HAL
open science

Relations quantitatives entre les craies à silex et les formations résiduelles à silex de l'ouest du bassin de Paris

Benoît B. Laignel, Florence Quesnel, Robert Meyer, Jean-Jacques Macaire

To cite this version:

Benoît B. Laignel, Florence Quesnel, Robert Meyer, Jean-Jacques Macaire. Relations quantitatives entre les craies à silex et les formations résiduelles à silex de l'ouest du bassin de Paris. Geodinamica Acta, 1998, 11 (4), pp.171-181. 10.1016/S0985-3111(98)80003-X . hal-00739095

HAL Id: hal-00739095

https://brgm.hal.science/hal-00739095v1

Submitted on 5 Oct 2012

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

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

Geodinamica Acta (Paris) 1998, 11, 4, 171–181

Relations quantitatives entre les craies à silex et les formations résiduelles à silex de l'ouest du bassin de Paris

Benoît Laignel[a*], Florence Quesnel[a,b], Robert Meyer[a], Jean-Jacques Macaire[c]

[a] Laboratoire de Géologie, ER CNRS 109, Université de Rouen, 76821 Mont-Saint-Aignan, France.
E-mail : benoit.laignel@univ-rouen.fr
[b] BRGM, SGN/I2G/NDC, 45060 Orléans cedex, France
[c] Laboratoire de Géologie des systèmes sédimentaires, EA 2100, Faculté des Sciences et Techniques, Parc de Grandmont, 37200 Tours, France

(Reçu le 23 avril 1997 ; accepté le 12 novembre 1997)

Résumé – Depuis plus d'un siècle, l'origine autochtone ou allochtone des formations résiduelles à silex (en abrégé RS : résidus à silex) par rapport aux craies a fait l'objet de multiples discussions. Pour répondre à ce problème, un bilan d'altération entre ces deux formations a été effectué. Il repose sur une connaissance précise des âges des craies-mères des RS et sur des comparaisons granulométrique et chimique entre craie et RS. Ces comparaisons s'appuient sur les quantités de silex contenues dans les craies et les RS, sachant que les silex sont reconnus comme autochtones et que leur degré de dissolution est calculé. Les résultats apportent des informations sur l'évolution crétacée du Bassin anglo-parisien, avec la mise en évidence de la craie du Maastrichtien dans le bassin de Paris et la reconstitution des épaisseurs de craie dissoutes. De plus, ils indiquent que la stratigraphie des craies est conservée dans les profils de RS. Ils montrent également que les silex, éléments autochtones des RS, sont faiblement altérés. Les matrices des RS sont, quant à elles, en grande partie allochtones, notamment dans les dix mètres supérieurs de la formation. L'allochtonie diminue avec la profondeur, avec des RS pouvant être considérés comme des résidus d'altération de la craie au sens strict à partir de 20 mètres de profondeur. © Elsevier, Paris

formations résiduelles à silex / craie / bilan d'altération / bassin de Paris

Abstract – During the past century, the autochthonous and allochthonous origin of clay with flints from underlying chalk rocks has been the subject of many discussions. In order to have a better understanding of the origin of this unit, a weathering balance between chalk and clay with flints was made. This balance was estimated by an accurate knowledge of mother chalk ages and by comparison of grain size distribution and geochemistry between chalk and clay with flints. These comparisons are based on the quantities of flints in chalk and in clay with flints, because flints are autochthonous and their weathering is calculated. Results provide several new elements on the Cretaceous evolution of the Paris-London Basin: chalk of Maastrichtian age existed in the Paris Basin, and we now have good estimations of the quantities of chalk that disappeared through weathering. Results further show that the stratigraphic succession of chalk is maintained in the clay with flints. Additionally, flints (autochthonous elements of clay with flints) are only slightly weathered. Clay with flints matrix is composed of a significant allochthonous fraction in the first 10 m, which diminishes with depth and disappears below a depth of 20 m. Pure clay with flints issued from chalk decarbonatation only exists at a depth greater than 20 m. © Elsevier, Paris

clay with flints / chalk / weathering balance / Paris Basin

1. Introduction

Sur les bordures septentrionale, occidentale et méridionale du bassin de Paris, il existe des couvertures meubles à silex connues sous les noms d'argiles à silex, d'altérites à silex, de formations résiduelles à silex ou de résidus à silex (en abrégé RS).

Ces formations sont également présentes dans le bassin d'Aquitaine [9, 10] dans le bassin de Londres [11, 20], sur les bordures du bassin de Mons, dans le Pays de Hervé (Belgique), au sud du Limbourg (Pays-Bas) et en Rhénanie [1, 2, 8].

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 hypothèses, plus ou moins divergentes, ont été émises. Deux théories dominent la littérature : l'allochtonie et la subautochtonie. Pour les défenseurs de l'allochtonie, les RS ne peuvent pas être uniquement le résidu de décalcification des craies. Ils

*Correspondance et tirés à part

supposent alors un apport allochtone important [4, 16]. Pour les défenseurs de la subautochtonie, les RS sont essentiellement un résidu de décarbonatation de la craie [12, 13, 21], ces RS ayant pu subir des remaniements plus ou moins importants et une pollution par des éléments étrangers. Toutefois, dès qu'il s'agit de déterminer les parts respectives de la phase résiduelle de la craie et de celle apportée, des désaccords subsistent.

Ce travail est consacré aux formations résiduelles à silex de l'ouest du bassin de Paris à partir de l'étude de 18 sites situés en position morphologique de plateau (*figure 1*). Après une analyse bibliographique sur l'origine des RS, un bilan d'altération entre les craies à silex et les RS a été réalisé afin de mieux comprendre la genèse de ces formations et de déterminer si les RS sont uniquement un résidu d'altération des craies à silex.

2. Analyse de la bibliographie concernant l'origine des RS

Les travaux de Van den Broeck [36] sur le rôle des agents météoriques dans l'érosion continentale furent repris et appliqués à l'argile à silex par Dollfus [14] et Gosselet [15]. L'eau de pluie se charge en acide carbonique par circulation dans le sol et devient très agressive 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 silicatés. Cette hypothèse d'une origine superficielle de l'argile à silex est admise aujourd'hui [34]. Cependant de nombreuses divergences demeurent sur le problème de l'autochtonie et de l'allochtonie des RS par rapport aux craies.

Quand on aborde ce problème, il est nécessaire de distinguer l'origine des silex de celle de la gangue (ou matrice). Si l'origine autochtone des silex est incontestable [7, 21], il n'en va pas de même pour la matrice des RS. Brajnikov [7] 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 constata que tous les minéraux détritiques de l'argile à silex pouvaient provenir de la craie. Cependant, il remarqua que ces derniers pouvaient également provenir des dépôts tertiaires du bassin de Paris. Il ouvrit ensuite la discussion sur l'épaisseur de craie altérée : avec une quantité de matières insolubles contenue 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 était de 200 à 250 m. Ceci lui parut invraisemblable. Cependant, il conclut que cette argumentation n'était pas valable, car il n'avait jamais rencontré des accumulations d'argile à silex aussi puissantes. Il admit que l'épaisseur maximale de RS ne devait pas excéder 5 m et que la seule décalcification de la craie suffisait pour expliquer la formation de RS.

Par la suite, Bauer [4] montra que la craie campanienne contenait 97 % de $CaCO_3$ et 1 % au maximum d'argile. Ceci impliquait une dissolution de 77 m de craie pour obtenir l'argile contenue dans 1 m d'argile à silex. Elle souligna également que l'argile à silex contenait 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 conduisit alors à une troisième théorie,

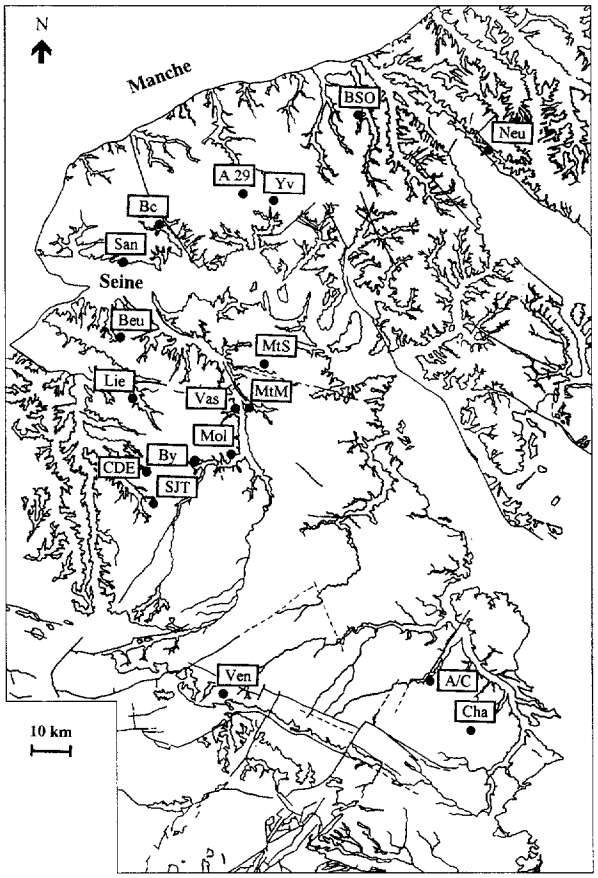


Figure 1. Localisation géographique des sites de RS des plateaux étudiés.
Neu : Neufchâtel en Bray, BSO : Bertreville St Ouen, Yv : Yvetot, A29 : A 29, Bc : Bolbec, San : Sandouville, MtS : Les Monts Sud, Beu : Beuzeville, Lie : La lièvrerie, CDE : Courtonne les Deux Eglises, SJT : St Jean du Theney, Vas : La Vasserie, MtM : Mont Mal, Mol : Les Mollands, By : Bernay, Ven : La Ventrouze, A/C : Aunay sous Crécy, Cha : Challet.

Figure 1. Location of studied outcrops of clay with flints.
Neu: Neufchâtel en Bray, BSO: Bertreville St Ouen, Yv: Yvetot, A29: A 29, Bc: Bolbec, San: Sandouville, MtS: Les Monts Sud, Beu: Beuzeville, Lie: La lièvrerie, CDE: Courtonne-les-Deux-Eglises, SJT: St-Jean-du-Theney, Vas: La Vasserie, MtM: Mont Mal, Mol: Les Mollands, By: Bernay, Ven: La Ventrouze, A/C: Aunay sous Crécy, Cha: Challet.

développée entre autres par Klein [21] et Dewolf [13] : la sub-autochtonie. L'argile à silex fut 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 à la craie.

Les auteurs anglais se penchèrent également sur ce problème pour les argiles à silex du Sud de l'Angleterre. Catt [11], dans sa synthèse sur les RS d'Angleterre, indiqua que les anciens auteurs (Lyell et Prestwich) considéraient tout d'abord ces dépôts comme étant uniquement des résidus d'altération de la craie. Cependant, Reid [33] s'aperçut que le résidu insoluble de la craie comportait très peu de fraction fine (argile, silt et sable) par rapport aux silex et que la simple dissolution de la craie devait produire des formations différentes de celles observées. Jukes-Browne [20] montra que la dissolution de 100 m de craie de la zone à *Micraster coranguinum* fournissait 7 m de résidus, dont 6 m de silex et 1 m seulement d'argile, ce qui était en désaccord avec les rapports 1/1 généralement observés dans les résidus à silex. Loveday [28] montra que les éléments grossiers (silex) dérivaient de la craie et que les fractions fines en résultaient en partie, mais surtout des dépôts sus-jacents (dans un rapport de 1 pour 5 ou plus). Plusieurs auteurs [3, 17, 28, 35] étudièrent et comparèrent 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 déduisirent que la matrice des argiles à silex provenait du démantèlement des dépôts argileux, silteux et sableux d'âge Thanétien et Yprésien.

Cependant, l'unanimité sur l'origine des RS est loin d'être faite, notamment lorsqu'il s'agit de déterminer au sein de ces formations les parts respectives de la phase résiduelle provenant de la craie et de la phase allochtone. Ces divergences sont essentiellement liées à un manque de connaissance de la roche-mère des RS (craie) qui a été dissoute. Les âges des craies-mères ne sont pas connus avec précision. Une synthèse à l'échelle régionale, aussi bien de la caractérisation lithologique des RS que de l'évaluation du taux d'insolubles des craies fait défaut. Les calculs utilisés pour évaluer les épaisseurs de craies dissoutes sont généralement biaisés. Ces calculs sont basés quelquefois sur la totalité des matériaux insolubles (silex + matrice), mais le plus souvent 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.

3. Méthodologie

Afin de répondre aux problèmes exposés précédemment, un bilan d'altération entre les craies et les RS a été effectué suivant l'organigramme de la *figure 2*.

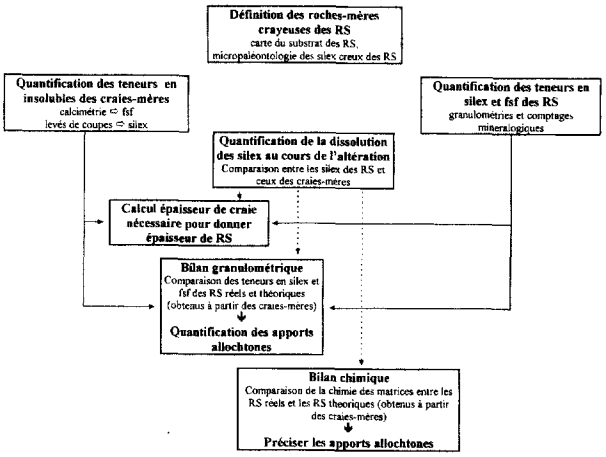


Figure 2. Organigramme de la méthodologie mise en œuvre pour calculer le bilan d'altération des RS.
Le bilan d'altération repose sur une connaissance précise des âges des craies-mères des RS. La quantification de la dissolution des silex au cours de l'altération et la comparaison des teneurs en silex et fsf (fraction silicatée fine) entre les craies et les RS permet de calculer les épaisseurs de craie dissoute et d'évaluer les apports allochtones. La quantification de la dissolution des silex et la comparaison des compositions chimiques entre les craies et les RS permet de préciser la nature des apports allochtones.

Figure 2. Methodology chart used to calculate the weathering balance of clay with flints.
The weathering balance is based on the accurate knowledge of mother-chalk of clay with flints. Quantification of flint dissolution during weathering and the comparison of the quantities of flint and fsf (fine silicate fraction) between chalk and clay with flints enable one to calculate the dissolved thickness of chalk and estimate the allochthonous supplies. Quantification of flint dissolution and comparison of chemical compositions between chalk and clay with flints enable to precise the nature of allochthonous supplies.

Celui-ci est une adaptation du raisonnement "isoquartz" tel qu'il est utilisé pour les calculs de bilan d'altération [26, 27].

A. Détermination des roches-mères crayeuses des RS

Les roches-mères crayeuses à l'origine des RS ont été déterminées grâce à l'étude du substrat et à l'analyse micropaléontologique du contenu des silex creux des RS. Le substrat des RS de l'ouest du bassin de Paris a été étudié à partir des cartes géologiques, de la bibliographie et d'analyses micropaléontologiques effectuées sur les craies du littoral haut-normand [23, 27]. L'étude micropaléontologique a été réalisée sur des silex prélevés à différents niveaux des profils de RS. Les silex creux contiennent une fine poudre siliceuse, en général blanche, composée de microfossiles siliceux ou silicifiés, souvent bien préservés : spicules de Spongiaires dominants, Foraminifères benthiques et planctoniques,

Ostracodes, coccolithes, Radiolaires... Seuls les Foraminifères ont été déterminés [5]. Ils permettent de connaître l'âge des craies à silex, roches-mères des altérites à silex.

B. Quantification des éléments insolubles contenus dans les craies considérés comme roches-mères des RS

Le choix, ainsi que l'échantillonnage des roches-mères crayeuses pour chaque type de RS, ont été guidés par :

– l'étude micropaléontologique des silex creux des altérites et des craies considérés comme roches-mères,

– la connaissance du substrat des RS,

– l'étude du contexte géologique environnant, à partir des cartes géologiques pour les RS concernés.

Au total, 29 sites de craies localisés à l'ouest du bassin de Paris ont ainsi été étudiés [23]. La microfaune de ces craies, comparée à celle des silex creux des RS, indique qu'il n'y a pas de variation importante, à l'échelle régionale, 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. Suivant le nombre de sites de craies situés à proximité des RS étudiés, ces derniers peuvent avoir plusieurs possibilités de roches-mères crayeuses théoriques. Dans ce cas, nous avons retenu les deux craies-mères théoriques aux caractéristiques lithologiques extrêmes.

La craie se compose d'une fraction carbonatée facilement soluble, constituée presque exclusivement de $CaCO_3$ et d'une fraction insoluble ou peu soluble comprenant les silex et la fraction silicatée fine. La fraction silicatée fine (en abrégé fsf) regroupe tous les éléments autres que les silex. Il s'agit essentiellement d'argile. Le quartz, les micas, les feldspaths, l'opale CT et la clinoptilolite, observés par Juignet et Pomerol [19], sont en faibles proportions dans les craies étudiées. Les teneurs en fsf et carbonates ont été obtenues par calcimétrie. Matthieu et De Coninck [29] ont indiqué que la méthode était fiable, en montrant expérimentalement que le choix de l'acide et de sa concentration a peu d'incidence sur la quantité de fsf mesurée. 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 transformation des pourcentages massiques en pourcentages volumiques, 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 mesurées lors d'essais de porosité sur les silex et sur les craies (porosimétrie au mercure) [24, 25]. 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.

C. Quantification des teneurs en silex et en fraction silicatée fine des RS

La quantification des teneurs en silex et en fsf des RS est obtenue à partir d'analyses granulométriques et de comptages minéralogiques à la loupe binoculaire et au microscope optique. Pour chaque RS étudié, un échantillon de 20 kg de la fraction inférieure à 100 µm est prélevé selon la norme NF 18560 utilisée par les géotechniciens :

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

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

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

La fraction inférieure à 100 µm est ensuite traitée par tamisage classique jusqu'à 40 µm et celle inférieure à 40 µm est analysée par microgranulométrie laser. En ce qui concerne la fraction supérieure à 100 µm, elle est traitée par analyse photographique [22, 23]. La fiabilité de cette méthode a été vérifiée sur 7 sites où des échantillons de 100 kg (au minimum) ont été prélevés.

Les comptages minéralogiques permettent, ensuite, de différencier et de quantifier les pourcentages de silex et de fsf dans la fraction sableuse (les cailloux et les graviers sont constitués uniquement de silex, tandis que les limons et argiles correspondent à la fsf).

D. Calcul de la dissolution des silex au cours de l'altération

L'ensemble des calculs du bilan d'altération étant basé sur les teneurs en silex, il est nécessaire d'évaluer l'éventuelle dissolution de ceux-ci. La dissolution des silex au cours de l'altération a été évaluée à partir de différentes comparaisons entre les silex des craies et ceux des RS. Ces comparaisons ont porté :

– sur la taille des silex, à partir de la mesure de leur épaisseur,

– sur la minéralogie des silex, étudiée par diffraction des rayons X,

– sur le volume des cavernes des silex, mesuré par analyse photographique [23],

– sur le volume et la porosité du cortex des silex, étudiés par la mesure de son épaisseur et grâce à un porosimètre à mercure [24, 25].

E. Calcul des épaisseurs de craie dissoutes

Connaissant les quantités de silex contenues dans les RS et dans les craies retenues comme roches-mères, et ayant évalué la dissolution des silex au cours de l'altération, le calcul des épaisseurs de craie dissoutes est réalisé de la manière suivante :

$$\text{ép. craie altérée} = \text{ép. silex}_{cor}\ RS \times 100\ m\ \text{craie} / \text{ép. silex dans 100 m de craie}$$

avec : ép. = épaisseur,

ép. silex_{cor} RS = épaisseur de silex dans le RS, corrigée en fonction de la dissolution des silex.

F. Bilan granulométrique et géochimique : méthodologie

Le principe du bilan granulométrique est représenté sur la *figure 3*. Il s'agit de comparer les quantités de silex et de fsf contenues dans les RS théoriques (calculés à partir des craies retenues comme roches-mères) et dans les RS réels observés sur le terrain. Pour le calcul des RS théoriques, une correction est apportée en fonction de la dissolution des silex (estimée selon la méthode exposée dans le paragraphe D.). Deux hypothèses sont envisagées : la silice issue de la dissolution des silex 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_2 dissous au silex, puis un autre RS théorique où le pourcentage de SiO_2 dissous est retranché au silex et ajouté à la fsf.

Le bilan granulométrique permet alors d'évaluer les éventuels apports allochtones en fsf au sein des RS réels.

Le bilan géochimique est une autre approche des apports allochtones entrant dans les fsf des RS réels. Celui-ci est effectué à partir de la comparaison des fsf entre les RS réels et les RS théoriques. Tout comme le bilan granulométrique, les fsf des RS théoriques sont corrigées en fonction du degré de dissolution des silex. Cette comparaison ne sera réalisée que pour les dix mètres supérieurs des RS, là où les RS réels ont été échantillonnés systématiquement. Seuls les teneurs en SiO_2, Al_2O_3 et Fe_2O_3 sont présentées ici. Celles-ci ont été mesurées respectivement par dosage gravimétrique, colorimétrique et par absorption atomique. La précision des analyses est de 2 %.

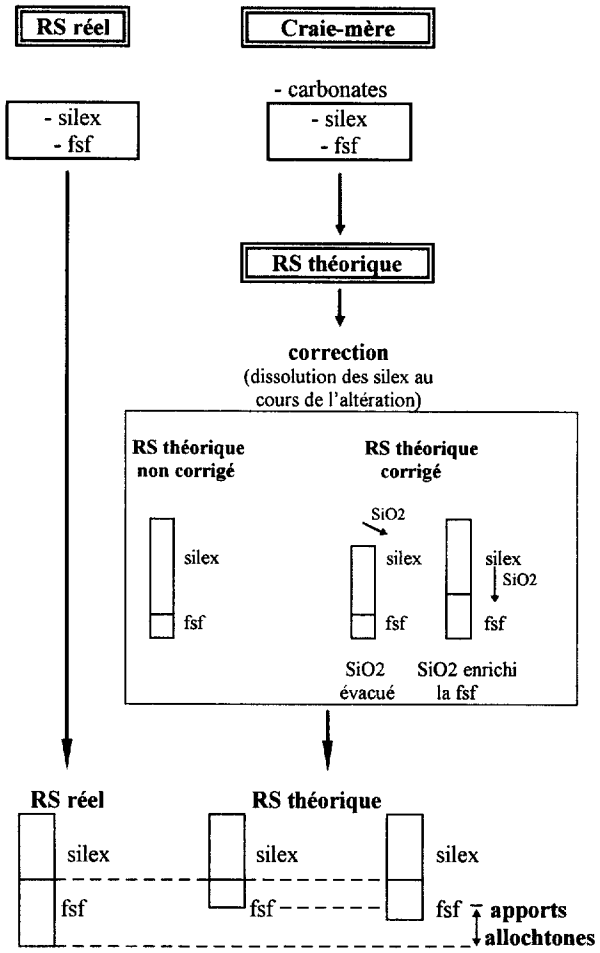


Figure 3. Bilan granulométrique – Méthodologie.
fsf : fraction silicatée fine.
Sachant que les silex sont autochtones, la comparaison des teneurs en fsf entre RS réels (observés sur le terrain) et RS théoriques (calculés à partir des roches-mères crayeuses) permet de quantifier les apports allochtones en fsf. Les RS théoriques sont corrigés en fonction du pourcentage de silice dissoute au niveau des silex au cours de l'altération. Deux RS théoriques sont calculés : un dans le cas où la silice issue de la dissolution des silex est évacuée, l'autre dans le cas où la silice issue de la dissolution des silex enrichit la fsf.

Figure 3. Balance of grainsize distribution - Methodology.
fsf: fine silicate fraction.
As flints are autochthonous, a comparison of the quantities of matrix between real clay with flints (observed) and theoretical clay with flints (calculated from the mother-chalk) allows a quantification of allochthonous supplies of matrix. Theoretical clay with flints are corrected for the percentage of dissolved SiO_2 in flints during weathering. Two theoretical clays with flints are calculated: 1. the SiO_2 originating from dissolution of flints is leached out of profile; 2. the SiO_2 originating from dissolution of flints enriching the matrix.

4. Résultats

A. Définition des craies-mères des RS

L'étude micropaléontologique du contenu des silex creux des RS montre que la stratigraphie de la craie est conservée au sein des profils de RS [22, 31]. Ceci est la preuve que les RS résultent de l'altération in situ des craies et que les profils de RS n'ont pas subi de remaniements.

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 (*tableau 1*). Ces investigations montrent que les craies à silex du Maastrichtien ont existé dans le Bassin de Paris [31].

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

Les comparaisons présentées sur la *figure 4* montrent que la taille des silex des RS est très proche de celle des silex des craies retenues comme roches-mères. De même, la composition minéralogique des silex des RS et des craies est identique : les silex sont tous composés de quartz microcristallin, et l'indice de cristallinité du quartz [30] des silex des craies est pratiquement identi-

Tableau 1. Âge stratigraphique des roches-mères crayeuses des RS étudiés. L'âge des roches-mères crayeuses des RS varient du Turonien au Maastrichtien.

Table 1. Stratigraphic age of the mother-chalks of studied clay with flints. The age of the mother-chalks of clay with flints varies between Turonian and Maastrichtian.

Sites de RS	Roches-mères crayeuses des RS
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

que à celui des silex des RS (0,7 à 2,9 pour les silex des craies ; 1,2 à 3,1 pour les silex des RS). Ceci permet de penser que la taille et la minéralogie des silex n'ont pas varié de façon sensible au cours de l'altération des craies à silex et de la formation des RS. Seuls les cavernes et le cortex des silex ont varié faiblement au cours de l'altération : les cavernes se sont agrandies légèrement et le cortex s'est épaissi quelque peu. Ces deux critères permettent de calculer le pourcentage de SiO_2 perdu par dissolution au niveau des silex au cours de l'altération et de montrer que celui-ci est faible, puisqu'il varie entre 0,5 et 7,1 % (*tableau 2*).

C. Épaisseur de craies dissoutes nécessaire pour donner les épaisseurs de RS

Les épaisseurs de craie nécessaires pour donner, par dissolution des carbonates, les épaisseurs de RS observées sur le terrain sont variables d'un secteur à un autre (*figure 5*) :

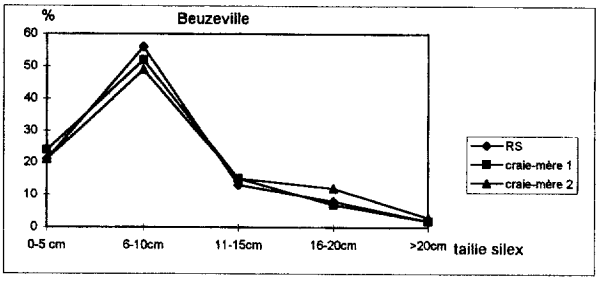
– dans l'est du Pays de Caux et le Talou, les épaisseurs de craie dissoutes sont faibles, de 10 à 11 m ;

– 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 disparues sont variables selon la localisation géographique ; à l'ouest elles sont comprises entre 29 et 84 m ; 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 ;

– dans le Perche, le seul site étudié 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 dissoutes sont les plus importantes, avec 196 à 205 m pour des RS de 40 m.



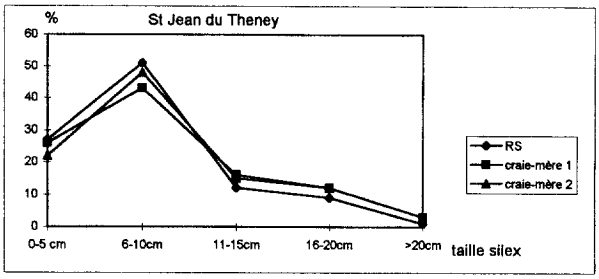


Figure 4. Comparaison de la taille des silex entre les RS et les craies choisies comme roches-mères pour les sites de Beuzeville et de St-Jean-du-Theney.
Pour chacun des sites, il existe deux craies-mères potentielles. La taille des silex correspond à la mesure de leur épaisseur. Les résultats montrent que la taille des silex des RS est très proche de celle des silex des craies retenues comme roches-mères.

Figure 4. Comparison of flint sizes between clay with flints and mother-chalks at Beuzeville and St-Jean-du-Theney.
For each site, 2 mother-chalks are possible. The flint size is the measurement of flint thickness. Results show that size of flints is very similar in clay with flints and in chalk regarded as mother-rock.

D. Bilan granulométrique

La *figure 6* indique que la fraction silicatée fine est toujours plus importante dans les RS réels observés sur le terrain que dans les RS théoriques obtenues à partir des craies-mères. Ceci est vrai quel que soit l'hypothèse de départ concernant l'altération des silex (que la silice issue de la dissolution des silex participe ou non à l'enrichissement de la fraction silicatée fine). Ceci implique des apports allochtones qui ont pu être chiffrés entre 14 et 48 %. Ces apports varient régionalement (*figure 6*) :

– 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 apports importants et relativement homogènes d'un site à un autre (entre 30 et 35 %) ;

– les apports extérieurs en fsf sont très hétérogènes dans l'Eure, de 14 à 41 % ;

– dans le Perche et le nord de l'Eure-et-Loir, les apports extérieurs en fsf sont homogènes (17 à 23 %) et relativement peu élevés par rapport à ceux du Pays de Caux et du Talou.

Tableau 2. Estimation du pourcentage volumique de SiO_2 dissous au niveau des silex au cours de l'altération. Le pourcentage de SiO_2 dissous au niveau des silex au cours de l'altération est faible, de 0,5 à 7,1 %.

Table 2. Quantification of volume percentage of dissolved SiO_2 in flints during weathering. The percentage of SiO_2 dissolved of the flints during weathering is small, varying between 0,5 and 7,1 %.

	% SiO_2 dissous
Bc	1,8 à 2,1
San	2,9 à 3,2
Beu	0,5 à 0,9
Lie	1,4 à 2,3
MtS	2,6 à 2,9
MtM	4,5 à 4,8
Vas 1	6,4 à 7,1
Vas 2	4,4 à 5,0
By	3,8 à 4,5
CDE	0,7 à 1,6
SJT	2,1 à 2,9
Ven	2,2 à 2,6
Neu	2,1 à 2,5
BSO	0,9 à 1,4
A29	3,0 à 3,1
Yv	2,6 à 2,7
A/C	1,5 à 1,8
Cha	4,7 à 5,0

De plus, ces apports allochtones varient verticalement et diminuent avec la profondeur (*figure 7*) : de 0 à 10 m, les apports sont élevés (de 18 à 41 %) et ils deviennent plus faibles au-delà de 15 m avec des valeurs inférieures à 16 %. On peut même penser que l'allochtonie devient nulle à 20 m de profondeur, avec des RS contenant 80 à 90 % de silex (décrit dans de nombreux sondages de l'Eure et du nord de l'Eure-et-Loir). A 20 m de profondeur, les RS peuvent alors être considérés comme de stricts résidus d'altération de la craie.

E. Bilan géochimique

Le bilan chimique des fsf entre les RS théoriques et les RS réels indique que les apports allochtones concernent essentiellement SiO_2, Al_2O_3 et Fe_2O_3 [23] et qu'ils varient géographiquement (*figure 8*). Le RS du Talou et de l'est du Pays de Caux présente les apports en SiO_2 les plus importants avec le RS de l'Eure, de 82 à 90 % pour le Talou et l'est du Pays de Caux et de 70 à 95 % pour l'Eure. Le RS de l'Eure se distingue néanmoins de celui du Talou et de l'est du Pays de Caux par des apports en Fe_2O_3 plus hétérogènes. Le RS du Pays de Caux présente les apports en Fe_2O_3 les plus élevés, de 8 à 16 %. Enfin, le RS du Perche et du nord de l'Eure et Loir correspond au RS avec les apports en Al_2O_3 les plus importants, de 35 à 59 %.

5. Discussion

La précision des chiffres donnés lors du bilan d'altération est soumise à une certaine incertitude à cause de contraintes méthodologiques et techniques. Pour chaque RS, on ne connaît pas les parts respectives des différents

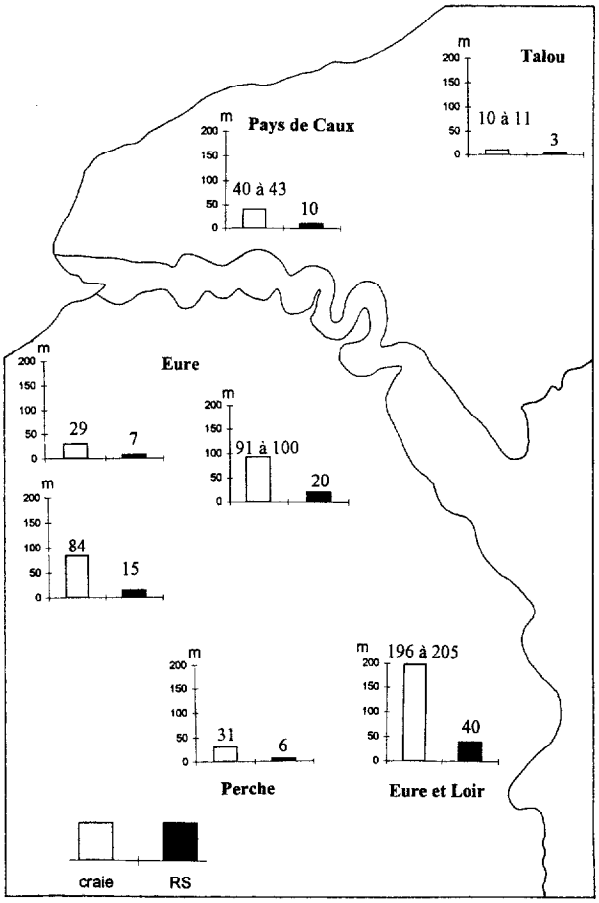


Figure 5. Épaisseurs (en mètres) de craies dissoutes nécessaires pour donner les épaisseurs de RS de plateau. Les épaisseurs de craie dissoute au cours de l'altération varient régionalement de 10 à 205 m.

Figure 5. Dissolved chalk thicknesses needed for creating the observed thickness of clay with flints. The dissolved chalk thicknesses during weathering vary regionally from 10 to 205 m.

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 de craies appartenant à 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 calculs sur les RS issus de roches-mères en partie turoniennes sont davantage incertains, en raison des différences lithologiques entre les craies turoniennes et sénoniennes. D'autre part, en l'absence de craies maastrichtiennes dans le bassin de Paris, les caractéristiques lithologiques des craies maastrichtiennes ont été supposées identiques à celles des craies campaniennes. Ceci est justifié par les analyses

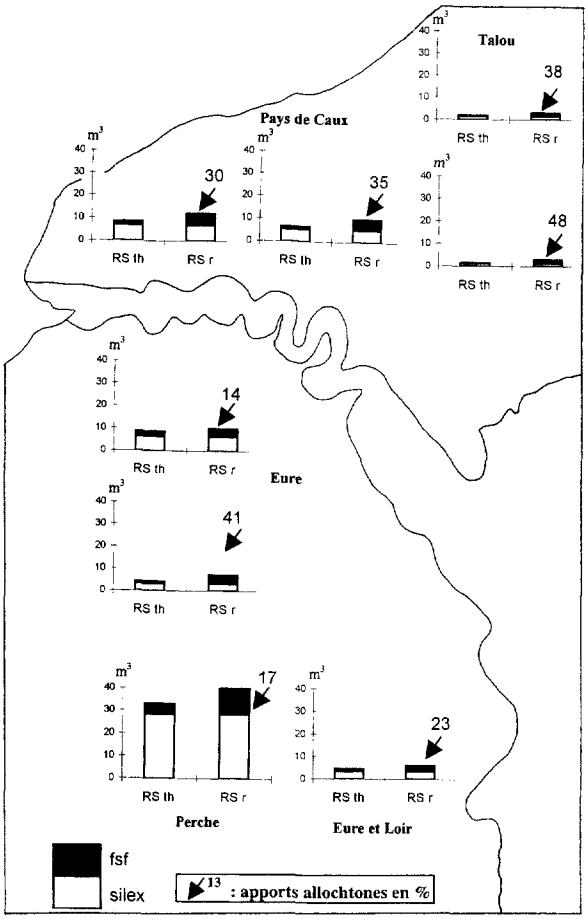


Figure 6. Comparaison des teneurs en silex et en fraction silicatée fine entre les RS réels observés sur le terrain (RSr) et les RS théoriques calculés à partir des craies retenues comme roches-mères (RSth) et quantification des apports allochtones. Les teneurs en silex et fsf sont en m^3. Les apports allochtones (flèches) sont donnés en pourcentage par rapport à l'ensemble du matériau (silex + fsf). Ils varient régionalement de 14 à 48 %.

Figure 6. Comparison of flints and matrix contents between the real clays with flints (RSr) observed and the theoretical clays with flints (Rsth) calculated from the mother-chalks and quantification of allochthonous supplies. Flint and matrix contents are given in m^3. Numbers with arrows denote percentage of allochthonous supplies for bulk material (flints and matrix). They vary regionally between 14 and 48 %.

micropaléontologiques des silex creux des RS, qui ont indiqué que les conditions de biotope et de sédimentation n'ont pas changé sensiblement entre le Campanien et le Maastrichtien [6].

Quoiqu'il en soit, le bilan d'altération permet d'estimer les épaisseurs de craie nécessaires pour donner les épaisseurs de RS observées sur le terrain et de constater

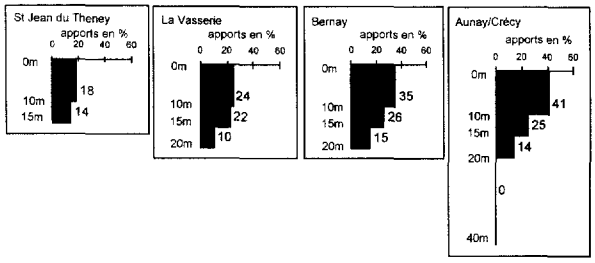


Figure 7. Évolution verticale des apports allochtones en fraction silicatée fine pour les RS des sites de St-Jean-du-Theney, de La Vasserie, de Bernay et d'Aunay-sous-Crécy. Les apports sont donnés en pourcentage par rapport à l'ensemble du matériau (silex + fsf). On constate la disparition de l'allochtonie en profondeur.

Figure 7. Evolution of the allochthonous supplies in the matrix (fsf) with the depth for the St-Jean-du-Theney, La Vasserie, Bernay and Aunay-sous-Crécy outcrops. Supplies are given in percentage for bulk material (flints and matrix). We note the disappearance of the allochthony with depth.

que celles-ci varient régionalement. 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. Ces données quantitatives sur les RS de l'Ouest du bassin de Paris rejoignent les observations réalisées par Jukes-Browne [20] et Loveday [28] sur les RS du Sud de l'Angleterre. Les apports allochtones en matrice sont incontestables et ils représentent une part très importante, notamment dans les dix mètres supérieurs des RS. Au-delà de 10 m, l'allochtonie diminue avec la profondeur et on peut penser que celle-ci devient nulle vers 20 m de profondeur, là où les RS sont composés de 80 à 90 % de silex. Les apports concernent essentiellement SiO_2, Al_2O_3 et Fe_2O_3 et ils varient géographiquement.

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

La granulométrie des matrices des RS 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 constitués par des débris de 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.

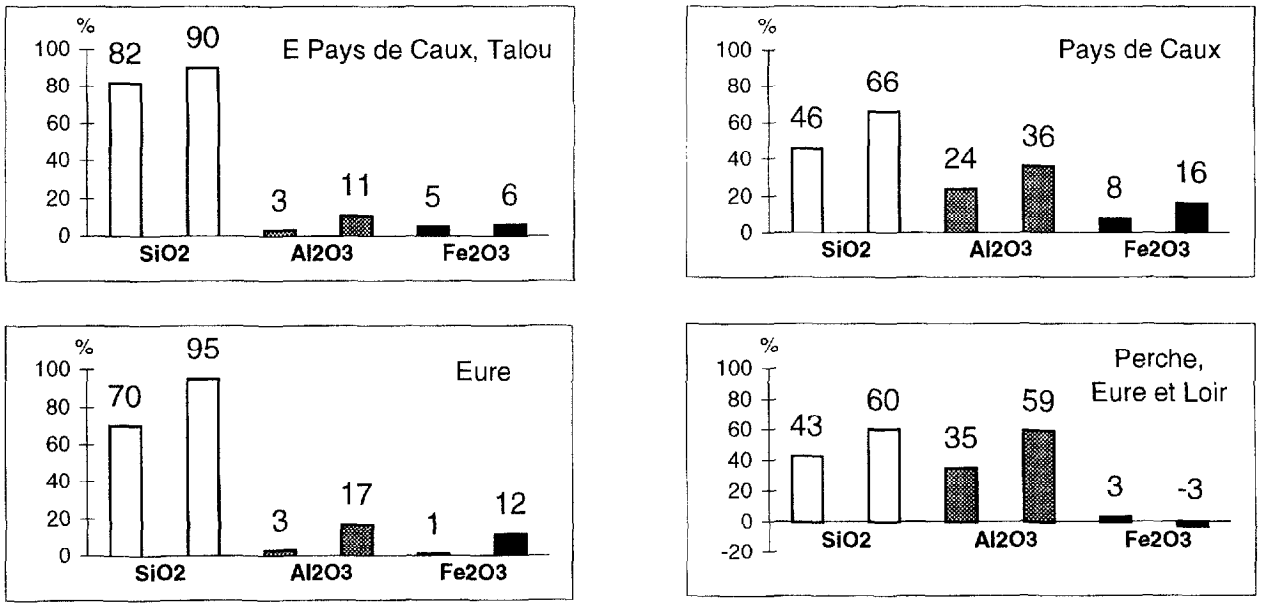


Figure 8. Quantification des apports allochtones en SiO_2, Al_2O_3 et Fe_2O_3 pour obtenir la fraction silicatée fine des RS réels à partir des craies retenues comme roches-mères. Les valeurs négatives apparaissant dans le Perche et l'Eure-et-Loir indiquent une perte en Fe_2O_3. Les résultats ont fait ressortir des secteurs géographiques différents. Pour chacun de ces secteurs et pour chaque élément chimique étudié, on donne les valeurs maximale et minimale d'apport.

Figure 8. Quantification of allochthonous supplies of SiO_2, Al_2O_3 and Fe_2O_3 required for obtaining the fine silicate fraction of real clay with flints from the mother-chalks. The negative values for Perche and Eure-et-Loir indicate a loss of Fe_2O_3. The results demonstrate the various geographical zones. For each zone and each chemical element, the maximum and minimum supplies are given.

La diminution de l'allochtonie avec la profondeur montre que la contamination des RS ne peut être réalisée que par des dépôts sus-jacents, comme l'avaient d'ailleurs soulignés Loveday [28], Avery [3], Hodgson et al. [17], Thorez et al. [35] et John [18] pour les RS anglais.

La cartographie des formations cénozoïques résiduelles conservées en poches au sommet des RS [32] peut alors apporter des informations sur l'origine des sources allochtones :

– les limons quaternaires et les sables et argiles plastiques yprésiens, observés dans le Talou et l'est du Pays de Caux, constituent vraisemblablement les sources principales d'apports dans cette région ;

– les sables de Lozère et les limons quaternaires, présents dans le reste du Pays de Caux, doivent contribuer aux apports dans ce secteur ;

– les sables de Fontainebleau, observés dans l'Eure, participent probablement à l'allochtonie ;

– pour le Perche, l'origine des apports est difficile à déterminer ;

– les sables du Thimerais, observés dans le nord de l'Eure-et-Loir, peuvent expliquer en partie les apports dans cette région.

De plus, Quesnel [32] a montré qu'il existe plusieurs générations de RS, avec globalement, des RS plio-quaternaires au nord de la Seine et cénozoïques au sud. Ces formations ont connu des évolutions géodynamiques différentes qui peuvent expliquer en grande partie la variabilité des apports allochtones observée sur la *figure 6*. En effet, les forts pourcentages de matériaux allochtones incorporés aux RS des régions au nord de la Seine s'expliqueraient par le fait que ces régions ont supporté une couverture tertiaire qui a été érodée au Plio-Quaternaire. En revanche, pour les régions situées au sud de la Seine, l'hétérogénéité et les faibles taux de matériaux allochtones seraient liés à l'absence de couverture tertiaire continue dans cette région. Selon Quesnel [32], les formations tertiaires y étaient spatialement discontinues au moment de leur dépôt (fluviatile mal individualisé).

6. Conclusion

L'étude des formations résiduelles à silex et de leurs relations quantitatives avec les craies à silex a permis de mettre en évidence que la stratigraphie des craies est conservée dans les profils de RS. Les RS sont donc des altérites en place. Il s'agit d'un point fondamental qui justifie la réalisation du bilan d'altération entre les craies et les RS. De plus, ces travaux confirment ceux de

Quesnel et al. [31], en montrant que la craie du Maastrichtien a bien existé dans le bassin de Paris. Il est également démontré que les altérites à silex du bassin de Paris, au même titre que celles du bassin de Londres, ne sont pas uniquement des résidus d'altération des craies. Il apparaît nettement que la matrice de ces altérites est en grande partie allochtone, tandis que les silex sont autochtones et faiblement altérés.

L'intérêt de la méthode mise en œuvre ici est de montrer la possibilité d'établir une relation quantitative entre les craies à silex et les altérites dérivées. Celle-ci donne un bon aperçu des parts relatives des craies roches-mères et des apports allochtones. Pertes et apports existent et permettent de mieux comprendre la variabilité lithologique des formations résiduelles à silex.

Enfin, le bilan d'altération entre les craies et les formations résiduelles à silex, tel qu'il est présenté ici, apporte des informations essentielles sur l'évolution crétacée et cénozoïque du Bassin anglo-parisien.

Références

[1] Albers H.J., Felder W.M., Feuersteine als Indikatoren der Quantifizierung und Datierung der Karbonatlösung am Nordwest-Rand des Rheinischen Schildes. International Feuersteinsymposium, 1979, Maastricht, Staringia 6, 1981a, 18–22.

[2] Albers H.J., Felder W.M., 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 (1981b) 469–482.

[3] Avery B.W., The soils and land use of the district around Aylesbury and Hemel Hempstead. Mem. of the Soil Survey of Great Britain, 1964, 216 p.

[4] Bauer J., Étude sédimentologique comparée de quelques échantillons de craie et d'argile à silex à l'ouest de Paris, Soc. Géol. Fr., 1964, pp. 75–79.

[5] Bourdillon C., Nouvelle biozonation des foraminifères dans la craie du Bassin parisien, *in :* Colloque La craie, objet géologique, réservoir, matériau et paysage, Réunion SGF-SGN-GFC, Arras, 1996, p. 21.

[6] Bourdillon C., Quesnel F., Le Maastrichtien de Normandie (France) : Microfaune, paléomilieux, paléogéographie, *in :* Colloque La craie, objet géologique, réservoir, matériau et paysage, Réunion SGF-SGN-GFC, Arras, 1996, p. 22.

[7] Brajnikov B., Recherches sur les formations dites "argiles à silex" dans le Bassin parisien, Rev. Geogr. Phys. et Géol. Dyn., Paris, x, (1938) 129 p.

[8] Calembert L., Monjoie A., Observations sur les phénomènes karstiques en Belgique et bilan des recherches, Ann. Soc. géol. Belgique 102 (1979) 125–135.

[9] Callot G., Pedro G., Relations entre la présence de couvertures d'argile à silex et la nature du substratum carbonaté. Rôle et origine des silex, C. R. Acad. Sci. Paris 285 (1977a) 1295–1297.

[10] Callot G., Pédro G., Théorie sur la formation des argiles à silex. C. R. Acad. Sci. Paris 285 (1977b) 1415–1418.

[11] Catt J.A., The nature, origin and geomorphological signifiance of clay with flints, *in :* the scientific study of flints and cherts, Ed. by Sieveking G. and Hart M.B., Cambridge University press, 1986, pp. 151–159.

[12] Dewolf Y., A propos des argiles à silex : essai de typologie, Rev. Géomorpho. Dyn., Paris 25 (4) (1976) 113–138.

[13] Dewolf Y., Le contact Île de France – Basse Normandie. Etude géodynamique, Mém. et Doc. Géogr., CNRS Édit., Paris, 1982, 253 p.

[14] Dollfus G.F., Relations stratigraphiques de l'argile à silex, Bull. Soc. Géol. Fr. 19 (1891) 883.

[15] Gosselet J., Observation au sujet du mode de formation du conglomérat à silex, Ann. Soc. Géol. Nord 19 (1891) 319–323.

[16] Grossouvre A. de., Nouvelles observations sur le terrain à silex du Sud-Ouest du bassin de Paris, Bull. Soc. Géol. Fr. 1 (1901) 431–432.

[17] Hodgson J.M., Catt J.A., Weir A.H., The origin and development of Clay-with-flints and associated soil horizons on the South Downs, J. Soil Sci. 18 (1) (1967) 85–102.

[18] John D.T.: The soils and superficial deposits on the North Downs of Surrey. *in :* Jones D.K.C. (éd.), The shapping of Southern England, Institute of British Geographers Special Publication 11, 1980, 274 p., pp. 101–130.

[19] Juignet P., Pomerol B., La clinoptilolite dans le Crétacé supérieur du bassin de Paris, Bull. Inf. Géol. Bass. Paris 12 (2) (1975) 25–34.

[20] Jukes-Browne A. J., The Clay-with-Flints: its origin and distribution, Quart. Journ. Geol. Soc., London 62 (1906) 132–164.

[21] Klein C., La surface de l'argile à silex, Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dyn. 2 (12) (1970) 180–220.

[22] Laignel B., 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 granulat., Mém. DEA, Orléans, 1993, 51 p.

[23] Laignel B., Les altérites à silex de l'ouest du bassin de Paris. Caractérisation lithologique, genèse et utilisation potentielle comme granulats, Thèse, Rouen, 1997, 224 p.

[24] Lautridou J. P. et Ozouf J. C., 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, Mém CNRS, Caen, 1987a, 29 p.

[25] Lautridou J.-P. et Ozouf J.-C., Définition de normes d'analyses physiques de roches. Étude critique des normes employées, proposition de nouvelles normes, Mém. CNRS, Caen, 1987b, 45 p.

[26] Lelong F., Nature et genèse des produits d'altération de roches cristallines sous climat tropical humide (Guyane française), Mém. ENSG, Nancy 14, 1969, 188 p.

[27] Lelong F. et Souchier B., Comparaison des bilans d'altération sur roches granitiques en zone tempérée et en zone équatoriale, C. R. Acad. Sci. Paris 274 (1972) 1896–1899.

[28] Loveday J., Plateau Deposits of the Southern Chilterns Hills, Proc. Geol. Assoc. 73 (1962) 83–102.

[29] Matthieu C., Coninck de F., 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 (1972) 3–14.

[30] Murata K.J., Norman M.B., An index of crystallinity for quartz, Amer. Journ. Sci. 276 (1976) 1120–1130.

[31] QuesneL F., Bourdillon C. et Laignel B., Maastrichtien supérieur au nord-ouest du bassin de Paris (France). Témoins résiduels en Seine-Maritime, C. R. Acad. Sci. Paris, 322 IIa (1996) 1071–1077.

[32] Quesnel F., Cartographie numérique en géologie de surface. Application aux altérites à silex de l'ouest du Bassin de Paris, Thèse, Rouen, 1997, 256 p.

[33] Reid C., The geology of the country around Dorchester, Mem. Geol. Survey U.K. (1899) 34 p.

[34] Thiry M., Trauth N., Evolution historique de la notion d'argile à silex, Bull. inf. Géol. Bass. Paris 13 (4) (1976) 41–48.

[35] Thorez J. P., BullocK J., Catt J. A., Weir A., The petrography and origin of deposits filling solution pipes in the chalk near South Mimms, Hertfordshire, Geol. Mag. 108 (1971) 413–423.

[36] Van Den Broeck E., 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 (1881) 180 p.