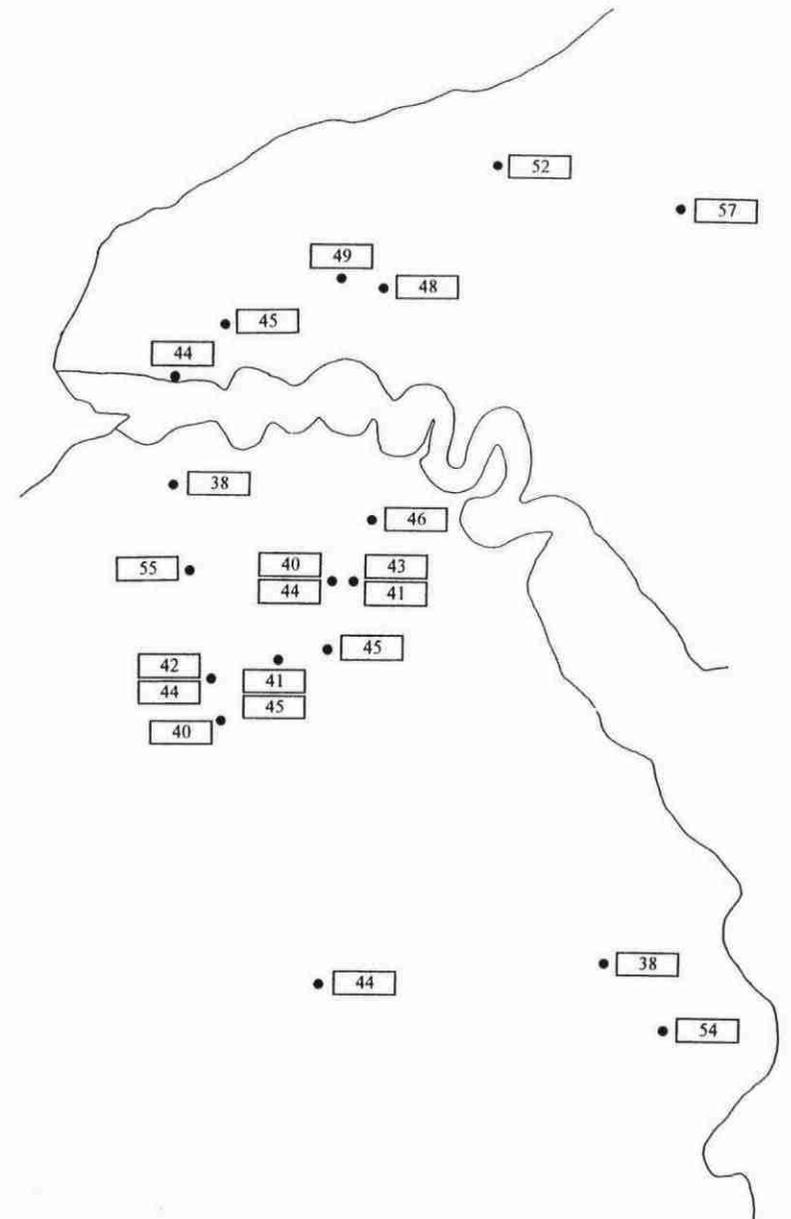
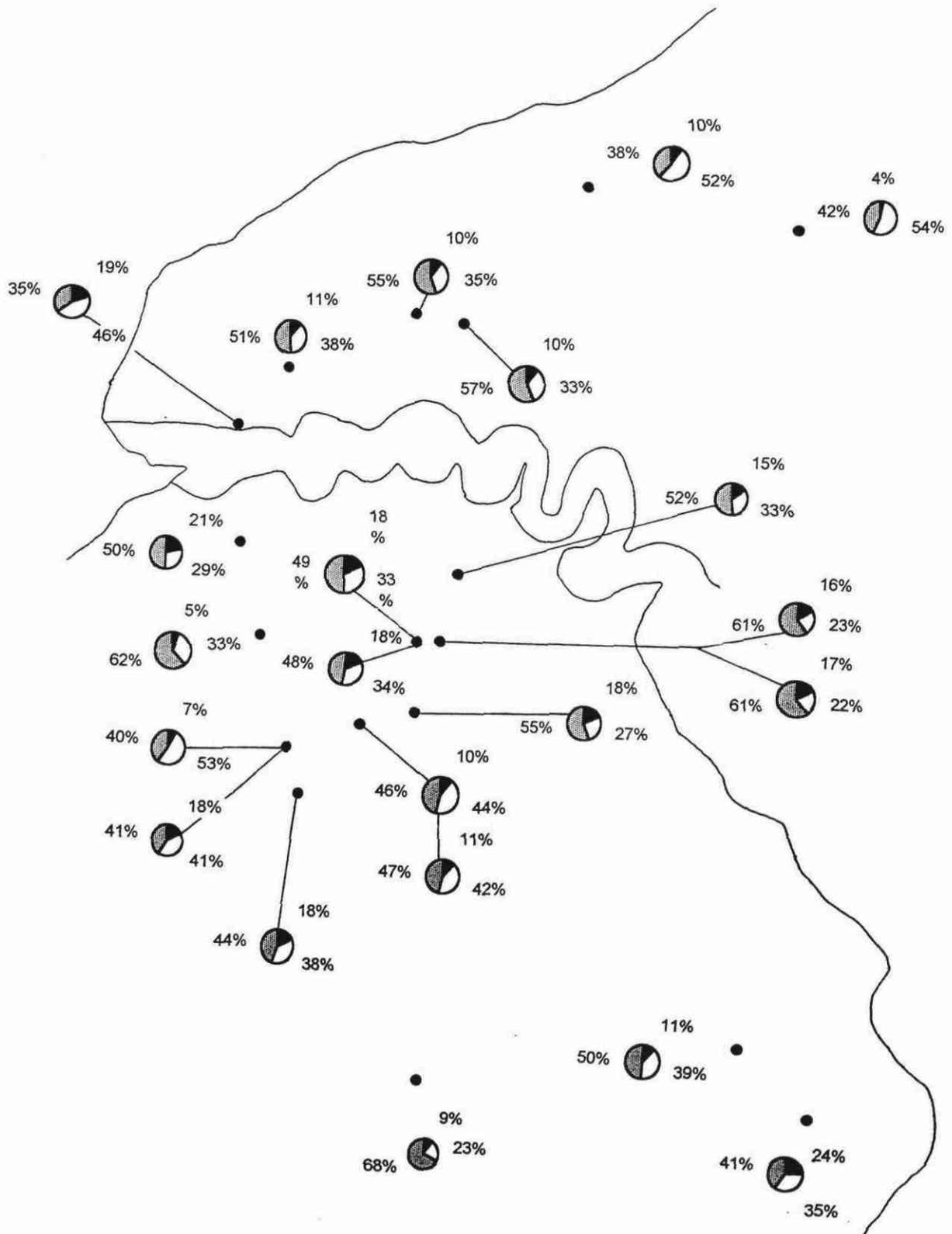
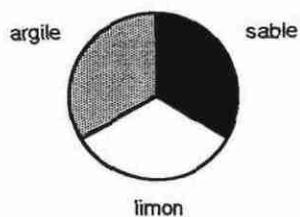


Figure 10 : Répartition géographique des teneurs en matrice (< 2 mm) des RS de plateau (en %m).



**Figure 11 : Répartition géographique des compositions granulométriques des matrices (< 2 mm) des RS de plateau (en %m).**



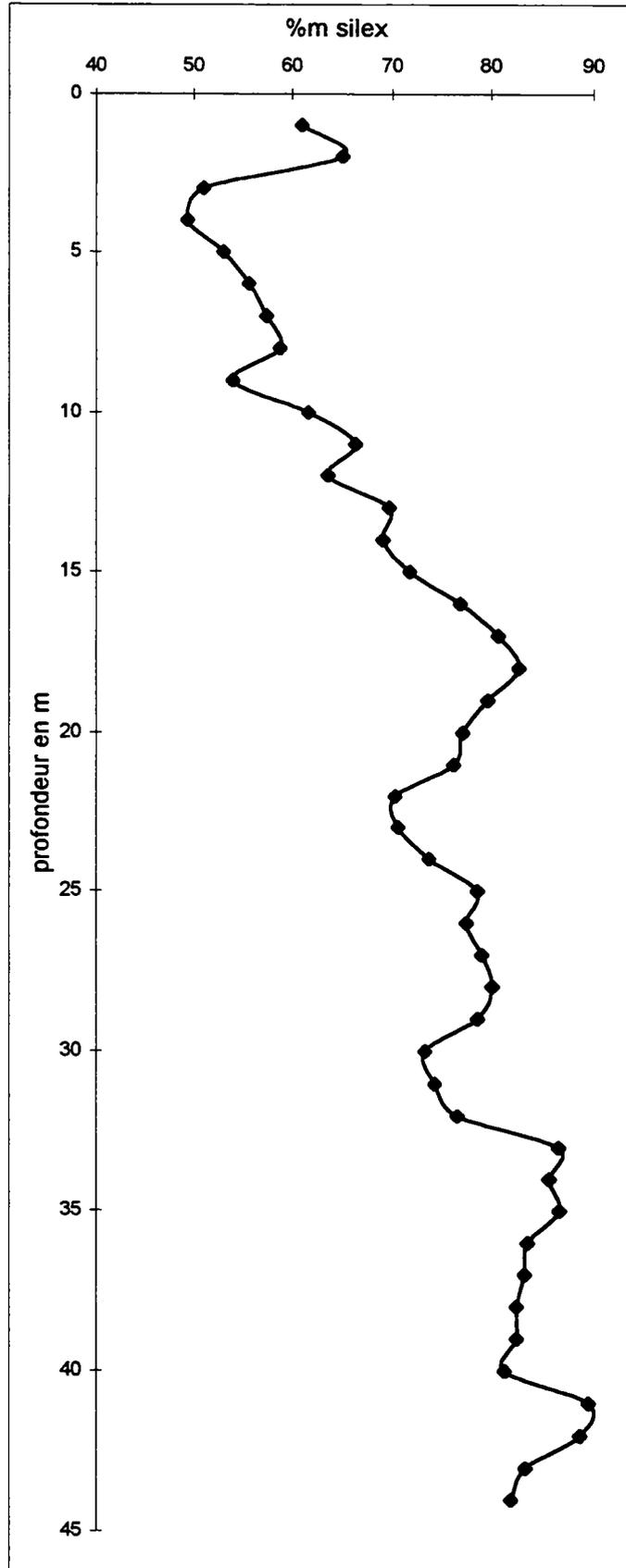


Figure 12 : Evolution des teneurs en silex des RS de plateau avec la profondeur (site A/C).

pensait pouvoir affirmer que "dans les parties moyennes et profondes de la nappe des argiles à silex de plateau, les silex représentent les deux tiers aux trois quarts du volume de la formation".

#### 1.4. *Caractérisation des matrices*

##### 1.4.1. **Minéralogie de la fraction argileuse des RS de plateau**

La minéralogie de la fraction inférieure à 2  $\mu\text{m}$  des RS a été abondamment étudiée. Les premiers travaux remontent à B. Brajnikov *et al.* (Brajnikov et Furon, 1934 ; Brajnikov et Urbain, 1934, 1936 ; Brajnikov, 1938). B. Brajnikov (1938) décrit un minéral spécifique à l'argile à silex, le minéral "E", qu'il détermine comme une beidellite/nontronite.

Au cours du colloque sur les argiles à silex du Bassin de Paris (1967), de nombreux travaux ont été consacrés à ce sujet. H. Elhai (1967) indique que la fraction inférieure à 2  $\mu\text{m}$  des argiles à silex de Haute-Normandie est composée essentiellement de kaolinite, d'illite et d'un peu de montmorillonite. C. Klein (1967) souligne que la kaolinite est mal ordonnée dans les argiles à silex normandes. Ceci est confirmé par P. Douillet *et al.* (1967), pour qui les principaux minéraux des argiles de ces formations sont la kaolinite avec un écart réticulaire 001 élevé (7,20 à 7,30 Å), la beidellite ferrifère, l'illite et de l'oxyde de fer de type goethite. De plus, ils signalent que la beidellite ferrifère n'est pas un minéral spécifique à l'argile à silex, puisqu'elle se trouve également dans des argiles brunes d'altération recueillies dans le travertin de Sézanne (au sud d'Épernay) et dans la marne de Villeau (au sud de Chartres). Enfin, C. Pomerol et J. Bauer (1967) distinguent les argiles à silex de Picardie et de Normandie de celles de Touraine, grâce à la minéralogie de leur fraction argileuse. Les argiles à silex de Picardie et de Normandie renferment de la kaolinite, de la montmorillonite et de l'illite, tandis que celles de Touraine contiennent presque exclusivement de la kaolinite.

Plus récemment, J. Lucas *et al.* (1974) et M. Thiry *et al.* (1977, 1978) indiquent la présence, dans les RS de l'est et du sud du Bassin de Paris, d'interstratifiés kaolinite/smectite accompagnant la kaolinite, la smectite et l'illite.

Les résultats de nos analyses minéralogiques sur la fraction inférieure à 2  $\mu\text{m}$  des RS de l'ouest du Bassin de Paris montrent une forte hétérogénéité (tabl. 4).

Les teneurs en kaolinite, smectite et interstratifiés kaolinite/smectite sont très variables, respectivement de 5 à 100%, de 0 à 95 % et de 0 à 90 %. L'écart réticulaire de la kaolinite est élevé, de 7,18 à 7,25 Å, confirmant les travaux de P. Douillet *et al.* (1967). Les quantités d'illite sont faibles, toujours inférieures ou égales à 15 %.

Parmi les autres minéraux présents dans la fraction inférieure à 2  $\mu\text{m}$ , on trouve en faible quantité et de manière assez rare des interstratifiés illite/smectite à feuillet chloritiques, de la pyrophyllite et de la lépidocrocite. Le quartz est présent dans pratiquement tous les échantillons. Quant à la goethite, on la trouve fréquemment, puisque 24 échantillons sur les 39 étudiés en contiennent.

Cette hétérogénéité est due :

- à une variation verticale de la minéralogie entre le sommet des RS contaminé par les limons (un à deux premiers mètres), les RS proprement dit à faciès argileux à argilo-limoneux et le liseré argileux brun foncé à la base au contact des craies ;
- aux contaminations des RS se trouvant à proximité des poches de sables cénozoïques ;

échantillons	faciès	Kaolinite	illite	Smectite	Int (7-14sm)	Int (10-14sm)ch	Pyrophyllite	Quartz	Goethite	Lépidocrocite
BLA 1	argilo-limoneux	30	10	0	60	0	0	Q	G	0
BLA 2	liseré argileux (base profil)	5	5	90	0	0	0	0	0	0
NEU	argilo-limoneux	10	tr	0	90	0	0	0	G	0
BSO 1	argilo-limoneux	5	5	90	0	0	0	Q	0	0
BSO 2	liseré argileux (base profil)	5	tr	95	0	0	0	Q	0	0
Yv	argileux à argilo-limoneux	65	10	0	25	0	0	Q	G	0
A29	argileux à argilo-limoneux	65	5	tr	30	0	tr	Q	G	0
Bc p1	argileux à argilo-limoneux	55	10	0	35	0	0	Q	G	L
San 1	argileux à argilo-limoneux	60	tr	tr	40	0	0	Q	G	0
San 2	sableux	70	15	0	10	0	5	Q	G	0
Oct	argileux à argilo-limoneux	65	10	0	25	0	0	Q	G	0
Beu 1	argileux	55	15	0	30	0	0	Q	G	0
Beu 2	argileux	90	tr	tr	10	0	0	Q	G	0
MtS	argileux à argilo-limoneux	55	10	0	35	0	0	Q	G	0
Lie 1	limoneux à limono-argileux	20	tr	0	80	0	0	Q	G	0
Lie 2	argileux	95	0	5	0	0	0	Q	G	0
Lie 3	liseré argileux (base profil)	15	tr	10	75	0	0	Q	G	0
CDE1	argilo-limoneux	30	10	60	0	0	0	Q	G	0
CDE2	argilo-limoneux	55	5	40	0	0	0	Q	G	0
CDE3	liseré argileux (base profil)	15	5	80	0	0	0	Q	G	0
SJT 1	sableux	65	10	0	25	0	0	Q	G	0
SJT 2	sablo-argileux	100	tr	0	0	0	0	Q	0	0
By 1	limoneux à limono-argileux	65	10	0	25	0	0	Q	0	0
By 2	argileux à argilo-limoneux	90	0	0	10	0	0	Q	0	0
Vas p1	argileux à argilo-limoneux	45	10	0	45	0	0	Q	G	0
Vas p3	sableux	85	5	0	10	0	0	Q	0	0
Vas p2	sablo-argileux	80	10	0	5	0	5	Q	0	0
MtM p1	argileux	45	15	0	40	0	0	Q	0	0
AUB 1	argileux	100	0	<tr	0	0	0	Q	G	0
AUB 2	argileux	100	0	<tr	0	0	0	0	G	0
Ven 1	argileux (base profil)	95	5	0	0	tr	0	Q	0	0
Ven 2	argileux (milieu profil)	100	tr	0	0	tr	0	Q	0	0
Ven 3	argileux (sommet profil)	100	tr	0	0	tr	0	Q	0	0
Ven 4	limoneux à limono-argileux	95	tr	0	0	5	0	Q	0	0
A/C 1	limoneux à limono-argileux	35	10	0	55	0	0	Q	G	0
A/C 2	argileux à argilo-limoneux	95	5	0	0	0	tr	Q	G	0
A/C 3	argileux à argilo-limoneux	100	0	0	0	0	0	0	0	0
A/C 4	liseré argileux (base profil)	20	tr	80	0	0	0	Q	0	0
Cha	argileux à argilo-limono-sableux	100	<tr	<tr	0	0	0	Q	G	0
moyenne		61,0	5,3	14,3	19,5	0,2	0,3	/	/	/
écartype		32,4	4,8	30,1	25,0	0,8	1,1	/	/	/
max		100	15	95	90	5	5	Q	G	L
min		5	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 4 : Minéralogie de la fraction argileuse des RS de plateau (en %).

tr : traces, Q : Quartz présent.

Int (7-14sm) : interstratifiés kaolinite/smectite,

Int (10-14sm)ch : interstratifiés illite/smectite à feuillets chloritiques,

Int (14ch-14v) : interstratifiés chlorite/vermiculite.

- à une variabilité régionale au sein des faciès dominants argileux à argilo-limoneux des RS.

Afin de bien individualiser des familles au sein des RS, nous avons choisi de regrouper les minéraux gonflants (smectite et interstratifiés kaolinite/smectite essentiellement), d'autant plus que la présence ou non de ces minéraux est fondamentale pour le traitement de ces matériaux dans le cadre d'une éventuelle exploitation, comme nous le verrons par la suite.

Tout d'abord, au sein des faciès dominants argileux à argilo-limoneux, quatre grandes familles de RS apparaissent (fig. 13) :

- l'est du Pays de Caux et le Talou, riches en minéraux gonflants (60 à 90 %) et pauvres en kaolinite (5 à 30 %) ;
- l'ensemble du Pays de Caux (à l'exception de l'Est), avec la kaolinite dominante, 55 à 65 % contre 25 à 40 % pour les minéraux gonflants ;
- l'Eure, avec une minéralogie hétérogène, composée de 30 à 95 % de kaolinite et de 5 à 60 % de minéraux gonflants. La kaolinite y est généralement dominante ;
- le Perche et le nord de l'Eure et Loir, très riche en kaolinite (95 à 100%) et pauvre en minéraux gonflants (0 à 5%).

Verticalement (tabl. 5), quel que soit le secteur considéré, on observe une différenciation depuis la base vers le haut des profils. A la base des profils, au niveau du liseré argileux brun foncé, la fraction argileuse est riche en minéraux gonflants (80 à 95 %) et pauvre en kaolinite (5 à 20 %). Seule la base du RS de la Ventrouze ne montre pas cette composition, mais ce RS qui repose sur les Sables du Perche ne montre pas de liseré argileux brun foncé, contrairement aux autres RS dont le substratum est crayeux. Au sommet des coupes, la minéralogie de la fraction argileuse du RS limoneux est hétérogène, avec 20 à 95 % de kaolinite et 0 à 80 % de minéraux gonflants.

La différenciation verticale des profils de RS depuis le bas vers le haut se réalise en deux étapes. On observe d'abord une augmentation du rapport kaolinite/minéraux gonflants (smectite et interstratifiés kaolinite/smectite) depuis les liserés argileux bruns foncés de base vers les faciès dominants argileux à argilo-limoneux, comme l'ont démontrés M. Thiry *et al.* (1977). Au sommet des profils, on remarque une inversion de cette tendance : le rapport kaolinite/minéraux gonflants diminue depuis les faciès dominants vers les faciès sommitaux limoneux.

En ce qui concerne les RS à faciès sableux, nous disposons seulement d'un échantillon de RS contaminé par les sables de Lozère (San 2) et de quatre échantillons de RS contaminés par les sables de type Fontainebleau (tabl. 6).

échantillons	types de sables	Kaolinite	llite	Smectite	Int (7-14sm)	Pyrophyllite	Quartz	Goethite
San 2	Lozère	70	15	0	10	5	Q	G
SJT 1	Fontainebleau	65	10	0	25	0	Q	G
SJT 2	Fontainebleau	100	tr	0	0	0	Q	0
Vas p3	Fontainebleau	85	5	0	10	0	Q	0
Vas p2	Fontainebleau	80	10	0	5	5	Q	0

Tableau 6 : Minéralogie de la fraction argileuse de 5 échantillons de RS sableux de plateau (en %).

tr : traces, Q : Quartz présent.

Int (7-14sm) : interstratifiés kaolinite/smectite.

La minéralogie de la fraction argileuse de ces RS apparaît homogène avec des teneurs élevées en kaolinite (65 à 100 %) et faibles en minéraux gonflants (0 à 25 %).

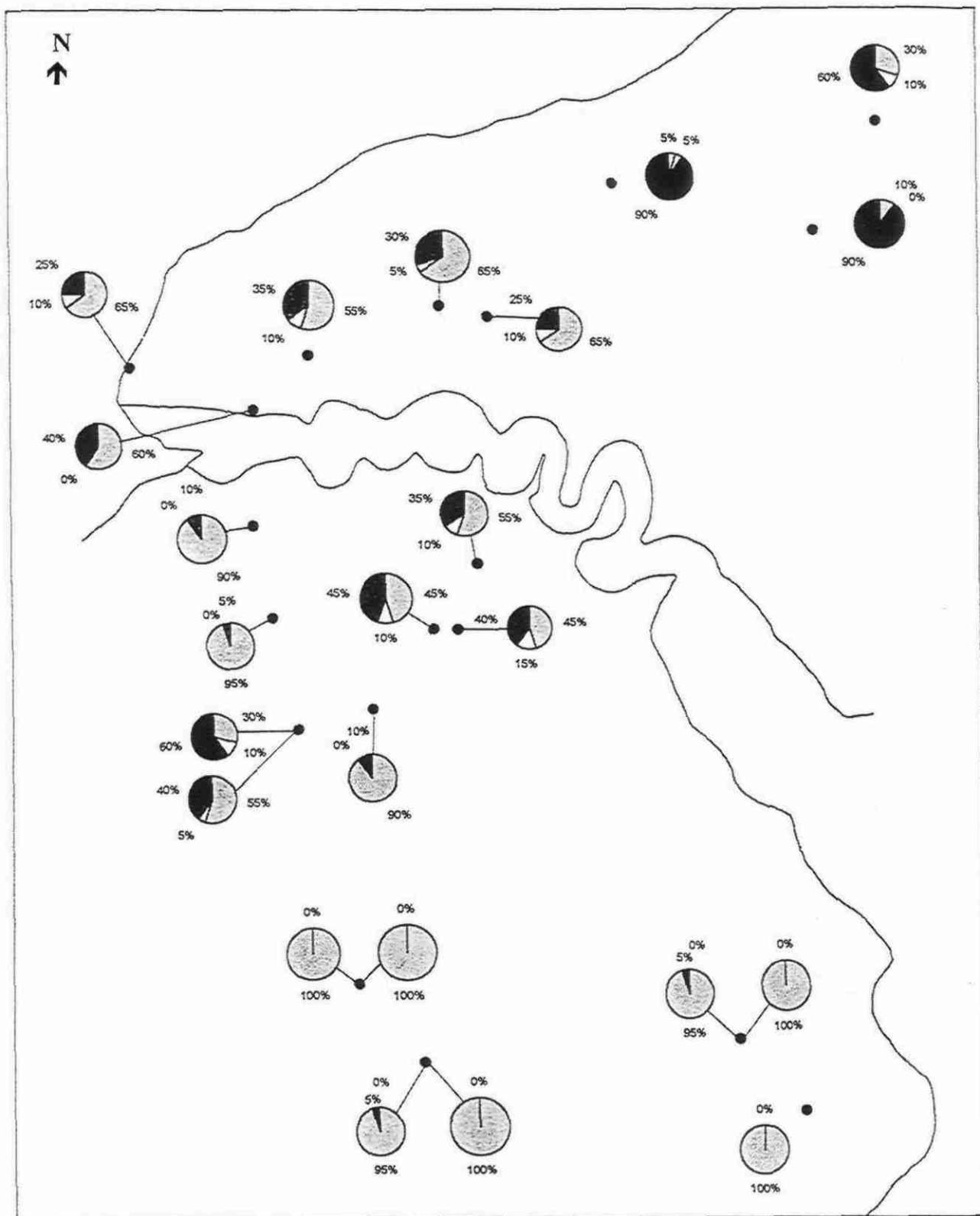


Figure 13 : Répartition géographique de la minéralogie de la fraction argileuse (<math>< 2 \mu\text{m}</math>) des RS de plateau (en %).

Sm + Int (7-14Sm) : smectite + interstratifiés kaolinite/smectite.



Affleurements	échantillons	Kaolinite	Illite	Sm + Int (7-14Sm)
<b>Blangy/Bresle</b>				
faciès argilo-limoneux	Bla 1	30	10	60
liseré argileux brun	Bla 2	5	5	90
<b>Bertreville St Ouen</b>				
faciès argilo-limoneux	BSO 1	5	5	90
liseré argileux brun	BSO 2	5	tr	95
<b>Lièvrerie</b>				
faciès limoneux	Lie 1	20	tr	80
faciès argileux	Lie 2	95	0	5
liseré argileux brun	Lie 3	15	tr	85
<b>Courtonne les D. E.</b>				
faciès argilo-limoneux	CDE 1	30	10	60
	CDE 2	55	5	40
liseré argileux brun	CDE 3	15	5	80
<b>Bernay</b>				
faciès limoneux	By 1	65	10	25
faciès argilo-limoneux	By 2	90	0	10
<b>La Ventrouze</b>				
faciès limoneux	Ven 4	95	tr	0
	Ven 3	100	tr	0
faciès argileux	Ven 2	100	tr	0
base RS	Ven 1	95	5	0
<b>A/C</b>				
faciès limoneux	A/C 1	35	10	55
	A/C 2	95	5	0
faciès argileux à argilo-limoneux	A/C 3	100	0	0
liseré argileux brun	A/C 4	20	tr	80

Tableau 5 : Evolution verticale de la minéralogie de la fraction argileuse des RS de plateau (en %).  
Sm + Int (7-14Sm) : smectite + interstratifiés kaolinite/smectite, tr : traces.

### 1.4.2. Chimie des matrices des RS de plateau

Les matrices (fraction inférieure à 2 mm) des RS de plateau présentent des compositions chimiques variables, dans lesquelles SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont les 3 éléments majeurs dominants (tabl. 7).

Les matrices des RS sont riches en SiO<sub>2</sub>, avec des valeurs strictement supérieures à 44 %. Les teneurs en SiO<sub>2</sub> sont néanmoins variables, puisqu'elles oscillent entre 44,8 et 86,5 %.

Les teneurs en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont également variables, de 4,35 à 37,6 % pour Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et de 0,95 à 11,3 % pour Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

MgO, CaO et K<sub>2</sub>O sont présents en faible quantité, toujours inférieure à 2 %. Les teneurs en Na<sub>2</sub>O sont très faibles de 0 à 0,51 %.

TiO<sub>2</sub> est présent en faible proportion dans tous les échantillons (moyenne de 0,64 %), à l'exception d'un seul où il est absent.

On trouve MnO en très faible proportion dans pratiquement tous les échantillons (moyenne de 0,07 %).

Cette variabilité de la composition chimique des matrices des RS est liée, tout comme la minéralogie de la fraction argileuse :

- à une variabilité régionale des faciès dominants argileux à argilo-limoneux,
- à une variation verticale au sein des profils de RS,
- aux faciès sableux des RS.

Les compositions chimiques des matrices des faciès argileux à argilo-limoneux permettent de retrouver les quatre familles mises en évidence par la minéralogie de la fraction argileuse (fig. 14) :

- l'est du Pays de Caux et le Talou. C'est dans ce secteur, ainsi que dans l'Eure, que l'on trouve les teneurs en SiO<sub>2</sub> les plus élevées, de 74 à 78 %. Les quantités de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont faibles et homogènes, respectivement de 7 à 11 % et de 4 à 5 %. Enfin, les pourcentages de TiO<sub>2</sub> sont les plus élevés de l'ouest du Bassin de Paris, avec le Perche et le nord de l'Eure et Loir (0,8 à 1 %) ;
- le Pays de Caux (à l'exception de l'est), présente les teneurs les plus faibles en SiO<sub>2</sub> (46 à 60 %), les plus élevées en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (6 à 10 %), en MgO, CaO, K<sub>2</sub>O et Na<sub>2</sub>O et les plus faibles en TiO<sub>2</sub> (voisin de 0,6 %). Les quantités de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont, quant à elles, relativement fortes (19 à 25 %) ;
- l'Eure (à l'exception du site les Monts Sud (MtS) qui se rattache géochimiquement au Pays de Caux) a les teneurs les plus élevées en SiO<sub>2</sub> (70 à 85 %), les plus faibles en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (6 à 15 %) et en MnO ( $\leq 0,02$  %). Les pourcentages de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont faibles et assez hétérogènes (2 à 7 %) ;
- le Perche et le nord de l'Eure et Loir. Ces deux régions sont géochimiquement semblables, avec les teneurs les plus faibles en SiO<sub>2</sub> (45 à 60 %), les plus élevées en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (25 à 38 %), les plus faibles en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $\leq 3$  %), en MgO, CaO, K<sub>2</sub>O et Na<sub>2</sub>O. Enfin, les pourcentages en TiO<sub>2</sub> et MnO sont hétérogènes. C'est dans ces deux régions que l'on trouve les valeurs les plus fortes et les plus basses pour ces deux derniers éléments.

Verticalement (tabl. 8), on observe une différenciation depuis la base vers le haut des profils.

A la base des profils, les liserés argileux bruns présentent des compositions chimiques homogènes (tabl. 8). Par rapport aux données chimiques de l'ensemble des faciès des RS (tabl. 7), les teneurs en SiO<sub>2</sub> sont faibles (46 à 52 %) et celles en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont relativement élevées

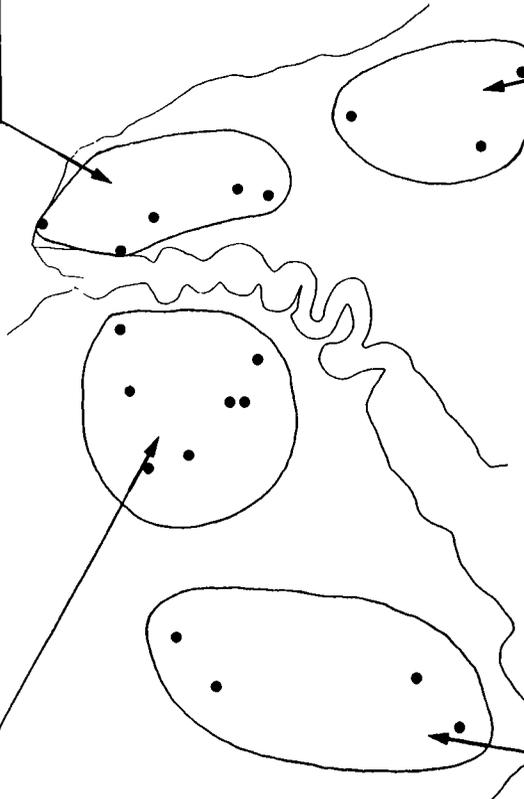
Echantillons	faciès	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P. F.
Bla 1	argilo-limoneux	78,22	7,83	4,39	0,44	0,5	0,88	0,06	0,98	0,21	6,02
Bla 2	liseré argileux (base profil)	50,81	21,01	7,79	0,97	1,32	0,89	0,08	0,72	0,379	14,3
Neu	argilo-limoneux	74,16	10,82	5,35	0,22	0,25	0,84	0,03	1,01	0,12	6,41
BSO 1	argilo-limoneux	78,1	7,22	4,22	0,54	0,43	0,77	0,05	0,81	0,04	7,01
BSO 2	liseré argileux (base profil)	52,04	18,85	9,15	1,14	0,93	0,82	0,05	0,89	0,7	13,83
Yv	argileux à argilo-limoneux	54,65	21,38	7,55	0,5	0,64	0,85	0,1	0,54	0,028	13,43
A29	argileux à argilo-limoneux	54,15	20,83	8,56	0,6	0,59	0,8	0,1	0,65	0,031	13,36
Bc p1	argileux à argilo-limoneux	59,73	19,38	6,17	0,62	0,66	0,87	0,11	0,58	0,0185	11,3
SAN 1	argileux à argilo-limoneux	46,34	24,59	10,08	0,63	0,94	0,94	0,09	0,68	0,045	14,73
SAN 2	sableux	84,9	6,65	2,08	0,2	0,17	0,29	0,03	0,24	0,006	4,28
Oct	argileux à argilo-limoneux	50,25	22,71	9,32	0,62	0,77	0,87	0,10	0,67	0,038	14,14
BEU 1	argileux	74,77	10,65	3,96	0,37	0,45	0,48	0,06	0,72	0,017	7,3
BEU 2	argileux	82,9	7,35	1,91	0,25	0,37	0,32	0,04	1,06	0,008	5,17
MtS	argileux à argilo-limoneux	59,01	18,17	6,75	0,58	0,81	0,9	0,12	0,73	0,022	12,15
LIE 1	limoneux à limono-argileux	49,96	21,03	8,55	0,72	0,8	0,98	0,08	0,72	0,007	15,39
LIE 2	argileux	70,22	12,18	6,32	0,31	0,35	0,33	0,05	0,61	0,008	8,55
LIE 3	liseré argileux (base profil)	49,08	21,57	8,64	1,12	0,83	1,47	0,1	0,73	0,175	15,04
CDE 1	argilo-limoneux	63,50	16,44	8,32	0,94	0,96	0,98	0,03	0,73	0,04	8,04
CDE 2	argilo-limoneux	71,1	14,6	5,7	0,5	0,5	0,8	0	0,52	0,02	6,21
CDE 3	liseré argileux (base profil)	49,57	23,17	6,42	0,8	1,7	0,96	0,11	0,55	0,058	14,77
SJT 1	sableux	86,49	4,35	2,57	0,13	0,04	0,27	0,09	0,27	0	4,17
SJT 2	sablo-argileux	86,22	6,46	0,95	0,1	0,12	0,18	0,04	0,42	0	4,64
BY 1	limoneux à limono-argileux	67,6	13,99	6,29	0,41	0,45	0,68	0,08	0,91	0,006	9,07
BY 2	argileux à argilo-limoneux	81,94	8,66	2,01	0,21	0,21	0,3	0,09	1,02	0,007	5,43
VAS p1	argileux à argilo-limoneux	74,85	9,86	4,53	0,37	0,43	0,52	0,07	0,41	0,007	7,21
VAS p2	sablo-argileux	84,52	7,2	2,18	0,15	0,09	0,23	0,02	0,31	0,008	4,37
VAS p3	sableux	85,72	6,68	1,68	0,14	0,12	0,2	0,02	0,26	0,007	4,14
MTM p1	argileux	85,34	5,74	2,3	0,24	0,16	0,47	0,06	0,7	0,015	4,07
Aub 2	argileux	52	37,6	3	0,1	0,4	0,5	0	0,42	0,01	5,46
Ven 1	argileux (base profil)	53,6	31,9	1,1	0	0	0,4	0	0,3	0	12,7
Ven 2	argileux (milieu profil)	53,59	30,36	1,84	0	0,1	0,51	0	0	0,41	13,19
Ven 3	argileux (sommet profil)	51,5	32,23	1,18	0	0,36	0,31	0	1,53	0	12,89
Ven 4	limoneux à limono-argileux	45,23	31,67	6,74	0,61	0	0,72	0,51	0,82	0	13,69
A/C 1	limoneux à limono-argileux	66,01	11,23	7,75	0,53	0,69	0,75	0,09	0,61	0,007	10,86
A/C 2	argileux à argilo-limoneux	55,33	19,08	11,28	0,15	0,45	0,25	0,06	0,57	0,008	10,93
A/C 3	argileux à argilo-limoneux	44,76	37,56	1,09	0,08	0,14	0,07	0,07	0,08	0	16
A/C 4	liseré argileux (base profil)	45,58	22,94	8,34	1,36	0,98	1,67	0,13	0,59	0,316	16,77
Cha	argileux à argilo-limono-sableux	60,1	25,8	2,75	0,1	0,3	0,31	0,1	1,15	0,01	9,38
moyenne		64,05	17,62	5,23	0,44	0,50	0,64	0,07	0,64	0,07	9,91
écartype		14,19	9,28	2,98	0,34	0,38	0,35	0,08	0,30	0,15	4,10
max		86,49	37,6	11,28	1,36	1,7	1,67	0,51	1,53	0,7	16,77
min		44,76	4,35	0,95	0	0	0,07	0	0	0	4,07

Tableau 7 : Chimie des matrices (fraction inférieure à 2 mm) des RS de plateau (en %m).

P. F. : Perte au feu.

Pays de Caux (excepté l'Est)	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	CaO	K2O	Na2O	TiO2	MnO
Yv	54,65	21,38	7,55	0,5	0,64	0,85	0,1	0,54	0,028
A29	54,15	20,83	8,56	0,6	0,59	0,8	0,1	0,65	0,031
Bc p1	59,73	19,38	6,17	0,62	0,66	0,87	0,11	0,58	0,019
SAN 1	46,34	24,59	10,08	0,63	0,94	0,94	0,09	0,68	0,045
Oct	50,25	22,71	9,32	0,62	0,77	0,87	0,10	0,67	0,038

Talou, est Pays de Caux	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	CaO	K2O	Na2O	TiO2	MnO
Bla 1	78,22	7,83	4,39	0,44	0,5	0,88	0,06	0,98	0,21
Neu	74,16	10,82	5,35	0,22	0,25	0,84	0,03	1,01	0,12
BSO 1	78,1	7,22	4,22	0,54	0,43	0,77	0,05	0,81	0,04



Eure	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	CaO	K2O	Na2O	TiO2	MnO
BEU 1	74,77	10,65	3,96	0,37	0,45	0,48	0,06	0,72	0,017
BEU 2	82,9	7,35	1,91	0,25	0,37	0,32	0,04	1,06	0,008
Mts	59,01	18,17	6,75	0,58	0,81	0,9	0,12	0,73	0,022
LIE 2	70,22	12,18	6,32	0,31	0,35	0,33	0,05	0,61	0,008
CDE 2	71,1	14,6	5,7	0,5	0,5	0,8	0	0,52	0,02
BY 2	81,94	8,66	2,01	0,21	0,21	0,3	0,09	1,02	0,007
VAS p1	74,85	9,86	4,53	0,37	0,43	0,52	0,07	0,41	0,007
MTM p1	85,34	5,74	2,3	0,24	0,16	0,47	0,06	0,7	0,015

Perche, Nord Eure et Loir	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	CaO	K2O	Na2O	TiO2	MnO
Aub 2	52	37,6	3	0,1	0,4	0,5	0	0,42	0,01
Ven 1	53,6	31,9	1,1	0	0	0,4	0	0,3	0
Ven 2	53,59	30,36	1,84	0	0,1	0,51	0	0	0,41
Ven 3	51,5	32,23	1,18	0	0,36	0,31	0	1,53	0
A/C 3	44,76	37,56	1,09	0,08	0,14	0,07	0,07	0,08	0
Cha	60,1	25,8	2,75	0,1	0,3	0,31	0,1	1,15	0,01

Figure 14 : Mise en évidence de quatre familles géographiques de RS en fonction de la composition chimique de leur matrice (< 2 mm).

Affleurements	échantillons	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO
<b>Blangy/Bresle</b>										
faciès argilo-limoneux	Bla 1	78,22	7,83	4,39	0,44	0,5	0,88	0,06	0,98	0,21
liseré argileux brun	Bla 2	50,81	21,01	7,79	0,97	1,32	0,89	0,08	0,72	0,379
<b>Bertreville St Ouen</b>										
faciès argilo-limoneux	BSO 1	78,1	7,22	4,22	0,54	0,43	0,77	0,05	0,81	0,04
liseré argileux brun	BSO 2	52,04	18,85	9,15	1,14	0,93	0,82	0,05	0,89	0,7
<b>Lièvrerie</b>										
faciès limoneux	Lie 1	49,96	21,03	8,55	0,72	0,8	0,98	0,08	0,72	0,007
faciès argileux	Lie 2	70,22	12,18	6,32	0,31	0,35	0,33	0,05	0,61	0,008
liseré argileux brun	Lie 3	49,08	21,57	8,64	1,12	0,83	1,47	0,1	0,73	0,175
<b>Courtonne les D. E.</b>										
faciès argilo-limoneux	CDE 1	63,50	16,44	8,32	0,94	0,96	0,98	0,03	0,73	0,04
	CDE 2	71,1	14,6	5,7	0,5	0,5	0,8	0	0,52	0,02
liseré argileux brun	CDE 3	49,57	23,17	6,42	0,8	1,7	0,96	0,11	0,55	0,058
<b>Bernay</b>										
faciès limoneux	By 1	67,6	13,99	6,29	0,41	0,45	0,68	0,08	0,91	0,006
faciès argilo-limoneux	By 2	81,94	8,66	2,01	0,21	0,21	0,3	0,09	1,02	0,007
<b>La Ventrouze</b>										
faciès limoneux	Ven 4	45,23	31,67	6,74	0,61	0	0,72	0,51	0,82	0
	Ven 3	51,5	32,23	1,18	0	0,36	0,31	0	1,53	0
faciès argileux	Ven 2	53,59	30,36	1,84	0	0,1	0,51	0	0	0,41
base RS	Ven 1	53,6	31,9	1,1	0	0	0,4	0	0,3	0
<b>A/C</b>										
faciès limoneux	A/C 1	66,01	11,23	7,75	0,53	0,69	0,75	0,09	0,61	0,007
	A/C 2	55,33	19,08	11,28	0,15	0,45	0,25	0,06	0,57	0,008
faciès argileux à argilo-limoneux	A/C 3	44,76	37,56	1,09	0,08	0,14	0,07	0,07	0,08	0
liseré argileux brun	A/C 4	45,58	22,94	8,34	1,36	0,98	1,67	0,13	0,59	0,316

Tableau 8 : Evolution verticale de la chimie des matrices (&lt; 2 mm) des RS de plateau (en %m).

(19 à 23 %). Ce sont les faciès qui présentent les proportions les plus élevées de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (6 à 9 %), de MgO+CaO+K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O et de MnO.

En ce qui concerne les faciès sommitaux des RS, leur composition chimique est relativement hétérogène (tabl. 8), notamment au niveau de SiO<sub>2</sub> et de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (respectivement de 45 à 68 % et de 11 à 32 %). Seules les teneurs en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et MnO sont assez homogènes. Les pourcentages de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont élevés (6 à 9 %) et ceux de MnO sont par contre très faibles (0 à 0,007 %).

A la base des coupes, depuis les liserés argileux brun foncé vers les faciès dominants argileux à argilo-limoneux, on a une augmentation en SiO<sub>2</sub> et une diminution en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO+CaO+K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O et MnO. Toutefois, la diminution en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ne s'observe pas lorsque le RS est très riche en alumine comme dans le nord de l'Eure et Loir. Au sommet, depuis les faciès dominants vers les faciès limoneux, on constate le phénomène inverse pour SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et MgO+CaO+K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O, tandis que pour Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> et MnO l'évolution est variable d'un site à un autre.

Enfin, les RS sableux ont des compositions homogènes (tabl. 9).

Echantillons	types de sables	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P. F.
SAN 2	Lozère	84,9	6,65	2,08	0,2	0,17	0,29	0,03	0,24	0,006	4,28
SJT 1	Fontainebleau	86,49	4,35	2,57	0,13	0,04	0,27	0,09	0,27	0	4,17
SJT 1	Fontainebleau	86,49	4,35	2,57	0,13	0,04	0,27	0,09	0,27	0	4,17
VAS p2	Fontainebleau	84,52	7,2	2,18	0,15	0,09	0,23	0,02	0,31	0,008	4,37
VAS p3	Fontainebleau	85,72	6,68	1,68	0,14	0,12	0,2	0,02	0,26	0,007	4,14

Tableau 9 : Chimie des matrices (< 2 mm) de 5 échantillons de RS sableux de plateau (en %m).  
P. F. : Perte au feu.

Ils sont logiquement les faciès les plus riches en SiO<sub>2</sub> (84,5 à 86,5 %), mais également les plus pauvres en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (4,35 à 7,2 %) et MnO (moins de 0,009 %). Les teneurs en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, en MgO+CaO+K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O et en TiO<sub>2</sub> sont faibles.

### 1.5. Caractérisation des silex des RS de plateau

Pour L. Cayeux (1929), le terme de silex désigne les accidents siliceux de la craie du Bassin de Paris. Il décrit deux types extrêmes de silex :

- "des rognons de formes variées, extrêmement durs, compacts et fins, en général de couleur brunâtre, vitreux et bien individualisés au sein de la craie. Ils passent à la craie par une zone blanchâtre, d'aspect terne, la patine ;
- des rognons d'aspect terreux, poreux, très légers. Le contact avec la craie n'est pas net".

Entre ces deux types extrêmes, on peut trouver tous les silex intermédiaires.

Ce sont les silex de la craie qui se retrouvent dans les RS. D'après G. Vilas Boas (1975), les silex des RS sont cassés, corrodés et souvent entourés d'un cortex blanchâtre, terreux et ferrugineux. Leurs angles et leurs surfaces de cassure sont en général nets.

### 1.5.1. Observations macroscopiques des silex des RS de plateau

Parmi les huit caractéristiques macroscopiques des silex étudiés dans les faciès dominants argileux à argilo-limoneux, quatre d'entre elles permettent de différencier cinq familles géographiques de RS. Il s'agit de la teinte, de la forme, de la fragmentation et de l'oxydation des silex.

La teinte des silex permet de distinguer cinq familles géographiques de RS (fig. 15) :

- l'est du Pays de Caux et le Talou, avec des silex uniquement gris et noirs ;
- le Pays de Caux (à l'exception de l'est). Les silex sont essentiellement gris, mais il est possible de rencontrer quelques silex bruns ;
- l'Eure (à l'exception d'un site, les Monts Sud, se rattachant davantage au Pays de Caux) avec des silex bruns et gris. Les silex bruns ont tendance à être les plus nombreux ;
- le Perche avec des silex principalement gris clair et quelques noirs ;
- le nord de l'Eure et Loir avec des silex essentiellement bruns.

Les silex se présentent le plus souvent sous la forme de rognons. Néanmoins, plusieurs familles géographiques de RS se distinguent par la forme des silex (fig. 16) :

- à l'est du Pays de Caux et dans le Talou, les rognons et les irréguliers (branchus et lobés) sont dominants ;
- pour le reste du Pays de Caux, les rognons prédominent. Les autres formes sont faiblement représentées ;
- dans l'Eure, on rencontre principalement des rognons, mais la quantité d'irréguliers peut être importante. On remarque d'ailleurs une différence entre l'ouest et l'est. A l'ouest, les pourcentages d'irréguliers sont supérieurs à 19 %, tandis qu'à l'est, ils sont inférieurs à 15 % ;
- dans le Perche, les silex irréguliers dominent ;
- dans le nord de l'Eure et Loir, les rognons sont les plus nombreux et les parallélépipèdes sont en quantité non négligeable.

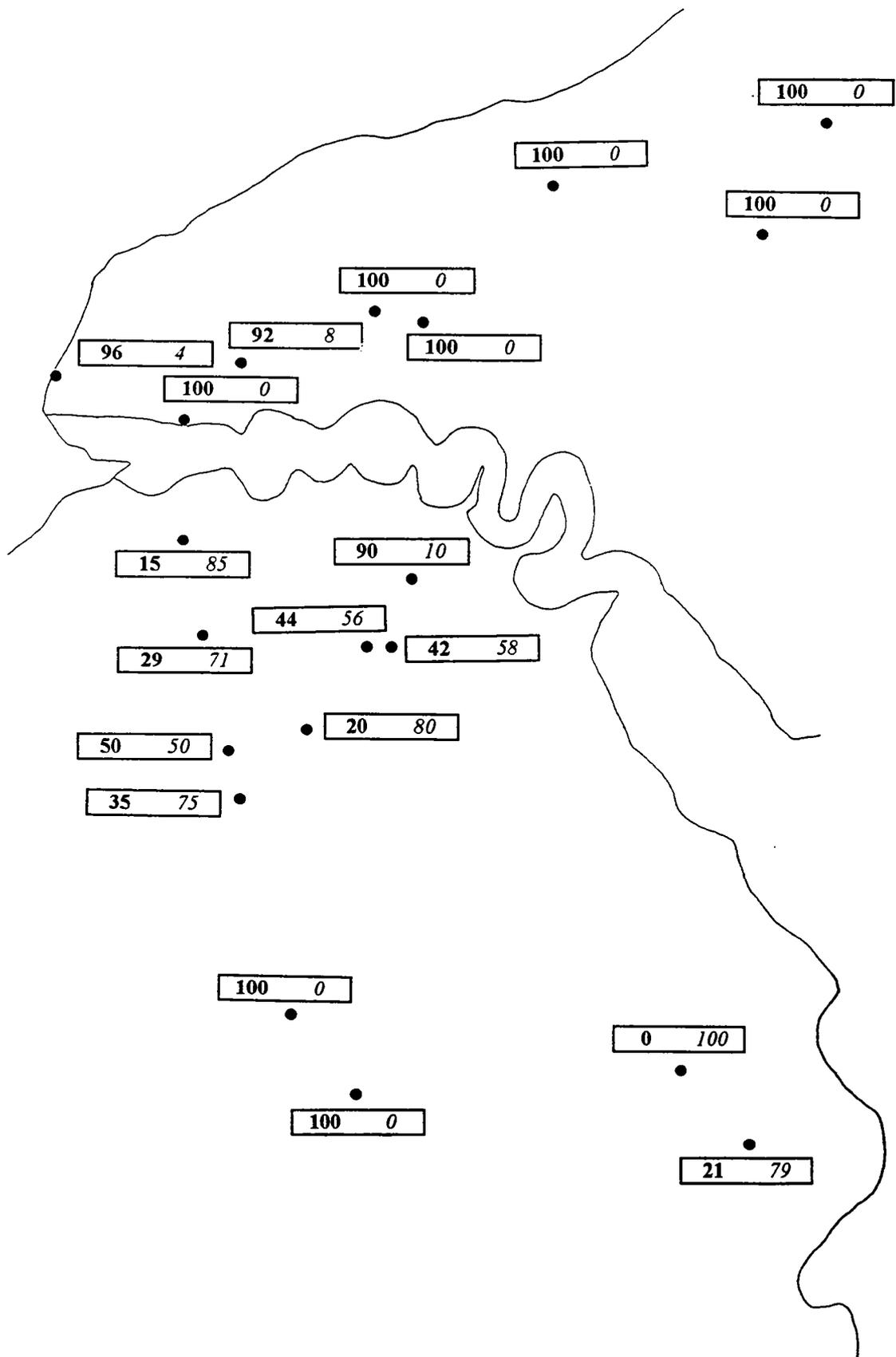
Les silex sont dans l'ensemble peu cassés. Le taux de fragmentation oscille entre 8 et 30 %. Ceci n'empêche pas de retrouver les cinq familles géographiques mises en évidence précédemment (fig. 17) :

- l'est du Pays de Caux et le Talou, avec une fragmentation des silex très faible (< 15 %) ;
- le reste du Pays de Caux, avec une fragmentation homogène, autour de 20 % ;
- l'Eure, avec une fragmentation un peu hétérogène, de 15 à 29 % ;
- le Perche, avec le pourcentage de fragmentation le plus faible (< 10 %) ;
- le nord de l'Eure et Loir, avec le taux de fragmentation le plus élevé (autour de 30 %).

Le pourcentage de silex avec des marques d'oxydation permet de retrouver les mêmes familles (fig. 18) :

- l'est du Pays de Caux et le Talou, où les silex ne présentent pas de taches d'oxydation ;
- le reste du Pays de Caux, avec peu de silex oxydés ;
- l'Eure, où les silex avec des marques d'oxydation sont les plus nombreux ;
- le Perche, avec peu de silex oxydés ;
- le nord de l'Eure et Loir, où les silex oxydés sont assez nombreux.

Le pourcentage de cortex des silex est très variable. Il est compris entre 20 et 56 % et varie d'un site à un autre, mais également sur un même site. En effet, dans le cas du site de La Vasserie, deux prélèvements réalisés à la pelle mécanique à 100 mètres d'intervalle ont donné des pourcentages différents, avec 31 % pour l'échantillon Vas p1a et 54 % pour Vas p1b.



**Figure 15 : Répartition géographique de la teinte des silex des RS de plateau (en%).**  
**silex gris et noirs (en gras)**  
*silex bruns et rouges (en italique)*

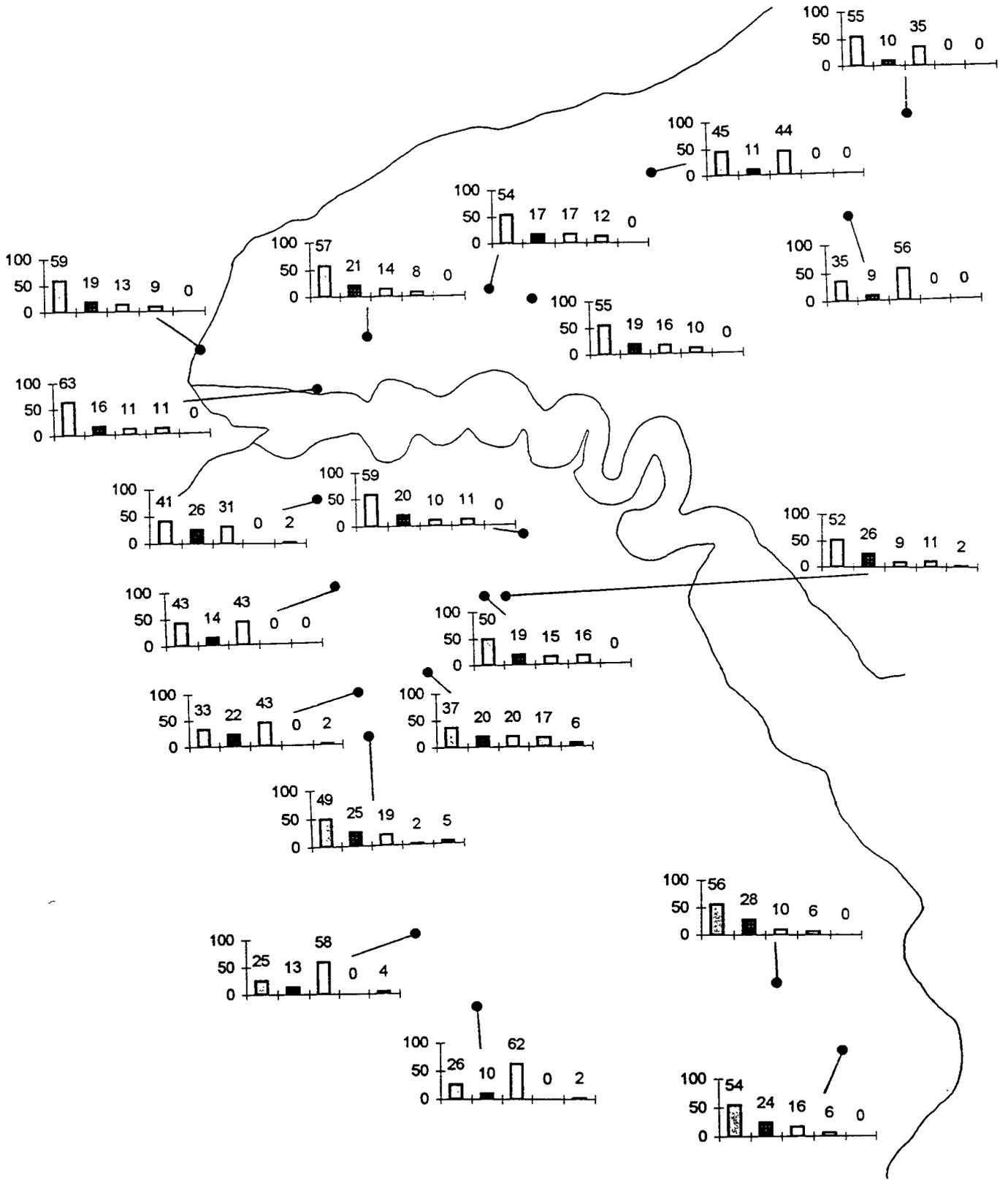
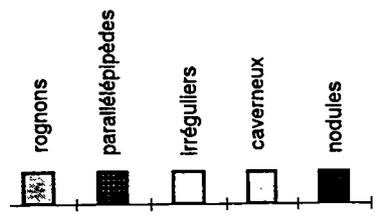


Figure 16 : Répartition géographique de la forme des silex des RS de plateau (en %).



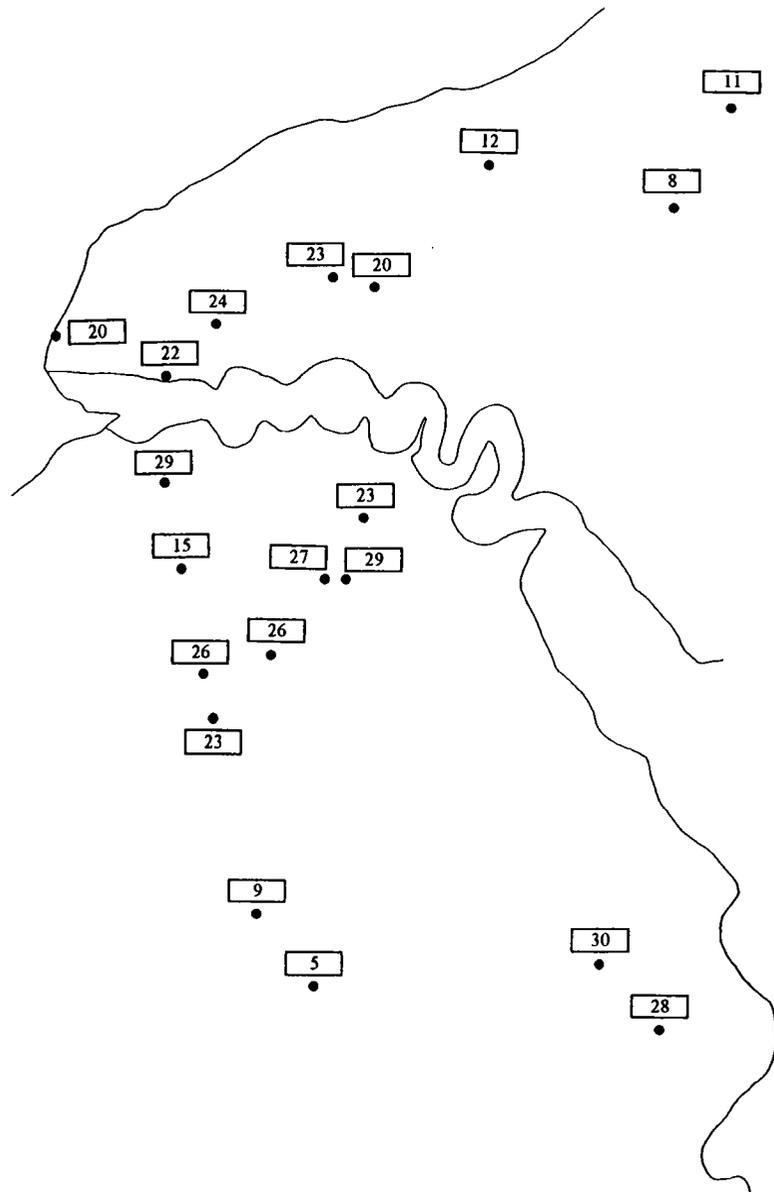


Figure 17 : Répartition géographique du pourcentage de fragmentation des silex des RS de plateau.

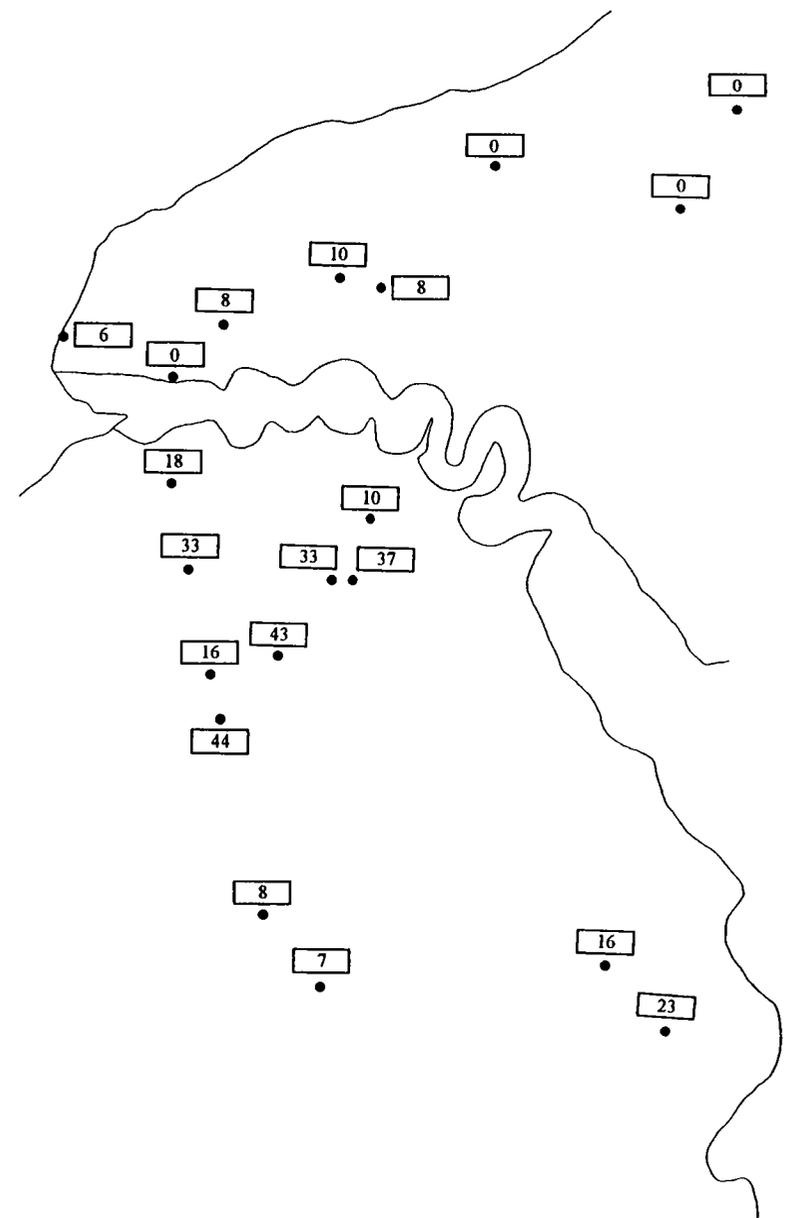


Figure 18 : Répartition géographique du pourcentage de silex présentant des marques d'oxydation.

Les critères concernant les pourcentages de silex fissiles, zonés et creux ne permettent pas non plus de distinguer des familles de RS. Ces paramètres varient de façon aléatoire d'un site à un autre.

### **1.5.2. Minéralogie des silex des RS de plateau**

Dans son étude sur les accidents siliceux du centre du Bassin de Paris, G. Vilas Boas (1975) indique que les silex des RS sont essentiellement constitués de quartz microcristallin et éventuellement de calcédoine en faible quantité.

Notre travail sur la minéralogie des silex des RS de plateau a consisté à analyser 13 échantillons dont 6 sont composés essentiellement de cortex.

Nos diagrammes de diffraction des rayons X des silex correspondent au diagramme classique du quartz, avec deux pics situés à  $24,24^\circ$  et  $31,04^\circ$   $2\theta$ . Ils confirment les résultats de G. Vilas Boas (1975) : les silex des RS sont constitués uniquement de quartz. D'après les observations au microscope optique, il s'agit essentiellement de quartz microcristallin. La calcédoine est présente en faible quantité. Par ailleurs, on ne constate pas de différence minéralogique entre le cortex et le reste du silex.

Tous nos échantillons de silex montrent une mauvaise cristallinité (tabl. 10). Celle-ci est comprise entre 1,2 et 3,1 (d'après la méthode de K. J. Murata et M. B. Norman, 1976). Là encore, on n'observe pas de différence entre le cortex et le reste du silex.

### **1.5.3. Autres caractéristiques des silex des RS de plateau : Porosité et densité**

L'objectif ici n'est pas de réaliser une typologie, mais de compléter la description des silex à partir de l'analyse de leur porosité et de leur densité. Ces paramètres ont pu être étudiés grâce à l'utilisation d'un porosimètre à mercure. 11 échantillons de cortex de silex et 10 échantillons de silex sans leur cortex ont été analysés (tabl. 11).

Pour les silex sans leur cortex, la porosité est faible (0,2 à 1,8 %) et la densité est homogène, avec des valeurs comprises entre 2,5 et 2,6 %.

Pour les cortex des silex, la porosité est beaucoup plus élevée que celle mesurée pour les silex sans leur cortex. Celle-ci est comprise généralement entre 8 et 12 % et peut atteindre dans des cas extrêmes 22 %. Seuls 2 échantillons ont montré des porosités très élevées (21 à 22 %). Il s'agit de deux cortex de silex intensément altérés. Ceux-ci ont été prélevés pour estimer les porosités maximales rencontrées dans les cortex des silex. La densité des cortex est homogène (2,4 à 2,5). Elle est légèrement plus faible que celle des silex sans leur cortex.

	<b>silex sans leur cortex</b>	<b>CI</b>
By 2	silex brun	1,7
SJT 1	silex brun	2,1
SJT 2	1/2sil brun, 1/2sil noir	1,6
San 2	silex brun	1,4
Lie 2	silex gris à brun	1,7
San 1	silex gris	3,1
A/C 3	silex brun	2,7
	<b>moyenne</b>	<b>2,1</b>

	<b>cortex + silex sans cortex</b>	<b>CI</b>
By 2	1/2cortex, 1/2sil brun	2,8
SJT 2	3/4cortex, 1/4sil brun	2,8
San 2	3/4cortex, 1/4sil brun	1,2
Lie 2	1/2cortex, 1/2sil brun	1,6
A/C 3	7/8cortex, 1/8sil brun	2,7
Ven 2	cortex	1,8
	<b>moyenne</b>	<b>2,2</b>

Tableau 10 : Cristallinité du quartz des silex de RS de plateau.

CI : index de cristallinité (tel que défini par Murata et Norman, 1976).

<b>silex sans leur cortex</b>	<b>Porosité (en %)</b>	<b>Densité</b>
Mol p	0,14	2,57
Mol p	1,67	2,58
Cha	0,54	2,46
Ven 2	1,8	2,57
A29	0,2	2,58
San 1	0,25	2,58
MTM pl	0,24	2,58
By 2	0,9	2,59
A/C 3	0,2	2,59
SJT 1	0,17	2,6
<b>moyenne</b>	<b>0,61</b>	<b>2,57</b>
<b>écartype</b>	<b>0,60</b>	<b>0,04</b>

<b>cortex</b>	<b>Porosité (en %)</b>	<b>Densité</b>
Mol p	8,21	2,5
Mol p	8,06	2,42
Cha	22,45	2,51
SJT 1	7,81	2,43
Vas pl	20,74	2,49
San 1	9,79	2,41
MTM pl	9,37	2,48
By 2	8,8	2,34
A/C 3	8,23	2,56
BSO 1	11,06	2,46
A29	11,81	2,45
<b>moyenne</b>	<b>11,48</b>	<b>2,46</b>
<b>écartype</b>	<b>4,93</b>	<b>0,06</b>

Tableau 11 : Porosité et densité des silex des RS de plateau.

### **1.6. Typologie des RS de plateau**

La synthèse des données lithologiques des RS de plateau de l'ouest du Bassin de Paris est reportée dans le tableau 12.

Ces données ont permis, dans un premier temps, de différencier :

- les RS limoneux à limono-argileux du sommet des coupes (un à deux premiers mètres). Ils se caractérisent par une minéralogie de la fraction argileuse et une géochimie des matrices variables d'un site à un autre ;
- les RS argileux à argilo-limoneux (faciès dominants), représentant l'essentiel de la formation depuis le liseré argileux brun foncé de la base jusqu'au RS limoneux du sommet des coupes. Ces résidus à silex s'organisent en familles géographiques ;
- les liserés argileux bruns foncés situés au contact des craies. Leur épaisseur varie de 0,5 à 2 m. La minéralogie de leur fraction argileuse et la chimie de leur matrice sont homogènes. La fraction argileuse est presque exclusivement composée de minéraux gonflants (smectite et interstratifiés kaolinite/smectite). Les matrices, par rapport à l'ensemble des faciès de RS, sont les plus riches en  $Fe_2O_3$ ,  $MgO+CaO+K_2O+Na_2O$  et  $MnO$ . Seules, les formations à silex reposant sur les Sables du Perche ne présentent pas de liseré argileux brun foncé ;
- les RS sableux localisés à proximité des poches de sables. Il existe 6 types de contaminations possibles des RS par les sables (cf. II.1.2). Seuls les RS contaminés par les sables se rattachant par leur faciès aux Sables de Lozère et de Fontainebleau ont été étudiés. Ces RS ont une fraction argileuse très riche en kaolinite et les matrices les plus riches en  $SiO_2$  et les plus pauvres en  $Al_2O_3$  et  $MnO$  (comparativement à l'ensemble des faciès de RS).

Dans un second temps, quatre familles géographiques de RS ont été mises en évidence au sein des faciès dominants argileux à argilo-limoneux :

- l'est du Pays de Caux et le Talou présentent des épaisseurs de RS faibles, des matrices de teinte brune à ocre, riches en  $SiO_2$  et une fraction argileuse très riche en minéraux gonflants. Les silex sont exclusivement gris et noirs ;
- le Pays de Caux (à l'exception de l'est). Le RS est caractérisé par des épaisseurs très variables (manteau de 8 à 15 m d'épaisseur et poches karstiques pouvant être très profondes), par des matrices de teinte rouge à brun rouge, relativement pauvres en  $SiO_2$  et riches en  $Fe_2O_3$  et  $MgO+CaO+K_2O+Na_2O$  et par une fraction argileuse à kaolinite dominante. Les silex sont essentiellement gris ;
- l'Eure (à l'exception de la partie orientale non étudiée). Les matrices sont de teinte brun rouge à rouge au sommet et s'éclaircissent en profondeur pour devenir beiges, rosâtres et blanches. Elles sont riches en  $SiO_2$  et pauvres en  $Al_2O_3$  comparativement aux autres faciès. La fraction inférieure à  $2 \mu m$  a une minéralogie variable où la kaolinite est néanmoins dominante. Concernant l'épaisseur, on différencie une zone centrale et méridionale où le RS est très épais ( $\geq 20$  m), par comparaison au reste où l'épaisseur varie entre 10 et 20 m et peut même à certains endroits être inférieure à 10 m. Les silex bruns ont tendance à être plus nombreux que les gris ;
- le sud de la zone étudiée (Perche et nord de l'Eure et Loir (Thimerais)) est caractérisé par un RS avec une matrice qui présente les mêmes variations verticales de teinte que la famille précédente, des teneurs élevées en  $Al_2O_3$  et faibles en  $SiO_2$  (par rapport aux autres faciès). La fraction argileuse est presque exclusivement composée de kaolinite. Cependant, l'épaisseur du RS dans le Perche est faible ( $\leq 10$  m), alors que dans le nord de l'Eure et Loir elle est forte ( $\geq 20$  m). Enfin, les silex sont gris clair dans le Perche, tandis qu'ils sont principalement bruns dans le nord de l'Eure et Loir.

Faciès RS de plateau		Teinte matrice	Granulométrie matrice (< 2 mm)	Minéralogie (< 2 µm)	Chimie matrice (< 2 mm)	% silex (> 20 mm)	Observations macro silex
RS limoneux à argilo-limoneux		variable	limoneuse à limono-argileuse	hétérogène	hétérogène	pauvre	/
RS sableux		variable	sableuse à sablo-argileuse	kaolinite	SiO2 Al2O3 MnO	variable	/
liseré argileux de la base des coupes		brun foncé, noir ou gris vert	argileuse	smectite interstratifiés 7/14sm	Fe2O3 MgO, CaO, K2O, Na2O MnO	/	/
RS argileux à argilo-limoneux (faciès dominant)	Est Pays de Caux, Talou	brun (ocre)	limono-argileuse	smectite interstratifiés 7/14sm	SiO2 TiO2	42 à 45	- gris, noirs - rognons, irréguliers - fragmentation < 15% - non oxydés
	Pays de Caux (excepté l'Est)	rouge à brun-rouge	argilo-limoneuse	kaolinite dominante	SiO2 Fe2O3 MgO, CaO K2O, Na2O TiO2	44 à 47	- gris, qq bruns - rognons - fragmentation ≈ 20% - peu oxydés
	Eure	<input type="checkbox"/> - rouge <input type="checkbox"/> - beige, rose, blanc	argileuse à argilo-limoneuse	variable (kaolinite dominante)	SiO2 Al2O3 MnO	<input type="checkbox"/> 0-10 m : 42 à 54 <input type="checkbox"/> 10-15 m : 60 à 70 <input type="checkbox"/> > 15 m : 70 à 80	- bruns, gris - rognons, irréguliers - fragmentation 15-30% - oxydés nombreux
	Perche	<input type="checkbox"/> - bigaré rouge, blanc <input type="checkbox"/> - blanc	argileuse à argilo-limoneuse	kaolinite	SiO2 Al2O3 Fe2O3 MgO, CaO K2O, Na2O	≈ 50	- gris - irréguliers - fragmentation < 10% - peu oxydés
	Eure et Loir	<input type="checkbox"/> - rouge <input type="checkbox"/> - beige, rose, blanc					<input type="checkbox"/> 0-10 m : 39 à 51 <input type="checkbox"/> 10-15 m : 60 à 70 <input type="checkbox"/> > 15 m : 70 à 80

Tableau 12 : Synthèse des données lithologiques et typologie des RS de plateau.

SiO2 : teneur élevée en SiO2, siO2 : teneur faible en SiO2.

Interstratifiés 7/14sm : interstratifiés kaolinite/smectite.

Malgré cette typologie des RS, il demeure des incertitudes pour certains secteurs de l'ouest du Bassin de Paris. Ceci est le plus souvent lié à l'absence d'affleurements. Il s'agit :

- du secteur de la Seine et de l'Eure,
- de la bordure est du Calvados,
- de l'est de l'Eure (Vexin Normand, région d'Evreux et Drouais),
- du Roumois,
- de l'extrémité méridionale de la zone étudiée (au sud du Thimerais).

D. Lefebvre (1984) a montré l'existence d'un faciès particulier de RS situé sous les hautes terrasses alluviales de la Seine. Il se caractérise par une faible épaisseur (< 3 m) et une matrice de teinte brun rouge à rouge. D'après les sondages, il existe également un RS sous les hautes terrasses alluviales de l'Eure. Ce dernier présente les mêmes caractéristiques que celui de la Seine.

D'après les sondages, le Vexin Normand se subdivise en deux, avec au nord-est, un RS de faible épaisseur (< 5 m), de teinte brune à ocre, et au sud-est, un RS d'épaisseur comprise entre 5 et 10 m, de teinte brun rouge. La plus grande partie située au nord-est se rattacherait donc au RS de l'est du Pays de Caux et du Talou, tandis que la bordure sud-ouest serait liée au reste du Pays de Caux.

D'après les sondages, les RS du Roumois et de la région d'Evreux, avec une matrice de teinte brun rouge à rouge et la présence de Sables de Lozère en poches, sont à rattacher au RS du Pays de Caux. Ceci est confirmé pour le Roumois par les caractéristiques lithologiques du RS du site des Monts Sud (MtS). En effet, le RS des Monts Sud, avec une matrice de teinte rouge, des teneurs en SiO<sub>2</sub> faibles et en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> élevées se rapproche davantage du RS du Pays de Caux que de celui de l'Eure.

D'après les sondages et les observations effectuées sur la déviation de Lisieux, la bordure est du Calvados serait liée au RS de l'Eure (RS de teinte brun rouge au sommet s'éclaircissant en profondeur pour devenir beige, rose et blanc).

La réalisation de la carte à 1/50000 de Dreux par F. Ménillet *et al.* (1994) a montré qu'il existe un faciès particulier de RS dans le Drouais. Celui-ci est caractérisé par une faible épaisseur de RS et des matrices de teinte brune, brun rouge ou brun ocre. La limite occidentale du faciès correspond à la limite de la transgression rupélienne.

Enfin, l'extrémité sud de la zone étudiée (Faux-Perche et Beauce d'Illiers) avec un RS rouge à brun rouge au sommet s'éclaircissant en profondeur (d'après les sondages) semble se rattacher au RS du nord de l'Eure et Loir (RS du Thimerais).

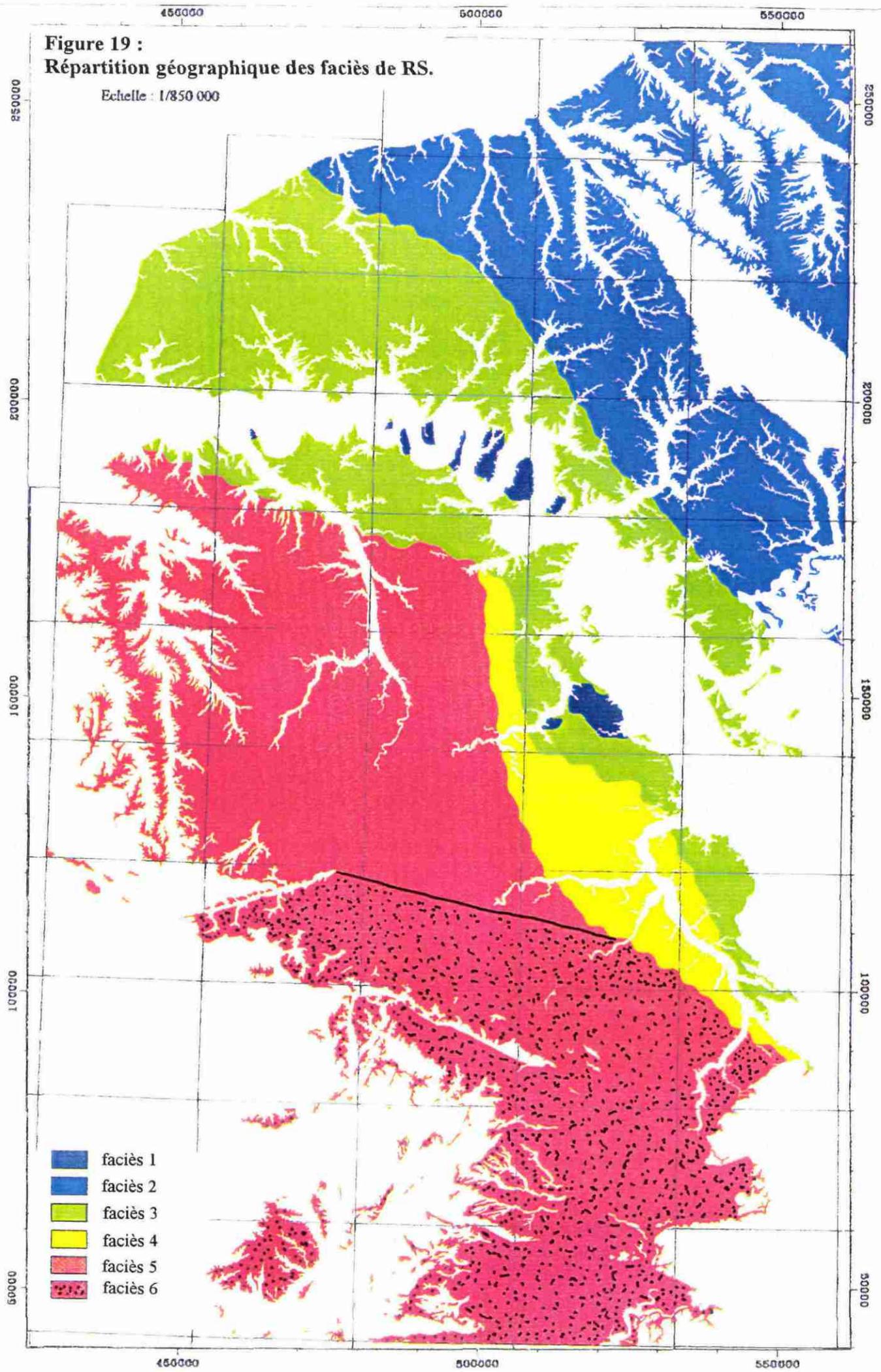
L'ensemble de ces observations complète ainsi les données lithologiques et permet de réaliser une carte de **typologie des RS de plateau**, où l'on distingue **6 familles géographiques** (fig. 19) :

- ① RS sous les alluvions des hautes terrasses de la Seine et de l'Eure ;
- ② RS de l'est de la zone étudiée (Talou, est du Pays de Caux et nord-est du Vexin Normand) ;
- ③ RS du Pays de Caux (excepté l'est), du Roumois, de la région d'Evreux et de la bordure sud-ouest du Vexin Normand ;
- ④ RS du Drouais ;
- ⑤ RS de l'Eure (excepté le Roumois et l'est) et de la bordure est du Calvados ;
- ⑥ RS du Perche et de l'Eure et Loir.

Notons que les limites entre les différents faciès régionaux sont difficiles à cerner. Les passages latéraux peuvent être plus ou moins continus d'un faciès à l'autre.

Figure 19 :  
Répartition géographique des faciès de RS.

Echelle : 1/850 000



-  faciès 1
-  faciès 2
-  faciès 3
-  faciès 4
-  faciès 5
-  faciès 6

## 2. Apports des bilans d'altération dans la compréhension de la genèse des RS

### 2.1. Problématique

Après avoir caractérisé les matériaux constituant les RS de plateau et défini 6 familles géographiques, nous tentons maintenant de comprendre l'origine de ces variations régionales au travers de l'étude des relations entre les craies et leurs produits dérivés au cours de l'altération, les RS. Dans cette partie, les âges de formation des différentes familles de RS ne sont qu'évoqués, dans la mesure où cet aspect est développé dans la thèse de F. Quesnel.

L'objectif, ici, est de **définir les quantités d'éléments insolubles contenues dans les craies et de voir si celles-ci sont suffisantes pour expliquer à elles seules la genèse des RS.** Nous répondrons ainsi à la question suivante : **les RS sont-ils uniquement un résidu de décarbonatation de la craie ?**

#### 2.1.1. Analyse de la bibliographie concernant l'origine des RS

Le problème de l'autochtonie et de l'allochtonie des RS par rapport aux craies a fait l'objet de multiples discussions au sein de la communauté scientifique.

Quand on aborde ce problème, il est nécessaire de distinguer l'origine des silex de celle de la gangue (ou matrice). En 1938, B. Brajnikov souligne qu'il est solidement établi que les silex des argiles à silex proviennent de la craie.

Si l'origine autochtone des silex est incontestable, il n'en va pas de même pour la matrice des RS. B. Brajnikov (1938) fut l'un des premiers à lancer le débat sur l'origine de la gangue des RS. Se basant sur une comparaison entre la liste des minéraux de l'argile à silex et celle des minéraux détritiques de la craie, il constate que tous les minéraux détritiques de l'argile à silex peuvent provenir de la craie. Mais il remarque que ces derniers peuvent également provenir des dépôts tertiaires du Bassin de Paris. Après une analyse quantitative, il indique que tous les éléments constitutifs de l'argile à silex peuvent être fournis par la craie, mais que les rapports entre ces éléments ne sont pas les mêmes dans les deux formations. Il ouvre ensuite la discussion sur l'épaisseur de craie altérée : avec une quantité de matières insolubles contenues dans la craie de l'ordre de 15 % et une épaisseur de RS de 30 à 40 m, l'épaisseur de craie disparue par décalcification serait de 200 à 250 m. Ceci paraît alors invraisemblable. Cependant, il conclut que cette argumentation n'est pas valable car il n'a jamais rencontré des accumulations d'argile à silex aussi puissantes, et il admet que l'épaisseur maximale de RS n'excède pas 5 m. Il définit "l'argile à silex comme une argile colluviale de décalcification dont la formation se produit dans des conditions particulières, sous une couverture de dépôts tertiaires ou quaternaires, à faciès essentiellement sableux ou sablo-argileux".

Par la suite, J. Bauer (1964) montre que la craie campanienne contient 97 % de  $\text{CaCO}_3$  et 1 % au maximum d'argile. Compte tenu du pourcentage d'argile contenu dans les argiles à silex, il faudrait dissoudre 77 m de craie pour obtenir l'argile contenue dans 1 m d'argile à silex. Elle souligne également que l'argile à silex contient environ 200 fois plus d'éléments détritiques que la craie, impliquant une dissolution de 200 m de craie pour obtenir le sable contenu dans 1 m d'argile à silex.

La divergence entre les théories allochtoniste et autochtoniste conduit alors à une troisième théorie développée entre autres par C. Klein (1970) et Y. Dewolf (1976) : la sub-autochtonie. L'argile à silex est considérée comme le résultat de l'addition :

- d'une phase résiduelle provenant de la décarbonatation de la craie ;
- d'une phase apportée qui explique l'existence dans l'argile à silex d'éléments étrangers.

G. Callot et G. Pédro (1977a, 1977b), au travers de l'étude des argiles à silex de la plate-forme Nord-Aquitaine, réaffirment le caractère autochtone des silex et leur rôle essentiel dans la conservation de la couverture d'altération. En ce qui concerne l'origine de la matrice des argiles à silex, pour eux, l'allochtonie et l'autochtonie sont toutes les deux possibles.

Les auteurs anglais se sont également penchés sur ce problème pour les argiles à silex du sud de l'Angleterre. J. A. Catt (1986), dans sa synthèse sur les RS d'Angleterre, indique que les anciens auteurs (Lyell et Prestwich) considèrent tout d'abord ces dépôts comme uniquement des résidus d'altération de la craie. Cependant, C. Reid (1899) s'aperçoit que le résidu insoluble de la craie comporte très peu de fraction fine (argile, silt et sable) par rapport aux silex et que la simple dissolution de la craie devrait produire des formations différentes de celles observées. A. J. Jukes-Browne (1906) montre que la dissolution de 100 m de craie de la zone à *Micraster cor-anguinum* fournit 7 m de résidus dont 6 m de silex et 1 m seulement d'argile, ce qui est en désaccord avec les rapports 1/1 généralement observés dans les résidus à silex. J. Loveday (1962) montre que les éléments grossiers (silex) dérivent de la craie et que les fractions fines résultent en partie de la craie, mais surtout des dépôts sus-jacents (dans un rapport de 1 pour 5 ou plus). Plusieurs auteurs (Loveday, 1962 ; Avery, 1964 ; Hodgson *et al.*, 1967 ; Thorez *et al.*, 1971 ; John, 1980) étudient et comparent les granularités des fractions fines, les cortèges de minéraux lourds et les minéralogies des argiles dans les argiles à silex et les différents niveaux paléogènes proches. Ils en déduisent que la matrice des argiles à silex provient du démantèlement des dépôts argileux, silteux et sableux d'âge Thanétien et Yprésien.

Malgré cette abondance de travaux, l'unanimité sur l'origine des RS est loin d'être faite en France, notamment lorsqu'il s'agit de déterminer au sein de ces formations l'importance de la phase résiduelle provenant de la craie et de la phase apportée de l'extérieur.

Ceci nous apparaît lié :

- à un manque de synthèse à l'échelle régionale ou multirégionale, aussi bien pour les RS que pour les craies. Ce problème, pour les RS, a déjà été développé dans l'introduction de ce mémoire. En ce qui concerne les craies, on constate que la quantification des matières insolubles est réalisée sur un nombre restreint d'échantillons. Klein (1970) le souligne d'ailleurs, dans son essai de synthèse sur l'évaluation du taux d'insolubles dans les craies de l'ouest et du sud du Bassin de Paris, en indiquant qu'il ne s'agit que de quelques estimations chiffrées tirées de l'analyse d'un nombre modeste d'échantillons de craie ;
- à une connaissance imprécise des âges des craies-mères des RS ;
- aux modes de calculs utilisés pour évaluer les épaisseurs de craies altérées. Ces calculs sont généralement basés, soit sur la totalité des matériaux insolubles (silex + matrice), soit sur la matrice uniquement. Or, sachant que les silex sont incontestablement d'origine autochtone, il aurait été semble-t-il plus judicieux de baser ces calculs sur les teneurs en silex contenues dans les craies et les RS.

### **2.1.2. Présentation de l'étude sur l'origine des RS à partir des bilans d'altération**

Afin de répondre aux problèmes évoqués ci-dessus et de mieux appréhender l'origine des RS, un bilan d'altération entre les craies et les RS a été effectué suivant l'organigramme de la figure 20. Il consiste à :

- définir les roches-mères crayeuses à l'origine des RS (pour les 21 sites de plateau), à partir de l'étude du substrat crayeux et de l'étude micropaléontologique (effectuée par C. Bourdillon, BRGM Orléans) du contenu des silex creux des RS ;
- quantifier les éléments insolubles (silex et fraction silicatée fine) contenus dans les éventuelles roches-mères crayeuses sur 29 sites de craies de l'ouest du Bassin de Paris. La fraction silicatée fine (en abrégé fsf) regroupe tous les éléments autres que les silex. Il s'agit essentiellement d'argile ; quartz, micas, feldspaths... étant en faibles proportions ;
- estimer la dissolution des silex au cours de l'altération des craies à silex et de la formation des RS, à partir de la comparaison des silex des RS et des craies retenues comme roches-mères probables (les bilans d'altération étant basés sur les teneurs en silex, il est nécessaire d'évaluer le degré d'altération de ceux-ci) ;
- reconstituer les épaisseurs de craies altérées nécessaires pour donner les épaisseurs de RS. Cette reconstitution est basée sur les teneurs en silex contenues dans les craies retenues comme roches-mères et les RS ;
- réaliser un bilan granulométrique en comparant les teneurs en silex et en fsf contenues dans les RS théoriques (obtenus à partir des quantités d'insolubles mesurées dans les craies retenues comme roches-mères) et dans les RS réels. Ceci va permettre d'évaluer le degré d'allochtonie des RS ;
- effectuer des bilans minéralogique et géochimique, en comparant les fsf des RS théoriques et des RS réels, afin de confirmer et de préciser les éventuels apports extérieurs.

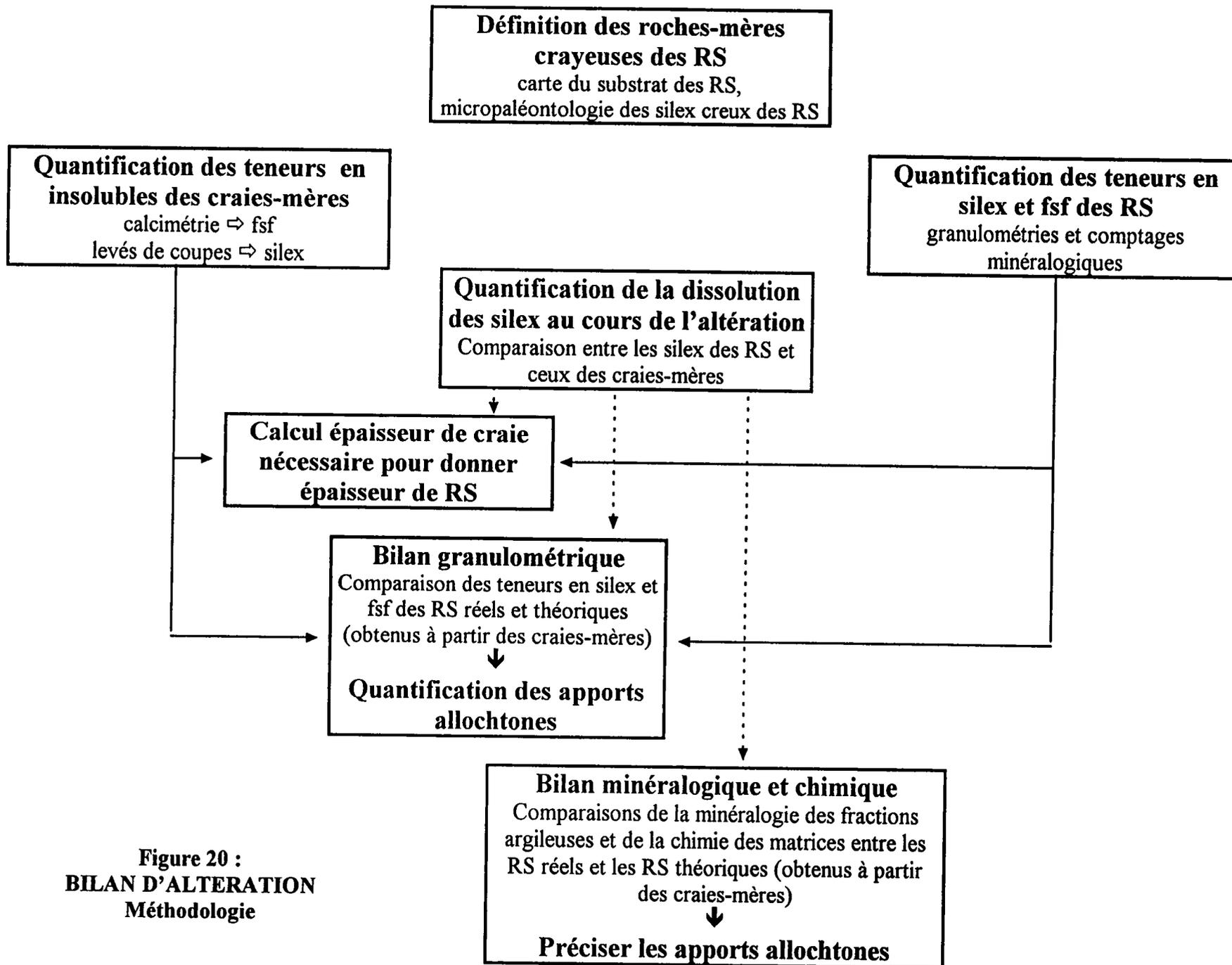
Le bilan d'altération réalisé ici entre les craies à silex et les RS est une adaptation du raisonnement "isoquartz" utilisé par F. Lelong (1969) et par F. Lelong et B. Souchier (1972) pour les calculs de bilan d'altération.

## **2.2. Définition et caractérisation lithologique des roches-mères crayeuses des RS**

### **2.2.1. Définition des roches-mères crayeuses des RS**

Les roches-mères crayeuses des RS de plateau étudiés ont pu être déterminées grâce :

- à la réalisation par F. Quesnel d'une carte du substrat des RS de l'ouest du Bassin de Paris. Elle est le résultat d'une synthèse à 1/250 000 des cartes géologiques à 1/50 000 et à 1/80 000, complétée par une étude bibliographique et quelques analyses micropaléontologiques effectuées sur les craies du littoral haut-normand ;
- à l'étude micropaléontologique systématique des silex creux situés au sommet des RS, mais également à différents niveaux des profils de RS pour les coupes les plus représentatives. Les silex creux présentent une ou plusieurs cavités contenant une fine poudre siliceuse, en général blanche. Elle est composée de microfossiles siliceux ou silicifiés, souvent bien préservés : spicules de spongiaires dominants, foraminifères, ostracodes, coccolithes, radiolaires... Seuls



**Figure 20 :**  
**BILAN D'ALTERATION**  
**Méthodologie**

les foraminifères ont été déterminés par C. Bourdillon (BRGM, Orléans). Ils permettent de connaître l'âge des craies à silex, roches-mères des altérites à silex.

Le substrat des RS est presque exclusivement crayeux, à l'exception du secteur sud-ouest de la zone étudiée (fig. 21) où les RS reposent sur les Sables du Perche, d'âge cénomanien supérieur (Juignet, 1974). Globalement, de l'WSW vers l'ENE le substrat est de plus en plus jeune, avec les craies ou sables les plus anciens datant du Cénomaniens dans le Perche et l'ouest de l'Eure, et les craies les plus jeunes datant du Campanien à l'est de l'Eure et au niveau de quelques affleurements à l'est du Pays de Caux. Localement, les craies cénomaniennes et turoniennes peuvent se retrouver en position culminante à la faveur d'anticlinaux (ex : Anticlinal du Bray).

L'étude micropaléontologique du contenu des silex creux des RS montre que la stratification de la craie est conservée au sein des RS (Kuntz *et al.*, 1984 ; Laignel, 1993 ; Ménéillet *et al.*, 1994).

A partir de cette étude, une carte du sommet des craies disparues par altération a été réalisée (fig. 22). Elle montre que des **craies à silex du Maastrichtien supérieur ont existé dans le NW du Bassin de Paris** (Quesnel *et al.*, 1996). La carte met en évidence deux secteurs :

- le secteur WSW, avec un âge sommital des craies altérées Campanien supérieur ;
- le secteur ENE, avec un âge sommital des craies altérées le plus souvent Maastrichtien inférieur.

L'ensemble des données micropaléontologiques et la carte du substrat des RS permettent alors de déterminer l'âge des roches-mères crayeuses à l'origine des RS étudiés (tabl. 13).

## **2.2.2. Caractérisation lithologique des craies choisies comme représentatives des roches-mères des RS**

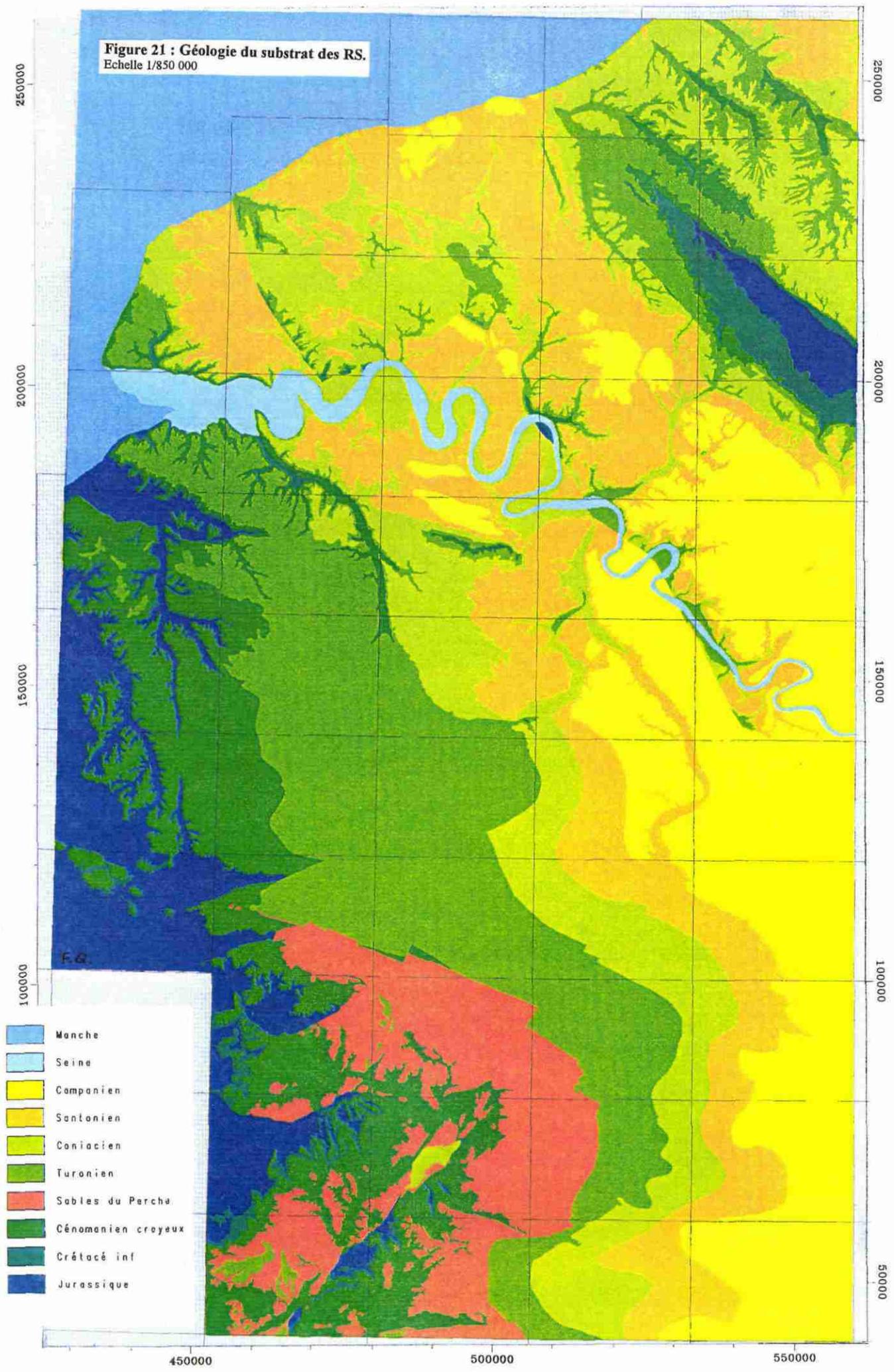
### **2.2.2.1. Choix des sites de craies**

C. Klein (1970) souligne pour l'ouest du Bassin de Paris qu'il est légitime de penser que les roches-mères dont dérivent les RS étaient peu différentes des craies qui ont échappé à l'altération. De plus, C. Mégnien *et al.* (1980) indiquent que les sédimentations turoniennes et sénoniennes sont homogènes pour la région qui nous concerne.

29 sites de craies localisés à l'ouest du Bassin de Paris ont alors été étudiés (fig. 23). Pour les craies turoniennes, l'étude a été complétée par les travaux de P. Juignet et G. Breton (1994) sur le littoral haut-normand, depuis le Cap Fagnet jusqu'à St Pierre en Port. Les noms, notations et âges des craies de ces sites sont donnés dans le tableau 14. La microfaune de ces craies comparée à celle des silex creux des RS indique qu'il n'y a pas de variation importante des conditions de sédimentation ou de biotope. On peut donc considérer que les craies prélevées sur les 29 sites sont représentatives des faciès crayeux à l'origine des RS étudiés.

La craie maastrichtienne a forcément posé un problème puisqu'il n'en existe plus dans le Bassin de Paris. Dans un premier temps, nous avons cherché dans la bibliographie des

**Figure 21 : Géologie du substrat des RS.**  
Echelle 1/850 000



- Manche
- Seine
- Campanien
- Santonien
- Coniacien
- Turonien
- Sables du Percha
- Cénomaniens creux
- Crétacé inf
- Jurassique

450000

500000

550000

250000

200000

150000

100000

250000

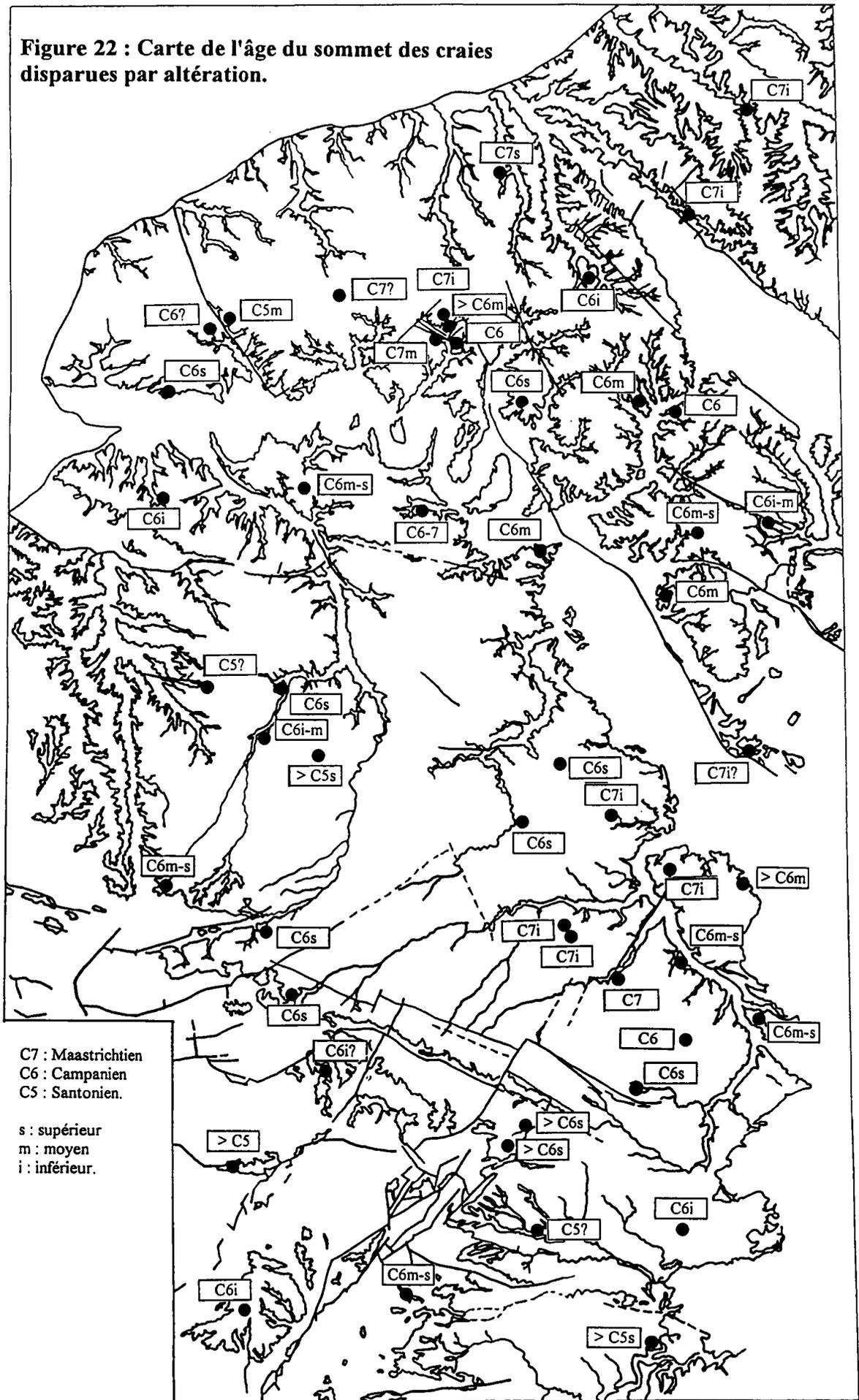
200000

150000

100000

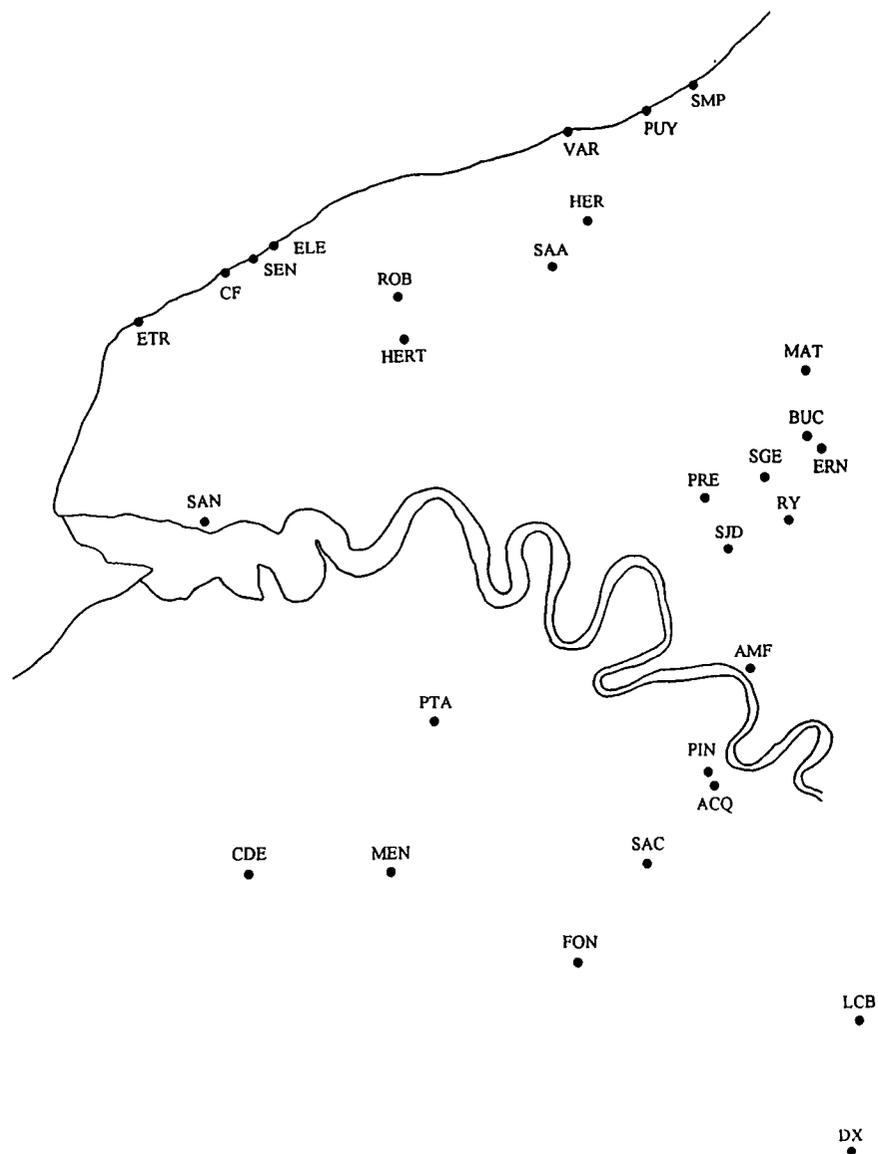
50000

Figure 22 : Carte de l'âge du sommet des craies disparues par altération.



<b>Sites de RS</b>	<b>Roches-mères crayeuses des RS</b>
Neu	Coniacien inf au Maastrichtien inf
BSO	Campanien inf au Maastrichtien
A29	Santonien au Maastrichtien inf
Yv	Santonien au Maastrichtien inf
Bc	Santonien au Campanien
San	Santonien au Campanien sup
Beu	Turonien moy? et sup au Campanien
Lie	Turonien sup au Campanien
MtS	Santonien sup au Campanien
MtM	Santonien au Campanien
Vas	Coniacien au Campanien
Mol	Coniacien au Campanien
By	Coniacien au Campanien sup
CDE	Turonien sup au Campanien
SJT	Turonien sup au Campanien
Ven	Turonien au Campanien
A/C	Coniacien moy au Maastrichtien
Cha	Coniacien moy au Maastrichtien

Tableau 13 : Définition des roches-mères crayeuses des RS étudiés.



sites de craie	notation	âge
St Martin Plage	SMP	Turonien inf et moy
Les Puys	Puy	Turonien inf - Santonien
Varengville	VAR	Santonien
Hermanville	HER	Santonien
Sâane St Just	SAA	Coniacien sup - Santonien
Robertot	ROB	Coniacien - Santonien
Hericourt	HERT	Coniacien
Eletot	ELE	Turonien sup
Senneville	SEN	Turonien moy
Cap Fagnet	CF	Turonien inf
Étretat	ETR	Coniacien
Sandouville	SAN	Cénomaniens - Santonien inf
Mattonville	MAT	Turonien sup - Coniacien
Buchy	BUC	Coniacien
Ernemont sur Buchy	ERN	Coniacien
St Germain des Essourts	SGE	Campanien
Préaux	PRE	Coniacien
Ry	RY	Santonien
St Jacques Darnétal	SJD	Santonien - Campanien.
Amfreville sous les Monts	AMF	Coniacien
Pont Authou	PTA	Coniacien
Courtonne les deux églises	CDE	Turonien inf
Menneval	MEN	Turonien inf et moy
Pinterville	PIN	Turonien sup - Coniacien
Acquigny	ACQ	Turonien sup - Coniacien
Sacquenville	SAC	Santonien
Fontenelles	FON	Turonien sup
La Couture Boussay	LCB	Campanien
Dreux	DX	Campanien

Tableau 14 : Sites de craies étudiés.

Figure 23 : Localisation géographique des sites de craies étudiés.

données sur les quantités d'éléments insolubles contenues dans les craies maastrichtiennes du NW de l'Europe. Mais nous nous sommes rendu compte que ces teneurs en insolubles varient fortement d'un bassin à un autre, notamment au niveau des quantités de silex (tabl. 15).

localisation	quantité de silex	références bibliographiques
NW Allemagne	3,1 %	W. U. Ehrmann (1987)
Pays Bas	19,1 %	H. Kars <i>et al.</i> (1987)
Belgique	17,2 %	H. Kars <i>et al.</i> (1987)
SE Grande Bretagne	silex présents	W. U. Ehrmann (1987)
Danemark	silex rares	H. Kars <i>et al.</i> (1987)

Tableau 15 : Teneur en silex dans les craies maastrichtiennes du Nord Ouest de l'Europe, d'après les travaux de W. U. Ehrmann (1987) et H. Kars *et al.* (1987).

Cependant, l'étude micropaléontologique du contenu des silex creux des RS a montré qu'entre le Campanien et le Maastrichtien les conditions de milieu de dépôt n'ont pas changé (Bourdillon, 1996). La microfaune des silex creux datée du Maastrichtien ne témoigne en aucun cas d'un faciès littoral, mais d'un environnement pélagique comme au Campanien. C'est pourquoi nous considérons que les caractéristiques lithologiques des craies campaniennes sont aussi valables pour les craies maastrichtiennes.

A titre de remarque, les craies cénomaniennes n'ont pas été étudiées dans la mesure où aucun RS étudié n'est le résultat de l'altération de ces craies.

#### 2.2.2.2. Quantification des éléments insolubles contenus dans les craies de l'ouest du Bassin de Paris

La craie se compose d'une fraction carbonatée facilement soluble, constituée presque exclusivement de CaCO<sub>3</sub> (Mégny *et al.*, 1980) et d'une fraction insoluble ou peu soluble comprenant les silex et la fraction silicatée fine (essentiellement de l'argile ; quartz, micas, feldspaths... étant en faibles proportions).

Les proportions des différents constituants de la craie ont été évaluées de la façon suivante :

- les teneurs en fsf et en carbonates ont été obtenues par calcimétrie (calcimètre de Bernard) en utilisant de l'acide chlorhydrique dilué à 1/3. C. Matthieu et F. de Coninck (1972) ont montré que le choix de l'acide et de sa concentration a peu d'incidence sur la quantité d'insoluble (% fsf) mesurée (tabl. 16).

Acide	Concentration	% insoluble fin (fsf)
HCl	concentré	5,16
HCl	1/5	5,31
HCl	1/10	5,41
CH <sub>3</sub> -COOH	1/10	5,77

Tableau 16 : Incidence de la concentration et du choix de l'acide sur la quantité de fsf mesurée lors de la calcimétrie, d'après les travaux de C. Matthieu et F. de Coninck (1972).

Pour chaque échantillon de craie, 3 à 5 essais ont été effectués suivant l'homogénéité des résultats. Une moyenne des résultats de ces essais a été alors réalisée pour chaque échantillon;

- les teneurs en silex correspondent à la moyenne en silex obtenue à partir des mesures effectuées sur 2 à 3 levés de coupes par affleurement de craie. La fiabilité de ces données a pu être vérifiée sur deux carrières de craie (Sandouville et Dreux) grâce aux données fournies par les exploitants de ce matériau (tabl. 17).

sites	âges des craies	% silex d'après les coupes	% silex exploitants
Sandouville	Sénonien	13	15
	Turonien	0,1	0
	Cénomaniens	23	25
Dreux	Santonien-Campanien	17	15

Tableau 17 : Vérification de la fiabilité des mesures concernant les teneurs en silex des craies étudiées.

La transformation des pourcentages massiques (%m) en pourcentages volumiques (%v) et inversement, pour l'ensemble des calculs concernant les bilans, a été effectuée en prenant des densités de 2,5 pour la fsf et les silex et de 1,8 pour les carbonates. Ces densités ont été choisies en fonction des mesures de densité obtenues lors des essais de porosité sur les silex et sur les craies. La fsf étant constituée de sables de quartz de densité 2,6, de limons composés essentiellement de particules de quartz de densité 2,6 et d'argiles de densité 2,4, une densité moyenne de 2,5 a été retenue pour la fsf.

Les teneurs en éléments insolubles des craies sont représentées sur les figures 24, 25, 26, 27 et 28. Les teneurs en silex et en fsf varient principalement d'un étage à l'autre et sont relativement homogènes au sein d'un même étage :

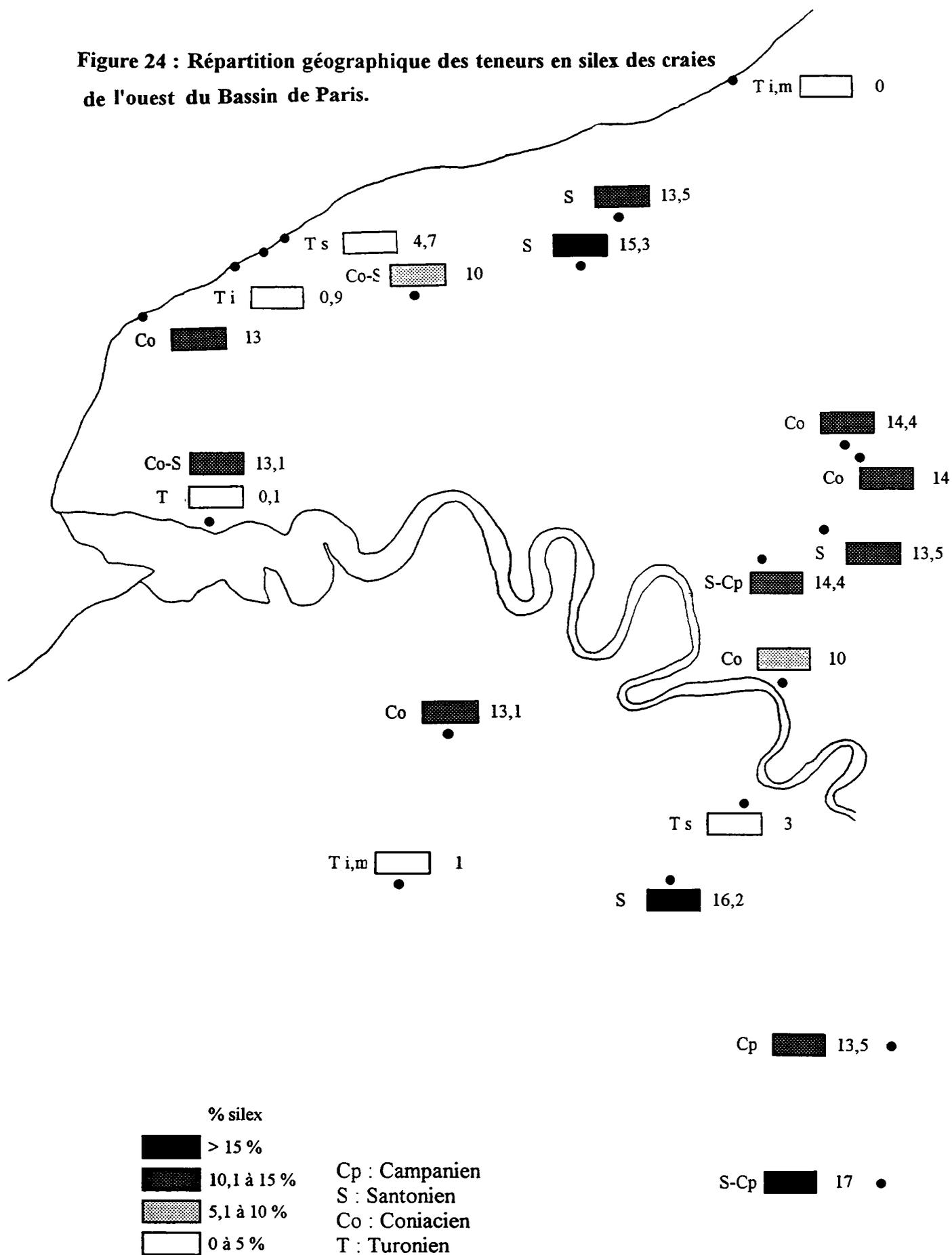
- pour le Campanien, les pourcentages de silex sont voisins de 15 % et les quantités de fsf varient entre 3 et 4 % ;
- pour le Santonien, les teneurs en silex sont également voisines de 15 % et les valeurs de fsf sont strictement inférieures à 3 % ;
- pour le Coniacien, les pourcentages de silex oscillent entre 10 et 14 % et les teneurs en fsf sont inférieures à 4 % ;
- pour le Turonien, on remarque des différences entre le Turonien inférieur-moyen et le Turonien supérieur. Les pourcentages de silex dans le Turonien inférieur et moyen sont très faibles (de 0 à 1 %) et ceux en fsf élevés (de 4 à 9 %), tandis que dans le Turonien supérieur, les teneurs en silex sont un peu plus élevées (de 3 à 5 %) et celles en fsf plus faibles (de 3 à 4%).

Les variations des teneurs en silex et fsf au sein des craies de l'ouest du Bassin de Paris ne sont donc pas régionales, mais stratigraphiques. On note également que les quantités en éléments insolubles des craies campaniennes, santoniennes et coniaciennes sont relativement proches entre elles, mais nettement différentes de celles du Turonien.

### ***2.2.2.3. Minéralogie de la fraction argileuse des craies de l'ouest du Bassin de Paris***

La fraction argileuse des craies à silex de l'ouest du Bassin de Paris est composée presque exclusivement de smectite et d'un peu d'illite (tabl. 18). La minéralogie des argiles ne présente ni variation stratigraphique, ni variation régionale.

Figure 24 : Répartition géographique des teneurs en silex des craies de l'ouest du Bassin de Paris.



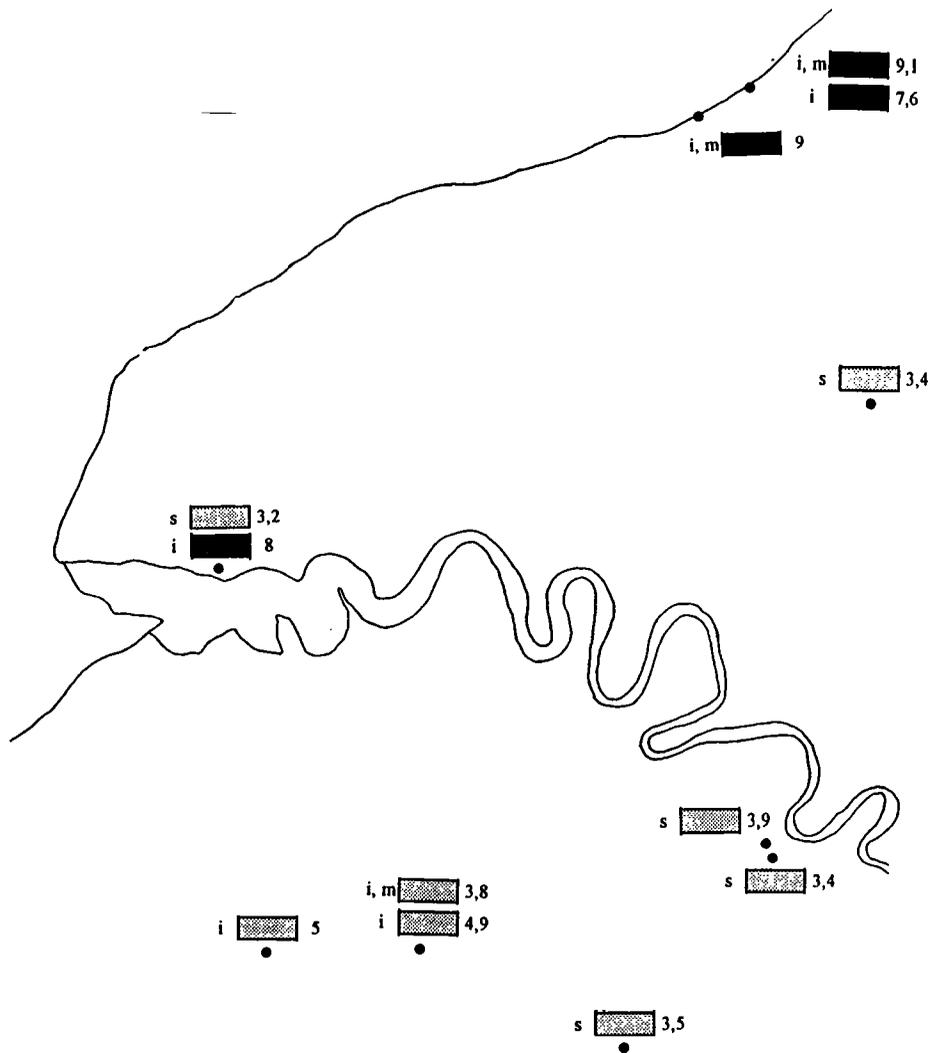


Figure 25 : Répartition géographique des teneurs en fsf des craies turoniennes de l'ouest du Bassin de Paris.

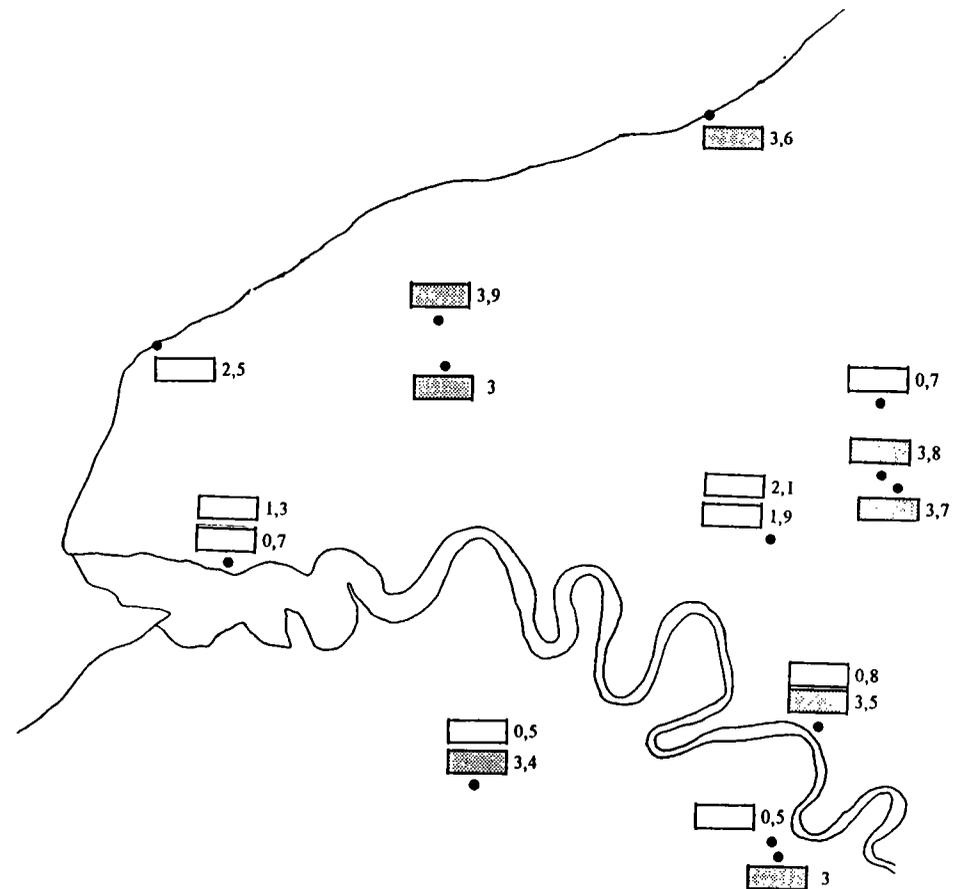
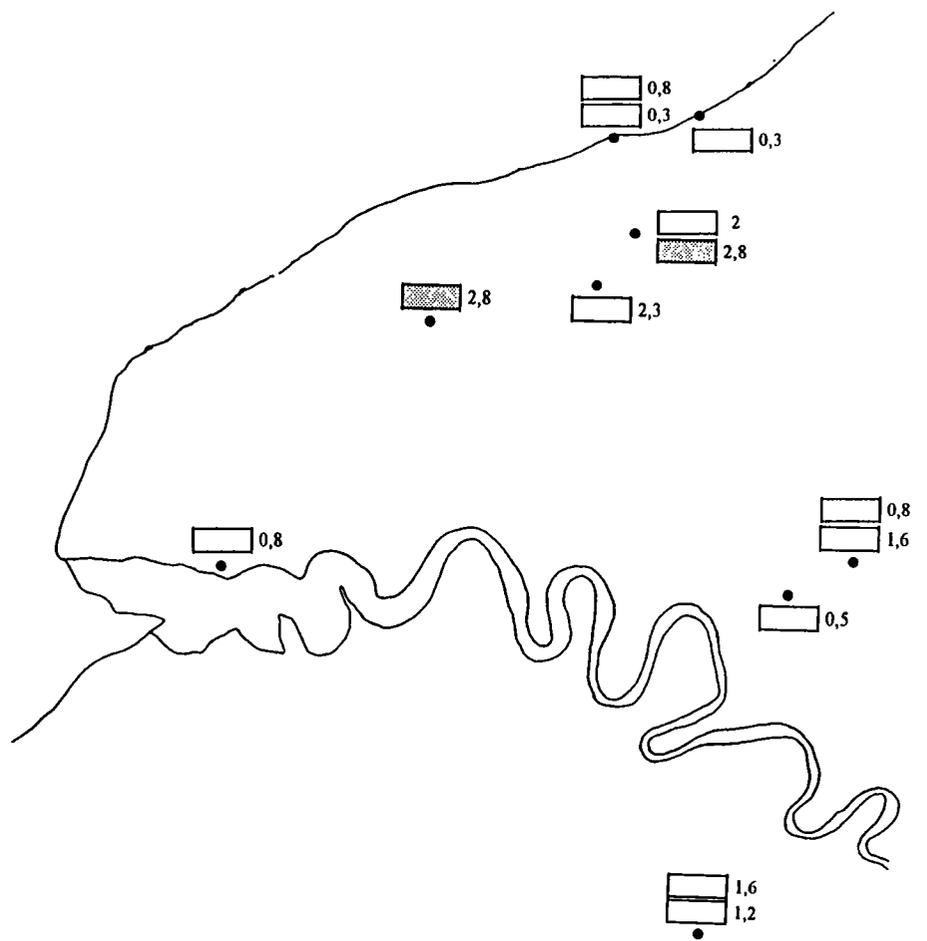


Figure 26 : Répartition géographique des teneurs en fsf des craies coniaciennes de l'ouest du Bassin de Paris.



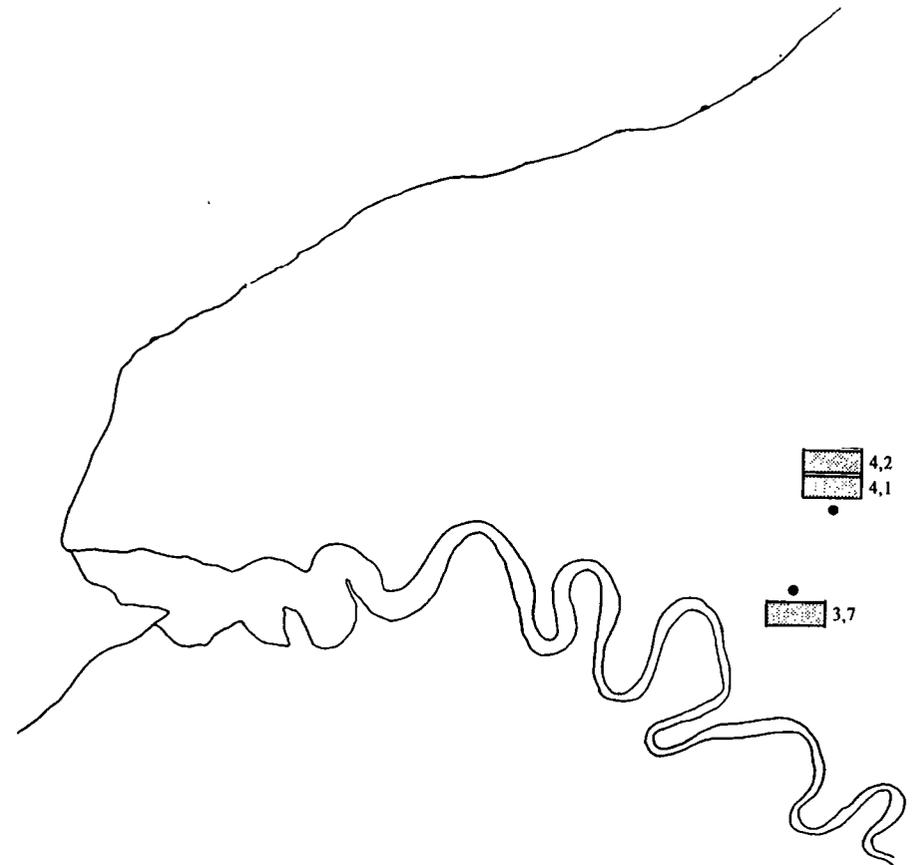


% fsf

- > 5 %
- ▨ 2,6 à 5%
- 0 à 2,5 %

□ 2,3 •

Figure 27 : Répartition géographique des teneurs en fsf des craies santonniennes de l'ouest du Bassin de Paris.



% fsf

- > 5 %
- ▨ 2,6 à 5%
- 0 à 2,5 %

▨ 3  
▨ 3,4  
□ 2,3

▨ 3  
▨ 3,2 •

Figure 28 : Répartition géographique des teneurs en fsf des craies campaniennes de l'ouest du Bassin de Paris.

échantillons	âge	Smectite	Illite	Quartz	Feldspath	Clinoptilolithe	Thomsonite
MEN 2	Turonien	90	10	tr	tr	C	0
SAN 1	Turonien	95	5	Q	0	0	0
ROB 1	Coniacien	90	10	Q	F	0	0
SAN 4	Coniacien	90	10	Q	F	0	0
PTA 2	Coniacien	80	20	Q	F	0	0
HER 2	Santonien	90	10	Q	tr	0	T
SAN 8	Santonien	80	20	Q	F	0	0
SAC 1	Santonien	90	10	Q	tr	0	T
SGE 1	Campanien	85	15	Q	tr	0	tr
DX 2	Campanien	90	10	Q	0	0	T

Tableau 18 : Minéralogie de la fraction argileuse des craies de l'ouest du Bassin de Paris(en %).

Q : Quartz présent ; tr : traces.

#### ***2.2.2.4. Composition chimique de la fraction silicatée fine des craies de l'ouest du Bassin de Paris***

Les compositions chimiques des fsf des craies sont données dans le tableau 19. On constate que celles-ci sont homogènes au sein d'un même étage stratigraphique, à l'exception du Turonien où il existe des différences entre le Turonien inférieur et moyen et le Turonien supérieur.

Les craies coniaciennes, santoniennes et campaniennes sont chimiquement proches. Le Turonien supérieur est également chimiquement proche du groupe précédent, à l'exception toutefois de teneurs en alumine légèrement plus faibles et en MgO plus élevées. Les craies du Turonien inférieur et moyen se démarquent des précédentes, notamment au niveau de SiO<sub>2</sub>, de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et de MgO.

#### ***2.2.2.5. Choix des roches-mères crayeuses théoriques pour chaque site de RS étudié***

Les roches-mères crayeuses théoriques correspondent aux craies retenues comme représentatives des roches-mères pour chaque RS étudié. Le choix a été effectué en fonction :

- des âges des craies-mères des RS, définis par la micropaléontologie des silex creux et la carte du substrat des RS (tabl. 13, cf. II.2.2.1.);
- de la proximité des sites de craies par rapport à chaque RS étudié.

Notons qu'en fonction de la densité des sites de craies à proximité des RS étudiés, ces derniers peuvent avoir une, deux ou plus de deux possibilités de roches-mères crayeuses théoriques. Pour le dernier cas, nous avons retenu les deux craies-mères théoriques aux caractéristiques lithologiques extrêmes (% fsf et % silex extrêmes).

Si l'on prend l'exemple du RS du site de Bolbec, d'après la micropaléontologie et la carte du substrat, la roche-mère crayeuse est santonienne et campanienne. Les sites de craies santoniennes et campaniennes les plus proches du RS de Bolbec sont Robertot, Sâane St Just, Hermanville, Varengerville et Puys pour le Santonien et St Germain les Essourts et St Jacques de Darnétal pour le Campanien. On regroupe alors deux par deux les sites de craie (un Santonien et un Campanien). Cela fait 10 possibilités de roches-mères crayeuses théoriques (tabl. 20). Parmi les 10 roches-mères possibles, seules sont retenues les deux présentant des caractéristiques lithologiques extrêmes (en grisé sur le tableau 20).

### ***2.3. Estimation de la dissolution des silex au cours de l'altération***

G. Vilas Boas (1975) et Y. Dewolf (1977) soulignent que les silex des RS ont subi une dissolution au cours de l'altération des craies à silex et de la formation des RS. La silice dissoute peut alors alimenter des néoformations argileuses au sein des RS. Pour effectuer un bilan d'altération entre les craies à silex et les RS, il est donc indispensable d'évaluer ce phénomène. A partir de la comparaison des silex entre les craies choisies comme roches-mères et les RS, les éventuels effets de la dissolution ont été étudiés sur :

- la minéralogie des silex,
- la taille des silex,

échantillons	âge craies	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO
MEN 1	Turonien i	57,09	13,97	5,67	17	3,64	1,21	0,61	0,81
MEN 2	Turonien i, m	54,73	13,17	7	16,87	4,53	1,23	0,82	1,65
ACQ	Turonien s	61,14	18,71	5,86	8	3,71	0,71	1	0,86
PUY 1	Turonien s	62,08	14,15	6,54	9,81	4,04	1,63	0,88	0,88
PTA	Coniacien	65,46	20,52	6,2	2,65	3,13	0,83	1,12	0,09
PUY 2	Coniacien	61,17	17,94	6,4	9,19	3,28	0,9	0,71	0,41
SAC 2	Santonien	65,26	19,92	7,13	3,37	2,92	0,58	0,81	0,01
SAA	Santonien	63,2	19,31	6,49	5,69	3,32	0,65	0,9	0,43
LCB 2	Campanien	65,04	22,35	5,29	2,77	2,95	0,64	0,96	0
SGE 2	Campanien	63,61	24,03	5,03	2,41	3,24	0,41	1,27	0,01

Tableau 19 : Composition chimique des fsf des craies de l'ouest du Bassin de Paris (en %m).

	<b>Roches-mères crayeuses du RS de Bolbec</b>	<b>% fsf (RS théorique)</b>	<b>% silex (RS théorique)</b>
RS théorique 1	ROB : Santonien SGE : Campanien	20	80
RS théorique 2	SAA : Santonien SGE : Campanien	15	85
RS théorique 3	HER : Santonien SGE : Campanien	16	84
RS théorique 4	VAR : Santonien SGE : Campanien	12	88
RS théorique 5	PUY : Santonien SGE : Campanien	11	89
RS théorique 6	ROB : Santonien SJD : Campanien	19	81
RS théorique 7	SAA : Santonien SJD : Campanien	14	86
RS théorique 8	HER : Santonien SJD : Campanien	16	84
RS théorique 9	VAR : Santonien SJD : Campanien	11	89
RS théorique 10	PUY : Santonien SGE : Campanien	10	90

Tableau 20 : Choix des craies-mères théoriques pour le RS de Bolbec.

Les RS théoriques sont obtenus à partir des quantités de silex et de fsf contenus dans les craies-mères.

- le volume des cavernes présentes dans les silex,
- le cortex des silex.

Pour les différents calculs du bilan d'altération, avec une composition chimique comprenant 95 à 98 % de SiO<sub>2</sub> (Kars *et al.*, 1987 ; Vilas Boas, 1975), les silex sont considérés comme totalement siliceux.

### **2.3.1. Minéralogie des silex des craies et des RS**

#### ***2.3.1.1. Minéralogie des silex des craies***

G. Vilas Boas (1975) décrit dans le centre du Bassin de Paris deux grands types de silex avec des compositions minéralogiques différentes :

- les silex embryonnaires, riches en calcite, avec de la silice essentiellement sous forme de tridymite et éventuellement de calcédoine ; le quartz pouvant apparaître à l'état de traces ;
- les silex évolués, où la silice est sous forme de quartz microcristallin et de calcédoine ; la tridymite et la cristobalite pouvant être présentes à l'état de traces.

Entre ces deux types, tous les intermédiaires sont possibles. Il explique que les silex embryonnaires évoluent au cours de la diagenèse avec transformation de l'opale (tridymite) en quartz. Il souligne que cette transformation est lente, puisqu'il existe encore aujourd'hui des silex embryonnaires.

Notre étude sur la minéralogie des silex des craies de l'ouest du Bassin de Paris ne confirme pas les résultats de G. Vilas Boas (1975). En effet, les diagrammes de diffraction des rayons X indiquent que les silex des craies sont uniquement composés de quartz. D'après les observations au microscope optique, le quartz se trouve essentiellement sous forme microcristalline, la calcédoine étant présente en faible quantité. La cristallinité du quartz est mauvaise (0,7 à 1,9) et il n'y a pas de différence entre le cortex et le reste du silex. P. Pangalos (1984) remarque également qu'il ne trouve pas d'opale dans des silex de la craie prélevés à Etretat.

Si l'on compare les travaux de G. Vilas Boas (1975) et nos résultats, on peut donc penser qu'il existe une différence de composition minéralogique entre les silex des craies de l'ouest et du centre du Bassin de Paris. Dans le centre, on trouverait toute une gamme de silex, depuis un pôle embryonnaire jusqu'à un pôle évolué, alors que dans l'ouest, seuls les silex "évolués" sont présents.

#### ***2.3.1.2. Comparaison minéralogique des silex entre les craies et les RS***

On ne constate pas de différence minéralogique entre les silex des craies et ceux des RS. Au microscope optique, ils sont tous composés essentiellement de quartz microcristallin et d'un peu de calcédoine, et en diffraction des rayons X leur cristallinité est mauvaise ( index de cristallinité de 1,2 à 3,1 pour les silex des RS et de 0,7 à 2,9 pour ceux des craies).

Selon G. Vilas Boas (1975), pour le centre du Bassin de Paris, les silex des craies sont constitués d'opale (tridymite), de calcédoine et de quartz microcristallin dans des proportions

pouvant être très variables. Les silex des RS sont composés principalement de quartz microcristallin. Il explique qu'au cours de la formation du RS, on a une altération des silex qui se traduit par une dissolution de l'opale et de la calcédoine, tandis que seul le quartz microcristallin subsiste. Une partie de ce dernier peut d'ailleurs être dissous par la suite. La silice dissoute peut alors être remobilisée pour donner des veines de quartz et de calcédoine au sein du silex ou migrer pour alimenter les silicifications et les néoformations argileuses. G. Vilas Boas souligne que l'altération des silex conduit également à une fragmentation de ces derniers et à la conservation uniquement des blocs de quartz microcristallin qui peuvent subir en partie à leur tour une fragmentation et une dissolution.

Pour l'ouest du Bassin de Paris, on ne peut pas retenir cette hypothèse, dans la mesure où les silex des craies et des RS ont une composition minéralogique identique. Toutefois, l'épaisseur du cortex un peu plus importante pour les silex des RS que pour ceux des craies et la présence parfois de cavernes en surface sur les silex des RS témoignent d'une altération des silex. Si l'on se réfère aux travaux de G. Vilas Boas (1975), cette dissolution des silex, si elle est indéniable, est vraisemblablement plus limitée à l'ouest qu'au centre du Bassin de Paris, dans la mesure où elle se réalise à partir de silex composés principalement de quartz, plus résistant à l'altération que les formes de l'opale.

Le processus de fragmentation des silex, évoqué par G. Vilas Boas, ne peut être non plus retenu ici. En effet, l'étude de la fragmentation des silex (cf. II.1.5.1.) a montré que les silex des RS de plateau sont peu fragmentés.

G. Vilas Boas (1975) indique qu'il peut exister des types régionaux d'accidents siliceux pouvant engendrer diverses provinces d'argiles à silex. Si cette hypothèse peut être éventuellement retenue entre le centre et l'Ouest du Bassin de Paris, en revanche, elle ne permet pas d'expliquer les différentes familles de RS mises en évidence à l'ouest du Bassin de Paris.

### **2.3.2. Comparaison de la taille des silex entre les roches-mères crayeuses théoriques et les RS**

Afin d'avoir une bonne représentation statistique, nous avons mesuré l'épaisseur de 100 silex sur deux sites de RS réels (Beuzeville et St Jean du Theney) et sur les craies retenues comme roches-mères de ces deux RS. Des classes de tailles de silex ont ensuite été définies (0-5 cm, 6-10 cm, 11-15 cm, 16-20 cm et >20 cm) et le nombre de silex entrant dans chacune de ces classes a été comptabilisé.

Les résultats illustrés sur la figure 29 indiquent qu'entre les RS et les craies retenues comme roches-mères le nombre de silex pour chaque classe de taille est proche. Ceci montre qu'au cours de l'altération la taille des silex n'a pas varié de façon significative.

### **2.3.3. Comparaison du volume de cavernes des silex entre les roches-mères crayeuses théoriques et les RS**

La démarche pour calculer le volume de cavernes des silex est la suivante :

- quantification du pourcentage de silex caverneux au sein des RS et des craies retenues comme roches-mères (selon la méthode exposée dans le I.2.3.1.) ;

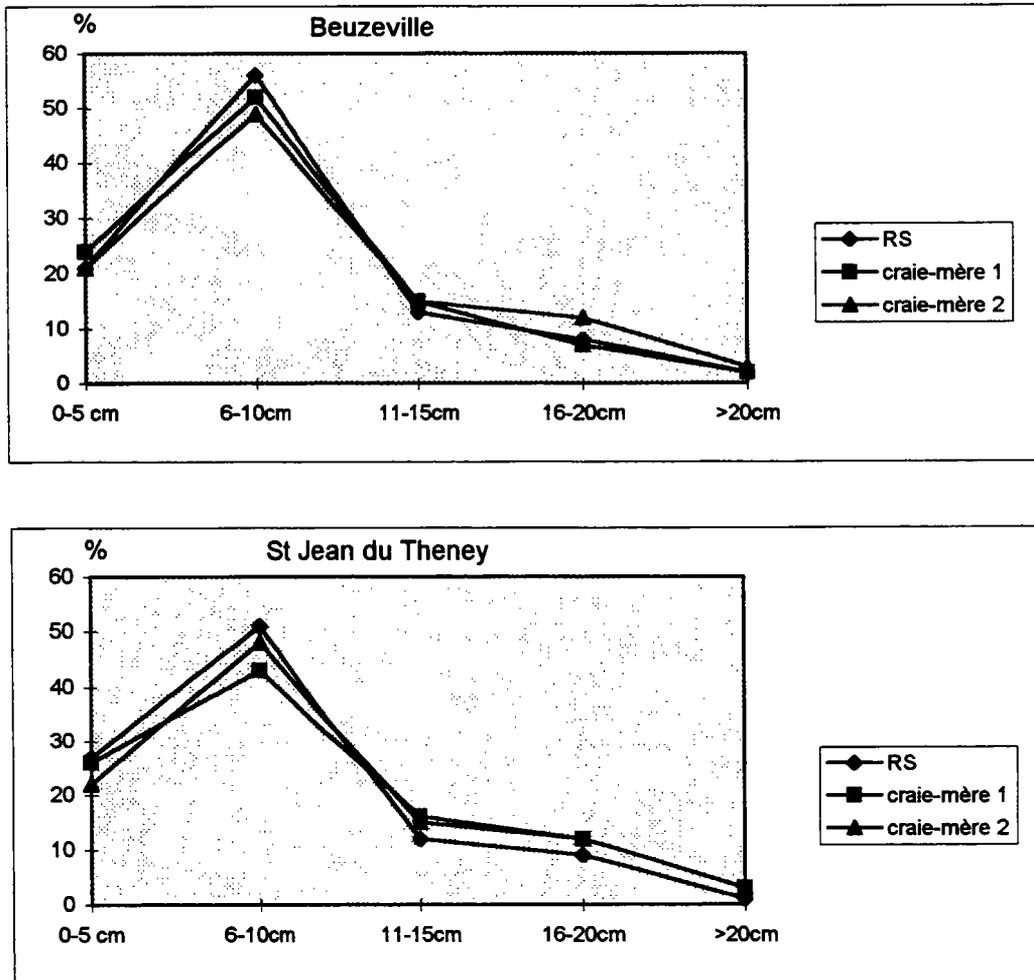


Figure 29 : Comparaison de l'épaisseur des silex entre les RS et les craies choisies comme roches-mères pour les sites de Beuzeville et de St Jean du Theney.

- estimation du pourcentage volumique de cavernes par analyse photographique pour 10 silex caverneux choisis comme représentatifs de la population des silex caverneux (tabl. 21). Le pourcentage volumique de cavernes pour les 10 silex étudiés varie entre 9,3 et 21,6 % avec une moyenne de 14,7 % +/- 3,8 %. La mesure obtenue par analyse photographique correspond en réalité à un pourcentage surfacique, lequel est considéré comme un pourcentage volumique. Cette approximation nous a paru réaliste dans la mesure où, quels que soient les silex caverneux (des RS ou des craies), à l'observation la surface des cavernes semble proportionnelle à leur profondeur et à leur volume (les cavernes avec les plus grandes surfaces sont les plus profondes et présentent les volumes les plus importants, et inversement pour les cavernes avec les plus petites surfaces) ;
- connaissant le pourcentage de silex caverneux au sein des RS réels et des craies-mères, le pourcentage volumique moyen de cavernes (14,7 %), on multiplie ces deux valeurs afin d'obtenir le pourcentage volumique total de cavernes au sein de l'ensemble de la population des silex des RS et des craies-mères (silex caverneux + silex non caverneux) ;
- on fait ensuite la différence entre le pourcentage volumique total de cavernes du RS et celui de la craie-mère correspondante et l'on obtient un pourcentage volumique de vide qui correspond au pourcentage volumique de SiO<sub>2</sub> dissous à l'origine des cavernes.

Les pourcentages volumiques de cavernes des silex des RS et de leurs craies-mères et le pourcentage volumique de SiO<sub>2</sub> dissous sont présentés dans le tableau 22. On constate que le pourcentage de SiO<sub>2</sub> dissous (à l'origine des cavernes) est faible, de 0 à 2,5 %. On notera qu'il y a trois chiffres négatifs dans le tableau 22. Ceci signifie que les silex des craies choisies comme roches-mères sont légèrement plus caverneux que ceux des RS. Dans ce cas, on considère que la dissolution des silex est nulle.

#### 2.3.4. Comparaison des cortex des silex des RS et des roches-mères crayeuses théoriques

On procède de la manière suivante :

- quantification du pourcentage volumique de cortex des silex des RS et des craies retenues comme roches-mères (selon la méthode exposée dans le 1.2.3.1.) ;
- calcul de la différence entre le pourcentage volumique de cortex des silex des RS et celui des craies-mères correspondantes. On a alors le pourcentage volumique de cortex lié à l'altération des silex ;
- mesure de la porosité des cortex de silex et des silex sans leur cortex des RS et des craies-mères (tabl. 23). Que ce soit pour la porosité des silex sans leur cortex ou celle des cortex, les valeurs entre RS et craies sont proches. Pour le cortex, les porosités supérieures à 14 % sont exceptionnelles et ne sont pas représentatives du cas général observé sur le terrain. On retiendra une porosité de 10 % pour les cortex des silex et de 1 % pour les silex sans leur cortex (RS et craies-mères confondus) ;
- on multiplie le pourcentage volumique de cortex lié à l'altération des silex par la différence de porosité (Po) entre cortex et silex sans leur cortex (Po = 9) et on obtient le pourcentage volumique de SiO<sub>2</sub> dissous au niveau du cortex des silex.

Le pourcentage de SiO<sub>2</sub> dissous (sous la forme de cortex) est faible (tabl. 24). Il est généralement compris entre 0,5 et 2,9 %, sauf pour deux échantillons (Vas p1a et Cha) où il est voisin de 4 %.

#### 2.3.5. Estimation de la dissolution des silex au cours de l'altération

Les différentes comparaisons réalisées entre les silex des RS réels et ceux des craies retenues comme roches-mères ont montré que **la minéralogie et la taille des silex ne varient pas de façon sensible au cours de l'altération des craies à silex et de la formation des RS. Seuls les cavernes à la surface des silex et le cortex de ces derniers varient faiblement au**

	<b>%v cavernes</b>
<b>silex n° 1</b>	16,6
<b>silex n° 2</b>	11,9
<b>silex n° 3</b>	19,3
<b>silex n° 4</b>	17,1
<b>silex n° 5</b>	9,3
<b>silex n° 6</b>	10,1
<b>silex n° 7</b>	21,6
<b>silex n° 8</b>	15,1
<b>silex n° 9</b>	11,9
<b>silex n° 10</b>	14,3
<b>moyenne</b>	14,7
<b>écartype</b>	3,8

Tableau 21 : Pourcentage volumique (%v) de cavernes mesuré sur dix silex caverneux.

	<b>%v cavernes craie-mère 1</b>	<b>%v cavernes craie-mère 2</b>	<b>%v cavernes RS</b>	<b>%SiO2 dissout 1</b>	<b>%SiO2 dissout 2</b>
<b>Bc</b>	0,2	0,6	1,2	1,0	0,7
<b>San</b>	0,2	0,6	1,6	1,4	1,1
<b>Beu</b>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Lie</b>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>MTS</b>	0,0	0,3	1,6	1,6	1,3
<b>MTM</b>	0,0	0,3	1,6	1,6	1,3
<b>Vas</b>	0,0	0,2	2,4	2,4	2,2
<b>Mol</b>	0,0	0,2	1,2	1,2	1,0
<b>By</b>	0,0	0,2	2,5	2,5	2,3
<b>CDE</b>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>SJT</b>	0,0	0,2	0,3	0,3	0,2
<b>Ven</b>	0,0	0,2	0	0,0	-0,2
<b>Neu</b>	0,0	0,1	0,0	0,0	-0,1
<b>BSO</b>	0,1	0,0	0,0	-0,1	0,0
<b>A29a</b>	0,5	0,0	1,8	1,3	1,8
<b>Yv</b>	0,5	0,0	1,5	1,0	1,5
<b>A/C</b>	0,0	0,5	0,9	0,9	0,5
<b>Cha</b>	0,0	0,5	0,9	0,9	0,5

Tableau 22 : Pourcentage de SiO2 dissous au niveau des cavernes des silex au cours de l'altération.

% SiO2 dissous = %v cavernes craie-mère - %v cavernes RS.

	<b>RS</b> <b>silex sans leur cortex</b>	<b>craie</b> <b>silex sans leur cortex</b>
	0,14	0,35
	0,54	0,4
	1,67	0,62
	1,8	0,25
	0,2	1,43
	0,25	0,61
	0,24	0,59
	0,9	
	0,2	
	0,17	
<b>moyenne</b>	<b>0,61</b>	<b>0,61</b>
<b>écartype</b>	<b>0,60</b>	<b>0,36</b>
<b>max</b>	<b>1,8</b>	<b>1,43</b>
<b>min</b>	<b>0,14</b>	<b>0,25</b>

	<b>RS</b> <b>cortex</b>	<b>craie</b> <b>cortex</b>
	8,21	17
	8,06	14,22
	22,45	11,16
	7,81	11,84
	20,74	9,79
	9,79	9,37
	9,37	8,8
	8,8	8,23
	8,23	
	11,06	
	11,81	
<b>moyenne</b>	<b>11,48</b>	<b>11,30</b>
<b>écartype</b>	<b>4,93</b>	<b>2,81</b>
<b>max</b>	<b>22,45</b>	<b>17</b>
<b>min</b>	<b>7,81</b>	<b>8,23</b>

Tableau 23 : Porosité (en %) des silex sans leur cortex et des cortex des silex des RS et des craies.

sites	%v cortex craie-mère 1	%v cortex craie-mère 2	%v cortex RS	RS - cm1	%v SiO2 dis1	RS - cm2	%v SiO2 dis2
<b>Bc</b>	12,3	5,3	21,0	8,8	<b>0,8</b>	15,8	1,4
<b>San</b>	12,3	5,3	29,0	16,8	<b>1,5</b>	23,8	2,1
<b>Beu</b>	8,0	12,5	18,0	10,0	<b>0,9</b>	5,5	0,5
<b>Lie</b>	10,0		26,0	16,0	<b>1,4</b>		
<b>MTS</b>	7,3		18,0	10,8	<b>1,0</b>		
<b>MTM</b>	7,3		39,0	31,8	<b>2,9</b>		
<b>Vas p1a</b>	9,2		54,0	44,8	<b>4,0</b>		
<b>Vas p1b</b>	9,2		31,0	21,8	<b>2,0</b>		
<b>By</b>	9,2		24,0	14,8	<b>1,3</b>		
<b>CDE</b>	10,0		18,0	8,0	<b>0,7</b>		
<b>SJT</b>	10,0		30,0	20,0	<b>1,8</b>		
<b>Ven</b>	13,5	9,1	38	24,5	<b>2,2</b>	28,9	2,6
<b>Neu</b>	12,3	7,8	36,0	23,8	<b>2,1</b>	28,3	2,5
<b>BSO</b>	12,0	6,5	22,0	10,0	<b>0,9</b>	15,5	1,4
<b>A29a</b>	5,7	12,2	26,0	20,3	<b>1,8</b>	13,8	1,2
<b>Yv</b>	5,7	12,2	24,0	18,3	<b>1,7</b>	11,8	1,1
<b>A/C</b>	10,4	8,4	20,0	9,6	<b>0,9</b>	11,6	1,0
<b>Cha</b>	10,4	8,4	56,0	45,6	<b>4,1</b>	47,6	4,3

Tableau 24 : Pourcentage volumique (%v) de SiO2 dissous au niveau du cortex des silex au cours de l'altération.  
cm1 : craie-mère 1, RS - cm : %v de cortex apparu au cours de l'altération.

**cours de l'altération.** On peut alors estimer le pourcentage de silice dissoute au niveau des silex au cours de l'altération en additionnant les pourcentages de SiO<sub>2</sub> dissous calculés pour ces deux critères (cf. II.2.3.3. et II.2.3.4.) (tabl. 25).

**Le pourcentage de SiO<sub>2</sub> dissous est faible,** entre 0,5 et 7,1 %. Seuls quatre RS présentent des valeurs supérieures à 4 %.

## 2.4. Reconstitution des épaisseurs de craies dissoutes

Etant admis que les silex des RS proviennent en totalité de la craie, le calcul des épaisseurs de craies dissoutes nécessaires pour donner les épaisseurs de RS observés sur le terrain est basé sur les quantités de silex contenues dans les craies-mères théoriques et les RS.

### - Méthode de calcul (fig. 30)

→ Détermination de la quantité de silex (% volumique) dans les craies-mères théoriques et les RS. Pour les RS, on distingue ceux avec une épaisseur inférieure ou égale à 10 m, de ceux avec une épaisseur supérieure à 10 m. Pour les RS dont l'épaisseur est inférieure ou égale à 10 m, les quantités de silex sont mesurées à partir des analyses granulométriques et des comptages minéralogiques à la loupe binoculaire et au microscope optique. Ces comptages permettent de différencier et de quantifier les pourcentages de silex et de fsf de la fraction sableuse (les cailloux et les graviers sont constitués uniquement de silex, tandis que les limons et argiles correspondent à la fsf). Pour les RS dont l'épaisseur est supérieure à 10 m, le pourcentage de silex pour les dix premiers mètres est obtenu comme ci-dessus. Au-delà de 10 m, on a constaté une augmentation de la teneur en silex avec la profondeur. On fait alors une approximation en extrapolant les données du site A/C aux autres sites dont l'épaisseur de RS est supérieure à 10 m. On considère que de 10 à 15 m on a 60 à 70 % de silex et au delà de 15 m 70 à 80 % ;

→ Calcul de l'épaisseur de silex dans les craies-mères et les RS. Pour les craies-mères, l'épaisseur de silex est déterminée pour 100 m de craie. Pour les RS, d'après les affleurements et le cas échéant les sondages, on connaît l'épaisseur de RS pour chaque site. Connaissant le pourcentage volumique de silex et l'épaisseur de RS on en déduit l'épaisseur de silex. Pour les RS dont l'épaisseur est supérieure ou égale à 10 m, on effectue deux calculs :

- \* épaisseur minimum de silex en prenant de 0 à 10 m le pourcentage de silex calculé avec la granulométrie et les comptages minéralogiques, de 10 à 15 m, 60 % de silex et au delà de 15 m, 70 % de silex ;
- \* épaisseur maximum de silex en prenant de 0 à 10 m comme ci-dessus, de 10 à 15 m, 70 % de silex et au delà de 15 m, 80 % de silex.

→ correction de l'épaisseur de silex dans les RS en fonction du pourcentage de SiO<sub>2</sub> dissous au niveau des silex au cours de l'altération (estimé dans II.2.3.5.) pour retrouver le stock de silex non altéré à l'origine dans les craies-mères.

$$\text{soit : } RM - \%SiO_2 \text{ dissous} \times RM = RS$$

avec RM = % silex dans la craie-mère (silex non altéré à l'origine)

et RS = % silex dans le résidu à silex (silex altéré)

$$\text{soit : } RM \times (1 - \% SiO_2 \text{ dissous}) = RS$$

$$\text{d'où : } RM = RS / (1 - \% SiO_2 \text{ dissous})$$

L'exemple du site de Bolbec ci-dessous illustre le principe de calcul.

Sur le site de Bolbec, l'épaisseur de RS est de 10 m, avec une épaisseur de silex de 5,70 m. Le pourcentage de SiO<sub>2</sub> dissous pour les silex de Bolbec est estimé à 2,1 %. On a alors :

$$5,70 / (1 - 0,021) = 5,82 \text{ m de silex non altéré à l'origine ;}$$

→ calcul de l'épaisseur de craie altérée. Ce calcul est accompli par une règle de trois illustrée par l'exemple du site de Bolbec ci-dessous.

Dans 100 m de craie retenue comme roche-mère du RS de Bolbec, on a 12,20 m de silex. Pour donner 10 m de RS avec 5,82 m de silex, il faut donc dissoudre :

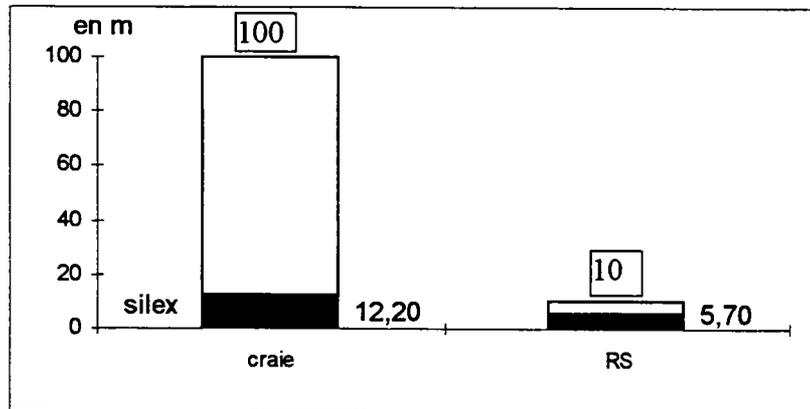
	<b>%SiO2 dis Total 1</b>	<b>%SiO2 dis Total 2</b>
<b>Bc</b>	1,8	2,1
<b>San</b>	2,9	3,2
<b>Beu</b>	0,9	0,5
<b>Lie</b>	1,4	2,3
<b>MTS</b>	2,6	2,9
<b>MTM</b>	4,5	4,8
<b>Vas p1a</b>	6,4	7,1
<b>Vas p1b</b>	4,4	5,0
<b>By</b>	3,8	4,5
<b>CDE</b>	0,7	1,6
<b>SJT</b>	2,1	2,9
<b>Ven</b>	2,2	2,6
<b>Neu</b>	2,1	2,5
<b>BSO</b>	0,9	1,4
<b>A29a</b>	3,1	3,0
<b>Yv</b>	2,7	2,6
<b>A/C</b>	1,8	1,5
<b>Cha</b>	5,0	4,7

Tableau 25 : Estimation du pourcentage volumique de SiO2 dissous au niveau des silex au cours de la formation des RS.

**Teneur en silex de 100 m de craie et de 10 m de RS  
(exemple RS de Bolbec)**

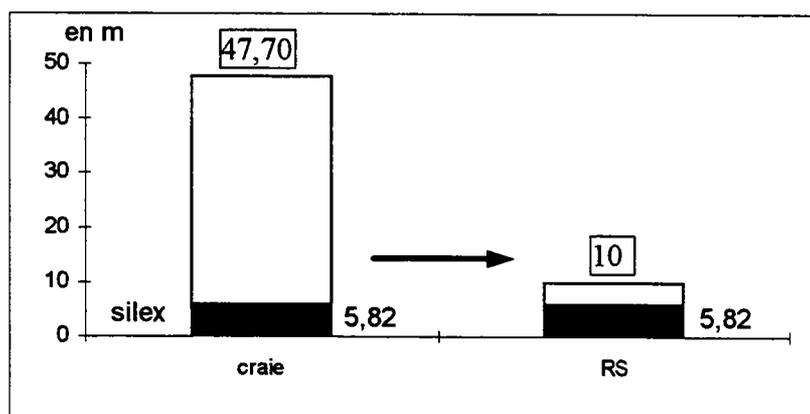
% silex dans les craies : d'après les levés de coupes

% silex dans les RS : d'après les granulométries et les comptages minéralogiques



**Correction % silex RS**  
(dissolution des silex au cours de l'altération)

**Épaisseur de craie nécessaire pour donner un RS avec 5,82 m de silex  
(ex : RS de Bolbec)**



**Figure 30 : Méthode de calcul des épaisseurs de craies nécessaires pour donner les épaisseurs de RS.**

Exemple du site de RS de Bolbec.

$$5,82 \times 100 / 12,20 = 47,70 \text{ m de craie à silex.}$$

### - Résultats

Les résultats représentés sur la figure 31 indiquent que :

- dans l'est du Pays de Caux et le Talou, les épaisseurs de craie dissoutes sont faibles, 10 à 11 m ;
- dans le reste du Pays de Caux, pour des épaisseurs de RS en moyenne de 10 m, il faut dissoudre 40 à 43 m de craie ;
- dans l'Eure, les épaisseurs de craie disparue sont variables selon la localisation géographique. C'est dans la partie centrale qu'elles sont les plus importantes, avec 91 à 100 m de craie dissoute pour 20 m de RS et 117 m pour 25 m de RS ;
- dans le Perche, le site de La Ventrouze indique une épaisseur de craie dissoute de 31 m pour donner un RS de 6 m ;
- dans le nord de l'Eure et Loir, c'est ici que les épaisseurs de craie dissoute sont les plus importantes, avec 196 à 205 m pour des RS de 39 à 40 m.

## 2.5. Bilan granulométrique

Il s'agit de comparer les quantités d'insolubles (silex et fsf = fraction silicatée fine) contenues dans les RS et les craies choisies comme roches-mères. Ceci permet de vérifier si les quantités d'insolubles des craies-mères théoriques sont suffisantes pour donner les RS.

Sachant que les silex proviennent en totalité de la craie et ayant estimé leur altération, on peut à partir de cette comparaison, évaluer les éventuels apports allochtones en fsf au sein des RS observés sur le terrain (RS réels).

### - Méthode de calcul

On procède de la façon suivante (fig. 32) :

- ① quantification en mètres des teneurs en silex et en fsf dans les RS réels (selon la démarche définie en II.2.4.) ;
- ② détermination de RS théoriques à partir des quantités de fsf et de silex contenus dans les craies définies comme roches-mères (teneurs en mètres en fonction de l'épaisseur des RS réels) ;
- ③ correction des RS théoriques en fonction de l'altération des silex. Le pourcentage de SiO<sub>2</sub> dissous au niveau des silex est connu d'après le II.2.3.5. La silice peut, soit être évacuée, soit enrichir la matrice des RS en participant à des néoformations argileuses. On calcule alors un RS théorique où l'on retranche le pourcentage de SiO<sub>2</sub> dissous au silex, puis un autre RS théorique où le pourcentage de SiO<sub>2</sub> dissous est retranché au silex et ajouté à la fsf (pour chaque site de RS étudié) ;
- ④ quantification des apports extérieurs en fsf. A partir du calcul précédent, on obtient deux RS théoriques qui peuvent être comparés au RS réel. L'épaisseur de silex des RS théoriques doit être logiquement égale à celle du RS réel. Si ce n'est pas le cas, on ramène l'épaisseur de silex des deux RS théoriques à celle du RS réel, et les épaisseurs de fsf sont recalculées par une règle de trois afin de respecter les proportions silex-fsf des RS théoriques et donc des craies-mères ;

Cette démarche est illustrée par l'exemple du RS de Bolbec ci-dessous :

- ① l'épaisseur du RS de Bolbec est de 10 m, dont 5,7 m de silex et 4,3 m de fsf ;

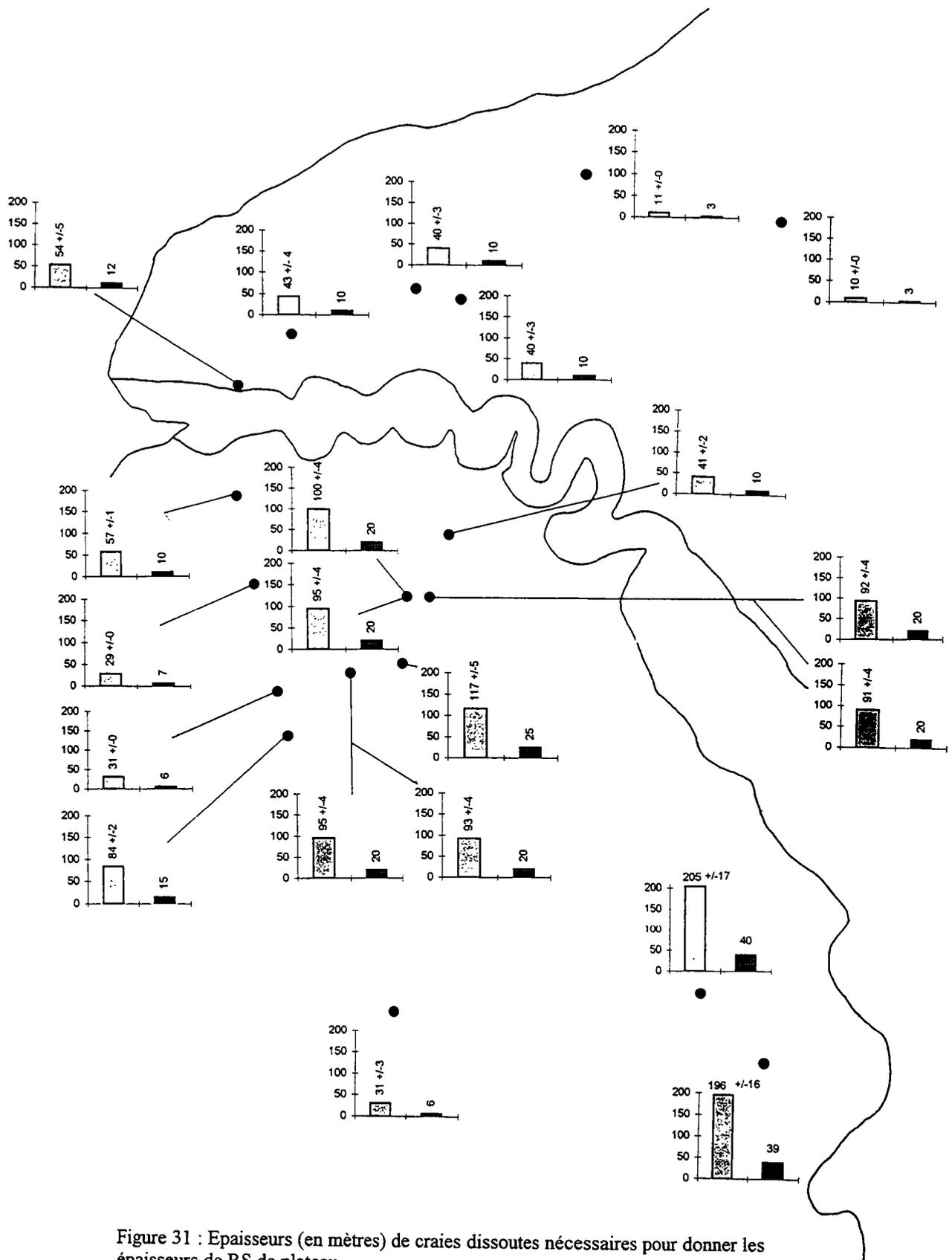
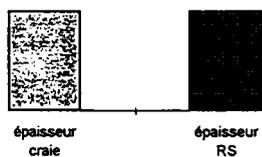
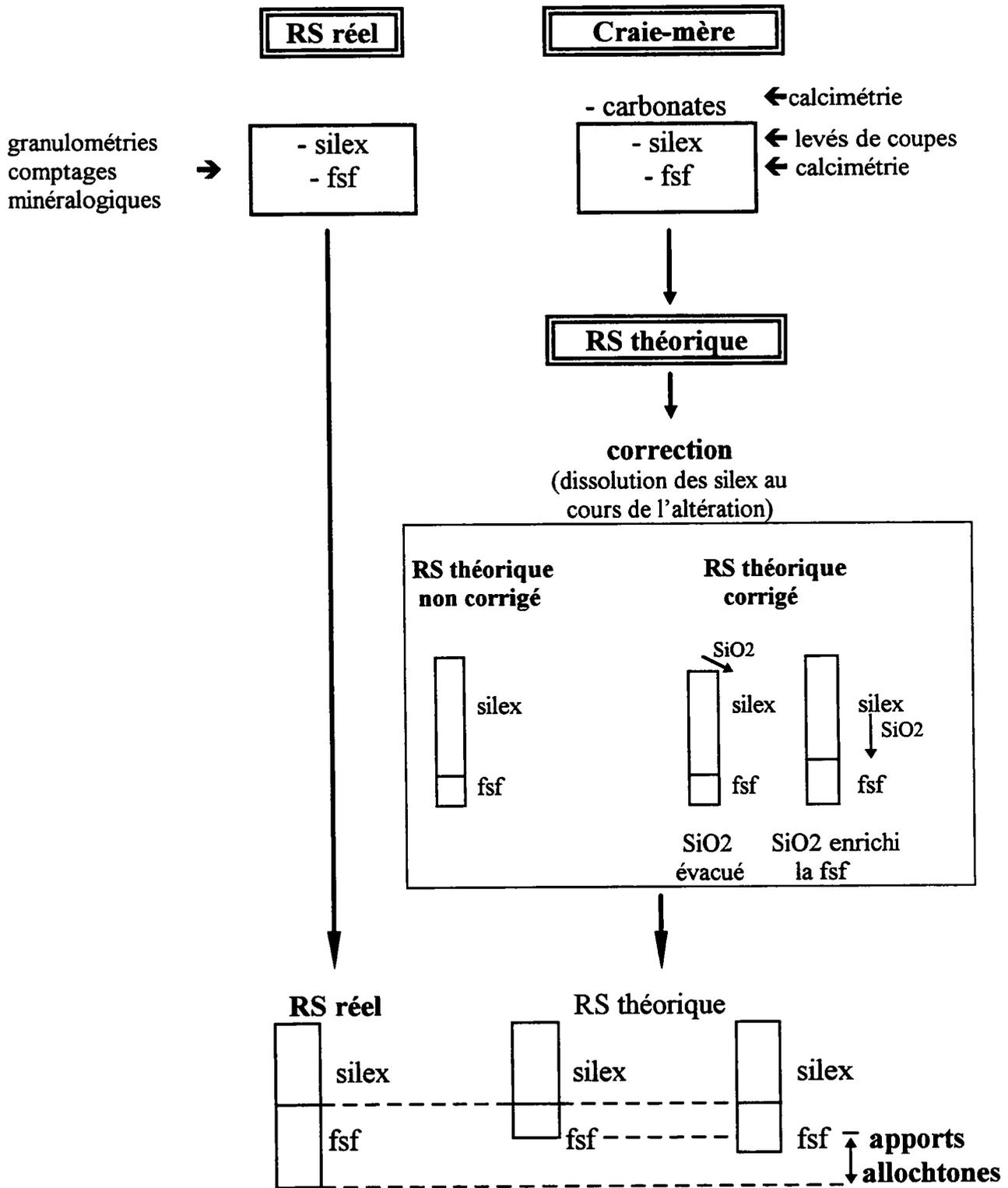


Figure 31 : Epaisseurs (en mètres) de craies dissoutes nécessaires pour donner les épaisseurs de RS de plateau.





**Figure 32 : Bilan granulométrique - Méthodologie**  
(fsf : fraction silicatée fine)

- ② à partir des éléments insolubles contenus dans les craies choisies comme roches-mères du RS de Bolbec, on calcule deux RS théoriques aux caractéristiques lithologiques extrêmes. Pour 10 m de RS, on a un RS théorique 1 avec 8 m de silex et 2 m de fsf et un RS théorique 2 avec 9 m de silex et 1 m de fsf ;

- ③ le pourcentage volumique de SiO<sub>2</sub> dissous au niveau des silex du RS de Bolbec est estimé à 1,79 % pour le RS théorique 1 (RSt<sub>h1</sub>) et 2,07 pour le RS théorique 2 (RSt<sub>h2</sub>). Ceci donne :

pour RSt<sub>h1</sub> :  $8 \times 1,79 / 100 = 0,14$  m de silex dissous

pour RSt<sub>h2</sub> :  $9 \times 2,07 / 100 = 0,19$  m de silex dissous

Dans le cas où la silice dissoute enrichit la matrice, on a alors :

pour RSt<sub>h1</sub> :  $8 - 0,14 = 7,86$  m de silex

$2 + 0,14 = 2,14$  m de fsf

pour RSt<sub>h2</sub> :  $9 - 0,19 = 8,81$  m de silex

$1 + 0,19 = 1,19$  m de fsf

Ceci donne un RS théorique moyen composé de 8,33 +/- 0,48 m de silex et de 1,66 +/- 0,48 m de fsf.

- ④ sachant que les silex proviennent en totalité de la craie, on devrait avoir une épaisseur de silex dans le RS théorique de 5,7 m comme le RS réel et non pas de 8,3 m. Ceci correspond à une épaisseur de fsf pour le RS théorique de :  $1,66 \times 5,7 / 8,33 = 1,14$  m

Or, l'épaisseur de fsf dans le RS réel est de 4,3 m. Ceci correspond donc à un apport extérieur de fsf de :  $4,3 - 1,14 = 3,16$  m

Soit à un apport en pourcentage, pour les 10 m de RS, de :  $3,16 \times 100 / 10 = 31,6$  %.

## -Résultats

Les résultats sont reportés sur les figures 33 et 34.

Quelle que soit l'hypothèse considérée au niveau de l'altération des silex (silice évacuée ou enrichissant la matrice), l'épaisseur de fsf des RS théoriques (obtenue à partir des craies-mères) est toujours inférieure à celle des RS réels. Ceci signifie que **les RS ne sont pas uniquement un produit d'altération de la craie**. Il est donc **nécessaire de faire intervenir des apports allochtones pour retrouver les teneurs en fsf (ou matrice) des RS réels**. Les apports (par rapport à l'ensemble du matériau : silex + fsf) sont importants : ils varient de 14 à 48 % selon les sites. Par rapport à la fsf seule, ces apports représentent 39 à 86 %.

Que la silice issue de l'altération des silex enrichisse ou non la matrice, étant donné le faible pourcentage volumique de SiO<sub>2</sub> dissous, son rôle est insignifiant dans le calcul des apports extérieurs.

Géographiquement (fig. 33 et 34) :

- le RS de l'est du Pays de Caux et du Talou possède les apports allochtones en fsf les plus importants, de 38 à 48 % ;
- le RS du reste du Pays de Caux présente des contaminations importantes et relativement homogènes d'un site à un autre, avec des apports en fsf compris entre 30 et 35 % ;
- les apports extérieurs en fsf sont très hétérogènes dans l'Eure, de 14 à 41 % selon les sites. Cependant, l'hétérogénéité est essentiellement marquée dans le nord et l'ouest de l'Eure, tandis que dans le centre la contamination du RS est plus homogène, de 20 à 28 % ;
- dans le Perche et le nord de l'Eure et Loir, les apports extérieurs en fsf sont homogènes et peu élevés par rapport à ceux du Pays de Caux et du Talou, de 17 à 23 %.

**Verticalement, les apports extérieurs en fsf diminuent avec la profondeur (fig. 35).**

Que la silice issue de l'altération des silex enrichisse ou non la matrice, on constate sur les sites où l'épaisseur de RS est supérieure à 10 m, de 0 à 10 m des apports élevés (de 18 à 41 %) qui deviennent plus faibles au-delà de 15 m avec des valeurs inférieures à 16 %. Pour la partie centrale de l'Eure (Vas, MtM, By et Mol), on remarque une forte homogénéité dans la contamination des RS et dans l'évolution verticale de celle-ci, tandis que dans le nord de l'Eure et Loir elle est hétérogène.

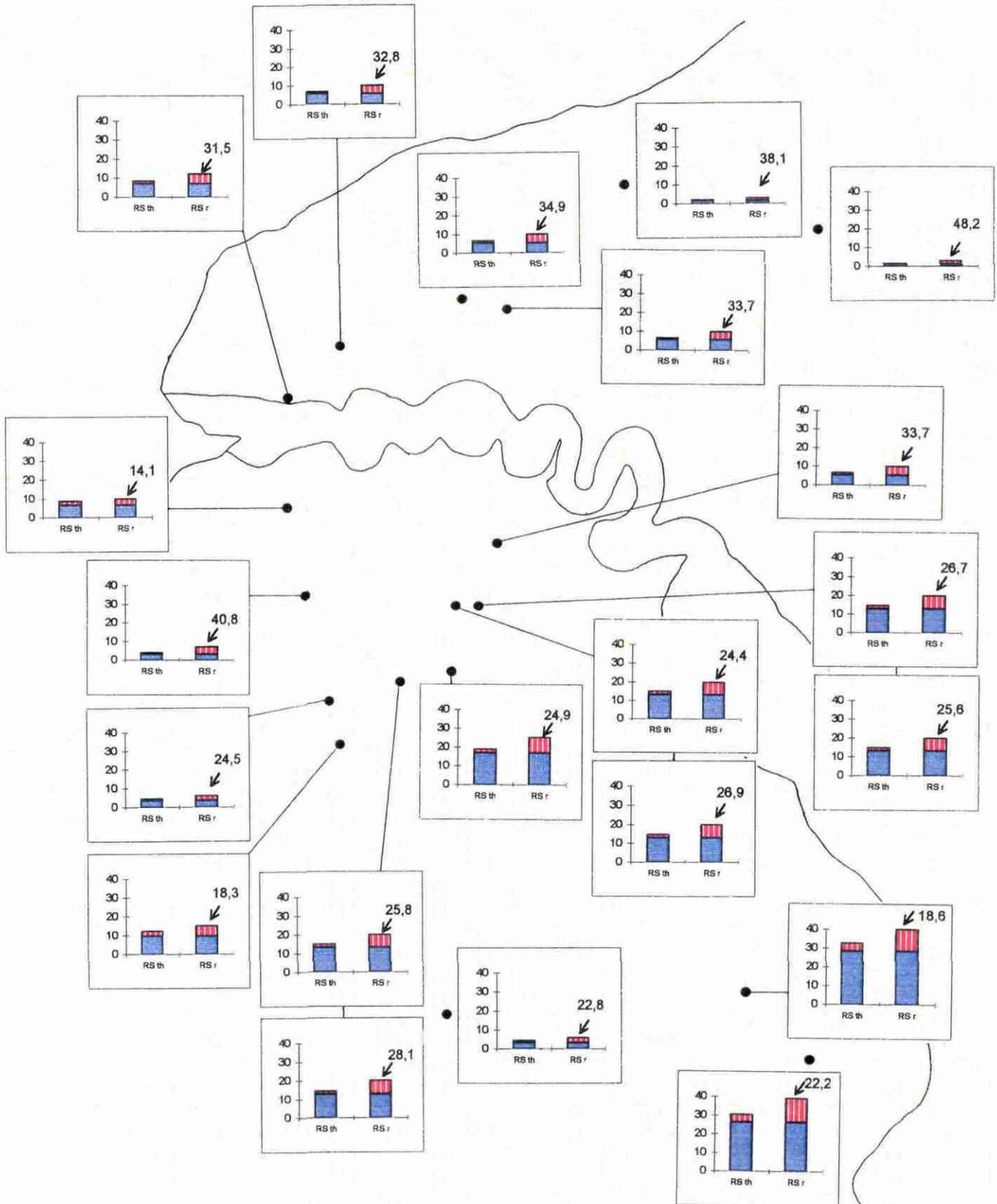
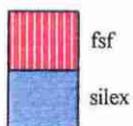


Figure 33 : Comparaison des teneurs en silice et en fsf entre les RS réels (RS r) et les RS théoriques (RS th) et quantification des apports allochtones (cas où la silice issue de l'altération des silices est évacuée).

Les teneurs en silice et fsf sont données en mètres. Les apports allochtones sont représentés par la flèche et sont en % (% par rapport à l'ensemble du matériau : silice + fsf)



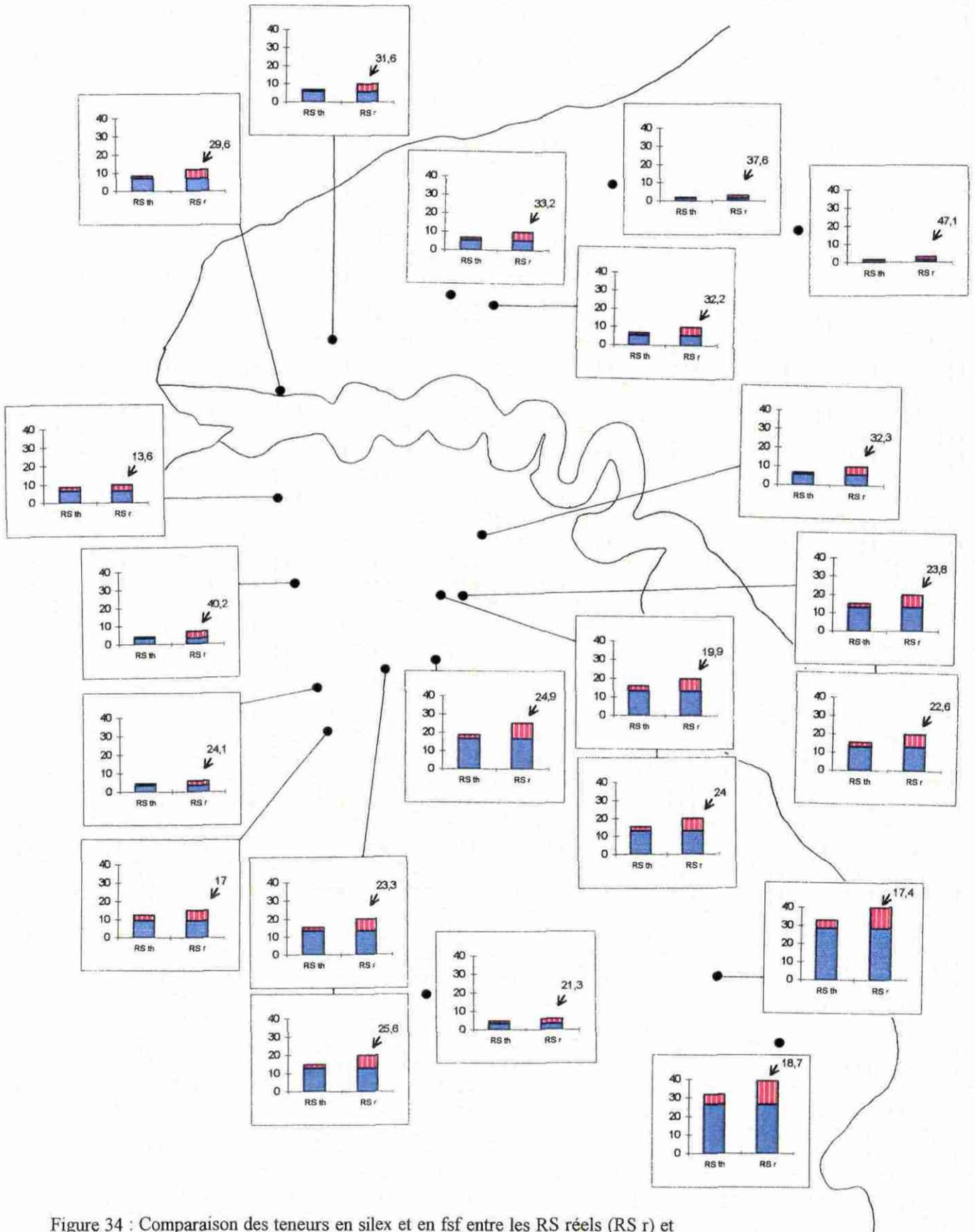


Figure 34 : Comparaison des teneurs en silice et en fsf entre les RS réels (RS r) et les RS théoriques (RS th) et quantification des apports allochtones (cas où la silice issue de l'altération des silex enrichit la fsf). Les teneurs en silice et fsf sont données en mètres. Les apports allochtones sont représentés par la flèche et sont en % (% par rapport à l'ensemble du matériau : silice + fsf)



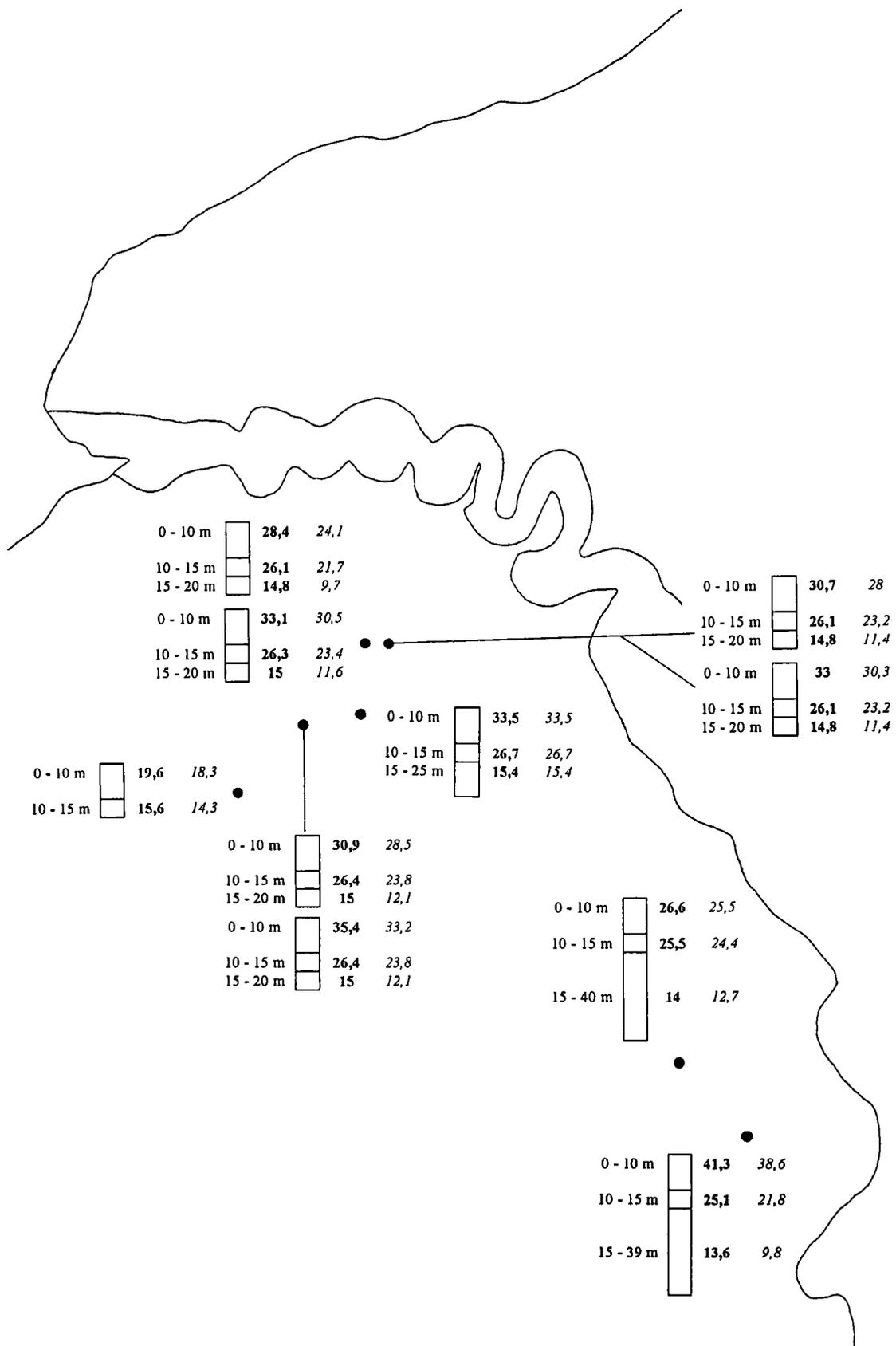


Figure 35 : Evolution verticale des apports allochtones en fsf pour les RS de plateau dont l'épaisseur est supérieure à 10 m.

Les apports sont donnés en pourcentage par rapport à l'ensemble du matériau (silex + fsf).

**cas où la silice issue de l'altération des silex est évacuée (en gras).**

*cas où la silice issue de l'altération des silex enrichit la fsf (en italique).*

Le bilan granulométrique a été réalisé en prenant pour les RS avec une épaisseur supérieure à 15 m une teneur moyenne en silex de 75 % au-delà de 15 m. Etant donné le pourcentage de silex des RS théoriques (obtenu à partir des craies-mères théoriques) compris entre 80 et 90 %, on peut penser que des **RS contenant 80 à 90 % de silex à des profondeurs de 20 m ou plus** (décrit dans certains sondages de l'Eure et du nord de l'Eure et Loir) sont des formations qui n'ont pas subi d'allochtonie. Il s'agit donc de **résidus d'altération de la craie stricts**.

## 2.6. Bilan minéralogique de la fraction argileuse

La minéralogie de la fraction argileuse des RS ayant déjà été abondamment étudiée (Brajnikov, 1938 ; Thiry *et al.*, 1977 ; Pomerol et Bauer, 1967...), nous nous limiterons à quelques réflexions tirées de la comparaison minéralogique de la fraction inférieure à 2  $\mu\text{m}$  entre les RS et les craies.

Les fractions argileuses des craies sont presque exclusivement composées de smectite (montmorillonite), tandis que pour les RS celles-ci sont à dominante de kaolinite, sauf pour l'est du Pays de Caux et le Talou.

M. Thiry *et al.* (1977) ont reconstitué un profil d'altération de la craie à silex avec une évolution des minéraux argileux de la base vers le sommet du profil : smectites -- smectites alumineuses -- interstratifiés smectite/kaolinite -- kaolinite. Ces auteurs expliquent que la transformation smectite  $\rightarrow$  kaolinite s'effectue en milieu acide et lessivant avec apparition d'interstratifiés kaolinite/montmorillonite. La kaolinite apparaît non pas au terme d'une dégradation continue des phyllosilicates mais serait issue d'une recombinaison de l'alumine et de la silice libérées lors des phases hydrolysantes (Dewolf, 1977). G. Millot (1964) avait déjà souligné ceci en expliquant que l'alumine à peine libérée lors de l'altération est ressaisie par la silice et réengagée dans les édifices silico-alumineux de type kaolinite.

D'après les formules générales de la kaolinite et de la montmorillonite (Caillère et Hénin, 1963), les rapports cationiques Si/Al sont :

- pour la kaolinite :  $\text{Si/Al} = 1$
- pour la montmorillonite :  $\text{Si/Al} \geq 2$

La comparaison de ces rapports indique que la montmorillonite présente davantage de silice que d'alumine comparativement à la kaolinite. Au cours de l'altération, la transformation de la montmorillonite en kaolinite s'accompagne donc d'une libération de silice. L'excès de silice des argiles de la fsf des craies-mères (montmorillonite presque exclusive), ainsi que la silice dissoute au niveau des silex ne peut donner des néoformations argileuses et un enrichissement en matrice au sein des RS qu'à condition d'avoir un apport allochtone d'alumine pour donner de la kaolinite. S'il n'y a pas cet apport, on aura une évacuation de la silice qui doit alors se marquer au niveau de la matrice des RS par une perte de matière et un RS réel avec une quantité de fsf moins importante que celle du RS théorique. Or, ce n'est pas le cas : les RS réels ont toujours des teneurs en fsf plus élevées que celles des RS théoriques (cf. II.2.5.). Ceci souligne, comme pour le bilan granulométrique, l'existence d'apports allochtones venant enrichir les matrices des RS par rapport à ce que peuvent fournir les craies.

La présence de kaolinite en forte proportion dans les argiles des RS (sauf pour l'est du Pays de Caux et le Talou) pourrait être liée :

- à des néoformations argileuses liées à la recombinaison de la silice libérée lors de la transformation des argiles, mais également lors de la dissolution (cependant faible) des silex, avec un apport allochtone d'alumine ;
- à des apports extérieurs directement de kaolinite en provenance des formations tertiaires par exemple (Pomerol et Bauer, 1967).

De plus, on a remarqué la **présence de pyrophyllite** dans les échantillons de RS de A/C et de l'A29 (prélevés à plus de 5 m de profondeur), ainsi que dans les RS sableux de La Vasserie et de Sandouville, alors qu'elle est absente dans la fraction argileuse des craies. Géologiquement, la pyrophyllite se trouve fréquemment dans les roches hydrothermales et même métamorphiques (Pait Suhayat, 1990). Elle n'a été rencontrée que rarement dans les sédiments et n'a jamais été décrite comme un minéral de néoformation (Millot, 1964 ; Dunoyer de Segonzac et Chamley, 1968 ; Chenaux *et al.*, 1970). Par conséquent, la présence de pyrophyllite dans les RS ne peut être le fait que d'**apports incontestablement allochtones**, dont l'origine reste à déterminer.

## 2.7. Bilan géochimique

L'objectif du bilan géochimique est de préciser pour les éléments chimiques majeurs les apports allochtones nécessaires pour obtenir les fsf des RS réels. Ceci est effectué à partir de la comparaison des fsf entre les RS réels et les RS théoriques. Dans la mesure où les échantillons analysés pour les RS réels ont été prélevés dans les dix premiers mètres de la formation, cette comparaison ne sera réalisée que pour les dix premiers mètres des RS.

### - Méthode de calcul

D'après le bilan granulométrique (cf. II.2.5.), à épaisseurs de silex identiques, on connaît les épaisseurs de fsf dans les RS réels et théoriques. Ceci permet de déduire les apports extérieurs de fsf en mètres et en pourcentage. A partir de ces données, on peut travailler en masse en réalisant une conversion en prenant une densité de 2,5 pour l'ensemble du matériau (silex et fsf, cf. II.2.2.2.2.). La comparaison des fsf (en masse) entre RS réels et théoriques permet de déduire la masse de fsf allochtone. Il suffit ensuite de pondérer les analyses chimiques des fsf des RS réels et théoriques en fonction de ce que représente la fsf par rapport au RS global (silex + fsf) pour en déduire la masse allochtone pour chacun des éléments chimiques majeurs.

Dans le détail, la démarche est décrite ci-dessous :

#### - Pour les RS réels :

\* les analyses chimiques (tabl. 7, cf. II.1.4.2.) ayant été effectuées sur la matrice (fraction inférieure à 2 mm), il faut homogénéiser les données en tenant compte de l'importance de cette fraction dans chaque RS (pondération). La pondération est réalisée de la façon suivante :

$$\begin{array}{l} \% \text{ SiO}_2 \text{ dans RS} \\ \text{(chimie pondérée)} \end{array} = \begin{array}{l} \% \text{ SiO}_2 \text{ dans matrice} \times \% \text{ matrice dans RS} \\ \text{(chimie non pondérée)} \end{array}$$

\* les analyses chimiques portent sur la matrice des RS et non pas sur la fsf (fig. 36).

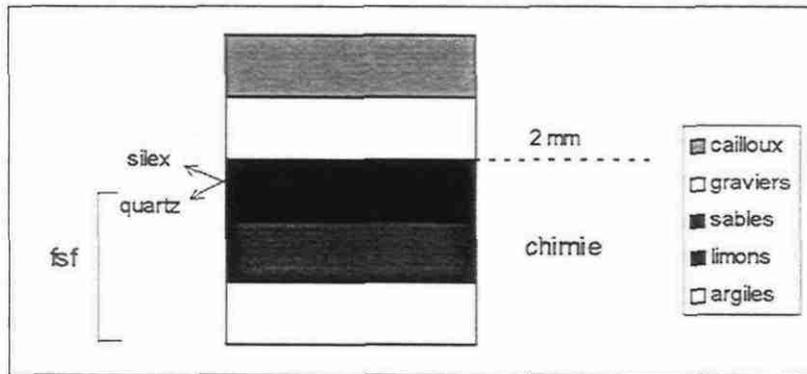


Figure 36 : Matériau des RS réels concerné par l'analyse chimique.

A partir des analyses granulométriques et des comptages minéralogiques, la proportion de silex dans les sables est évaluée, ce qui permet de connaître la quantité de fsf. Pour simplifier, on considère les silex comme totalement siliceux (cf. II.2.3.). Le pourcentage de SiO<sub>2</sub> de la chimie pondérée est alors corrigé en fonction du pourcentage de silex contenu dans les sables de la matrice, et on obtient la chimie des fsf réels ;

\* on connaît l'épaisseur (y) de RS réel et les épaisseurs de silex et de fsf. En prenant une densité de 2,5 pour l'ensemble du matériau, on calcule alors la masse de RS, ainsi que les masses de silex et de fsf, pour une épaisseur (y m) et un volume (y m<sup>3</sup>) de RS.

exemple du RS de Bolbec :

Le RS de Bolbec est épais de 10 m.

On travaille alors sur 10 m<sup>3</sup>,

soit une masse de : 10 x 2,5 = 25 t de RS

Dans le RS de Bolbec, les épaisseurs de silex et de fsf sont respectivement de 5,7 m et 4,3 m

Pour 10 m<sup>3</sup>, on a donc 5,7 m<sup>3</sup> de silex et 4,3 m<sup>3</sup> de fsf

soit des masses de : 5,7 x 2,5 = 14,25 t de silex

4,3 x 2,5 = 10,75 t de fsf

\* On calcule les masses des différents éléments chimiques contenus dans la masse de fsf définie ci-dessus.

- Pour les RS théoriques :

A partir des compositions chimiques des fsf des craies choisies comme roches-mères (cf. II.2.2.2.4.), on définit les compositions chimiques des fsf des RS théoriques.

Tout comme le bilan granulométrique, on distingue deux cas : celui où la silice issue de l'altération des silex enrichit la matrice des RS théoriques et celui où cette même silice est évacuée sans enrichir la matrice des RS théoriques.

D'après le bilan granulométrique, on connaît les épaisseurs de silex et de fsf des RS théoriques. De la même manière que pour les RS réels, on calcule la masse de fsf des RS théoriques et celles des éléments chimiques contenus dans la fsf. Dans le cas de la fsf enrichie par la silice (issue de l'altération des silex), le pourcentage de SiO<sub>2</sub> de la chimie sera corrigé au préalable en fonction du pourcentage de SiO<sub>2</sub> dissous au niveau des silex.

Les compositions chimiques en masse des fsf des RS réels et théoriques sont données dans les tableaux 26 et 27.

Pour la totalité des sites, les fsf des 10 premiers mètres de RS réels présentent toujours plus de SiO<sub>2</sub> et d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> que les fsf des RS théoriques (à l'exception de Beuzeville pour l'alumine). Il y a d'autant plus de silice excédentaire dans les RS réels que l'on considère le cas où la silice issue de l'altération des silex est évacuée sans enrichir les fsf. Les masses en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et TiO<sub>2</sub> sont aussi généralement supérieures dans les fsf des RS réels comparativement à celles des RS théoriques, mais de façon moins importante que SiO<sub>2</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Géographiquement, on remarque pour les fsf des RS réels par rapport aux fsf des RS théoriques que :

- dans l'est du Pays de Caux et le Talou, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O et TiO<sub>2</sub> sont excédentaires. Les excédents en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont cependant variables d'un site à un autre ;

est Pays de Caux, Talou

		SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	K2O	Na2O	TiO2	MnO	CaO
Neu	RS réel	3,34	0,50	0,25	0,01	0,04	0,00	0,05	0,01	0,01
	RS théorique	0,37	0,12	0,03	0,03	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00
	apports/pertes	2,97	0,38	0,21	-0,02	0,02	0,00	0,04	0,01	0,01
BSO1	RS réel	3,15	0,31	0,18	0,02	0,03	0,00	0,03	0,00	0,02
	RS théorique	0,57	0,21	0,04	0,02	0,03	0,00	0,01	0,00	0,00
	apports/pertes	2,59	0,09	0,13	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02

Pays de Caux (excepté l'est)

		SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	K2O	Na2O	TiO2	MnO	CaO
Yv	RS réel	7,10	2,98	1,05	0,07	0,12	0,01	0,08	0,00	0,09
	RS théorique	1,95	0,69	0,17	0,11	0,10	0,02	0,04	0,00	0,00
	apports/pertes	5,15	2,28	0,88	-0,04	0,02	0,00	0,04	0,00	0,09
A29	RS réel	7,19	2,96	1,21	0,09	0,11	0,01	0,09	0,00	0,08
	RS théorique	1,93	0,68	0,17	0,11	0,10	0,01	0,03	0,00	0,00
	apports/pertes	5,26	2,27	1,05	-0,02	0,01	0,00	0,06	0,00	0,08
Bc3	RS réel	7,13	2,47	0,79	0,08	0,11	0,01	0,07	0,00	0,08
	RS théorique	1,62	0,56	0,15	0,10	0,08	0,01	0,03	0,01	0,00
	apports/pertes	5,50	1,92	0,64	-0,03	0,03	0,00	0,05	-0,01	0,08
San 1	RS réel	6,65	3,85	1,58	0,10	0,15	0,01	0,11	0,01	0,15
	RS théorique	2,01	0,69	0,18	0,13	0,10	0,02	0,03	0,01	0,00
	apports/pertes	4,65	3,16	1,40	-0,03	0,04	0,00	0,07	0,00	0,15

Eure

		SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	K2O	Na2O	TiO2	MnO	CaO
Beu 2	RS réel	7,31	0,92	0,30	0,03	0,04	0,01	0,09	0,00	0,04
	RS théorique	3,35	1,08	0,32	0,22	0,17	0,03	0,05	0,01	0,00
	apports/pertes	3,96	-0,15	-0,02	-0,19	-0,13	-0,03	0,04	-0,01	0,04
MtS	RS réel	7,04	2,40	0,89	0,08	0,12	0,02	0,10	0,00	0,11
	RS théorique	1,52	0,51	0,13	0,07	0,07	0,01	0,02	0,00	0,00
	apports/pertes en t	5,52	1,89	0,76	0,01	0,05	0,01	0,07	0,00	0,11
Lie 2	RS réel	7,30	1,30	0,67	0,03	0,04	0,01	0,06	0,00	0,04
	RS théorique	1,49	0,47	0,14	0,10	0,07	0,02	0,02	0,01	0,00
	apports/pertes	5,81	0,82	0,53	-0,06	-0,04	-0,01	0,04	-0,01	0,04
CDE1	RS réel	4,20	1,13	0,57	0,06	0,07	0,00	0,05	0,00	0,07
	RS théorique	1,59	0,50	0,15	0,10	0,08	0,02	0,02	0,01	0,00
	apports/pertes	2,61	0,62	0,42	-0,04	-0,01	-0,02	0,03	-0,01	0,07
CDE2	RS réel	4,56	1,03	0,40	0,04	0,06	0,00	0,04	0,00	0,04
	RS théorique	1,59	0,50	0,15	0,10	0,08	0,02	0,02	0,01	0,00
	apports/pertes	2,96	0,52	0,25	-0,07	-0,02	-0,02	0,01	-0,01	0,04
By I	RS réel	8,39	0,94	0,22	0,02	0,03	0,01	0,11	0,00	0,02
	RS théorique	1,32	0,42	0,13	0,06	0,06	0,01	0,02	0,00	0,00
	apports/pertes en t	7,07	0,52	0,09	-0,04	-0,03	0,00	0,09	0,00	0,02
By II	RS réel	9,26	1,03	0,24	0,03	0,04	0,01	0,12	0,00	0,03
	RS théorique	1,23	0,40	0,12	0,06	0,06	0,01	0,02	0,00	0,00
	apports/pertes	8,03	0,64	0,12	-0,03	-0,02	0,00	0,10	0,00	0,03
Vas pla	RS réel	7,47	1,08	0,50	0,04	0,06	0,01	0,05	0,00	0,05
	RS théorique	1,40	0,45	0,13	0,06	0,06	0,01	0,02	0,00	0,00
	apports/pertes	6,07	0,63	0,36	-0,02	-0,01	-0,01	0,02	0,00	0,05
Vas plb	RS réel	8,29	1,19	0,55	0,04	0,06	0,01	0,05	0,00	0,05
	RS théorique	1,29	0,41	0,12	0,06	0,06	0,01	0,02	0,00	0,00
	apports/pertes	7,01	0,78	0,43	-0,01	0,00	0,00	0,03	0,00	0,05
MtM I	RS réel	9,15	0,65	0,26	0,03	0,05	0,01	0,08	0,00	0,02
	RS théorique	1,31	0,43	0,13	0,06	0,06	0,01	0,02	0,00	0,00
	apports/pertes	7,84	0,22	0,14	-0,03	-0,01	-0,01	0,06	0,00	0,02
MtM II	RS réel	8,71	0,62	0,25	0,03	0,05	0,01	0,08	0,00	0,02
	RS théorique	1,36	0,44	0,13	0,06	0,06	0,01	0,02	0,00	0,00
	apports/pertes	7,35	0,18	0,12	-0,04	-0,01	-0,01	0,06	0,00	0,02

Perche, nord Eure et Loir

		SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	K2O	Na2O	TiO2	MnO	CaO
Ven	RS réel	3,86	2,39	0,10	0,00	0,03	0,00	0,05	0,01	0,01
	RS théorique	1,92	0,59	0,19	0,17	0,10	0,02	0,03	0,01	0,00
	apports/pertes	1,94	1,79	-0,08	-0,17	-0,07	-0,02	0,02	0,00	0,01
A/C 3	RS réel	4,57	4,26	0,12	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02
	RS théorique	1,53	0,50	0,14	0,07	0,07	0,02	0,02	0,00	0,00
	apports/pertes	3,04	3,76	-0,02	-0,06	-0,06	-0,01	-0,01	0,00	0,02
Cha	RS réel	7,70	3,84	0,41	0,01	0,05	0,01	0,17	0,00	0,04
	RS théorique	1,26	0,41	0,12	0,06	0,06	0,01	0,02	0,00	0,00
	apports/pertes	6,44	3,43	0,29	-0,04	-0,01	0,00	0,15	0,00	0,04

Tableau 26 : Comparaison des compositions chimiques des fsf entre RS réels et théoriques (cas où la silice issue de l'altération des silex est évacuée). Les compositions chimiques sont données en tonnes. Les apports ou pertes correspondent à la différence : RS réel - RS théorique.

est Pays de Caux, Talou

		SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	K2O	Na2O	TiO2	MnO	CaO
Neu	RS réel	3,34	0,50	0,25	0,01	0,04	0,00	0,05	0,01	0,01
	RS théorique	0,45	0,12	0,03	0,03	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00
	apports/pertes	2,89	0,38	0,21	-0,02	0,02	-0,00	-0,04	0,01	0,01
BSO1	RS réel	3,15	0,31	0,18	0,02	0,03	0,00	0,03	0,00	0,02
	RS théorique	0,61	0,21	0,04	0,02	0,03	0,00	0,01	0,00	0,00
	apports/pertes	2,54	0,09	0,13	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02

Pays de Caux (excepté l'est)

		SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	K2O	Na2O	TiO2	MnO	CaO
Yv	RS réel	7,10	2,98	1,05	0,07	0,12	0,01	0,08	0,00	0,09
	RS théorique	2,31	0,69	0,17	0,11	0,10	0,02	0,04	0,00	0,00
	apports/pertes	4,79	2,28	0,88	-0,04	0,02	0,00	0,04	0,00	0,09
A29	RS réel	7,19	2,96	1,21	0,09	0,11	0,01	0,09	0,00	0,08
	RS théorique	2,35	0,68	0,17	0,11	0,10	0,01	0,03	0,00	0,00
	apports/pertes	4,84	2,27	1,05	-0,02	0,01	0,00	0,06	0,00	0,08
Bc3	RS réel	7,13	2,47	0,79	0,08	0,11	0,01	0,07	0,00	0,08
	RS théorique	1,91	0,56	0,15	0,10	0,08	0,01	0,03	0,01	0,00
	apports/pertes	5,22	1,92	0,64	-0,03	0,03	0,00	-0,05	-0,01	0,08
San 1	RS réel	6,65	3,85	1,58	0,10	0,15	0,01	0,11	0,01	0,15
	RS théorique	2,56	0,69	0,18	0,13	0,10	0,02	0,03	0,01	0,00
	apports/pertes	4,10	3,16	1,40	-0,03	0,04	0,00	0,07	0,00	0,15

Eure

		SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	K2O	Na2O	TiO2	MnO	CaO
Beu 2	RS réel	7,31	0,92	0,30	0,03	0,04	0,01	0,09	0,00	0,04
	RS théorique	3,47	1,08	0,32	0,22	0,17	0,03	0,05	0,01	0,00
	apports/pertes	3,84	-0,15	-0,02	-0,19	-0,13	-0,03	0,04	-0,01	0,04
MtS	RS réel	7,04	2,40	0,89	0,08	0,12	0,02	0,10	0,00	0,11
	RS théorique	1,87	0,51	0,13	0,07	0,07	0,01	0,02	0,00	0,00
	apports/pertes	5,17	1,89	0,76	0,01	0,05	0,01	0,07	0,00	0,11
Lie 2	RS réel	7,30	1,30	0,67	0,03	0,04	0,01	0,06	0,00	0,04
	RS théorique	1,60	0,47	0,14	0,10	0,07	0,02	0,02	0,01	0,00
	apports/pertes	5,70	0,83	0,53	-0,06	-0,04	-0,01	0,04	-0,01	0,04
CDE1	RS réel	4,20	1,13	0,57	0,06	0,07	0,00	0,05	0,00	0,07
	RS théorique	1,66	0,50	0,15	0,10	0,08	0,02	0,02	0,01	0,00
	apports/pertes	2,55	0,62	0,42	-0,04	-0,01	-0,02	0,03	-0,01	0,07
CDE2	RS réel	4,56	1,03	0,40	0,04	0,06	0,00	0,04	0,00	0,04
	RS théorique	1,66	0,50	0,15	0,10	0,08	0,02	0,02	0,01	0,00
	apports/pertes	2,90	0,52	0,25	-0,07	-0,02	-0,02	0,01	-0,01	0,04
By I	RS réel	8,39	0,94	0,22	0,02	0,03	0,01	0,11	0,00	0,02
	RS théorique	1,91	0,42	0,13	0,06	0,06	0,01	0,02	0,00	0,00
	apports/pertes	6,48	0,52	0,09	-0,04	-0,03	0,00	0,09	0,00	0,02
By II	RS réel	9,26	1,03	0,24	0,03	0,04	0,01	0,12	0,00	0,03
	RS théorique	1,79	0,40	0,12	0,06	0,06	0,01	0,02	0,00	0,00
	apports/pertes	7,47	0,64	0,12	-0,03	-0,02	0,00	0,10	0,00	0,03
Vas pl a	RS réel	7,47	1,08	0,50	0,04	0,06	0,01	0,05	0,00	0,05
	RS théorique	2,47	0,45	0,13	0,06	0,06	0,01	0,02	0,00	0,00
	apports/pertes	5,00	0,63	0,36	-0,02	-0,01	-0,01	0,02	0,00	0,05
Vas pl b	RS réel	8,29	1,19	0,55	0,04	0,06	0,01	0,05	0,00	0,05
	RS théorique	1,94	0,41	0,12	0,06	0,06	0,01	0,02	0,00	0,00
	apports/pertes	6,35	0,78	0,43	-0,01	0,00	0,00	0,03	0,00	0,05
MtM I	RS réel	9,15	0,65	0,26	0,03	0,05	0,01	0,08	0,00	0,02
	RS théorique	1,96	0,42	0,12	0,06	0,06	0,01	0,02	0,00	0,00
	apports/pertes	7,19	0,23	0,14	-0,03	-0,01	-0,01	0,06	0,00	0,02
MtM II	RS réel	8,71	0,62	0,25	0,03	0,05	0,01	0,08	0,00	0,02
	RS théorique	2,03	0,44	0,13	0,06	0,06	0,01	0,02	0,00	0,00
	apports/pertes	6,67	0,18	0,12	-0,04	-0,01	-0,01	0,06	0,00	0,02

Perche, nord Eure et Loir

		SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	K2O	Na2O	TiO2	MnO	CaO
Ven	RS réel	3,86	2,39	0,10	0,00	0,03	0,00	0,05	0,01	0,01
	RS théorique	2,14	0,59	0,19	0,17	0,10	0,02	0,03	0,01	0,00
	apports/pertes	1,72	1,79	-0,08	-0,17	-0,07	-0,02	0,02	0,00	0,01
A/C 3	RS réel	4,57	4,26	0,12	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02
	RS théorique	1,80	0,50	0,14	0,07	0,07	0,02	0,02	0,00	0,00
	apports/pertes	2,77	3,76	-0,02	-0,06	-0,06	-0,01	-0,01	0,00	0,02
Cha	RS réel	7,70	3,84	0,41	0,01	0,05	0,01	0,17	0,00	0,04
	RS théorique	1,92	0,41	0,12	0,06	0,06	0,01	0,02	0,00	0,00
	apports/pertes	5,79	3,43	0,29	-0,04	-0,01	0,00	0,15	0,00	0,04

Tableau 27 : Comparaison des compositions chimiques des fsf entre RS réels et théoriques (cas où la silice issue de l'altération des silex enrichit la fsf). Les compositions chimiques sont données en tonnes. Les apports ou pertes correspondent à la différence : RS réel - RS théorique.

- dans le reste du Pays de Caux, on retrouve les cinq éléments chimiques précédents en surplus. Le MgO est déficitaire ;
- dans l'Eure, à l'exception de deux sites (Beuzeville et Les Monts Sud), SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et TiO<sub>2</sub> sont excédentaires, tandis qu'on a un déficit en MgO, K<sub>2</sub>O et Na<sub>2</sub>O. Pour Beuzeville, tous les éléments sont déficitaires, à l'exception de SiO<sub>2</sub> fortement excédentaire et de TiO<sub>2</sub>. Pour Les Monts Sud, tous les éléments sont en surplus ;
- dans le Perche et le nord de l'Eure et Loir, seuls SiO<sub>2</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont constamment excédentaires, tandis que Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et TiO<sub>2</sub> sont en surplus ou légèrement déficitaires suivant les sites. MgO et K<sub>2</sub>O sont déficitaires.

Connaissant les quantités en éléments chimiques pouvant être fournies par les craies choisies comme roches-mères (fsf des RS théoriques), nous sommes en mesure de quantifier les éventuels apports allochtones nécessaires pour obtenir les compositions chimiques des fsf des RS réels (pour les dix premiers mètres des RS) (tabl. 28 et 29). Nous raisonnerons dans le cas où la silice issue de l'altération des silex enrichit la matrice, dans la mesure où :

- il n'y a pratiquement pas de différence au niveau des apports ou des pertes pour chacun des éléments chimiques entre ce cas de figure et celui où la silice dissoute au niveau des silex est évacuée (Pour un élément chimique donné, pour un apport inférieur à 30 %, la différence maximale est de 1 %, pour un apport supérieur à 30 %, elle est de 3 %).
- il est plus vraisemblable de voir SiO<sub>2</sub> enrichir la matrice que partir au loin. La silice est peu mobile dans les contextes d'altération, sauf si cette altération est latérisante, avec déstabilisation de la kaolinite au profit des hydroxydes d'alumine ; ce qui est peu probable ici.

Les apports allochtones en éléments chimiques nécessaires pour obtenir les fsf des RS réels à partir des fsf des craies-mères sont différents d'une région à une autre (tabl. 28) :

- dans l'est du Pays de Caux et le Talou, les apports en SiO<sub>2</sub> sont largement prédominants, de 82 à 90 %. Ceux en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont relativement faibles et variables, entre 3 et 11 % pour Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et 5 et 6 % pour Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Les apports en TiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O et MnO sont faibles, inférieurs ou égaux à 1 % ;
- dans le reste du Pays de Caux, les apports en SiO<sub>2</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont importants, avec respectivement 46 à 66 % et 24 à 36 %. Ceux en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont élevés par rapport aux autres régions, de 8 à 16 %. Pour TiO<sub>2</sub> et K<sub>2</sub>O, ils sont inférieurs à 1 %. Enfin MgO et Na<sub>2</sub>O montrent une perte inférieure à 0,5 % ;
- dans l'Eure (à l'exception de Beuzeville et Les Monts Sud), les apports en SiO<sub>2</sub> sont considérables, de 70 à 95 %. Ceux en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont variables, respectivement de 3 à 17 % et de 1 à 12 %. Pour TiO<sub>2</sub>, ils sont inférieurs à 1,5 %. MgO et K<sub>2</sub>O présentent des pertes pouvant atteindre 1 à 2 % ;
- dans le Perche et le Nord de l'Eure et Loir, les apports en SiO<sub>2</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont importants et peuvent dans le cas de l'alumine dépasser ceux de la silice, avec 35 à 59 % pour Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et 43 à 60 % pour SiO<sub>2</sub>. Suivant les sites, il est nécessaire d'avoir des pertes en TiO<sub>2</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pour obtenir les RS réels. MgO, K<sub>2</sub>O montrent des pertes pouvant atteindre respectivement 5 et 2 %.

### est Pays de Caux, Talou

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	CaO
Neu	81,87	10,61	6,02	-0,57	0,55	-0,06	1,14	0,12	0,33
BSO1	90,35	3,25	4,75	0,05	0,13	-0,05	0,82	0,06	0,65

### Pays Caux (excepté l'est)

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	CaO
Yv	59,42	28,33	10,93	-0,47	0,22	-0,01	0,49	-0,01	1,10
A29	58,33	27,43	12,63	-0,25	0,17	-0,01	0,69	0,00	1,01
Bc3	66,01	24,27	8,10	-0,32	0,33	0,00	0,58	-0,04	1,07
SAN 1	46,11	35,60	15,70	-0,33	0,49	-0,03	0,81	0,00	1,66

### Eure

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	CaO
BEU 1	113,13	-4,56	-0,50	-5,47	-3,75	-0,87	1,12	-0,33	1,24
MTS	64,12	23,46	9,39	0,11	0,62	0,02	0,93	0,04	1,33
LIE 2	81,18	11,78	7,57	-0,91	-0,54	-0,15	0,61	-0,07	0,53
CDE1	70,54	17,23	11,59	-1,09	-0,32	-0,42	0,72	-0,09	1,83
CDE2	80,39	14,50	6,92	-1,91	-0,62	-0,47	0,35	-0,13	0,98
BY I	90,83	7,23	1,30	-0,51	-0,40	-0,06	1,28	0,00	0,32
BY II	89,98	7,65	1,47	-0,37	-0,25	-0,03	1,24	0,00	0,30
VAS p1a	82,90	10,49	6,03	-0,37	-0,12	-0,12	0,40	0,00	0,78
VAS p1b	83,31	10,22	5,58	-0,17	0,05	-0,07	0,40	0,00	0,68
MTM I	94,76	2,98	1,79	-0,45	-0,07	-0,07	0,81	0,02	0,24
MTM II	95,38	2,60	1,71	-0,54	-0,14	-0,09	0,82	0,02	0,25

### Perche, nord Eure et Loir

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	CaO
Ven	53,85	56,06	-2,63	-5,40	-2,11	-0,74	0,57	0,04	0,36
A/C 3	43,44	58,82	-0,27	-0,92	-0,98	-0,12	-0,21	-0,01	0,25
Cha	59,91	35,52	3,04	-0,43	-0,12	0,02	1,58	0,01	0,46

Tableau 28 : Quantification (en %) des apports allochtones ou pertes en éléments chimiques majeurs pour obtenir la fsf des RS réels à partir des craies-mères (cas où la silice issue de l'altération des silex enrichit la matrice).

Les chiffres négatifs correspondent aux pertes, tandis que les autres chiffres représentent les apports.

## est Pays de Caux, Talou

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	CaO
Neu	82,26	10,38	5,88	-0,55	0,54	-0,06	1,11	0,12	0,32
BSO1	90,49	3,21	4,68	0,05	0,13	-0,05	0,80	0,06	0,64

## Pays Caux (excepté l'est)

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	CaO
Yv	61,16	27,12	10,46	-0,45	0,21	-0,01	0,47	-0,01	1,06
A29	60,34	26,10	12,02	-0,24	0,17	-0,01	0,66	0,00	0,96
Bc3	67,18	23,44	7,82	-0,31	0,32	0,00	0,56	-0,04	1,03
SAN I	49,25	33,52	14,79	-0,31	0,46	-0,03	0,76	0,00	1,56

## Eure

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	CaO
BEU 1	112,67	-4,40	-0,48	-5,29	-3,63	-0,84	1,08	-0,32	1,20
MTS	65,62	22,48	9,00	0,10	0,60	0,02	0,89	0,03	1,27
LIE 2	81,55	11,55	7,45	-0,91	-0,54	-0,15	0,59	-0,07	0,52
CDE1	71,06	16,93	11,39	-1,07	-0,31	-0,41	0,71	-0,09	1,80
CDE2	80,73	14,24	6,80	-1,87	-0,61	-0,47	0,34	-0,12	0,96
BY I	91,54	6,68	1,20	-0,47	-0,36	-0,05	1,18	0,00	0,30
BY II	90,60	7,17	1,38	-0,34	-0,24	-0,02	1,17	0,00	0,28
VAS p1a	85,46	8,92	5,13	-0,31	-0,10	-0,10	0,34	0,00	0,67
VAS p1b	84,63	9,41	5,13	-0,16	0,05	-0,06	0,37	0,00	0,63
MTM I	95,22	2,72	1,64	-0,42	-0,07	-0,07	0,75	0,02	0,22
MTM II	95,84	2,33	1,55	-0,50	-0,14	-0,08	0,74	0,02	0,23

## Perche, nord Eure et Loir

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	CaO
Ven	56,71	52,58	-2,47	-5,06	-1,98	-0,69	0,53	0,04	0,34
A/C 3	45,70	56,47	-0,25	-0,88	-0,94	-0,12	-0,20	-0,01	0,24
Cha	62,45	33,27	2,85	-0,40	-0,11	0,02	1,48	0,01	0,43

Tableau 29 : Quantification (en %) des apports allochtones ou pertes en éléments chimiques majeurs pour obtenir la fsf des RS réels à partir des crases-mères (cas où la silice issue de l'alération des silex est évacuée).  
Les chiffres négatifs correspondent aux pertes, tandis que les autres chiffres représentent les apports.

## 2.8. Origine des apports extérieurs

Dans l'état actuel de nos connaissances, l'origine des apports allochtones est difficile à préciser. Néanmoins, un certain nombre d'éléments peut alimenter notre réflexion.

La cartographie des formations cénozoïques (cf. thèse F. Quesnel) montre qu'il y a une certaine relation entre la répartition de ces formations et les faciès de RS mis en évidence dans le paragraphe II.1.6. En effet, on constate que :

- l'est du Pays de Caux et le Talou, où le RS est brun, correspondent à la zone des sables et argiles du Thanétien et de l'Yprésien ;
- le reste du Pays de Caux, le Roumois, la région d'Evreux et le sud-ouest du Vexin Normand, où le RS est rouge à brun-rouge, correspondent au secteur des Sables de Lozère et de St Eustache et à la partie la plus occidentale des sables yprésiens ;
- le Drouais, avec le faciès de RS brun, brun-rouge ou brun-ocre, correspond à la zone des Sables de Fontainebleau. Selon F. Quesnel, la limite occidentale de ce faciès de RS coïncide avec le paléo-rivage du Rupélien supérieur mis en évidence par F. Ménéillet *et al.* (1994) ;
- l'Eure (à l'exception de l'est et du Roumois) et le nord de l'Eure et Loir, avec le faciès de RS rouge à brun-rouge au sommet s'éclaircissant en profondeur, correspondent au secteur où il existe des sables rattachés par leur faciès aux Sables de Fontainebleau. L'origine de ces sables est d'ailleurs contestée : l'hypothèse la plus vraisemblable en fait des sables d'origine éolienne (cf. thèse F. Quesnel). Il est possible de trouver également des silicifications (conglomérats à silex, grès ladères) au sommet des profils de RS. Ces silicifications sont rattachés par leur faciès à des silcrètes d'âge éocène probable (travaux de M. Thiry en cours). Le nord de l'Eure et Loir (Thimerais) se distingue de l'Eure par la présence des Sables du Thimerais ;
- dans le Perche, G. Moguedet (à paraître), lors du levé de la carte à 1/50 000 de Mortagne au Perche, a mis en évidence la présence de grès, de conglomérats et de formations sableuses contenant des galets. Ces formations ne sont, pour l'instant, rattachées à aucun faciès type et n'ont donc pas d'âge bien défini.

Le rôle joué par ces formations cénozoïques se marque de deux manières : d'une part, elles contrôlent l'âge de formation des RS et d'autre part, participent aux contaminations des RS.

Pour F. Quesnel, le RS de la gouttière normande (est du Pays de Caux) et du Talou est postérieur au démantèlement de la couverture imperméable des argiles plastiques yprésiennes, comme c'est le cas en Picardie et dans le Nord de la France (Bonte, 1955) et pour certains RS du Bassin de Londres (Jukes-Browne, 1906 ; Thorez *et al.*, 1971). Le RS s'est développé une fois seulement qu'affleurait la couverture perméable des sables thanétiens. La période la plus probable pour cette altération post-dénudation des argiles yprésiennes est plio-quadernaire.

Le RS du reste du Pays de Caux, du Roumois, de la région d'Evreux et du sud-ouest du Vexin Normand se serait développé après le dépôt et sous la couverture des Sables de Lozère, de St Eustache et de Valmont (Cavelier et Kuntz, 1974 ; Tourenq *et al.*, 1991 ; Quesnel *et al.*, 1996). Il serait donc plio-quadernaire (post-Redonien).

La formation du RS du Drouais serait postérieure au dépôt des Sables de Fontainebleau, vraisemblablement plio-quadernaire.

Enfin, l'Eure, le Perche et le nord de l'Eure et Loir correspondraient à une zone où les RS seraient les plus anciens (formation depuis l'émersion finie-crétacée).

Bien que sur le terrain, la contamination des RS par les formations cénozoïques semble faible à l'observation, les données granulométriques, minéralogiques et chimiques des RS comparées à celles de ces formations montrent que la contamination est bien réelle.

### **2.8.1. Origine des apports extérieurs - Arguments granulométriques**

La granulométrie des matrices des RS (cf. II.1.3.) avec des teneurs relativement importantes en limons (22 à 54 %), notamment pour le Pays de Caux et le Talou, souligne vraisemblablement un apport d'origine loessique.

Elle indique également la présence de sables, dont la quantité maximale peut atteindre 24 %. Les comptages minéralogiques à la loupe binoculaire et au microscope optique des sables ont montré que, dans la majorité des cas, plus de 50 % de ces sables ne sont pas des silex. Dans la mesure où les craies choisies comme roches-mères ne contiennent pas ou pratiquement pas de sables, ces derniers doivent provenir d'apports extérieurs.

### **2.8.2. Origine des apports extérieurs - Arguments minéralogiques**

B. Pomerol et J. Bauer (1967) indiquent qu'une partie des minéraux argileux des argiles à silex de Picardie, de Normandie, d'Ile de France et de Touraine provient directement de la craie, notamment la montmorillonite et l'illite. En revanche, la présence de kaolinite dans les argiles à silex, alors que ce minéral est rarissime dans la craie, leur pose un problème. Ils suggèrent, dans l'hypothèse d'une origine sub-autochtone ou allochtone, que la kaolinite puisse venir des argiles sparnaciennes (pour la Picardie et l'Ile de France), des Sables de Lozère (pour l'Ile de France et la Normandie), des argiles pliocènes (pour la Normandie), d'apports fluviaux en provenance des massifs anciens (pour la Normandie et la Touraine). Selon eux, il est aussi possible qu'une partie de la kaolinite soit de néoformation.

Il est clair que la néoformation de la kaolinite va dépendre du degré d'altération et de l'âge des RS. Ainsi, le RS de l'est du Pays de Caux et du Talou, avec un âge plio-quadernaire, a subi une altération relativement faible, d'où une fraction argileuse pratiquement dépourvue de kaolinite. En revanche, le RS du Perche et du nord de l'Eure et Loir, considéré comme le plus ancien (formation dès l'émergence finie-crétacée), a subi une altération plus intense que le RS du Talou et de l'est du Pays de Caux, conduisant à une fraction argileuse riche en kaolinite. Néanmoins, la durée et le degré d'altération ne permettent pas d'expliquer le surplus de fsf dans les RS par rapport à ce que peuvent fournir les craies-mères. Il est alors nécessaire de faire intervenir des apports allochtones.

Les analyses minéralogiques effectuées sur la fraction inférieure à 2  $\mu\text{m}$  des formations cénozoïques indiquent que (tabl. 30) :

- les sables rattachés par leur faciès aux Sables de St Eustache, de Lozère et de Fontainebleau sont tous riches en kaolinite. De plus, ces sables peuvent contenir de la pyrophyllite (minéral observé dans quelques échantillons de RS) ;
- les sables et argiles yprésiennes sont riches en smectite et en interstratifiés illite/smectite, tandis que les sables et argiles thanétiennes sont plutôt riches en kaolinite. Ceci confirme les résultats de M.M Blanc-Valleron et M. Thiry (1993) sur la minéralogie des argiles yprésiennes.

D'après J. P. Lautridou (1985), les limons normands se caractérisent par des smectites dominantes et par la présence d'illite, de kaolinite, de vermiculite et de chlorite.

Dans le Pays de Caux (excepté l'est), le Roumois, la région d'Evreux et le sud-ouest du Vexin Normand, on peut penser que les Sables de Lozère ont participé à l'enrichissement en

Formations cénozoïques	Kaolinite	Illite	Smectite	Int (10-14sm)	Pyrophyllite	Quartz	Goethite	Lépidocrocite
argile grise, Thanétien	50	25	0	25	0	Q	0	0
sable vert-ocre, Thanétien	45	40	0	15	0	Q	G	0
argile lie de vin, Yprésien	5	5	90	0	0	Q	0	0
argiles sableuse, Yprésien	25	10	65	0	0	Q	0	0
argile, Yprésien ?	25	25	0	65	0	Q	0	0
argile, Yprésien ?	30	25	45	0	0	Q	0	0
sable, Yprésien	10	5	85	0	0	Q	G	0
Sables Fontainebleau	40	10	45	0	5	Q	0	0
Sables Fontainebleau	100	tr	0	0	0	Q	0	0
Sables Fontainebleau	65	15	0	15	5	Q	0	0
sables + ou - limoneux, Fontainebleau	95	5	0	5	0	Q	0	0
Sables Fontainebleau	55	10	0	35	0	Q	0	0
sables argileux, Fontainebleau	65	10	0	25	0	Q	G	0
sables argileux, Fontainebleau	100	0	0	0	0	Q	0	L
Sables Fontainebleau	95	0	0	5	0	Q	G	0
Sables Fontainebleau	65	5	0	30	0	Q	0	0
Sables Fontainebleau	60	10	0	30	0	Q	0	0
Sables Fontainebleau	90	5	0	5	0	Q	G	0
Sables Lozère	70	30	0	tr	0	Q	G	0
sables argileux, Lozère	70	15	0	10	5	Q	G	0
Sables Lozère	55	5	0	30	0	Q	G	0
sables fins, St Eustache ?	70	10	0	20	0	Q	G	0
Sables St Eustache	50	50	0	tr ?	0	Q	G	0
Sables St Eustache	100	0	0	0	tr ?	Q	G	0
sables fins un peu argileux, St Eustache	70	30	0	0	0	Q	G	0
sables fins argileux, St Eustache	65	10	25	0	0	Q	G	0
argile grise et rouge, alluvions anciennes	85	5	0	10	0	Q	0	0

Tableau 30 : Minéralogie de la fraction argileuse des formations cénozoïques.  
Int (10-14sm) : Interstratifiées illite/smectite.

kaolinite du RS, tandis que dans l'Eure et le nord de l'Eure et Loir se sont plutôt les sables rattachés par leur faciès aux Sables de Fontainebleau qui ont contribué à une partie de cet enrichissement.

L'est du Pays de Caux et le Talou sont les seuls à présenter un RS à fraction argileuse riche en minéraux gonflants. L'âge récent (Plio-Quaternaire) de ce RS implique un degré d'altération relativement modéré, qui sous-entend que cette minéralogie peut être liée en partie à la craie. Mais le bilan granulométrique a montré que les apports extérieurs en fsf étaient importants dans ce secteur (cf. II.2.5.). Les limons, avec une minéralogie de la fraction inférieure à 2  $\mu\text{m}$  dont la smectite est le minéral dominant, peuvent en partie expliquer ces apports, de même que les argiles plastiques yprésiennes.

### 2.8.3. Origine des apports extérieurs - Arguments chimiques

Le bilan géochimique (cf. II.2.7.) a montré que les apports allochtones nécessaires pour obtenir la chimie des matrices des RS concernent essentiellement  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{TiO}_2$ . Les analyses chimiques des fractions inférieures à 2 mm des sables cénozoïques (Sables de St Eustache, de Lozère et de Fontainebleau, tabl. 31), avec bien entendu des teneurs en  $\text{SiO}_2$  très élevées, peuvent expliquer les apports en  $\text{SiO}_2$ , mais également participer à ceux en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{TiO}_2$ .

Les limons normands avec une chimie homogène (tabl. 32, d'après les travaux de Lautridou, 1985) peuvent aussi expliquer les apports pour ces quatre éléments.

On peut toutefois se demander si les formations sableuses cénozoïques et les limons quaternaires sont suffisants pour expliquer les différents apports en éléments chimiques ? Rien n'est moins sûr, notamment pour l'alumine.

M. Thiry et N. Trauth (1976b) ont donné une composition chimique moyenne des argiles paléogènes de la bordure tertiaire du Bassin de Paris (tabl. 33). Celle-ci indique que ces formations pourraient, outre la silice et le fer, être une source importante en alumine pour les RS.

**En conclusion, de nombreuses sources sont possibles pour expliquer ces apports allochtones (limons quaternaires, sables cénozoïques, argiles paléogènes).**

**Qualitativement ces sources sont différentes d'un secteur à un autre et elles sont en grande partie à l'origine des différentes familles géographiques de RS :**

- pour la gouttière normande (est du Pays de Caux) et le Talou, les limons et les argiles plastiques yprésiennes sont probablement les sources principales d'apports ;
- pour le reste du pays de Caux, le Roumois, la région d'Evreux et le sud-ouest du Vexin Normand, les Sables de Lozère et les limons quaternaires doivent contribuer à ces apports ;
- pour l'Eure (excepté l'est et le Roumois), on peut penser que les Sables de Fontainebleau participent à l'allochtonie ;
- pour le Perche, l'origine des apports est difficile à déterminer ;
- enfin dans le nord de l'Eure et Loir, les sables du Thimerais explique en partie ces apports.

Il demeure, néanmoins, un certain nombre d'interrogations sur l'origine de ces apports et il est **impossible actuellement de quantifier les parts respectives des différentes sources**. La résolution de ce problème passe en partie par une meilleure connaissance du monde tertiaire à l'ouest du Bassin de Paris.

Formations cénozoïques	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	Perte au Feu
Sables Fontainebleau	94,13	2,55	0,54	0,09	0,26	0,09	0,04	0,24	0,007	1,66
Sables Fontainebleau	87,06	6,6	1,2	0,14	0,39	0,18	0,11	0,23	0,014	3,91
Sables argileux, Fontainebleau	72,52	11,69	3,4	0,48	2,48	0,58	0,16	0,5	0,014	7,94
sables limonneux, Fontainebleau	81,35	6,36	0,69	0,25	6,5	0,2	0,07	0,3	0,007	4,14
Sables Fontainebleau	87,92	5,33	1,37	0,2	0,21	0,22	0,03	0,3	0,016	3,49
Sables Fontainebleau	86,49	4,35	2,57	0,13	0,04	0,27	0,09	0,27	0	4,17
Sables Fontainebleau ?	90,91	3,14	1,14	0,08	0,17	0,14	0,03	0,31	0,013	2,65
Sables Fontainebleau	87,04	5,92	1,64	0,09	0,12	0,13	0,04	0,26	0	4,02
Sables Lozère	81,16	7,94	3,47	0,38	0,92	0,54	0,05	0,3	0,007	5,15
Sables Lozère	84,9	6,65	2,08	0,2	0,17	0,29	0,03	0,24	0,006	4,28
Sables St Eustache ?	93,67	2,23	1,29	0,09	0,2	0,06	0,02	0,3	0,014	1,16
Sables St Eustache	97,27	0,33	0,36	0,04	0,24	0,04	0,02	0,21	0,039	0,24
Sables St Eustache	95,8	1,36	1,07	0,05	0,16	0,04	0,04	0,46	0,007	0,6
sables argileux, St Eustache	77,41	8,9	4,58	0,33	0,48	0,49	0,06	0,33	0,015	6,23

Tableau 31 : Composition chimique de la fraction inférieure à 2 mm des sables cénozoïques.

Limons	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO
	65 à 82	7 à 9,5	3 à 4	0,5 à 1	1,5 à 2	1	0,5 à 1	< 0,1

Tableau 32 : Composition chimique des limons (d'après les travaux de Lauridou, 1995).

Argiles paléogènes	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO
	51,9	27,27	6,15	1,34	0,31	1,4	0,02

Tableau 33 : Composition chimique des argiles paléogènes (Thiry et Trauth, 1976b).

## 2.9. Conclusion sur le bilan d'altération craies à silex / RS

La précision des chiffres donnés lors du bilan d'altération, est limitée par quelques contraintes méthodologiques et techniques :

- pour chaque RS, on ne connaît pas les parts respectives des différents étages de craie disparus. Le calcul des RS théoriques à partir des craies choisies comme roches-mères est effectué en moyennant les pourcentages d'insolubles sur plusieurs étages. Les caractéristiques lithologiques des craies coniaciennes, santoniennes et campaniennes étant relativement proches, il n'y a pas de problème pour les RS dont les craies-mères sont sénoniennes. Seuls les RS avec des roches-mères en partie turonienne sont plus douteuses, à cause de la lithologie bien tranchée entre les craies turoniennes et sénoniennes ;
- en l'absence de craies maastrichtiennes dans le Bassin de Paris, les caractéristiques lithologiques des craies campaniennes ont été retenues pour le Maastrichtien. Ceci se justifie par les analyses micropaléontologiques des silex creux des RS qui ont indiqué que les conditions de sédimentation n'ont pas changé entre le Campanien et le Maastrichtien ;
- la méthode d'évaluation de l'altération des silex au cours de la formation des RS, même si elle n'apparaît pas très précise, donne un ordre de grandeur qui montre que la quantité de silice dissoute au cours de l'altération des silex est faible ;
- il y a probablement une sous-évaluation des apports extérieurs. Si l'on se réfère au bilan géochimique, au cours de l'altération K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, MgO et CaO doivent être complètement ou en grande partie dissous et évacués. Or, les compositions chimiques des fsf des RS réels soulignent que ces éléments n'ont pas complètement disparus. Ceci est vraisemblablement lié à une compensation par des apports extérieurs. K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, MgO et CaO à l'origine dans les craies-mères ont complètement ou en grande partie disparus par dissolution et ont été remplacés par des apports extérieurs dont on ne peut évaluer l'importance.

Malgré les réserves faites ci-dessus, le bilan d'altération permet d'appréhender les épaisseurs de craie nécessaires pour donner les épaisseurs de RS observés sur le terrain. Celles-ci varient d'un secteur à un autre en fonction des familles de RS et de leur épaisseur.

Il montre que si l'altération des silex au cours de la formation des RS existe, elle est cependant faible.

Avec des rapports fsf/silex de 1/4 à 1/9 dans les craies contre 1/1 à 1/1,5 dans les RS, il est clair que si les silex proviennent en totalité de la craie, il n'en va pas de même pour les matrices des RS. Les apports allochtones en matrice sont incontestables et ils représentent une part très importante, notamment dans les dix premiers mètres des RS. Au-delà de 10 mètres, l'allochtonie diminue avec la profondeur et on peut penser que celle-ci devient nulle vers 20 mètres de profondeur, où les RS sont composés de 80 à 90 % de silex.

Les éléments chimiques concernés par ces apports sont essentiellement SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et TiO<sub>2</sub>.

Plusieurs sources d'apports sont possibles, sans que l'on puisse en déterminer les parts respectives. Parmi ces sources, on citera les limons quaternaires, les sables cénozoïques, les argiles paléogènes.

La répartition en familles géographiques des faciès dominants des RS est essentiellement liée :

- à l'altération météorique plus ou moins poussée des RS suivant leur âge ;
- à l'origine des apports allochtones de matrice qui est différente d'un secteur à un autre.

**CHAPITRE III :**

**LES FORMATIONS RESIDUELLES A SILEX DE  
VERSANT OU BIEFS A SILEX**

N. De Mercey (1880) et J. Gosselet (1890) utilisent pour la première fois le terme de bief à silex pour désigner les formations résiduelles à silex à matrice sableuse. B. Brajnikov (1938) le reprend et indique qu'il s'agit d'une formation constituée de silex concassés, de sables quartzeux et d'argiles. Dans le colloque sur les argiles à silex du Bassin de Paris, H. Elhai (1967) parle d'argiles à silex remaniées à matrice sableuse ou argilo-sableuse rencontrées soit dans des poches, soit sur les versants des vallées. Les participants du colloque recommandent alors d'utiliser plutôt le terme d'argiles à silex remaniées, plutôt que celui de biefs à silex. Le nom de bief à silex est malgré tout repris par Y. Dewolf (1982) qui définit ces formations comme des argiles à silex remaniées par la dynamique périglaciaire au Quaternaire. Selon cette définition, on peut rencontrer les biefs sur les versants, mais aussi en surface des plateaux (au niveau du premier mètre).

Le terme de bief à silex est donc ambigu car il peut, suivant les auteurs, désigner :

- les RS sableux et argilo-sableux localisés à proximité des poches de sables,
- les RS remaniés sur les versants,
- les RS remaniés en surface sur les plateaux.

Bien que ce terme puisse apparaître inapproprié et ambigu, nous l'avons tout de même retenu, car il est d'utilisation courante chez les exploitants de granulats. Il est alors essentiel lorsqu'on parle de bief à silex de bien définir le sens de ce terme, ce qui n'a pas toujours été le cas pour tous les travaux. Nous avons choisi une terminologie basée sur la position morphologique des sites étudiés. Ainsi, nous parlerons de biefs à silex uniquement pour les formations résiduelles à silex de versant.

## **1. Caractérisation lithologique des biefs à silex**

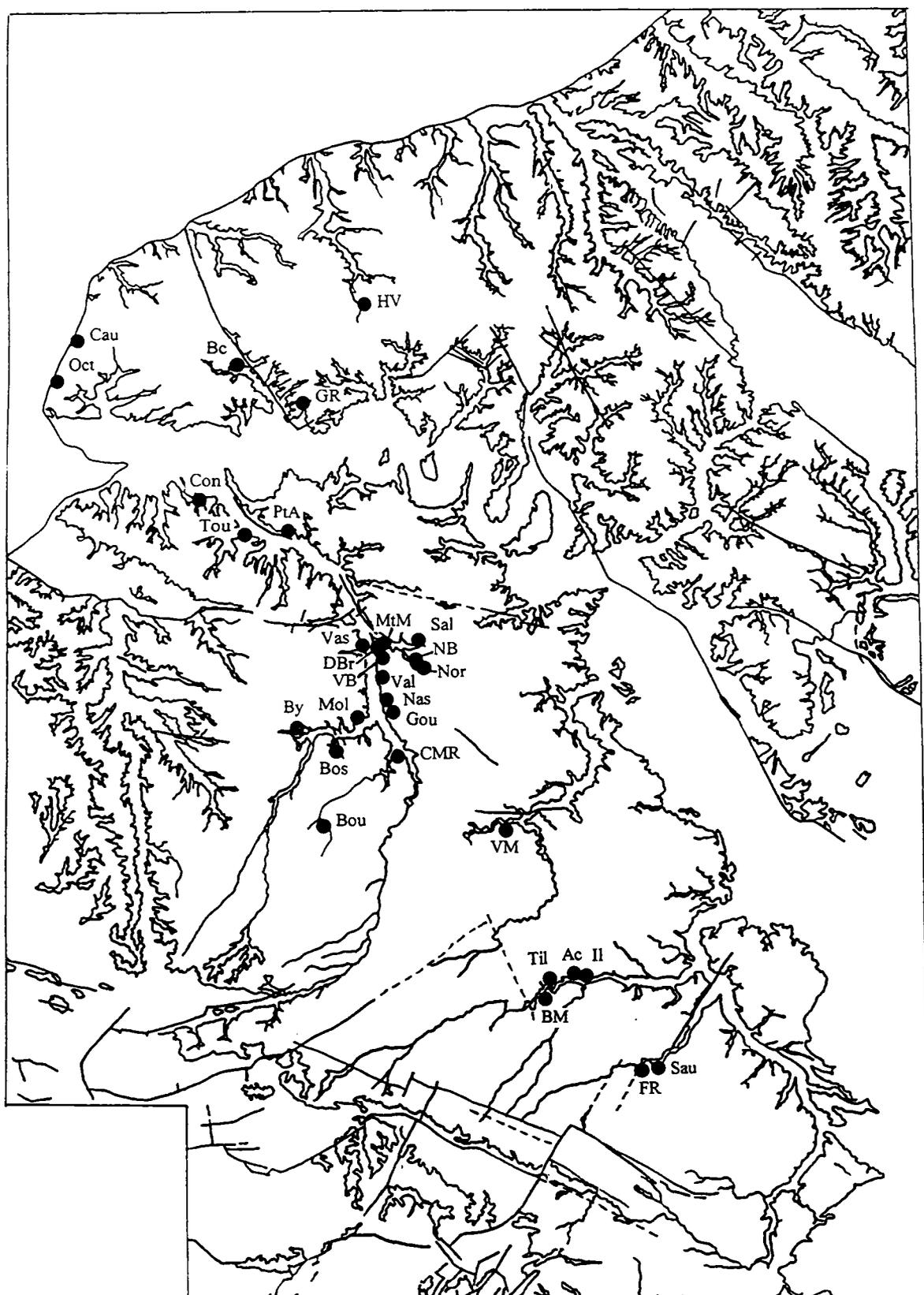
### **1.1. Présentation des sites de biefs à silex étudiés**

#### **1.1.1. Localisation géographique et géomorphologique**

Le choix des sites de RS de versant étudiés a été dicté par la présence ou non d'excavations encore fraîches, irrégulièrement réparties sur le territoire étudié. 30 sites ont ainsi été retenus pour la qualité des affleurements. Beaucoup de ces sites se localisent au niveau de la vallée de la Risle dans l'Eure, tandis que pour la Seine-Maritime et le reste de la zone étudiée, les affleurements sont plus dispersés (fig. 37).

Un certain nombre de paramètres morphologiques relatifs à ces sites sont reportés dans le tableau 34. Ils suscitent les remarques suivantes :

- Du point de vue de la nature du versant, on distingue : 19 versants de vallées sèches ou vallons secs et valleuses, 7 de vallées drainées et 4 à l'extrémité d'interfluves.
- 26 sites se localisent en haut de versant et seulement 4 à mi-versant.



**Figure 37: Localisation géographique des sites de biefs à silex étudiés.**

Echelle : 1/850 000.

Cau : Cauville, Oct : Octeville, HV : Hautôt le Vatois, Bc : Bolbec, GR : Grande Rue, Con : Conteville, Tou : Toutainville, PtA : Pont Audemer, Vas : La Vasserie, DBr : Déviation de Brionne, VB : Vallée aux Boeufs, MtM : Mont Mal, NB : Neuville du Bosc, Nor : Carrières de Normandie, Sal : Salverte, Val : Valleville, Mol : Les Mollands, Bos : La Bosquerie, Bou : Le Boulay, By : Bernay, Nas : Nassandres, Gou : Goupillères, CMR : Croix Maître Renault, VM : Vallée Moutarde, Til : Tilières/Avre, BM : Béro la Mulotière, Il : Ilou, Ac : Acon, Sau : Saulnières, FR : Fontaine les Ribouts.

sites	nature versant	position versant	exposition versant	encaissement en m	pente versant en degré	longueur versant en m	pente rebord du plateau en degré
Cauville	valleuse	haut de versant	ssw	15	14,5	80	4
Octeville	valleuse	haut de versant	sw	10	15	30	< 1
Hautot le V	vallée sèche	haut de versant	ssw	10	13	60	< 1
Bolbec	vallée sèche	haut de versant	s à sse	40	20	105	4
Gde Rue	vallée sèche	haut de versant	ssw	30	9	90	4
Conteville	interfluve	haut de versant					
Toutainville	interfluve	haut de versant					
Pt Audemer	vallée drainée	haut de versant	ssw	70	21	180	< 1
La Vasserie	vallon sec	haut de versant	wsw	10	16	30	2,5
Dév Brionne	vallon sec	haut de versant	sw	25	16	75	1
V aux Boeufs	vallée sèche	haut de versant	sw	40	21	100	5
Mt Mal	vallée drainée	haut de versant	ne	45	25	125	2
Neuville du B	vallée sèche	haut de versant	se	30	25	70	< 1
C Normandie	vallée sèche	haut de versant	sw	30	20	105	< 1
Salverte	vallon sec	haut de versant	w	15	18	60	< 1
Valleville	vallée drainée	haut de versant	w	65	18	220	5
Les Mollands	vallon sec	haut de versant	sw	15	15	55	< 1
La Bosquerie	vallée sèche	haut de versant	wnw	10	6	85	2
Le Boulay	vallée sèche	haut de versant	nw	10	20	35	4,5
Dév Bernay	vallée sèche	haut de versant	s	15	19	50	2,5
Nassandres	vallée drainée	haut de versant	w	65	15,5	255	1
Goupillères	vallon sec	haut de versant	nnw	20	24	40	3
Croix M R	interfluve	mi-versant					
V Moutarde	vallon sec	haut de versant	ne	10	7	80	< 1
Tillières / A	vallée sèche	mi-versant	wsw	10	22	40	4,5
Bérou la M	vallée drainée	mi-versant	nw	35	29	110	< 1
Ilou	vallée drainée	mi-versant	ssw	30	21	100	5
Acon	vallée drainée	haut de versant	ssw	40	23	100	< 1
Saulnières	interfluve	haut de versant					
Fontaine les R	vallée sèche	haut de versant	sw	20	21,5	40	< 1

Tableau 34 : Paramètres morphologiques des sites de biefs à silex étudiés.

- Il est possible de rencontrer des biefs à silex quelle que soit l'exposition des affleurements. Cependant, ces formations s'observent plus fréquemment sur les versants exposés du sud à l'ouest : 18 sites sur les 26 situés en versant de vallées drainées ou sèches ou vallons secs présentent ces expositions.

- Au niveau des sites, les vallées présentent des encaissements (dénivelé entre le rebord du plateau et le fond de la vallée) qui varient entre 10 et 70 mètres. Les vallées sèches ou vallons secs présentent les encaissements les plus faibles de 10 à 40 mètres, tandis que les vallées drainées ont les encaissements les plus forts de 30 à 70 mètres.

- La pente des versants correspond à la pente moyenne mesurée à l'aplomb des affleurements. Ces mesures montrent que les biefs peuvent se rencontrer sur des pentes de 6 à 29 degrés. Sur le terrain, nous avons cherché en vain à déceler la présence de biefs sur des versants ayant des pentes supérieures à 29 degrés ou inférieures à 6 degrés. Cependant, des biefs ont été décrits par Y. Dewolf (1982) sur des pentes allant jusqu'à un minimum de 3 degrés.

- D'autre part, les biefs à silex se trouvent sur des versants de longueur très variable. En effet, on rencontre ces formations aussi bien sur des versants courts (30 m) que sur des versants longs (255 m).

- La pente du plateau localisé à proximité du versant (ou pente du rebord du plateau) varie de 5 à moins de 1 degrés.

Enfin, on s'aperçoit que la relation entre la pente et l'exposition des versants, qui veut, dans nos régions, que les versants exposés au sud, au sud-ouest et à l'ouest aient une pente forte et que ceux exposés au nord, au nord-est et à l'est aient une pente faible (Dewolf, 1982), n'est pas systématique. D'ailleurs, C. Lechevalier (1966) et J. P. Lautridou (1985) indiquent, pour le Pays de Caux et l'Artois, que la dissymétrie des versants n'est pas systématique et que celle-ci est liée à certaines conditions d'encaissement, de pente et de longueur des vallées.

### **1.1.2. Faciès observés à partir des coupes de terrain**

La description des affleurements, ainsi que l'échantillonnage des biefs à silex sont donnés dans l'annexe 3.

A l'observation, les formations résiduelles à silex de versant se caractérisent par leur richesse en silex et par la présence de silex cassés. Y. Dewolf (1982) souligne que le bief à silex se reconnaît par la présence dans toute sa masse de silex éclatés et d'esquilles anguleuses. Ces formations sont également fortement hétérogènes avec des matrices de teinte et de composition très variables d'un site à un autre, mais également au sein d'un même site. En effet, il n'est pas rare de trouver sur un même site deux à trois faciès différents.

Parmi l'ensemble des faciès observés, il en existe un particulier que l'on retrouve sur 16 des 30 sites étudiés. Il s'agit d'un matériau très riche en silex à matrice sableuse blanchâtre à ocre clair qui s'observe au sommet des coupes sur un niveau plus ou moins continu et plus ou moins épais : de 0,5 à 3 m suivant les sites. Il peut aller jusqu'à former à certains endroits des puits verticaux étroits. Ce faciès présente dans certaines zones des silex jointifs avec des vides interstitiels entre les silex. Ces silex sont très cassés et l'on remarque la présence de nombreuses esquilles. On constate que le développement maximal de ce faciès se situe au niveau des interfluves avec des épaisseurs supérieures à 1 m et pouvant atteindre jusqu'à 3 m. Ce faciès témoigne incontestablement de lessivage intense au sommet des biefs à silex et tout particulièrement pour les biefs localisés à l'extrémité des interfluves.

Parmi les figures particulières observables dans les biefs, il n'est pas rare de trouver des lentilles ou paquets sableux à sablo-limoneux disséminés au sein du matériau. En revanche, seuls les biefs situés à l'extrémité des interfluves montrent des figures de creeping et de fauchage. Celles-ci sont situées au sommet des coupes dans les trois à quatre premiers mètres. Elles s'orientent dans le sens de la pente du versant. Le creeping et le fauchage indiquent du lessivage et des déplacements suivant le sens de la pente du versant.

## **1.2. Granulométrie des biefs à silex**

Tout comme les RS de plateau, seuls les faciès dominants de chaque site ont été échantillonnés.

Les résultats représentés dans le tableau 35 montrent :

- des teneurs en cailloux élevées de 55 à 81 %, avec une moyenne de 65,7 % ;
- des teneurs en graviers assez hétérogènes de 5 à 23% ;
- concernant les matrices (fraction inférieure à 2 mm), leurs teneurs sont variables (8 à 40%) et leurs compositions sont hétérogènes comme le souligne la dispersion des points représentatifs des biefs à silex sur la figure 38.

Que se soit pour les teneurs en cailloux, en graviers de silex ou la teneur et la composition des matrices, on n'observe pas comme pour les RS de plateau de variation d'ordre régional. A titre d'exemple, la composition des matrices, dans un secteur géographiquement restreint à la Vallée de la Risle, présente une forte hétérogénéité d'un site à un autre malgré la faible distance qui les sépare (fig. 39). Cette hétérogénéité dans la composition des matrices peut se retrouver au sein d'un même site. De nombreux sites dans ce secteur géographique présentent souvent deux à trois faciès de matrices différents.

## **1.3. Caractérisation des matrices des biefs à silex**

### **1.3.1. Minéralogie de la fraction argileuse des biefs à silex**

La minéralogie de la fraction inférieure à 2 µm des biefs à silex est reportée dans le tableau 36. Elle est riche en kaolinite, avec une moyenne de 73,3 %. Les teneurs en kaolinite sont néanmoins variables, puisqu'elles sont comprises entre 35 et 100 %. Sur les 56 échantillons étudiés, seulement deux échantillons présentent des teneurs en kaolinite inférieures à 50 %. Il s'agit de deux échantillons prélevés en sommet de coupes dans le faciès lessivé en matrice.

Les quantités d'illite sont faibles, toujours inférieures ou égales à 25 %.

Les teneurs en smectite et en interstratifiés kaolinite/smectite sont relativement faibles et variables, respectivement de 0 à 40 % et de 0 à 35 %.

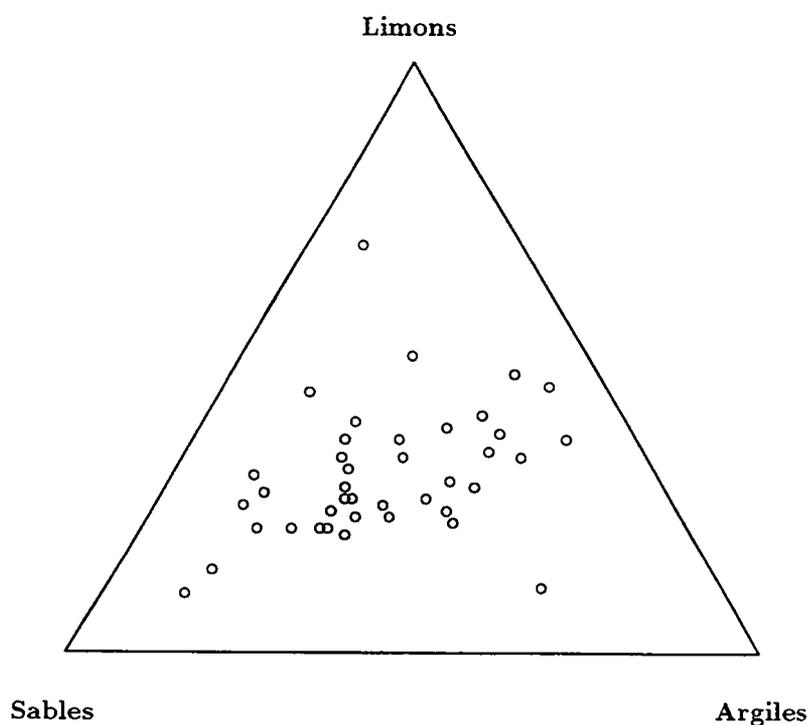
En ce qui concerne les autres minéraux de la fraction argileuse :

- la chlorite, les interstratifiés illite/smectite à feuillets chloritiques, les interstratifiés chlorite/vermiculite, la gibbsite, la lépidocrocite et l'opale CT sont présents dans quelques échantillons ;

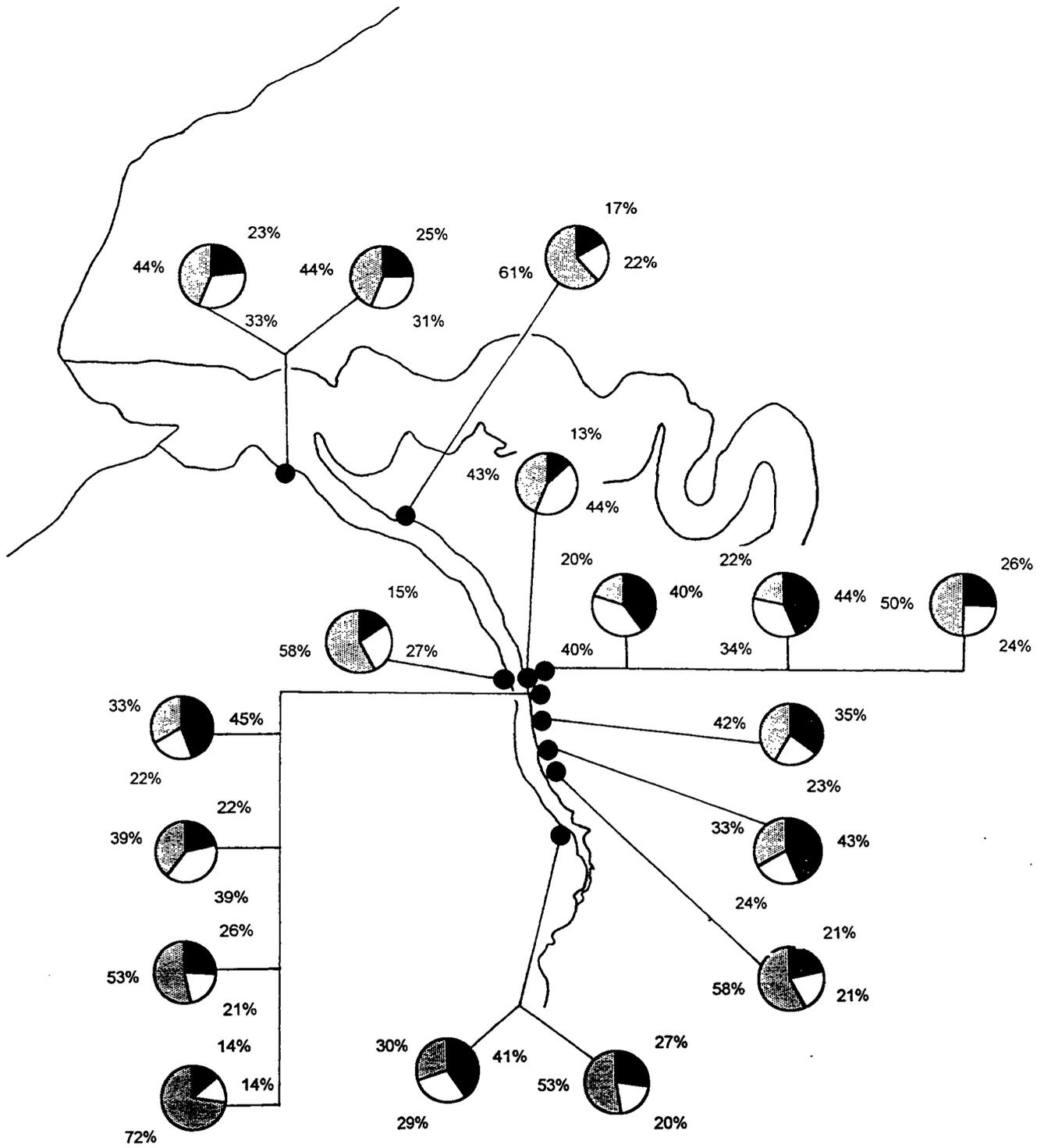
	Cailloux	Graviers	Matrice		
			Sables	Limons	Argiles
Cau 1	68	7	9	6,5	9,5
Cau 2	58	14,5	13	6,5	8
Oct	63	5			
HV 1	62,5	11,5	12	7	7
Bc 1	59	10	11	10	10
GR	59	7	3	15	16
Con 1	60	22	8	6	4
Con 2	79	13	3,5	2,5	2
Tou	78	15			
PTA	67	13	12	4,5	3,5
Vas 1	60	15	14	7	4
DBr	55	22	10	10	3
VB 1	71	11	6	4	8
VB 2	70	10	8	8	4
VB 3	70	13	9	3,5	4,5
VB 4	74	8	13	2,5	2,5
MtM 1	67	13	4	8	8
MtM 2a	57	11	7	11	14
MtM 2b	55	11	7	12	15
MtM 3	69	11	10	5	5
NB 1	68	14	8	5	5
Nor 1	60	9	11	11	9
Nor 2	59	12,5	12,5	10	6
Sal 1	62	14	10	6	8
Val 1	67	8	10	6	9
Mol 1	63	15	6	6	10
Bos 1	58	9,5	6	10,5	16
Bos 2	55	10	16	9	10
Bos 3	60	6	20	10	4
Bou 1	68	12	4	7	9
By 1	68	10			
By 2	59	9			
Nas	62	8	10	7	13
Gou 1	71	11	10	4	4
CMR 1	64	18	5	5,5	7,5
CMR 2	81	11	4	2	2
VM 1	55	5	31	4	5
Til 1	74	13	3	9	1
BM	74	13			
II	64	19,5	4	6,5	6
Ac 1	70	10	2	7	11
Ac 2	79	11	5	2	3
Sau 1	72	11	2	8	7
Sau 2	78	14	5	2	1
Sau 3	72	12	4	8	4
FR	59	23	5	2	11
<b>moyenne</b>	<b>65,7</b>	<b>12,0</b>	<b>8,6</b>	<b>6,7</b>	<b>7,1</b>
<b>écartype</b>	<b>7,2</b>	<b>4,0</b>	<b>5,4</b>	<b>3,0</b>	<b>4,0</b>
<b>max</b>	<b>81</b>	<b>23</b>	<b>31</b>	<b>15</b>	<b>16</b>
<b>min</b>	<b>55</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>

Tableau 35 : Granulométries des biefs à silex (% massique).

Cailloux : > 20 mm, Graviers : 20 à 2 mm, Sables : 2 mm à 50  $\mu$ m,  
 Limons : 50 à 2  $\mu$ m, Argiles : < 2  $\mu$ m.

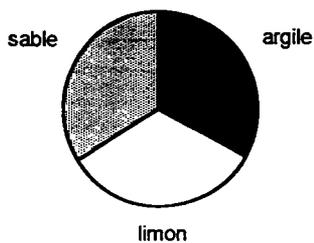


**Figure 38 : Diagramme triangulaire des compositions granulométriques des matrices (fraction inférieure à 2 mm) des biefs à silex (en %m).**



**Figure 39 : Composition granulométrique des matrices (fraction inférieure à 2 mm) des biefs à silex de la Vallée de la Risle.**

Légende :



échantillons	faciès	Kaolinite	Illite	Smectite	Int (7-14sm)	Chlorite	Int (10-14sm)ch	Int (14ch-14v)	Pyrophyllite	Gibbsite	Quartz	Goéthite	Lépidocrocite	opale CT
Cau 1	argilo-sablo-limoneux	70	15	0	15	0	0	0	0	0	Q	G	0	0
Cau 2	sableux à sablo-argileux	60	25	0	15	0	0	0	0	0	Q	G	0	0
HV1	sablo-argilo-limoneux	60	10	0	0	0	30	0	0	0	Q	G	0	0
HV2	sableux	70	20	0	10	0	0	0	0	0	Q	G	0	0
Bc 1	argilo-limono-sableux	90	5	0	5	0	0	0	0	0	Q	G	0	0
Bc 2	sablo-limoneux	70	0	0	25	0	0	0	5	0	Q	0	0	0
GR	argilo-limoneux	65	10	0	25	0	0	0	0	0	Q	G	0	0
Con 1	sablo-limono-argileux	75	10	0	15	0	0	0	0	0	Q	G	L	0
Con 2	lessivé en matrice	70	15	0	10	0	0	0	5	0	Q	0	L	0
PtA	sableux à sablo-limono-argileux	75	5	0	20	0	0	0	0	0	Q	G	0	0
Vas 1	sableux	80	5	0	15	0	0	0	0	0	Q	G	0	0
VB 1	argileux	80	10	0	10	0	0	0	0	0	Q	0	0	0
VB 2	limono-sablo-argileux	80	5	10	5	0	0	0	0	0	0	0	0	CT
VB 3	sableux à sablo-argileux	90	5	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	CT
VB 4	sableux	95	5	tr	tr	0	0	0	0	0	Q	0	0	CT
MtM 1	argilo-limoneux	70	10	15	0	0	0	0	5	0	Q	0	0	0
MtM 2	argileux à argilo-limoneux	70	5	0	25	0	0	0	tr	0	Q	0	0	0
NB 1	sablo-limono-argileux	75	10	0	15	0	0	0	0	0	Q	G	0	0
NB 2	limono-argilo-sableux	55	20	0	20	0	0	0	5	0	Q	0	0	0
NB 3	lessivé en matrice	35	0	0	0	0	0	65	0	0	Q	0	0	0
Nor 1	argilo-limono-sableux	75	10	0	15	0	0	0	0	0	Q	G	0	0
Nor 2	sableux à sablo-argilo-limoneux	65	15	0	15	0	0	0	5	0	Q	0	0	0
Sal 1	sablo-argilo-limoneux	80	5	0	15	0	0	0	0	0	Q	0	0	0
Sal 2	lessivé en matrice	80	10	0	10	0	0	0	0	0	Q	0	0	0
Val 1	argilo-limono-sableux	75	5	0	20	0	0	0	0	0	Q	0	0	0
Val 2	sablo-argilo-limoneux	80	5	0	15	0	0	0	0	0	Q	0	0	0
Val 3	lessivé en matrice	65	15	0	0	0	15	0	5	0	Q	G	0	0
Mol 1	argileux	75	10	0	15	0	0	0	0	0	Q	G	0	0
Mol 2	très argileux	75	15	0	10	0	0	0	0	0	Q	0	L	0
Mol 3	lessivé en matrice	90	5	0	0	0	0	0	5	0	Q	0	0	0
Mol 4	sableux	75	10	0	15	0	0	0	0	0	Q	0	0	0
Bos 1	argileux à argilo-limoneux	70	15	0	15	0	0	0	0	0	Q	0	0	0
Bos 2	sableux à sablo-argileux	60	10	0	30	0	0	0	0	0	Q	0	0	0
Bos 3	sableux	55	10	0	35	0	0	0	0	0	Q	0	0	0
Bos 4	lessivé en matrice	45	20	0	10	25	0	0	0	0	Q	0	0	0
Bou 1	argilo-limoneux	55	5	40	0	0	0	0	0	0	Q	G	0	0
Bou 2	lessivé en matrice	80	5	0	0	0	15	0	0	0	Q	0	0	0
Nas	argileux	65	10	0	25	0	0	0	0	0	Q	G	0	0
Gou 1	sablo-limono-argileux	50	10	0	30	0	0	0	10	0	Q	0	L	0
Gou 2	argileux	100	0	0	0	0	0	0	0	0	Q	0	0	0
CMR 1	argileux	55	5	40	0	0	0	0	0	0	Q	0	0	0
CMR 2	lessivé en matrice	80	10	0	0	0	0	0	10	0	Q	G	0	0
VM 1	sableux	100	0	0	0	0	0	0	0	0	Q	0	L	0
VM 2	argilo-sableux	85	5	0	10	0	0	0	0	0	Q	0	0	0
VM 3	argileux à argilo-sableux	60	20	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0
Til 1	limoneux	75	5	0	20	0	0	0	0	0	Q	G	0	0
Til 2	sablo-limono-argileux	75	10	15	0	0	0	0	0	0	Q	G	0	0
Il	argilo-limoneux	55	15	15	10	0	0	5	0	0	Q	G	0	0
Ac 1	argileux à argilo-limoneux	90	5	0	tr	0	0	0	5	0	Q	G	0	0
Ac 2a	sableux à sablo-argilo-limoneux	55	10	0	35	0	0	0	0	0	Q	G	0	0
Ac 2b	sableux à sablo-argilo-limoneux	100	0	0	tr	0	0	0	0	0	Q	G	0	0
Ac 3	lessivé en matrice	75	5	0	15	0	0	0	5	0	Q	0	0	0
Sau 1	argilo-limoneux	85	0	0	15	0	0	0	0	0	Q	0	0	0
Sau 2	lessivé en matrice	95	5	tr	tr	0	0	0	0	0	Q	0	0	0
Sau 3	limoneux	85	15	0	tr	0	0	0	0	0	Q	0	0	0
FR	argileux	80	5	0	5	0	10	0	0	0	Q	G	0	0
moyenne		73,3	8,7	2,5	11,1	0,5	1,3	1,3	1,2	0,4	/	/	/	/
écartype		14,1	5,7	8,1	9,9	3,3	5,0	8,7	2,7	2,7	/	/	/	/
max		100	25	40	35	25	30	65	10	20	Q	G	L	CT
min		35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 36 : Minéralogie de la fraction argileuse des biefs à silex (en %).

tr : traces, Q : quartz présent.

Int (7-14sm) : interstratifiés kaolinite/smectite, Int (10-14sm)ch : interstratifiés illite/smectite à feuillets chloritiques,

Int (14ch-14v) : interstratifiés chlorite/vermiculite.

- la pyrophyllite est présente dans 12 échantillons, principalement prélevés dans des faciès lessivés et sableux ;
- le quartz est présent dans pratiquement tous les échantillons ;
- quant à la goethite, elle est fréquente, puisqu'on la trouve dans 23 des 56 échantillons étudiés.

Contrairement aux RS de plateau, la minéralogie de la fraction argileuse des biefs à silex ne présente pas d'organisation régionale.

### **1.3.2. Chimie des matrices des biefs à silex**

Les matrices (fraction inférieure à 2 mm) des biefs à silex présentent des compositions chimiques variables, dans lesquelles SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont les trois éléments majeurs dominants (tabl. 37).

Les matrices sont riches en SiO<sub>2</sub>, avec une teneur moyenne de 70,9 %. Les quantités de SiO<sub>2</sub> sont néanmoins variables, puisqu'elles oscillent entre 45 et 94,1 %.

Les pourcentages d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont également variables, de 2,6 à 29,7 % pour Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et de 0,1 à 13,3 % pour Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Les teneurs en MgO, CaO, K<sub>2</sub>O et Na<sub>2</sub>O sont très faibles, avec des valeurs toujours inférieures à 1 %, à l'exception de deux échantillons pour CaO. Ces deux échantillons ont été prélevés dans des faciès incontestablement enrichis en sables par des contaminations extérieures.

TiO<sub>2</sub> est présent dans tous les échantillons, avec des teneurs faibles (0 à 1,1 %).

MnO est également présent en très faibles quantités (0 à 0,18 %) dans pratiquement tous les échantillons de biefs à silex.

Tout comme la minéralogie de la fraction argileuse, la composition chimique des matrices des biefs à silex ne montre pas d'organisation régionale.

## **1.4. Caractérisation des silex des biefs à silex**

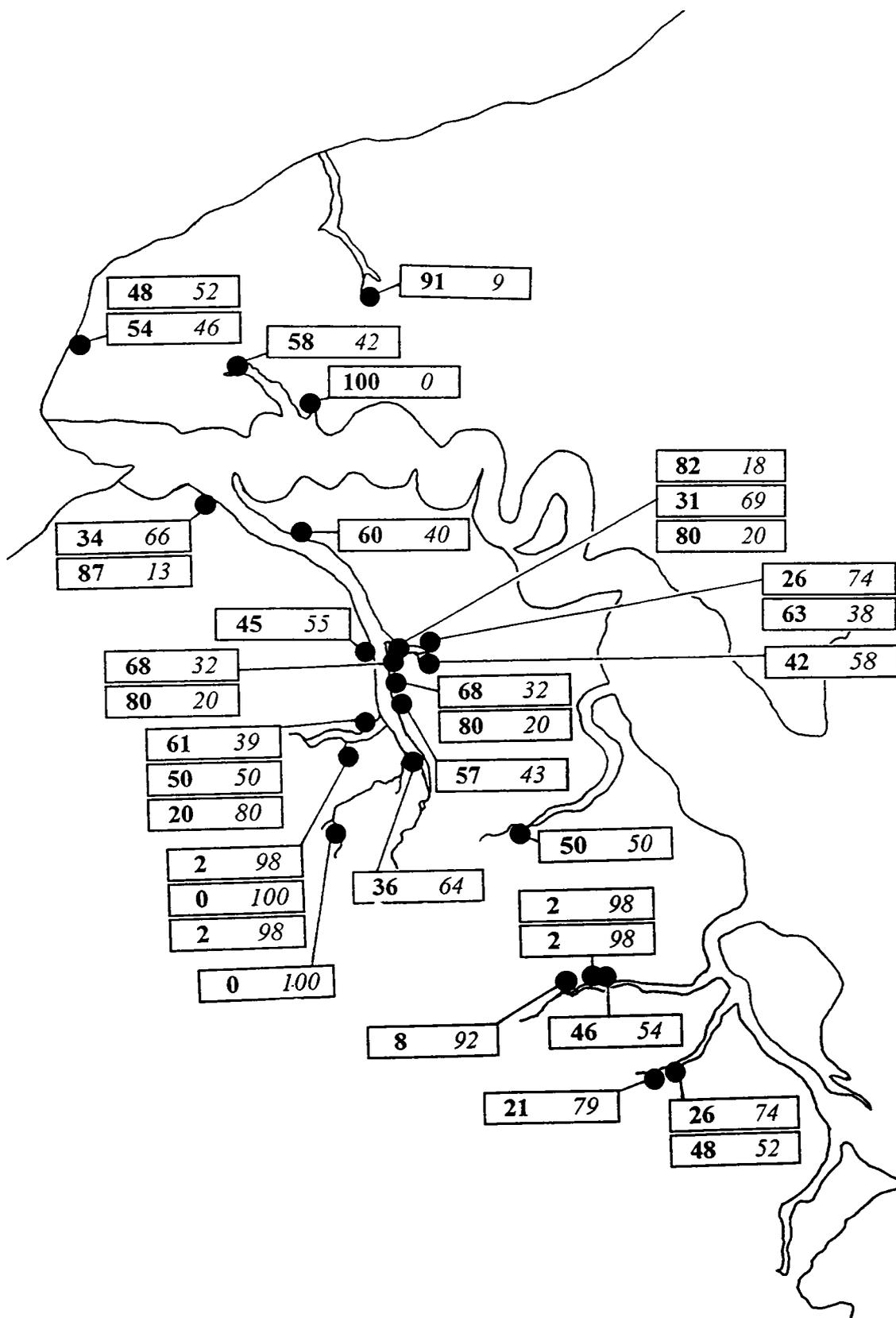
### **1.4.1. Observations macroscopiques des silex des biefs à silex**

Au niveau de la teinte des silex, on observe conjointement du nord vers le sud, une augmentation du pourcentage de silex bruns et une diminution du nombre de silex gris (fig. 40). En effet, dans le Pays de Caux ce sont les silex gris qui dominent, tandis qu'au sud de l'Eure et dans le nord de l'Eure et Loir, les silex bruns sont les plus nombreux.

Les autres critères macroscopiques des silex (forme, fragmentation, marques d'oxydation, cortex...) ne présentent pas d'organisation géographique. Ils montrent une variabilité d'un site à un autre, mais également au sein d'un même site (tabl. 38). Le pourcentage de fragmentation oscille entre 28 et 85 %. L'importance du cortex varie de 12 à 39%. Les silex des biefs à silex sableux sont généralement ceux qui ont les cortex les plus développés. Enfin, les pourcentages de silex avec des marques d'oxydation sont compris entre 0 et 100 %. Il semble toutefois, pour ce dernier critère, que le nombre de silex avec des taches d'oxydation augmente du nord vers le sud.

Echantillons	faciès	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	Perte au feu
Cau 1	argilo-sablo-limoneux	56,07	19,75	7,44	0,44	0,22	0,67	0,11	0,57	0,017	13,17
Cau 2	sableux à sablo-argileux	74,91	8,96	6,74	0,32	0,38	0,46	0,09	0,42	0,021	7,34
HV 1	sablo-argilo-limoneux	49,56	19,01	13,34	0,67	0,15	0,74	0,08	0,51	0,182	14,22
HV 2	sableux	86,43	5,2	2,71	0,16	0,17	0,23	0,04	0,32	0,012	3,69
Bc 1	argilo-limono-sableux	64,44	16,51	5,54	0,21	0,49	0,4	0,09	0,72	0,016	10,06
Bc 2	sablo-limoneux	78,19	11,51	1,32	0,17	0,65	0,07	0,03	0,57	0,013	6,95
GR	argilo-limoneux	54,48	20,23	7,69	0,61	0,29	0,87	0,1	0,76	0,034	13,79
Con 1	sablo-limono-argileux	61,2	16,91	7,04	0,45	0,25	0,64	0,06	0,58	0,016	11,11
Con 2	lessivé en matrice	83,14	6,66	2,01	0,2	0,17	0,27	0,05	0,39	0,008	5,56
PTA	sableux à sablo-limono-argileux	81,77	7,75	2,77	0,21	0,25	0,26	0,04	0,35	0,02	5,41
Vas 1	sableux	73,99	11,6	3,76	0,28	0,1	0,46	0,07	0,45	0,006	7,81
VB1	argileux	57,33	27,56	1,78	0,44	0,22	0,56	0	0,33	0	11,78
VB 2	limono-sablo-argileux	58,04	24,46	0,76	0,71	0,33	0,76	0	0	0	14,94
VB 3	sableux à sablo-argileux	66,01	16,52	0,1	0	0	0,42	0	0	0	16,94
VB 4	sableux	77,67	12,92	0,63	0	0	0,63	0	0,28	0	7,87
MTM 1	argilo-limoneux	65,78	14,61	4,47	0,45	0,69	0,65	0,1	0,73	0,007	11,15
MTM 2	argileux à argilo-limoneux	62,96	16,76	5,08	0,47	0,2	0,57	0,08	0,79	0,007	10,64
MTM 3	sableux	94,13	2,55	0,54	0,09	0,26	0,09	0,04	0,24	0,007	1,66
NB 1	sablo-limono-argileux	74,11	11,6	3,72	0,31	0,68	0,34	0,1	0,63	0,028	7,57
NB 2	limono-argilo-sableux	69,88	13,49	5,17	0,56	0,3	0,59	0,08	0,97	0,068	8,93
Nor 2	sableux à sablo-argilo-limoneux	72,52	11,69	3,4	0,48	2,48	0,58	0,16	0,5	0,014	7,94
Sal 1	sablo-argilo-limoneux	68,05	14,48	4,34	0,4	0,26	0,54	0,08	0,47	0,007	9,77
Sal 2	lessivé en matrice	73,1	8,75	2,36	0,6	6,94	0,4	0,07	0,39	0,016	7,24
Val 1	argilo-limono-sableux	60,93	18,65	4,59	0,57	0,04	0,57	0,08	0,58	0,007	12,4
Val 3	lessivé en matrice	92,85	2,74	1,17	0,09	0,11	0,41	0,23	0,4	0,014	1,77
Mol 1	argileux	56,23	20,88	5,85	0,53	0,41	0,7	0,08	0,81	0,053	12,84
Mol 2	très argileux	73,78	14,69	1	0,2	0,17	0,17	0,04	0,52	0,008	7,67
Mol 3	lessivé en matrice	84,86	6,31	1,75	0,14	0,04	0,19	0,07	0,39	0,007	4,78
Mol 4	sableux	63,02	18,74	2,92	0,45	0,38	0,43	0,06	0,87	0,008	11,48
Bos 1	argileux à argilo-limoneux	71,3	13,92	2,71	0,35	0,45	0,4	0,06	0,77	0,007	8,71
Bos 3	sableux	87,92	5,33	1,37	0,2	0,21	0,22	0,03	0,3	0,016	3,49
Bos 4	lessivé en matrice	91,25	2,74	1,49	0,14	0,08	0,51	0,36	0,47	0,007	1,76
Bou 1	argilo-limoneux	56,44	18,4	6,92	0,69	0,48	0,74	0,11	0,67	0,019	13,68
Bou 2	lessivé en matrice	89,56	4,03	2,01	0,19	0,3	0,29	0,05	0,36	0,012	3,07
Nas	argileux	59,01	19,43	7,35	0,44	0,41	0,68	0,06	0,76	0,023	11,72
Gou 1	sablo-limono-argileux	63,85	17,62	3,42	0,62	0,48	0,54	0,08	0,32	0,008	11,83
Gou 2	argileux	79,96	9,76	1,12	0,13	0,04	0,06	0,04	0,59	0,007	6,53
CMR 1	argileux	63,85	15,43	5,54	0,64	0,35	0,73	0,12	0,55	0,014	11,15
CMR 2	lessivé en matrice	92,29	3,07	1,18	0,09	0,14	0,18	0,08	0,28	0,02	2,58
VM 1	sableux	90,91	3,14	1,14	0,08	0,17	0,14	0,03	0,31	0,013	2,65
VM 2	argilo-sableux	58,88	21,21	4,01	0,38	0,21	0,49	0,06	1,1	0,013	12,01
VM 3	argileux à argilo-sableux	52,03	29,69	0,95	0,26	0,43	0,23	0,06	0,09	0,013	15
Til 1	limoneux	61,43	15,87	8,72	0,4	0,08	0,48	0,11	0,46	0,046	11,06
Til 2	sablo-limono-argileux	88,74	3,58	2,81	0,16	0,1	0,18	0,05	0,21	0,037	3,16
Ac 1	argileux à argilo-limoneux	64,59	16,66	5,52	0,24	0,24	0,3	0,08	0,53	0	10,63
Ac 2a	sableux à sablo-argilo-limoneux	81,4	6,26	4,84	0,23	0,23	0,3	0,04	0,28	0	5,64
Ac 2b	sableux à sablo-argilo-limoneux	78,82	8,35	4,42	0,13	0,14	0,22	0,07	0,4	0,005	6,17
Ac 3	lessivé en matrice	86,67	5,41	2,27	0,17	0,11	0,27	0,07	0,43	0,007	4,28
Sau 1	argilo-limoneux	44,96	24,16	13,26	0,67	0,25	0,8	0	0,94	0	14,94
Sau 2	lessivé en matrice	67,2	15,36	1,65	0,75	0,32	0,88	0	0,49	0	13,33
Sau 3	limoneux	49,53	23,59	5,84	0,74	0,32	0,96	0	0,43	0	18,59
Moyenne		70,9	13,42	3,89	0,35	0,43	0,46	0,07	0,5	0,017	8,99
Ecartype		13,11	6,95	2,91	0,21	0,98	0,23	0,059	0,23	0,027	4,28
Max		94,13	29,69	13,34	0,75	6,94	0,96	0,36	1,1	0,182	18,59
Min		44,96	2,55	0,1	0	0	0,06	0	0	0	1,66

Tableau 37 : Chimie des matrices (fraction inférieure à 2 mm) des biefs à silex. Résultats analytiques bruts en %massique.



**Figure 40 : Répartition cartographique de la teinte des silex des biefs à silex.**  
 silex gris et noirs (en gras)  
 silex bruns et rouges (en italique)

échantillons	Teinte				Zonation		Forme						marques d'oxydation	Cavité		Fissile		Fragmentation	Cortex
	noir	gris	brun	rouge	oui	non	rognon	parall.	irrégulier	caverneux	nodule	oui		non	oui	non	oui		
Cau 1	0	48	52	0	0	100	54	23	15	4	4	39	61	0	100	30	33		
Cau 2	0	54	46	0	0	100	61	11	22	0	0	33	67	0	100	28	31		
HV 1	0	91	9	0	0	100	70	20	0	0	0	20	80	18	82	41	32		
Bc 1	0	58	42	0	2	98	72	12	2	14	0	28	72	10	90				
GR	0	100	0	0	14	86	53	32	16	0	0	43	57	43	57	40	28		
Con 1	0	34	66	0	12	88	56	34	8	2	0	48	52			65			
Con 2	20	67	13	0	30	70	44	50	6	0	0	60	40	7	93	85	33		
PtA	0	60	40	0	10	90	72	11	11	6	0	30	70	0	100	50	31		
Vas 1	0	45	55	0	0	100	63	25	13	0	0	33	67	0	100	42	39		
VB 1	0	68	32	0	4	96	42	28	6	24	0	24	76			50			
VB 4	0	80	20	0	8	92	42	38	18	0	2	30	70			57			
MGM 1	0	82	18	0	0	100	38	44	19	0	0	86	14	0	100	54	30		
MGM 2	0	31	69	0	10	90	41	35	12	12	0	60	40	0	100	44	24		
MGM 3	0	80	20	0	0	100	50	33	17	0	0		100	40	60	59	39		
NB 1	8	34	58	0	0	100	75	25	0	0	0	13	88	4	96	56	32		
Sal 1	0	26	74	0	20	80	73	27	0	0	0	20	80	10	90	51	17		
Sal 2	0	63	38	0	0	100	67	17	0	17	0	20	80	18	82		23		
Val 1	0	68	32	0	0	100	50	11	17	22	0	43	57	0	100	46	24		
Val 3	0	80	20	0	0	100	88	13	0	0	0	38	63	8	92		30		
Mol 1	0	61	39	0	0	100	42	33	17	8	0	17	83	0	100	44	23		
Mol 2	0	50	50	0	0	100	75	6	19	0	0	31	69	0	100		28		
Mol 3	0	20	80	0	6	94	80	20	0	0	0	60	40	5	95				
Bos 1	0	2	98	0	4	96	50	38	13	0	0	25	75	0	100		20		
Bos 2	0	0	100	0	6	94	38	38	15	8	0	45	55	0	100	38	25		
Bos 3	0	2	98	0	8	92	50	38	13	0	0	90	10	0	100		29		
Bou 1	0	0	96	4	0	100	64	16	8	12	0	20	80	20	80	51	12		
Nas	0	57	43	0	0	100	53	13	27	0	7	47	53	0	100	34	21		
CMR 1	0	36	64	0	8	92	42	50	0	8	0	32	68			62			
CMR 2																81			
VM 1	0	50	50	0	10	90	44	36	10	8	2	10	90			29			
TH 1	0	8	92	0	0	100	46	54	0	0	0	18	82			55			
BM 1																61			
II	0	46	54	0	0	100	42	48	0	10	0	26	74			53			
Ac 1	0	2	98	0	10	90	30	16	40	4	10	40	60				16		
Ac 2	0	2	98	0	0	100	40	30	30	0	0	44	56	10	90	53	20		
Sau 1	0	26	74	0	4	96	40	24	0	32	2	34	66			60			
Sau 2	0	48	52	0	2	98	36	22	0	40	0	16	84			75			
FR	0	21	79	0	12	88	54	38	2	6	0	24	76			52			

Tableau 38 : Caractéristiques macroscopiques des silex des biefs à silex (chiffres en %).

### 1.4.2. Minéralogie des silex des biefs à silex

Les diagrammes de diffraction des rayons X des silex de biefs correspondent tous à des diagrammes classiques de quartz. Les silex sont donc constitués uniquement de quartz et plus précisément de quartz microcristallin et de calcédoine en très faible quantité (d'après les observations au microscope optique). On n'observe pas de différence minéralogique entre le cortex et le reste du silex.

De plus, tous les échantillons montrent une mauvaise cristallinité (1 à 3,4 ; d'après la méthode de Murata et Norman, 1976) et il n'y a pas non plus de différence entre le cortex et le reste du silex (tabl. 39).

	<b>silex sans leur cortex</b>	<b>CI</b>
<b>VB 2</b>	silex gris	1,2
<b>Bou 1</b>	silex brun foncé	1,4
<b>Mol 3</b>	silex gris	3,1
<b>Mol 1</b>	silex brun	1,4
<b>VB 4</b>	silex gris	1,0

	<b>silex + cortex</b>	<b>CI</b>
<b>VB 2</b>	2/3 cortex, 1/3 silex gris	3,4
<b>Bou 1</b>	1/2 cortex oxydé, 1/2 silex brun	2,2
<b>Bou 1</b>	1/2 cortex, 1/2 silex brun	1,3
<b>Mol 3</b>	cortex	1,7
<b>VB 4</b>	1/2 cortex ; silex 1/4 blanc, 1/4 gris	2,0
<b>Sal</b>	cortex et géode	3,2

Tableau 39 : Index de cristallinité (CI) du quartz des silex des biefs à silex (d'après la méthode de Murata et Norman, 1976).

### 1.5. Géométrie des gisements de biefs à silex

Une première campagne de sondages électriques réalisés sur trois sites de RS en Haute-Normandie par le CETE (Normand et Evrard, 1982) a mis en évidence un contraste de résistivité entre deux matériaux, attribué à une différence de teneur en silex entre les biefs à silex et les argiles à silex de plateau grâce à leur observation sur la carrière abandonnée d'Octeville.

Les biefs à silex présentent une résistivité apparente comprise entre 600 et 4000  $\Omega$ m contre 100 à 300  $\Omega$ m pour les RS de plateau (tabl. 40).

<b>sites</b>	<b>nombre de sondages réalisés par site</b>	<b>résistivité (en <math>\Omega</math>m) des biefs à silex</b>	<b>résistivité (en <math>\Omega</math>m) des RS de plateau</b>
Toutainville	22	1000 à 4000	100 à 300
Octeville	14	800	200
Mont Mal	17	600 à 2500	300

Tableau 40 : Résistivité apparente des biefs à silex et des RS de plateau mesurée sur trois sites de Haute-Normandie, d'après les travaux de M. Normand et H. Evrard (1982).

Les sondages électriques permettent également de connaître l'épaisseur des biefs à silex et ils montrent que celle-ci diminue lorsqu'on s'éloigne du versant vers le plateau.

Une deuxième campagne de sondages électriques réalisée de manière plus ponctuelle, sur cinq sites de RS dans la région Centre par le BRGM d'Orléans (Pasquet, 1987) a confirmé l'existence d'un contraste de résistivité entre biefs à silex et RS de plateau. Les biefs à silex présentent une résistivité apparente de 500 à 3000  $\Omega\text{m}$  contre 70 à 200  $\Omega\text{m}$  pour les RS de plateau (tabl. 41).

sites	nombre de sondages réalisés par site	résistivité (en $\Omega\text{m}$ ) des biefs à silex	résistivité (en $\Omega\text{m}$ ) des RS de plateau
Bérou la Mulotière	3	2200	70 à 200
Saulnières	1	500	
Fontaine les Ribouts	2	$\geq 500$	100 à 130
Neuvy sur Barangeon	2	900	
Aubigny sur Nere	4	700 à 3000	

Tableau 41 : Résistivité apparente des biefs à silex et des RS de plateau mesurée sur cinq sites de la région Centre, d'après les travaux de R. Pasquet (1987).

Dans le cadre de cette étude, le nombre de sondages était trop faible pour mettre en évidence une diminution d'épaisseur du bief à silex en s'éloignant du versant. Néanmoins, R. Pasquet (1987) souligne qu'il n'a pas trouvé de biefs à silex sur le plateau et que ceux-ci sont cantonnés aux versants.

Notre travail a alors consisté, dans un premier temps, à vérifier les données des sondages électriques grâce à la réalisation de sondages à la pelle mécanique, puis, dans un second temps, à appréhender la géométrie des gisements de biefs à silex à partir de l'ensemble des données des sondages électriques, des sondages à la pelle mécanique et du suivi des travaux routiers réalisés perpendiculairement aux versants.

Les sondages à la pelle mécanique ont confirmé les données obtenues par la géophysique électrique. La résistivité mesurée est directement liée aux teneurs en silex des formations : les résistivités les plus élevées étant mesurées dans les matériaux les plus riches en silex, c'est à dire les biefs, tandis que les résistivités les plus faibles sont obtenues dans les RS de plateau moins riches en silex. De plus, nous avons vérifié que la limite entre les deux matériaux de résistivités différentes correspond effectivement au passage entre les biefs à silex et les RS de plateau. Ce passage est difficilement perceptible à l'observation. Il se réalise progressivement sur un à deux mètres, avec une augmentation de la teneur et de la fragmentation des silex depuis l'altérite à silex de plateau jusqu'au bief.

La **méthode géophysique du sondage électrique** apparaît donc **appropriée pour la recherche de biefs à silex**. Cette méthode permet non seulement de **mettre en évidence la présence de bief à silex**, mais également **d'évaluer son épaisseur**. Cependant, il convient d'être prudent à l'égard de cette méthode, car celle-ci est tributaire des conditions hydriques du terrain.

Grâce aux sondages électriques, à l'ensemble des sondages à la pelle mécanique, ainsi qu'au suivi des travaux routiers, nous avons pu appréhender la géométrie des biefs à silex sur 10 sites :

- 5 sites de versants de vallons secs (Brionne, Toutainville I, La Vasserie, Les Mollands, La Vallée Moutarde),
- 2 sites de versants de vallées sèches (Bernay, Bolbec),
- 2 sites de versants de vallées drainées (Mont Mal I, Mont Mal II),
- 1 site à l'extrémité d'un interfluve (Toutainville II).

**Les biefs à silex se présentent systématiquement sous la forme d'un biseau simple ou d'un double biseau (fig. 41, 42 et 43).**

Dans le premier cas (fig. 41), on a un biseau simple qui présente à sa base, c'est à dire au contact avec le RS de plateau, une pente de 3 à 7 degrés (par la suite, ce biseau sera appelé bief 1). Cette géométrie se rencontre pour les versants dont la pente est de 7 à 16 degrés. Il s'agit ici de versants de vallons secs. Malgré le nombre restreint de sites étudiés, il existe une certaine relation entre la pente du bief et la pente du versant (tabl. 42)

sites	pente du versant	pente du bief 1
Toutainville I	13,5°	4°
Brionne	16°	6°
La Vasserie	16°	7°
Les Mollands	15°	7°
Vallée Moutarde	7°	3°

Tableau 42 : Relation entre la pente du versant et la pente du bief 1 pour les biefs à silex localisés sur les versants dont la pente est inférieure ou égale à 16°.

Pour un versant avec une pente faible, le bief a une pente faible et inversement. De plus, le bief est d'autant plus perché que l'encaissement du vallon est important (fig. 41) : pour un encaissement faible du vallon de 10 mètres, le bief à silex s'étend sur l'ensemble du versant, tandis que pour un encaissement important (25 mètres ici) le bief se retrouve en position perchée sur le versant.

Dans le deuxième cas (fig. 42), nous avons un double biseau. Au sommet du versant, on retrouve le biseau précédent avec une pente de 4 à 8 degrés. Celui-ci est recoupé par un deuxième biseau avec une pente de 16 à 21 degrés (par la suite, ce deuxième biseau sera appelé bief 2). Cette géométrie se rencontre au niveau des versants de vallées sèches et drainées dont la pente est comprise entre 19 et 26 degrés. Malgré le nombre très restreint de sites, il semble qu'il existe une certaine relation entre la pente du bief 2 et celle du versant, selon le même principe que celui énoncé précédemment pour le bief 1 (tabl. 43).

sites	pente du versant	pente du bief 2
Mont Mal I	26°	21°
Mont Mal II	25°	19°
Bernay	19°	16°
Bolbec	20°	?

Tableau 43 : Relation entre la pente du versant et la pente du bief 2 pour les biefs à silex localisés sur les versants dont la pente est supérieure ou égale à 19°.

De même, le bief à silex s'étend sur tout le versant pour un encaissement faible de la vallée (15 mètres à Bernay), tandis qu'il est en position perchée pour un encaissement plus important (45 m au Mont Mal) (fig. 42).

Enfin, en situation d'extrémité d'interfluve, nous avons une géométrie particulière avec 2 biseaux simples sur chaque versant qui se rejoignent au centre de l'interfluve (fig. 43). Ces 2 biseaux simples présentent des pentes l'un de 3 degrés, l'autre de 4 degrés. Le bief à silex avec la pente de 3 degrés se localise sur un versant de vallée drainée qui présente une rupture de pente : 6 degrés au sommet du versant puis 15° sur le reste de celui-ci. Le bief à silex avec une pente de 4 degrés se situe sur le versant d'un vallon dont la pente est de 22 degrés. Ce dernier

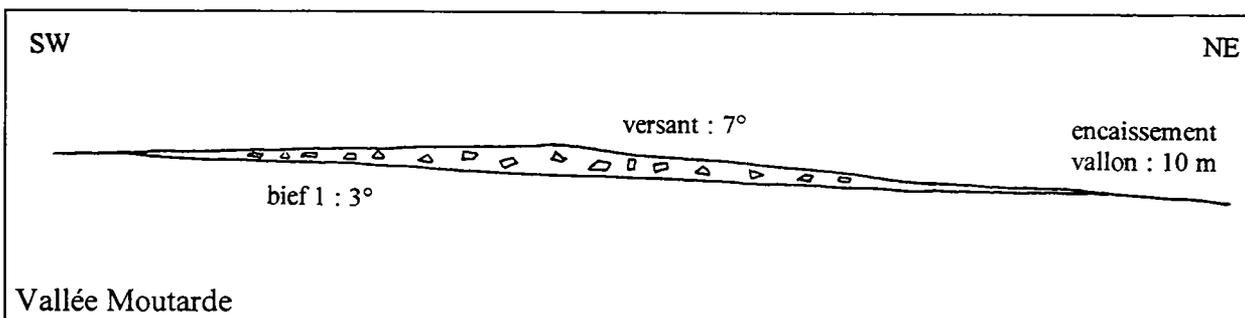
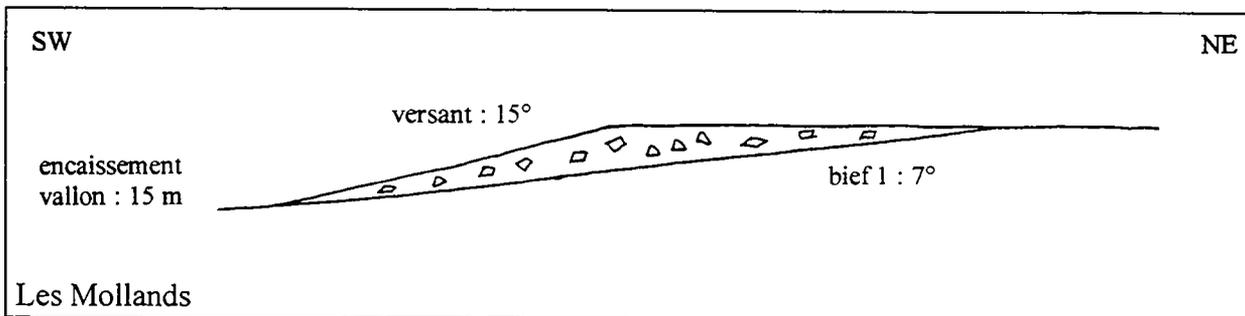
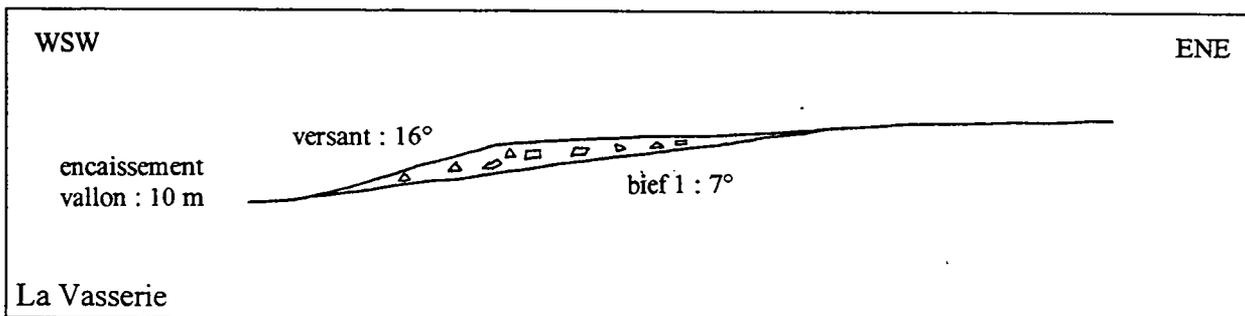
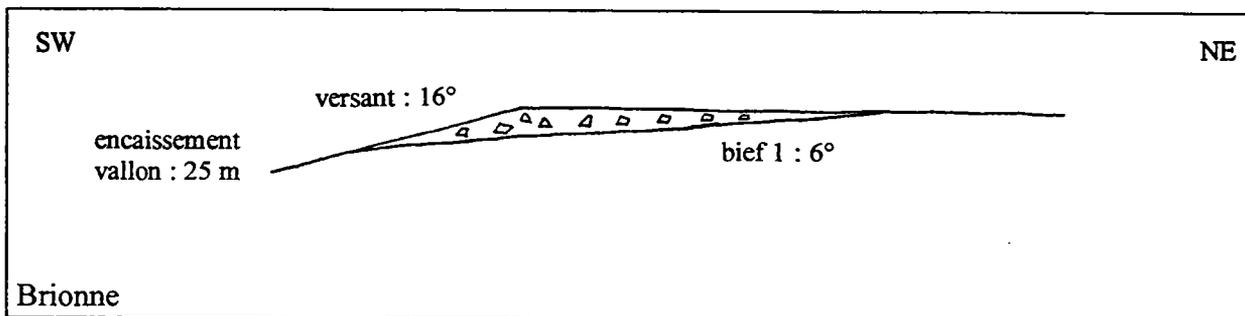
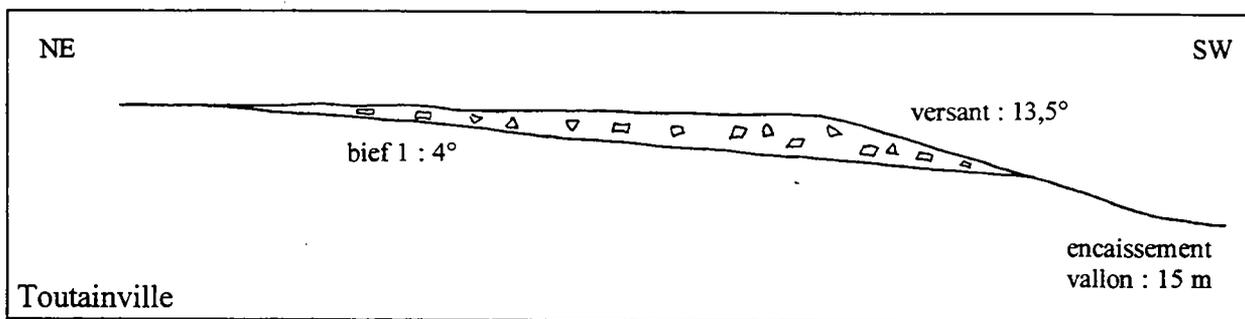


Figure 41: Géométrie des gisements de biefs à silex localisés sur les versants dont la pente est inférieure ou égale à  $16^\circ$ .  
échelle 1/1250.

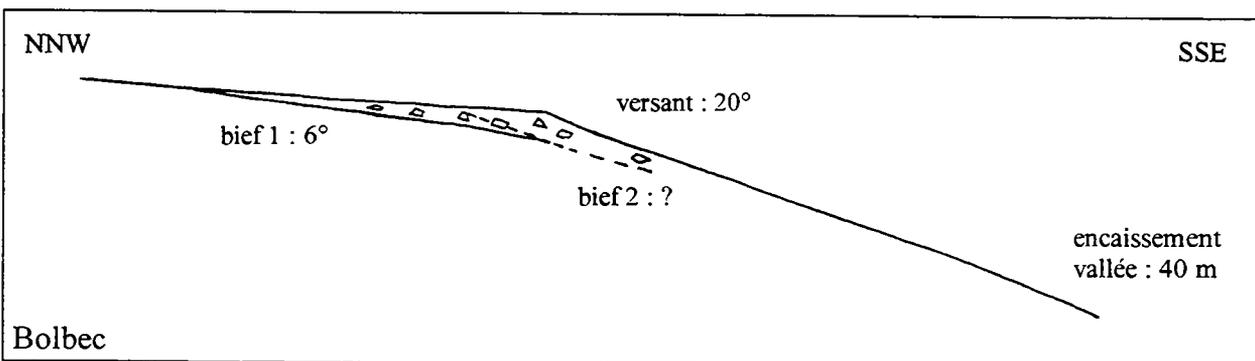
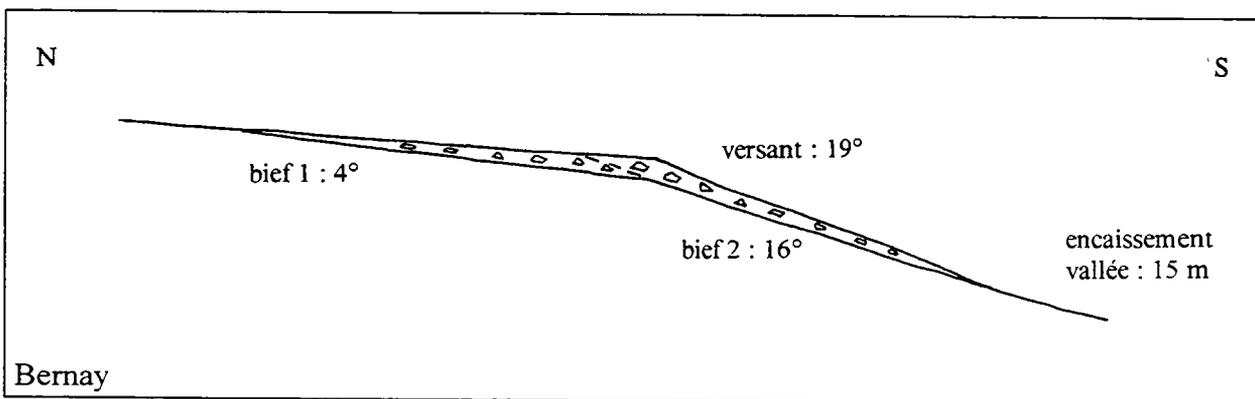
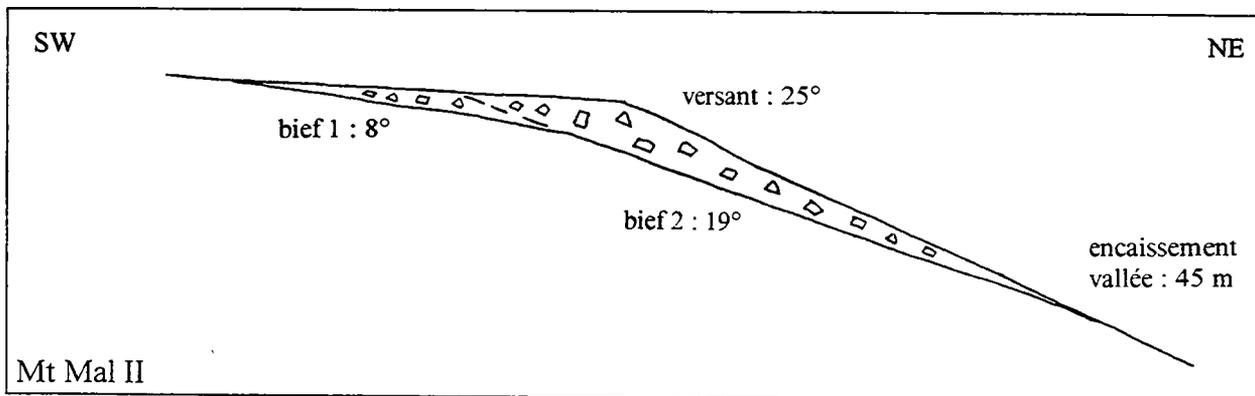
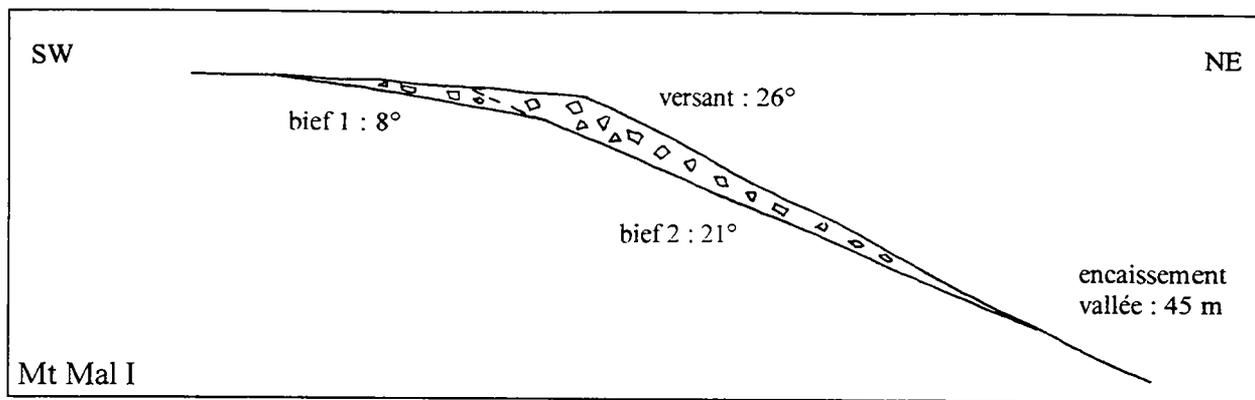


Figure 42 : Géométrie des gisements de biefs à silex localisés sur les versants dont la pente est supérieure ou égale à 19°. échelle : 1/1000.

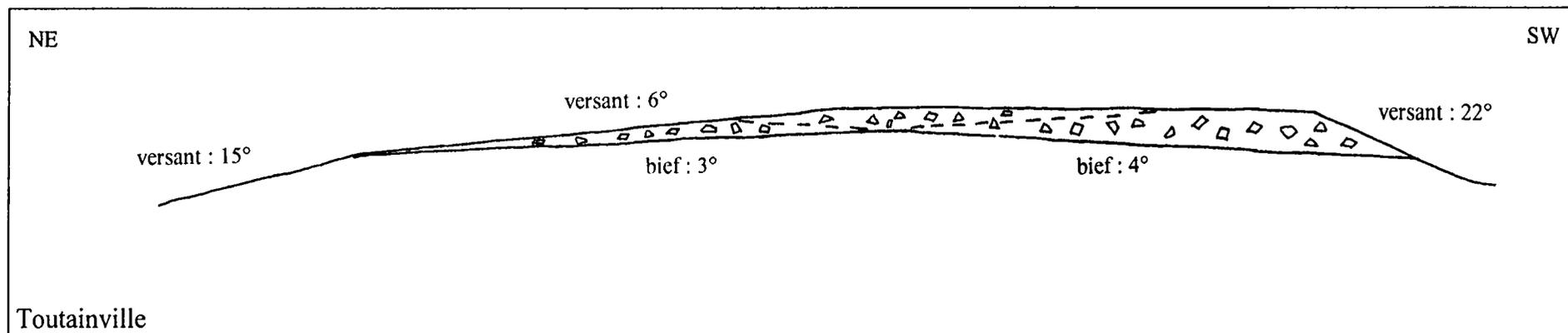


Figure 43 : Géométrie des gisements de biefs à silex localisés aux extrémités d'interfluve.  
 échelle 1/2000.

est le prolongement latéral vers l'aval du biseau de la coupe Toutainville I (fig. 41). Il confirme bien la présence d'un bief avec une pente de 4 degrés sur l'ensemble du versant de ce vallon. On peut cependant s'étonner sur la coupe Toutainville II de ne pas trouver de bief 2 sur un versant dont la pente est de 22 degrés. Cette absence peut s'expliquer par la position particulière en interfluve et la morphologie concave du versant qui témoignent probablement d'une érosion fluviale importante qui aurait pu éroder le bief 2.

### **1.6. Typologie des biefs à silex**

La **caractérisation lithologique des biefs à silex** montre que ces formations sont **hétérogènes**. Cette hétérogénéité se marque **d'un site à un autre**, mais également **au sein d'un même site**, si bien qu'on ne retrouve **pas d'organisation régionale** des biefs à silex comme pour les RS de plateau.

**Les biefs à silex se caractérisent par :**

- leur **richesse en silex** (55 à 81 % de silex > 20 mm) ;
- une **fragmentation des silex importante** et variable (28 à 85 %) ;
- une **minéralogie des silex homogène**, composée principalement de quartz microcristallin ;
- leur **diversité de faciès**.

Cette diversité de faciès se marque par une hétérogénéité de composition des matrices. Ces dernières présentent :

- de nombreuses variations de teintes ;
- des compositions granulométriques variables. Les matrices sont argilo-limono-sableuses avec des proportions variables entre ces trois constituants d'un faciès à un autre ;
- des minéralogies de la fraction argileuse avec des teneurs élevées et variables en kaolinite (50 à 100 %) et des quantités relativement faibles et variables en minéraux gonflants ( 0 à 40 % de smectite et d' interstratifiés kaolinite/smectite) ;
- des compositions chimiques dont SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont les éléments majeurs dominants. Les teneurs de ces trois éléments sont néanmoins variables, de 45 à 94 % pour SiO<sub>2</sub>, de 2,5 à 30 % pour Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et de 0,1 à 13 % pour Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la caractérisation des matériaux constituant les biefs à silex n'a pas permis de mettre en évidence une organisation régionale comme pour les RS de plateau. Par contre, nous avons constaté qu'il existe deux formes géométriques de biefs à silex et que celles-ci dépendent de la pente des versants.

Compte tenu de cette observation, nous avons étudié les relations éventuelles entre les caractéristiques des biefs et la morphologie des sites. Une typologie des biefs à silex a pu être dégagée. Celle-ci est basée sur les relations entre la nature et la pente du versant et respectivement les teneurs en silex et la fragmentation des silex.

#### **1.6.1. Relation entre les teneurs en silex (fraction supérieure à 2 mm) et la morphologie des sites (tabl. 44)**

Les extrémités d'interfluve correspondent aux zones les plus riches en silex, avec des valeurs comprises entre 82 et 93 %. Les biefs à silex des versants de vallées drainées ont

	% silex > 2 mm	nature versant	exposition versant	encaissement en m	pente versant en degré	longueur versant en m	pente rebord du plateau en degré
VM 1	60	vallon sec	ne	10	7	80	<1
Bos 2	65	vallée sèche	wnw	10	6	85	2
GR	66	vallée sèche	ssw	30	9	90	4
Bos 3	66	vallée sèche	wnw	10	6	85	2
Bos 1	67,5	vallée sèche	wnw	10	6	85	2
Oct	68	vallée sèche	sw	10	15	30	<1
Nor 1	69	vallée sèche	sw	30	20	105	<1
Nas	70	vallée drainée	w	65	15,5	255	1
Nor 2	71,5	vallée sèche	sw	30	20	105	<1
Cau 2	72,5	vallée sèche	ssw	15	14,5	80	4
HV 1	74	vallée sèche	ssw	10	13	60	<1
Cau 1	75	vallée sèche	ssw	15	14,5	80	4
Val 1	75	vallée drainée	w	65	18	220	5
Vas 1	75	vallon sec	wsw	10	16	30	2,5
Sal 1	76	vallon sec	w	15	18	60	<1
DBr	77	vallon sec	sw	25	16	75	1
Mol 1	78	vallon sec	sw	15	15	55	<1
By 1	78	vallée sèche	s	15	19	50	2,5
PrA	80	vallée drainée	ssw	70	21	180	<1
Bou 1	80	vallée sèche	nw	10	20	35	4,5
VB 2	80	vallée sèche	sw	40	21	100	5
MtM 1	80	vallée drainée	ne	45	25	125	2
MtM 3	80	vallée drainée	ne	45	25	125	2
Ac 1	80	vallée drainée	ssw	40	23	100	<1
CMR 1	82	interfluve					
NB 1	82	vallée sèche	se	30	25	70	<1
Gou 1	82	vallon sec	nw	20	24	40	3
VB 4	82	vallée sèche	sw	40	21	100	5
VB 1	82	vallée sèche	sw	40	21	100	5
Con 1	82	interfluve					
FR	82	vallée sèche	sw	20	21,5	40	<1
VB 3	83	vallée sèche	sw	40	21	100	5
Sau 1	83	interfluve					
II	83,5	vallée drainée	ssw	30	21	100	5
Sau 3	84	interfluve					
Til 1	87	vallée sèche	wsw	10	22	40	4,5
BM	87	vallée drainée	nw	35	29	110	<1
Ac 2	90	vallée drainée	ssw	40	23	100	<1
Con 2	92	interfluve					
Sau 2	92	interfluve					
CMR 2	92	interfluve					
Tou	93	interfluve					

Tableau 44 : Relation entre les teneurs en silex (supérieurs à 2 mm) et la morphologie des sites de biefs à silex.

également des teneurs élevées en silex (70 à 90%), tandis que ceux des versants de vallées sèches et de vallons secs présentent un éventail de valeurs beaucoup plus large, de 60 à 87%. C'est néanmoins, au niveau des versants de vallées sèches et de vallons secs que l'on a les teneurs en silex les plus faibles. **Il existe donc une certaine relation entre la nature du versant et la répartition des teneurs en silex dans les biefs à silex**, même si celle-ci n'est pas systématique.

Pour les versants de vallons secs, vallées sèches et drainées, **la pente du versant apparaît déterminante dans la distribution du pourcentage de silex dans les biefs à silex**. En effet, on distingue trois domaines :

- les versants à pente faible de 6 à 9°, avec des biefs dont les teneurs en silex sont faibles, inférieures à 68%;
- les versants avec une pente comprise entre 13 et 18 degrés, avec des biefs dont le pourcentage de silex oscille entre 68 et 78%;
- les versants à pente forte de 19 à 29 degrés, avec des biefs dont les teneurs en silex sont supérieures ou égales à 78 %.

On note toutefois deux exceptions avec les échantillons Nor 1 et Nor 2 (prélevés sur le site des Carrières de Normandie) qui présentent des pourcentages de silex respectivement de 71,5 et 69% pour un versant avec une pente de 20 degrés. Les biefs à silex localisés sur les versants dont la pente est supérieure ou égale à 19 degrés se présentent sous la forme géométrique d'un double biseau avec le bief 1 et le bief 2 situés respectivement en retrait par rapport au versant et sur le versant (fig. 44). Le prélèvement des échantillons de bief a été réalisé en haut de versant à l'exception de 4 sites. Dans ce cas, l'échantillonnage a donc été effectué dans le bief 2 (fig. 44). Or, le site des carrières de Normandie a été exploité activement si bien que le front de taille est très en retrait par rapport au versant. Ceci laisse penser que les deux échantillons Nor 1 et 2 ont été prélevés non pas dans le bief 2, mais dans le bief 1.

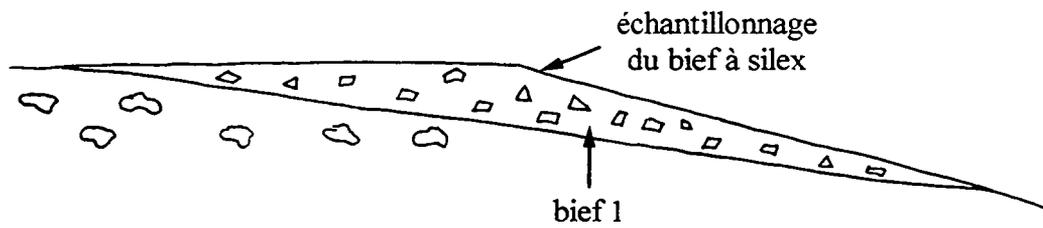
L'exposition des versants peut jouer un rôle dans la distribution des teneurs en silex, avec les biefs les plus charpentés (les plus riches en silex) localisés sur les versants à pente forte exposés au sud, au sud-ouest et à l'ouest et les moins charpentés sur les versants exposés au nord, au nord-est et à l'est (Dewolf, 1982). Cependant, pour les 30 sites étudiés, cette règle ne se vérifie pas, puisque la relation entre la pente et l'exposition des versants n'est pas systématique comme nous l'avons vu précédemment (cf. III.1.1.1.).

En ce qui concerne l'encaissement de la vallée, la longueur du versant et la pente du rebord du plateau, ils n'influencent pas la répartition du pourcentage de silex dans les biefs à silex.

#### **1.6.2. Relation entre la fragmentation des silex et la morphologie des sites (tabl. 45)**

Tout comme pour les teneurs en silex, **il existe une relation entre le pourcentage de fragmentation des silex et la nature du versant, même si celle-ci n'est pas systématique**. Les extrémités d'interfluve correspondent aux zones où les silex sont les plus cassés (60 à 85 % de fragmentation). En revanche, les biefs à silex des versants de vallées drainées, de vallées sèches et de vallons secs présentent des pourcentages de fragmentation similaires, avec 34 à 61

**Versants avec une pente inférieure ou égale à 16°**



**Versants avec une pente supérieure ou égale à 19°**

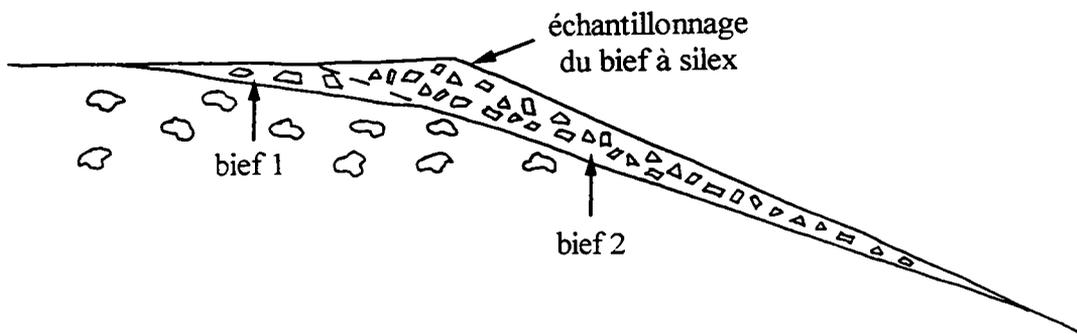


Figure 44 : Localisation de l'échantillonnage des biefs à silex.

Les échantillons sont prélevés en haut de versant. Pour les versants avec une pente  $\leq 16^\circ$ , le prélèvement a lieu dans le bief 1, tandis que pour les versants avec une pente  $\geq 19^\circ$ , l'échantillonnage est effectué dans le bief 2.

	% fragmentation silex	nature versant	exposition versant	encaissement en m	pente versant en degré	longueur versant en m	pente rebord du plateau en degré
Cau 2	28	valleuse	ssw	15	14,5	80	4
VM 1	29	vallon sec	ne	10	7	80	<1
Cau 1	30	valleuse	ssw	15	14,5	80	4
Nas	34	vallée drainée	w	65	15,5	255	1
Bos 2	38	vallée sèche	wnw	10	6	85	2
GR	40	vallée sèche	ssw	30	9	90	4
HV 1	41	vallée sèche	ssw	10	13	60	<1
Vas 1	42	vallon sec	ws	10	16	30	2,5
Mol 1	44	vallon sec	sw	15	15	55	<1
Val 1	46	vallée drainée	w	65	18	220	5
PtA	50	vallée drainée	ssw	70	21	180	<1
VB 1	50	vallée sèche	sw	40	21	100	5
Bou 1	51	vallée sèche	nw	10	20	35	4,5
Sal 1	51	vallon sec	w	15	18	60	<1
FR	52	vallée sèche	sw	20	21,5	40	<1
Ac 2	53	vallée drainée	ssw	40	23	100	<1
II	53	vallée drainée	ssw	30	21	100	5
MtM 1	54	vallée drainée	ne	45	25	125	2
Til 1	55	vallée sèche	ws	10	22	40	4,5
NB 1	56	vallée sèche	se	30	25	70	<1
VB 4	57	vallée sèche	sw	40	21	100	5
MtM 3	59	vallée drainée	ne	45	25	125	2
Sau 1	60	interfluve					
BM	61	vallée drainée	nw	35	29	110	<1
CMR 1	62	interfluve					
Sau 2	75	interfluve					
CMR 1	81	interfluve					
Con 2	85	interfluve					

Tableau 45 : Relation entre le pourcentage de fragmentation des silex et la morphologie des sites de biefs à silex.

% pour les versants de vallées drainées et 28 à 57 % pour ceux de vallées sèches et de vallons secs.

**C'est la pente du versant qui apparaît une nouvelle fois comme le paramètre essentiel dans la distribution de la fragmentation des silex des biefs.** On différencie deux familles :

- les biefs à silex situés sur les versants avec une pente comprise entre 6 et 18° ont un pourcentage de fragmentation des silex strictement inférieur à 50 % (à l'exception d'un échantillon : Sal) ;
- les biefs à silex localisés sur les versants avec une pente comprise entre 20 et 29° ont un pourcentage de fragmentation supérieur ou égal à 50%.

Bien qu'une certaine relation entre la fragmentation des silex et l'exposition des versants puisse exister, nous ne la retrouvons pas sur les 30 sites étudiés, puisque la relation entre la pente et l'exposition des versants n'est pas systématique (cf. III. 1.1.1.).

En ce qui concerne l'encaissement de la vallée, la longueur du versant et la pente du rebord du plateau, ils ne sont pas déterminants dans la répartition du pourcentage de fragmentation des silex des biefs.

### **1.6.3. Interprétation : Typologie des biefs à silex**

Les biefs à silex se présentent sous la forme géométrique, soit d'un biseau simple pour les versants dont la pente est inférieure ou égale à 16°, soit d'un double biseau pour les versants dont la pente est supérieure ou égale à 19° (fig. 44). Les échantillons de biefs à silex ont été prélevés en haut de versant à l'exception de quatre sites où les prélèvements ont été effectués à mi-versant. Par conséquent, pour les versants avec une pente inférieure ou égale à 16°, l'échantillonnage a été accompli dans le bief 1, tandis que pour les versants avec une pente supérieure ou égale à 19°, il a été réalisé dans le bief 2 (fig. 44).

L'étude des relations entre la morphologie des sites, la teneur en silex d'une part et la fragmentation des silex d'autre part, a permis de mettre en évidence deux familles de biefs à silex pour les versants de vallons secs, de vallées sèches et drainées. Les biefs se distinguent selon qu'ils se situent sur des versants avec une pente supérieure ou égale à 19° ou inférieure ou égale à 18°. Il est donc légitime de penser que la limite entre les deux géométries de biefs à silex est constituée par les versants avec une pente de 18 à 19°. Pour les versants dont la pente est inférieure ou égale à 18°, on a une géométrie sous la forme d'un simple biseau. Pour les versants dont la pente est supérieure ou égale à 19°, on a un double biseau.

Le bief 1 se caractérise alors par des teneurs en silex inférieures à 78 % et un pourcentage de fragmentation des silex inférieure à 50 % et le bief 2 par des quantités de silex supérieures ou égales à 78 % et une fragmentation des silex supérieure ou égale à 50 %. Ces différences de teneur et de fragmentation des silex entre bief 1 et 2 ont été confirmées sur deux sites : le Mont Mal et Bernay. Sur ces sites, ont été prélevés un échantillon en haut de versant et un autre en arrière de ce dernier sur le rebord du plateau, de manière à se situer dans le bief 2 pour le premier échantillon et dans le bief 1 pour le deuxième (fig. 44). La quantité de silex (fraction supérieure à 2 mm) a été mesurée sur les deux sites, alors que le pourcentage de fragmentation a été évalué uniquement sur le site du Mont Mal (tabl. 46).

	Mont Mal		Bernay	
	bief 1	bief 2	bief 1	bief 2
Teneur en silex > 2 mm (%m)	66	80	68	78
% fragmentation des silex	44	54		

Tableau 46 : Teneur et pourcentage de fragmentation des silex des biefs 1 et 2 des sites du Mont Mal et de Bernay.

Les deux échantillons prélevés en haut de versant (dans le bief 2) ont des teneurs en silex supérieures ou égale à 78 %, tandis que les deux échantillons prélevés en arrière du versant (dans le bief 1) ont des pourcentages en silex inférieurs à 78 %. La fragmentation des silex sur le site du Mont Mal est supérieur à 50 % en haut de versant et inférieur à 50 % en arrière du versant.

Il est donc possible de réaliser une **typologie des biefs à silex** (fig. 45). Celle-ci est basée sur la teneur et la fragmentation des silex des biefs. Elle ne s'organise pas de manière géographique, mais en fonction de la morphologie des sites, et plus précisément en fonction de la nature et de la pente du versant. Ainsi distingue-t-on :

- les biefs à silex situés à l'extrémité des interfluves ;
- les biefs à silex localisés sur les versants de vallées sèches ou drainées dont la pente est comprise entre 19 et 29° ;
- les biefs à silex situés sur les versants de vallées sèches ou drainées dont la pente est comprise entre 6 et 18°.

Les caractéristiques de ces trois grands types de biefs à silex sont reportés sur la figure 45.

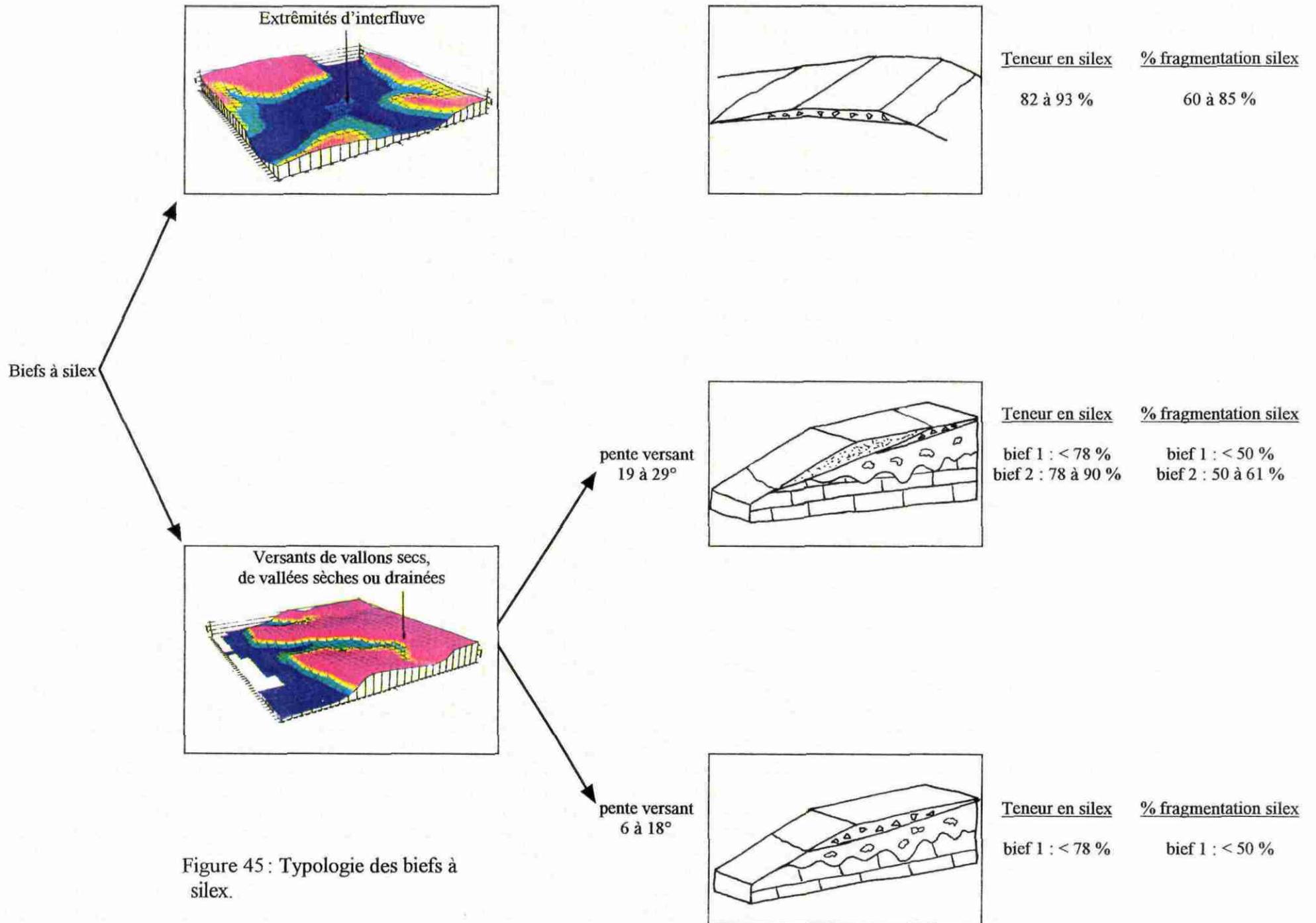


Figure 45 : Typologie des biefs à silex.

## 2. Genèse des biefs à silex

### 2.1. *Processus de mise en place des biefs à silex*

#### 2.1.1. **Détermination des processus de mise en place des biefs à silex à partir de la comparaison entre les biefs à silex et les altérites à silex de plateau originelles**

L'étude de la géométrie des biefs à silex a permis de constater que ces formations sont différentes des altérites à silex de plateau : elles s'en distinguent à l'observation par des teneurs élevées en silex et une forte fragmentation des silex. Pour tenter de comprendre la genèse de ces formations, nous avons réalisé des comparaisons analytiques entre biefs à silex et altérites à silex de plateau. La caractérisation des RS de plateau a montré que ces formations s'organisent en plusieurs familles géographiques. Les affleurements de biefs à silex étudiés concernent seulement le Pays de Caux, l'Eure et le nord de l'Eure et Loir. C'est pourquoi les comparaisons ont été effectuées uniquement sur ces trois secteurs.

##### *2.1.1.1. Comparaison analytique entre biefs à silex et altérites à silex de plateau originelles*

###### - Comparaison granulométrique

Quelles que soient la zone géographique et la fraction granulométrique (supérieure à 20 mm ou supérieure à 2 mm) considérées, les teneurs en silex sont toujours plus élevées dans les biefs à silex que dans les RS de plateau (fig. 46).

Pour les trois régions étudiées, la granularité des matrices est nettement plus hétérogène dans les biefs que dans les RS de plateau (fig. 47).

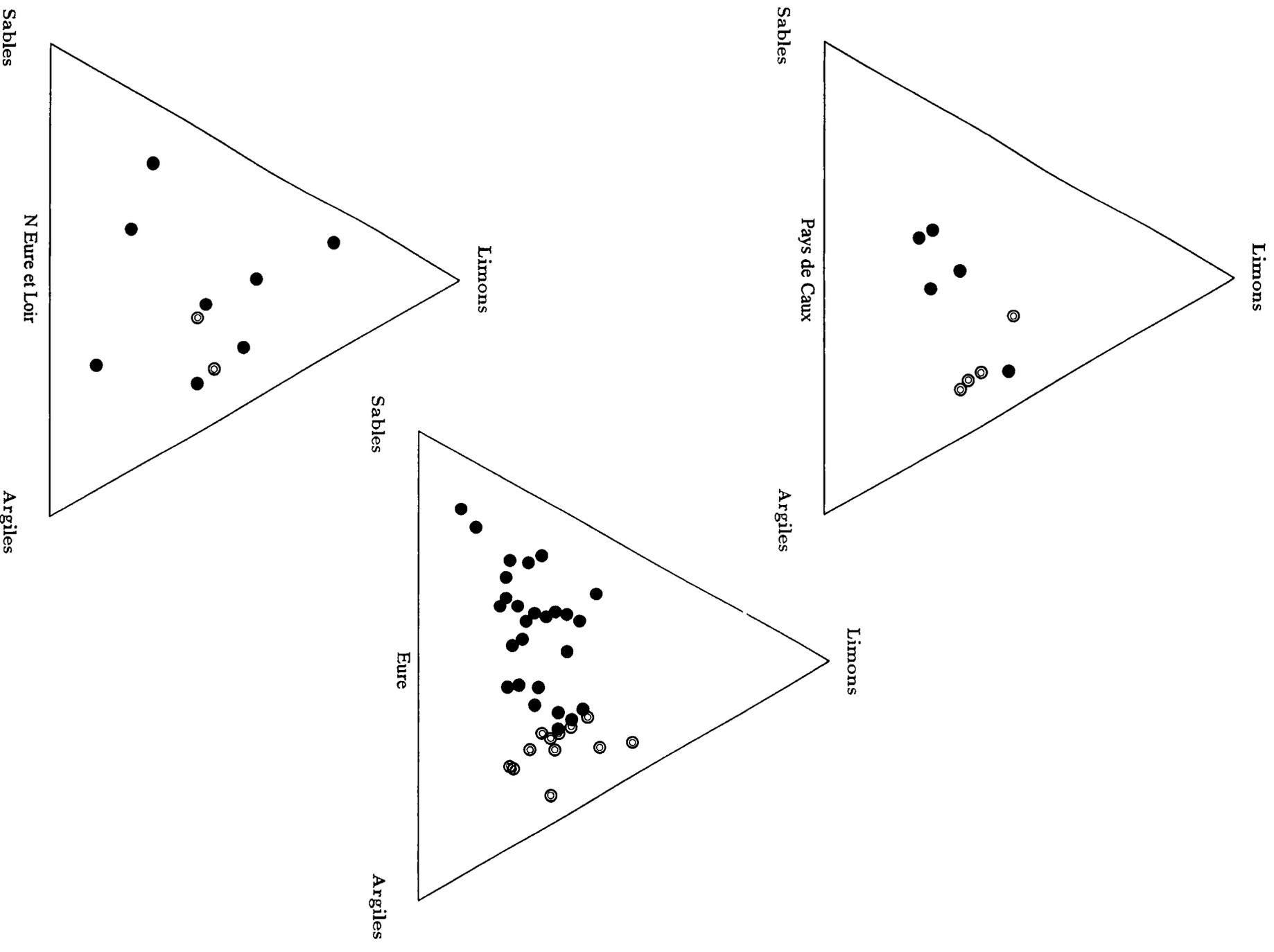
###### - Comparaison de la minéralogie de la fraction argileuse

La minéralogie des fractions inférieures à 2  $\mu\text{m}$  a tendance à être plus hétérogène dans les biefs à silex que dans les RS de plateau (tabl. 47). Pour chacune des régions, les teneurs en kaolinite dans les biefs à silex sont très variables, tandis qu'elles sont homogènes pour les RS de plateau. Les teneurs en illite et en minéraux gonflants (smectite + interstratifiés kaolinite/smectite) sont également plus variables dans les biefs que dans les RS de plateau, mais ceci est moins marqué que pour la kaolinite. De plus, les pourcentages en kaolinite sont plus élevés dans les biefs à silex que dans les formations à silex de plateau pour le Pays de Caux et l'Eure, contrairement au nord de l'Eure et Loir. Conjointement, les teneurs en minéraux gonflants dans les biefs à silex sont inférieures à celles des altérites à silex de plateau pour le Pays de Caux et l'Eure.

###### - Comparaison des compositions chimiques des matrices

Les teneurs en  $\text{SiO}_2$  et en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sont plus disparates dans les biefs à silex que dans les RS de plateau (tabl. 48). Par contre, les quantités de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sont relativement voisines dans les deux matériaux. Pour chacun des autres éléments, suivant la région considérée, on observe,





**Figure 47 : Comparaison des compositions granulométriques des matrices (fraction inférieure à 2 mm) entre les RS de plateau et les biefs à silex du Pays de Caux, de l'Eure et du Nord de de l'Eure et Loir (en %).**

○ RS de plateau

● Biefs à silex

Pays de Caux		Kaolinite	illite	Sm+Int (7-14sm)	Chlorite	Int (10-14sm)ch	Int (14ch-14v)	Pyrophyllite	Gibbsite	Quartz	Goethite	Lépidocrocite	opale CT
RS de plateau	moyenne	61,7	11,7	27,5	0,0	0,0	0,0	/	0,0	/	/	/	0,0
	écartype	3,7	2,4	3,8	0,0	0,0	0,0	/	0,0	/	/	/	0,0
	max	65	15	35	0	0	0	tr	0	Q	G	L	0
	min	55	10	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Biefs à silex	moyenne	69,3	12,1	13,6	0,0	4,3	0,0	0,7	0,0	/	/	0,0	0,0
	écartype	9,4	8,0	8,7	0,0	10,5	0,0	1,7	0,0	/	/	0,0	0,0
	max	90	25	25	0	30	0	5	0	Q	G	0	0
	min	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Eure		Kaolinite	illite	Sm+Int (7-14sm)	Chlorite	Int (10-14sm)ch	Int (14ch-14v)	Pyrophyllite	Gibbsite	Quartz	Goethite	Lépidocrocite	opale CT
RS de plateau	moyenne	55,0	8,8	36,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	/	/	0,0	0,0
	écartype	6,6	6,0	6,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	/	/	0,0	0,0
	max	65	15	45	0	0	0	0	0	Q	G	0	0
	min	45	0	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Biefs à silex	moyenne	72,2	8,8	13,9	0,7	0,8	1,7	1,5	0,5	/	/	/	/
	écartype	14,2	5,2	11,0	4,0	3,3	10,4	3,0	3,2	/	/	/	/
	max	100	20	40	25	15	65	10	20	Q	G	L	CT
	min	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

N Eure et Loir		Kaolinite	illite	Sm+Int (7-14sm)	Chlorite	Int (10-14sm)ch	Int (14ch-14v)	Pyrophyllite	Gibbsite	Quartz	Goethite	Lépidocrocite	opale CT
RS de plateau	moyenne	98,3	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	0,0	/	/	0,0	0,0
	écartype	2,4	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	0,0	/	/	0,0	0,0
	max	100	5	0	0	0	0	5	0	Q	G	0	0
	min	95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Biefs à silex	moyenne	79,1	6,8	12,3	0,0	0,9	0,5	0,9	0,0	/	/	0,0	0,0
	écartype	13,8	4,9	10,9	0,0	2,9	1,4	1,9	0,0	/	/	0,0	0,0
	max	100	15	35	0	10	5	5	0	Q	G	0	0
	min	55	0	tr	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 47 : Comparaison de la minéralogie de la fraction argileuse entre les RS de plateau et les biefs à silex du Pays de Caux, de l'Eure et du nord de l'Eure et Loir (chiffres en %).

Sm + Int (7-14sm) : smectite + interstratifiés kaolinite/smectite, Int (10-14sm)ch : interstratifiés illite/smectite à feuillets chloritiques, Int (14ch-14v) : interstratifiés chlorite/vermiculite, tr : traces.

Pays de Caux		SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	CaO	K2O	Na2O	TiO2	MnO	Perte au Feu
RS de plateau	moyenne	53,02	21,78	8,34	0,59	0,72	0,87	0,10	0,62	0,03	13,39
	écartype	4,50	1,77	1,37	0,05	0,12	0,04	0,01	0,05	0,01	1,16
	max	59,73	24,59	10,08	0,63	0,94	0,94	0,105	0,68	0,045	14,73
	min	46,34	19,38	6,17	0,5	0,59	0,8	0,09	0,54	0,0185	11,3
Biefs à silex	moyenne	66,30	14,45	6,40	0,37	0,34	0,49	0,08	0,55	0,04	9,89
	écartype	12,81	5,49	3,61	0,19	0,17	0,27	0,03	0,14	0,06	3,75
	max	86,43	20,23	13,34	0,67	0,65	0,87	0,11	0,76	0,182	14,22
	min	49,56	5,2	1,32	0,16	0,15	0,07	0,03	0,32	0,012	3,69

Eure		SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	CaO	K2O	Na2O	TiO2	MnO	Perte au Feu
RS de plateau	moyenne	75,02	10,90	4,19	0,35	0,41	0,52	0,06	0,72	0,01	7,01
	écartype	7,99	3,77	1,84	0,12	0,19	0,21	0,03	0,21	0,01	2,35
	max	85,34	18,17	6,75	0,58	0,81	0,9	0,12	1,06	0,022	12,15
	min	59,01	5,74	1,91	0,21	0,16	0,3	0	0,41	0,007	4,07
Biefs à silex	moyenne	72,25	13,26	2,98	0,34	0,52	0,44	0,08	0,49	0,01	8,61
	écartype	12,41	7,10	2,00	0,20	1,17	0,20	0,07	0,25	0,01	4,13
	max	94,13	29,69	7,35	0,71	6,94	0,76	0,36	1,1	0,068	16,94
	min	52,03	2,55	0,1	0	0	0,06	0	0	0	1,66

N Eure et Loir		SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	CaO	K2O	Na2O	TiO2	MnO	Perte au Feu
RS de plateau	moyenne	53,40	27,48	5,04	0,11	0,30	0,21	0,08	0,60	0,01	12,10
	écartype	6,41	7,64	4,46	0,03	0,13	0,10	0,02	0,44	0,00	2,83
	max	60,1	37,56	11,28	0,15	0,45	0,31	0,1	1,15	0,01	16
	min	44,76	19,08	1,09	0,08	0,14	0,07	0,06	0,08	0	9,38
Biefs à silex	moyenne	69,26	13,25	5,48	0,39	0,20	0,49	0,05	0,46	0,01	9,76
	écartype	14,86	7,28	3,41	0,25	0,09	0,29	0,04	0,19	0,02	4,98
	max	88,74	24,16	13,26	0,75	0,32	0,96	0,11	0,94	0,046	18,59
	min	44,96	3,58	1,65	0,13	0,08	0,18	0	0,21	0	3,16

Tableau 48 : Comparaison de la composition chimique des matrices (< 2 mm) entre les RS de plateau et les biefs à silex du Pays de Caux, de l'Eure et du nord de l'Eure et Loir (chiffres en %m).

sans logique apparente, tantôt une prédominance dans les biefs par rapport aux RS de plateau, tantôt l'inverse.

#### - Comparaison des caractéristiques des silex

Du point de vue macroscopique, la teinte et le pourcentage de fragmentation sont les deux critères les plus instructifs.

On remarque que les teintes des silex observées dans les RS de plateau ont tendance à être conservées dans les biefs à silex, avec une prédominance des silex gris dans le Pays de Caux, tandis que dans l'Eure et surtout dans le nord de l'Eure et Loir ce sont généralement les silex bruns qui sont les plus nombreux (tabl. 49). En revanche, quelque soit la région considérée, les silex sont beaucoup plus cassés dans les biefs que dans les formation à silex de plateau (fig. 48).

La minéralogie et la cristallinité des silex ne sont pas différentes entre les bief à silex et les altérites à silex. Tous les silex sont constitués principalement de quartz microcristallin et présentent une mauvaise cristallinité.

#### *2.1.1.2. Interprétation*

Cette comparaison analytique montre que les RS de versant, également appelés **biefs à silex**, sont des matériaux nettement différents des RS de plateau. **Ces formations, étudiées essentiellement en haut de versant, ne doivent pas être considérées comme représentatives des altérites à silex de plateau** comme cela a été manifestement le cas dans certaines études.

Les biefs à silex se distinguent des RS de plateau par des teneurs élevées en silex, une fragmentation intense des silex et une forte hétérogénéité des matrices.

Parmi les **processus expliquant** ces différences et intervenant dans la **mise en place des biefs à silex**, le **lessivage** est indéniable. Celui-ci conduit à une augmentation de la teneur en silex dans les biefs à silex comparativement aux RS de plateau originels. Par contre, il ne permet pas d'expliquer la fragmentation importante des silex et l'hétérogénéité des matrices des biefs. Concernant la minéralogie des argiles, le lessivage devrait conduire à une augmentation des teneurs en kaolinite dans les biefs par rapport aux altérites à silex originelles. On a vu précédemment que ce phénomène s'observe pour le Pays de Caux et l'Eure, mais pas pour le nord de l'Eure et Loir. Du point de vue géochimique, le lessivage devrait entraîner des diminutions des teneurs en  $Fe_2O_3$  et surtout en  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $K_2O$  et  $Na_2O$  dans les biefs comparativement aux altérites à silex, or nous avons constaté que ce n'est pas le cas.

Cette hétérogénéité des matrices ne peut s'expliquer que par une contamination des biefs à silex lors de leur mise en place par des formations autres que les altérites à silex de plateau originelles. Le seul processus envisageable pour induire cette contamination ne peut être que du **remaniement**. Ce qui explique également la fragmentation poussée des silex et la géométrie en biseau des biefs à silex.

Lorsqu'on parle de la fragmentation des silex, le gel apparaît comme une cause probable. Les biefs à silex présentent à leur sommet des faciès lessivés très riches en silex. Ces faciès se caractérisent aussi par une fragmentation très poussée des silex. Cette fragmentation importante se retrouve également dans le premier mètre des formations à silex de plateau, témoignant de l'action intense du gel en surface. Ces observations rejoignent celles réalisées par J. P. Coutard et J. P. Lautridou (1977) lors d'essais de cryoclastie effectués sur les silex

<b>Pays de Caux</b>		<b>% silex gris</b>	<b>% silex bruns</b>
<b>RS de plateau</b>	moyenne	97,6	2,4
	écartype	3,2	3,2
	max	100	8
	min	92	0
<b>Biefs à silex</b>	moyenne	70,2	29,8
	écartype	21,1	21,1
	max	100	52
	min	48	0

<b>Eure</b>		<b>% silex gris</b>	<b>% silex bruns</b>
<b>RS de plateau</b>	moyenne	41	59
	écartype	21,8	21,8
	max	90	85
	min	15	10
<b>Biefs à silex</b>	moyenne	46,8	53,2
	écartype	27,3	27,3
	max	87	100
	min	0	13

<b>N Eure et Loir</b>		<b>% silex gris</b>	<b>% silex bruns</b>
<b>RS de plateau</b>	moyenne	10,5	89,5
	écartype	10,5	10,5
	max	21	100
	min	0	79
<b>Biefs à silex</b>	moyenne	21,9	78,1
	écartype	18,0	18,0
	max	48	98
	min	2	52

Tableau 49 : Comparaison de la teinte des silex entre les RS de plateau et les biefs à silex du Pays de Caux, de l'Eure et du nord de l'Eure et Loir.

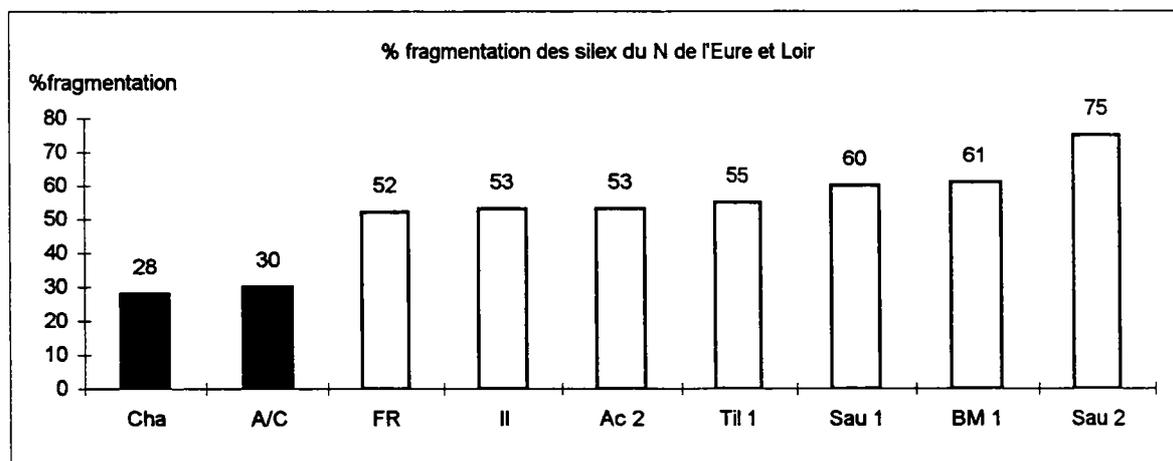
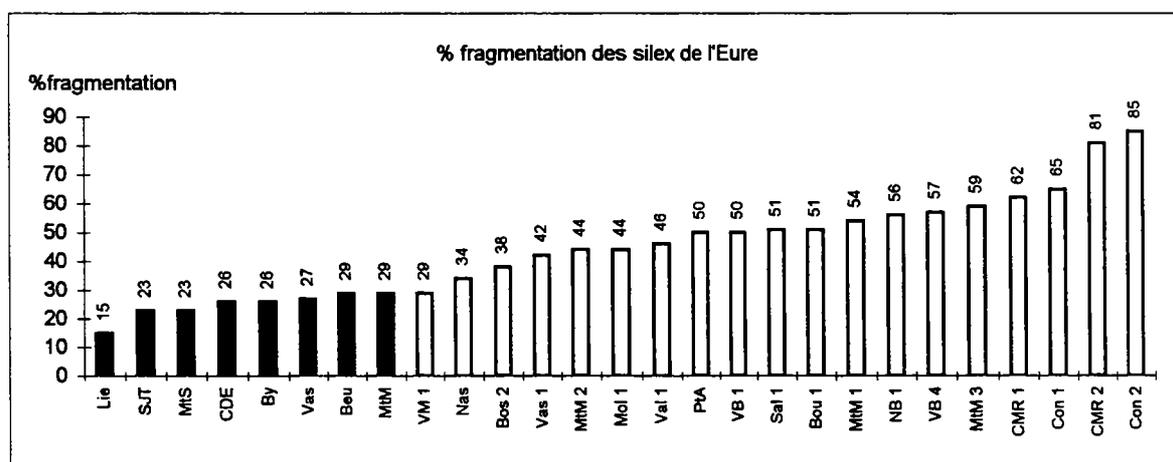
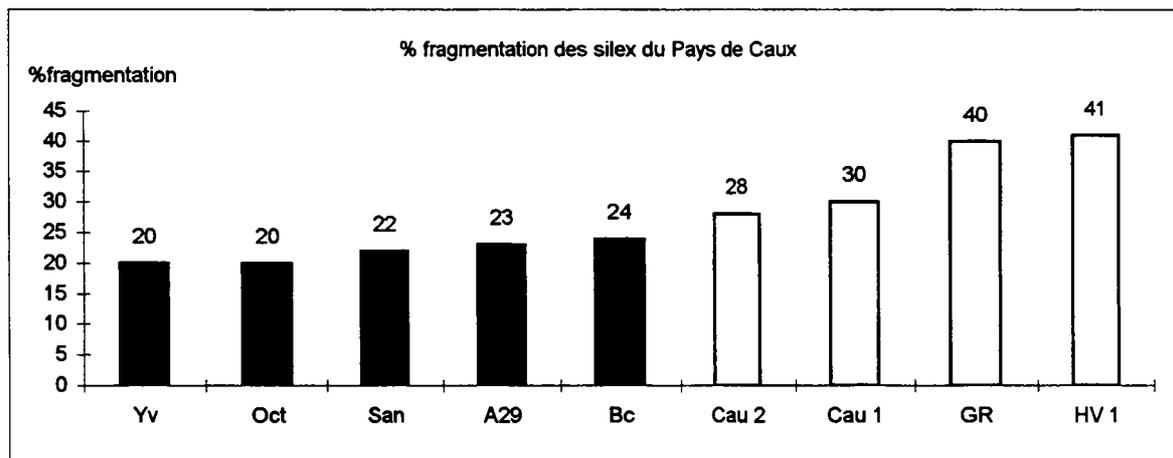


Figure 48 : Comparaison du pourcentage de fragmentation des silex entre les RS de plateau et les biefs à silex du Pays de Caux, de l'Eure et du nord de l'Eure et Loir.

■ RS de plateau      □ Biefs à silex

d'un dépôt de pente de Montfort sur Risle. Après de nombreux cycles de gel-dégel, ils obtiennent des éclats de forme aplatie, des esquilles et des éléments allongés à section triangulaire. Ces formes d'éclats se retrouvent dans tous les biefs à silex, ce qui confirme le rôle du gel dans la fragmentation des silex.

Cependant, d'autres observations de terrain montrent que :

- le faciès lessivé à silex très fragmentés du sommet des coupes est plus développé au niveau des extrémités des interfluves qu'au niveau des versants simples de vallées sèches et drainées, avec respectivement des épaisseurs de 3 m et de 1 m ;
- tous les faciès de biefs observés au niveau des extrémités d'interfluve ont toujours des silex plus fragmentés que ceux des versants simples de vallées ;
- les silex des biefs 2 (situés sur les versants avec une pente supérieure ou égale à 19°) présentent une fragmentation plus importante que ceux des biefs 1 (situés sur les versants avec une pente inférieure ou égale à 18°).

La fragmentation des silex ne peut donc être attribuée uniquement à l'action du gel. Il faut aussi faire intervenir une action mécanique, liée au déplacement des matériaux. Au niveau des extrémités d'interfluve, l'étude de la géométrie des gisements révèle qu'il existe deux biseaux qui se rejoignent au centre de l'interfluve. On peut donc penser qu'à l'extrémité des interfluves les phénomènes ont été amplifiés et que les déplacements ont donc été plus importants que sur les versants simples. Ceci a alors conduit à une fragmentation très poussée des silex à l'extrémité des interfluves. De même, on peut penser que le bief 2 a subi un nombre plus important de déplacements (deux ou plus ?) que le bief 1, ce qui se traduit par un bief 2 plus riche en silex et davantage cassés que le bief 1.

On peut aussi invoquer le rôle de la matrice. Dans le bief 1, où la matrice est la plus abondante, celle-ci va protéger davantage les silex de l'action du gel que dans le bief 2 et ceux des extrémités d'interfluve où il y a moins de matrice. De même, la présence de matrice en plus ou moins grande quantité peut plus ou moins préserver les silex des compressions lors des déplacements du matériau.

La fragmentation des silex des biefs à silex est donc le résultat d'une action conjointe du gel et du déplacement des matériaux lors de leur mise en place. Ceci confirme l'idée de J. P. Coutard et J. P. Lautridou (1977) et J. P. Lautridou (1985) selon laquelle "la fatigue" des matériaux va jouer un rôle important dans les processus de gélifraction de ces derniers. Dans le cas présent, cette "fatigue" serait d'origine mécanique, liée aux pressions qui s'exercent sur les silex au cours du déplacement en masse des matériaux.

### **2.1.2. Détermination des processus de mise en place des biefs à silex à partir de la comparaison entre les biefs à silex, les heads et les grèzes massives**

#### ***2.1.2.1. Analogie des biefs à silex avec les heads et les grèzes massives***

Les biefs à silex présentent une analogie avec d'autres dépôts de versant tels que les heads et les grèzes massives. La caractéristique commune de toutes ces formations est d'être des dépôts massifs et hétérométriques.

Les heads sont des formations périglaciaires quasi généralisées le long des côtes de part et d'autre de la Manche (Lautridou, 1985). Ils recouvrent des plages marines fossiles et sont décrits par J. P. Lautridou (1985) et C. Harris (1987) comme des dépôts hétérométriques

complexes à matrice de composition variable. La composition de la matrice des heads va dépendre de la nature des matériaux localisés au niveau du rebord du plateau et qui vont être mobilisés lors de la formation du head. Cette définition des heads peut être appliquée sans aucun doute aux biefs à silex qui sont également des formations hétérogènes et hétérométriques.

Les heads ont été décrits dans le Cotentin (Lautridou, 1985), en Bretagne (Monnier, 1973, 1981 ; Hallegouet, 1971), dans les îles anglo-normandes (Keen, 1978, 1980 ; Coope *et al.*, 1980), sur la côte sud de l'Angleterre (Mottershead, 1977 ; James, 1976) et dans le nord de l'Aquitaine (Bertran *et al.*, 1995). On trouve également quelques coupes de heads crayeux en Seine Maritime et dans le nord de la France (Lautridou, 1985). On retiendra tout particulièrement les heads du Cotentin qui présentent une forte ressemblance avec les biefs à silex. En effet, J. P. Lautridou (1985) souligne que ces formations peuvent présenter des matrices argilo-limono-sableuses et qu'il peut exister au sein du matériau des lentilles limono-argileuses et limono-sableuses. Cette description rappelle la composition argilo-limono-sableuse des matrices des biefs à silex et la présence de lentilles ou de paquets sableux à sablo-limoneux au sein du matériau.

La grèze est un dépôt de pente. Elle se présente sous la forme d'un sable calcaire à éléments anguleux (dont la limite supérieure se place autour de 25 mm) portant la marque de la cryergie (Guillien, 1962). Les termes de grèze massive ou de groize sont réservés à un matériau plus grossier (Guillien, 1964).

Les biefs à silex présentent également une certaine analogie avec les grèzes et plus précisément les grèzes massives. Ces dernières sont décrites dans le nord de l'Aquitaine par J. C. Ozouf *et al.* (1995) et P. Bertran *et al.* (1995) comme des matériaux massifs sans véritable stratification pouvant présenter des variations de couleur de leur matrice (plus ou moins brune ou brun rouge) et des pentes comprises entre 18 et 20°. Ces caractéristiques rappellent le caractère massif des biefs silex, la pente de 16 à 21° mise en évidence pour le bief 2 et les nombreuses variations de teinte des matrices des biefs. Ces variations de teinte, aussi bien dans les grèzes massives que dans les biefs, pourraient être expliquées par des remaniements d'horizons pédologiques ou de formations autres que la roche-mère originelle lors de la mise en place de ces matériaux (exemple : les limons au sein des biefs).

En revanche, les biefs à silex se distinguent des grèzes litées par l'absence de litage. La lithologie du matériau originel joue alors un rôle fondamental (Van Vliet-Lanoë, 1987a, 1987b). En effet, on comprend qu'il est facile d'obtenir du litage dans une formation telle qu'un calcaire propice à la formation de plaquettes, tandis que dans les RS la coexistence de silex et de matrice ne seront pas favorables à la cryoreptation et à une différenciation au sein du matériau. Ceci ne veut pas dire que les processus de mise en place des deux matériaux sont différents, mais seulement que la lithologie de la formation originelle joue un rôle décisif dans la différenciation et l'apparition ou non de litage.

### **2.1.2.2. Interprétation**

Cette analogie entre les biefs à silex et les dépôts périglaciaires de versants que sont les heads et les grèzes massives suggère une mise en place des biefs par remaniements de type périglaciaire au Quaternaire.

La disposition anarchique des cailloux et des blocs de silex dans les biefs implique un mouvement en masse, lent, de type solifluxion. Ce lent déplacement va entraîner l'incorporation des formations situées en bordure de plateau (altérite à silex et autres formations), sans permettre une homogénéisation du matériau. Ceci explique l'hétérogénéité

des matrices et la présence de lentilles ou de paquets sableux à sablo-limoneux au sein des biefs.

J. P. Lautridou (1985) a montré que la mise en place des heads a lieu en début de phase glaciaire lorsque le climat est suffisamment humide pour permettre un déplacement en masse de type solifluxion. La forte analogie entre les biefs à silex et les heads permet de penser qu'il en va de même pour les biefs.

**Les biefs à silex sont donc le résultat du remaniement des altérites à silex de plateau. Ce remaniement est lié à un mouvement en masse, lent, de type solifluxion, survenu en début de phase glaciaire au cours du creusement des vallées (fig. 49).**

Les faciès des biefs à silex vont donc dépendre de la nature et de la quantité des matériaux se trouvant sur le rebord du plateau lors du creusement des vallées (fig. 50). En présence d'une poche de sable, le creusement de la vallée entraîne l'ouverture de celle-ci. Il s'ensuit un remaniement et un mélange du sable et de l'altérite à silex, conduisant à la formation d'un bief sableux à argilo-sableux selon la quantité de sable se trouvant en bordure de la vallée. Dans le cas d'une couverture limoneuse, selon le même principe, on aboutit à un bief limono-argileux à argilo-limoneux suivant la quantité de limons localisés à proximité de la vallée en cours d'élaboration. Ces deux cas, séparés du point de vue théorique, sont en réalité combinés, expliquant ainsi que l'on trouve des biefs argilo-limono-sableux avec des proportions variables entre ces trois constituants d'un site à un autre.

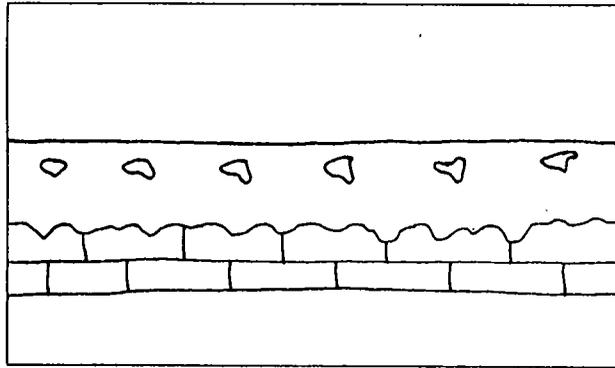
## **2.2. Age de mise en place des biefs à silex**

La géométrie en double biseau implique au moins deux phases de mise en place des biefs à silex. L'étude de la typologie de ces matériaux a montré que la teneur et la fragmentation des silex étaient plus élevées dans le bief 2 que dans le bief 1. Ceci indique que le bief 2 est davantage remanié que le bief 1 : **le bief 2 est donc plus récent que le bief 1.**

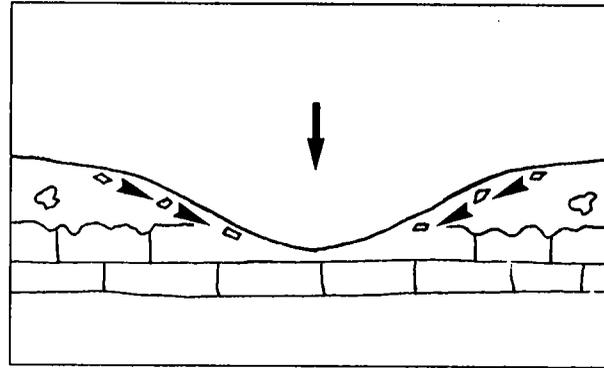
On peut alors imaginer une première phase de creusement du réseau hydrographique au cours de laquelle l'altérite à silex de plateau est remaniée pour former le bief 1, avec une pente de 3 à 8 degrés (fig. 51). Puis, au cours d'un deuxième stade de creusement, une partie du bief 1 est remobilisé pour donner le bief 2, avec une pente de 16 à 21 degrés (fig. 51).

Cependant, entre la pente maximale du bief 1 (8°) et la pente minimale du bief 2 (16°), il y a un hiatus (absence de pentes intermédiaires). Ce dernier suggère l'existence de phases de remaniement intercalées entre une phase ancienne et une phase récente dont les témoins sont respectivement le bief 1 et le bief 2. Les témoins de ces remaniements intermédiaires auraient alors totalement disparus, consécutivement à la phase responsable de la mise en place du bief 2.

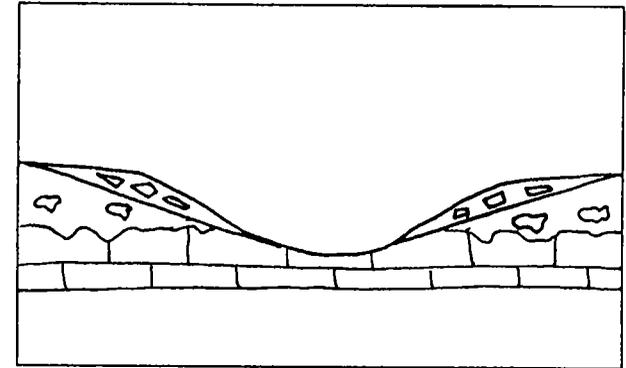
Pour les versants des vallées sèches et drainées dont la pente est supérieure ou égale à 19°, le caractère ancien du bief 1 et récent du bief 2 est également mis en évidence par l'étude du rapport entre la pente du bief et la pente du versant. Un bief est d'autant plus récent que sa pente (pente à la base du bief) et la pente du versant (pente topographique) sont proches, c'est à dire que le rapport de la pente du bief sur la pente du versant est voisin de 1. Dans le cas du bief 1, ce rapport est compris entre 0,21 et 0,32, tandis que pour le bief 2, il oscille entre 0,76 et 0,84. Ces deux valeurs corroborent le **caractère récent du bief 2 et ancien du bief 1.**



Etat initial

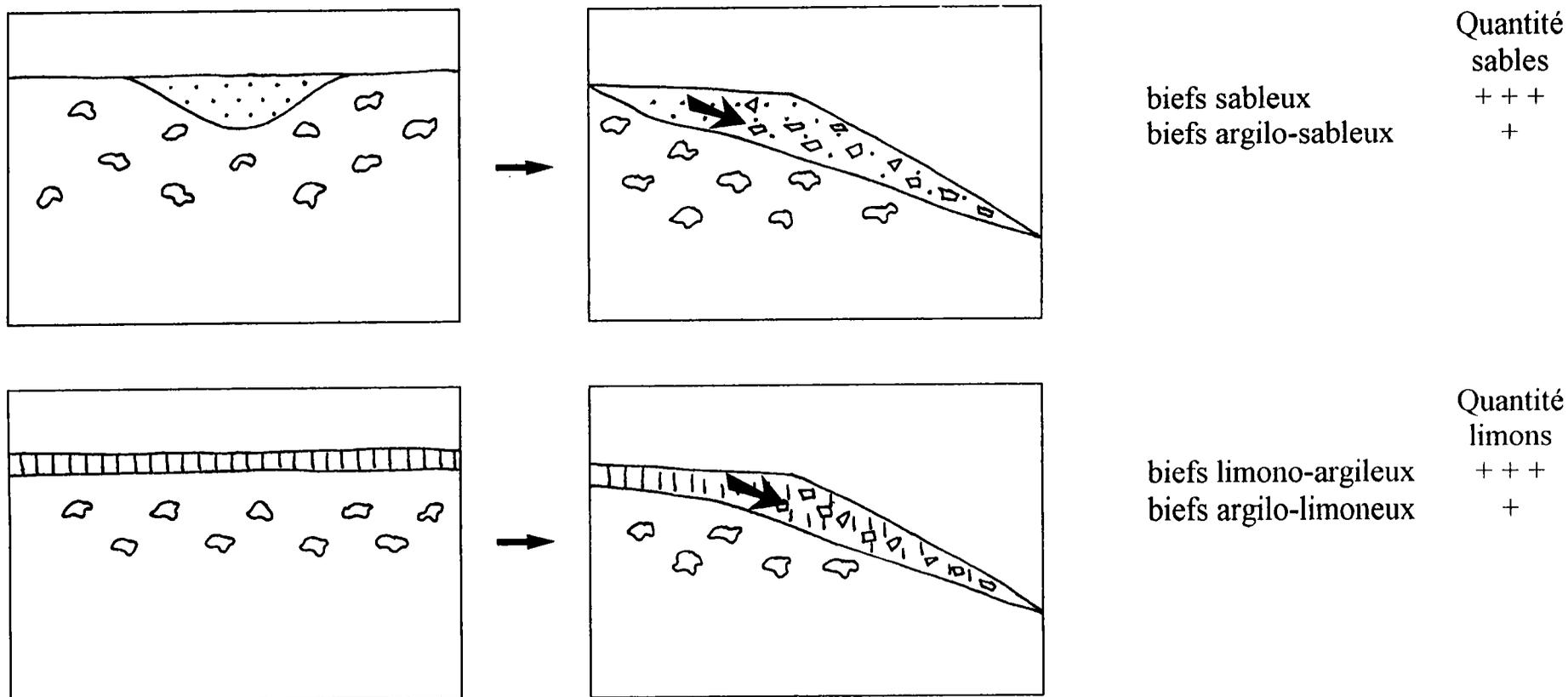


Creusement du réseau hydrographique, remobilisation du RS de plateau et formation du bief à silex



Bief à silex dans son état final

**Figure 49 : Représentation schématique de la genèse des biefs à silex.**

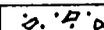


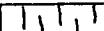
**Figure 50 : Relation entre les faciès des biefs à silex et les formations localisées à proximité des vallées en cours d'élaboration.**

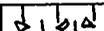
Le nombre de croix (+) est proportionnel à la quantité de sables ou de limons localisés sur le rebord du plateau.

 altérite à silex de plateau

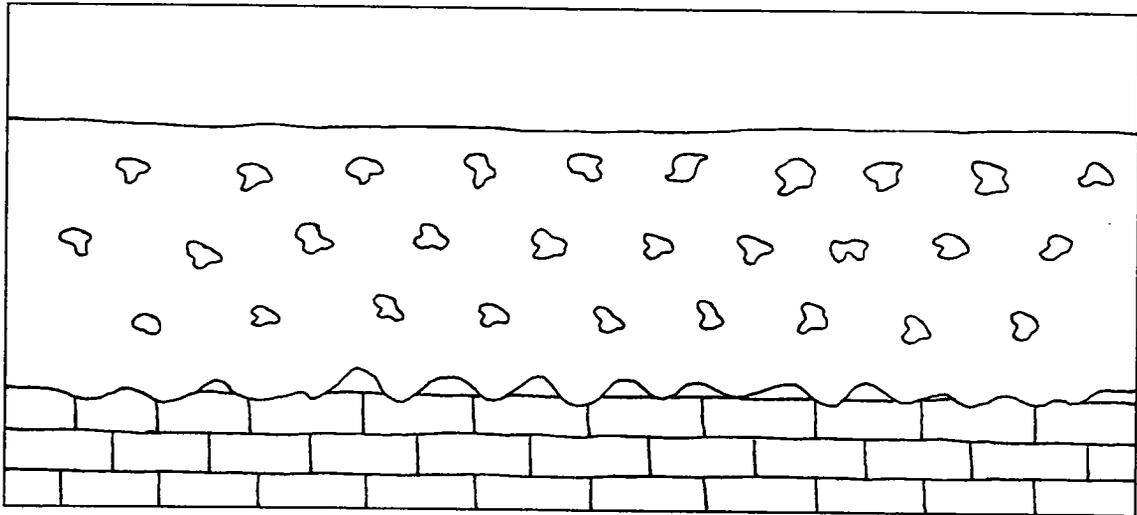
 sable (faciès type Fontainebleau et Lozère principalement)

 biefs à silex sableux à argilo-sableux

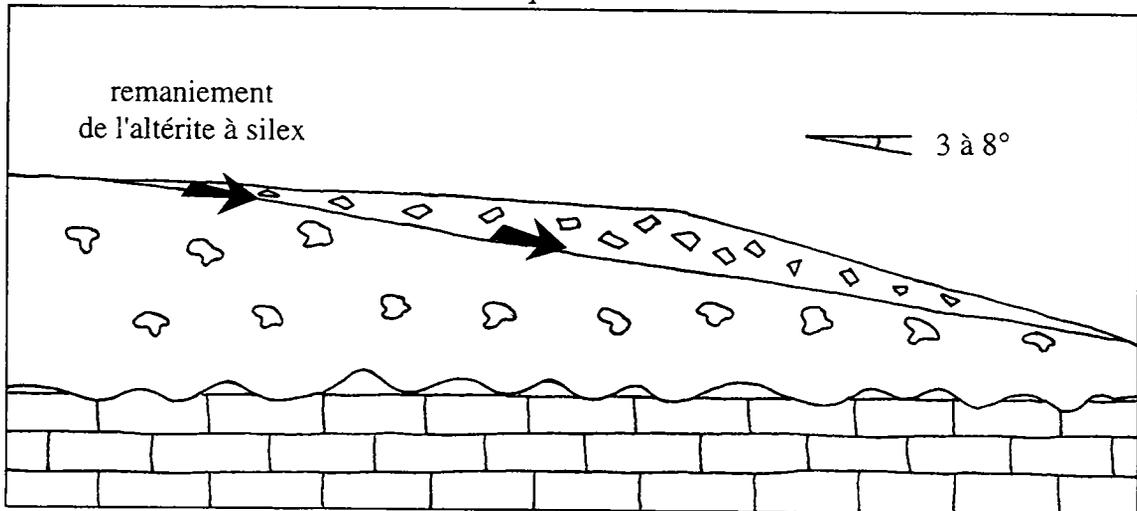
 limon

 biefs à silex limono-argileux à argilo-limoneux

Etat initial



Mise en place du bief 1



Mise en place du bief 2

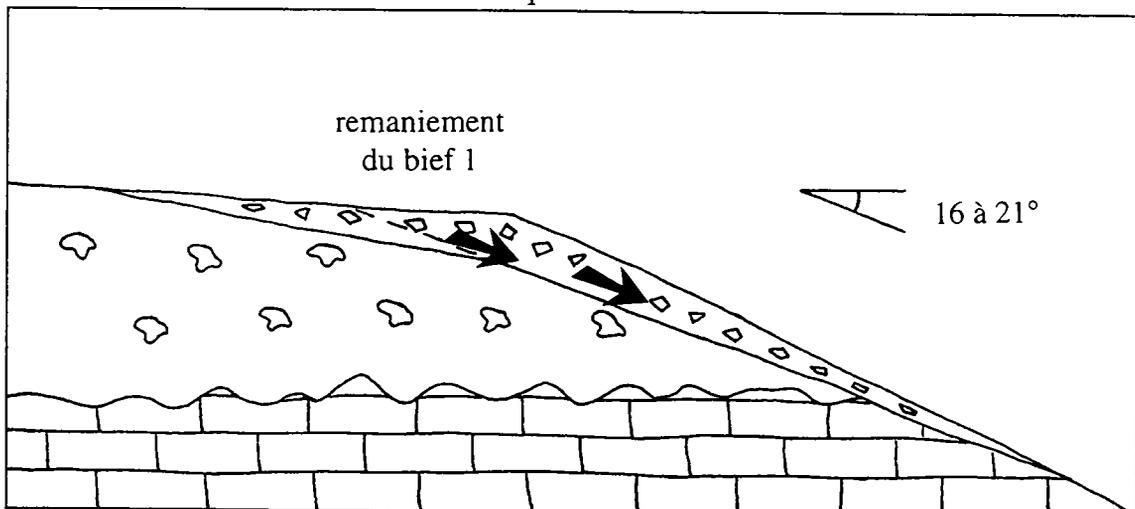
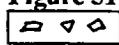
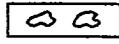
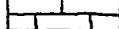


Figure 51: Représentation schématique des deux phases de mises en place des biefs à silex.

-  biefs à silex
-  altérite à silex de plateau
-  craie

### 2.2.1. Propositions d'âges de mise en place des biefs à silex à partir de l'analogie entre les biefs et les heads

Il apparaît difficile de dater avec précision les 2 phases de mise en place reconnues ; d'autant plus qu'il n'existe pas, comme cela est le cas pour les heads, de sol interglaciaire et d'intercalations de niveaux loessiques au sein des biefs à silex.

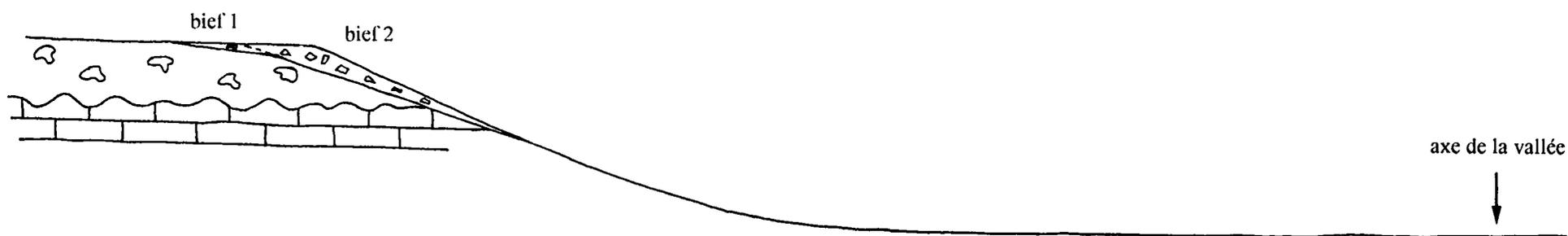
Les heads étudiés par J. P. Lautridou (1985) sont datés du Saalien ou du Weichsélien. Par référence à ces dépôts de versant présentant la même dynamique de mise en place que les biefs à silex, **on peut penser que le bief le plus récent (bief 2) s'est mis en place au Weichsélien ou au Saalien**. En considérant plusieurs phases de remaniement entre les deux biefs, **le bief le plus ancien (bief 1) serait alors anté-Saalien**. Or, pour les heads, il n'existe pratiquement pas de témoins plus anciens que le Saalien (Lautridou 1985). J. P. Lautridou explique que l'érosion marine serait responsable de la quasi-absence de ces heads anciens. Dans le cas des biefs à silex, la situation morphologique des gisements est tout à fait différente. En effet, alors que les heads sont conservés le long des falaises du littoral, les biefs à silex se trouvent sur les versants des rivières. L'érosion marine n'a donc pas pu éroder ces derniers et il semble logique, dans ce cas de figure, de pouvoir retrouver pour les biefs des témoins de phases périglaciaires plus anciennes que le Saalien.

### 2.2.2. Propositions d'âges de mise en place des biefs à silex à partir de la relation entre celle-ci et le creusement des vallées

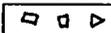
La relation entre la mise en place des biefs et le creusement des vallées apporte également des informations sur la datation des deux phases. Les dix sites où la géométrie des biefs a pu être étudiée se trouvent sur les versants des vallées qui se rattachent au système basse Seine. Or, D. Lefebvre *et al.* (1994) ont mis en évidence pour la basse Seine cinq stades de creusements de - 800 000 à - 20 000 ans. On peut penser que ces stades de creusement sont à l'origine de la mise en place des biefs à silex et que les deux phases identifiées sont survenues dans ce laps de temps.

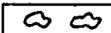
Dans le détail, à partir de la coupe du Mont Mal I (fig. 52), il est possible à titre d'hypothèse, de préciser les datations. La coupe du Mont Mal I se situe dans la vallée drainée du Bec Hellouin à quatre kilomètres en amont de la vallée de la Risle qui est un affluent de la Seine. La vallée du Bec Hellouin, ainsi que celle de la Risle se rattachent indiscutablement au système basse Seine de D. Lefebvre *et al.* (1994). L'origine des phases de mise en place des biefs 1 et 2 de la coupe du Mont Mal I peut alors être recherchée en liaison avec les 5 stades de creusement de la basse Seine mis en évidence par D. Lefebvre *et al.* (1994) pour la période allant de - 800 000 à - 20 000 ans (fig. 53).

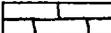
Sur la coupe du Mont Mal I (fig. 54), on remarque que la pente du bief 2 est proche de celle du versant. Ceci laisse supposer une mise en place récente. D'autre part, si on prolonge fictivement la base du bief 2, on remarque que ce dernier est absent en bas de versant. Il a par conséquent subi une érosion, qui ne peut être que fluviale. D. Lefebvre *et al.* (1994) ont montré pour la Basse Seine qu'il existe au Weichsélien un premier stade de creusement rattaché au stade isotopique  $\delta^{18}\text{O}$  6 puis un deuxième stade de surcreusement à la fin du Weichsélien rattaché au stade  $\delta^{18}\text{O}$  2. Ces processus pourraient expliquer la morphologie et dater la mise en place du bief 2 : On aurait une mise en place du bief 2 lors du premier stade de



**Figure 52 : Coupe transversale du versant et de la vallée du Bec Hellouin au niveau du site Mont Mal L**  
 échelle 1/2000.

 biefs à silex

 RS de plateau

 craie

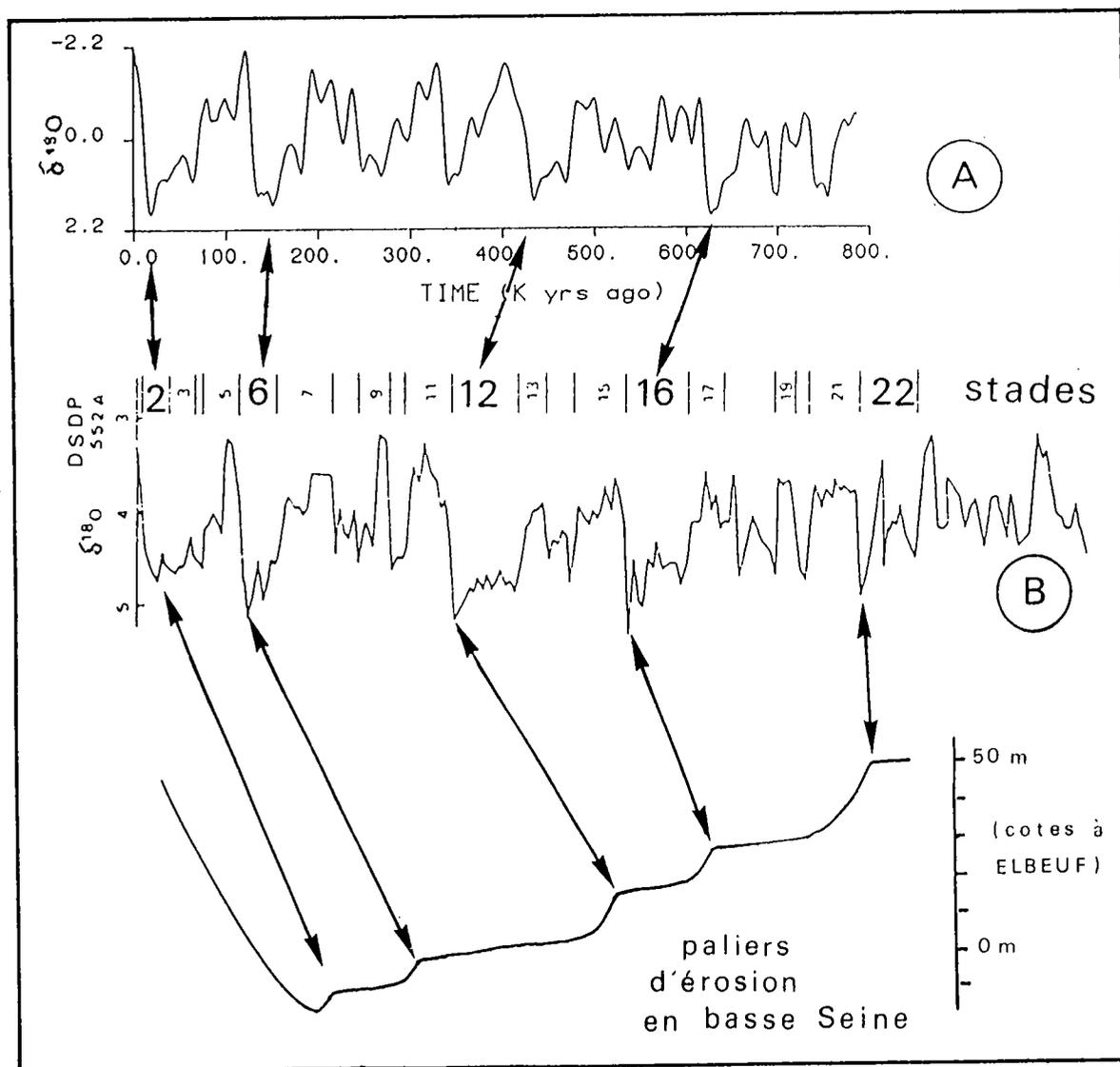
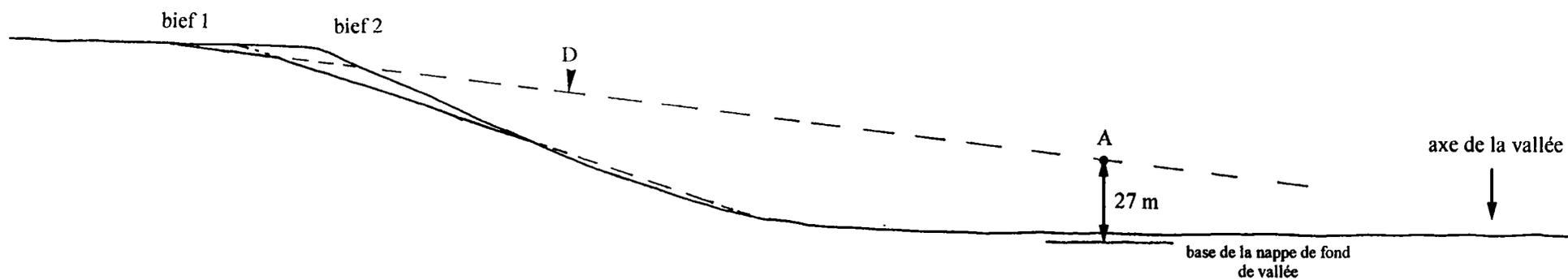


Figure 53 : Mise en parallèle de courbes isotopiques et des incisions en basse Seine, d'après Lefebvre *et al.* (1994).

A - courbe lissée des variations de  $\delta^{18}\text{O}$  dans cinq sondages marins profonds (Imbrie *et al.*, 1984).

B - variations de  $\delta^{18}\text{O}$  dans le forage DSDP 552A (plateau de Rockall) (Zimmerman *et al.*, 1984).



**Figure 54 : Détermination par construction géométrique du fond de la vallée contemporaine du bief 1 et du dénivelé entre celui-ci et le fond de la vallée weichsélienne.**  
 Le point A représente la position du fond de la vallée contemporaine de la mise en place du bief 1.

creusement au Weichsélien, puis le surcreusement de la fin du Weichsélien serait responsable de l'érosion du bief 2 en bas de versant.

En ce qui concerne le bief 1, nous avons tenté de préciser son âge de mise en place à partir de la construction géométrique suivante (fig. 54) :

- on prolonge fictivement la base du bief 1 dans la vallée, en respectant l'angle de 8° mis en évidence pour le bief 1 sur la coupe du Mont Mal I (droite D sur la figure 54) ;
- la largeur (L) et l'encaissement (E) de la vallée actuelle sont mesurés. On prend comme hypothèse que le rapport E/L est conservé lors du creusement de la vallée. Ce rapport est de 0,15 pour la vallée du Bec Hellouin à l'emplacement de la coupe du Mont Mal I ;
- on recherche alors sur la droite D, le point qui présente un rapport E/L égale à 0,15. Ce point est noté A sur la figure 54. Il correspondrait à la position altimétrique du fond de vallée contemporain du bief 1 ;
- on mesure ensuite le dénivelé entre le point A et la base de la nappe de fond de la vallée actuelle attribuée au Weichsélien. La cote de la base de la nappe de fond est connue dans la vallée du Bec Hellouin grâce à un sondage localisé 1 km en amont de la coupe du Mt Mal. Elle est de - 3 m par rapport au fond de la vallée actuelle.

Au droit du point A, le dénivelé mesuré est de 27 m. Si l'on se réfère à la figure 53 qui matérialise les différents stades de creusement, ainsi que les différents paliers d'érosion en relation avec les stades isotopiques  $\delta^{18}\text{O}$  pour la basse Seine (Lefebvre *et al.*, 1994), on constate que le dénivelé de 27 m pour la vallée du Bec Hellouin correspond au dénivelé entre le palier d'érosion Weichsélien (- 10 m) et le palier à + 15 / + 18 m relié au stade isotopique  $\delta^{18}\text{O}$  16 pour la basse Seine. Or, la vallée du Bec Hellouin se trouve à 33 km en amont de la Seine. Il est logique de penser que les stades de creusement observés dans la basse Seine ont pu être enregistré avec un amortissement dans les vallées situées en amont de la Seine. Par conséquent les dénivelés entre les différents paliers ont dû être moins importants dans la vallée du Bec Hellouin que dans la Seine. Ceci suppose alors que le bief 1 n'est pas contemporain du palier + 15 / + 18 m et du stade isotopique  $\delta^{18}\text{O}$  16, mais d'un stade antérieur. Le bief 1 pourrait alors être contemporain du creusement rattaché au stade isotopique  $\delta^{18}\text{O}$  22, daté vers - 800 000 ans. Ce stade  $\delta^{18}\text{O}$  22 inaugure les grands contrastes glaciaires-interglaciaires des 800 000 dernières années (Lefebvre *et al.*, 1994). Il correspondrait à une phase majeure de creusement de la basse Seine (plus de 20 m) qui pourrait être à l'origine de la mise en place du bief 1. Ce dernier serait alors le témoin de la phase glaciaire du premier grand contraste glaciaire-interglaciaire.

Dans le cadre de cette **hypothèse**, on aurait une première phase de **mise en place du bief 1 au dépend de l'altérite à silex de plateau vers - 800 000 ans**, lors de la première grande crise climatique responsable du premier creusement important de la basse Seine. Puis, aux stades isotopiques  $\delta^{18}\text{O}$  16 et 12, on aurait deux autres phases de creusement à l'origine de deux nouvelles mise en place successives des biefs à partir de la remobilisation d'une partie du bief 1. Ensuite, le **Weichsélien** ( $\delta^{18}\text{O}$  6) se marque par un nouveau creusement qui serait responsable du remaniement et de la disparition des deux biefs précédents (biefs contemporains des stades  $\delta^{18}\text{O}$  16 et 12) et éventuellement d'une partie du bief 1 **pour donner le bief 2**. Enfin, le surcreusement enregistré à la fin du Weichsélien ( $\delta^{18}\text{O}$  2) serait à l'origine de l'érosion du bief 2 en bas de versant.

Notons, parmi les autres voies de recherche abordées, que la réalisation d'un profil longitudinal depuis la vallée de la Seine jusqu'à la vallée du Bec Hellouin couplée à l'étude des relations entre terrasses alluvionnaires (grâce aux cartes géologiques à 1/50 000 et aux

sondages archivés au BRGM) n'a pas apporté d'éléments essentiels. De même, la recherche sur les versants des sites étudiés de nappes alluviales et des relations avec les biefs à silex n'a pas donné d'informations. Aucune trace de nappe alluviale n'a été décelée, à l'exception d'un site (La Vallée Moutarde) où des éléments de terrasses (cailloux de silex roulés) ont été mis en évidence sous forme remaniée au sein du bief à silex. Ces cailloux roulés n'ont pu être rattachés à un système de nappe précis et n'ont donc pas pu être utilisés comme éléments de datation.

### 3. Conclusion sur les biefs à silex

Au même titre que les heads pour le Cotentin, la Bretagne, les îles anglo-normandes, le sud de l'Angleterre et que les grèzes massives pour le nord de l'Aquitaine, les **biefs à silex** apparaissent comme les **marqueurs de la dynamique périglaciaire pour l'ouest du Bassin de Paris**.

Les **formations résiduelles à silex de haut de versant** (ou biefs à silex) sont des **matériaux totalement différents des formations résiduelles à silex originelles de plateau** dont elles dérivent. Il convient donc d'être prudent à l'égard des travaux antérieurs, où manifestement les formations à silex de haut de versant ont souvent été considérées comme représentatives des altérites à silex de plateau. Elles se distinguent de ces dernières par des teneurs élevées en silex, une fragmentation poussée des silex et une forte hétérogénéité des matrices.

Ces caractéristiques sont liées à la **dynamique de mise en place des biefs à silex**. Cette dynamique correspond à des **remaniements périglaciaires de type solifluxion**. Ces remaniements sont **survenus vraisemblablement en début de phase glaciaire, au cours du creusement des vallées au Quaternaire**.

Les **biefs à silex** se présentent systématiquement sous la **forme géométrique d'un biseau simple ou d'un double biseau**. Ceci implique **au moins deux phases de mise en place** de ces matériaux. La présence d'un hiatus entre la pente maximale du bief 1 et la pente minimale du bief 2 indique probablement plusieurs phases de remaniement entre une phase ancienne et une phase récente dont le bief 1 et le bief 2 sont les témoins respectifs.

Les deux phases de mises en place reconnues sur les dix sites **se situent dans un intervalle de temps compris entre - 800 000 et - 20 000 ans**. La similitude avec les heads, au niveau de la dynamique de mise en place, suggère un âge Saalien ou Weichsélien pour le bief 2 et anté-Saalien pour le bief 1. La relation entre le creusement de la vallée de la basse Seine et la mise en place des biefs permet de proposer à titre d'**hypothèse une mise en place ancienne vers - 800 000 ans pour le bief 1 et une mise en place récente, au Weichsélien, pour le bief 2**. Entre ces deux phases, il est possible qu'il y ait eu deux remaniements successifs aux stades isotopiques  $\delta^{18}\text{O}$  16 et 12, dont il ne resterait plus de témoins (traces effacées par le bief 2).

**CHAPITRE IV :**

**UTILISATION DES FORMATIONS RESIDUELLES  
A SILEX COMME GRANULATS**

Après avoir caractérisé les matériaux constituant les formations résiduelles à silex (argiles à silex ou RS de plateau et biefs à silex) et étudié leur genèse, nous sommes en mesure de réaliser une typologie de ces matériaux adaptée à leur utilisation comme granulats.

## 1. Qualité et utilisation des formations résiduelles à silex

### 1.1. Typologie des formations résiduelles à silex

Au sein des RS, on distingue **deux grandes sources possibles de matériaux** suivant la position morphologique des sites (fig. 55). Il s'agit d'une part des **RS de plateau** et d'autre part des **RS de versant**, également appelés biefs à silex.

Pour les RS de plateau, on différencie quatre ensembles (cf. II.1.6.) :

- les faciès limoneux à limono-argileux localisés au sommet des RS, au niveau des un à deux premiers mètres. Ils sont pauvres en silex ( pourcentage visuel inférieur à 50%) et ceux-ci sont cassés ;
- les faciès sableux à sablo-argileux. Ces faciès se trouvent au contact des poches de sable et leur extension est faible (métrique à décamétrique le plus souvent) ;
- les faciès argileux à argilo-limoneux. Il s'agit des faciès dominants des RS de plateau. Ils constituent l'essentiel de la formation depuis les faciès limoneux du sommet jusqu'au liseré argileux brun foncé situé au contact des craies. Du fait de leur extension et de leur épaisseur qui peuvent être importantes, ils sont les seuls à présenter un intérêt pour l'exploitation. Ils se subdivisent en plusieurs familles géographiques ;
- le liseré argileux brun foncé situé à la base des RS, au contact des craies. Son épaisseur varie généralement entre 0,5 et 2 mètres.

Pour les RS de versant ou biefs à silex, on distingue trois ensembles suivant la nature et la pente du versant (cf. III.1.6.3.) :

- les biefs à silex localisés à l'extrémité des interfluves ;
- les biefs à silex situés sur les versants de vallées sèches ou drainées dont la pente est supérieure ou égale à 19 degrés ;
- les biefs à silex situés sur les versants de vallées sèches ou drainées dont la pente est inférieure ou égale à 18 degrés.

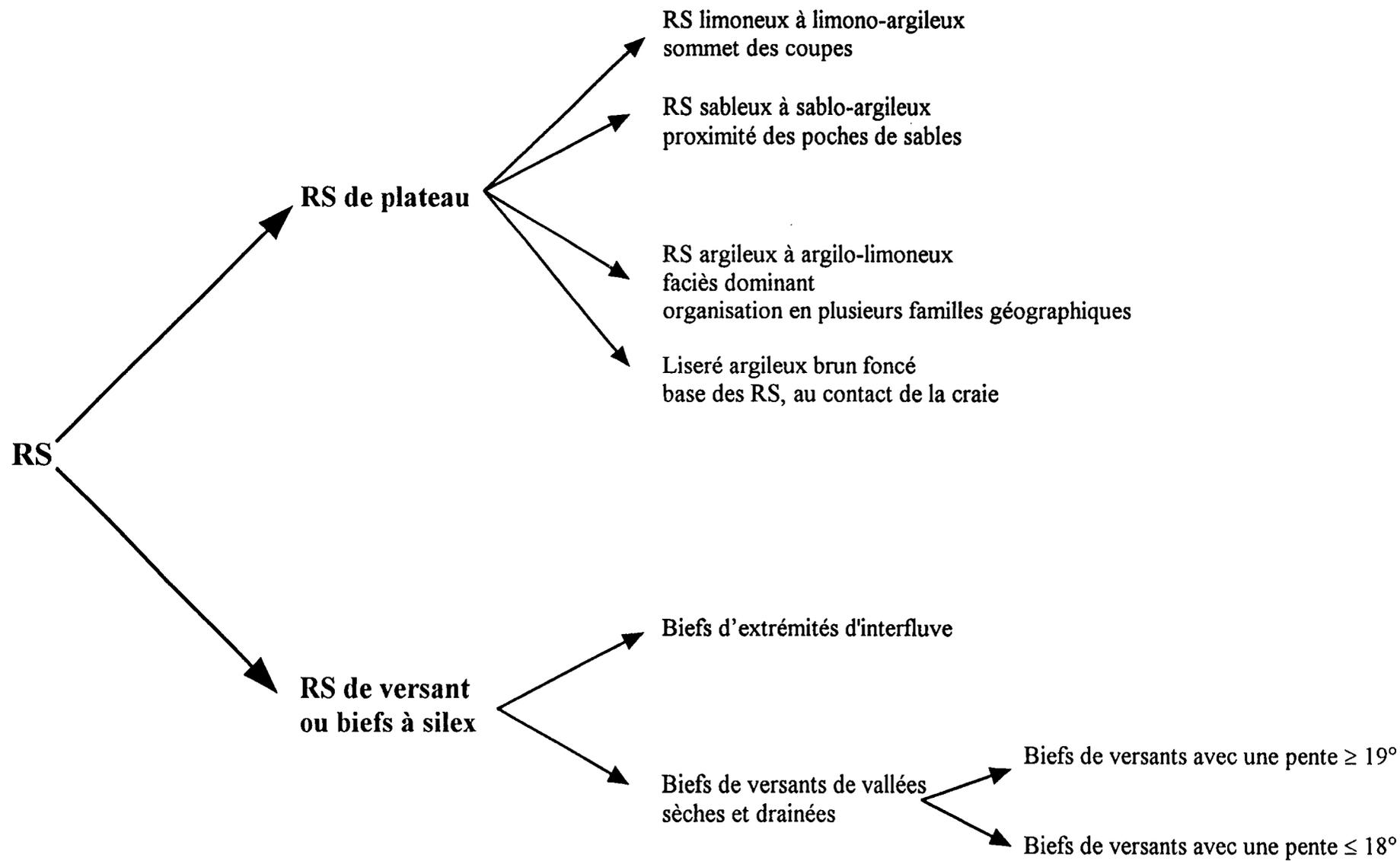


Figure 55 : Typologie des formations résiduelles à silex.

### 1.1.1. RS de plateau

#### 1.1.1.1. *Faciès non exploitables*

Les **faciès limoneux à limono-argileux, sableux, et les liserés argileux bruns foncés** présentent des **volumes trop limités pour être exploités**. On notera toutefois que le site de Saint Jean du Theney avec deux très grandes poches de sable et un RS sableux associé couvrent plusieurs hectares. Les sables sont rattachés par leur faciès aux Sables de Fontainebleau. Afin de déterminer le caractère isolé ou non de ce type de site, nous avons mené une prospection approfondie sur les gisements de sable de faciès Fontainebleau et les formations à silex sableuses associées dans le département de l'Eure. Nous n'avons pas trouvé de gisements avec une extension aussi importante que celui de St Jean du Theney. Ce type de site bien qu'il existe, semble donc être limité en nombre.

#### 1.1.1.2. *Faciès a priori intéressants pour l'exploitation*

##### - Synthèse des paramètres lithologiques concernant l'exploitabilité des RS de plateau

Compte tenu de leur extension et de leur épaisseur, les **faciès argileux à argilo-limoneux** sont les **faciès a priori les plus intéressants pour l'exploitation**. Ils présentent généralement des teneurs en silex comprises entre 39 et 54 % pour la fraction supérieure à 20 mm et entre 43 et 62 % pour la fraction supérieure à 2 mm. Les pourcentages de fines (< 80 µm) oscillent entre 31 et 56 % (fig. 56).

En réalité, ceci se vérifie uniquement pour les dix premiers mètres de l'argile à silex. En effet, le pourcentage de silex (fraction supérieure à 2 mm) augmente avec la profondeur (cf. II.1.3., fig. 12) :

- de 0 à 10 m, la quantité de silex oscille entre 40 et 60 % ;
- de 10 à 15 m, la teneur en silex est comprise entre 60 et 70% ;
- au delà de 15 m, le pourcentage de silex est de 70 à 80%.

Si on extrapole ces observations à l'ensemble des régions concernées par les RS, la partie centrale et méridionale de l'Eure et le nord de l'Eure et Loir sont les secteurs les plus intéressants pour l'exploitation, non seulement pour leur forte épaisseur de RS (épaisseur pouvant atteindre 30 m ; cf. II.1.1., fig. 5), mais également pour leur richesse en silex.

La caractérisation lithologique des faciès dominants des RS de plateau a permis de mettre en évidence l'existence de plusieurs familles géographiques. Parmi les critères distinctifs, nous retiendrons tout particulièrement la minéralogie de la fraction argileuse. Celle-ci va jouer un rôle important dans le traitement des RS lors de la séparation des silex et de la matrice, par la présence de minéraux gonflants (smectite et interstratifiés kaolinite/smectite principalement) en plus ou moins grande quantité. La caractérisation minéralogique des argiles a abouti à la différenciation de quatre familles de RS (cf. II.1.4.1.) :

- le RS de l'est du Pays de Caux et du Talou (sud-ouest de la Picardie), riche en minéraux gonflants ;
- le RS de l'ensemble du Pays de Caux (à l'exception de l'est), à kaolinite dominante ;
- le RS de l'Eure, à kaolinite dominante, mais à minéralogie plus variable que le RS précédent ;
- les RS du Perche et du nord de l'Eure et Loir, à kaolinite presque exclusive.

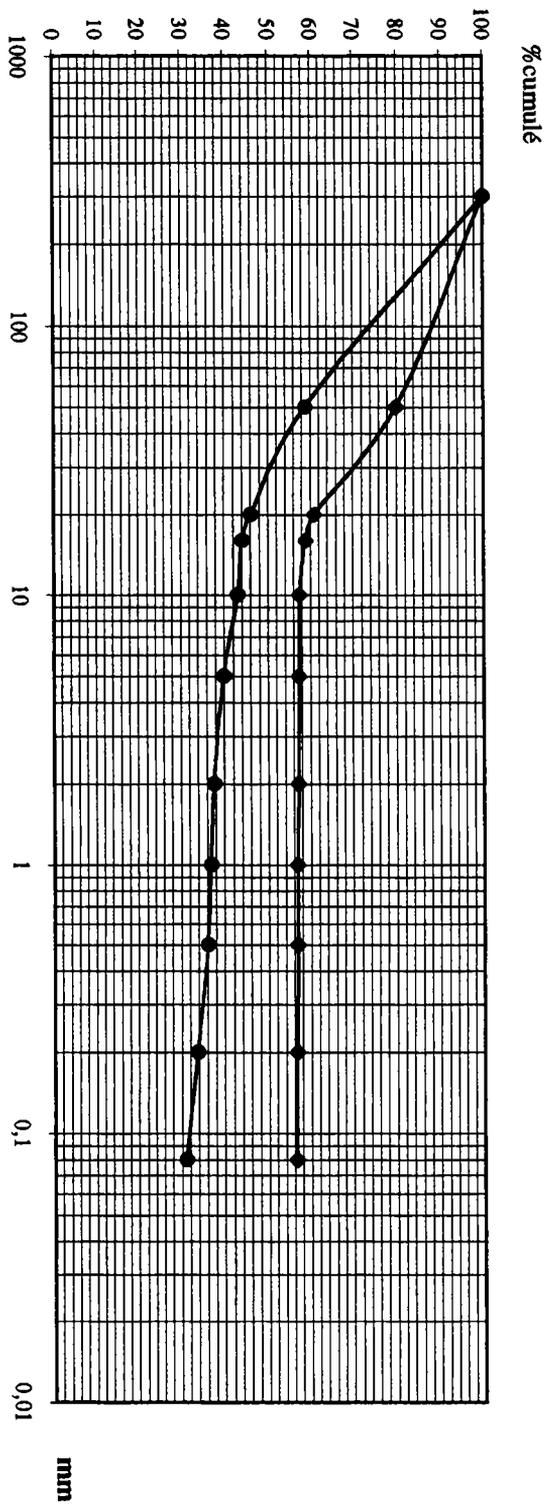


Figure 56 : Fuseau granulométrique des RS de plateau.

Du point de vue de la minéralogie des argiles, les RS les plus intéressantes seront donc localisés dans le Perche et le nord de l'Eure et Loir.

La carte des épaisseurs de limons réalisée par F. Quesnel permet de visualiser l'importance de la couverture des RS et donne une information sur la découverte dans le cadre d'une éventuelle exploitation (fig. 57). On distingue :

- la totalité de la Seine-Maritime (excepté le Pays de Bray), le nord et l'ouest de l'Eure et la bordure est du Calvados présentent des épaisseurs de limons élevées, de l'ordre de 2 à 5 m, pouvant atteindre 10 m au centre des plateaux ;
- le centre et le sud de l'Eure correspondent à une zone intermédiaire entre le nord de la carte où l'épaisseur de limons est forte et le sud de la carte où elle est faible. L'épaisseur de limons est de l'ordre de 0 à 2 m et peut atteindre 5 m au centre des plateaux ;
- le Perche et le nord de l'Eure et Loir présentent des épaisseurs de limons faibles. Celles-ci sont généralement inférieures à 2 m et n'atteignent que très rarement 5 m au centre des plateaux. Les épaisseurs de limons dans le secteur de la Seine et dans le Pays de Bray sont également faibles (inférieures à 2 m).

#### **- Estimations des volumes et des tonnages en silex des gisements de RS de plateau**

Connaissant l'épaisseur et la granulométrie des argiles à silex de plateau, le calcul du volume des gisements et de leur tonnage en silex peut être réalisé. Afin de pouvoir comparer les gisements des différentes familles géographiques de RS, nous avons envisagé une exploitation type pour toutes les formations à silex. Cette exploitation couvre une surface de 20 hectares.

L'épaisseur de RS exploitable est normalement fixée en fonction de la profondeur du toit de la nappe. La carte de l'épaisseur de craie non saturée sous les RS (fig. 58) réalisée par F. Quesnel permet d'observer les tendances régionales de la nappe, mais pas ses irrégularités à l'échelle d'un site. C'est pourquoi nous avons choisi, par commodité pour le calcul du volume des gisements et afin de pouvoir réaliser des comparaisons, de ne pas retenir les cinq derniers mètres de RS au dessus du contact avec la craie. Le volume et le tonnage en silex des gisements vont alors être fonction de l'épaisseur et de la teneur en silex de chaque RS.

Pour la partie est de l'ouest du Bassin de Paris (terminaison sud-ouest du Plateau Picard, est du Pays de Caux et est de l'Eure), l'épaisseur de RS dépasse rarement 5 m. Dans ce cas de figure, l'exploitation est impossible, car elle conduirait à une mise à nu de la craie.

Pour l'ensemble du Pays de Caux (à l'exception de l'est), avec une épaisseur moyenne de 10 à 15 m, on peut envisager une exploitation sur 5 à 10 m.

Pour le RS situé sous les alluvions des hautes terrasses de la Seine, l'exploitation n'est pas possible avec une épaisseur maximum de 3 m.

Pour l'ensemble nord et ouest de l'Eure, comprenant le Lieuvin, le Roumois et la partie occidentale du Pays d'Ouche, avec une épaisseur moyenne de RS de 10 à 15 m, on peut prétendre exploiter le RS sur 5 à 10 m.

Dans la partie centrale et méridionale de l'Eure, l'épaisseur de RS exploitable peut être de 15 à 20 m.

Pour la partie la plus occidentale du Bassin de Paris (Pays d'Auge et Perche), avec une épaisseur maximum de RS de 10 m, on peut difficilement prétendre réaliser une exploitation.

Enfin dans le nord de l'Eure et Loir, une exploitation sur une épaisseur de 20 à 25 m peut être envisagée. Dans ce secteur, il convient d'être prudent vis à vis de la nappe. D'après les travaux de F. Quesnel, le toit de la nappe se situe à la base des RS (fig. 58).

Figure 57 : Epaisseurs interpolées de limons  
Echelle 1 / 850000.

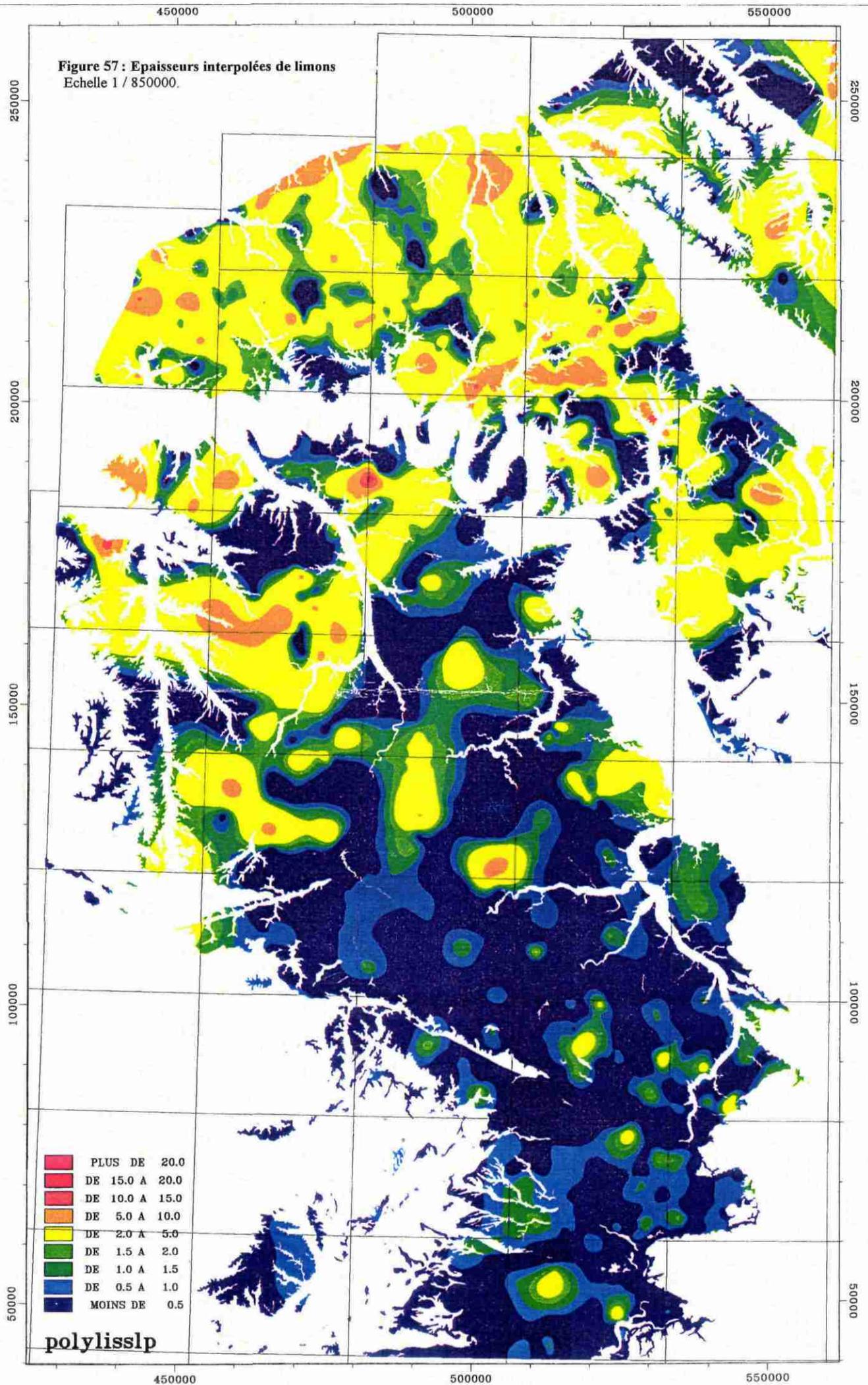
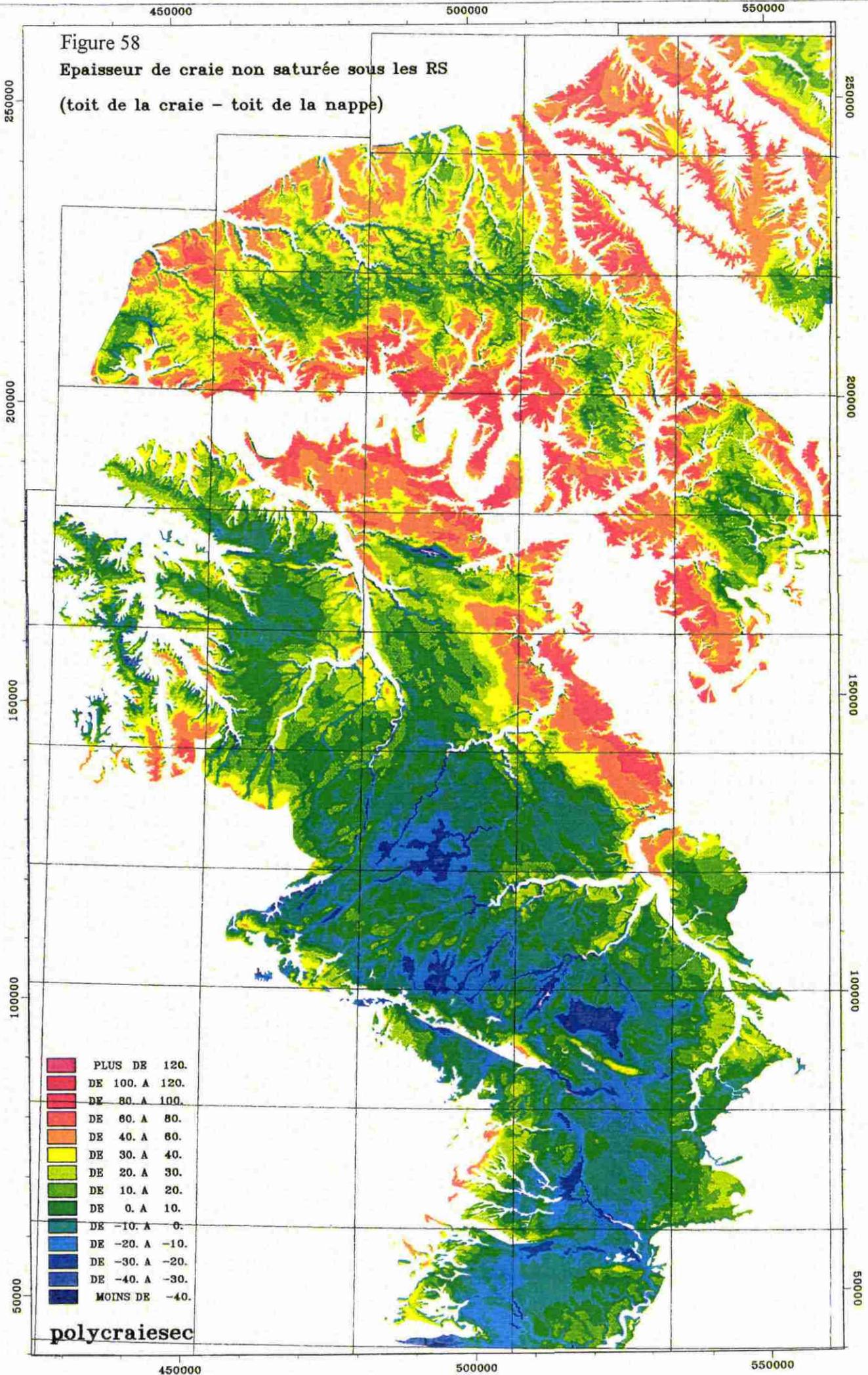


Figure 58  
 Epaisseur de craie non saturée sous les RS  
 (toit de la craie - toit de la nappe)



Le volume et le tonnage en silex des gisements sont calculés de la façon suivante :

a) volume du gisement = surface exploitation (20 ha) x épaisseur RS exploitable

b) tonnage du gisement (silex + matrice) = volume gisement x densité du matériau (silex + matrice)

La densité du matériau est de 2,5 (cf. II. 2.2.2.2.).

c) pour le tonnage en silex, on distingue les gisements dont l'épaisseur de RS exploitable est inférieure ou égale à 10 m, de ceux dont l'épaisseur de RS est supérieure à 10 m.

c<sub>1</sub>) Pour une épaisseur inférieure ou égale à 10 m, on a :

tonnage en silex = tonnage du gisement x %<sub>m</sub> moy silex

avec %<sub>m</sub> moy silex = moyenne des %massiques de silex des RS des sites étudiés pour la région considérée,

c<sub>2</sub>) Pour une épaisseur supérieure à 10 m,

on a une augmentation du pourcentage de silex avec la profondeur (0 à 10 m : 40 à 60 %, 10 à 15 m : 60 à 70 %, au delà de 15 m : 70 à 80 %).

Pour un gisement avec une épaisseur de 20 m, on a donc :

10 m	représente 50 % du gisement	Teneur en silex : % <sub>m</sub> moy silex 60 à 70 % 70 à 80 %
5 m	représente 25 % du gisement	
5 m	représente 25 % du gisement	

Figure 59 : Exemple de gisement de RS de plateau avec une épaisseur exploitable de 20 m.

Deux calculs sont alors réalisés :

tonnage minimum en silex = tonnage gisement x (0,5 x %<sub>m</sub> moy + 0,25 x 0,6 + 0,25 x 0,7)

tonnage maximum en silex = tonnage gisement x (0,5 x %<sub>m</sub> moy + 0,25 x 0,7 + 0,25 x 0,8)

Les résultats sont reportés dans le tableau 50. Le nord de l'Eure et Loir et les parties centrale et méridionale de l'Eure apparaissent incontestablement comme les zones géographiques les plus intéressantes pour une éventuelle exploitation. Les tonnages en silex oscillent entre 4 et 8 millions de tonnes (pour 20 hectares exploités), ce qui correspond à des durées de vie de 20 à 40 ans pour des exploitations de 200 000 tonnes par an.

#### - Synthèse sur l'exploitabilité des RS de plateau : Définition des grandes zones régionales

La synthèse de l'ensemble des informations concernant l'exploitabilité des RS de plateau, permet de dégager 11 zones géographiques différentes (tabl. 51 et fig. 60). On différencie 4 zones défavorables, 3 peu favorables, 3 moyennement favorables et 1 favorable.

Les 4 zones défavorables sont :

- la partie orientale de l'ouest du Bassin de Paris (terminaison sud-ouest du Plateau Picard, est du Pays de Caux et est de l'Eure). C'est la zone la plus défavorable pour l'exploitation avec une épaisseur de RS très faible et une couverture limoneuse souvent épaisse (5 à 10 m). De plus, la minéralogie des argiles (observée à l'est du Pays de Caux et dans le Talou) à base de minéraux gonflants renforce le caractère négatif de cette zone pour l'exploitation ;
- le RS sous les alluvions des hautes terrasses des vallées de la Seine et de l'Eure. Bien que la caractérisation du RS n'y ait pas été réalisée, son épaisseur est trop faible (inférieure ou égale à 3 m) pour une exploitation ;
- le petit secteur restreint au sud du Lieuvin et au nord-ouest du Pays d'Ouche, avec une épaisseur de RS faible (inférieure à 10 m) et une couverture limoneuse épaisse (5 m en moyenne) n'est pas intéressant pour l'exploitation ;
- la partie la plus occidentale du Bassin de Paris (Pays d'Auge et Perche). Bien que la minéralogie des argiles (kaolinite dominante) et l'épaisseur de la couverture ( $\leq 2$  m dans le Perche) soient intéressantes, l'épaisseur de RS est trop faible pour envisager une exploitation.

secteurs géographiques	épaisseur de RS exploitable en m	volume du gisement en millions de m3	tonnage en silex du gisement en millions de tonnes	durée de vie de l'exploitation en années (exploitation de 200000 t/an)
<b>Partie est de l'ouest du Bassin de Paris :</b> sud-ouest Picardie, est Pays de Caux, est Eure	0	/	/	/
<b>Pays de Caux (à l'exception de l'est)</b>	5	1	1,150	6
	10	2	2,300	12
<b>RS de la Seine</b>	0	/	/	/
<b>nord et ouest de l'Eure :</b> Lieuvin, Roumols, ouest Pays d'Ouche,	5	1	1,225	6
	10	2	2,450	12
<b>Pays d'Auge et Perche</b>	0	/	/	/
<b>Centre et sud Eure</b>	15	3	3,796 à 4,044	19 à 20
	20	4	5,550 à 6,050	28 à 30
<b>nord Eure et Loir</b>	20	4	5,500 à 6	27 à 30
	25	5	7,250 à 8	36 à 40

Tableau 50 : Estimation des volumes et tonnages en silex des différents types de gisements de RS de plateau.  
Les volumes et tonnages en silex des gisements sont calculés pour des exploitations de 20 hectares.

Aptitude à l'exploitation	Zones géographiques	Epaisseur moyenne de RS (en m) (seuil 10 m)	Recouvrement en mètres (seuil 2 m)	Teneur en silice (en %) (seuil 70 %)	Minéralogie de la fraction argileuse (en %)	Tonnage en silice des gisements (en millions de tonnes) (seuil 2 Mt)
<b>défavorable</b>	- est du Pays de Caux, SW Picardie - est de l'Eure	<del>≈ 5</del>	<del>≥ 5</del>	<del>45 à 50</del> <del>≈ 50</del>	<del>smectite exclusive</del> <del>?</del>	<del>&lt; 2</del>
	RS sous les terrasses de la Seine et de l'Eure	<del>3</del>	<del>&lt; 2</del>	<del>≈ 50</del>	<del>?</del>	<del>&lt; 2</del>
	sud Lieuvain, nord-ouest Pays d'Ouche	<del>&lt; 10</del>	<del>5</del>	<del>≈ 50</del>	<del>?</del>	<del>&lt; 2</del>
	- Pays d'Auge - Perche	<del>≤ 10</del>	<del>5</del> <del>≤ 2</del>	<del>≈ 50</del> <del>55 à 60</del>	<del>?</del> <del>kaolinite exclusive</del>	<del>&lt; 2</del>
<b>peu favorable</b>	Pays de Caux (excepté l'est)	10 à 15	<del>≥ 5</del>	<del>50 à 55</del>	<del>kaolinite dominante</del>	<del>1,15 à 2,3</del>
	- Lieuvain, Roumois	10 à 15	<del>5</del>	<del>45 à 60</del>	<del>kaolinite dominante</del>	<del>≈ 1 à 2</del>
	- ouest Pays d'Ouche	10 à 15	<del>5</del>	<del>55 à 60</del>	<del>kaolinite dominante</del>	<del>≈ 1 à 2</del>
<b>moyennement favorable</b>	sud-ouest Eure	15	<del>&lt; 2</del>	<del>0 à 10m : 40-60</del> <del>10 à 15m : 60-70</del>	<del>?</del>	<del>≈ 2</del>
	est Plaine du Neubourg	15	<del>≤ 2</del>	<del>0 à 10m : 40-60</del> <del>10 à 15m : 60-70</del>	<del>?</del>	<del>≈ 2</del>
	ouest Beauce	15	<del>&lt; 2</del>	<del>0 à 10m : 40-60</del> <del>10 à 15m : 60-70</del>	<del>?</del>	<del>≈ 2</del>
<b>favorable</b>	- Centre et sud de l'Eure	20 à 25	<del>≤ 2</del>	<del>0 à 10m : 55-60</del> <del>10 à 15m : 60-70</del> <del>plus de 15m : 70-80</del>	<del>kaolinite dominante</del>	<del>3,8 à 6</del>
	- nord Eure et Loir	25 à 30	<del>&lt; 2</del>	<del>0 à 10m : 45-60</del> <del>10 à 15m : 60-70</del> <del>plus de 15m : 70-80</del>	<del>kaolinite exclusive</del>	<del>5,5 à 8</del>

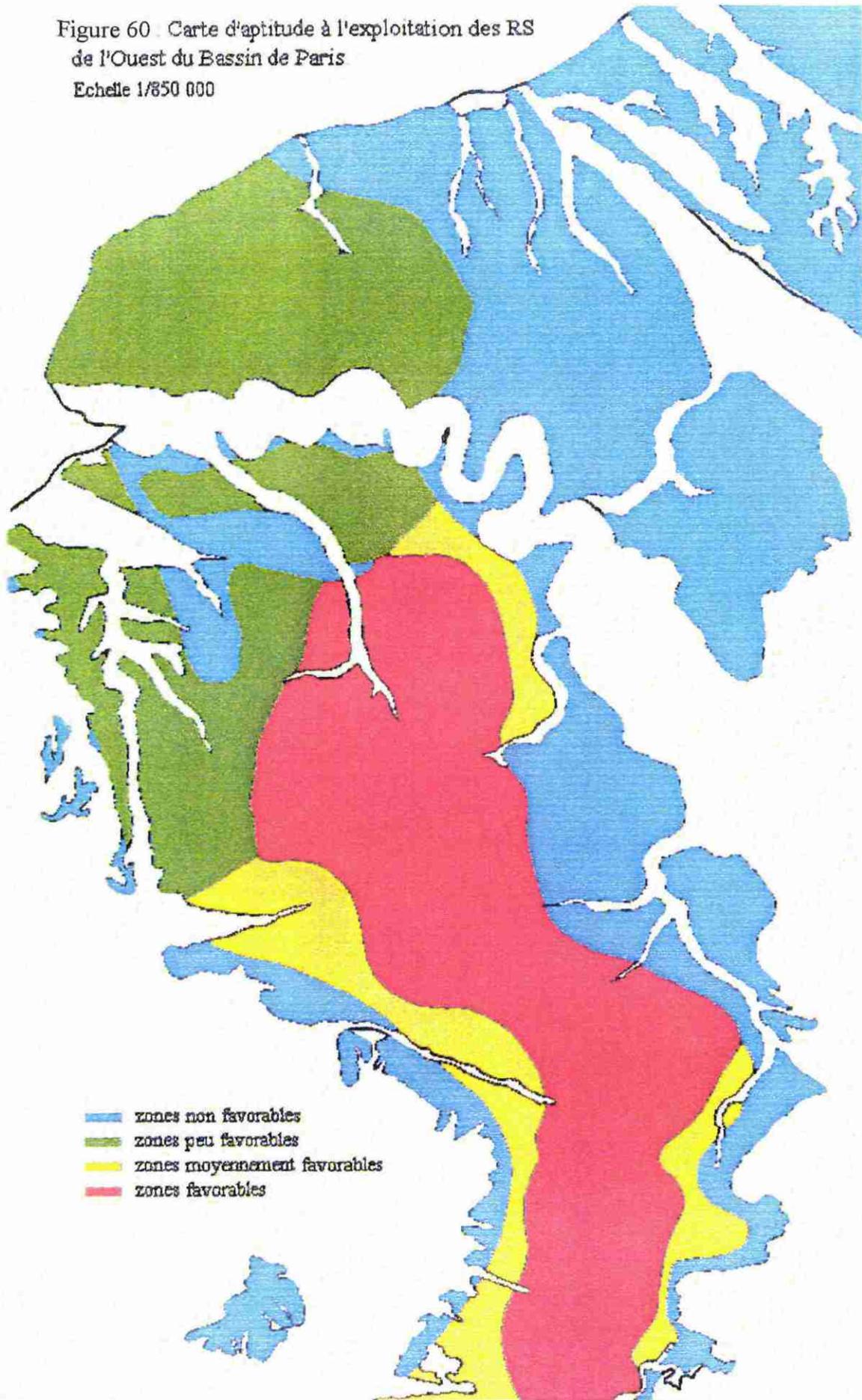
**Tableau 51 : Classification des RS de plateau en zones plus ou moins favorables pour l'exploitation en fonction des paramètres lithologiques du matériau.**

Pour chaque paramètre lithologique des seuils d'exploitabilité ont été choisis :

l'épaisseur de RS n'est pas intéressante lorsqu'elle est inférieure à 10 m ; l'épaisseur de couverture n'est pas intéressante lorsqu'elle est supérieure à 2m ; la teneur en silice n'est pas intéressante lorsqu'elle est inférieure à 70 % ; la minéralogie des argiles à base de smectite dominante n'est pas intéressante ; le tonnage en silice des gisements est défavorable lorsqu'il est inférieur à 2 millions de tonnes.

Les cases sont rayées lorsque les paramètres lithologiques des RS sont défavorables pour l'exploitation ; un paramètre lithologique particulièrement intéressant pour l'exploitation sera en gras.

Figure 60 . Carte d'aptitude à l'exploitation des RS  
de l'Ouest du Bassin de Paris  
Echelle 1/850 000



Les 3 zones peu favorables sont :

- le **Pays de Caux** (excepté sa partie est, citée au paragraphe précédent). Malgré l'épaisseur de RS et le tonnage de silex relativement intéressants (1,2 à 2,3 millions de tonnes), la minéralogie de la fraction argileuse à base de kaolinite dominante, le Pays de Caux présente une couverture limoneuse trop épaisse (5 à 10 m) et des teneurs en silex trop faibles ( $\approx 50\%$ ) pour que l'ouverture d'une carrière soit financièrement rentable dans le contexte actuel ;
- le **Lieuvin** et le **Roumois**. Bien que le tonnage de silex soit relativement élevé (entre 1 et 2 millions de tonnes environ), la couverture limoneuse est trop épaisse ( $\approx 5$  m) et les teneurs en silex trop faibles (45 à 60 %) pour que le RS soit exploitable dans ce secteur ;
- la **partie occidentale du Pays d'Ouche**, pour les mêmes raisons que le Lieuvin et le Roumois.

Les 3 zones moyennement favorables sont :

- l'ensemble comprenant la **bordure sud-ouest de l'Eure** et la **partie centrale du Faux Perche** ;
- **l'est de la Plaine du Neubourg** ;
- **l'ouest de la Beauce**.

Malgré une épaisseur de RS intéressante (15 m en moyenne), une couverture limoneuse peu épaisse ( $\approx 2$  m), l'ouverture d'une carrière dans ces secteurs concernerait uniquement les dix premiers mètres du RS, lesquels présentent des teneurs en silex assez faibles ( $\approx 50\%$ ).

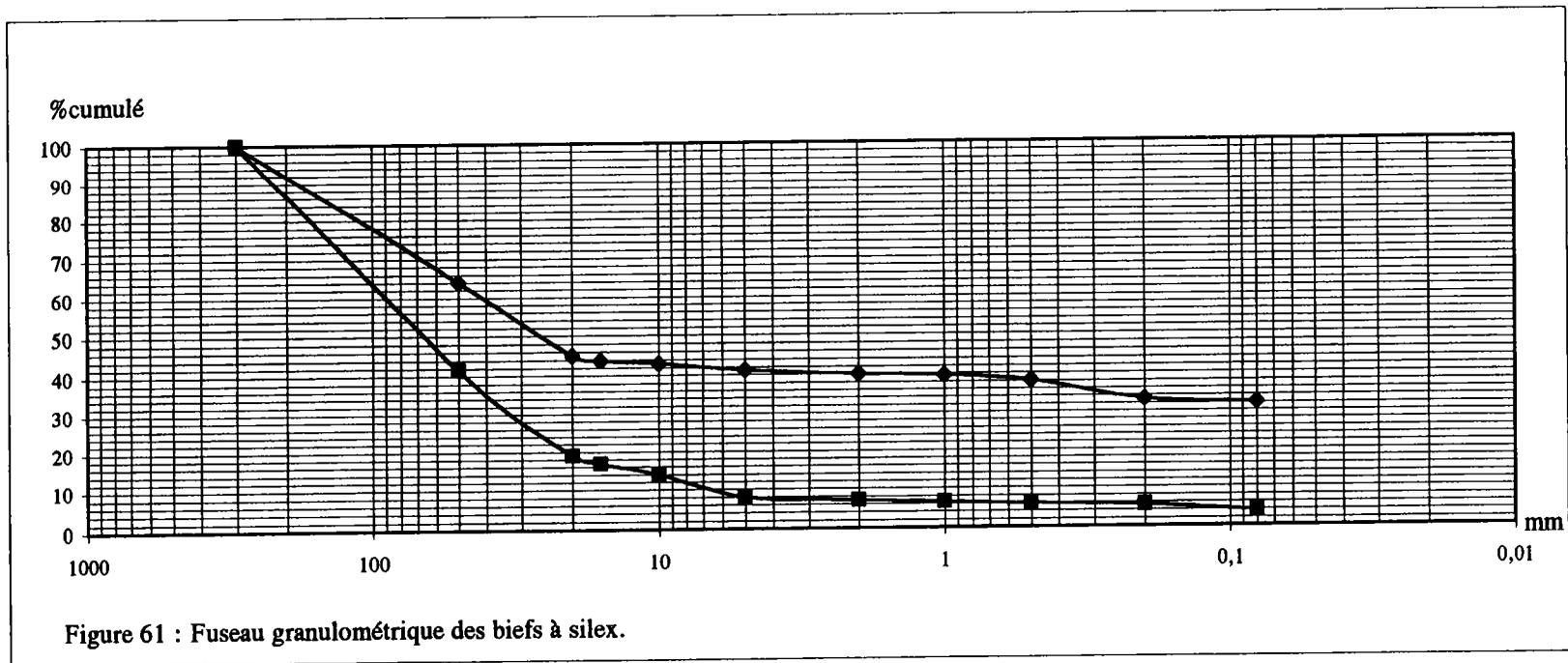
La zone favorable pour l'exploitation comprend :

- **le centre et le sud de l'Eure et le nord de l'Eure et Loir**, avec des épaisseurs de RS et des tonnages en silex très importants (4 à 8 millions de tonnes pour 20 hectares exploités), une couverture limoneuse de faible épaisseur ( $\leq 2$  m), une minéralogie des argiles à base de kaolinite dominante et un enrichissement en silex avec la profondeur. Le **nord de l'Eure et Loir** apparaît comme le secteur le **plus favorable**, avec le tonnage en silex le plus élevé (5 à 8 millions de tonnes pour 20 hectares exploités), l'épaisseur de couverture la plus faible ( $< 2$  m) et une minéralogie des argiles presque exclusivement composée de kaolinite.

### 1.1.2. RS de versant ou biefs à silex

Les biefs à silex sont des formations hétérogènes, à matrice argilo-limono-sableuse, riches en silex, de 55 à 81 % pour la fraction supérieure à 20 mm et de 60 à 93 % pour celle supérieure à 2 mm. Leur pourcentage de fines ( $< 80 \mu\text{m}$ ) est compris entre 4 et 32 % (fig. 61). D'un site à un autre et au sein d'un même site, la matrice (fraction inférieure à 2 mm) peut avoir une composition variable. En revanche, il existe une typologie de ces matériaux basée sur leur teneur en silex (fraction supérieure à 2 mm). Cette **classification** s'organise en fonction de la nature et de la pente du versant (cf. III. 1.6.3.). On distingue :

- les **biefs à silex situés à l'extrémité des interfluves**. Il s'agit des matériaux les plus riches en silex, avec des teneurs comprises entre 82 et 93 %.
- les **biefs à silex localisés sur les versants des vallées drainées et sèches dont la pente est supérieure ou égale à 19°**. L'étude de la géométrie des gisements de ces matériaux a montré qu'il existe sur ces versants deux biefs. Un bief localisé sur le versant (bief 2, avec une pente de 16 à 21°), dont la teneur en silex est élevée (78 à 90 %) et un bief en retrait par rapport au versant (bief 1, avec une pente de 3 à 8°), dont la quantité de silex est plus faible que le bief 2 (60 à 78 %) ;



- les **biefs à silex localisés sur les versants des vallées sèches et drainées dont la pente est inférieure ou égale à 18°**. Géométriquement, les gisements ne présentent qu'un seul bief, le bief 1. Le pourcentage de silex de ce dernier est compris entre 60 et 78 %, avec une différenciation entre les versants à pente faible (inférieure à 9°) et ceux à pente un peu plus forte (supérieure ou égale à 13°) dont les teneurs en silex sont respectivement de 60 à 68 % et de 68 à 78 %.

Connaissant la géométrie et la granulométrie des biefs, nous pouvons calculer les volumes et les tonnages en silex des gisements de ces matériaux. Afin de comparer les gisements entre eux, nous avons retenu pour les sites de versant de vallées sèches et drainées une exploitation théorique avec une longueur (L) fixe de 500m parallèlement au versant (fig. 62). Les paramètres épaisseur (e) et largeur (l) varient en fonction du site, de même que la teneur en silex qui est fonction de la pente du versant. Le calcul a été réalisé sur les sites de géométrie connue (cf. III.1.5.), ainsi que sur le site de Saulnières où nous disposons de suffisamment d'informations pour estimer le volume du gisement.

Les résultats sont reportés dans le tableau 52. Quelles que soient la pente du versant et la fraction granulométrique considérée (supérieure à 20 mm ou supérieure à 2 mm), les tonnages en silex des gisements de versant de vallées sèches et drainées sont faibles, entre 161 000 et 563 000 tonnes. Les tonnages en silex des gisements situés à l'extrémité des interfluves sont plus importants avec des valeurs comprises entre 800 000 et 1 100 000 tonnes. **Des exploitations de 200 000 tonnes par an ne sont donc pas possibles** sur ces sites. Par contre, **des exploitations plus modestes**, de 100 000 tonnes par an, pour des **besoins locaux**, peuvent être envisagées sur les **sites d'interfluves**. Elles auraient une durée de vie de 8 à 11 ans. Néanmoins, les **sites à l'extrémité des interfluves**, du fait de leur situation morphologique particulière, restent **très limités en nombre**.

Parmi les autres caractéristiques de ces matériaux pouvant influencer sur les possibilités d'exploitation, notons que :

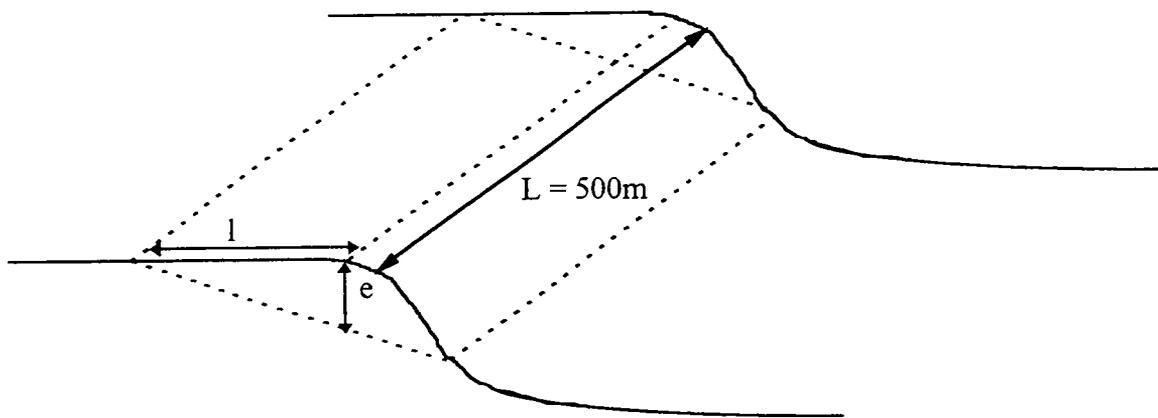
- la minéralogie de la fraction argileuse des biefs, bien que variable, est toujours composée de kaolinite dominante (supérieure à 50 %). La nature de la fraction argileuse posera donc peu de difficulté lors de la séparation silex-matrice ;
- l'épaisseur de recouvrement du bief par les formations limoneuses n'excède pas deux mètres pour tous les sites de versant étudiés. Il ne s'agit donc pas d'un paramètre restrictif pour l'exploitation.

Après avoir établi une typologie des formations résiduelles à silex à partir de l'identification des tout-venants et déterminé les volumes et les tonnages en silex des différents types de gisements, nous allons maintenant nous intéresser aux caractéristiques mécaniques des silex de ces formations et à leur utilisation.

## **1.2. Caractérisation géotechnique et utilisation des silex des RS (argiles à silex de plateau et biefs à silex)**

Les essais géotechniques ont été réalisés sur 27 échantillons sélectionnés en fonction des différents faciès de RS rencontrés. Les analyses granulométriques ont montré que la majeure partie des silex se situe dans la fraction supérieure à 20 mm. La fabrication de granulats à partir de ces matériaux nécessite donc un concassage des cailloux de silex. C'est

Figure 62 : Exploitation type retenue pour le calcul du volume des gisements de biefs à silex.



Type de bief à silex	Volume du gisement en m <sup>3</sup>	Tonnage en silex du gisement en tonnes	
		fraction > 20 mm	fraction > 2 mm
<b>Extrémités d'interfluve :</b>			
Toutainville	409 000	797 000	920 000
Saulnières	525 000	945 000	1 089 000
<b>Versants de vallée sèche et drainée avec une pente ≤ 18° :</b>			
Déviation de Brionne	168 000	231 000	324 000
La Vasserie 1	156 000	234 000	293 000
La Vasserie 2	300 000	450 000	563 000
Les Mollands	148 000	234 000	289 000
<b>Versants de vallée sèche et drainée avec une pente ≥ 19° :</b>			
Bernay	98 000	161 000	185 000
Mont Mal	194 000	321 000	374 000

Tableau 52 : Estimation des volumes et tonnages en silex des différents types de gisements de biefs à silex.  
Les volumes et tonnages en silex sont calculés pour des exploitations sur des versants d'une longueur de 500 m.

pourquoi, nous avons essentiellement analysé les caractéristiques mécaniques des granulats provenant du concassage des cailloux de silex : 20 échantillons de silex concassés ont été étudiés. Parmi ces 20 échantillons, 12 concernent les RS de plateau, 8 les biefs à silex. Enfin, 7 échantillons de graviers de silex non concassés, c'est à dire à l'état naturel dans les RS, ont été analysés. Il s'agit uniquement d'échantillons de biefs à silex, qui sont les seuls matériaux à contenir des quantités non négligeables de graviers.

### **1.2.1. Caractéristiques de fabrication et résistance mécanique des granulats issus du concassage des silex des RS**

#### ***1.2.1.1. Caractéristiques de fabrication des silex concassés***

Le concassage des silex a été accompli à l'aide :

- d'un réducteur à mâchoires dont le gueulard accepte des blocs de 100 mm maximum d'épaisseur, pour produire un 0-40 mm ;
- d'un réducteur giratoire qui produit un 0-20 mm à partir d'un 20-40 mm.

M. Normand et H. Evrard (1980) soulignent que ces appareils sont très limités en capacité. Ils permettent une réduction des matériaux, mais celle-ci n'est pas représentative des conditions industrielles. Contrairement à un concassage réalisé dans des conditions industrielles, il est impossible de jouer sur les caractéristiques de fabrication du matériau (granulométrie, aplatissement, angularité).

Les caractéristiques de fabrication étudiées sont la granularité et le coefficient d'aplatissement. Ces mesures se sont limités à quelques échantillons, dans la mesure où les résultats sont très proches (fig. 63 et tabl. 53).

Les granularités obtenues après les deux opérations de concassage sont représentées sur la figure 63. Elles sont similaires à celles obtenues par M. Normand et H. Evrard (1980) sur trois échantillons de silex de biefs concassés dans les mêmes conditions. On remarque pour tous les échantillons que les courbes granulométriques présentent la même allure creuse, témoignant d'une faible production de sables. Notons également que la quantité de fines produite varie de 1 à 3 %.

En ce qui concerne les coefficients d'aplatissement, là encore, on a des résultats similaires avec des coefficients élevés pour tous les échantillons (tabl. 53). Ces résultats sont identiques à ceux de M. Normand et H. Evrard (1980). La forme des gravillons obtenus après concassage n'est donc pas satisfaisante, en particulier dans les plus petites classes granulométriques (la forme peut être considérée comme bonne lorsque le coefficient d'aplatissement est inférieur ou égale à 20).

Que ce soit pour la granularité ou la forme des gravillons, on peut penser, comme le soulignent M. Normand et H. Evrard (1980), qu'une opération de réduction effectuée avec un matériel de concassage approprié permette d'obtenir de meilleurs résultats.

C. Spencer *et al.* (1996) ont effectué sur les silex de Challet une série de 7 opérations de concassages comparatifs, avec différents types de concasseurs et de broyeurs (fig. 64). Deux souches de silex ont été préalablement concassés :

échantillon/lamis mm	31,5	25	20	16	12,5	10	8	6,3	5	4	2	0,5	0,315	0,2	0,08
Con2	99,8	97	80	54	33	23	16	12	8	7	4	1,4	1	0,7	0,3
Oct	99,5	91	76	55	32	22	16	12	8	6,5	4	2	1,6	1,3	0,8
SMB	97	85	48	23	14	10	8	6	5	4	2	1,4	0,6	0,6	0,3
Vas s7	100	94	82	69	45	35	27	21	17	14	10	5	4	3	1,5
San2	100	94	83	69	49	38	30	23	19	16	11	6	5	4	2
MM2	100	94	84	70	51	38	30	24	19	16	10	6	4	3	2
MM3	100	92	81	70	49	36	28	21	17	14	11	6	4	3	1,5
Cha	100	86	72	59	43	35	28	23	19	17	14	8	6	6	3
Ven	100	92	82	71	53	41	34	27	21	18	14	8	6	5	2
Con	100	92	81	70	49	36	28	21	17	14	10	4	3	2,5	1

chiffres en %

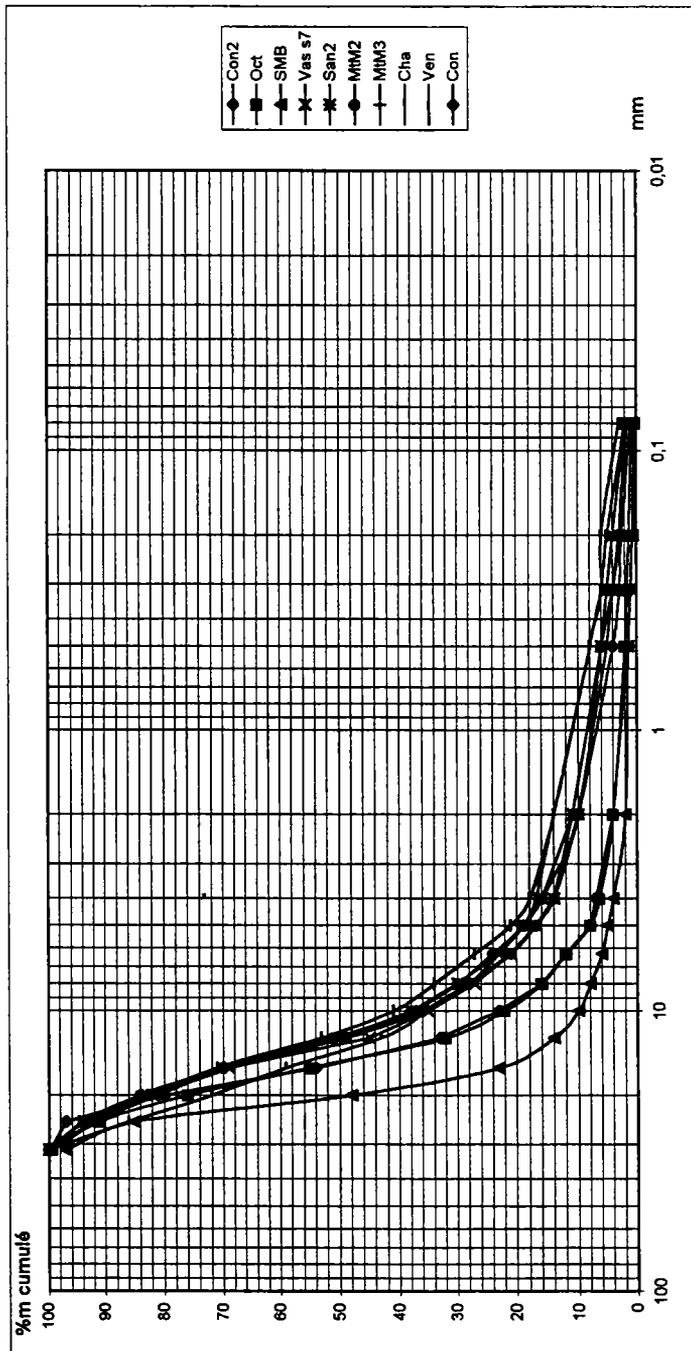


Figure 63 : Granulométries des granulats issus du concassage des silex par des réducteurs à mâchoire et gratoire. Les mesures sur les échantillons Con 2, Oct et SMB proviennent des travaux de M. Normand et H. Evvard (1980).

	31,5-25 mm	25-20 mm	20-16 mm	16-12,5 mm	10-8 mm	8-6,3 mm	6,3-5 mm	5-4 mm
Con2		17,4	10,8	19,8	31,7	33,5	34,2	42
Oct	66,2	17,4	15,1	21,2	42	46,9	41,3	47,3
SMB	34	13,7	10,4	23,4	39,9	40,2	37,5	49
VasS7		15,2	13,8	22,3	35,3	37	37,2	45
MtM2		20,1	19,8	33,4	44,9	47,6	45,1	50,1
MtM3		14,5	12,6	22,3	40,3	42,7	39,4	48,1
Ven		12,8	10,1	18	30,6	32,1	33,3	41

Tableau 53 : Coefficients d'aplatissement (en %) de 7 échantillons de silex de RS concassés avec un réducteur à machoire et un réducteur giratoire. Les mesures sur les échantillons Con 2, Oct et SMB proviennent des travaux de M. Normand et H. Evrard (1980).

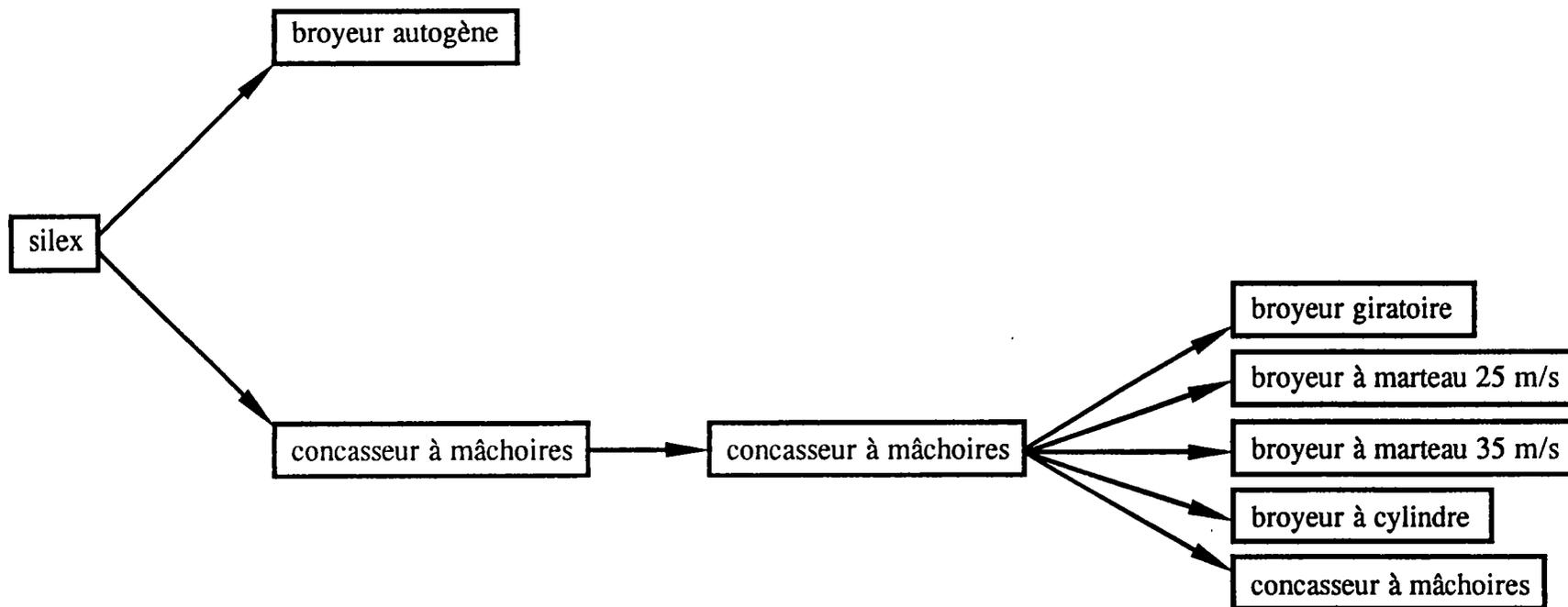


Figure 64 : Modes de concassage réalisés par C. Spencer *et al.* (1996) sur les silex du RS de Challet.

- 250 kg en utilisant un concasseur à mâchoires ABM, puis un concasseur à mâchoires PINETTE ;
- 130 kg en utilisant un broyeur autogène.

Le test au broyeur autogène n'a pas donné les résultats escomptés (mauvaise fragmentation des silex) et n'a pas été poursuivi.

Le lot de 250 kg provenant des concasseurs à mâchoires a été divisé en plusieurs lots par quartage et une réduction tertiaire a été réalisée à l'aide de plusieurs types de broyeurs (fig. 64).

Le tableau 54 indique les granulométries obtenues après chaque type de concassage ou broyage. On constate que certains modes de broyage (opérations 3 et 6) donnent des taux de sable (fraction inférieure à 5 mm) élevés.

Le tableau 55 résume les mesures de coefficient d'aplatissement obtenues sur les silex concassés.

n° d'opération	type de broyage	Coefficient d'aplatissement (%)
2	Concasseur à mâchoires - 2 passages	24,6
3	Concasseur à mâchoires - 3 passages	28,4
4	Concasseur à mâchoires - 2 passages puis broyeur à marteau Hazemag 25 m/s	23,9
5	Concasseur à mâchoires - 2 passages puis broyeur giratoire	39,4
6	Concasseur à mâchoires - 2 passages puis broyeur à marteau Hazemag 35 m/s	27,2
7	Concasseur à mâchoires - 2 passages puis broyeur à cylindres	29,6

Tableau 55 : Coefficients d'aplatissement des graviers de silex du RS de Challet obtenus après différents types de concassage (Spencer *et al.*, 1996).

Les coefficients d'aplatissement sont dans l'ensemble assez élevés. Il semble, à la vue de ces résultats, que la réduction granulométrique des silex obtenue avec un concasseur à mâchoires (2 passages), puis un broyeur à marteaux réglé à 25 m/s, permet d'avoir des granulats présentant le plus faible coefficient d'aplatissement. En revanche, l'indice d'aplatissement est très élevé pour le matériau issu du concasseur giratoire.

On peut donc penser que l'opération de concassage n° 4, utilisée dans des conditions industrielles, permette d'obtenir un coefficient d'aplatissement inférieur à 20 % (communication orale des géotechniciens du C.E.T.E. de Rouen).

### 1.2.1.2. Résistance mécanique des silex issus du concassage

Les caractéristiques mécaniques des graviers et des sables issus du concassage des cailloux de silex sont rassemblées dans le tableau 56.

Pour la classe granulaire 10-14 mm, à l'exception de deux échantillons (Challet et La Vasserie p1b), la résistance mécanique à l'usure obtenue par l'essai micro-Deval (MDE) est bonne. Avec des valeurs comprises entre 18 et 29, la résistance aux chocs mesurée par l'essai de fragmentation dynamique (FD) est modeste.

La classe 4-6,3 mm présente un micro-Deval plus élevé et moins bon que celui de la fraction 10-14 mm. On retrouve les deux échantillons Challet et La Vasserie p1b avec les plus

<b>Opération 1 : Concasseur à mâchoires - 1 passage</b>			
d (mm)	P (g)	P (%)	P (%cum)
12.5	8942	74,61	74,61
10	370	3,09	77,7
6.3	767	6,40	84,1
5	318	2,65	86,75
<5	1500	13,25	100
alimentation	11985	100	

<b>Opération 5 : Concasseur à mâchoires - 2 passages puis broyeur à marteaux 25m/s</b>			
d (mm)	P (g)	P (%)	P (%cum)
12,5	2189	37,02	37,02
10	395	6,68	43,70
6,3	857	14,49	58,19
5	390	6,60	64,79
<5	2082	35,21	100
alimentation	5913	100	

<b>Opération 2 : Concasseur à mâchoires - 2 passages</b>			
d (mm)	P (g)	P (%)	P (%cum)
12.5	5281	65,05	65,05
10	415	5,11	70,17
6.3	625	7,7	77,86
5	229	2,82	80,68
<5	1568	19,32	100
alimentation	8118	100	

<b>Opération 6 : Concasseur à mâchoires - 2 passages puis broyeur à marteaux 35 m/s</b>			
d (mm)	P (g)	P (%)	P (%cum)
12,5	1280	24,96	24,96
10	239	4,66	29,62
6,3	698	13,61	43,23
5	355	6,92	50,16
<5	2556	49,84	100
alimentation	5128	100	

<b>Opération 3 : Concasseur à mâchoires - 3 passages</b>			
d (mm)	P (g)	P (%)	P (%cum)
12.5	0	0	0
10	0	0	0
6.3	96	2,25	2,25
5	325	7,61	9,86
<5	3849	90,14	100
alimentation	4270	100	

<b>Opération 7 : Concasseur à mâchoires - 2 passages puis broyeur à cylindres lisses</b>			
d (mm)	P (g)	P (%)	P (%cum)
12,5	7891	70,99	70,99
10	441	3,97	74,96
6,3	805	7,23	82,2
5	361	3,25	85,45
<5	1616	14,55	100
alimentation	11115	100	

<b>Opération 4 : Concasseur à mâchoires - 2 passages puis broyeur giratoire</b>			
d (mm)	P (g)	P (%)	P (%cum)
12.5	2425	25,95	25,95
10	1532	16,4	42,35
6.3	2043	21,68	64,21
5	555	5,94	70,15
<5	2789	29,85	100
alimentation	9344	100	

Tableau 54 : Granulométries des matériaux issus des différents modes de concassage des silex du RS de Challet (Spencer *et al.*, 1996).

d : diamètre ; P : poids en gramme, en pourcentage et en pourcentage cumulé.

échantillons	localisation morphologique	MDE 10-14 mm	FD 10-14 mm	MDE 4-6,3 mm	FD 4-6,3 mm	FS 0,2-4 mm
Lie	plateau	11	28	27	29	
By	plateau	7	23	16	26	18
Cha	plateau	24	28	38	30	46
San 1	plateau	8	26	20	26	20
San 2	plateau	7	25	18	27	19
SJT	plateau	8	25	20	27	20
Ven	plateau	12	27	28	28	25
Vas plb	plateau	23	29	43	30	46
Vas pla	plateau	7	24	19	27	20
A/C	plateau	11	26	24	28	16
A29	plateau	8	25	20	27	
MtM pl	plateau	14	27	23	29	23
Con 1	versant	5	25	16	26	16
Bou	versant	6	27	17	26	
Mol	versant	7	21	18	22	17
Sau 1	versant	7	25	18	26	
VB 1	versant	8	22	20	24	
Vas1	versant	11	25	26	28	26
MtM 2	versant	6	25	22	28	20
Con 2	versant	4	18	14	26	

Tableau 56 : Résistance mécanique des graviers et des sables issus du concassage des cailloux de silex.  
MDE : Micro-Deval, FD : Fragmentation dynamique, FS : Friabilité des sables.

mauvais MDE. Les autres valeurs de MDE sont moyennes. La fragmentation dynamique du 4-6,3 mm est similaire à celle du 10-14 mm.

Tous les échantillons de la fraction sableuse ont une friabilité des sables (FS) modeste (17 à 26), à l'exception, là encore, de Challet et de La Vasserie p1b où elle est mauvaise.

A l'exception des deux échantillons Challet et La Vasserie p1b, les résistances mécaniques des silex des formations de plateau et de versant sont similaires.

### 1.2.2. Résistance mécanique des graviers contenus dans les RS à l'état naturel

Les résultats de MDE et de FD, pour les classes granulométriques 10-14 et 4-6,3 mm sont identiques à ceux des graviers de silex obtenus par concassage (tabl. 57).

échantillons	MDE 10-14 mm	FD 10-14 mm	MDE 4-6,3 mm	FD 4-6,3 mm
Con1	17	24	29	27
Mol	8	25	23	28
Sau 1	14	25	25	28
Sau 2	9	25	21	27
VB 1	19	26	30	27
VB 4	17	25	30	28
Con2	7	19	17	26

Tableau 57 : Résistance mécanique des graviers de silex contenus dans les biefs à silex.

La FD pour les deux classes est modeste. Le MDE du 10-14 mm est bon, alors que celui du 4-6,3 mm est modeste.

### 1.2.3. Synthèse sur la résistance mécanique des silex

Le principe de l'essai micro-Deval voudrait que les résultats des fractions 10-14 mm et 4-6,3 mm soient les mêmes. Or, on retrouve, aussi bien pour les graviers de silex concassés que pour ceux contenus dans les RS à l'état naturel, un MDE moins bon pour le 4-6,3 mm comparativement au 10-14 mm. Nous pensions également que les résultats de résistance mécanique entre échantillons seraient très proches pour une classe granulométrique donnée; mais ce n'est pas le cas, notamment pour le MDE (tabl. 56).

L'explication de ces différences est liée à l'importance du cortex des silex. En effet, après avoir quantifié le pourcentage volumique de cortex des silex pour chaque échantillon soumis aux essais, nous avons observé l'existence, pour les deux fractions granulométriques étudiées, d'une forte corrélation entre les résultats géotechniques et le pourcentage de cortex dans les échantillons, notamment au niveau du MDE (tabl. 58).

	MDE 10-14 mm	MDE 4-6,3 mm	FD 10-14 mm	FD 4-6,3 mm
% de cortex	0,92	0,91	0,79	0,71

Tableau 58 : Tableau des coefficients de corrélation entre le pourcentage de cortex contenus dans les échantillons de silex soumis aux essais géotechniques (MDE, FD) et les résultats de ces essais, pour les classes granulométriques 10-14 mm et 4-6,3 mm.

De même, les moins bons résultats de MDE du 4-6,3 mm par rapport au 10-14 mm s'expliquent par une production plus importante d'éléments de cortex dans le 4-6,3 mm comparativement au 10-14 mm, lors du concassage des silex. Ceci se retrouve également pour les graviers à l'état naturel au sein du RS : lors de la mise en place des biefs à silex, le remaniement des altérites à silex va conduire à une fragmentation des silex et à une production plus importante de cortex dans les plus petites classes granulométriques.

A partir des corrélations dégagées entre la quantité de cortex contenue dans les échantillons de silex analysés et respectivement les résultats du micro-Deval et de la fragmentation dynamique, des abaques peuvent être établis (fig. 65). Ainsi, pour un échantillon de silex avec un pourcentage de cortex connu, nous pourrions estimer les résultats du MDE et de la FD.

La caractérisation des RS portant sur les critères macroscopiques des silex a montré qu'il n'existe pas de zone géographique homogène pour le pourcentage de cortex des silex aussi bien en plateau qu'en versant (cf. II.1.5.1. et III.1.4.1.). L'importance du cortex sur les silex varie d'un site à un autre et également au sein d'un même site. C'est le cas du site de la Vasserie, où deux échantillons prélevés en plateau à 100 mètres de distance ont donné des silex avec des pourcentages de cortex très différents (cf. II.1.5.1.). Ces remarques indiquent que le développement important de cortex des silex semble être dépendant de zones de circulation d'eau et donc de zones d'altération privilégiées. Sur le terrain, le repérage de ces zones est très difficile.

#### 1.2.4. Essais d'identifications complémentaires sur les sables (fraction inférieure à 4 mm) obtenus après concassage des silex

##### - Equivalent de sable

L'essai d'Equivalent de sable a été réalisé uniquement sur 3 échantillons de sables issus du concassage des silex. Les résultats oscillent entre 30 et 80 %. M. Normand et H. Evrard (1980) observent des résultats similaires avec un équivalent de sable entre 39 et 89 %. Ils soulignent que l'équivalent de sable est lié au pourcentage de fines (< 80 µm) contenu dans le sable : l'équivalent de sable est supérieur à 80 % pour une teneur en fines faible (inférieure à 4%), tandis qu'il est inférieur à 40% pour une teneur en fines de 10%. La propreté des sables n'apparaît donc pas satisfaisante.

##### - Coefficient d'absorption des sables

Cette mesure a été effectuée sur 3 échantillons de sables issus du concassage des silex (tabl. 59).

échantillons	coefficient d'absorption (%)
MtM p1	4,7
Cha	14,4
Vas 1	5,3

Tableau 59 : Coefficients d'absorption des sables issus du concassage des silex.

Les échantillons MTM p1 et VAS 1 sont représentatifs de la majeure partie des sables obtenus par concassage. Leur coefficient d'absorption est assez bon (voisin de 5 %).

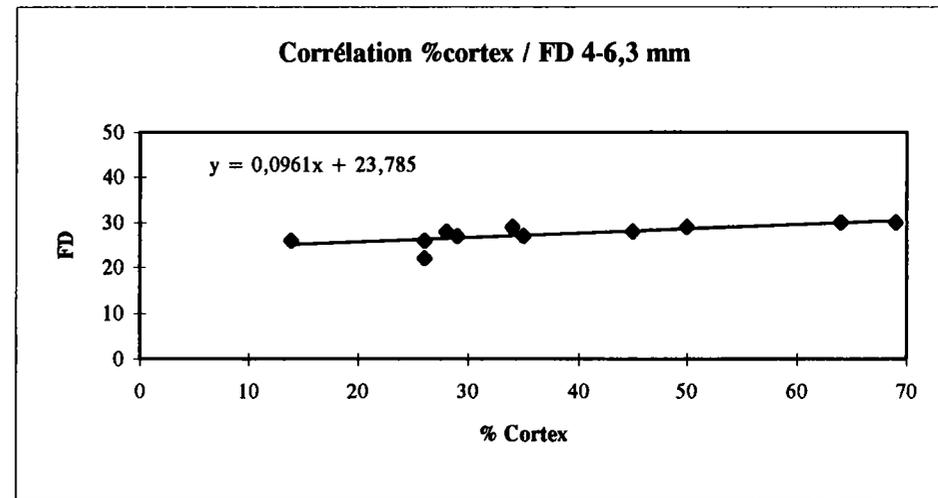
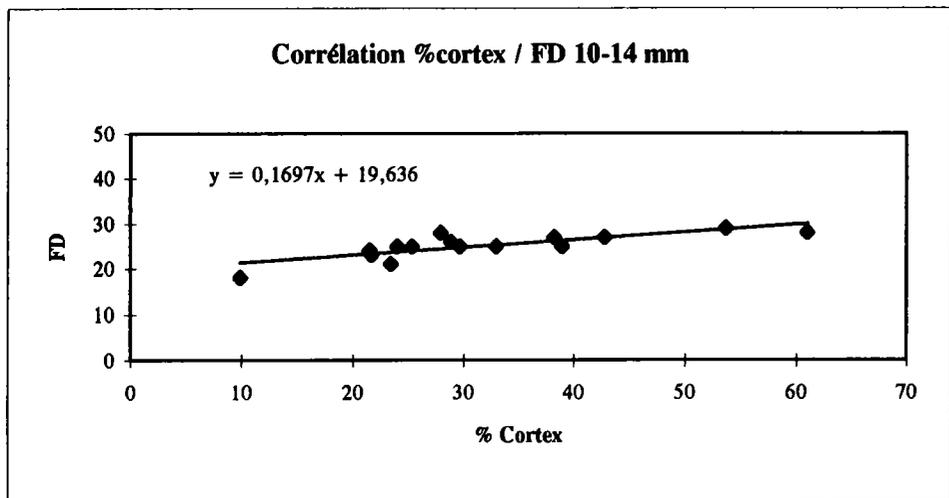
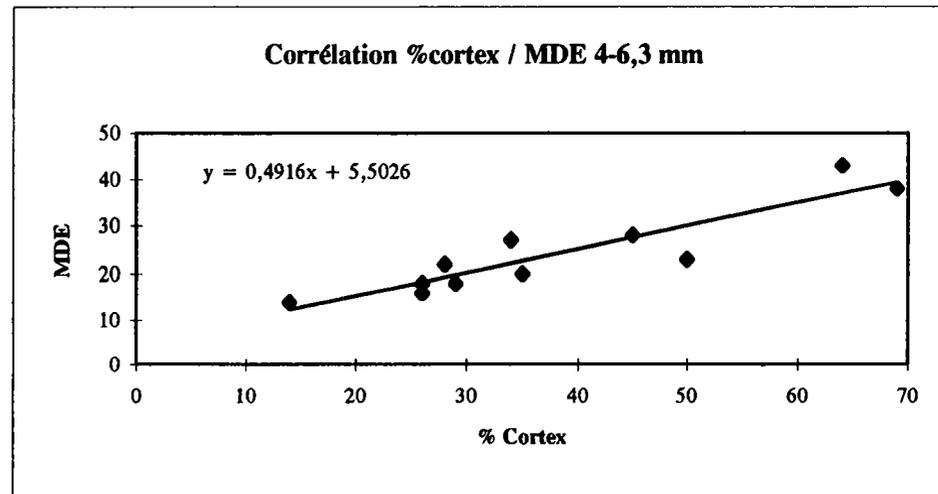
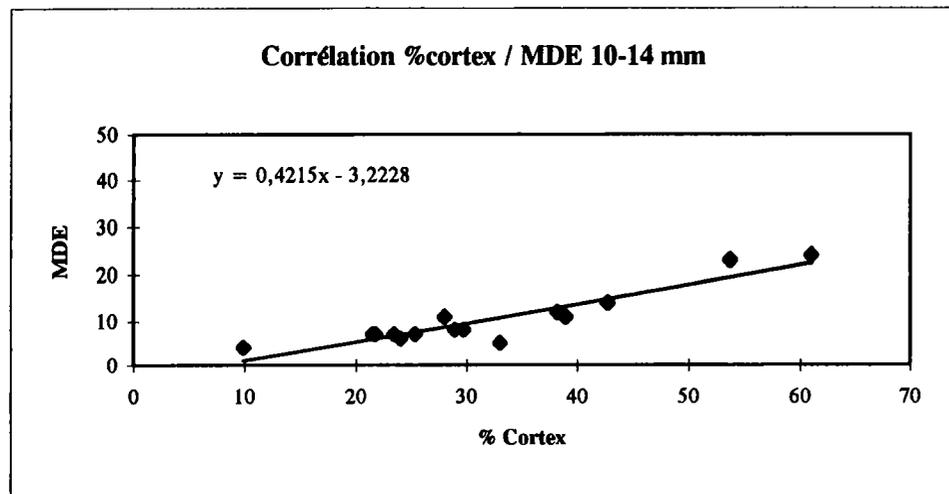


Figure 65 : Abaqués des résistances mécaniques des silex des RS.

En revanche, celui de l'échantillon de Challet est mauvais. Ces résultats sont une nouvelle fois liés à la présence en plus ou moins grande quantité d'éléments de cortex dans le sable.

### 1.2.5. Utilisation des silex des RS

#### 1.2.5.1. Utilisation dans les bétons hydrauliques pour le bâtiment et les ouvrages d'art

Les recommandations pour ce type d'utilisation sont données dans la norme NF P 18-541. Elles sont résumées dans le tableau 60.

Essais géotechniques	exigences générales	exigences particulières
		ouvrages d'art de résistance à la compression $\geq 36$ MPa bâtiments de résistance à la compression $> 60$ MPa
Los Angeles ou Fragmentation dynamique	$\leq 40$	$\leq 30$
Friabilité des sables	$\leq 60$	$\leq 40$
Coefficient d'aplatissement	$\leq 30$ %	$\leq 20$ %
Equivalent de sable	$\geq 60$ %	$\geq 75$ %
Coefficient d'absorption	$\leq 5$ %	$\leq 2,5$ %

Tableau 60 : Recommandations pour les granulats destinés aux bétons hydrauliques pour bâtiments et ouvrages d'art.

Avec des FD inférieures ou égales à 30 pour les classes granulométriques 10-14 mm et 4-6,3 mm (tabl. 56), **les graviers de silex peuvent être utilisés dans les bétons hydrauliques pour construction de bâtiment et d'ouvrages d'art**, quelles que soient les exigences au niveau de la résistance à la compression caractéristique du béton. Le coefficient d'aplatissement des graviers de silex ne devrait pas poser de problème. En effet, nous avons souligné précédemment qu'avec un matériel de concassage approprié, utilisé dans des conditions industrielles, le coefficient d'aplatissement ne devrait pas dépasser 20 %.

En ce qui concerne la **fraction sableuse** (fraction 0,2-4 mm), ces caractéristiques mécaniques (friabilité des sables, tabl. 56) répondent aux spécifications de la norme NF P 18-541. Par contre, avec des équivalents de sables (ES) compris entre 30 et 90 %, la totalité des échantillons de sables n'est pas utilisable dans les bétons. Pour les sables avec un ES inférieur à 60 %, il sera nécessaire de faire un **lavage pour éliminer les fines**, puis une **incorporation d'un sable correcteur**. De plus, le coefficient d'absorption de ces sables (voisin de 5%) indique qu'ils ne pourront pas être utilisés pour les bâtiments et ouvrages d'art aux exigences particulières.

#### 1.2.5.2. Utilisation en viabilité

L'association des caractéristiques mécaniques de résistance aux chocs et à l'usure permet de classer les gravillons en catégories selon la norme NF P 18-101 (tabl. 61).

Catégories	LA + MDE	LA	MDE
A	≤ 25	≤ 20	≤ 15
B	≤ 35	≤ 25	≤ 20
C	≤ 45	≤ 30	≤ 25
D	≤ 55	≤ 35	≤ 30
E	≤ 80	≤ 45	≤ 45
F	> 80	> 45	> 45

Tableau 61 : Classement des granulats en catégories en fonction de l'association des caractéristiques mécaniques de résistance aux chocs (LA : Los Angeles ou FD : Fragmentation Dynamique) et à l'usure (MDE : Micro-Deval).

En viabilité, on distingue plusieurs techniques d'utilisation des granulats :

- graves non traitées et graves recomposées humidifiées,
- graves traitées aux liants hydrauliques,
- graves traitées aux liants hydrocarbonés (graves bitumes et graves émulsion),
- bétons bitumineux,
- enduits superficiels,
- bétons bitumineux cloutés,
- bétons hydrauliques.

Pour chaque technique routière, un texte de normes publié par le Ministère des Transports en 1984 donne les catégories de granulats les mieux adaptées en fonction de 6 classes de trafic de poids lourds (Galtier, 1993) (tabl. 62).

Classes de trafic	< T3	T3	T2	T1	T0	> T0
Seuils de trafic (moyenne journalière pour l'année)	50	150	300	750	2000	

Tableau 62 : Classification du trafic de poids lourds.

L'association des caractéristiques mécaniques et le classement en catégorie des différents échantillons de graviers de silex étudiés sont reportés dans le tableau 63. Les graviers de la classe 10-14 mm se classent pratiquement tous dans les catégories B et C (à l'exception de Challet et La Vasserie p1b dans la classe D et Conteville 2 dans A). Les graviers 4-6,3 mm se situent plutôt dans les catégories C et D, plus quelques uns en E.

En fonction de ces résultats, on peut retenir les utilisations suivantes :

- en graves non traitées, la fraction 10-14 mm peut être utilisée pour les couches de base et de fondation pour un trafic moyen de type T2. La classe 4-6,3 mm sera employée de la même manière, mais pour un trafic faible ;
- graves traitées aux liants hydrauliques, en couches de base et de fondation à fort trafic ;
- graves bitumes, en couches de base et de fondation à fort trafic pour le 10-14 mm et à trafic moyen pour le 4-6,3 mm ;
- graves émulsion, en couches de base à faible trafic. Pour un trafic plus important, des études complémentaires devront être réalisées ;
- bétons hydrauliques, pour les chaussées à trafic moyen.

Les silex seront impropres en géotechnique routière pour les bétons bitumineux (couches de liaison et de roulement) et les enduits superficiels, essentiellement à cause de leur angularité.

échantillons	MDE 10-14 mm	FD 10-14 mm	MDE+FD 10-14 mm	catégories	MDE 4-6,3 mm	FD 4-6,3 mm	MDE+FD 4-6,3 mm	catégories
Lie	11	28	39	C	27	29	56	E
By	7	23	30	B	16	26	42	C
Cha	24	28	52	D	38	30	68	E
San 1	8	26	34	C	20	26	46	D
San 2	7	25	32	B	18	27	45	C
SJT	8	25	33	B	20	27	47	D
Ven	12	27	39	C	28	28	56	E
Vas p1b	23	29	52	D	43	30	73	E
Vas pla	7	24	31	B	19	27	46	D
A/C	11	26	37	C	24	28	52	D
A29	8	25	33	B	20	27	47	D
MtM p1	14	27	41	C	23	29	52	D
Con 1	5	25	30	B	16	26	42	C
Bou	6	27	33	C	17	26	43	C
Mol	7	21	28	B	18	22	40	C
Sau 1	7	25	32	B	18	26	44	C
VB 1	8	22	30	B	20	24	44	C
Vas 1	11	25	36	C	26	28	54	D
MtM 2	6	25	31	B	22	28	50	D
Con 2	4	18	22	A	14	26	40	C

Tableau 63 : Classement des échantillons de graviers de silex en catégories en fonction de leurs caractéristiques mécaniques selon la norme NF P 18-101.

MDE : Micro-Deval, FD : Fragmentation dynamique.

En ce qui concerne la **fraction sableuse**, on peut envisager les **mêmes utilisations**. Néanmoins, la propreté des sables (ES) peut être insuffisante, comme nous l'avons vu pour l'utilisation dans le domaine du bâtiment. On préconisera, là aussi, un **lavage** afin d'éliminer les fines et l'incorporation d'un **sable correcteur**.

Les silex après concassage sont donc susceptibles de rendre de nombreux services aussi bien dans le domaine du bâtiment que dans l'ensemble des techniques routières, mais ceci nécessite une gestion adaptée aux besoins.

### **1.3. Synthèse des données géologiques et géotechniques sur l'utilisation des RS comme granulats**

La synthèse des données géologiques et géotechniques concernant l'utilisation des RS comme granulats est représentée dans le tableau 64.

Le problème de l'exploitabilité des RS reste difficile. En effet, au sein de ces formations, il existe deux grandes sources possibles de matériaux, les biefs à silex et les argiles à silex de plateau, qui présentent chacun des points positifs et négatifs pour leur éventuelle exploitation.

Les **biefs à silex** sont des matériaux **riches en silex et pauvres en fines**, mais les **volumes des gisements sont faibles**. Seuls les sites à **l'extrémité des interfluves** peuvent avoir un intérêt pour des **besoins locaux**. Ces sites sont cependant **limités en nombre**.

Les **RS de plateau** présentent des gisements avec des **volumes et des tonnages en silex très importants dans le centre et le sud de l'Eure et le nord de l'Eure et Loir**. Malheureusement, les **teneurs en silex** de ces matériaux sont généralement **faibles à moyennes** et les **pourcentages de fines élevés**. Ceci implique un **traitement délicat** au niveau de la séparation des silex et de la matrice. Il est donc nécessaire d'étudier la capacité des techniques actuelles à traiter ces formations et le cas échéant de **trouver de nouvelles méthodes de traitement**.

Typologie des RS			Caractéristiques du matériau		Tonnage en silex des gisements en millions de tonnes	Recouvrement en mètres	Utilisation des silex	
			% silex (> 2mm)	minéralogie (< 2µm)				
<b>RS de plateau</b>	RS limoneux		pauvre		smectite dominante	très faible	/	/
	RS sableux		variable		kaolinite exclusive	très faible	/	
	Liseré argileux de base		pauvre		smectite exclusive	très faible	/	
	RS argileux à argilo-limoneux	- est du Pays de Caux, SW Picardie - est de l'Eure	45 à 50	smectite exclusive	faible	élevé 5 à 10	<b>Graviers</b>  - bétons pour bâtiments et ouvrages d'art - viabilité : toutes les techniques routières exception : bétons bitumineux et enduits superficiels	
			/	/				
		Pays de Caux (excepté l'est)		50 à 55	kaolinite dominante	assez élevé 1,15 à 2,3		élevé 5 à 10
		RS des vallées de la Seine et de l'Eure		/	/	faible		faible < 2
		- Lieuvin, Roumois - ouest Pays d'Ouche		45 à 60 55 à 60	kaolinite dominante	assez élevé 1 à 2 environ		élevé 5
		- Pays d'Auge -Perche		/	/	faible		élevé 5 faible < 2
		Centre et sud de l'Eure		0 à 10m : 55-60 10 à 15m : 60-70 plus de 15m : 70-80	kaolinite dominante	élevé 3,8 à 6		faible 2
nord Eure et Loir		0 à 10m : 45-60 10 à 15m : 60-70 plus de 15m : 70-80	kaolinite exclusive	élevé 5,5 à 8	faible < 2	<b>Sables</b> Utilisations identiques conditions : lavage et sables correcteurs		
<b>Biefs à silex</b>	Extrémités d'interfluve		85 à 95	kaolinite dominante	moyen 0,8 à 1		faible ≤ 2	
	Versants de vallées sèches et drainées	pente du versant ≥ 19°	80 à 90	kaolinite dominante	faible 0,15 à 0,4		faible ≤ 2	
		pente du versant ≤ 18°	60 à 80	kaolinite dominante	faible 0,2 à 0,55	faible ≤ 2		

Tableau 64 : Typologie des formations résiduelles à silex adaptée à leur utilisation comme granulats.

## 2. Données technico-économiques

Ces données porteront uniquement sur les techniques de traitement visant à séparer les silex et la matrice des RS et sur la valorisation de la matrice de ces formations.

### 2.1. Traitement des RS

#### 2.1.1. Traitement par voie humide

Les techniques traditionnelles de traitement des granulats sont toutes basées sur des séparations entre le granulat et sa matrice par voie humide.

Il existe actuellement une exploitation de biefs à silex qui utilise les procédés de traitement par voie humide avec de bons résultats. Cette exploitation se situe à Saulnières à l'extrémité d'un interfluve resserré (les caractéristiques granulométriques du bief à silex sont données dans le tableau 35 du III.1.2., échantillons Sau 1 et 2). Les opérations d'élaboration des matériaux sont les suivantes :

- trempage des matériaux pour décolmater l'argile,
- reprise et débouage dans un tube laveur,
- criblage primaire (sable naturel 0-5 mm, gravier naturel 5-20 mm et refus),
- concassage du refus,
- criblage secondaire (sable concassé 0-5 mm, gravier concassé 5-20 mm),
- décantation des boues.

Le débouage des matériaux est souvent très long. Ceux-ci sont trempés généralement plusieurs jours avant d'être introduits dans la chaîne de traitement. R. Pasquet (1987) souligne qu'en fin de chaîne la séparation des argiles et de l'eau est effectuée par un décanteur dont le débit semble insuffisant et la décantation des eaux polluées est difficile car la carrière ne dispose pas de grands bassins de décantation.

Une expérimentation à l'échelle industrielle sur les biefs à silex a été réalisée par le CETE de Rouen sous la direction de M. Normand et H. Evrard (1982). L'installation de traitement utilisée est celle de l'Entreprise Dubois et Cie implantée à Conteville, laquelle exploite des alluvions sablo-graveleux de terrasses anciennes de la Vallée de La Risle. Le traitement a porté sur 150 tonnes de biefs à silex de Conteville, situé à l'extrémité d'un interfluve (les caractéristiques granulométriques de l'échantillon soumis à l'essai sont données dans le tableau 35 du III.1.2., échantillon Con 2). Les étapes de traitement sont les suivantes :

- la première étape correspond au brassage du tout-venant primaire et de l'eau claire et à une réduction des gros éléments ;
- la deuxième étape se décompose en trois phases. La première phase consiste à séparer les éléments grenus (fraction supérieure à 4 mm) du reste du matériau, la deuxième à séparer les éléments fins entre eux (séparation sables et fines) et la troisième correspond à l'égouttage (réduction du volume d'eau dans les produits fins) ;
- la troisième étape consiste à clarifier les eaux de lavage par décantation naturelle et à recycler l'eau clarifiée.

Les conclusions de cette expérimentation sont les suivantes :

- le matériel actuellement proposé par les constructeurs est adapté au traitement des biefs à silex,

- le traitement de 125 tonnes par heure de tout venant nécessite 350 à 400 m<sup>3</sup> par heure d'eau clarifiée,
- la boue récupérée après lavage peut constituer un excellent matériau de réaménagement. Cette boue se compose essentiellement d'éléments inférieurs à 80 µm, auxquels il faut ajouter des sables (80 µm à 4 mm).

Des essais de traitement par voie humide ont également été accomplis à l'aide de l'appareil CLASSOL du CETE de Rouen sur le bief à silex, mais aussi sur l'argile à silex de plateau.

Le principe de l'appareil CLASSOL est le suivant : On introduit un échantillon de 10 kg de tout-venant (la dimension maximale des éléments est de 100 mm) dans un tambour de machine à laver de taille courante (volume de 50 litres). Ce tambour est soumis à une rotation dans une cuve remplie d'une certaine quantité d'eau. La vitesse de rotation est de 40 tours par minute. Les caractéristiques détaillées de l'appareillage et du mode opératoire sont décrits dans les rapports internes du CETE de M. Kergoet et J. Cahour (1980), de M. Kergoet (1985) et de J. Garnier et M. Normand (1985). Cet essai permet d'évaluer l'aptitude au délitage et au débouillage de matériaux pollués par des argiles et destinés à l'élaboration de granulats.

Les expériences ont montré que le traitement par eau d'un bief à silex d'interfluve (échantillon de Conteville : Con 2) était possible, tandis que celui de l'argile à silex de plateau (échantillon de La Vasserie : Vas p1) était très difficile, voir impossible avec des quantités d'eau raisonnables.

Une société privée productrice de granulats s'est également intéressé au problème de la séparation des silex et de la matrice des argiles à silex. Un échantillon de 150 tonnes de RS de plateau a été prélevé dans une fosse à 10 m de profondeur sur un site (A/C) localisé dans le nord de l'Eure et Loir (la granulométrie de l'échantillon est donnée dans le tableau 3 du II.1.3., A/C 3). Sur cet échantillon, deux essais ont été réalisés : un par voie humide, l'autre par voie sèche. Le premier essai a été effectué grâce à un débouilleur classique à eau. Celui-ci a conduit à un colmatage du débouilleur par l'argile. Cette technique est donc inadaptée pour les formations à silex de plateau. Pour être efficace, elle nécessiterait des volumes d'eau beaucoup trop importants.

Au travers de ces différentes expérimentations, on constate que les **traitements classiques de séparation par l'eau sont adaptés pour les biefs à silex d'interfluves**. Pour les autres types de biefs, aucune expérience n'a été effectuée, dans la mesure où seuls les gisements situés à l'extrémité des interfluves peuvent présenter un intérêt pour de petites exploitations. On peut néanmoins penser que ces techniques seraient **efficaces pour les biefs des versants à pente forte, riches en silex**. Pour les biefs des versants à pente faible, les teneurs en silex un peu moins élevées pourraient entraîner des **difficultés** dans la mise en oeuvre de ce type de traitement.

En ce qui concerne les **RS de plateau, la séparation des silex et de la matrice par l'eau ne peut être envisagée**, car elle mettrait en jeu des volumes d'eau trop importants. Pour ces formations de plateau, il est donc nécessaire de trouver de nouvelles méthodes de traitement.

### 2.1.2. Traitement par voie sèche

Un essai de traitement à sec a été réalisé sur l'échantillon prélevé dans le nord de l'Eure et Loir (A/C) par la société productrice de granulat. Celui-ci a été passé sur des cribles vibrants à grosses mailles (70 mm, puis 30 mm). Les résultats ont été jugés satisfaisants avec une teneur en argile associée aux silex ramenée à 10-15 %. Cependant, le tout-venant avait été stocké après son extraction et avait partiellement séché avant l'essai.

Le BRGM d'Orléans dans le cadre d'opérations financées par le Ministère de l'Industrie et le Ministère de l'Environnement, ont également tenté de définir un mode de traitement optimal à sec des argiles à silex (Spencer *et al.*, 1996).

Un échantillon de RS de plateau a été prélevé à Challet dans une fosse à une profondeur de 7 à 10 m (la granulométrie de l'échantillon est donné dans le tableau 3 du II.1.3., Cha). Pour le traitement, un appareil de type trommel débourbeur de conception BRGM a été utilisé (fig. 66). Celui-ci est alimenté par une bande transporteuse lisse. Des chaînes d'un mètre de longueur ont été fixées à l'intérieur du trommel afin de faciliter la désintégration des mottes argileuses, ainsi que le nettoyage des silex. La sortie du trommel est équipée d'une cage à écureuil percée de trous de diamètre 40 mm. Durant les essais, la vitesse de rotation du trommel était de 30 tours par minute et celui-ci était incliné selon une pente de 15 %.

Trois tests ont été effectués. Le bilan de ces tests de séparation est représenté dans le tableau 65.

test	masse de RS traitée (kg)	humidité (%)		%massique
test 1	460	16	refus >40 mm	41,22
			passant < 40 mm	58,78
test 2	1685	15,97	refus >40 mm	38,87
			passant < 40 mm	61,13
test 3	1185	18,71	refus >40 mm	38,81
			passant < 40 mm	61,18

Tableau 65 : Bilans des tests de séparation par voie sèche des silex et de la matrice du RS de Challet, d'après les travaux de C. Spencer *et al.* (1996).

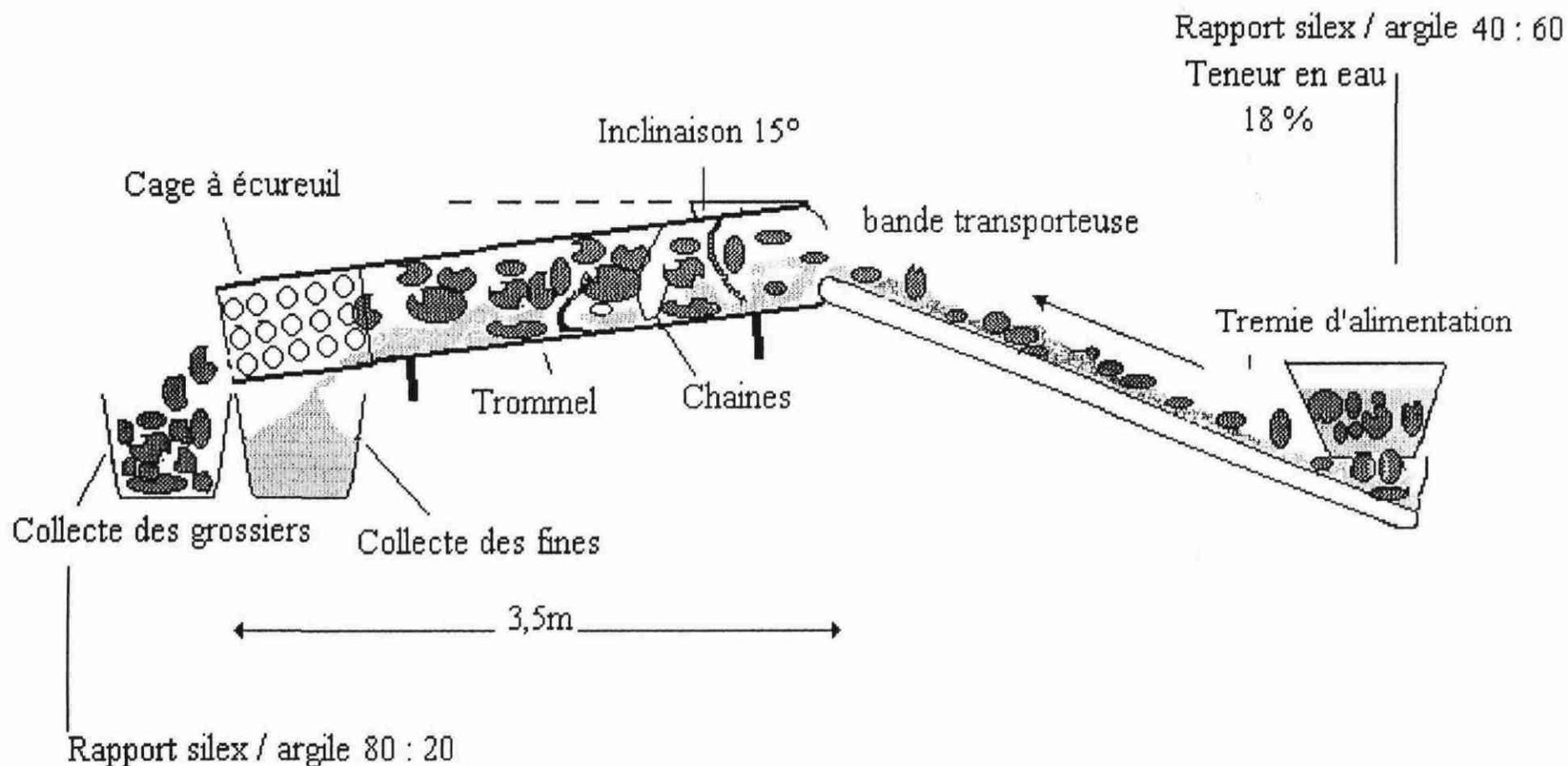
La fraction supérieure à 40 mm, enrichie en silex, est ensuite lavée avec un appareil à haute pression d'eau afin d'enlever les argiles résiduelles restées collées sur les silex après le traitement à sec. Les silex propres sont ensuite pesés (tabl. 66)

	Fraction > 40 mm		Silex propres	Teneur en silex
	masse humide (kg)	masse sèche (kg)	masse sèche (kg)	% masse humide
Fraction enrichie en silex (test 2)	136	126	106	77,94
Fraction enrichie en silex (test 3)	108	97	87	80,56
Moyenne				79,25

Tableau 66 : Evaluation de l'efficacité de la séparation des silex et de la matrice du RS de Challet par le trommel, d'après les travaux de C. Spencer *et al.* (1996).

L'efficacité des séparations obtenues avec le trommel est acceptable (tabl. 66). Le traitement à sec par trommel a permis d'obtenir deux fractions granulométriques :  
 - la fraction supérieure à 40 mm, enrichie en cailloux et blocs de silex. Elle représente environ 40 % du tout-venant ;

Figure 66 : Schéma du traitement minéralurgique des argiles à silex de plateau, d'après Spencer *et al.*, 1996.



- la fraction inférieure à 40 mm, appauvrie en silex, qui représente environ 60 % du tout-venant.

Dans la fraction supérieure à 40 mm, la teneur en argile résiduelle restée collée sur les cailloux et blocs de silex est en moyenne de 20,75 % par rapport à la masse brute de l'échantillon. La fraction inférieure à 40 mm contient 17,2 % de petits silex compris entre 5 et 40 mm. Ces silex ne pourront pas être récupérés dans des conditions économiques acceptables. Il faudrait mettre l'argile en suspension dans l'eau et cribler ensuite.

Toutefois, il faut souligner que ces tests n'ont pas été réalisés aussitôt après le prélèvement de l'échantillon de Challet. Le matériau a été stocké pendant deux mois dans des conteneurs fermés (big-bags). Ceci a entraîné une diminution de 12 % de l'humidité du matériau et a par conséquent favorisé la séparation silex-matrice.

Enfin, le rendement en silex du RS de Challet à l'issue des essais de séparation est de 32 % de la matière brute. Ce rendement est trop faible pour espérer mettre en place une exploitation. Ceci est lié à la faible teneur en silex du tout-venant de Challet (cailloux de silex : 39 %). Avec une formation à silex plus riche en silex, le rendement pourrait devenir intéressant.

Les deux expérimentations de traitement à sec des RS de plateau menées par le BRGM et la société privée productrice de granulat se sont montrées efficaces, avec une bonne séparation silex-matrice. Cependant, ces deux essais ont été réalisés après un stockage du tout-venant. Ceci a permis un séchage de ce dernier et a donc favorisé le traitement. Il aurait été intéressant d'effectuer un essai de séparation silex-matrice à la teneur en eau naturelle, directement en sortie de carrière.

C'est pourquoi, un nouvel essai (à caractère confidentiel) a été accompli par le BRGM et la société privée, selon la méthode mise au point par le BRGM (traitement à sec par trommel). Ce test a porté sur un échantillon de RS de plateau prélevé dans le nord de l'Eure et Loir (A/C) dans une fosse à une profondeur de 12 à 13 m. Le tout-venant a été traité après seulement quatre jours de stockage, permettant ainsi de simuler une séparation en sortie de carrière. Dans les expérimentations antérieures (BRGM et société privée), les échantillons d'argile à silex de Challet et d'A/C avaient respectivement une teneur en silex (fraction supérieure à 20 mm) de 39 et 51 %. Dans cet échantillon, le pourcentage de silex est de 70 %. Le résultat de ce nouvel essai s'est avéré très positif : le traitement à sec par trommel a permis une bonne séparation silex-matrice. Compte tenu du caractère confidentiel de cette étude, nous n'avons pu obtenir davantage d'informations.

En conclusion, pour les **RS de plateau, la seule méthode de traitement actuellement envisageable est celle par voie sèche**. Au niveau des gisements, il faut distinguer les 10 premiers mètres du RS moins riches en silex que le reste de la formation (40 à 60 % contre 60 à 80 %). Au delà des 10 premiers mètres, le tout venant peut être traité directement en sortie de carrière ou après une courte durée de stockage (quelques jours). Pour les 10 premiers mètres, on doit envisager une durée de stockage plus longue. Si on prend l'exemple de Challet, avec une humidité de 29 % dans un échantillon prélevé dans des conditions climatiques favorables (début octobre 1995), on peut difficilement envisager un traitement à sec directement en sortie de carrière quelle que soit la période de l'année considérée. L'expérience de Challet a montré qu'après un stockage de deux mois dans de mauvaises conditions (big-bags fermés), l'humidité a diminué de 12 %. On peut donc penser que, dans des conditions idéales de stockage, la durée de ce dernier sera inférieur à 2 mois.

Il est donc nécessaire de poursuivre ces travaux et de définir :

- le degré d'humidité du matériau à partir duquel le traitement à sec sera possible ;

- la durée de stockage du tout-venant en fonction de son humidité en sortie de carrière et du point précédent.

## **2.2. Valorisation des matrices des RS**

La valorisation des matrices pourrait contribuer à la rentabilité financière d'une exploitation d'argile à silex de plateau.

Les argiles riches en kaolinite trouvent des débouchés dans différents domaines comme:

- les argiles réfractaires,
- les argiles cuisant clair pour céramique,
- les argiles cuisant rose ou rouge pour terre cuite (tuiles, briques, carreaux).

Compte tenu de la minéralogie des argiles des RS de plateau (tabl. 4 du II.1.4.1.), seules les formations à silex du nord de l'Eure et Loir avec des argiles presque exclusivement composées de kaolinite, peuvent présenter un intérêt industriel. C'est pourquoi C. Spencer *et al.* (1996) ont étudié la valorisation de la matrice du RS de Challet.

La fraction inférieure à 40 µm du RS de Challet contient de la kaolinite en forte proportion, mais également du quartz et de la silice amorphe. Sa teneur en alumine, de l'ordre de 20 %, est trop faible pour envisager des applications en réfractaire. D'autre part, sa teneur en fer de 3,75 % est beaucoup trop élevée pour espérer obtenir des produits cuisant clair.

Pour évaluer l'aptitude de ces matériaux à des applications en terre cuite, le BRGM (Spencer *et al.*, 1996) a réalisé des essais de cuisson à 950° C, 1050° C et 1150° C sur la fraction inférieure à 40 µm. La couleur des produits cuits est très classique, variant du rose au roux, au brun assez pâle. Les pastilles ne montrent aucune fissuration, mais elles conservent toutes une forte capacité d'absorption d'eau. Ceci indique que même à 1150°, la température de grésage n'est pas atteinte. Ces tests préliminaires indiquent que ce matériau pourrait, sous réserve de tests complémentaires, convenir pour la fabrication de carreaux de faïence à pâte colorée, de tuiles et de briques. Mais pour cela, il faudrait envisager un traitement permettant :

- de produire un matériau "argileux" de dimension inférieure à 5 mm à partir de la fraction inférieure à 40 mm récupérée après la séparation silex-matrice. Ceci pourrait être obtenu grâce à un malaxeur-filtre ;
- de concentrer la pulpe à l'issue du lavage des silex, à l'aide d'un filtre presse.

Un tel traitement pour recueillir de l'argile pour terre cuite semble difficile à envisager à court terme. La demande pour ce type de matière première est entièrement satisfaite par des niveaux d'argile ne nécessitant pas de traitement d'épuration préalable, avec des réserves bien situées géographiquement.

Compte tenu de ces résultats assez décevants, C. Spencer *et al.* (1996) se sont intéressés à l'utilisation des fractions fines (inférieures à 40 µm), issue du traitement des RS, dans le domaine du stockage des déchets. Deux tests ont été effectués :

- un essai Proctor qui détermine la compacité maximale et la teneur en eau optimale correspondante ;
- une évaluation de la perméabilité des argiles.

La perméabilité du matériau compacté à l'optimum Proctor obtenue est de  $3.10^{-9}$  m/s. Cette valeur est cohérente avec la composition minéralogique de l'échantillon. Elle est très

proche du seuil de  $1.10^{-9}$  m/s imposé par la législation pour les matériaux utilisés pour le confinement des déchets.

Enfin des essais de décantation portant sur les fractions granulométriques 0-250  $\mu\text{m}$  et 0-40  $\mu\text{m}$  ont été effectués par le BRGM (Spencer *et al.*, 1996). L'objectif est de fournir des données quantitatives sur le comportement des pulpes sans ajout de défloculants, ni de dispersants.

La valeur de concentration solide et les surfaces de décantation correspondantes sont cohérentes avec les caractéristiques d'un matériau argileux de cette nature (tabl. 67).

Echantillons	Concentration initiale de la suspension (g/l)	Concentration de la pulpe décantée (g/l)	Surface spécifique de décantation nécessaire ( $\text{m}^2/\text{t/h}$ )
0 - 250 $\mu\text{m}$	48,5	249	266
	48,5	200	235
	48,5	162	199
	48,5	147	180
0 - 40 $\mu\text{m}$	49,2	197	294
	49,2	164	259
	49,2	126	196

Tableau 67 : Résultats des essais de décantation sur les fractions 0-250  $\mu\text{m}$  et 0-40  $\mu\text{m}$  d'après les travaux de Spencer *et al.* (1996).

Compte tenu des résultats, il faudrait prévoir, en cas d'exploitation, des bassins de décantation de très grande surface ou améliorer la séparation solide-liquide à l'aide d'appareils du type filtre-presse.

### 3. Données environnementales

Nous avons vu que les biefs à silex sont localisés sur les versants des vallées et à l'extrémité des interfluves. Il s'agit de zones sensibles, généralement boisées et classées en ZNIEF (Zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique) sur les cartes départementales du patrimoine de la Direction Régionale de l'Environnement. De plus, dans les vallées on trouve fréquemment des zones urbanisées.

D'autre part, nous avons montré que la production de granulats d'un gisement de bief à silex exploité sur 500 m en longueur sur le versant serait très faible. La création de grosses exploitations impliquerait de s'étendre sur de longues distances sur le versant et conduirait à l'établissement de carrières filiformes. Ce type de carrière est peu réaliste, dans la mesure où les impacts sur le paysage et sur l'environnement de manière générale seraient considérables.

Des exploitations modestes pour des besoins locaux situées à l'extrémité des interfluves pourraient être implantées avec des impacts moins importants sur le paysage que pour les biefs à silex des versants de vallées sèches et drainées. Compte tenu de leurs volumes de matériau un peu plus élevés que les biefs de versant de vallées sèches et drainées, il serait possible de laisser les versants boisés et d'exploiter uniquement le centre de l'interfluve sans créer d'impact sur le paysage visible depuis la vallée. Les figures 67 et 68 montrent l'exemple d'une zone déboisée au centre d'un interfluve, invisible dans le paysage depuis la vallée, grâce aux versants restés boisés.

En ce qui concerne les RS de plateau, les contraintes environnementales seraient beaucoup moins fortes que celles pour les versants. En effet, les gisements très importants tels que ceux du nord de l'Eure et Loir se situent le plus souvent dans des zones vouées aux grandes cultures. Sur le plan faunistique et floristique, ces zones sont relativement pauvres avec très peu de bio-diversité par rapport aux versants. L'impact environnemental de très grandes carrières de RS de plateau serait donc modeste et un réaménagement en terres cultivables pourrait être envisagé à l'issue de l'exploitation.

**Du point de vue environnement, il est donc préférable d'exploiter les RS de plateau plutôt que celles de versant.**



Figure 67 : Zone déboisée dans la partie centrale de l'extrémité d'un interfluve.  
Le déboisement a été effectué en laissant les versants boisés.

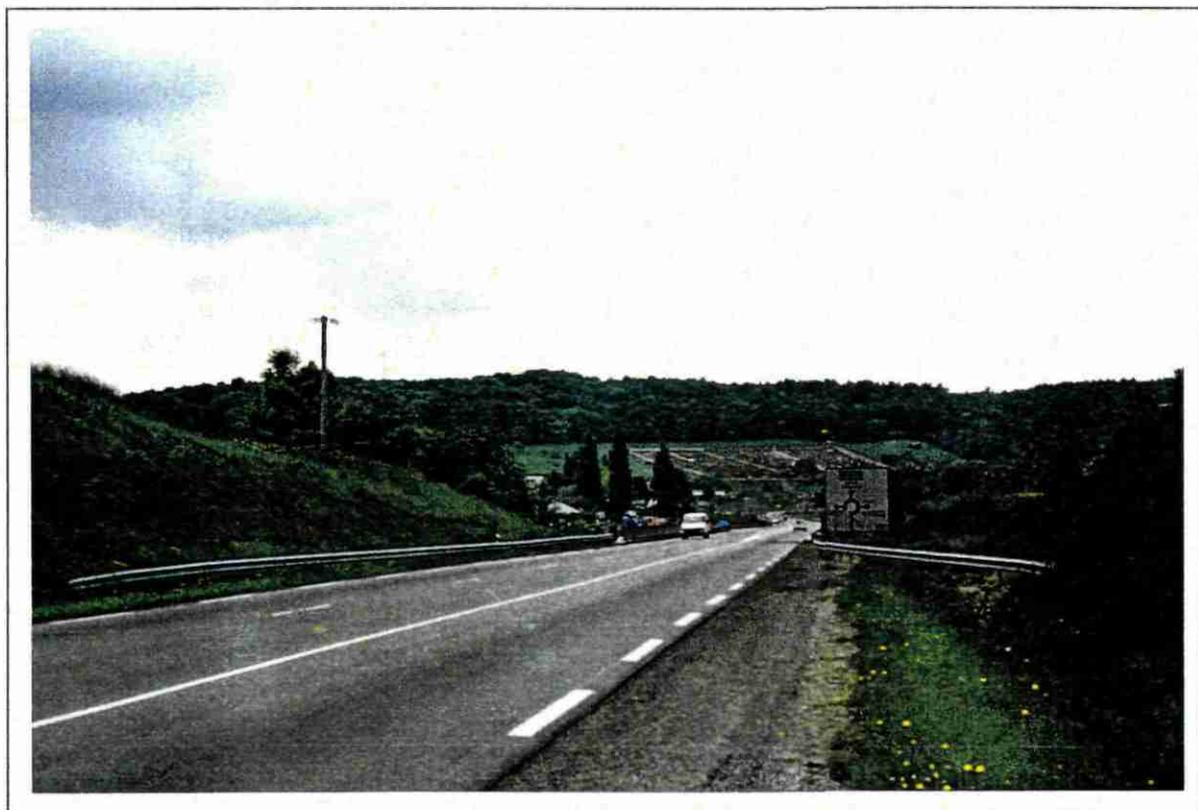


Figure 68 : Photo illustrant l'absence, dans le paysage, de marques liées à la zone déboisée de la photo précédente.

#### 4. Conclusion sur l'utilisation des formations résiduelles à silex comme granulats

Au sein des RS, on distingue deux grandes sources possibles de matériaux aux potentialités d'exploitation différentes : les RS ou argiles à silex de plateau et les RS de versant ou biefs à silex.

##### - Biefs à silex

L'intérêt des biefs à silex pour l'exploitation est leur **richesse en silex** et leur **pauvreté en fines**. En revanche, les **volumes des gisements sont trop faibles** pour espérer mettre en place de grosses exploitations. Seuls les **biefs à silex à l'extrémité des interfluves** ont des réserves qui pourraient permettre l'installation d'**exploitations modestes** pouvant servir pour des **besoins locaux**. Cependant, ces sites, du fait de leur contexte géomorphologique particulier, sont **limités en nombre**. Du point de vue du traitement, une **installation classique avec séparation à l'eau des silex et de la matrice est satisfaisante**. Les silex, une fois récupérés, sont utilisables aussi bien en techniques routières que dans le bâtiment. Enfin, les biefs à silex sont situés dans des zones généralement boisées et le plus souvent classées en ZNIEF. Leur exploitation devrait donc être **confrontée à de fortes contraintes environnementales**.

##### - RS de plateau

Les RS de plateau sont intéressantes pour l'exploitation, dans la mesure où les **réserves en matériaux** peuvent être **considérables comme dans le centre et le sud de l'Eure et le nord de l'Eure et Loir**. De plus, ces zones ne sont **pas astreintes à de fortes contraintes environnementales** et la qualité des silex permet d'envisager de multiples utilisations en viabilité et dans le domaine du bâtiment. Par contre, les **teneurs en silex** des RS de plateau sont généralement **modestes** et les **quantités de fines** relativement **élevées**. Ceci implique la mise au point de **nouvelles méthodes de séparation silex-matrice**, autres que les traitements traditionnels par voie humide. Les premiers essais de **traitement à sec**, à l'aide de cribles vibrants ou d'un trommel, ont donné de **bons résultats**. Par ailleurs, nous avons constaté que les RS du nord de l'Eure et Loir et probablement du centre et du sud de l'Eure montrent une augmentation de la teneur en silex avec la profondeur, si bien qu'il est possible d'envisager un traitement à sec, sans ou après une courte durée de stockage du matériau exploité au delà de 10 m de profondeur. Pour les 10 premiers mètres, il apparaît nécessaire d'effectuer un stockage pour permettre un séchage du tout-venant. La durée du stockage reste cependant à définir.

Dans ce cas de figure, un scénario d'exploitation a été proposé par le BRGM (Spencer *et al.*, 1996) (fig. 69).

**L'exploitabilité des RS de plateau passe incontestablement par la mise au point de méthodes de traitement adaptées à ce type de matériaux et ceci pour un coût compétitif par rapport aux autres matériaux de substitution**. Il est donc nécessaire de poursuivre les recherches afin :

- d'affiner la méthode de traitement de ces formations ;
- de déterminer les coûts de production de granulats concassés à partir de ces formations à silex.

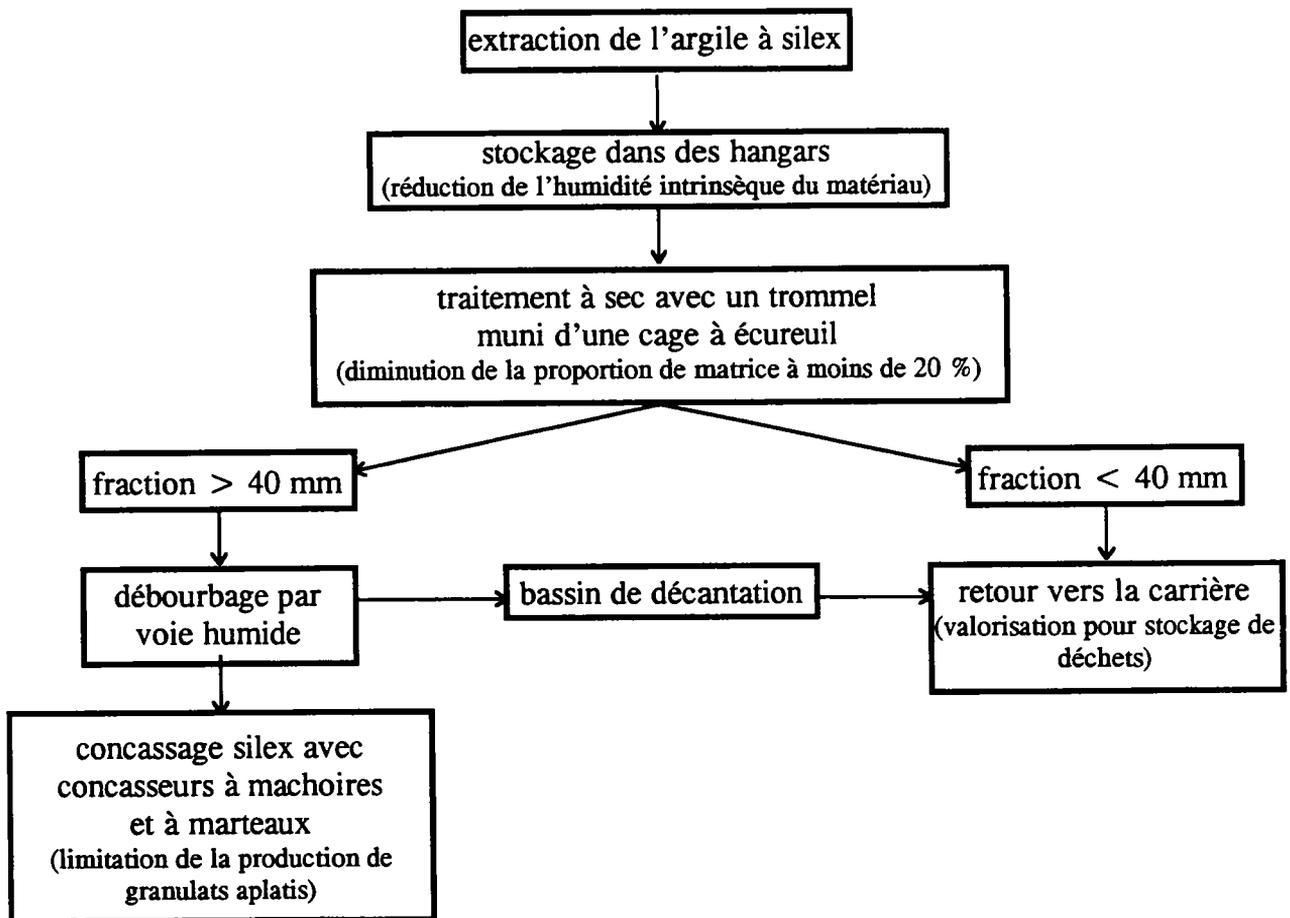


Figure 69 : Scénario d'exploitation des argiles à silex de plateau envisagé par le BRGM (d'après Spencer *et al.*, 1996).

## **CONCLUSION**

Les formations résiduelles à silex ou argiles à silex de l'ouest du Bassin de Paris se subdivisent en **deux grands ensembles** aux caractéristiques lithologiques bien distinctes : les **RS de plateau** et les **RS de versant**, également appelés biefs à silex.

Au sein des **RS de plateau**, on différencie **plusieurs faciès** :

- les **RS limoneux à limono-argileux** du sommet des coupes (un à deux premiers mètres) ;
- les **RS argileux à argilo-limoneux, faciès dominants** qui représentent l'essentiel de la formation depuis le RS limoneux du sommet jusqu'au liseré argileux brun foncé de la base des profils. Leur épaisseur varie régionalement. Ils se caractérisent par une teneur en silex comprise entre 40 et 60 % pour les dix premiers mètres de la formation. Au delà de 10 mètres, la teneur en silex augmente avec la profondeur pour atteindre 80 à 90 % vers 20 mètres. Les RS argileux à argilo-limoneux **s'organisent en 6 familles géographiques** dont les différences se marquent essentiellement au niveau de la lithologie des matrices (teinte, composition minéralogique de la fraction argileuse et composition chimique) :
  - \* RS sous les alluvions des hautes terrasses de la Seine et de l'Eure,
  - \* RS de l'est de la zone étudiée (sud-ouest du Plateau Picard (ou Talou), est du Pays de Caux et nord-est du Vexin Normand),
  - \* RS du Pays de Caux (excepté l'est), du Roumois, de la région d'Evreux et de la bordure sud-ouest du Vexin Normand,
  - \* RS du Drouais,
  - \* RS de l'Eure (excepté l'est et le Roumois) et de la bordure est du Calvados,
  - \* RS du Perche et de l'Eure et Loir ;
- les **liserés argileux brun foncé** situés à la base des profils, au contact des craies à silex ;
- les **RS sableux** localisés à proximité des poches de sables cénozoïques (sables thanétiens, yprésiens, du Thimerais, de Fontainebleau, de Lozère et de St Eustache).

Les biefs à silex se distinguent des RS de plateau par des teneurs élevées en silex, une fragmentation poussée des silex et des matrices hétérogènes d'un site à un autre, mais également au sein d'un même site. Malgré cette hétérogénéité apparente, il est possible de réaliser une **typologie des biefs à silex** fondée sur la teneur et la fragmentation des silex. Celle-ci s'organise en fonction de la nature et de la pente du versant. On distingue alors :

- les biefs à silex situés à **l'extrémité des interfluves** ;
- les biefs à silex localisés **sur les versants des vallées sèches et drainées dont la pente est supérieure ou égale à 19°**. Ces versants présentent **deux biefs** sous la forme géométrique de deux biseaux. Le bief 1 est situé en retrait par rapport au versant et sa pente est comprise entre 3 et 8°. Le bief 2 est localisé sur le versant et sa pente varie entre 16 et 21° ;
- les biefs à silex localisés **sur les versants des vallées sèches et drainées dont la pente est inférieure ou égale à 18°**. Ces versants ne présentent qu'**un seul bief**, le bief 1.

L'hétérogénéité des biefs à silex par rapport aux familles géographiques de RS de plateau implique une histoire géologique complexe de ceux-ci. Cette histoire commence avec la formation des RS de plateau par altération météorique des craies à silex, dès l'émergence finie-crétacée.

L'étude des relations entre les craies à silex et les **RS de plateau** montre que ces derniers **ne sont pas uniquement un résidu d'altération des craies**. Seuls les silex

proviennent en totalité des craies et leur altération au cours de la formation des RS est faible. Avec des rapports fraction silicatée fine/silex de 1/4 à 1/9 dans les craies contre 1/1 à 1/1,5 dans les 10 mètres supérieurs des RS, il est clair que les **matrices** de ces derniers sont **en grande partie allochtones**. **L'allochtonie diminue avec la profondeur**, pour devenir nulle vers 20 m de profondeur, là où les RS sont composés de 80 à 90 % de silex. **Les limons quaternaires, les sables cénozoïques, les argiles paléogènes** sont des **sources possibles d'apports extérieurs**, mais il est actuellement impossible de déterminer les parts respectives de ces sources. **La distribution géographique des faciès types de RS est liée en grande partie à l'origine des apports allochtones en matrice, qui varie d'un secteur à un autre, mais également à l'évolution plus ou moins poussée des profils d'altérites à silex suivant leur âge** (point développé dans la thèse de F Quesnel).

Au Quaternaire, la dynamique périglaciaire et le creusement des vallées conduisent à des remaniements de type solifluxion des RS de plateau (situés en bordure des vallées en cours d'élaboration). Ces remaniements aboutissent à la formation des biefs à silex. **Les biefs à silex** apparaissent donc comme les **marqueurs de la dynamique périglaciaire pour l'ouest du Bassin de Paris**, au même titre que les heads pour le Cotentin, la Bretagne, les îles anglo-normandes et le sud de l'Angleterre et que les grèzes massives pour le nord de l'Aquitaine. **Les deux biefs** reconnus sur le terrain impliquent **deux phases de mise en place situées dans un intervalle de temps compris entre -800 000 et -20 000 ans**. La similitude avec les heads (au niveau de la dynamique de mise en place) et la relation entre le creusement de la basse vallée de la Seine et la mise en place des biefs permet de proposer à titre d'**hypothèse** une mise en place ancienne, **vers -800000 ans** (lors du premier grand mouvement glacio-eustatique) **pour le bief 1** et une mise en place récente, **au Weichsélien, pour le bief 2**. Entre ces deux phases, il aurait pu y avoir deux remaniements successifs dont il ne reste plus de témoins.

Enfin, la caractérisation lithologique et la compréhension de la genèse des RS a permis d'établir une typologie de ces matériaux adaptée à leur utilisation potentielle comme granulats.

**Les biefs à silex** avec leurs teneurs élevées en silex apparaissent d'un point de vue lithologique comme les matériaux les plus intéressants pour l'exploitation. Malheureusement, **les volumes des gisements sont trop faibles** pour espérer la mise en place de grosses exploitations (200 000 tonnes par an). **Seuls les biefs à silex situés à l'extrémité des interfluves** pourraient permettre l'installation d'exploitations de taille modeste **pour des besoins locaux** ( $\leq 100\ 000$  tonnes par an). De plus, l'exploitation des versants implique de fortes contraintes environnementales (zones généralement boisées, le plus souvent classées en ZNIEF).

**Les RS de plateau** sont intéressants pour l'exploitation dans la mesure où **dans le centre et le sud de l'Eure et le nord de l'Eure et Loir les gisements sont considérables**. De plus, ils ne sont pas astreints à de fortes contraintes environnementales. En revanche, **les teneurs en silex de ces matériaux sont généralement modestes** et leurs quantités de fines élevées, notamment pour les 10 à 15 premiers mètres de ces formations, **si bien que les méthodes traditionnelles de séparation par voie humide des silex et de la matrice sont inadaptées**. **Les premiers essais de traitement à sec** de ces matériaux ont, par contre, donné des **résultats encourageants** et ont ainsi souligné la nécessité de poursuivre ce type de recherches afin d'affiner la méthode de traitement et de définir les coûts de production de granulats concassés à partir des silex des RS.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

**ALBERS H. J. et FELDER W. M. (1981a) :** Feuersteine als Indikatoren der Quantifizierung und Datierung der Karbonatlösung am Nordwest-Rand des Rheinischen Schildes. International Feuersteinsymposium, 1979, Maastricht, Staringia, 6, pp 18-22.

**ALBERS H. J. et FELDER W. M. (1981b) :** Feuersteingerölle im Oligomiozän der Niederrheinischen Bucht als Ergebnis mariner Abrasion und Karbonatlösungsphasen auf der Kreide-Tafel von Aachen-SüdLimburg. Fortschr. Geol. Rheinld. und Westf., 29, pp 469-482.

**AVERY B.W. (1964) :** The soils and land use of the district around Aylesbury and Hemel Hempstead. Mem. of the Soil Survey of Great Britain, 216 p.

**BAUER J. (1964) :** Etude sédimentologique comparée de quelques échantillons de craie et d'argile à silex à l'Ouest de Paris. Soc. Géol. Fr., pp 75-79.

**BERTRAN P., COUTARD J. P., OZOUF J. C. et TEXIER J. P. (1995) :** Dépôts de pente calcaires du nord de l'Aquitaine. Répartition stratigraphique et géographique des faciès. Z. Geomorph. N. F., 39, 1, Stuttgart, pp 29-54.

**BLANC-VALLERON M. M. et THIRY M. (1993) :** Minéraux argileux, paléoaération, paléopaysages et séquence climatique : exemple du Paléogène continental en France. In H. PAQUET et N. CLAUER, Sédimentologie et Géochimie de la Surface, Coll. à la Mémoire de G. Millot, Coll. Acad. Sci., Paris, pp 199-216.

**BONTE A. (1955) :** Les formations superficielles à silex du Nord de la France. C. R. Acad. Sc., Paris, 241, pp 1211-1213.

**BOURDILLON C. (1996) :** Nouvelle biozotation des foraminifères dans la craie du Bassin Parisien, In Colloque La craie, objet géologique, réservoir, matériau et paysage, Réunion SGF-SGN-GFC, Arras, p 21.

**BRAJNIKOV B. et FURON R. (1934) :** Sur l'argile à silex. C. R. somm. Soc. Géol. Fr., 14, p 203.

**BRAJNIKOV B. et URBAIN P. (1934) :** Sur le spectre de rayons X de la phyllite de l'argile à silex de Vernon (Eure). C. R. somm. Soc. Géol. Fr., 14, p 203.

**BRAJNIKOV B. et URBAIN P. (1936) :** Le constituant essentiel des argiles à silex de Normandie. C. R. Acad. Sc., Paris, 202, p 1595.

**BRAJNIKOV B. (1938) :** Recherches sur les formations dites "argiles à silex" dans le Bassin Parisien. Rev. Geogr. Phys. et Géol. Dyn., Paris, x, 129 p.

**B.R.G.M. (1975) :** Notes d'orientation pour l'établissement de la carte géologique à 1/50000. Service Géologique National, B.R.G.M. Edit., Orléans, 2ème édit., 240 p.

- BROWN G. (1961)** : Identification and crystal structures of clay minerals. Mineralogical society, London, 575 p.
- CAILLERE S. et HENIN S. (1963)** : Minéralogie des argiles. Edit. Masson & Cie, Paris, 355p.
- CALEMBERT L. et MONJOIE A. (1979)** : Observations sur les phénomènes karstiques en Belgique et bilan des recherches. Ann. Soc. géol. Belgique, 102, pp 125-135.
- CALLOT G. et PEDRO G. (1977a)** : Relations entre la présence de couvertures d'argile à silex et la nature du substratum carbonaté. Rôle et origine des silex. C. R. Acad. Sc., Paris, 285, pp 1295-1297.
- CALLOT G. et PEDRO G. (1977b)** : Théorie sur la formation des argiles à silex. C. R. Acad. Sc., Paris, 285, pp 1415-1418.
- CATT J.A. (1986)** : The nature, origin and geomorphological significance of clay with flints. Cambridge University, pp 151-159.
- CAVELIER C. et KUNTZ G. (1974)** : Découverte du Pliocène marin (Redonien) à Valmont (Seine-Maritime) dans le Pays de Caux. Conséquences sur l'âge post-redonien des Argiles à silex de Haute-Normandie. C. R. somm. Soc. Géol. Fr., 7, 16, pp 160-162.
- CAYEUX L. (1929)** : Les roches sédimentaires de France. Roches siliceuses. Mém. Carte Géol. France, 774 p.
- CHENAUX G., DUNOYER de SEGONZAC G. (1970)** : Genèse de la pyrophyllite dans le Paléozoïque du Sahara occidental. C. R. Acad. Sc., Paris, 270, pp 2405-2408.
- COOPE G. R., JONES R. L. et KEEN D. M. (1980)** : The palaeoecology and age of peat at Fliquet Bay, Jersey, Channel Islands. J. Biogeogr., 7, pp 187-195.
- COUTARD J. P. et LAUTRIDOU J. P. (1977)** : Effets du gel sur diverses roches de Normandie (grès, granites, silex). Bull. Soc. Linn. Normandie, 105, pp 79-82.
- DEWOLF Y. (1976)** : A propos des argiles à silex : Essai de typologie. Rev. Géomorpho. Dyn., Paris, 25, 4, pp 113-138.
- DEWOLF Y. (1977)** : Désilicification et silicifications secondaires de certaines argiles à silex des marges occidentales du Bassin de Paris. C. R. Acad. Sc., Paris, 284, pp 725-728.
- DEWOLF Y. (1982)** : Le contact Ile de France - Basse Normandie. Etude géodynamique. Mém. et Doc. Géogr., CNRS Edit., Paris, 253 p.
- DOLLFUS G. F. (1891)** : Relations stratigraphiques de l'argile à silex. Bull. Soc. Géol. Fr., 19, p 883.
- DOUILLET P., NICOLAS J. et POMEROL C. (1967)** : Etude minéralogique d'argiles d'altération du bassin de Paris. Problèmes de détermination. Mém. h. sér. Soc. Géol. Fr., 4, pp 15-19.

- DUNOYER de SEGONZAC G. et CHAMLEY H. (1968)** : Sédimentologie : Sur le rôle joué par la pyrophyllite comme marqueur dans les cycles sédimentaires. C. R. Acad. Sc., Paris, 267, pp 274-277.
- EHRMANN W. U. (1987)** : Upper cretaceous flints in central NW Europe, paleoproductivity and Milankovitch cycles. In Coll. Int. sur le silex, Edit. CNRS, Bordeaux, V, pp 77-83.
- ELHAI H. (1967)** : Les formations superficielles et le relief de la Haute-Normandie. Mém. h. sér. Soc. Géol. Fr., 4, pp 20-29.
- EVARD H. et VIGIER J. (1982)** : Etude bibliographique des argiles à silex. Rap CETE, Rouen, 41 p.
- GALTIER L. (1993)** : Mémento roches et minéraux industriels. Granulats. Edit. BRGM, Orléans, 126 p.
- GARNIER J. et NORMAN M. (1985)** : Etude des problèmes d'élaboration des granulats. Etude de la dispersivité des argiles, aptitude au délitage et au débouage des tout-venants. Rap. CETE, Rouen, 42 p.
- GOSSELET J. (1890)** : Considérations sur le bief à silex de l'Artois. Ann. Soc. Géol. Nord, 17, p 165.
- GOSSELET J. (1891)** : Observation au sujet du mode de formation du conglomérat à silex. Ann. Soc. Géol. Nord, 19, pp 319-323.
- GROSSOUVRE A. de (1901)** : Nouvelles observations sur le terrain à silex du Sud-Ouest du Bassin de Paris. Bull. Soc. Géol. Fr., 1, pp 431-432.
- GULLIEN Y. (1962)** : Grave, Grèze, Gress. Bull. Ass. Géog. Fr., 303-304, pp 79-81.
- GULLIEN Y. (1964)** : Grèzes litées et bancs de neige. Géol en Minjouw, 43, pp 103-112.
- HALLEGOUET B. (1971)** : Le Bas-Léon (Finistère, France). Etude géomorphologique. Thèse 3e cycle, Brest, 260 p.
- HARRIS C. (1987)** : Mechanisms of mass-movement in periglacial environments. Slope Stability, John Wiley and Sons, London, pp 531-559.
- HODGSON J. M., CATT J. A. et WEIR A. H. (1967)** : The origin and development of Clay-with-flints and associated soil horizons on the South Downs. J. Soil Sci., 18, 1, pp 85-102.
- HOLTZAPFFEL T. (1985)** : Les minéraux argileux. Préparation. Analyse diffractométrique et détermination. Soc. Géol. Nord, Villeneuve d'Ascq, 12, 136 p.

**IMBRIE J., HAYS J. D., MARTINSON D. G., Mc INTYRE A., MIX A. C., MORLEY J. J., PISIAS N. G., PRELL W. L. et SHACKLETON N. J. (1984)** : The orbital theory of pleistocene climate : support from a revised chronology of the  $\delta^{18}\text{O}$  record. In Berger A., Imbrie J., Hays J., Kukla G. et Saltzman B., Edit. Milankovitch and Climate 1, Reidel, Dordrecht, pp 269-305.

**JAMES H. C. L. (1976)** : Problems of dating raised beaches in South Cornwall. Trans. Roy. Geol. Cornwall, Penzance, 20, 4, pp 260-274.

**JOHN D.T. (1980)** : The soils and superficial deposits on the North Downs of Surrey. In. The shapping of Southern England, Edit. by D.K.C. JONES, Institute of British Geographers Special Publication, 11, 274 p, pp 101-130.

**JUIGNET P. (1974)** : La transgression créacée sur la bordure orientale du Massif armoricain. Thèse d'état, Géologie, Caen, 2 vol., 786 p.

**JUIGNET P. et BRETON G. (1994)** : Stratigraphie, rythmes sédimentaires et eustatisme dans les craies turoniennes de la région de Fécamp (Seine-Maritime, France). Expression et signification des rythmes de la craie. Bull. Soc. Géol. Normandie, 81-2, pp 55-81.

**JUKES-BROWNE A. J. (1906)** : The Clay-with-Flints : its origin and distribution. Quart. Journ. Geol. Soc., London, 62, pp 132-164.

**KARS H., JANSEN J. B. H., VRIEND P. (1987)** : Petrography and geochemistry of flint from the lanaye chalk. In Coll. Int. sur le silex, Edit. CNRS, Bordeaux, V, pp 131-140.

**KEEN D. H. (1978)** : The pleistocene deposits of the Channel Islands. Rep. Inst. Geol. Sc., 78, 26, 15 p.

**KEEN D. H. (1980)** : Report on a short field meeting in Guernsey and Jersey (24th-28th september 1979). Quatern. Newsletter, 30, pp 26-30.

**KERGOET M. et CAHOUR J. (1980)** : Identification des sols. Recherche d'un circuit de préparation rapide des sols. Rap. CETE, Melun, 31 p.

**KERGOET M. (1985)** : Identification des sols et des roches. Mise au point d'un essai d'aptitude au débouage. Rap. CETE, Melun, 16 p.

**KLEIN C. (1967)** : La karstification des craies à silex du Bassin de Paris. La notion de niveau de base. Mém. h. sér. Soc. Géol. Fr., 4, pp 30-38.

**KLEIN C. (1970)** : La surface de l'argile à silex. Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dyn., 2, 12, pp 180-220.

**KUNTZ G., MONCIARDINI C. et VERRON G. (1984)** : Carte géologique de la France à 1/50 000, feuille Bernay n°148. BRGM, Orléans. Notice explicative par KUNTZ G., MONCIARDINI C., de la QUERIERE P. et VERRON G., 28 p.

**LAIGNEL B. (1993)** : Les matériaux résiduels à silex de la marge occidentale du Bassin de Paris. Caractérisation, bilan des transformations minérales au cours de leur genèse et utilisation potentielle comme granulats., Mém. D.E.A., Orléans, 51 p.

**LAUTRIDOU J. P. (1985)** : Le cycle périglaciaire pléistocène en Europe du Nord-Ouest et plus particulièrement en Normandie. Thèse de Doctorat es Lettres, géog., Caen, 908 p.

**LAUTRIDOU J. P. et OZOUF J. C. (1987a)** : Définition de normes d'analyses physiques de roches. Acquisitions nouvelles sur la porosité et sur la perméabilité des roches au cours des dix dernières années. CNRS, Caen, 29 p.

**LAUTRIDOU J. P. et OZOUF J. C. (1987b)** : Définition de normes d'analyses physiques de roches. Etude critique des normes employées, proposition de nouvelles normes. CNRS, Caen, 45 p.

**LE BERRE P. (1977)** : Les argiles à silex du Bassin de Paris. Produit de substitution des granulats alluvionnaires. Etude préliminaire. Rap. BRGM, Orléans, 72 p.

**LEBRET P., CAMPY M., COUTARD J.-P., FOURNIGUET J., ISAMBERT M., LAUTRIDOU J.-P., LAVILLE P., MACAIRE J.-J., MENILLET F. et MEYER R. (1993)** : Cartographie des formations superficielles. Réactualisation des principes de représentation à 1/50 000. Géologie de la France, 4, pp 39-54.

**LECHEVALIER C. (1966)** : Les dépôts quaternaires de la vallée de la Lézarde. Contribution à l'étude morphologique du Caux occidental. Mém D.E.S., Rouen, 162 p.

**LEFEBVRE D. (1984)** : Une terrasse inédite et de l'argile à silex quaternaire à la Pointe de la Roque (estuaire de la Seine). Actes Museum Rouen, 1, pp 1-13.

**LEFEBVRE D., ANTOINE P., AUFFRET J. P., LAUTRIDOU J. P. et LECOLLE F. (1994)** : Réponses de la Seine et de la Somme aux événements climatiques, eustatiques et tectoniques du Pleistocène moyen et récent : Rythmes et taux d'érosion. Quaternaire, 5, 3-4, pp 165-172.

**LELONG F. (1969)** : Nature et genèse des produits d'altération de roches cristallines sous climat tropical humide (Guyane française). Mém. ENSG, Nancy, 14, 188 p.

**LELONG F. et SOUCHIER B. (1972)** : Comparaison des bilans d'altération sur roches granitiques en zone tempérée et en zone équatoriale. C. R. Acad. Sc., Paris, 274, pp 1896-1899.

**LOVEDAY J. (1962)** : Plateau Deposits of the Southern Chilterns Hills. Proc. Geol. Assoc., 73, pp 83-102.

**LUCAS J., TRAUTH N. et THIRY M. (1974)** : Les minéraux argileux des sédiments paléogènes du Bassin de Paris. Evolution des smectites et des interstratifiés (7-14Sm). Bull. Gr. Fr. Argiles, 26, pp 245-262.

**MATHEY E. (1992)** : Essai d'analyse qualitative et quantitative des formations superficielles par traitements informatiques. Mém. D.E.A., Orléans, 40 p.

- MATTHIEU C. et CONINCK de F. (1972)** : Caractérisations physico-chimiques et sédimentologiques des craies turoniennes et coniaciennes de Thiérache et du Marlois (Nord-Est du Bassin de Paris). Bull. Inf. Géol. Bass. Paris, 34, pp 3-14.
- MEGNIEN C., MEGNIEN F. (Coord.) & Coll. (1980)** : Synthèse géologique du Bassin de Paris. Mém. BRGM, Orléans, 3 vol, n° 101, 102, 103.
- MENILLET F., HAVLICEK P., FROBERT L., DUGUEY E., GIGOT C., LEBRET P., PIERRET A. et MONCIARDINI C. (1994)** : Carte géologique de la France à 1/50 000, feuille Dreux n°216. BRGM, Orléans, Notice explicative par MENILLET F., MONCIARDINI C., MAGET P. et ISAMBERT M., 67 p.
- MERCEY N. de (1880)** : Sur la confusion résultant de l'emploi de la dénomination d'argile à silex. Soc. Géol. Nord, 7, p 237.
- MEYER R. et DOS REIS R. B. P. (1985)** : Paleosols and alunite silcrettes in continental cenozoic of western Portugal. Journal of Sedimentary Petrology, 55, 1, pp 76-85.
- MILLOT G. (1964)** : Géologie des argiles. Edit. Masson & Cie, Paris, 429 p.
- MOGUEDET G. et al. (à paraître)** : Carte géologique de la France à 1/50 000, feuille Mortagne-au-Perche n° 252. BRGM, Orléans.
- MONNIER J. L. (1973)** : Contribution à l'étude des dépôts quaternaires de la région de Saint-Brieuc. Stratigraphie et sédimentologie des limons, des plages et des sols anciens. Thèse 3e cycle, Rennes, 260 p.
- MONNIER J. L. (1981)** : Le Pléistocène de la côte du Nord de la Bretagne. Essai de synthèse lithostratigraphique et chronostratigraphique. Bull. Ass. Fr. Et. Quat., 3, pp 147-156.
- MOTTERSHEAD D. N. (1977)** : The Quaternary evolution of the South Coast of England. In the Quaternary history of the Irish Sea, Kidson et Tooley Edit., Geol. J. Spec. Issue, 7 pp 299-320.
- MURATA K. J. et NORMAN M. B. (1976)** : An index of crystallinity for quartz. Amer. Journ. Sci., 276, pp 1120-1130.
- NORMAND M. et EVRARD H. (1980)** : Etude des biefs à silex. Techniques d'identification des matériaux. Rap CETE, Rouen, 59 p.
- NORMAND M. et EVRARD H. (1982)** : Etude des biefs à silex. Expérimentations de prospection in situ et d'élaboration à l'échelle industrielle. Rap CETE, Rouen, 52 p.
- OZOUF J.C., TEXIER J.P., BERTRAN P. et COUTARD J.P. (1995)** : Quelques coupes caractéristiques dans les dépôts de versant d'Aquitaine septentrionale : faciès et interprétation dynamique. Permafrost and Periglacial Processes, 6, pp 89-101.

**PAIT SUHAYAT Y. (1990)** : L'étude des argiles dans les matériaux roseki, toseki et kaolin de la partie sud de Java, Indonésie occidentale. Caractérisation chimico-minéralogique. Thèse 3e cycle, Nancy, 165 p.

**PANGALOS P. (1984)** : La cristallinité du quartz dans les roches sédimentaires; Essais d'interprétation. Mém D.E.A., Nancy, 60 p.

**PASQUET R. (1987)** : Valorisation des argiles à silex en région centre comme matériaux de substitution des granulats alluvionnaires, Rap. BRGM, Orléans, 83 p.

**POMEROL C. et BAUER J. (1967)** : Mode de gisement, nature et origine d'argiles à silex d'altération du Bassin de Paris. Mém. h. sér. Soc. Géol. de France, 4, pp 65-72.

**QUESNEL F., BOURDILLON C. et LAIGNEL B. (1996)** : Maastrichtien supérieur au Nord-Ouest du Bassin de Paris (France). Témoins résiduels en Seine-Maritime. C. R. Acad. Sc., Paris, 322, II a, pp 1071-1077.

**QUESNEL F. (1997)** : Cartographie numérique en géologie de surface. Application aux altérites à silex de l'ouest du Bassin de Paris. Thèse Univ. Rouen, Document BRGM n°263.

**REID C. (1899)** : The geology of the country around Dorchester. Mem. Geol. Survey U.K.

**SPENCER C., LAIGNEL B. et HERGIBO P. L. (1996)** : Etude des argiles à silex du Bassin parisien. Recherche de matériaux de substitution. Rap. BRGM, Orléans, 65 p.

**THIRY M. et TRAUTH N. (1976a)** : Evolution historique de la notion d'argile à silex. Bull. inf. Géol. Bass. Paris, 13, 4, pp 41-48.

**THIRY M. et TRAUTH N. (1976b)** : Les sédiments paléocènes et éocènes inférieurs du Bassin de Paris. Rôle des argiles dans les éléments traces. Sc. Géol., Strasbourg, 30, 3, pp 113-128.

**THIRY M., CAVELIER C. et TRAUTH N. (1977)** : Les sédiments de l'Eocène inférieur du Bassin de Paris et leur relation avec la paléoaltération de la craie. Sc. Géol., Strasbourg, 30, 3, pp 113-128.

**THIRY M., AUBRY M. P., CAVELIER C., KUNTZ G., WYNS R. et TRAUTH N. (1978)** : Nature des smectites élaborées lors d'altérations lessivantes de la craie à silex du Bassin de Paris. Sc. Géol., Strasbourg, 31, 4, pp 163-172.

**THOREZ J. P., BULLOCK J., CATT J. A. et WEIR A. (1971)** : The petrography and origin of deposits filling solution pipes in the chalk near South Mimms, Hertfordshire. Geol. Mag., 108, pp 413-423.

**TOURENQ J., KUNTZ G. et LAUTRIDOU J.-P. (1991)** : Démonstration par l'exoscopie des quartz des conditions marines de mise en place des sédiments pliocènes (Sables de Lozère...) de Haute-Normandie (France). C. R. Acad. Sc., Paris, 312, II, pp 855-862.

**VAN DEN BROECK E. (1881)** : Mémoire sur les phénomènes d'altération des eaux météoriques étudiés dans leurs rapports avec la géologie stratigraphique. Mém Acad. Sc. lett. Bx-Arts de Belgique, 44, 180 p.

**VAN VLIET-LANOE B. (1987a)** : Cryoreptation, gélifluxion et coulées boueuses : une dynamique continue en relation avec le drainage et la stabilité de l'agrégation cryogénique. In Pécsi M. and French H. M., Loess and Periglacial Phenomena, Akad. Kiado, pp 203-226.

**VAN VLIET-LANOE B. (1987b)** : Dynamique périglaciaire actuelle et passée. Apport de l'étude micromorphologique et de l'expérimentation. Bull. Ass. Fr. Quat., 2 , pp 113-132.

**VILAS BOAS G. (1975)** : L'altération des accidents siliceux, silex et chailles dans les formations paléogènes du Bassin de Paris. Thèse 3e cycle, Strasbourg, 110 p.

**ZIMMERMAN H. B., SHACKLETON N. J., BACKMAN J., KENT D. V., BALDAUF J. G., KALTENBACK A. J. et MORTON A. C. (1984)** : History of Plio-Pleistocene climate in the Northeastern Atlantic, Deep Sea Drilling Project Hole 552A. In Roberts D. G., Schnitker D. *et al.*, Init. Repts D.S.D.P., 81, Washington, pp 861-875.

## LISTE DES FIGURES

	<b>Page</b>
<b>Figure 1</b> : Localisation géographique de l'étude sur les formations résiduelles à silex.	4
<b>Figure 2</b> : Méthodes utilisées pour caractériser les formations résiduelles à silex.	9
<b>Figure 3</b> : Photo illustrant les différentes formes de silex rencontrées dans les RS.	12
<b>Figure 4</b> : Cadre géographique régional de l'étude sur les formations résiduelles à silex.	18
<b>Figure 5</b> : Epaisseurs moyennes régionales de RS (krigeage SynerGIS).	19
<b>Figure 6</b> : Epaisseurs de formations superficielles (RS + LP) au dessus de la craie, d'après les sondages.	20
<b>Figure 7</b> : Localisation géographique des sites de RS de plateau étudiés.	21
<b>Figure 8</b> : Répartition géographique des teintes des matrices (< 2 mm) des RS de plateau.	23
<b>Figure 9</b> : Répartition géographique des teneurs en cailloux de silex (> 20 mm) des RS de plateau.	27
<b>Figure 10</b> : Répartition géographique des teneurs en matrice (< 2 mm) des RS de plateau.	27
<b>Figure 11</b> : Répartition géographique des compositions granulométriques des matrices (< 2 mm) des RS de plateau.	28
<b>Figure 12</b> : Evolution des teneurs en silex des RS de plateau avec la profondeur (site A/C).	29
<b>Figure 13</b> : Répartition géographique de la minéralogie de la fraction argileuse (< 2 µm) des RS de plateau.	33
<b>Figure 14</b> : Mise en évidence de quatre familles géographiques de RS en fonction de la composition chimique de leur matrice (< 2 mm).	37
<b>Figure 15</b> : Répartition géographique de la teinte des silex des RS de plateau.	41
<b>Figure 16</b> : Répartition géographique de la forme des silex des RS de plateau.	42
<b>Figure 17</b> : Répartition géographique du pourcentage de fragmentation des silex des RS de plateau.	43
<b>Figure 18</b> : Répartition géographique du pourcentage de silex présentant des marques d'oxydation.	43
<b>Figure 19</b> : Répartition géographique des faciès de RS.	49
<b>Figure 20</b> : Bilan d'altération - méthodologie.	53
<b>Figure 21</b> : Géologie du substrat des RS.	55
<b>Figure 22</b> : Carte de l'âge du sommet des craies disparues par altération.	56
<b>Figure 23</b> : Localisation géographique des sites de craies étudiés.	58
<b>Figure 24</b> : Répartition géographique des teneurs en silex des craies de l'ouest du Bassin de Paris.	61
<b>Figure 25</b> : Répartition géographique des teneurs en fsf des craies turoniennes de l'ouest du Bassin de Paris.	62

## Liste des figures

<b>Figure 26</b> : Répartition géographique des teneurs en fsf des craies coniaciennes de l'ouest du Bassin de Paris.	62
<b>Figure 27</b> : Répartition géographique des teneurs en fsf des craies santoniennes de l'ouest du Bassin de Paris.	63
<b>Figure 28</b> : Répartition géographique des teneurs en fsf des craies campaniennes de l'ouest du Bassin de Paris.	63
<b>Figure 29</b> : Comparaison de l'épaisseur des silex entre les RS et les craies choisies comme roches-mères pour les sites de Beuzeville et de St Jean du Theney.	70
<b>Figure 30</b> : Méthode de calcul des épaisseurs de craies nécessaires pour donner les épaisseurs de RS. Exemple du site de RS de Bolbec.	77
<b>Figure 31</b> : Epaisseurs (en mètres) de craies dissoutes nécessaires pour donner les épaisseurs de RS de plateau.	79
<b>Figure 32</b> : Bilan granulométrique - méthodologie.	80
<b>Figure 33</b> : Comparaison des teneurs en silex et en fsf entre les RS réels (RS r) et les RS théoriques (RS th) et quantification des apports allochtones (cas où la silice issue de l'altération des silex est évacuée).	82
<b>Figure 34</b> : Comparaison des teneurs en silex et en fsf entre les RS réels (RS r) et les RS théoriques (RS th) et quantification des apports allochtones (cas où la silice issue de l'altération des silex enrichit la fsf).	83
<b>Figure 35</b> : Evolution verticale des apports allochtones en fsf pour les RS de plateau dont l'épaisseur est supérieure à 10 m.	84
<b>Figure 36</b> : Matériau des RS réels concerné par l'analyse chimique.	87
<b>Figure 37</b> : Localisation géographique des sites de biefs à silex étudiés.	102
<b>Figure 38</b> : Diagramme triangulaire des compositions granulométriques des matrices (fraction inférieure à 2 mm) des biefs à silex.	107
<b>Figure 39</b> : Composition granulométrique des matrices (< 2 mm) des biefs à silex de la Vallée de la Risle.	108
<b>Figure 40</b> : Répartition cartographique de la teinte des silex des biefs à silex.	112
<b>Figure 41</b> : Géométrie des gisements de biefs à silex localisés sur les versants dont la pente est inférieure ou égale à 16°.	117
<b>Figure 42</b> : Géométrie des gisements de biefs à silex localisés sur les versants dont la pente est supérieure ou égale à 19°.	118
<b>Figure 43</b> : Géométrie des gisements de biefs à silex localisés aux extrémités d'interfluve.	119
<b>Figure 44</b> : Localisation de l'échantillonnage des biefs à silex.	123
<b>Figure 45</b> : Typologie des biefs à silex.	127
<b>Figure 46</b> : Comparaison des teneurs en silex (fractions supérieures à 20 mm et à 2 mm) entre RS de plateau et biefs à silex.	129

<b>Figure 47</b> : Comparaison des compositions granulométriques des matrices (< 2 mm) entre les RS de plateau et les biefs à silex du Pays de Caux, de l'Eure et du nord de l'Eure et Loir.	130
<b>Figure 48</b> : Comparaison du pourcentage de fragmentation des silex entre les RS de plateau et les biefs à silex du Pays de Caux, de l'Eure et du nord de l'Eure et Loir.	135
<b>Figure 49</b> : Représentation schématique de la genèse des biefs à silex.	139
<b>Figure 50</b> : Relation entre les faciès des biefs à silex et les formations localisées à proximité des vallées en cours d'élaboration.	140
<b>Figure 51</b> : Représentation schématique des deux phases de mises en place des biefs à silex.	141
<b>Figure 52</b> : Coupe transversale du versant et de la vallée du Bec Hellouin au niveau du site Mont Mal I.	143
<b>Figure 53</b> : Mise en parallèle des courbes isotopiques et des incisions en basse Seine, d'après Lefebvre <i>et al.</i> (1994).	144
<b>Figure 54</b> : Détermination par construction géométrique du fond de la vallée contemporaine du bief 1 et du dénivelé entre celui-ci et le fond de la vallée weichsélienne.	145
<b>Figure 55</b> : Typologie des formations résiduelles à silex.	151
<b>Figure 56</b> : Fuseau granulométrique des RS de plateau.	153
<b>Figure 57</b> : Epaisseurs interpolées de limon sur les RS.	155
<b>Figure 58</b> : Epaisseur de craie non saturée sous les RS.	156
<b>Figure 59</b> : Exemple de gisement de RS de plateau avec une épaisseur exploitable de 20 m.	157
<b>Figure 60</b> : Carte d'aptitude à l'exploitation des RS de l'Ouest du Bassin de Paris.	160
<b>Figure 61</b> : Fuseau granulométrique des biefs à silex.	162
<b>Figure 62</b> : Exploitation type retenue pour le calcul du volume des gisements de biefs à silex.	164
<b>Figure 63</b> : Granulométrie des granulats issus du concassage des silex par des réducteurs à mâchoire et giratoire.	167
<b>Figure 64</b> : Modes de concassage réalisés par C. Spencer <i>et al.</i> (1996) sur les silex du RS de Challet.	169
<b>Figure 65</b> : Abaques des résistances mécaniques des silex des RS.	175
<b>Figure 66</b> : Schéma du traitement minéralurgique des argiles à silex de plateau, d'après Spencer <i>et al.</i> (1996).	184
<b>Figure 67</b> : Zone déboisée dans la partie centrale de l'extrémité d'un interfluve.	189
<b>Figure 68</b> : Photo illustrant l'absence, dans le paysage, de marques liées à la zone déboisée de la photo précédente.	189
<b>Figure 69</b> : Scénario d'exploitation des argiles à silex de plateau envisagé par le BRGM (d'après Spencer <i>et al.</i> , 1996).	191

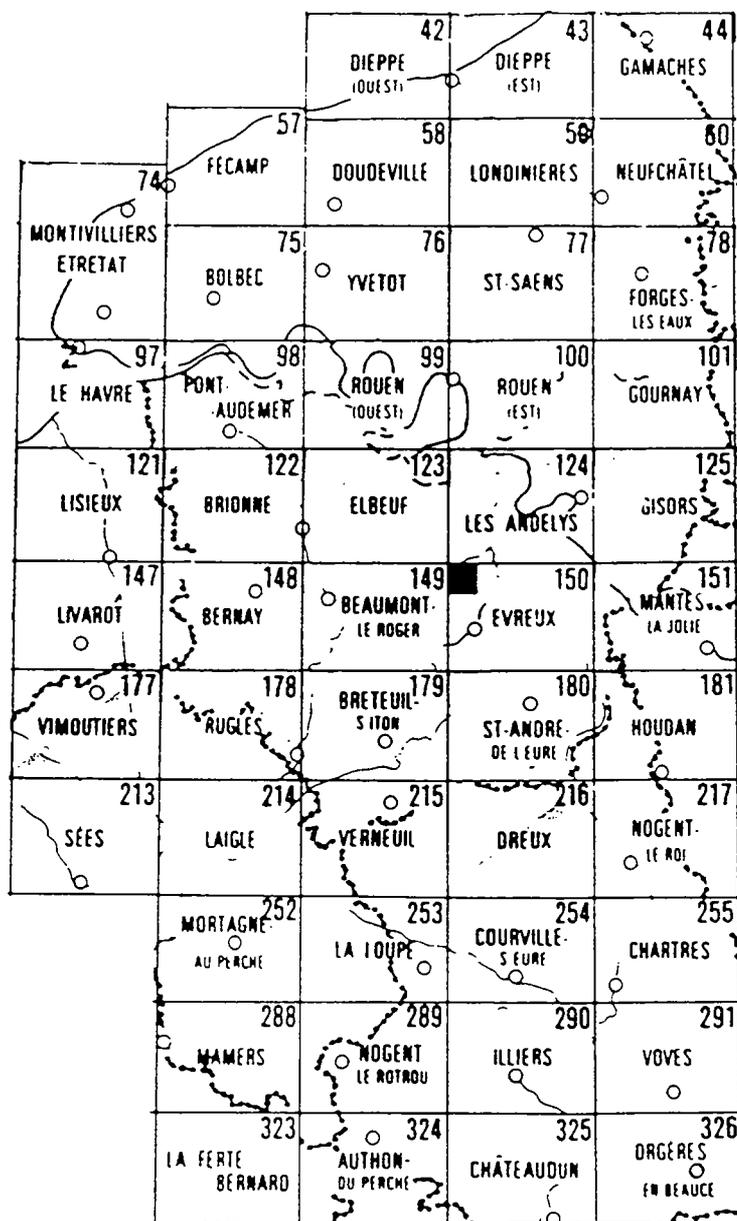
## **LISTE DES TABLEAUX**

	<b>Page</b>
<b>Tableau 1</b> : Fiche descriptive de terrain.	7
<b>Tableau 2</b> : Comparaison des résultats de résistance à la fragmentation des silex des RS entre les essais de fragmentation dynamique (FD) et Los Angeles (LA).	14
<b>Tableau 3</b> : Granulométries des RS de plateau.	26
<b>Tableau 4</b> : Minéralogie de la fraction argileuse des RS de plateau.	31
<b>Tableau 5</b> : Evolution verticale de la minéralogie de la fraction argileuse des RS de plateau.	34
<b>Tableau 6</b> : Minéralogie de la fraction argileuse de 5 échantillons de RS sableux de plateau.	32
<b>Tableau 7</b> : Chimie des matrices (< 2 mm) des RS de plateau.	36
<b>Tableau 8</b> : Evolution verticale de la chimie des matrices (< 2 mm) des RS de plateau.	38
<b>Tableau 9</b> : Chimie des matrices (< 2 mm) de 5 échantillons de RS sableux de plateau.	39
<b>Tableau 10</b> : Cristallinité du quartz des silex de RS de plateau.	45
<b>Tableau 11</b> : Porosité et densité des silex des RS de plateau.	45
<b>Tableau 12</b> : Synthèse des données lithologiques et typologie des RS de plateau.	47
<b>Tableau 13</b> : Définition des roches-mères crayeuses des RS étudiés.	57
<b>Tableau 14</b> : Sites de craies étudiés.	58
<b>Tableau 15</b> : Teneur en silex dans les craies maastrichtiennes du Nord Ouest de l'Europe, d'après les travaux de W. U. Ehrmann (1987) et H. Kars <i>et al.</i> (1987).	59
<b>Tableau 16</b> : Incidence de la concentration et du choix de l'acide sur la quantité de fsf mesurée lors de la calcimétrie, d'après les travaux de C. Matthieu et F. de Coninck (1972).	59
<b>Tableau 17</b> : Vérification de la fiabilité des mesures concernant les teneurs en silex des craies étudiées.	60
<b>Tableau 18</b> : Minéralogie de la fraction argileuse des craies de l'ouest du Bassin de Paris.	64
<b>Tableau 19</b> : Composition chimique des fsf des craies de l'ouest du Bassin de Paris.	66
<b>Tableau 20</b> : Choix des craies-mères théoriques pour le RS de Bolbec.	67
<b>Tableau 21</b> : Pourcentage volumique (%v) de cavernes mesuré sur dix silex caverneux.	72
<b>Tableau 22</b> : Pourcentage de SiO <sub>2</sub> dissous au niveau des cavernes des silex au cours de l'altération.	72
<b>Tableau 23</b> : Porosité (en %) des silex sans leur cortex et des cortex des silex des RS et des craies.	73
<b>Tableau 24</b> : Pourcentage volumique de SiO <sub>2</sub> dissous au niveau du cortex des silex au cours de l'altération.	74
<b>Tableau 25</b> : Estimation du pourcentage volumique de SiO <sub>2</sub> dissous au niveau des silex au cours de la formation des RS.	76

<b>Tableau 26</b> : Comparaison des compositions chimiques des fsf entre RS réels et théoriques (cas où la silice issue de l'altération des silex est évacuée).	88
<b>Tableau 27</b> : Comparaison des compositions chimiques des fsf entre RS réels et théoriques (cas où la silice issue de l'altération des silex enrichit la fsf).	89
<b>Tableau 28</b> : Quantification (en %) des apports allochtones ou pertes en éléments chimiques majeurs pour obtenir la fsf des RS réels à partir des craies-mères (cas où la silice issue de l'altération des silex enrichit la fsf).	91
<b>Tableau 29</b> : Quantification (en %) des apports allochtones ou pertes en éléments chimiques majeurs pour obtenir la fsf des RS réels à partir des craies-mères (cas où la silice issue de l'altération des silex est évacuée).	92
<b>Tableau 30</b> : Minéralogie de la fraction argileuse des formations cénozoïques.	95
<b>Tableau 31</b> : Composition chimique de la fraction inférieure à 2 mm des sables cénozoïques.	97
<b>Tableau 32</b> : Composition chimique des limons (d'après les travaux de Lautridou, 1995).	97
<b>Tableau 33</b> : Composition chimique des argiles paléogènes (Thiry et Trauth, 1976b).	97
<b>Tableau 34</b> : Paramètres morphologiques des sites de biefs à silex étudiés.	103
<b>Tableau 35</b> : Granulométries des biefs à silex.	106
<b>Tableau 36</b> : Minéralogie de la fraction argileuse des biefs à silex.	109
<b>Tableau 37</b> : Chimie des matrices (< 2 mm) des biefs à silex.	111
<b>Tableau 38</b> : Caractéristiques macroscopiques des silex des biefs à silex.	113
<b>Tableau 39</b> : Index de cristallinité (CI) du quartz des silex des biefs à silex.	114
<b>Tableau 40</b> : Résistivité apparente des biefs à silex et des RS de plateau mesurée sur trois sites de Haute-Normandie, d'après les travaux de M. Normand et H. Evrard (1982).	114
<b>Tableau 41</b> : Résistivité apparente des biefs à silex et des RS de plateau mesurée sur cinq sites de la région Centre, d'après les travaux de R. Pasquet (1987).	115
<b>Tableau 42</b> : Relation entre la pente du versant et la pente du bief 1 pour les biefs à silex localisés sur les versants dont la pente est inférieure ou égale à 16°.	116
<b>Tableau 43</b> : Relation entre la pente du versant et la pente du bief 2 pour les biefs à silex localisés sur les versants dont la pente est supérieure ou égale à 19°.	116
<b>Tableau 44</b> : Relation entre les teneurs en silex (> 2 mm) et la morphologie des sites de biefs à silex.	121
<b>Tableau 45</b> : Relation entre le pourcentage de fragmentation des silex et la morphologie des sites de biefs à silex.	124
<b>Tableau 46</b> : Teneur et pourcentage de fragmentation des silex des biefs 1 et 2 des sites du Mont Mal et de Bernay.	126
<b>Tableau 47</b> : Comparaison de la minéralogie de la fraction argileuse entre les RS de plateau et les biefs à silex du Pays de Caux, de l'Eure et du nord de l'Eure et Loir.	131
<b>Tableau 48</b> : Comparaison de la composition chimique des matrices (< 2 mm) entre les RS de plateau et les biefs à silex du Pays de Caux, de l'Eure et du nord de l'Eure et Loir.	132

<b>Tableau 49</b> : Comparaison de la teinte des silex entre les RS de plateau et les biefs à silex du Pays de Caux, de l'Eure et du nord de l'Eure et Loir.	134
<b>Tableau 50</b> : Estimation des volumes et tonnages en silex des différents types de gisements de RS de plateau.	158
<b>Tableau 51</b> : Classification des RS de plateau en zones plus ou moins favorables pour l'exploitation en fonction des paramètres lithologiques du matériau.	159
<b>Tableau 52</b> : Estimation des volumes et tonnages en silex des différents types de gisements de biefs à silex.	165
<b>Tableau 53</b> : Coefficients d'aplatissement (en %) de 7 échantillons de silex de RS concassés avec un réducteur à mâchoire et un réducteur giratoire.	168
<b>Tableau 54</b> : Granulométries des matériaux issus des différents modes de concassage des silex du RS de Challet (Spencer <i>et al.</i> , 1996).	171
<b>Tableau 55</b> : Coefficients d'aplatissement des graviers de silex du RS de Challet obtenus après différents types de concassage (Spencer <i>et al.</i> , 1996).	170
<b>Tableau 56</b> : Résistance mécanique des graviers et des sables issus du concassage des cailloux de silex.	172
<b>Tableau 57</b> : Résistance mécanique des graviers de silex contenus dans les biefs à silex.	173
<b>Tableau 58</b> : Tableau des coefficients de corrélation entre le pourcentage de cortex contenus dans les échantillons de silex soumis aux essais géotechniques (MDE, FD) et les résultats de ces essais, pour les classes granulométriques 10-14 mm et 4-6,3 mm.	173
<b>Tableau 59</b> : Coefficients d'absorption des sables issus du concassage des silex.	174
<b>Tableau 60</b> : Recommandations pour les granulats destinés aux bétons hydrauliques pour bâtiments et ouvrages d'art.	176
<b>Tableau 61</b> : Classement des granulats en catégories en fonction de l'association des caractéristiques mécaniques de résistance aux chocs (LA : Los Angeles ou FD : Fragmentation Dynamique) et à l'usure (MDE : Micro-Deval).	177
<b>Tableau 62</b> : Classification du trafic de poids lourds.	177
<b>Tableau 63</b> : Classement des échantillons de graviers de silex en catégories en fonction de leurs caractéristiques mécaniques selon la norme NF P 18-101.	178
<b>Tableau 64</b> : Typologie des formations résiduelles à silex adaptée à leur utilisation comme granulats.	180
<b>Tableau 65</b> : Bilans des tests de séparation par voie sèche des silex et de la matrice du RS de Challet, d'après les travaux de C. Spencer <i>et al.</i> (1996).	183
<b>Tableau 66</b> : Evaluation de l'efficacité de la séparation des silex et de la matrice du RS de Challet par le trommel, d'après les travaux de C. Spencer <i>et al.</i> (1996).	183
<b>Tableau 67</b> : Résultats des essais de décantation sur les fractions 0-250 $\mu\text{m}$ et 0-40 $\mu\text{m}$ , d'après les travaux de C. Spencer <i>et al.</i> (1996).	187

## **ANNEXES**



**Annexe 1 : Feuilles géologiques à 1/50000 concernées par l'étude des RS de l'Ouest du Bassin de Paris.**

## Annexe 2 : Description des coupes et échantillonnage des RS de plateau.

Description des coupes	Echantillonnage
<b>Blangy sur Bresle</b> - limon loessique - argile plastique bigarée, Yprésien - sables argileux avec silex verdés à la base, Thanétien - RS argilo-limoneux à dominante limoneuse, ocre à brun, faciès dominant - liseré argileux brun foncé - craie	Bla 1 Bla 2
<b>Neufchâtel en Bray</b> - limon loessique - limon argileux rouge (vieux limons) - argile plastique bigarée, Yprésien - sables, Yprésien ? - RS argilo-limoneux à dominante limoneuse, brun, faciès dominant - liseré argileux brun foncé - craie	Neu
<b>Bertreville St Ouen</b> - limon loessique - argile plastique bigarée avec galets avellanaires, Yprésien - sables et argile-sableuse, Yprésien - RS argilo-limoneux à dominante limoneuse, brun à ocre, faciès dominant - liseré argileux brun foncé - craie	BSO 1 BSO 2
<b>Yvetot</b> - limon loessique - sables fins de St Eustache - RS argileux à argilo-limoneux , brun-rouge à rouge, faciès dominant	Yv
<b>A29</b> - limon loessique - sables fins de St Eustache - Sables de Lozère - RS limono-argileux à limoneux, à silex épars et cassés, au sommet de la coupe, passage progressif avec le RS sous-jacent - RS sableuse à proximité des poches de Sables de Lozère - RS argileux à argilo-limoneux , rouge, faciès dominant - liseré argileux brun foncé, localement au contact d'un bonhomme de craie - craie, localement sous forme d'un bonhomme de craie	A29
<b>Bolbec</b> - limon loessique - Sables de Lozère - argile plastique grise, Yprésien ? - RS limono-argileux à limoneux, à silex épars et cassés, au sommet du profil, passage progressif avec le RS sous-jacent - RS sableux à proximité des poches de sables de Lozère - RS argileux à argilo-limoneux , brun-rouge, faciès dominant	Bc pl
<b>Sandouville</b> - limon loessique - sables fins de St Eustache - Sables de Lozère - RS limono-argileux à limoneux, brun à brun-rouge, au sommet du profil (difficilement perceptible par rapport au faciès dominant), passage progressif avec le RS sous-jacent - RS sableuse à proximité des poches de sables de Lozère - RS argilo-limoneux , brun-rouge, faciès dominant - liseré argileux brun foncé - craie	San 2 San 1

Description des coupes	Echantillonnage
<b>Octeville</b> - limon loessique - RS limono-argileux à limoneux, à silex épars et cassés, au sommet du profil, passage progressif avec le RS sous-jacent - RS argileux à argilo-limoneux, rouge à brun-rouge, faciès dominant	Oct
<b>Beuzeville</b> - limon loessique - RS limono-argileux à limoneux, à silex épars et cassés, au sommet du profil, passage progressif avec le RS sous-jacent - RS argileux, marbré beige, gris et rouge, faciès dominant - liseré argileux brun foncé à noir - craie	Beu 1 et 2
<b>Les Monts Sud</b> - limon loessique - RS limono-argileux à limoneux, à silex épars et cassés, au sommet du profil, passage progressif avec le RS sous-jacent - RS argileux à argilo-limoneux, rouge, faciès dominant	MtS
<b>La Lièvrerie</b> - limon loessique - sables faciès Fontainebleau - RS limono-argileux à limoneux, à silex épars et cassés, au sommet du profil, passage progressif avec le RS sous-jacent - RS argileux, marbré beige, gris et rouge, faciès dominant - liseré argileux brun foncé à noir - craie	Lie 1 Lie 2 Lie 3
<b>Courtonne les deux Eglises</b> - Terre végétale - RS argilo-limoneux, rouge, pouvant être marbré gris et rouge par endroit sommet base - liseré argileux brun foncé à noir - craie	CDE 1 CDE 2 CDE 3
<b>St Jean du Theney</b> - limon loessique - sables faciès Fontainebleau, rouge au sommet et s'éclaircissant en profondeur pour devenir jaune, sous forme de deux très grande poches d'une superficie de plusieurs hectares - RS limono-argileux à limoneux, brun-rouge, à silex épars et cassés, au sommet du profil, passage progressif avec le RS sous-jacent - RS sableux à sablo-argileux à proximité des poches de sables de Fontainebleau - RS argileux à argilo-limoneux, rouge au sommet et s'éclaircissant en profondeur pour devenir beige et blanc, faciès dominant	SJT 1 SJT 2 SJT 3
<b>La Vasserie</b> - limon loessique - sables faciès Fontainebleau - RS limono-argileux à limoneux, rouge, à silex épars et cassés, au sommet du profil, passage progressif avec le RS sous-jacent - RS sableux à sablo-argileux à proximité de la poche de Sables de Fontainebleau - RS argileux à argilo-limoneux, rouge s'éclaircissant en profondeur pour devenir beige, faciès dominant	Vas p3 Vas p2 Vas pla et plb
<b>Mont Mal</b> - limon loessique - RS limono-argileux à limoneux, brun à brun-rouge, à silex épars et cassés, au sommet du profil, passage progressif avec le RS sous-jacent - RS argileux, beige, faciès dominant	MtM pla et plb

Description des coupes	Echantillonnage
<b>Les Mollands</b> - limon loessique - RS limono-argileux à limoneux, brun-rouge à rouge, à silex épars et cassés, au sommet du profil, passage progressif avec le RS sous-jacent - RS argileux, marbré blanc et rouge, faciès dominant	Mol p
<b>Bernay</b> - limon loessique - RS limono-argileux à limoneux, brun-rouge à rouge, à silex épars et cassés, au sommet du profil, passage progressif avec le RS sous-jacent - RS argileux à argilo-limoneux, rouge s'éclaircissant en profondeur pour devenir rosâtre à blanc, faciès dominant	By 1  By 2a et 2b
<b>Aubé</b> - limon loessique - RS brun clair s'éclaircissant en profondeur pour devenir blanc	Aub 1 Aub 2
<b>A/C</b> - limon loessique - RS limono-argileux à limoneux, brun-rouge à rouge, à silex épars et cassés, au sommet du profil, passage progressif avec le RS sous-jacent - RS argileux à argilo-limoneux, rouge (plus ou moins confondu avec le faciès limoneux) s'éclaircissant en profondeur pour devenir beige puis marbrée blanc, rosâtre et beige, faciès dominant - liseré argileux brun foncé à noir (observé en sondages) - craie (observée en sondages)	A/C 1  A/C 2 A/C 3 A/C 4
<b>Challet</b> - limon loessique - RS limono-argileux à limoneux, brun-rouge, à silex épars et cassés au sommet du profil, passage progressif avec le RS sous-jacent - RS argileux à argilo-limono-sableux, rouge s'éclaircissant en profondeur pour devenir blanc, rosâtre et beige, faciès dominant	Cha
<b>La Ventrouze</b> - loess ocre (d'âge probablement Saalien) - vieux limons (anté-Saalien) - RS limoneux, marbré brun, beige, rouge et gris, à silex épars et cassés, passage progressif avec le RS sous-jacent - RS blanc avec quelques liserés rouges de place en place, faciès dominant sommet milieu base - Sables du Perche	Ven 4  Ven 3 Ven 2 Ven 1

## Annexe 3 : Description des coupes et échantillonnage des biefs à silex.

Description des coupes	Echantillonnage
<b>Cauville</b> - sables fins (faciès St Eustache ?), sous forme d'une poche (largeur 3 m, profondeur 2 m) - bief sableux à sablo-argileux, rouge à brun-rouge, au sommet de la carrière (1 à 2 m d'épaisseur) - bief argilo-sablo-limoneux, roux à orangé, faciès dominant de la carrière	Cau 2 Cau 1
<b>Octeville</b> bief argilo-limoneux, brun-rouge	Oct
<b>Hautôt le Vatois</b> - sables fins (faciès St Eustache probable), sous forme d'un poche (largeur et profondeur 1,5m) - bief sableux, jaune à beige, à proximité de la poche de sable - bief sablo-argilo-limoneux, brun, faciès dominant de la carrière	HV 2 HV 1
<b>Bolbec</b> - petits paquets de sables fins et grossiers disséminés au sein du bief (faciès St Eustache et Lozère probables) - bief localement sablo-limoneux, brun clair - bief argilo-limono-sableux, brun, faciès dominant	Bc 2 Bc 1
<b>Grande Rue</b> - bief argilo-limoneux, rouge à brun-rouge	GR
<b>Conteville</b> - bief lessivé en matrice (matrice sableuse blanchâtre), au sommet de la carrière sur 1 à 3 m d'épaisseur, pouvant former des puits verticaux (largeur max 1 m) - bief sablo-limono-argileux, brun	Con 2 Con 1
<b>Toutainville</b> - bief sableux à sablo-limono-argileux, brun à brun clair	Tou
<b>Pont Audemer</b> - petits paquets de sables (faciès Fontainebleau) disséminés au sein du bief - bief sableux à sablo-limono-argileux, brun clair	PtA
<b>La Vasserie</b> - poche de sables (faciès Fontainebleau), à proximité du versant sur le rebord du plateau observé par sondage (extension 100 m, profondeur min 5m) - petits paquets de sables (faciès Fontainebleau) disséminés au sein du bief - bief sableux, roux à orangé	Vas 1
<b>Déviation de Brionne</b> - bief limono-sableux, brun clair	DBr
<b>Vallée aux Boeufs</b> - sables (faciès Fontainebleau) sous formes de poches de taille variable (largeur et profondeur de 1 à 10 m) - bief sableux, blanc à roux au sommet - bief sableux à sablo-argileux, orangé à rosâtre - bief limono-sablo-argileux, roux à orangé - bief argileux, jaune	VB 4 VB 3 VB 2 VB 1
<b>Mont Mal</b> - sables (faciès Fontainebleau) sous formes de poches (largeur et profondeur de 1 à 2 m) ou de paquets (extension 0,5 à 2m) - bief lessivé en matrice (matrice sableuse, blanchâtre à ocre clair), au sommet de la carrière (niveau discontinu 0 à 1 m) - bief sableux, jaune à rouge au sommet - bief argilo-limoneux, rouge à brun-rouge, faciès dominant - bief argileux à argilo-limoneux, brun-rouge, observé en retrait du versant grâce à des sondages	MtM 3 MtM 1 MtM 2a et 2b

Description des coupes	Echantillonnage
<b>Neuville du Bosc</b> - sables (faciès Fontainebleau) sous formes de poches (largeur et profondeur de 1 à 5 m) ou de paquets (extension 0,5 à 2m) - bief lessivé en matrice (matrice sableuse, blanchâtre à ocre clair), au sommet de la carrière, sous la forme d'un niveau discontinu (épaisseur 0 à 1 m) pouvant donner des puits verticaux (largeur 0,5 m) - bief sableux, jaune à rouge, à proximité des poches de sables - bief sablo-limono-argileux, brun, faciès dominant, moins sableux vers la base de la coupe	NB 3   NB 1 NB 2
<b>Carrières de Normandie</b> - sables (faciès Fontainebleau) sous formes de nombreuses poches (largeur 5 à 10 m et profondeur max 5 m) - bief lessivé en matrice (matrice sableuse, blanchâtre à ocre clair), au sommet de la carrière, sous la forme d'un niveau discontinu (épaisseur 0 à 0,5 m) pouvant donner des puits verticaux (largeur 1 m) - biefs sableux à sablo-argilo-limoneux, rouge à brun-rouge - biefs argilo-limono-sableux, brun	Nor 2 Nor 1
<b>Salverte</b> - sables (faciès Fontainebleau) sous forme d'une poche (largeur et profondeur 1 m) - bief lessivé en matrice (matrice sableuse, blanchâtre), au sommet de la carrière, sous la forme d'un niveau discontinu (épaisseur 0 à 1 m) pouvant donner des puits verticaux (largeur 1 m) - bief sablo-argilo-limoneux, rouge à rosâtre, faciès dominant	Sal 2   Sal 1
<b>Valleville</b> - sables (faciès Fontainebleau) sous forme d'une poche (largeur 2 m et profondeur 1 m) et de quelques petits paquets disséminés au sein du bief - bief lessivé en matrice (matrice sableuse, blanchâtre à ocre clair), au sommet de la carrière, sous la forme d'un niveau continu (épaisseur 0,5 à 1 m) - bief sablo-argilo-limoneux, rouge à rosâtre, faciès dominant moins sableux vers la base	Val 3  Val 2 Val 1
<b>Les Mollands</b> - sables (faciès Fontainebleau) sous forme de poches et de paquets difficiles à cerner - bief sableux, jaune à roux, localement à proximité des poches de sables - bief lessivé en matrice (matrice sableuse, blanchâtre à ocre clair), au sommet de la carrière, sous la forme d'un niveau discontinu (épaisseur 0 à 1m) pouvant donner des puits verticaux (largeur 0,5 m) - bief argileux, rouge à rosâtre, faciès dominant - bief très argileux, rouge ou marbrée rouge, blanc et beige, observable au fond de la carrière en direction du plateau	Mol 4 Mol 3   Mol 1 Mol 2
<b>La Bosquerie</b> - sables (faciès Fontainebleau) sous forme de poches de tailles variables (largeur et profondeur 1 à 5 m) - bief lessivé en matrice (matrice sableuse, blanchâtre), au sommet de la carrière, sous la forme d'un niveau discontinu (épaisseur 0 à 1m) - bief sableux, jaune à roux - bief sableux à sablo-argileux, rosâtre à roux - bief argileux à argilo-limoneux, brun rouge à rouge	Bos 4   Bos 3 Bos 2 Bos 1
<b>Le Boulay</b> - quelques petits paquets ou lentilles de sables (faciès Fontainebleau probable) disséminés au sein du bief (taille centimétrique à décimétrique) - bief lessivé en matrice (matrice sableuse, blanchâtre), sous la forme d'un niveau discontinu (épaisseur 0 à 0,5m) et d'un puits vertical (largeur inférieure à 0,5 m) - bief argilo-limoneux, brun, faciès dominant	Bou 2   Bou 1
<b>Bernay</b> - bief argilo-limoneux, brun, observé sur le versant - bief argilo-limoneux, brun, observé en retrait du versant grâce à des travaux routiers	By 1 By 2

Description des coupes	Echantillonnage
<b>Nassandres</b> - sables (faciès Fontainebleau) sous forme d'une poche (largeur 1,5 m et profondeur 1 m) - bief lessivé en matrice (matrice sableuse, blanchâtre à ocre clair), observé localement sous la forme d'un puits vertical (largeur inférieure à 0,5 m) - bief argileux, brun	Nas
<b>Goupillères</b> - bief sableux, roux à rouge, observé localement au sommet de la carrière - bief lessivé en matrice (matrice sableuse, blanchâtre à ocre clair), sous la forme d'un niveau discontinu (épaisseur 0 à 0,5m) - bief sablo-limono-argileux, roux, faciès dominant - bief argileux, marbré roux et grisâtre, à la base de la coupe	Gou 1 Gou 2
<b>Croix Maître Renault</b> - bief lessivé en matrice (matrice sableuse, blanchâtre), sous la forme d'un niveau continu (épaisseur 1 à 2 m) et d'un puits vertical (largeur max 1,5 m) - bief argileux, brun	CMR 2 CMR 1
<b>Vallée Moutarde</b> - sables (faciès Fontainebleau) sous forme d'un niveau continu (épaisseur 1 à 2 m) et de poches (profondeur max 3m) - bief sableux, roux, faciès dominant - bief argilo-sableux, rouge à brun-rouge - bief argileux à argilo-sableux, blanc, à la base de la coupe	VM 1 VM 2 VM 3
<b>Tillières sur Avre</b> - passées ou lentilles de sables (faciès fontainebleau probable) - bief sablo-limono-argileux, beige à roux - bief limoneux, brun clair à roux, faciès dominant	Til 2 Til 1
<b>Bérou la Mulotière</b> - sables (faciès Fontainebleau) sous forme d'une poche (largeur 6 m et profondeur 3 m) - bief lessivé en matrice (matrice sableuse, blanchâtre), sous la forme d'un niveau discontinu (épaisseur 0 à 1 m) pouvant donner des puits verticaux (largeur 0,5 à 1 m) - bief sableux, jaune, à proximité de la poche de sable - bief sablo-argilo-limoneux, brun clair à beige, faciès dominant	BM
<b>Ilou</b> - bief lessivé en matrice (matrice sableuse, blanchâtre), au sommet de la carrière, sous la forme d'un niveau continu (épaisseur 0,5 à 1,5 m) - bief argilo-limoneux, brun, faciès dominant	II
<b>Acon</b> - sables (faciès Fontainebleau) sous forme de poches (largeur 1 à 10 m et profondeur 1 à > 10 m) - bief lessivé en matrice (matrice sableuse, blanchâtre à rosâtre), au sommet de la carrière, sous la forme d'un niveau discontinu (épaisseur 0,5 à 1,5 m) - bief sableux à sablo-argilo-limoneux, rouge à brun-rouge, marbré de gris par endroit - bief argileux à argilo-limoneux, jaune à beige, à la base de la coupe	Ac 3 Ac 2a et 2b Ac 1
<b>Saulnières</b> - sables du Thymerais, sous forme de poches (largeur et profondeur 1 à 3 m) - bief sableux, roux à rouge, localement à proximité des poches de sables - bief lessivé au sommet de la carrière (matrice sableuse, blanchâtre à ocre clair ou rosâtre), sous forme d'un niveau continu (épaisseur 1 à 3m) - bief limoneux, brun-rouge - bief argilo-limoneux, brun	Sau 2 Sau 3 Sau 1
<b>Fontaine les Ribouts</b> - bief argileux, brun	FR





Passez un ordre permanent aux Éditions du BRGM - BP 6009 - 45060 Orléans Cedex.

- N° 1 — **Hydrogéologie de la craie du bassin de Paris.** Colloque régional, Rouen, 25-26 mai 1978. Communications. 1 vol., 627 p. complété par le Document n° 3 (1978). - 250 FF.
- N° 2 — J. BODELLE — **Les formations nummulitiques de l'Arc de Castellane.** 2 vol., 581 p., 27 pl., 1 carte h.-t. (1971). - 250 FF.
- N° 3 — **Hydrogéologie de la craie du bassin de Paris.** Colloque régional, Rouen, 25-26 mai 1978. Rapports généraux, débats, conclusions. 115 p. (complément du Document n° 1) (1979). - 200 FF.
- N° 5 — D. FAUCONNIER — **Les dinoflagellés de l'Albien et du Cénomanién inférieur du Bassin de Paris.** 1 vol., 146 p., 17 fig., 16 pl., 30 tabl. (1979). - 150 FF.
- N° 8 — **Connaître le sous-sol, un atout pour l'aménagement urbain.** Colloque national, Lyon, 13-15 mai 1979. 2 tomes, 1 093 p., nb. fig. (1979). - 400 FF.
- N° 10 — P. JEANROT — **De l'exploitation du rayonnement X en microscopie électronique à balayage.** 122 p., 53 fig. (1979). - 104 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 11 — J. PERSON — **Interventions réglementaires du géologue agréé en vue de la protection des eaux destinées à l'alimentation humaine.** 193 p. (1979). - 150 FF.
- N° 12 — **Utilisation de la géochimie majeure pour la cartographie des terrains cristallins. Possibilités de traitement automatique des analyses au BRGM.** 126 p., 61 fig. (1979). - 100 FF.
- N° 13 — M. VILLEY — **Simulation thermique de l'évolution des kérogènes.** 1 vol., 240 p., 86 fig., 19 tabl., 10 pl. (1980). - 100 FF.
- N° 14 — J.-Y. SCANVIC, G. WEECKSTEEN — **Carte des linéaments de la France à 1/1 000 000. Une carte format 110 x 110 cm et une notice de 14 p.** Disponible pliée et à plat (1980). - 115 FF.
- N° 16 — C. GOLOUBINOFF — **Le Permo-houillier du nord du Bassin de Saint-Affrique (Aveyron).** 139 p., 35 fig., 11 pl. photos (1979). - 150 FF.
- N° 18 — P. ROUBICHOU — **Les formations métamorphiques de la région de Leyme près de Saint-Céré (Massif central français).** 160 p., 53 fig., 12 pl. photos, 4 cartes h.-t., 1 carte h.-t. couleurs (1980). - 150 FF.
- N° 19 — B. LAMOUILLE — **Géologie structurale et pétrologie de la région d'Uzerche (Corrèze, Massif central français).** 233 p., 75 fig., 12 pl. photos, 4 cartes h.-t. dont 1 en couleurs (1980). - 150 FF.
- N° 20 — P. PICOT, M. FÉVRIER — **Étude minéralogique d'échantillons du golfe de Californie (Campagne CYAMEX),** 114 p., 29 pl. ph. dont 2 en coul. (1980). - 100 FF.
- N° 23 — J.-B. CHAUSSIER — **Préparation matérielle d'une mission de prospection minière en zone intertropicale à l'usage du géologue et du prospecteur minier.** 1 vol., 35 p. (1980). - 50 FF.
- N° 24 — **Géologie comparée des gisements de phosphates et de pétrole.** Colloque international à la mémoire de M. KIEKEN et J.P. RAGOT (Orléans, 6-7 novembre 1979). 268 p., 77 fig., 4 tabl., 2 pl., 1 dpl. (1980). - 200 FF.
- N° 25 — E. OUDIN avec la participation de C. FOUILLAC, L. LEBEL — **Études minéralogiques et géochimiques des dépôts sulfurés sous-marins actuels de la ride est-pacifique (21° N).** Campagne rise. 241 p., 25 fig., 23 pl. noir et blanc, 2 pl. couleur, 16 tabl. (1981). - 150 FF.
- N° 26 — D. BONIJOLY — **Étude structurale et minéralisations d'une plate-forme carbonatée : le Quercy.** 229 p., 9 ann., 4 pl. h.-t. photos (1981). - 150 FF.
- N° 27 — A. GÉRARD, D. WESTERCAMP, P. BOUYASSE, G. DUBREUIL, J. VARET — **Étude géophysique préliminaire à une évaluation du potentiel géothermique des Antilles françaises.** 42 p. (1981). - 50 FF.
- N° 28 — P. BLERY-OUSTRIÈRE, M. BEURRIER, C. ALSAC — **Contribution à l'étude des nodules polymétalliques de la Zone Clarion, Clipperton.** 120 p. (1981). - 100 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 29 — **Connaître le sous-sol, un atout pour l'aménagement urbain.** Colloque national, Lyon, 13-15 mai 1979. Tome 3. Communications. 118 p. (1981). - 100 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 30 — **Communication du séminaire national, "La gestion régionale des sédiments",** Propriano (Corse), 27-29 mai 1981, organisé par le Ministère de l'Environnement et du Cadre de vie et le BRGM. 361 p., nbs fig. (1981). - 200 FF.
- N° 31 — D. MARITON — **Le bassin houiller du Bas-Dauphiné. Essai de synthèse géologique.** 46 p., 11 pl. h.-t., 8 annexes (1980). - 100 FF.
- N° 32 — (non publié).
- N° 33 — J.-P. SAUTY — **Du comportement thermique des réservoirs aquifères exploités pour le stockage d'eau chaude ou la géothermie basse enthalpie.** 221 p., 11 annexes (1982). - 200 FF.
- N° 34 — M. BONNET — **Méthodologie des modèles de simulation en hydrogéologie.** 438 p., nbs fig. (1982). - 300 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 35 — H. BELAYOUNI, D. FAUCONNIER, M. SLANSKY, J. TRICHET — **Étude du contenu organique des dépôts phosphatés du bassin de Gafsa (Tunisie).** 70 p., 17 fig., 2 pl. photos, 7 tabl. (1982). - 50 FF.
- N° 36 — J.-L. BLES — **Étude structurale des schistes et des filons de fluorine de l'Albigeois.** 58 p., 8 pl. h.-t., 1 fig. (1982). - 150 FF.
- N° 37 — A. PARFENOFF — **Un minerai traceur pour la prospection alluvionnaire : l'ilménite. Relations entre ilménites magnésiennes, basaltes alcalins, kimberlites et diamant.** 215 p., 29 fig., 51 tabl., 7 pl. ph. (1982). - 200 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 38 — C. GOUGOUSSIS — **Assainissement individuel et aptitude des sols à l'élimination et à l'épuration des effluents domestiques.** 354 p., 50 fig., 17 pl., 33 tabl. (1982). - 290 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 39 — **Programme de géologie profonde.** Colloque national, Paris, 15 juin 1982. Communications. 545 p., nbs fig. (1982). - 250 FF.
- N° 40 — **Programme de géologie profonde.** Colloque national, Paris, 15 juin 1982. Rapports généraux. 124 p. (1982). - 100 FF.
- N° 41 — P. DUTARTRE — **Étude de la fracturation du granite de la Margeride. Région de St-Alban-sur-Limagnole (Lozère).** 344 p., 4 dpl. h.-t., 91 fig., 10 annexes (1982). - 250 FF.

- N° 42 — B. CALINE — Le secteur occidental de la Baie du Mont-St-Michel. Morphologie, sédimentologie et cartographie de l'Estran. 250 p., 124 fig., 9 pl., 3 cartes h.-t. (1982). - 250 FF.
- N° 43 — 4e Conférence internationale sur la planification et la gestion des eaux. Marseille. 10-12 mai 1982. Communications. 836 p. (1982). - 400 FF.
- N° 44 — N. DOERLER — Influence du broyage sur les propriétés massiques et superficielles du quartz et de la biotite. Conséquences sur l'adsorption de tensio-actifs ioniques. 268 p., 6 pl. ph., 58 fig., 34 tabl. (1982). - 200 FF.
- N° 45 — Les milieux discontinus en hydrologie. Colloque national en hommage à G. CASTANY. 448 p., 42 communications (1982). - 300 FF. - (ÉPUISE).
- N° 46 — D. BONIJOLY, G. DELPONT — Étude du bassin des Causses et de la bordure cévenole par la télédétection et la géologie structurale. 63 p., 25 fig., 2 tabl., 19 pl. (1982). - 100 FF.
- N° 47 — Valorisation des ressources du sous-sol. Recueil des communications présentées au séminaire. Bilan annuel de l'action concertée. Paris. 12-16 octobre 1981. 284 p., 23 communications (1982). - 100 FF.
- N° 48 — L. DESCOMBES — Les gisements alluvionnaires de la Seine et de ses principaux affluents. Topographie et granulométrie d'après ces données d'exploitation. 153 p., 51 fig., 6 tabl., 31 pl. en annexe (1982). - 100 FF.
- N° 49 — G. LABLANCHE — Les calcaires lacustres paléogènes de la Champagne berrichonne. Étude cartographique, pétrographique, reconstitution du milieu de sédimentation. 127 p., 28 fig., 10 pl. photo, 4 cartes en annexe (1982). - 100 FF.
- N° 50 — F. LEBERT — Application des techniques de diagraphie dans le domaine de la prospection minière sur deux sites volcano-sédimentaires bretons : Bodennec et la Porte-aux-Moines. 112 p., 63 fig., 14 tabl., 39 pl. ann. (1982). - 100 FF.
- N° 51 — P. GUENNOG, Y. THISSE — Genèse de l'ouverture de la mer rouge et des minéralisations des fosses axiales. 112 p., 49 fig., 4 pl. annexes (1982). - 100 FF.
- N° 52 — G. POUIT, M. BIGOT, J. DELFOUR, J.-P. MILESI, P. PICOT — Les minéralisations actuelles et anciennes : l'exemple de la mer rouge. 90 p. (1983). - 100 FF.
- N° 53 — R. FLEURY — La formation de Saint-Cosme dans la Bresse du Nord. Ses relations avec les événements du Pléistocène bressan. 150 p., 11 dpl. h.-t. (1983). - 200 FF.
- N° 54 — B. LEMIERE — L'amas sulfuré de Chizeuil (Saône-et-Loire) : Étude géochimique de son environnement volcanosédimentaire dévonien supérieur et de son auréole d'altération hydrothermale. 142 p., 64 fig., 33 tabl. (1982). - 150 FF.
- N° 55 — Y. MOELO — Contribution à l'étude des conditions naturelles de formation des sulfures complexes d'antimoine et plomb (Sulfosels de Pb/Sb). Signification métallogénique. 624 p., 27 pl. ph. (1983). - 400 FF.
- N° 56 — Y. ATLAN, C. FELLER — Applications de la pédologie à la géotechnique routière. Exemple du Sénégal. 88 p., 10 fig., 4 tabl. (1983). - 100 FF.
- N° 57 — D. THIERY, M. VANDENBEUSCH, P. VAUBOURG — Interprétation des pompages d'essai en milieu fissuré aquifère. 54 p., 8 pl. h.-t., 24 fig., 6 tabl. (1983). - 100 FF. - (ÉPUISE).
- N° 58 — C.-O. VALETTE — Karsts et filons à fluorine dans le faisceau synclinal du Morvan. Le gisement d'Argentolle (Saône-et-Loire). 299 p., 96 fig., 16 tabl., 4 pl. h.-t., 2 cartes h.-t. (1983). - 200 FF.
- N° 59 — C. DADOU — Évaluation probabiliste de l'aléa sismique régional dans le Sud-Est de la France. 246 p., 47 fig., 29 tabl. (1983). - 150 FF. - (ÉPUISE).
- N° 60 — C. BERGERON, H. DEHAYS, T. POINTET — Remontées des nappes d'eau souterraine. Causes et effets. 56 p., nombreuses illustrations (1983). - 100 FF. - (ÉPUISE).
- N° 61 — Valorisation des ressources du sous-sol. Sophia-Antipolis, 3, 4 et 5 novembre 1982. 440 p. - 100 FF. - (ÉPUISE).
- N° 62 — A. BOURG — Modélisation du comportement des métaux traces à l'interface solide-liquide dans les systèmes aquatiques. 171 p., 80 fig., 20 tabl. (1983). - 300 FF.
- N° 63 — P. BOUYASSE, S. ROBERT, P. GUENNOG, S. MONTI — Bathymétrie détaillée (Seabeam), anomalies magnétiques dans les Antilles françaises. 80 p., 5 pl. h.-t., 18 fig. (1983). - 100 FF.
- N° 64 — P. MARTEAU — Le bassin permio-carbonifère d'Autun. Stratigraphie, sédimentologie et aspects structuraux. 198 p., 2 pl. h.-t., 54 fig., 19 tabl., 4 pl. ph. (1983). - 150 FF.
- N° 65 — T. AUGÉ — Étude minéralogique et pétrographique de roches basiques et ultrabasiques du complexe ophiolitique du Nord Oman. 300 p. (1983). - 150 FF.
- N° 66 — D. RABU, J.-J. CHAUVEL, J. CHANTRAINE — Le domaine interne de la chaîne cadomienne dans le Massif armoricain. Étude lithostratigraphique, géochimique et structurale le long d'une transversale en baie de Saint-Brieuc et dans le pays de Lamballe (Côtes-d'Armor). 56 p., 7 fig., 5 pl. h.-t. (1983). - 100 FF.
- N° 67 — J. CHANTRAINE *et al.* — Inventaire lithologique et structural du Briovérien (Protérozoïque) de la Bretagne centrale et du bocage normand pour la recherche de guides métallogéniques. 185 p., 16 ann. h.-t. (1983). - 300 FF.
- N° 68 — R. WYNS, J. LE METOUR — Le Précambrien du massif vendéen. Étude détaillée de deux coupes de référence (coupe de l'Eure et coupe de la Divatte) et synthèse des données récentes. 60 p., 2 pl. h.-t., 10 fig. (1983). - 100 FF.
- N° 69 — G. SUSTRAC — La bibliothèque du géologue. Bibliographie fondamentale thématique et régionale en Sciences de la Terre. 192 p. (1984). - 200 FF.
- N° 70 — C. VINCHON — Sédimentogenèse et métallogenèse du Permien du dôme du Barrot (Alpes-Maritimes, France). 444 p., 72 fig., 18 tabl., 18 pl. ph. (1984). - 300 FF.
- N° 71 — G. LABARRAQUE — Étude d'un plasma à couplage inductif (i.c.p.), 27 mhz, et application à l'analyse multi-élémentaire par spectrométrie d'émission d'ultra-violet d'échantillons géologiques. 194 p., 36 tabl. (1984). - 150 FF.
- N° 72 — M. LACAZE — Diagraphie par gamma de capture : instrumentation et modélisation. Applications aux minerais de nickel. 115 p. (1984). - 100 FF.

- N° 73 — J. DELFOUR, P. ISNARD, E. LECUYER, B. LEMIERE, F. LHOÏTE, B. MOINE, M. PIBOULE, P. PICOT, A. PLOQUIN, M. TEGYEY — Étude du gîte de pyrite de Chizeuil (Saône-et-Loire) et de son environnement volcano-sédimentaire dévonien et dinantien. 37 p., 20 fig., 2 tabl., 5 ann. (1984). - 250 FF.
- N° 74 — V. MENICHETTI avec la collaboration de A. GUILLEN — Techniques inverses en gravimétrie et magnétisme. Application à la terminaison sud et de l'anomalie magnétique du bassin de Paris. 120 p., 5 pl. h.-t. (1984). - 150 FF.
- N° 75 — B. PRADIER — Transport et fixation de l'uranium dans le domaine supergène. Études de cas et applications en prospection géochimique. 339 p., 102 fig., 46 tabl. (1984). - 300 FF.
- N° 76 — D. BONIJOLY, H. GERMAIN — Histoire tectonique post-hercynienne du bassin d'Alès (Gard). Chronologie des déformations et contrôle structural des minéralisations barytiques. 25 p., 13 fig., 7 pl. (1984). - 50 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 77 — H. BELAYOUNI — Étude de la matière organique dans la série phosphatée du bassin de Gafsa-Metlaoui (Tunisie). Application à la compréhension des mécanismes de la phosphatogenèse. 248 p. (1984). - 200 FF.
- N° 78 — Journées d'étude sur le comportement des canalisations pour le transport des eaux géothermales. Exposés et débats. Orléans. 20 et 21 mars 1984. 485 p. - 250 FF.
- N° 79 — Valorisation des ressources du sous-sol. Sophia-Antipolis. 8, 9, 10 novembre 1982. 376 p. (1984). - 100 FF.
- N° 80 — Géologie profonde de la France. Colloque national. Première phase d'investigation : 1983-1984. 232 p. - 100 FF.
- N° 81 — Géologie profonde de la France. Colloque national. Première phase d'investigation : 1983-1984. 11 fascicules. - 500 FF.
- N° 82 — P. TELEKI, C. WEBER — Remote sensing for geological mapping. Télédétection appliquée à la cartographie. 313 p. (1984). - 300 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 83 — J.-C. FLAGEOLLET — Mouvements de terrain. Colloque de Caen, 22-23-24 mars 1984. 670 p. (1984). - 290 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 84 — Journées sur le granite. Orléans-La Source, 26 juin 1984. Communications. 280 p. (1984). - 200 FF.
- N° 85 — M. RENARD — Géochimie des carbonates pélagiques. Mise en évidence des fluctuations de la composition des eaux océaniques depuis 140 MA. Essai de chimostratigraphie. 650 p., 190 fig. (1985). - 300 FF.
- N° 86 — C. ROQUIN — Traitement des données en prospection géochimique : facteurs de variation de signal et sélection de la composante anomalie. 316 p. (1985). - 300 FF.
- N° 87 — J.-M. LULIN — Un nouveau gîte à Nb, Ta, U, T.R. d'origine magmatique en Afrique orientale : le complexe alcalin tectonisé de Meponda Précambrien de la province de Niassa (République populaire du Mozambique). 370 p. (1985). - 400 FF.
- N° 88 — A. DEURBERGUE — Transformations post-sédimentaires sur la bordure nord du Massif central. Le quartz carrié des environs de La Châtre : les altérites siliceuses du bassin de Cosne-d'Allier. 184 p. (1985). - 200 FF.
- N° 89 — La microsonde électronique BRGM/CNRS. Journée dédiée à Monsieur le professeur Raimond Castaing. Comptes-rendus des exposés. 100 p. (1985). - 150 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 90 — A. COCHERIE — Interaction manteau-croûte, son rôle dans la genèse d'associations plutoniques calco-alcalines, contraintes géochimiques (éléments en traces et isotopes du strontium et de l'oxygène). 246 p. (1985). - 200 FF. (ÉPUISÉ).
- N° 91 — G. REVOIL — Étude d'une méthode de préconcentration des éléments traces dans les eaux. 162 p. (1985). - 100 FF. (ÉPUISÉ).
- N° 92 — D. WESTERCAMP. — Géologie de l'archipel des Grenadines (Petites Antilles méridionales). Étude monographique. 208 p. (1985). - 200 FF.
- N° 93 — Ph. BOUYASSE *et al.* — Géologie de la ride d'Aves et des pentes sous-marines du Nord des Petites Antilles. Esquisse bathymétrique à 1/1 000 000 de l'Est Caraïbe. 146 p., 2 dépliants h.-t. (1985). - 200 FF.
- N° 94 — M. BERTRAND — La Provence géologique. Excursion du centenaire de la découverte des nappes de charriage. 100 p. (1985). - 100 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 95 — Programme géologie profonde de la France. Deuxième phase d'investigation : 1984-1985. 13 fascicules (1985). - 700 FF.
- N° 96 — C. KING — Étude des sols et des formations superficielles par télédétection. Approche de leurs caractéristiques spectrales, spatiales et temporelles dans le visible et le proche infrarouge. 200 p. (1985). - (ÉPUISÉ).
- N° 97 — G. FARJANEL — La flore et le climat du Néogène et du Pléistocène de Bresse (France) d'après l'analyse pollinique. Implications chronostratigraphiques. 200 p. (1985). - 200 FF.
- N° 98 — J.-L. HONEGGER — Étude d'un échangeur à contact direct co-courant pour la valorisation thermodynamique de la géothermie moyenne enthalpie. 186 p. (1985). - 200 FF.
- N° 99 — M. JEBRAK — Contribution à l'histoire naturelle des filons (F, Ba) du domaine varisque. 510 p. (1985). - 300 FF.
- N° 100 — Programme géologie profonde de la France. Troisième phase d'investigations 1985-1986, GPF 3 - Forage Échassières n° 1. Rapport d'exécution et descriptions préliminaires. Thème 8 : Évolution géochimique et métallogénique d'un apex granitique. 323 p. (1985). - 200 FF.
- N° 101 — Géologie de la bordure méridionale du golfe tertiaire de Casamance (Sénégal, Guinée Bissau), par J.-P. PRIAN. Ostracodes tertiaires (Paléogène à Néogène) du bassin sénégal-guinéen, par G. CARBONNEL. 243 p. (1986). - 350 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 102 — J.-L. BLES avec la collaboration de R. BLANCHIN, D. BONIJOLY, P. DUTARTRE, J.-L. FEYBESSE, Y. GROS, J. LANDRY et P. MARTIN — Fracturation profonde des massifs rocheux granitiques. 316 p. (1986). - 300 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 103 — J.-F. OUVRY — Étude physique et rhéologique des argiles congelées. Application à l'argile profonde de Boom (Belgique). 247 p. (1986). - 200 FF.
- N° 104 — R. GABLE — Température, gradient et flux de chaleur terrestre. Mesures. Interprétation. 188 p. (1986). - 250 FF. (ÉPUISÉ).
- N° 105 — Programme géologie profonde de la France. Troisième phase d'investigations 1985-1986, GPF 3 - Forage de Chassole (Cézallier). Rapport d'exécution et descriptions préliminaires. Thème 10 : Géothermalisme actuel. 486 p. (1986). - 350 FF.
- N° 106 — P. DEVISMES — La détermination rapide des minéraux lourds des alluvions et des roches : utilisation pour l'inventaire minéralogique et la recherche minière (1986). - 60 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 107 — P. ROSSI — Organisation et genèse d'un grand batholite orogénique : le batholite calco-alcalin de la Corse (1986). - 250 FF.

- N° 108 — J. TOURENQ — Étude sédimentologique des alluvions de la Loire et de l'Allier, des sources au confluent. Les minéraux lourds des roches des bassins versants (1986). - 100 FF.
- N° 109 — J.-F. SAUNIER — Un domaine cristallophyllien dans le Protérozoïque supérieur (Briovérien) de Bretagne centrale : le dôme de Plouguenast (Côtes-d'Armor) (1986). - 200 FF.
- N° 110 — Les couches riches en matière organique et leurs conditions de dépôt : Réunion du GRECO 52, CNRS. Tours. 14-15 novembre 1985. 286 p., 20 pl. photo (1986). - (ÉPUISE).
- N° 111 — R. DEGALLIER — Interprétation des variations naturelles du niveau des nappes souterraines. Applications aux données provenant du bassin versant de Korhogo (Côte-d'Ivoire). 44 p., nombreuses figures (1986). - (ÉPUISE).
- N° 112 — D. GARCIA — Étude isotopique et géochimique des eaux thermales des Vosges méridionales. Application géothermique. 180 p., nombreuses illustrations (1986). - (ÉPUISE).
- N° 113 — A. LALLEMAND-BARRES *et al.* — Teneurs en nitrate des nappes phréatiques de la France. État 1983. Carte à 1/1 500 000. 20 p. (1986). - (ÉPUISE).
- N° 114 — P. HUBERT — Textures et inclusions fluides des quartz aurifères. Application au gîte de Cros-Gallet (Haute-Vienne, France) et au prospect de Sanoukou (district de Keneleba, Mali). 350 p., 82 fig., 11 pl. photo, 2 cartes (1986). - 300 FF. - (ÉPUISE).
- N° 115 — A. BARRAT — Étude du rôle des eaux souterraines dans le mécanisme des éruptions phréatiques. Application à la Montagne Pelée de Martinique et à la Soufrière de Guadeloupe. 190 p., 26 fig. (1986). - 200 FF. - (ÉPUISE).
- N° 116 — P. RICHARD — Structure et évolution alpine des massifs paléozoïques du Labourd (Pays Basque français). 384 p., 2 dpl. (1986). - 350 FF.
- N° 117 — E. MARCOUX — Isotopes du plomb et paragenèses métalliques. Traceurs de l'histoire des gîtes minéraux. Illustration des concepts de source, d'héritage et de régionalisme dans les gîtes français. Applications en recherche minière. 388 p., 12 pl. photo (1986). - 350 FF. - (ÉPUISE).
- N° 118 — J.K. KANG et A. KOSAKEVITCH — Étude texturale des encroûtements ferro-manganésifères thalassiques et hydrothermaux de l'Est-Caraïbe. 203 p., 41 pl. photo (1986). - 350 FF.
- N° 119 — E. LALLIER-VERGES — Micronodules de manganèse et sédiments pélagiques dans l'Océan Pacifique. Caractérisation, formation, diagenèse. 425 p., 42 tabl., 181 pl. h.-t. (1986). - 450 FF. - (ÉPUISE).
- N° 120 — J.-L. LESCUYER et D. GIOT avec la participation de M. DONNOT et P. BEZIAT — Les minéralisations Pb-Zn de Montagne Noire et leurs relations avec leur encaissant Cambrien carbonaté sur quelques exemples du versant nord (La Rabasse, Brusque, Lardenas, Peux, Les Comtes) et du versant sud (Bidaut, Tête Rousse). 270 p., nombreuses figures, 3 dépliants (1987). - 200 FF.
- N° 121 — V. BORNE — Le bassin Paléogène de Challans-Noirmoutier (France). Thèse de doctorat d'Université de Nantes. 272 p., nombreuses photos, 6 planches photo, 9 dépliants (1987). - 300 FF.
- N° 122 — C. BEAUFRERE — Stabilité des carrières souterraines abandonnées de l'Entre-Deux-Mers (Gironde). Influence des facteurs géologiques et mécaniques. 439 p., 149 fig., 5 pl. photo coul., 12 pl. en pochette (1987). - 400 FF.
- N° 123 — Programme géologie profonde de la France. Troisième phase d'investigation : 1985-1986 - GPF 3. Thème 11. Subsidence et diagenèse (Ardèche). 1 vol., 143 p., 36 fig., 7 tabl., 5 pl. h.-t. (1987). - 150 FF. - (ÉPUISE).
- N° 124 — Programme géologie profonde de la France. Thème 8. Évolution d'un apex granitique. Forage d'Échassières. Données analytiques : 1985-1987, 1 vol., 437 p. (1988). - 400 FF. - (ÉPUISE).
- N° 125 — Programme géologie profonde de la France. Thème 10. Géothermalisme actuel. Forages de Chassole (Cézallier). Données analytiques : 1985-1987. 1 vol., 178 p. (1988). - 200 FF.
- N° 126 — HILAL AL AZRI — Typologie des gisements de chromite dans la partie sud de l'ophiolite du Nord-Oman. 1 vol., 159 p., 82 fig., 10 tabl., 7 pl. photo (1987). - 200 FF. - (ÉPUISE).
- N° 127 — F. BECHENNEC — Géologie des nappes Hawasina dans les parties orientale et centrale des montagnes d'Oman. 1 vol., 474 p., 135 fig., 17 annexes, 8 tabl., 36 photos, 2 pl. h.-t. (1988). - 450 FF.
- N° 128 — M. BEURRIER — Géologie de la nappe ophiolitique de Samail dans les parties orientale et centrale des montagnes d'Oman. 412 p., 206 fig., 68 tabl., 8 pl. ph., 7 pl. h.-t. (1988). - 400 FF.
- N° 129 — J. LE METOUR — Géologie de l'autochtone des montagnes d'Oman. La fenêtre du Saih Hatat. 1 vol., 425 p., 151 fig., 10 tabl., 3 pl. ph. (1988). - 450 FF.
- N° 130 — D. RABU — Géologie de l'autochtone des montagnes d'Oman. La fenêtre du Jabal Akdar. 1 vol., 614 p., 1 carte (1989). - 500 FF.
- N° 131 — J.-C. BARFETY — Le Jurassique dauphinois entre Durance et Rhône. Étude stratigraphique et géodynamique (zone externe des Alpes occidentales françaises). 1 vol., 656 p., 175 fig., 19 tabl., 24 pl. ph. (1988). - 600 FF.
- N° 132 — C. BOUCHET — Hydrogéologie du milieu volcanique. Le bassin de la Veyre (Chaîne des Puys - Massif central). Analyse et modélisation du bassin versant du lac d'Aydat. Étude d'un aquifère fissuré basaltique. 1 vol., 319 p., 137 fig., 26 tabl., 3 annexes (1987). - 200 FF. - (ÉPUISE).
- N° 133 — J.-G. ASTRUC — Le paléokarst quercynois au Paléogène. Altérations et sédimentations associées. 1 vol., 150 p., 63 fig., 5 tabl., 26 pl. h.-t. - 150 FF. - (ÉPUISE).
- N° 134 — S. GENTIER — Morphologie et comportement hydromécanique d'une fracture naturelle dans le granite sous contrainte normale. Étude expérimentale et théorique. 1 vol., 597 p. (1987). - 450 FF. - (ÉPUISE).
- N° 135 — J. GUERANGE-LOZES — Les nappes varisques de l'Albigeois cristallin. Lithostratigraphie, volcanisme et déformations. 1 vol., 259 p., 7 annexes, 34 fig., 18 tabl., 16 pl. photo (1987). - 450 FF.
- N° 136 — Programme géologie profonde de la France. Phase d'investigation : 1986-1987. Thème 2 : Socle et anomalie magnétique du bassin de Paris - Forage de Sancerre-Couy. Terrains sédimentaires : rapport d'exécution et descriptions préliminaires. 1 vol., 185 p. (1987). - 200 FF.
- N° 137 — Programme géologie profonde de la France. Phase d'investigation : 1986-1987. Thème 2 : Socle et anomalie magnétique du bassin de Paris - Forage de Sancerre-Couy. Socle : résultats préliminaires. 1 vol., 323 p., (1988). - 300 FF.
- N° 138 — Programme géologie profonde de la France. Phase d'investigation : 1986-1987. Thème 2 : Socle et anomalie magnétique du bassin de Paris - Forage de Sancerre-Couy. Données géophysiques. 1 vol., 259 p. (1988). - 250 FF. - (ÉPUISE).

- N° 139 — **Programme géologie profonde de la France.** Colloque national. Troisième phase d'investigation : 1985-1986. GPF 3. Thème 1 : Chevauchements nord-varisques (faille du Midi). *1 vol., 93 p.* (1987). - 100 FF.
- N° 140 — **Programme géologie profonde de la France.** Colloque national. Troisième phase d'investigation : 1985-1986. GPF 3. Thème 3 : Chevauchements synmétamorphes varisques du Limousin. *1 vol., 104 p.* (1987). - 100 FF.
- N° 141 — **Programme géologie profonde de la France.** Colloque national. Troisième phase d'investigation : 1985-1986. GPF 3. Thème 4 : Soubassement précambrien du domaine varisque en Bretagne. *1 vol., 49 p.* (1987). - 50 FF.
- N° 142 — **Programme géologie profonde de la France.** Colloque national. Troisième phase d'investigation : 1985-1986. GPF 3. Thème 5 : Allochtonie des unités alpines. *1 vol., 94 p.* (1987). - 100 FF.
- N° 143 — **Programme géologie profonde de la France.** Colloque national. Troisième phase d'investigation : 1985-1986. GPF 3. Thème 6 : Allochtonie des massifs paléozoïques nord-pyrénéens. *1 vol., 68 p.* (1987). - 100 FF.
- N° 144 — **Programme géologie profonde de la France.** Colloque national. Troisième phase d'investigation : 1985-1986. GPF 3. Thème 7 : Bassins paléozoïques cachés sous l'Aquitaine. *1 vol., 57 p.* (1987). - 50 FF.
- N° 145 — **Programme géologie profonde de la France.** Colloque national. Troisième phase d'investigation : 1985-1986. GPF 3. Thème 9 : Volcanisme récent du Massif central (Mont-Dore). *1 vol., 65 p.* (1987). - 100 FF.
- N° 146 — **Programme géologie profonde de la France.** Colloque national. Troisième phase d'investigation : 1985-1986. GPF 3. Thème 12 : Projet Vosges. Le socle vosgien, segment de la chaîne varisque d'Europe. *1 vol., 136 p.* (1987). - 150 FF. - (ÉPUISE).
- N° 147 — M. LYS — **Biostratigraphie du Carbonifère et du Permien en Mésogée** (Espagne, Afrique du Nord, Régions Égéennes, Proche-Orient). Études micropaléontologiques (foraminifères). Paléobiogéographie. *1 vol., 315 p., 72 fig., 21 planches, 28 tabl. dont 12 h.-t.* (1988). - 300 FF. - (ÉPUISE).
- N° 148 — J. AGARD, A. BENNANI, F. PERMINGEAT — **Les unités métallifères à tungstène du Maroc.** Une vue d'ensemble. *1 vol., 50 p., 7 fig., 2 tabl.* (1988). - 100 FF. - (ÉPUISE).
- N° 149 — D. BILLAUX, B. FEUGA — **Étude comparée des méthodes de modélisation de la fracturation des roches.** *1 vol., 45 p., 22 fig.* (1988). - 50 FF. - (ÉPUISE).
- N° 150 — A. CHEREAU, R. DEGALLIER, A. DURAND *et al.* — **Détermination des paramètres hydrodynamiques des nappes souterraines à partir de leurs variations de niveau sous l'influence des pompes.** *1 vol., 737 p., 15 fig.* (1988). - 450 FF. - (ÉPUISE).
- N° 151 — P. MANDIER — **Le relief de la moyenne vallée du Rhône au Tertiaire et au Quaternaire.** Essai de synthèse paléogéographique. *3 vol., 654 p., 229 fig., 18 tabl., 11 cartes, 5 pl. h.-t.* (1988). - 750 FF.
- N° 152 — P. CHEVREMONT, C. GAGNY, H. DE LA ROCHE, J.-P. PUPIN, P. ROSSI — **Représentation cartographique du plutonisme acide et du plutonisme intermédiaire à basique associé.** *1 vol., 68 p., 19 fig., 2 tabl.* (1988). - 100 FF. - (ÉPUISE).
- N° 153 — J. BODIN — **Le Dévonien inférieur et moyen des Pyrénées ariégeoises et centrales.** Biostratigraphie, séries hétéropiques et mise en évidence de nappes hercyniennes précoces. *1 vol., 270 p., 79 fig., 5 tabl.* (1988). - 250 FF.
- N° 154 — M. URVOIS — **Apports de l'estimation géostatistique de l'épaisseur des unités métallifères dans la compréhension des mécanismes de mise en place des sédiments de la fosse Atlantique II (Mer Rouge).** *1 vol., 228 p., 81 fig., 5 tabl.* (1988). - 250 FF.
- N° 155 — H. MASSOUD — **Modélisation de la petite fracturation par les techniques de la géostatistique.** *1 vol., 210 p., 42 fig.* (1988). - 200 FF. - (ÉPUISE).
- N° 156 — B. CALINE, Y. GRUET, C. LEGENDRE, J. LE RHUN, A. L'HOMER, R. MATHIEU, R. ZBINDEN — **Les récifs à Annélides (hermelles) en baie du Mont-Saint-Michel.** Écologie, géomorphologie, sédimentologie, implications géologiques. *1 vol., 190 p., 52 fig., 10 pl. photo* (1988). - 200 FF.
- N° 157 — D. THIEBLEMONT — **Le magmatisme paléozoïque en Vendée.** Apport de la géochimie des éléments traces et de la pétrologie du métamorphisme à la compréhension du développement orogénique varisque. *1 vol., 372 p., 128 fig., 27 tabl., 10 pl. photo, 58 ann.* (1988). - 350 FF.
- N° 158 — **Gisements métallifères dans leur contexte géologique.** Actes du colloque PIRSEM. *Vol. 1, 488 p., nb. fig., vol. 2, 902 p., nb. fig.* (1988). - 650 FF.
- N° 159 — I. CZERNICHOVSKI-LAURIOL — **Modélisation de l'évolution des fluides géothermaux lors de leur exploitation par forages.** *1 vol., 202 p., 33 fig., 9 tabl.* (1988). - 200 FF.
- N° 160 — **Hydrogéologie et sûreté des dépôts de déchets radioactifs et industriels toxiques.** Vol. 1 : Communications Association internationale des hydrogéologues. *1 vol., 634 p., 270 fig., 35 tabl.* (1988). - 500 FF. - (ÉPUISE).
- N° 161 — **Hydrogéologie et sûreté des dépôts de déchets radioactifs et industriels toxiques.** Vol. 2 : Actes Association internationale des hydrogéologues. *1 vol., 160 p., 11 fig., 2 tabl.* (1988). - 150 FF.
- N° 162 — P. LOISEAU — **Étude structurale et géostatistique des gneiss de la région du Cézallier (Massif central français).** Modélisation tridimensionnelle de réseaux de fractures. Application à l'écoulement des fluides. *1 vol., 192 p., 83 fig., 15 tabl.* (1988). - 200 FF.
- N° 163 — D. NURY — **L'Oligocène de Provence méridionale.** Stratigraphie dynamique sédimentaire. Reconstitutions paléogéographiques. *1 vol., 418 p., 120 fig., 37 tabl., 7 pl. photo* (1988). - 400 FF.
- N° 164 — J.-P. PLATEL — **Le Crétacé supérieur de la plate-forme septentrionale du Bassin d'Aquitaine.** Stratigraphie et évolution géodynamique. *1 vol., 578 p., 100 fig., 21 tabl., 10 cartes coul.* (1989). - 500 FF.
- N° 165 — **Programme géologie profonde de la France.** Programme national. Cibles de forages profonds suggérés par les profils sismiques ECORS. *1 vol., 46 p., 22 fig.* (1988). - 50 FF. - (ÉPUISE).
- N° 166 — M. LARDEAU — **Minéralogie et pétrogenèse du minerai sulfuré du gisement volcano-sédimentaire à Zn-Cu-Ba. (Pb-Ag) de Chessy-les-Mines (Rhône).** Application à l'étude des amas sulfurés métamorphisés. *1 vol., 196 p., 74 fig., 32 tabl., 5 ann.* (1989). - 200 FF.
- N° 167 — Y. MO—LO, E. MAKOVICKY et S. KARUP-MOLLER — **Sulfures complexes plombo-argentifères : minéralogie et cristalochimie de la série andorite-fizelyite (Pb, Mn, Fe, Cd, Sn)<sub>3</sub> — 2 x (Ag, Cu)x (Sb, Bi, As)<sub>2</sub> + x (S, Se)<sub>6</sub>.** *1 vol., 114 p., 18 fig., 21 tabl., 58 pl. photo en ann.* (1989). - 100 FF.
- N° 168 — S. LOUAHALA — **Signatures spectrales de roches en milieu tempéré.** Valeurs réelles et valeurs perçues par le satellite. *1 vol., 212 p., 79 fig., 15 tabl., 5 photos* (1989). - 200 FF.

- N° 169 — J.-C. ARAGON — **Sédimentologie et stratigraphie séquentielle de l'Albien dans le bassin de Quillan et le Synclinorium d'Ascat (Zone nord-pyrénéenne, Aude)**. 1 vol., 192 p., 47 fig., 17 pl. photo (1988). - 200 FF.
- N° 170 — M. BONNEMAISON — **Indices de diagenèse liés aux nannofossiles calcaires dans le Crétacé des Pyrénées. Comparaison avec des sites océaniques dans le Golfe de Gascogne**. 1 vol., 272 p., 47 fig., 47 tabl., 24 pl. photo (1988). - 250 FF.
- N° 171 — P. ANDREIEFF, P. BOUYASSE et D. WESTERCAMP — **Géologie de l'arc insulaire des petites Antilles et évolution géodynamique de l'est-Caraïbe**. 1 vol., 392 p., 40 fig., 7 tabl., 9 pl. photo (1989). - 400 FF.
- N° 172 — J. DUBREUILH — **Synthèse paléogéographique et structurale des dépôts fluviatiles tertiaires du nord du bassin d'Aquitaine. Passage aux formations palustres, lacustres et marines**. 1 vol., 468 p., 79 fig., 9 tabl., 2 ann. (1989). - 450 FF.
- N° 173 — P. BARANGER — **Origine et diagenèse des constituants organiques associés aux niveaux salifères tertiaires de Bresse (France). Étude expérimentale de la réduction d'espèces métalliques par la matière organique sédimentaire**. 1 vol., 424 p., 51 fig., 5 tabl., 4 pl. photo (1989). - 400 FF.
- N° 174 — J. TOURENQ — **Les sables et argiles du Bourbonnais (Massif central, France). Une formation fluvio-lacustre d'âge pliocène supérieur. Étude minéralogique, sédimentologique et stratigraphique**. 1 vol., 340 p., 140 fig., 109 tabl., 7 pl. photo (1989). - 350 FF.
- N° 175 — J.-P. CAPDEVILLE — **Synthèse paléogéographique et structurale des dépôts fluvio-lacustres tertiaires du nord du bassin Aquitain entre Lot et Dordogne**. 1 vol., 302 p., 78 fig., 12 tabl. (1989). - 400 FF.
- N° 176 — **Programme géologie de la France. Programme national. Forages scientifiques de l'Ardèche**. 1 vol., 116 p., 38 fig., 8 tabl. (1989). - 100 FF.
- N° 177 — M. POUPON — **Les altérations hydrothermales associées aux amas sulfurés de Chessy et de Sain-Bel (Paléozoïque, série de la Brévenne, Massif central français)** (1989). - 300 FF.
- N° 178 — D. PRIMEY et G. FARJANEL avec la collaboration de D. FAUCONNIER — **Étude paléobotanique et palynologique des gisements stéphanautuniens de Lucenay-lès-Aix et Devay (Bassin de Decize, Nièvre)**. 1 vol., 210 p., 51 fig., 10 tabl., 8 pl. photo (1989). - 250 FF.
- N° 179 — M. DONSIMONI avec la collaboration de J.-F. BECQ-GIRAUDON, J. BOIS, M. DEGOUY, G. GONZALEZ, D. MARITON, J.-F. PASQUET, D. PRIMEY, C. REMOND — **Le gisement de charbon de Lucenay-lès-Aix (Nièvre). Essai de synthèse géologique d'après les sondages récents (1981-1986)**. 1 vol., 84 p., 18 fig., 6 tabl. (1988). - 250 FF.
- N° 180 — J.-M. PUIG — **Le système karstique de la fontaine de Vauluse**. 1 vol., 214 p., 69 fig., 27 tabl. (1990). - 200 FF. - (ÉPUISE).
- N° 181 — **Colloque : «Valorisation des ressources du sous-sol», recueil des communications. Paris, 27-28 novembre 1984**. 1 vol., 76 p., 23 fig., 5 tabl. (1990). - 70 FF.
- N° 182 — **Colloque-bilan : «Valorisation des ressources minérales», recueil des communications. Paris, 27-28 septembre 1988**. 1 vol., 324 p., 80 fig., 20 tabl. (1990). - 350 FF.
- N° 183 — **Mobilité et concentration des métaux de base dans les couvertures sédimentaires. Manifestations, mécanismes, prospection. (Mobility and concentration of base metals in sedimentary cover rocks. Manifestations, mechanisms, prospection)**. Coordonné par H. Pélissonnier, J.-F. Sureau. 1 vol., nb. illustrations (1990). - 600 FF.
- N° 184 — J. ROJAS, D. GIOT, Y.-M. LE NINDRE, A. CRIAUD, C. FOUILLAC, M. BRACH, A. MENJOZ, J.-C. MARTIN, M. LAMBERT, avec la collaboration de J.-P. CHILES, A.-M. FOUILLAC, H. PAUWELS — **Caractérisation et modélisation du réservoir géothermique du Dogger, Bassin Parisien, France. Rapport final**. 1 vol., 240 p., 138 fig., 32 tabl. (1990). - 300 FF.
- N° 185 — A. GENTER — **Géothermie roches chaudes sèches, le granite de Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin, France)**. 1 vol., 246 p., 82 fig., 16 tabl., 4 ann., 4 pl. photo (1990). - 250 FF.
- N° 186 — D. BILLAUX — **Hydrogéologie des milieux fracturés. Géométrie, connectivité et comportement hydraulique**. 1 vol., 296 p. (1990). - 300 FF. - (ÉPUISE).
- N° 187 — X. WU — **L'arsénopyrite aurifère, composition, conditions de genèse. L'apport des synthèses minérales et de l'étude de gisements d'or (Le Châtelet, l'Aurières, France)**. 1 vol., 209 p., 52 fig., 20 tabl., 4 pl. (1990). - 350 FF.
- N° 188 — M. GUIOMAR — **Le Carbonifère des chaînes subalpines de Haute-Provence (France) dans son cadre structural**. 1 vol., 246 p., 149 fig., 4 pl. photo (1990). - 400 FF.
- N° 189 — V. BOUCHOT — **Contexte géologique et structural des minéralisations aurifères du district de Saint-Yrieix (Limousin, Massif central français)**. 1 vol., 284 p., 86 fig., 19 tabl., 1 pl. photo (1990). - 300 FF.
- N° 190 — M. SCHULER — **Environnements et paléoclimats paléogènes palynologie et biostratigraphie de l'Éocène et de l'Oligocène inférieur dans les fossés rhénan, rhodanien et de Hesse**. 1 vol., 503 p., 144 fig., 87 tabl., 14 pl. h.-t. (1990). - 600 FF.
- N° 191 — D. VASLET — **Le paléozoïque (anté-permien supérieur) d'Arabie saoudite. Volume 1. Histoire géologique de la bordure occidentale de la plate-forme arabe**. 1 vol., 209 p., nbs. fig. (1990). - 250 FF. - (ÉPUISE).
- N° 192 — Y.-M. LE NINDRE, J. MANIVIT, D. VASLET — **Géodynamique et paléogéographie de la plate-forme arabe du Permien au Jurassique. Volume 2. Histoire géologique de la bordure occidentale de la plate-forme arabe**. 1 vol., 280 p., 54 fig., 4 tabl., 4 annexes (1990). - 500 FF.
- N° 193 — Y.-M. LE NINDRE, D. VASLET, J. MANIVIT — **Le Permo-Trias d'Arabie centrale. Volume 3. Histoire géologique de la bordure occidentale de la plate-forme arabe**. 290 p., 51 fig., 4 tabl., 11 pl. photo. (1990). - 600 FF.
- N° 194 — J. MANIVIT, Y.-M. LE NINDRE, D. VASLET — **Le Jurassique d'Arabie centrale. Volume 4. Histoire géologique de la bordure occidentale de la plate-forme arabe**. 559 p., 74 fig., 1 tabl., 12 pl. photo. (1990). - 600 FF.
- N° 195 — COLLECTIF — **L'eau souterraine, un patrimoine à gérer en commun, colloque 6-7 novembre 1990, Paris. Volume 1. Communications**. 443 p. (1990). - 750 FF.
- N° 196 — COLLECTIF — **L'eau souterraine, un patrimoine à gérer en commun. Colloque 6-7 novembre 1990, Paris. Volume 2. Rapports généraux. Table ronde**. 171 p. (1992). - 170 FF. - (ÉPUISE).
- N° 197 — O. MAQUAIRE — **Les mouvements de terrain de la côte au Calvados. Recherche et prévention**. 1 vol., 431 p., 157 fig., 16 ph. (1990). - 350 FF.
- N° 198 — O. ROUZEAU — **Problématique de la transposition des modèles de distribution de température dans le sol aux interprétations issues de la télédétection thermique spatiale. Application au bassin de Paris**. 1 vol., 193 p., 96 fig., 54 pl. h.-t. (1990). - 400 FF.

- N° 199 — B. CROCHET — Molasses syntectoniques du versant nord des Pyrénées : la série de Palassou. *1 vol., 387 p., 129 fig.* (1990). - 400 FF.
- N° 200 — COLLECTIF — Programme géologie profonde de la France. Phase 1989-1990. Thème 11. Ardèche : diagenèse et relations fluides-roches. Forages scientifiques de l'Ardèche. Les interactions fluides-roches sur une paléomarge distensive. Forage de Balazuc 1 : Rapport d'exécution et données préliminaires. *1 vol., 126 p., 52 fig., 23 tabl.* (1990). - 150 FF.
- N° 201 — G. BRONNER — Structure et évolution d'un craton archéen. La dorsale Réguibat occidentale (Mauritanie). Tectonique et métallogénie des formations ferrifères. *448 p., 84 fig., 9 cartes h.-t.* (1992). - 750 FF.
- N° 202 — H.-T. LIAO — Estimation des réserves récupérables de gisements d'or. Comparaison entre le krigeage disjonctif et le krigeage des indicatrices. *1 vol., 198 p., 100 fig., 44 tabl.* (1990). - 400 FF.
- N° 203 — P. FREYSSINET — Géochimie et minéralogie des latérites du Sud-Mali. *1 vol., 278 p., 87 fig., 3 tabl., 8 ph.* (1991). - 350 FF.
- N° 204 — M.-M. BLANC-VALLERON — Les formations paléogènes évaporitiques du bassin potassique de Mulhouse et des bassins plus septentrionaux d'Alsace. *514 p., 162 fig., 47 tabl., 185 ph.* (1991). - 500 FF.
- N° 205 — C. CENSIER — Dynamique sédimentaire d'un système fluvial diamantifère mésozoïque : la formation de Carnot (République centrafricaine). *568 p., 129 fig., 48 tabl., 29 ph.* (1991). - 570 FF.
- N° 206 — P. VALLA — Applications de la modélisation numérique aux méthodes d'électromagnétisme fréquentiel en prospection géophysique. *472 p., 108 fig., 1 tabl.* (1991). - 480 FF.
- N° 207 — M. TERRIER — Néotectonique de la Provence occidentale (France). Vers une analyse multicritère des déformations récentes. Applications à la classification des structures sismogènes. *1 vol., 232 p., 76 fig., 16 tabl.* - 450 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 208 — J.-P. DEROIN — Méthodologie d'utilisation de l'imagerie satellitaire à haute résolution spatiale en zone tempérée. Apports à la connaissance géomorphologique, géologique et minérale des Cévennes et du Bas-Languedoc (sud de la France). *1 vol., 386 p., 71 fig., 8 tabl., 7 ph.* (1992). - 350 FF.
- N° 209 — J.-L. SCHNEIDER, J.-P. WOLF — Carte géologique et cartes hydrogéologiques à 1/1 500 000 de la République du Tchad. Mémoire explicatif. *2 vol.* - 600 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 210 — N. MOUKOLO — Hydrogéologie du Congo. *130 p.* (1992). - 150 FF.
- N° 211 — Géologie profonde de la France. Forum GPF. Nouvelles cibles, 18 mars 1992, Paris. *1 vol., 130 p., 37 fig.* (1992). - 100 FF.
- N° 212 — J. LORENZ — Le Dogger du Berry. Contribution à la connaissance des plates-formes carbonatées européennes du Jurassique. *1 vol., 400 p., 12 pl.* (1992). - 450 FF.
- N° 213 — VIth international symposium on the observation of the continental crust through drilling Continental scientific drilling programmes. Géologie profonde de la France. *1 vol., 288 p., 10 fig., 2 tabl.* (1992). - 100 FF.
- N° 214 — L. MERCIER — Approche thermique de la collision continentale dans le Massif central français : exemple des nappes de l'Artense. *1 vol., 234 p., nb fig., 14 tabl.* (1992). - 250 FF.
- N° 215 — Y.-M. LENINDRE, Ph. DUTARTRE — Découverte du bassin d'Arcachon par la télédétection spatiale. *1 vol., 110 p., 23 fig., 27 pl.* (1993). - 500 FF.
- N° 216 — J.-C. GOUJOU — Analyse pétro-structurale dans un avant-pays métamorphique : influence du plutonisme tardi-orogénique varisque sur l'encaissant épi à mésozonal de Vendée. *1 vol., 347 p.* (1992). - 400 FF.
- N° 217 — F. GIRAULT — Auscultation par imagerie numérique de quelques versants instables, *1 vol., 193 p.* (1992). - 200 FF.
- N° 218 — Forage scientifique Ardèche. Le forage de Balazuc. *1 vol., 122 p.* (1992). - 450 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 219 — Late orogenic extension in Mountain-Belts. *1 vol., 230 p.* (1993). - 450 FF.
- N° 220 — Y. LEI — La tectonique cassante du gisement aurifère de Salsigne (Aude, France). *1 vol., 174 p.* (1993). - 450 FF.
- N° 221 — D. RABU (coordinator) — Stratigraphy and structure of the Oman mountains. *1 vol., 262 p., 143 fig., 24 tabl., 4 pl. h.t.* (1993). - 650 FF.
- N° 222 — F. MENILLET — Les meulière du bassin de Paris (France) et les faciès associés. Rôle des altérations supergènes néogènes à quaternaire ancien dans leur genèse. *1 vol., 425 p., 186 fig., 34 tabl., 5 pl. photo.* (1993). - 450 FF.
- N° 223 — VIe Symposium international sur l'observation de la croûte continentale par forage (VIth International Symposium of the observation of the continental crust through drilling). Publications. Géologie de la France. Paris 7-10 avril 1992 sous les auspices du Ministre de la recherche et de la technologie et du Programme international sur la lithosphère. *1 vol., 349 p.* (1993). - 400 FF.
- N° 224 — J.-P. MILESI, J.-L. LESCUYER — The Chessy Zn-Cu-Ba massive sulphide deposit and the devonian Brevenne volcanosedimentary belt (eastern Massif central, France). *1 vol., 258 p., 18 fig., 4 tabl., 8 pl.* (1993). - 350 FF.
- N° 225 — M. MOISY — Evolution de la perméabilité et de la circulation des fluides hydrothermaux dans une zone de cisaillement fragile. *1 vol., 214 p., 81 fig.* (1993). - 280 FF.
- N° 226 — A. DAVID — Influence des paramètres hydroclimatologiques sur les déplacements verticaux du radon-222 en zone non-saturée. *1 vol., 199 p., 111 fig., 3 annexes* (1995). - 500 FF.
- N° 227 — Atelier sur les ressources minérales et le développement durable. Elincourt Sainte-Marguerite (France) (5-7 mai 1994). Résumés et documents de base. *167 p.* Mineral resources and sustainable development : a workshop. Elincourt Sainte-Marguerite (France) 5-7 may 1994. Abstracts and background documents. *156 p.* (1994) - 400 FF.
- N° 228 — J. JEHLICKA — Etude structurale de matières organiques soumises à des processus métamorphiques. *1 vol., 240 p., 38 fig., 23 tabl., 10 pl. photo* (1994). - 480 FF.
- N° 229 — Ph. ALVAREZ — Les facteurs de contrôle de la sédimentation du supergroupe ouest-congolien (Sud-Congo). Rampe carbonatée et activité biologique au Protérozoïque supérieur. *1 vol., 235 p., 56 fig., 18 pl. photo* (1995). - 500 FF.
- N° 230 — D. LAHONDÈRE — Les schistes bleus et les éclogites à lawsonite des unités continentales et océaniques de la Corse alpine. Nouvelles données pétrologiques et structurales. *1 vol., 285 p., 117 fig., 29 tabl., 6 pl. photo* (1996) - 600 FF.
- N° 231 — C. ROTH — Contribution de la géostatistique à la résolution du problème inverse en hydrogéologie. *1 vol., 195 p., 81 fig.* (1995). - 500 FF.
- N° 232 — F. GUÉRIN — Production et mécanismes de migration du radon-222 dans les milieux fissurés : application à la recherche des discontinuités perméables du socle cristallin. *1 vol., 282 p., 141 fig., 130 tabl.* (1995). - 600 FF.

- N° 243 — Colloque international **Minéralogie fondamentale et appliquée** à la mémoire de Claude GUILLEMIN, 1923-1994. Résumés des communications. Institut de France 4 et 5 septembre 1995. *1 vol., 117 p.* (1995). - **80 FF.**
- N° 244 — **Workshop on Albanian ophiolites and related mineralization.** IUGS/UNESCO modeling programme, 10-17 October 1995. Papers and abstracts. Field guidebook. *1 vol., 191 p., 41 fig., 25 tabl.* (1995). - **400 FF.**
- N° 245 — D. DESSANDIER — **Etude du milieu poreux et des propriétés de transfert des fluides du tuffeau blanc de Touraine. Application à la durabilité des pierres en œuvre.** *1 vol., 279 p., 97 fig., 53 tabl.* (1995). - **600 FF.**
- N° 246 — G. OUILLOU — **Application de l'analyse multifractale et de la transformée en ondelettes anisotropes à la caractérisation géométrique multi-échelle des réseaux de failles et de fractures.** *1 vol., 313 p., 129 fig.* (1995). - **650 FF.**
- N° 247 — Colloque Géofrance 3D. **Connaissance des structures et des processus géologiques du sous-sol de la France : vers un observatoire 3D de la croûte continentale. Synthèse des groupes thématiques.** *1 vol., 88 p., 23 fig.* (1995). - **200 FF.**
- N° 248 — Colloque **Formations superficielles et géomorphologie.** Rouen 19-20 mars 1996. *1 vol., 99 p., 14 fig.* (1996). - **250 FF.**
- N° 249 — F.G. BOURROUILH-LE JAN — **Plates-formes carbonatées et atolls du Centre et Sud Pacifique. Stratigraphie, sédimentologie, minéralogie et géochimie. Diagenèses et émergences : aragonite, calcite, dolomite, bauxite et phosphate.** *1 vol., 365 p., 215 fig.* (1996). - **600 FF.**
- N° 250 — F. LÉONE — **Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain.** *1 vol., 286 p., 65 fig., 34 tabl., 17 annexes* (1996). - **600 FF**
- N° 251 — C. DEZAYES — **Caractérisation et interprétation d'un volume rocheux fracturé à partir de données de forages. Les forages géothermiques de Soultz-sous-Forêts.** *1 vol., 222 p., 117 fig., 7 tabl.* (1996). - **500 FF.**
- N° 252 — C. CARNEC — **Interférométrie SAR différentielle. Application à la détection et au suivi de mouvements de terrain.** *1 vol., 173 p., 77 fig.* (1996). - **400 FF.**
- N° 253 — A. GUTTIEREZ - **Evaluation des ressources en eau souterraine de l'île de Malte.** *1 vol., 348 p., 161 fig., 58 tabl., 3 annexes* (1996). - **600 FF.**
- N° 254 — S. EL MAGNOUNI - **Méthodologie d'aide à la décision pour l'évaluation et la gestion multicritère des ressources en eau souterraine.** *1 vol., 180 p., 50 fig., 3 annexes* (1996). - **400 FF.**
- N° 255 — M. CALVET - **Morphogenèse d'une montagne méditerranéenne : les Pyrénées orientales.** 3 vol., 1177 p., 5 pl. h.t. en pochette. (1996). - **900 FF.**
- N° 256 - **Colloque contribution des eaux souterraines au fonctionnement des hydrosystèmes, conséquences pour la gestion.** *1 vol., 134 p., 46 fig., 9 tabl.* (1996). - **350 FF.**
- N° 257 - M. CHABART - **La recharge de l'aquifère multicouche du Roussillon et les conséquences d'un éventuel changement climatique sur la gestion de la ressource en eau (Pyrénées-Orientales).** *1 vol., 160 p., 132 fig., 59 tabl.* (1996). - **650 FF.**
- N° 258 - F. CHEVRON - **Dénitrification biologique d'une nappe phréatique polluée par des composés azotés d'origine industrielle.** *1 vol., 216 p., 46 fig., 17 tabl., 3 pl. photo* (1996). - **500 FF.**
- N° 259 - Y. MARCHAND. - **Cartographies sédimentologiques et morphologiques par télédétection de la baie du Mont Saint-Michel (Ouest de la France).** *1 vol., 236 p., 70 fig., 21 tabl.* (1997). - **600 FF.**
- N° 260 - P. ANDREIEFF - **Notes d'orientation pour l'établissement de la carte géologique de France à 1:50 000 (3e édition, mai 1997). Comité de la Carte géologique de la France.** *1 vol., 255 p.* (1997). - **200 FF.**
- N° 261 - A. COMPANY-REMOND.- **Images SAR : possibilités d'extraction d'un paramètre physique du ruissellement, la rugosité (modélisation et expérimentation).** *1 vol., 283 p., 87 fig., 26 tabl.* (1997). - **550 FF.**
- N° 262 - L. DANNEVILLE.- **Contribution des eaux souterraines aux débits et à la qualité des eaux de surface : exemple de la Garonne, de ses sources à la confluence du Tarn.** *1 vol., 434 p., 8 fig., 5 tabl., 14 graphiques; 1 carte* (1997). - **500 FF.**
- N° 263 - F. QUESNEL.- **Cartographie numérique en géologie de surface. Application aux altérites à silex de l'ouest du bassin de Paris.** *1 vol., 430 p., 94 fig., 6 tabl., 9 annexes* (1997). - **650 FF.**
- N° 264 - B. LAIGNEL - **Les altérites à silex de l'ouest du bassin de Paris : Caractérisation lithologique, genèse et utilisation potentielle comme granulats.** *1 vol., 224 p., 69 fig., 67 tabl., 3 annexes* (1997) (à paraître)
- N° 265 - P. WAVRER. - **Apport à la théorie de l'échantillonnage des solides hétérogènes. Application à des grandeurs mesurées sur matières premières, secondaires et ultimes.** *1 vol., 211 p., 27 fig., 20 tabl., 5 annexes.* (1997). - **450 FF.**
- N° 266 - J. DEBELMAS et J. DESMONS - **Géologie de la Vanoise.** *1 vol., 187 p., 119 fig.* (1997). **220 FF.**
- N° 267 - M.-P. DABARD.- **Les formations à cherts carbonés (phtanites) de la chaîne cadomienne : genèse et signification géodynamique. Exemple du segment armoricain.** *1 vol., 248 p., 83 p., 34 tabl.* (1997). (à paraître)

Afin d'améliorer l'accès à l'information, les Éditions BRGM mettent à la disposition du public, certains documents notés comme (ÉPUISE) dans la liste ci-dessus.

Ces reproductions n'étant faites qu'au fur et à mesure des demandes, veuillez nous consulter pour devis.



### BON DE COMMANDE

à présenter à votre librairie habituelle ou à défaut  
à retourner à : **ÉDITIONS DU BRGM** - B.P. 6009 - 45060 ORLÉANS Cedex 2 - FRANCE

Nom ou Organisme: \_\_\_\_\_

Adresse: \_\_\_\_\_

Veuillez me faire parvenir dès parution les Documents du BRGM  
Je réglerai ceux-ci à réception de la facture

Veuillez me faire parvenir le(s) Document(s) suivant(s):

VOTRE MODE DE PAIEMENT AU CHOIX		
<input type="checkbox"/> Chèque postal <input type="checkbox"/> Chèque bancaire  <b>Carte bancaire</b> <input type="checkbox"/> Visa <input type="checkbox"/> Eurocard <input type="checkbox"/> Mastercard	Avec votre carte de paiement	SIGNATURE
	(N'oubliez pas d'inscrire son n° et de signer) 	
	Date d'expiration de votre carte bancaire	

	Nombre exemplaire	Prix unitaire	TOTAL
N°-----	-----	-----	-----
N°-----	-----	-----	-----
N°-----	-----	-----	-----
N°-----	-----	-----	-----
N°-----	-----	-----	-----
N°-----	-----	-----	-----
Total			-----
* Frais de port et d'emballage			-----
Montant total			-----

\* 50 F pour la France ou 75 F pour l'étranger



Impression et façonnage  
**BRGM Service reprographie**  
Dépôt légal : octobre 1997

La caractérisation lithologique des formations résiduelles à silex (en abrégé RS : résidus à silex) ou altérites à silex de l'ouest du Bassin de Paris montre que ces matériaux se subdivisent en deux grands ensembles : les RS de plateau et les RS de versant, également appelés biefs à silex. Les RS de plateau s'organisent en six familles géographiques aux caractéristiques lithologiques bien distinctes. Les biefs à silex ne s'organisent pas de manière régionale, mais en fonction de la nature et de la pente du versant. On distingue : les biefs à silex situés à l'extrémité des interfluves ; les biefs à silex localisés sur les versants des vallées sèches et drainées dont la pente est supérieure ou égale à  $19^\circ$  (ces versants présentent deux biefs, les biefs 1 et 2, sous la forme géométrique d'un double biseau) ; les biefs à silex localisés sur les versants des vallées sèches et drainées dont la pente est inférieure ou égale à  $18^\circ$  (ces versants ne présentent qu'un seul bief, le bief 1, sous la forme d'un simple biseau).

La genèse des RS aux dépens des craies commence dès l'émersion fini-crétacée. La réalisation d'un bilan d'altération entre les craies à silex et les RS indique que les RS ne sont pas uniquement un résidu d'altération des craies. Si l'origine autochtone des silex est incontestable, les rapports fraction silicatée fine / silex de  $1/4$  à  $1/9$  dans les craies contre  $1/1$  à  $1/1,5$  dans les RS montrent que les matrices présentent une part allochtone importante. L'allochtonie diminue avec la profondeur, pour devenir nulle vers 20 mètres.

Au Quaternaire, la dynamique périglaciaire et le creusement des vallées va entraîner des remaniements de type solifluxion des RS sur le rebord des plateaux. Ceci conduit à la formation des biefs à silex. La mise en évidence d'une géométrie en double biseau implique au moins deux phases de mise en place. La similitude de ces formations avec les heads et leur relation avec le creusement de la vallée de la basse Seine permet de proposer une datation de ces phases de mise en place : la première matérialisée par le bief 1 serait datée vers - 800 000 ans, tandis que le bief 2 se serait mis en place au Weichsélien.

La caractérisation lithologique et la compréhension de la genèse des RS permet d'établir une typologie de ces matériaux adaptée à leur utilisation comme granulats. Les biefs à silex, malgré leur teneur élevée en silex, présentent des gisements avec des volumes trop faibles pour envisager des exploitations à l'échelle industrielle. Seuls les RS de plateau dans le centre et le sud de l'Eure et le nord de l'Eure-et-Loir avec des gisements considérables apparaissent intéressants pour l'exploitation. Ces formations présentent, néanmoins, des teneurs en silex relativement faibles dans les dix premiers mètres, nécessitant la mise au point de nouvelles méthodes de séparation silex/matrice. Des essais de traitement à sec de ces matériaux ont été réalisés et ont donné des résultats encourageants, montrant ainsi la nécessité de poursuivre ce type de recherche.

Lithological characterisation of the clay with flints (abbreviated in French to RS: «résidus à silex») in the western part of the Paris Basin shows that these deposits can be divided into two major units: plateau RS and slope RS, also known as «biefs à silex». The plateau RS are made up of six geographical families, each with distinct lithological characteristics. The slope RS show no geographical pattern but can be classified, according to the nature of the slope, into (1) «biefs à silex» at the extremities of the interfluves, (2) «biefs à silex» on the flanks of dry and well-drained valleys with slopes of  $19^\circ$  or more (these slopes show two «biefs», known as «bief» 1 and 2, which geometrically form a double wedge), and (3) «biefs à silex» on the flanks of dry and well-drained valleys with slopes of  $18^\circ$  or less (these slopes show only the «bief» 1, which geometrically forms a single wedge).

The genesis of the RS at the expense of chalk began with end-Cretaceous emergence. A weathering balance between the chalk and the RS indicates that the RS is not composed exclusively of material originating from the chalk. Whilst an autochthonous origin for the flint is undisputed, the ratio of fine-grained siliceous material / flint is  $1/4$  to  $1/9$  for the chalk and  $1/1$  to  $1/1.5$  for the RS. This indicates that the matrix is composed of a significant allochthonous fraction which diminishes with depth and disappears below 20 m.

Periglacial dynamics and valley incision during the Quaternary brought about solifluxion reworking in the RS at the plateau edges, leading to formation of the «biefs à silex». The double wedge geometry indicates at least two phases of development. The similarity of these formations with the «heads» and their relationship with the incision of the lower Seine valley make it possible to date the phases: «bief» 1 is dated at around 800 000 bp and «bief» 2 is considered as Weichselian.

The lithological characterisation and the understanding of the genesis of the RS has made it possible to establish a typology of these deposits adapted to their use as aggregate. The «biefs à silex», despite being rich in flint, form deposits which are too small for exploitation at industrial scale. Only the plateau RS in the centre and south of the Eure Department and in the north of the Eure-et-Loir Department seem to be of interest for exploitation. However, these deposits have a relatively low flint content in the upper 10 m, which would call for the development of new methods of flint/matrix separation. Dry process separation tests have provided encouraging results and demonstrate the necessity of pursuing this type of research.