



Les horizons d'accumulations carbonatées (HAC) en Champagne-Ardenne ; répartition régionale, caractérisation et conséquences sur les transferts hydriques

Damien Linoir

► To cite this version:

Damien Linoir. Les horizons d'accumulations carbonatées (HAC) en Champagne-Ardenne ; répartition régionale, caractérisation et conséquences sur les transferts hydriques. Interfaces continentales, environnement. Université de Reims Champagne-Ardenne, 2014. Français. NNT : . tel-01146005

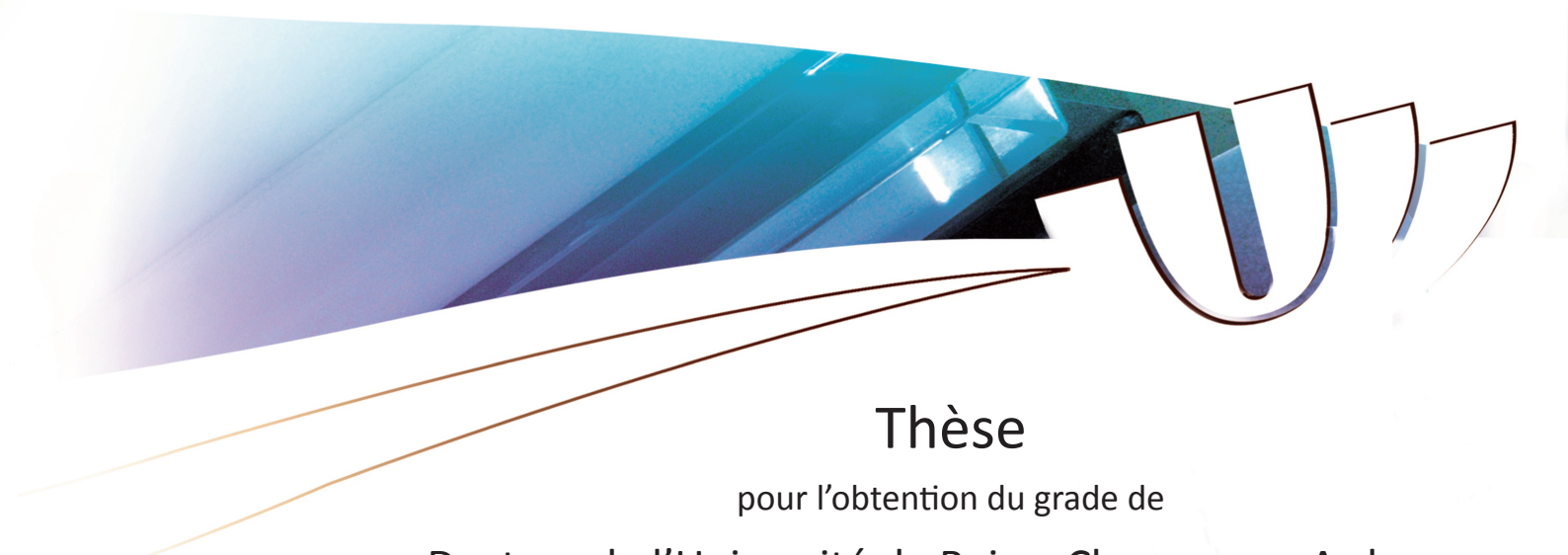
HAL Id: tel-01146005

<https://theses.hal.science/tel-01146005>

Submitted on 27 Apr 2015

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.



Thèse

pour l'obtention du grade de

Docteur de l'Université de Reims Champagne-Ardenne

Spécialité

Sciences de la Terre et de l'Univers

présentée par

Damien Linoir

Les horizons d'accumulations carbonatées (HAC) en Champagne-Ardenne

répartition régionale, caractérisation et conséquences
sur les transferts hydriques

Thèse soutenue publiquement le 24 juin 2014 devant le Jury composé de :

Ary BRUAND	Professeur des Universités, <i>Université d'Orléans</i>	Président du Jury
Corinne LOISY	Professeur des Universités, <i>Université Michel de Montaigne, Bordeaux 3</i>	Rapporteur
Yves GÉRAUD	Professeur des Universités, <i>Université de Lorraine</i>	Rapporteur
Anne-Véronique WALTER-SIMONNET	Maître de Conférences HDR, <i>Université de Franche-Comté</i>	Examineur
Jean-Pierre VANDERVAERE	Maître de Conférences, <i>Université Joseph Fourier, Grenoble</i>	Examineur
Oumarou MALAM ISSA	Professeur des Universités, <i>Université de Reims Champagne-Ardenne</i>	Directeur
Vincent BARBIN	Professeur des Universités, <i>Université de Reims Champagne-Ardenne</i>	Co-Directeur
Céline THOMACHOT-SCHNEIDER	Maître de Conférences, <i>Université de Reims Champagne-Ardenne</i>	Co-Encadrante

Thèse

pour l'obtention du grade de

Docteur de l'Université de Reims Champagne-Ardenne

Spécialité

Sciences de la Terre et de l'Univers

présentée par

Damien Linoir

Les horizons d'accumulations carbonatées (HAC) en Champagne-Ardenne

répartition régionale, caractérisation et conséquences
sur les transferts hydriques

sous la direction de

Oumarou Malam Issa

&

Vincent Barbin

co-encadrée par

Céline Thomachot-Schneider

financement

Contrat de Projet Etat-Région Aqual

préparée au sein de l'Equipe d'Accueil 3795

**Groupe d'Etude sur les Géomatériaux et les Environnements Naturels,
Anthropiques et Archéologiques (GEGENAA)**

-

**UFR Sciences Exactes et Naturelles
51100 - Reims - France**

RÉSUMÉ

Les sols de Champagne-Ardenne présentent de manière non systématique des horizons d'accumulations carbonatées (HAC). Ces HAC présentent une épaisseur variant entre 5 et 20 cm et sont localisés sous l'horizon organo-minéral à une trentaine de centimètres de profondeur. Ils se présentent sous la forme de cryoclastes crayeux centimétriques emballés dans une matrice silto-argileuse carbonatée.

Des études antérieures focalisées sur ce type de structures ont permis l'établissement d'une hypothèse de formation polyphasée et polygénique par l'entremise de phénomènes physico-chimique et biologiques de 14000 ans BP à l'actuel. Cependant, certaines questions restent encore en suspens et notamment en ce qui concerne la localisation des HAC dans le cadre régional champardennais, leur caractérisation par rapport aux autres horizons des profils de sol ainsi que leur rôle dans les transferts hydriques.

L'étude pénétrométrique réalisée dans ces travaux a montré que la localisation des HAC par reconnaissance indirecte s'avère extrêmement difficile. Cependant, l'analyse de données issues de sources bibliographiques variées a permis la détermination d'un contexte actuel de localisation préférentielle des HAC de Champagne-Ardenne en fonction de différents paramètres environnementaux.

La caractérisation des HAC par rapport aux autres horizons des profils de sols a été réalisée par colorimétrie, pénétrométrie dynamique, géochimie, étude de la porosité totale à l'eau, porosimétrie par injection de mercure et par une étude micromorphologique sur des échantillons prélevés tout au long des profils. Ces analyses montrent que les HAC sont clairement différents des horizons sus et sous-jacents. Les HAC présentent des couleurs plus claires liées à leur composition singulière et des micromorphologies différentes des autres horizons du profil pédologique ce qui justifie les réseaux poreux différents identifiés par porosimétrie par injection de mercure. Ces différentes études permettent également de compléter certaines phases des hypothèses de formation établies dans les études antérieures.

L'étude des transferts hydriques a été réalisée en laboratoire par des méthodes habituellement utilisées dans l'étude des pierres en œuvre (cinétiques d'absorption capillaire et d'évaporation et infiltrations à la pipette de Karsten). Ces travaux montrent

que les HAC ont un comportement différent des autres horizons vis-à-vis des transferts hydriques ce qui est directement à lier à leur morphologie différente.

Contrairement à ce qui est généralement avancé dans la bibliographie, les HAC ne font pas obstacle aux transferts hydriques que ce soit en infiltration ou en capillarité mais les favorisent de part leur réseau poreux singulier. Dans les profils de sols de Champagne-Ardenne, les mauvaises propriétés hydrauliques des grèzes est responsable en période de drainage la formation d'une nappe perchée qui induit des écoulements de subsurface en contexte de pente. La présence d'un HAC permet de retarder l'érosion du RENDOSOL plus meuble ainsi que le ruissellement de surface. En périodes d'arrêt du drainage, les bonnes propriétés de transferts hydriques des HAC permet aux eaux de la nappe perchée qu'ils contiennent d'alimenter le RENDOSOL. Les HAC forment donc une réserve d'eau qui ralentit le dessèchement de l'horizon organo-minéral.

Le croisement des nouvelles données de caractérisation des HAC avec celles concernant d'une part les transferts hydriques et, d'autre part, l'évolution annuelle des équilibres calco-carboniques permet de mettre en lumière une saisonnalité de l'évolution des HAC. Ces structures sont dans des dynamiques de genèse en périodes sèches et dans des dynamiques de dégradation en périodes plus humides. Le bilan général tend à montrer que les HAC sont dans une dynamique générale de dégradation et notamment dans leur partie la plus inférieure. Ce phénomène pourrait être accentué par les pratiques agricoles.

MOTS-CLEFS : horizons d'accumulations carbonatées (HAC) ; Champagne-Ardenne ; profil pédologique ; répartition régionale ; analyses pétrophysiques ; transferts hydriques.

ABSTRACT

Carbonate accumulation horizons (CAH) are structures un-systematically present in Champagne-Ardenne soils (NE of France). Localized under the rendic leptosol, these features exhibit a thickness between 5 and 20 cm. They are composed by centimetric chalk cryoclasts packed in a carbonated matrix.

Previous studies have led to hypothesize CAH establishment by physicochemical and biological processes from 14000 year BP to actual. However, questions remain about their regional distribution, their characterization compared to other soil horizons and their impact on water transfers.

Dynamic penetrometry showed that CAH indirect localization on the field was extremely difficult. However, literature data analyzing has allowed to determine a CAH preferential localization context according to environmental parameters.

CAH characterization has been realized by colorimetry, geochemistry, total water porosity, mercury injection porosimetry and micromorphological analyzes. CAH are clearly different from the over and underlying horizons. CAH show colors related to their composition and singular micromorphologies linked to a different porous network. These analyzes also allow to complete the establishment hypotheses.

Water transfers were studied by methods that are currently used for the study on building stones (capillary absorption and drying kinetic study and Karsten pipe infiltrations). CAH show a singular behaviour. CAH do not impede water transfers (infiltration and capillary rise) contrary to what is generally sated into literature.

The bad hydraulic properties of CAH underlying horizon cause the formation of perched water table which induces lateralized flows during drying periods into slope contexts at the scale of soil profiles. The CAH presence can delay rendic leptosol erosion and surface runoff. During dry periods, the good CAH hydraulic properties allow water contained into perched water table to supply the rendic leptosol. CAH thus form a water reserve which slows the drying of the organo-mineral horizon.

Characterization, calco-carbonic balances and water transfers data cross-referring also allows to suggest a CAH seasonal evolution. CAH could develop during dry periods and decline during wetter periods but the annual balance suggests that CAH are

Abstract

actually in a degradation period at their lower part. This may be exacerbated by actual farming practices.

KEYWORDS: carbonate accumulation horizons (CAH); Champagne-Ardenne; soil profile; regional localization; petrophysical analyses; water transfers.

REMERCIEMENTS

Lundi 5 Octobre 2009, je foule pour la première fois les allées du Campus Moulin de la Housse à la recherche de la salle où passer l'oral de sélection de la thèse. Quatre ans et demi plus tard, voici que s'achève cette étape riche d'un panel varié d'émotions...

A l'image d'un soufflet musical, tout s'active de plus en plus vite, administratif, relationnel, émotionnel, préparations diverses, les ornements baroques laissent place aux mélodies développées et aux contrastes du Classique. Le Romantisme finit par imposer ses émotions puissantes et ses grilles harmoniques complexes alors que la lumière du vidéoprojecteur s'intensifie sur la ligne d'horizon derrière des montagnes aux allures de bout du monde. Un matin, c'est le jour du grand *sforzando* central qui satellise dans un autre monde. Un *Allegro Molto* de Bartók puis quelques passages d'Offenbach plus tard, on enlève tout ce qui est superflu, on s'affranchit des chapes de plomb qui nous ont trop longtemps oppressé et ne reste que l'essentiel dans la *Gnossienne* finale lorsqu'il est grand temps de remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

*« Dans la vie, les hommes sont tous tributaires les
uns des autres. Il y a donc toujours quelqu'un à
maudire ou à remercier... »*

Madeleine Ferron - Extrait de « *Le chemin des dames* »

Je tiens donc tout d'abord à remercier **CÉLINE THOMACHOT-SCHNEIDER**, co-encadrante de cette thèse, pour l'investissement considérable dont elle a fait preuve durant ces trois dernières années. Cette thèse n'aurait jamais pris vie sans son dévouement et ses nombreux conseils. Merci pour le temps (et l'énergie !) que tu m'as consacré !

Je remercie **OUMAROU MALAM ISSA** et **VINCENT BARBIN**, directeur et co-directeur de thèse pour m'avoir donné la possibilité et les moyens de réaliser ces travaux. Merci pour l'ensemble de vos conseils et remarques.

Merci à **CORINNE LOISY** et **YVES GÉRAUD** qui ont accepté de prendre de leur temps afin de relire ce manuscrit et d'y apporter leurs précieux commentaires, remarques et

Remerciements

conseils avisés. Une pensée particulière pour « *Loisy [1997]* » qui m'a accompagné tout au long de ces quatre années et demi.

Merci à **ANNE-VÉRONIQUE WALTER-SIMONNET** et **JEAN-PIERRE VANDERVAERE** d'avoir accepté de venir en Terres Champenoises en qualité d'examineurs de la soutenance de ces travaux. Merci à Jean-Pierre pour l'accueil au LTHE de Grenoble, pour le prêt de l'infiltromètre à disque et pour les nombreux conseils. Merci à Anne-Véronique pour tout ce qu'elle m'a apporté depuis mon premier stage de recherche en troisième année de Licence Géosciences à Besançon. Merci pour les conseils, les remontages de moral et pour tout le reste !

Et bien sûr, merci à **ARY BRUAND** d'avoir accepté de présider ce jury en plus de sa qualité d'examineur. Merci pour votre gentillesse, votre égard vis-à-vis de l'auditoire et pour les nombreux conseils que vous m'avez donnés.

Je remercie également la **RÉGION CHAMPAGNE-ARDENNE** qui a financé cette thèse à travers le Programme AQUAL : « *Lutte pour les pollutions diffuses en milieu rural sur le bassin versant de la Vesle* ».

Merci à toute l'équipe du **GEGENAA** pour son accueil chaleureux, les discussions sérieuses mais aussi celles qui le sont moins ! Merci à **PATRICIA VÁZQUEZ** pour les affres statistiques à **XAVIER MORVAN** pour les discussions hydrologiques et à **MAXIME GOMMEAUX** pour les premières années et l'aide importante sur le terrain.

Un merci tout particulier pour **GILLES FRONTEAUX**. Pas de manière simple de dire pourquoi. Toujours présent et toujours la bonne façon de faire. Les discussions passionnantes sur ma thèse mais aussi sur à peu près tout le reste. Merci !

Je remercie **ALEXANDRA CONREUX**, **XAVIER DROTHIÈRE**, **JULIEN HUBERT** et **DIDIER DELOR**, pour l'aide importante qu'ils m'ont apportée lors des différents travaux de sciage, de prélèvement des multiples blocs sur le terrain, de la préparation des sols, la confection des lames minces dans un matériau peu coopérant et bien plus encore.

Merci également à **HUBERT GUÉRIN** et **MICHEL LAURAIN** pour la découverte géologique et géomorphologique de la région. Une pensée pour **MICHEL COULON** et ses nombreux conseils sur l'utilisation du pénétromètre dynamique pour l'étude des formations superficielles.

Comment pourrais-je oublier mes camarades Thésards, Posdocs, ATER et autres gens du voyage de la Recherche. Par ordre d'apparition à l'écran de mes souvenirs : **THOMAS BOUCHET**, premier collègue de bureau également « croûtologue » qui m'a fait découvrir Lyon et sa campagne, **ANTHONY GAUTHIER** et ses aspirations cyclistes, **CLAIRE PICHARD**, celle que j'aurai toujours envie de « frapper », **CHRISTELLE SOSSON**, alias Dame Ginette, **BASTIEN FARRE** pour les barbeuks et autres bonnes pitances, **NICOLAS BOLLLOT** et ses

terrains glissants, **KHAIRAT ABBAS** pour le tape-Khairat (oui, il arrive des moments où l'on a un peu envie de taper tout le monde...), **SON TONG SI** et ses méridiennes et, bien sûr, **ARNAUD SCHNEIDER**, notre nounours grincheux à nous et **ANNE-LAURE**, sa chère et tendre. Vous avez toutes et tous collaboré à la bonne humeur nécessaire et à la réalisation de cette thèse ! Et j'en oublie...

Merci à tous les musiciens de l'orchestre **EUPHONY**, NOTRE orchestre, pour tous les bons moments passés ensemble en répètes comme en concert et la bonne ambiance ! Un clin d'œil à **ISABELLE**, ma collègue de pupitre pendant plus de quatre ans, pour son soutien bien sûr, mais aussi pour les nombreux fous-rires.

Toujours dans un domaine plus musical, merci à **ALEXANDRA METZ**, **LAURENT MASSON**, **AMÉLIE PORRET-DUBREUIL**, **IRÈNE DROULLÉ** et **CHARLES CHAUVÉ**, respectivement violonistes, altiste, violoncelliste et clarinettiste de notre quintette « *Les Ornithes* ». Comment pourrais-je oublier nos aventures ! Comment oublier la trompeuse candeur de *Pomme d'Api*, les contretemps de *Rabbi Jacob*, l'*Andante moderato* du Rimski-Korsakov, les Irlandais, les soirées ! Merci aussi aux conjoint(e)s **CHRISTINE**, **SOIZIC** et **JULIEN** pour avoir supporté nos canards et nos discussions anarchistes (et anarchiques ?) ! Un clin d'œil également à **MANON** et **JULIEN**. Sans vous tous, cette aventure doctorale aurait été différente. Bien différente.

Merci à **MÉLANIE GARRET** et **JULIEN CICILIANI**, IGE Géotechniciens et anciens collègues de Licence et Master de Besançon, échus à Reims par les grands hasards de la vie qui font parfois bien les choses. Je leur dois énormément de bons moments et bien d'autres choses encore !

Je pense également à tous ces gens qui flottent encore dans mes souvenirs. **VÉRONIQUE**, bien sûr, mais aussi **EVA** et **YOUËN** qui sont passés par cette épreuve avant moi... **MÉLANIE**, **AYMERIC**, **JORDANE**...

Merci également à **ROMAIN LAFAY** pour tout ce qu'on a vécu depuis ce jour d'automne 2004 vers l'arrêt de bus Fanart il y a dix ans... Merci à toi et à **JULIE** pour l'accueil grenoblois ! J'espère que vous gardez avec fierté le « souvenir » que je vous ai laissé à l'insu de mon plein gré...

Je remercie tout particulièrement **ANTOINE PRIN**, colocataire de la dernière ligne droite. Merci pour les corvées de relecture, les conseils et pour avoir supporté mon stress je dirais... un tantinet communicatif... Merci pour tout plein de choses en fait !

Un grand merci à **GRÉGORY TISSIER** pour l'initiation à LaTeX, bien sûr, les excellents moments passés au bureau et en TP, les pauses clopes, les très nombreux conseils divers et variés, les longues discussions et pour l'ensemble de son œuvre. Merci également à **MARIE** pour tout plein de chose. Et vivement la suite !

Remerciements

J'ai également une forte pensée pour les non-rémois qui ont jalonné mon parcours de près comme de loin. **NOËLLINE MANTEY** ainsi que sa famille pour tout ce qu'on a vécu depuis, oula, une petite quinzaine d'année et tout ce qui reste à vivre..., la bise à **KÉVIN**. **SYLVIA BISOFFI**, nos discussions philosophiques sur la vie et plus si affinités, nos fous-rires perpétuels, nos séances de psy, les soirées pas très catholiques, le Martini de la pénurie..., la bise à **GAËL**.

Et, bien sûr, je remercie **AURÉLIE TURMEL**. Un savant mélange de tout pleins de choses. Nos discussions porosimétriques, philosophiques, mais surtout nos délires de tous les instants à l'époque du bureau commun et après, nos re-motivations mutuelles. Pour tout ce que tu m'as apporté, Merci !

Je tiens en dernier lieu à remercier ma famille et plus particulièrement **MES PARENTS** qui ont toujours été présents, dans les bons moments comme dans les pires, et ce en dépit des aléas de la vie qui, souvent, s'acharne un peu trop...

Ainsi s'achèvent mes remerciements dont l'aspect dithyrambique témoigne de l'importance que vous avez toutes et tous eu pour moi tout au long de ces quatre années et demi et/ou depuis bien plus longtemps. Merci d'avoir ensoleillé cette période (très) particulière de quelque façon que ce soit !

« - Comtois, rends-toi !
- Nenni, ma foi ! »

à JEANNE ET PIERRE LORIOD
mes grands-parents

grandeurs d'âme et de cœur...

LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Signification	Unité
α	angle de contact liquide/solide	°
A	section de pointe	m ²
A _k	surface de contact	m ²
ag	agrégat micro-cryoclaste/matrice détritique	-
β	constante estimée à 0,6	-
$\overline{b(\lambda)}$	fonction colorimétrique des cônes réiniens sensibles au bleu	-
C	concentration massique de vapeur d'eau dans l'air	g.m ⁻²
C ₁	coefficient de prise de poids en eau	g.m ⁻² .s ^{-1/2}
C ₂	coefficient de progression de la frange capillaire	m.s ^{-1/2}
C _d	coefficient de dispersion	-
C _{e,r}	concentration de l'élément chimique dans l'horizon de référence	%
C _{e,t}	concentration de l'élément chimique dans l'horizon testé	%
C _{i,r}	concentration de l'iso-élément chimique dans l'horizon de référence	%
C _{i,t}	concentration de l'iso-élément chimique dans l'horizon testé	%
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage	-
CR	macro-cryoclaste de craie	-
cr	micro-cryoclaste de craie	-
ΔE^*	coefficient de différence de couleur	-
$\Delta \rho$	différence de masse volumique air/eau	kg.m ⁻³
D _v	coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air pur	m ² .s ⁻¹
D	dimension fractale	-
η	viscosité dynamique	Pa.s = kg.m ⁻¹ .s ⁻¹
E	énergie cinétique de battage	J = kg.m ² .s ⁻²
e	enfoncement du train de tiges	m
F	flux d'évaporation	g.m ² .s ⁻¹
γ	constante égale à 0,75	-
g	accélération de la pesanteur	9,806 kg.s ⁻²
$\overline{g(\lambda)}$	fonction colorimétrique des cônes réiniens sensibles au vert	-
H	teinte de Munsell	-

Liste des symboles

h_1	charge hydrostatique	m
h_c	hauteur d'ascension capillaire	m
HAC	horizon(s) d'accumulations carbonatées	-
HVS	Human Visual System	-
I	lame d'eau infiltrée	m
ICP-AES	Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry	-
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry	-
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique	-
$I_{r_{i-1}}$	intrusion incrémentale de mercure sur l'intervalle de rayons $[i ; i-1]$	mL.g^{-1}
I_{r_i}	intrusion différentielle logarithmique de mercure pour un rayon i	mL.g^{-1}
K	conductivité hydraulique	m.s^{-1}
k_1	constante de proportionnalité	-
k_2	constante de proportionnalité	-
K_m	efficacité lumineuse maximum en vision diurne	683 lm.W^{-1}
L	longueur du tube capillaire	m
L_0	ordonnée à l'origine de la frange mouillée	m
L_f	hauteur de la frange mouillée	m
L^*	luminosité	-
M	micro-aiguilles calcitiques simples	-
m_{15}	eau infiltrée à $t + 15 \text{ min}$	g
m_5	eau infiltrée à $t + 5 \text{ min}$	g
m_{90}	eau infiltrée à $t + 90 \text{ s}$	g
m_d	masse de l'échantillon sec	g
m_f	masse frappante	kg
m_h	masse hydrostatique de l'échantillon	g
m_s	masse de l'échantillon saturé	g
MA	micro-aiguilles calcitiques appariées	-
MB	micro-aiguilles calcitiques en agencements complexes	-
MD	matrice détritique	-
MEB	Microscope Électronique à Balayage	-
N	nombre de capillaires	-
N_{cap}	porosité capillaire	%
N_{Hg}	porosité totale par injection de mercure	%
N_t	porosité totale à l'eau	%
NFC	Needle Fiber Calcite	-
P_0	pression de gaz	Pa
P_{20}	pression d'injection de mercure pour envahir 20 % du réseau poreux	Pa
P_{50}	pression d'injection de mercure pour envahir 50 % du réseau poreux	Pa
P_{80}	pression d'injection de mercure pour envahir 80 % du réseau poreux	Pa
P_{airVM}	pression de l'air dans le vase de Mariotte	Pa
P_{atm}	pression atmosphérique	Pa

P_c	pression capillaire	Pa
P_f	masse frappée	kg
P_{Hg}	pression exercée par le mercure	Pa
P_t	pression de liquide	Pa
P_{vap}	pression de vapeur saturante de mercure	Pa
PC	porosité de canaux	-
Q	débit du fluide	$m^3.s^{-1}$
q	densité de flux massique	$kg.m^{-2}.s^{-1}$
Q_d	résistance de pointe	Pa
ρ_{eau}	masse volumique de l'eau	$1000 kg.m^{-3}$
R	rayon de courbure du ménisque	m
R_{eq}	rayon équivalent	m
R_1 et R_2	rayons décrivant le ménisque	m
R_m	rayon moyen	m
r	rayon d'accès aux pores	m
r_d	rayon du disque d'infiltration	m
$\overline{r(\lambda)}$	fonction colorimétrique des cônes rétiens sensibles au rouge	-
σ	tension superficielle	$N.m^{-1}$
σ_{lg}	tension interfaciale liquide/gaz	$N.m^{-1}$
σ_{sg}	tension interfaciale solide/gaz	$N.m^{-1}$
σ_{sl}	tension interfaciale solide/liquide	$N.m^{-1}$
S	sorptivité capillaire	$m.s^{-1}$
S_c	saturation critique	%
θ_f	teneur en eau volumique finale de l'horizon testé	-
θ_i	teneur en eau volumique initiale de l'horizon testé	-
t	temps	s
t_{sc}	temps critique	s
UCC	Upper Continental Crust	-
V	clarté de Munsell	-
V_p	volume poreux de l'échantillon	L
V_s	volume de la matrice solide de l'échantillon	L
V_t	volume total de l'échantillon	L
v_f	vitesse de frappe	$m.s^{-1}$
W_0	masse d'eau initiale avant immersion de l'échantillon	g
W_a	coefficient moyen d'absorption d'eau	$g.m^{-2}.s^{-1}$
X	réponse des cônes rétiens M et L	-
x	distance entre deux points	m
$\overline{x(\lambda)}$	fonction colorimétrique positive des cônes rétiens sensibles au rouge	-
Y	luminance	-
$\overline{y(\lambda)}$	fonction colorimétrique positive des cônes rétiens sensibles au vert	-
Z	réponse des cônes rétiens S	-
$\overline{z(\lambda)}$	fonction colorimétrique positive des cônes rétiens sensibles au bleu	-

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	I
ABSTRACT.....	III
REMERCIEMENTS	V
LISTE DES SYMBOLES	XI
SOMMAIRE	XV
INTRODUCTION	1
PREMIÈRE PARTIE : CONTEXTE GÉNÉRAL DE L'ÉTUDE	5
CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES HAC	7
I. RÉPARTITION MONDIALE	7
II. ORIGINES	8
III. MICROMORPHOLOGIE GÉNÉRALE	10
1. STRUCTURES MACROSCOPIQUES	10
a. <i>Rhizolithes</i>	11
b. <i>Les croûtes laminaires</i>	11
c. <i>Pisolithes</i>	11
2. STRUCTURES MICROSCOPIQUES	11
a. <i>Rhizolithes</i>	11
b. <i>Structures laminaires et revêtements de pisolithes</i>	12
c. <i>Péloïdes</i>	12
d. <i>Filaments calcifiés et calcisphères</i>	13
e. <i>Sphérulites</i>	14
f. <i>Needle Fiber Calcite (NFC)</i>	14
➤ Aiguilles monocristallines	15
➤ Chaînes polycristallines	16
➤ Nanobaguettes de calcite	17
➤ Origine des aiguilles de calcite	18
IV. COLORIMÉTRIE.....	19
V. CLASSIFICATION	19
VI. ÉCHELLE DE TEMPS.....	22
VII. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX.....	22
VIII. CONCLUSIONS	23

CHAPITRE II : LES HAC EN CHAMPAGNE-ARDENNE..... 25

I. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE	25
1. LOCALISATION ET GÉOGRAPHIE ADMINISTRATIVE	25
2. LE CLIMAT CHAMPARDENNAIS	25
a. <i>Précipitations</i>	26
b. <i>Insolation</i>	27
c. <i>Températures</i>	27
II. CONTEXTE GÉOLOGIQUE	27
1. RAPPELS GÉOLOGIQUES SUR LE BASSIN DE PARIS	27
a. <i>Limites géographiques</i>	27
b. <i>Le socle du bassin de paris}</i>	28
c. <i>Histoire sédimentaire</i>	30
2. GÉOLOGIE DE LA CHAMPAGNE-ARDENNE	32
a. <i>Les substrats géologiques</i>	32
➤ Le socle hercynien.....	32
➤ Le Trias	32
➤ Le Jurassique	32
➤ Le Crétacé	34
➤ Le Tertiaire	34
b. <i>Les formations superficielles</i>	35
➤ Formations issues de la gélifraction.....	35
▪ Les poches de cryoturbation :	35
▪ Les grèzes litées ou « graveluches » :	36
➤ Les limons	39
➤ Les alluvions	39
3. ESQUISSE PÉDOLOGIQUE	39
4. PAYSAGE VÉGÉTAL	40
III. RÉPARTITION.....	42
IV. MICROMORPHOLOGIE.....	42
1. CRYOCLASTES DE CRAIE	44
2. LIANT CARBONATÉ	46
a. <i>Matrice à éléments détritiques</i>	46
b. <i>Ciments microsparitique et sparitique</i>	47
c. <i>Phases à aiguilles et micro-aiguilles calcitiques</i>	47
3. RÉPARTITION VERTICALE DES PHASES DU LIANT CARBONATÉ.....	48
V. MODALITÉS ET CHRONOLOGIES DE FORMATION.....	49
1. LE MODÈLE <i>PER DESCENSUM</i> [DURAND, 1979 ET 1980].....	49
2. UNE PÉDOGENÈSE BIPHASÉE [DEVER ET AL., 1983]	50
3. LES HYPOTHÈSES GÉNÉTIQUES DE LOISY [1997]	50
VI. CLASSIFICATION	51
VII. CONSÉQUENCES ENVIRONNEMENTALES.....	53

CHAPITRE III : RÉPARTITION RÉGIONALE DES HAC..... 55

I. RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES.....	55
--	-----------

II. ÉTABLISSEMENT DE LA BASE DE DONNÉES	57
III. CLASSIFICATION DES VARIABLES	58
1. SUBSTRAT GÉOLOGIQUE	58
2. TOPOGRAPHIE	59
3. FORMATION SUPERFICIELLE	60
4. SOL	60
5. COUVERT VÉGÉTAL	61
6. ORIENTATION TOPOGRAPHIQUE	62
IV. EXPLORATION DES DONNÉES	64
V. CONCLUSION	66
 CHAPITRE IV : SITES ÉTUDIÉS	 69
I. LE SITE DU MONT DU MÉNIL	69
1. LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE	69
2. LOCALISATION GÉOMORPHOLOGIQUE	69
3. CONTEXTE GÉOLOGIQUE	72
4. DESCRIPTION GÉNÉRALE DU FRONT DE TAILLE	74
a. <i>La craie sénonienne</i>	74
b. <i>Les formations superficielles</i>	74
c. <i>L'horizon d'accumulations carbonatées</i>	74
d. <i>Le sol</i>	75
5. DESCRIPTION DES PROFILS 1 ET 2 SUR L'ANCIEN FRONT DE TAILLE	75
6. DESCRIPTION DU PROFIL 3 SOUS BOIS	77
II. AUTRES SITES ÉTUDIÉS	79
1. SITE D'AUSSONCE-NORD-OUEST	79
2. SITE D'AUSSONCE-EST	79
3. SITE DU VIEUX MONT	81
III. ÉCHANTILLONNAGE	83
1. PRÉLÈVEMENTS <i>IN SITU</i>	83
2. SOUS-ÉCHANTILLONNAGE EN LABORATOIRE	83
 DEUXIÈME PARTIE : CARACTÉRISATION DES HAC	 87
 CHAPITRE V : MÉTHODES ET TECHNIQUES DE CARACTÉRISATION	 89
I. CARACTÉRISATION COLORIMÉTRIQUE	89
1. SYSTÈME CIE-XYZ (CIE-Yxz)	90
a. <i>Définition du système</i>	90
b. <i>Diagramme de chromaticité</i>	92
2. SYSTÈME $L^*a^*b^*$	93
a. <i>Définition du système</i>	93
b. <i>Coefficient de différence de couleur $\Delta E^* L^*a^*b^*$</i>	94

c. Représentation des résultats.....	95
3. APPAREILLAGE ET MÉTHODOLOGIE	95
II. CARACTÉRISATION PÉNÉTROMÉTRIQUE	95
1. PÉNÉTROMÉTRIE DYNAMIQUE À ÉNERGIE VARIABLE	96
2. CALCUL DE LA RÉSISTANCE DE POINTE Q_0	98
3. RESTITUTION DES COURBES DE PÉNÉTRATION	98
III. CARACTÉRISATION GÉOCHIMIQUE.....	99
1. TENEURS EN CARBONATES ET CARBONE ORGANIQUE TOTAUX.....	99
2. TENEURS EN ÉLÉMENTS MAJEURS ET TERRES RARES	100
3. ÉCHANTILLONNAGE	102
IV. CARACTÉRISATION MINÉRALOGIQUE.....	102
V. CARACTÉRISATION MICROMORPHOLOGIQUE	102
1. RÉALISATION DES LAMES MINCES	102
2. ANALYSE D'IMAGES SUR LAMES MINCES.....	103
3. MICROSCOPIE	104
a. Microscopie optique.....	104
b. Microscopie électronique à balayage	105
VI. CARACTÉRISATION DU MILIEU POREUX	105
1. POROSITÉS ET MORPHOLOGIE DU MILIEU POREUX.....	105
a. Le milieu poreux	105
b. Les types de porosité.....	105
c. Les classes de porosité	107
2. POROSIMÉTRIE TOTALE À L'EAU	109
a. Principe	109
b. Dispositif expérimental	109
c. Calcul de la porosité totale à l'eau	111
d. Adaptation de la méthode aux matériaux étudiés.....	111
3. POROSIMÉTRIE PAR INTRUSION DE MERCURE	112
a. Théorie	113
➤ Tension d'interface fluide-fluide : tension de surface.....	113
➤ Tension d'interface fluide-solide : mouillabilité.....	113
▪ Équation de Young :	113
▪ Mouillabilité :	114
▪ Pression capillaire	114
▪ La loi de Laplace.....	115
b. Application à la porosimétrie au mercure.....	116
c. L'essai porosimétrique	117
➤ Intrusion du mercure	117
▪ La mesure en basses pressions :	119
▪ La mesure en hautes pressions :	120
➤ Extrusion du mercure.....	120
➤ Courbes de restitution	120
➤ Outils de description de l'allure des courbes	121
▪ Les familles de pores et le rayon d'accès :	122
▪ Le coefficient de dispersion C_d :	122
➤ Piégeage du mercure	124
➤ Dimension fractale D.....	124

➤ Limites de la méthode	126
d. Échantillons étudiés	127
e. Appareillage.....	127
VII. DATATION AU CARBONE 14.....	127

CHAPITRE VI : RÉSULTATS DE LA CARACTÉRISATION DES HAC131

I. COLORIMÉTRIE.....	131
1. ESPACE CIE XYZ 1931.....	131
2. ESPACE CIE L*A*B*	133
II. GÉOCHIMIE.....	135
1. TENEUR EN CARBONATES	135
2. TENEUR EN CARBONE ORGANIQUE TOTAL (COT)	136
3. ÉLÉMENTS MAJEURS.....	138
a. Description préliminaire des courbes.....	138
b. Rapports élément majeur/SiO ₂	140
➤ Al ₂ O ₃ :	140
➤ Fe ₂ O ₃ :	140
➤ CaO :	140
➤ MgO, Na ₂ O, K ₂ O et TiO ₂ :	141
➤ P ₂ O ₅ :	141
➤ MnO :	142
c. Gains/pertes en éléments majeurs normalisés à la craie	142
➤ Profils 1 et 2 : le front de taille :	142
➤ Cas du profil 3 sous bois :	142
d. Gains/pertes en éléments majeurs normalisés aux grèzes	144
➤ Profils 1 et 2 au niveau du front de taille :	145
➤ Profils 3 sous bois :	146
e. Analyse en composantes principales sur les majeurs	147
➤ Données de l'analyse en composantes principales :	147
➤ Graphique des variables/individus selon les composantes 1 et 2 :	148
4. TERRES RARES	148
a. Contenu en terres rares	148
b. Gain/perte rapportés à la craie et aux grèzes	149
c. Analyse en composante principale sur les terres rares	151
➤ Les données de l'analyse en composantes principales :	151
➤ Graphique variables/individus selon les composantes 1 et 2 :	152
d. Spectres de terres rares	152
➤ Normalisation à l'U.C.C. :	152
➤ Normalisation au substrat crayeux :	155
e. Rapports éléments majeurs/terres rares totales	157
III. RÉSISTANCE DES HAC À LA PÉNÉTRATION.....	158
IV. CONTENU MINÉRALOGIQUE.....	160
V. ÉTUDE MICROMORPHOLOGIQUE	162
1. CONTENU GÉNÉRAL EN CRYOCLASTES.....	162
2. ENTITÉS PRINCIPALES CONSTITUTIVES FIGURÉES	164

Sommaire

a.	Macro-cryoclastes de craie	164
b.	Agrégats micro-cryoclastes/matrice détritique	166
3.	ENTITÉS SECONDAIRES	169
a.	Porosité de canaux	169
b.	Aiguilles de calcite	169
c.	Aires ouvertes	171
4.	SYNTHÈSE	174
VI.	ÉTUDE POROSIMÉTRIQUE	175
1.	POROSITÉ TOTALE À L'EAU	175
2.	POROSITÉ TOTALE PAR INJECTION DE MERCURE	176
3.	CARACTÉRISATION DU MILIEU POREUX PAR INJECTION DE MERCURE	177
a.	Le substrat crayeux	177
b.	Les grèzes	179
c.	Les HAC	179

CHAPITRE VII : DISCUSSION PARTIELLE 185

I.	COLORIMÉTRIE ET CARBONATES	185
II.	COT ET P_2O_5	186
III.	APPORTS DE L'ÉTUDE GÉOCHIMIQUE	186
1.	ÉLÉMENTS MAJEURS	186
2.	TERRES RARES	186
3.	CONCLUSION	188
IV.	PÉNÉTROMÉTRIE DYNAMIQUE	188
V.	ÉTUDE MINÉRALOGIQUE	189
VI.	MICROMORPHOLOGIE ET POROSITÉS	189

TROISIÈME PARTIE : TRANSFERTS HYDRIQUES DANS LES HAC 195

CHAPITRE VIII : MÉTHODES ET TECHNIQUES D'ÉTUDE DES TRANSFERTS HYDRIQUES 197

I.	GÉNÉRALITÉS SUR LES TRANSFERTS HYDRIQUES	198
1.	LES PHASES DE L'EAU	198
2.	L'ÉTAT SEC	198
II.	CINÉTIQUES D'IMBIBITIONS CAPILLAIRES	198
1.	THÉORIE	199
a.	La loi de Jurin	199
b.	La loi de Hagen-Poiseuille	199
c.	L'équation de Washburn	200
d.	Coefficients de capillarité C_1 et C_2	201
2.	DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL	202
a.	Préparation des échantillons	202

b.	<i>Déroulement de l'expérience</i>	203
3.	SIGNIFICATION DES COURBES D'IMBIBITION CAPILLAIRE.....	204
a.	<i>Migration de la frange capillaire</i>	204
b.	<i>Évolution de la prise de poids en eau</i>	205
➤	Première phase	205
➤	Deuxième phase	205
c.	<i>Types de réseaux poreux</i>	207
➤	Le réseau monomodal	207
➤	Le réseau bimodal	207
➤	Le réseau hétérogène	207
d.	<i>Rayon équivalent R_{eq} et nombre de capillaire N</i>	208
4.	INFLUENCE DES FORCES GRAVITAIRES	209
III.	CINÉTIQUES DE SÉCHAGE	209
1.	PRINCIPE DE DIFFUSION	209
a.	<i>Les lois de Fick</i>	210
➤	Première loi de Fick	210
➤	Deuxième loi de Fick.....	210
b.	<i>Alimentation de la surface libre</i>	211
2.	DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL.....	211
a.	<i>Préparation des échantillons</i>	211
b.	<i>Déroulement de l'expérience</i>	211
3.	SIGNIFICATION DES COURBES DE SÉCHAGE	212
a.	<i>Phase I (linéaire) et saturation critique</i>	212
➤	Le flux d'évaporation F	212
➤	La surface évaporante effective	213
➤	Saturation critique S_c et temps critique t_{sc}	213
b.	<i>Phase II (courbe)</i>	214
c.	<i>Phase III (linéaire)</i>	214
IV.	INFILTRATIONS À LA PIPETTE DE KARSTEN	214
1.	DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL.....	215
2.	CALCUL DU COEFFICIENT MOYEN D'ABSORPTION W_A	215
V.	INFILTROMÉTRIE À DISQUE	217
1.	APPAREILLAGE	217
2.	UTILISATION SUR LE TERRAIN.....	218
3.	DÉTERMINATION DE LA SORPTIVITÉ CAPILLAIRE S	221
CHAPITRE IX : RÉSULTATS OBTENUS POUR LES TRANSFERTS HYDRIQUES		223
I.	RÉSULTATS DES TESTS D'IMBIBITIONS CAPILLAIRES	223
1.	PRISE DE POIDS EN EAU C_1	223
2.	MIGRATION DE LA FRANGE CAPILLAIRE C_2	225
3.	POROSITÉ CAPILLAIRE N_{CAP}	227
II.	RÉSULTATS DES CINÉTIQUES DE SÉCHAGE	228
1.	FLUX D'ÉVAPORATION F	228
2.	SATURATION CRITIQUE S_c	230

CHAPITRE X : DISCUSSION PARTIELLE	235
I. TRANSFERTS HYDRIQUES EN INFILTRATION	235
II. TRANSFERTS HYDRIQUES PAR REMONTÉES CAPILLAIRES	235
III. CINÉTIQUES DE SÉCHAGE	236
IV. CONCLUSION.....	238
 DISCUSSION GÉNÉRALE	239
CONCLUSION GÉNÉRALE	263
PERSPECTIVES DE RECHERCHE.....	269
BIBLIOGRAPHIE	273
LISTE DES ILLUSTRATIONS.....	309
LISTE DES TABLEAUX	321
ANNEXES	325
INDEX	349

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le Contrat d'Objectifs AQUAL est un Contrat de Projet État-Région débuté en 2003 né de l'orientation du PIREN Seine dans sa phase quadriennale 2002-2005. Ce programme fédère une multitude d'équipes de recherche dont l'objectif principal est la lutte contre les pollutions diffuses en milieu rural sur le bassin versant de la Vesle, zone de grandes cultures et de vignobles autour de l'agglomération de Reims. Un des grands axes de ce Contrat d'Objectif vise à étudier les mécanismes de dégradation et de transfert des contaminants depuis les sols jusqu'aux aquifères. Cet axe de recherche nécessite donc en amont la compréhension des transferts hydriques dans les différents compartiments verticaux constituant les sols et les substrats géologiques.

Les profils de sol de Champagne-Ardenne ont la particularité de présenter de manière non systématique des horizons caractérisés par des accumulations de carbonates. Ces structures particulières n'ont fait l'objet que de peu d'études. La plus récente et la plus complète est constituée par les travaux de thèse de Corinne Loisy qui s'est focalisée en [1997] sur le rôle de la diagenèse et des actions biologiques lors de la formation de ces horizons d'accumulations carbonatées (HAC) dans l'est du Bassin de Paris. Par des études micromorphologiques poussées notamment, l'auteure a défini différentes phases de genèse de ces structures qui débutent il y a 14000 ans BP et se poursuivent jusqu'à l'actuel en lien avec l'évolution climatique. Cependant, diverses questions restent encore sans réponse à l'heure actuelle :

- la première concerne la répartition géographique des HAC en Champagne-Ardenne. En effet, si les HAC sont connus pour être des niveaux irrégulièrement présents à l'échelle régionale comme à l'échelle locale, aucune étude ne s'est attachée à préciser la localisation de ces structures ;
- la seconde concerne la caractérisation précise des HAC. En effet, bien que ces niveaux aient déjà fait l'objet d'études, ces dernières se sont toujours focalisées sur les HAC sans jamais les comparer aux autres horizons des profils de sol et notamment à certains types de formations superficielles qui semblent être considérés comme leur matériau d'accueil ;
- enfin, la littérature semble généralement envisager que les horizons d'accumulations carbonatées champardennais font obstacle aux transferts

hydriques. Cependant, aucune étude poussée n'a jamais été menée à ce jour afin de confirmer cette hypothèse.

L'originalité de ce travail repose d'abord sur la mise au point et l'analyse d'une base de donnée issue de sources bibliographiques diversifiées afin de pouvoir définir un contexte actuel de localisation préférentielle de ce type de structures en fonctions de différents paramètres environnementaux. Ceci a également permis la sélection d'un site pilote correspondant à ce type de contexte de localisation préférentielle : le Mont du Ménil, ancienne carrière localisée dans le sud du département des Ardennes au niveau duquel trois profils ont subi un échantillonnage et des prélèvements systématiques. Ce travail repose également sur l'utilisation sur des horizons de sols assez cohérents de méthodes pétrophysiques habituellement utilisées dans l'étude des pierres en œuvre (porosimétrie par injection de mercure, porosité totale à l'eau, cinétiques d'absorptions capillaires et d'évaporations). Le couplage de ces méthodes singulières d'étude des sols à des méthodes de terrain et de laboratoire plus habituelles (pénétration dynamique, géochimie, étude micromorphologique et diffraction des rayons X) a été réalisé afin de pouvoir apporter des connaissances nouvelles sur ces structures particulières des sols champardennais.

Le présent mémoire est construit en trois parties subdivisées en différents chapitres :

- la **première partie** présente le contexte général de l'étude. Elle sera composée de quatre chapitres présentant la description générale des HAC dans le contexte mondial, les connaissances actuelles sur les HAC champardennais, l'exploration bibliographique déterminant leurs zones de localisation préférentielle et une description précise des sites d'étude ;
- la **deuxième partie** regroupe l'ensemble des travaux concernant la caractérisation multi-proxy des HAC par rapport aux autres horizons des profils de sol. Elle sera composée de trois chapitres présentant en détail l'ensemble des méthodes utilisées, les résultats qui en sont issus et les interprétations et conclusions partielles ;
- la **troisième partie** focalise sur les propriétés de transferts hydriques au sein des HAC champardennais. Comme dans la partie précédente, trois chapitres présenteront en détail l'ensemble des méthodes utilisées, les résultats qui en sont issus ainsi que les interprétations et les conclusions partielles.

Les résultats majeurs obtenus dans les deux parties précédentes seront ensuite interprétés puis discutés avant que la conclusion présente les données et idées nouvelles qui ressortent de cette étude des horizons d'accumulations carbonatées en Champagne-Ardenne. Les annexes contiennent entre autres les tableaux de valeurs obtenues à l'issue des différentes analyses.

PREMIÈRE PARTIE

CONTEXTE GÉNÉRAL DE L'ÉTUDE

GÉNÉRALITÉS SUR LES HAC

Les horizons d'accumulations carbonatées (HAC), appelés également « calcrêtes », « caliches » ou « croûtes calcaires » sont des formations assez couramment observées au sein des profils pédologiques formés sur des substrats calcaires. Ces différentes dénominations ont été employées au fil du temps pour décrire une grande diversité de faciès carbonatés. Ils sous-entendent généralement une induration plus ou moins superficielle qui peut trouver son origine dans une accumulation carbonatée dans les profils pédologiques [e.g. Gile *et al.*, 1965] (l'horizon est alors appelé "K"), ou des cimentations issues de phénomènes diagénétiques, cryogéniques, phréatiques, vadoses, des rhizocrêtes [Purvis et Wright, 1991], des brèches tectoniques [e.g. Rigby, 1953], des brèches de versant [Breton *et al.*, 1989] ou des spéléothèmes [Chafetz et Butler, 1981] etc.. Wright et Tucker [1991] proposent une définition de ces structures en s'appuyant sur celles de Goudie [1973] et de Watts [1980] :

« Les calcrêtes sont des horizons d'accumulation localisés proches de la surface du sol qui sont principalement mais non exclusivement composés de carbonate de calcium qui peut se présenter sous différentes formes allant d'un état nodulaire à un état poudreux en passant par un état fortement induré. Ils sont issus de cimentation et d'introduction de carbonate de calcium au sein du profil pédologique, de la roche mère et des sédiments dans des zones où les eaux vadoses et les eaux souterraines phréatiques peu profondes sont saturées en carbonate de calcium. ».

Ce premier chapitre présente des informations générales concernant ce type de structures particulières afin d'avoir une idée de leurs contextes de localisations géographiques mondiales, des grands processus mis en œuvre pour leur formation, de leurs aspects micromorphologiques, de leurs classifications ainsi que de leurs impacts sur l'environnement.

I. RÉPARTITION MONDIALE

A l'heure actuelle, les profils pédologiques au sein desquels des quantités importantes de carbonate de calcium s'accumulent sont assez répandus [Alonzo-Zarza et Wright, 2010]. En [1988], Yaalon estime que ces profils pédologiques représentent 10 % des terres émergées à la surface de la Terre.

Ces HAC sont généralement localisés dans des régions ayant une température moyenne annuelle comprise entre 16 et 20 °C et des précipitations moyennes correspondant à un climat semi-aride qui sont comprises entre 100 et 500 mm d'eau par an [Goudie, 1983]. Chen *et al.* [2002] estiment par exemple que les horizons d'accumulations carbonatées occupent 21 % de la surface de l'Australie et ces structures sont assez courantes sous climat méditerranéen lorsque les précipitations annuelles sont inférieures à 600 mm et que la température annuelle moyenne est d'environ 18 °C [Alonso-Zarza, 1999 ; Alonso-Zarza et Wright, 2010 ; Hamidi *et al.*, 2001 ; Vogt, 1984].

La présence d'HAC est cependant relevée dans des régions du globe aux contextes climatiques variés plus ou moins singuliers. Ces structures peuvent en effet se former sous des climats qui induisent des précipitations plus importantes supérieures à 1000 mm [Mack et James, 1994]. Goudie [1973] décrit ce type d'horizon sous climat tropical mais ils peuvent également être localisés sous climat subdésertique [*e.g.* Schlesinger, 1985] ou sous climat semi-continental [*e.g.* Loisy, 1997]. Les HAC peuvent aussi se former sous climats nettement plus froids comme dans l'Arctique [*e.g.* Lauriol et Clarke, 1999] ou l'Antarctique [*e.g.* Foley *et al.*, 2006 ; Vogt et Corte, 1996].

Même si les HAC semblent associés préférentiellement aux climats semi-arides, il apparaît clairement que ces structures semblent assez ubiquistes et pas uniquement en lien avec les conditions climatiques.

II. ORIGINES

La littérature scientifique a présenté au cours du temps de nombreuses hypothèses quant à la formation des HAC. Freytet et Verrecchia [1989] réalisent une review commentée des différents modèles existants qui sont hétérogènes et non comparables entre eux. Certains font appel à des milieux de dépôt, d'autres à des mécanismes de précipitation ou à l'origine même du carbonate [Verrecchia, 1984] :

- **le modèle lacustre** : modèle lacustre les faciès laminés, fréquents sur le pourtour d'anciens lacs, permettent de déduire que certains HAC pourraient être d'origine sédimentaire (biologique et lacustre). Les calcaires palustres correspondent à ce modèle (sols hypercalcimorphes [Freytet, 1971 ; Freytet et Plaziat, 1982]). Ils sont noduleux, à traces de racines élargies (pseudomicrokarst) et à séquences lacustres / palustres / stromatolitiques. Freytet et Verrecchia [1989] donnent l'exemple des calcaires de Beauce ;
- **le modèle *in situ*** : modèle *in situ* dans ce modèle, le carbonate provient directement de l'altération d'une roche mère carbonatée. Il s'agit des HAC que l'on peut par exemple trouver dans les rendzines actuelles sur colluvions

sur craie. Ce modèle est également appliqué pour expliquer la formation des « nari » de l'école israélienne [Yaalon et Singer, 1974] ;

- **le modèle *per ascensum*** : il s'agit du modèle le plus anciennement imaginé [Pomel, 1872]. Il met en œuvre une remontée capillaire associée à l'évaporation des eaux enrichies en carbonates dissous [Moseley, 1965]. Selon Freytet et Verrecchia [1989], ce mécanisme « repose sur une méconnaissance totale de la circulation de l'eau dans les sols d'une part et sur l'hypothèse erronée selon laquelle une croûte est un profil unique, simple et actuel d'autre part ». Ils le définissent comme « purement théorique » ;
- **le modèle *per descensum*** : il s'agit d'une accumulation progressive des carbonates provenant du lessivage des horizons pédologiques sus-jacents [Hawker, 1927 ; Price, 1933 ; Gile *et al.*, 1966]. Ce modèle semble être le mode de formation classique des horizons pédologiques de toutes natures et réunit la grande majorité des auteurs. La concentration de matière se fait par un enrichissement en argiles et par le comblement de la porosité par les précipitations dans la zone d'enracinement maximal ;
- **le modèle sédimentaire** : dans ce modèle, les carbonates sont transportés par l'eau puis précipités lors de son évaporation [Branner, 1911 ; Jaranoff, 1937 ; Lattman, 1973]. Une influence d'organismes peut être responsable des précipitations pour aboutir aux tufs, oncolithes... [Vaudour, 1981] ;
- **le modèle géochimique** : dans ce cas, la croûte calcaire se développe sur des roches non carbonatées (schistes [Freytet, 1971], gneiss [Schmitt et Simon-Coincon, 1985]...) à partir d'apports éoliens principalement. Les carbonates corrodent et remplacent leur substrat par épigénie calcaire [Milot *et al.*, 1977 ; Nahon et Ruellan, 1975].

De nouvelles idées semblent également apparaître qui tendent à mettre la formations de certains HAC en lien avec les activités humaines. Itkin [2014] introduit le terme de « Anthro-Calcretisation » et définit deux processus principaux :

- le premier, nommé « **biogeochemical** » par l'auteur, est majoritairement dû à des réactions chimiques pédogéniques qui résultent d'une contamination involontaire des sols par les techniques de chaulage pour l'agriculture ;
- le second, nommé « **hydropedological** », est issu de la modification des relations entre le sol et les eaux due au remaniement d'entités géomorphologiques par l'homme (l'auteur donne l'exemple de l'établissement de terrasses agricoles).

L'anthro-calcrétisation peut donc suivre l'un de ces deux processus mais peut également être le résultat d'une combinaison des deux.

III. MICROMORPHOLOGIE GÉNÉRALE

La grande famille des HAC regroupant un nombre très important d'occurrences se formant sur des substrat géologique et sous des climats différents, il existe un très grand nombre de structures figurées qui peuvent se rencontrer en leur sein. Cette partie en décrit les principales qui sont généralement classées en structures macroscopiques (« *macrofeatures* ») et microscopiques (« *microfeatures* »).

1. STRUCTURES MACROSCOPIQUES

Les principales structures macroscopiques observables au sein des HAC sont les rhizolithes, les croûtes laminaires et les pisolithes [Wright et Tucker, 1991 ; Zhou et Chafetz, 2009].

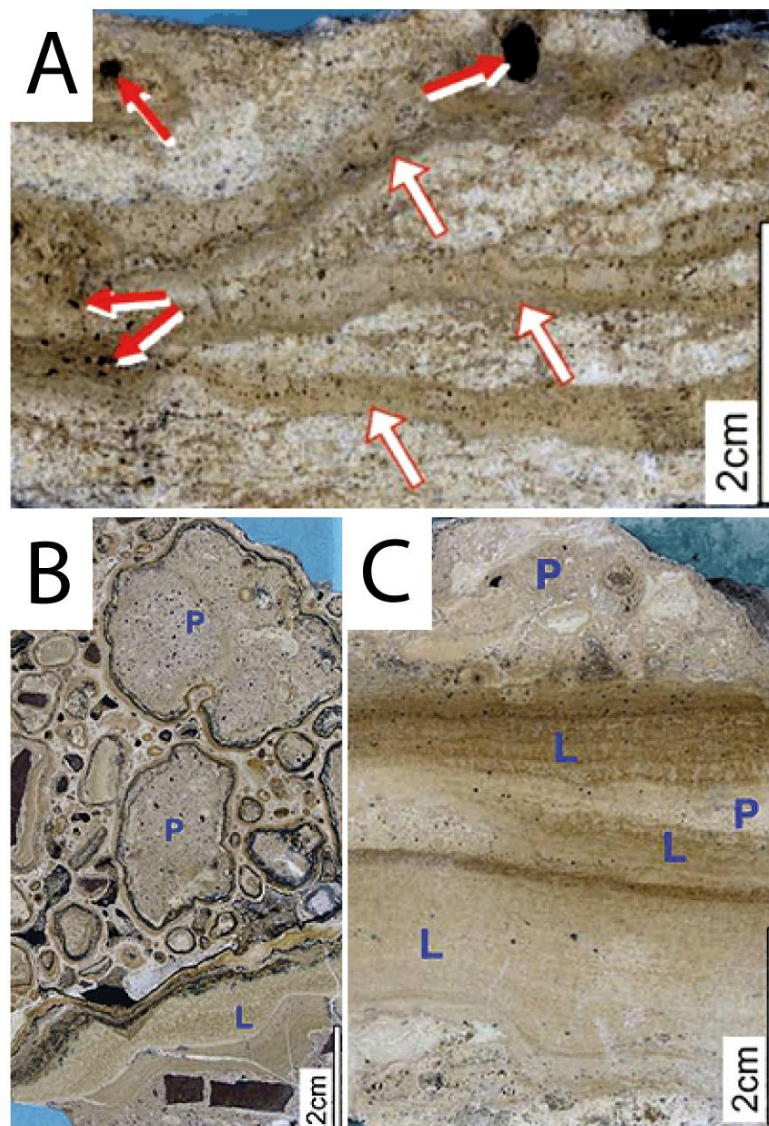


Figure I - 1 : Structures macroscopiques observables au sein des horizons d'accumulations carbonatées (d'après Zhou et Chafetz [2009]). A : rhizolithes (flèches rouges) ; B : Pisolithes (P) et C : croûtes laminaires (L).

a. RHIZOLITHES

Ce type de structure provient d'une cimentation de calcite à l'intérieur et/ou autour des racines [Klappa, 1980]. Ils possèdent une morphologie typique en pores submillimétriques et/ou en tubes cylindriques, tous deux d'origine racinaire et semblent généralement être répartis de manière aléatoire dans l'HAC (Figure I - 1 : A).

Les rhizolithes s'orientent majoritairement de manière subverticale [Wright et Tucker, 1991] mais l'orientation horizontale est également observée [Whright *et al.*, 1988]. Zhou et Chafetz [2009] subdivisent ces structures en cinq types : « *root moulds* », « *root casts* », « *root tubules* », « *rhizocretions* » et « *root petrifications* ».

b. LES CROÛTES LAMINAIRES

Les croûtes laminaires se présentent sous la forme d'une alternance de couches de couleurs et de textures différentes [Zhou et Chafetz, 2009]. Les mêmes auteurs expliquent que dans leurs études réalisées au Texas, leur couleur est très variable (du blanc au noir en passant par le brun, le vert foncé, le gris...) (Figure I - 1 : C). Leur épaisseur ne semble dépasser que rarement le décimètre et leur extension latérale est de l'ordre de la dizaine de mètres.

Les origines de ces structures sont diverses. Certaines sont issues de phénomènes purement physicochimiques par simple précipitation de carbonates. D'autres trouvent leur origine dans des phénomènes biologiques induits par des lichens, des cyanobactéries, des tapis racinaires, des champignons et/ou des algues [*e.g.* Klappa, 1979 ; Krumbein et Giele, 1979 ; Kahle, 1977].

c. PISOLITHES

Les pisolithes sont constitués d'encroûtements successifs en couches concentriques autour de grains préexistants (Figure I - 1 : B). Ils peuvent affecter des grains dont la taille peut varier entre 0,2 millimètre et quelques centimètres [Wright et Tucker, 1991].

Ces structures pisolithiques se rencontrent très couramment au sein des HAC et notamment associées à des profils de sol à calcrêtes très matures. Elles apparaissent généralement au sommet du calcrête, au dessus d'une croûte laminaire, à la suite de la formation d'une cuirasse à la faveur de nuclei qui sont généralement des clastes issus du calcrête [Wright et Tucker, 1991].

2. STRUCTURES MICROSCOPIQUES

a. RHIZOLITHES

D'un point de vue microscopique, il s'agit de cercles concentriques dont le diamètre varie entre 100 et 500 μm (Figure I - 2 : A). Quand la structure est bien

conservée, il est possible d'observer la structure polygonale des cellules racinaires. En général, l'épiderme des racines est préservée et composée de calcite microsparitique ou micritique, de needle fibre calcite (NFC) et de corps sphériques nanométriques [Zhou et Chafetz, 2009].

Le ciment micritique marron que ces microtubules présentent est intimement lié aux structures racinaires [Jones et Ng, 1988]. La cimentation plus importante de ces zones est expliquée par l'activité plus importante des micro-organismes symbiotiques qui coexistent avec les racines des plantes [Jones et Ng, 1988 ; Alonso-Zarza et Jones, 2007].

b. STRUCTURES LAMINAIRES ET REVÊTEMENTS DE PISOLITHES

Bien que les formes macroscopiques des structures laminaires et des revêtements de pisolithes soient différentes, leurs micromorphologies sont assez similaires. Il s'agit en effet de couches foncées enrichies en matière organique intercalées de couches claires composées de calcite microsparitique (Figure I - 2 : B et C).

Il existe également de nombreux petits pisolithes à l'intérieur des croûtes laminaires. Ils ont un diamètre allant de 200 à 500 μm et certains d'entre eux peuvent être associés à des structures racinaires. Leur revêtement est alors composé de nombreux filaments et de needle fiber calcite (NFC).

c. PÉLOÏDES

Les péloïdes sont des petits grains micritiques sans structure interne particulière. Ils ont en général un diamètre supérieur à 300 μm et une forme subsphérique. Ces structures semblent pouvoir s'associer en amas consolidés par une microsparite ce qui donne un aspect moucheté au microscope optique (Figure I - 2 : D). Certains d'entre eux sont poreux et intimement associés à des structures racinaires.

Ils ont souvent été interprétés comme étant des produits de l'altération de grains plus gros [James, 1972], des agrégats de ciments calcaires [Klappa, 1978] ou d'origine fécale [Calvet et Julia, 1983 ; Jones et Squair, 1989 ; Alonso-Zarza et Arenas, 2004]. Aux vues des observations de Chafetz [1986] dans des récifs actuels et de Chafetz et Folk [1984] dans des travertins, il semble que la formation de certains de ces péloïdes soit induite par des bactéries.

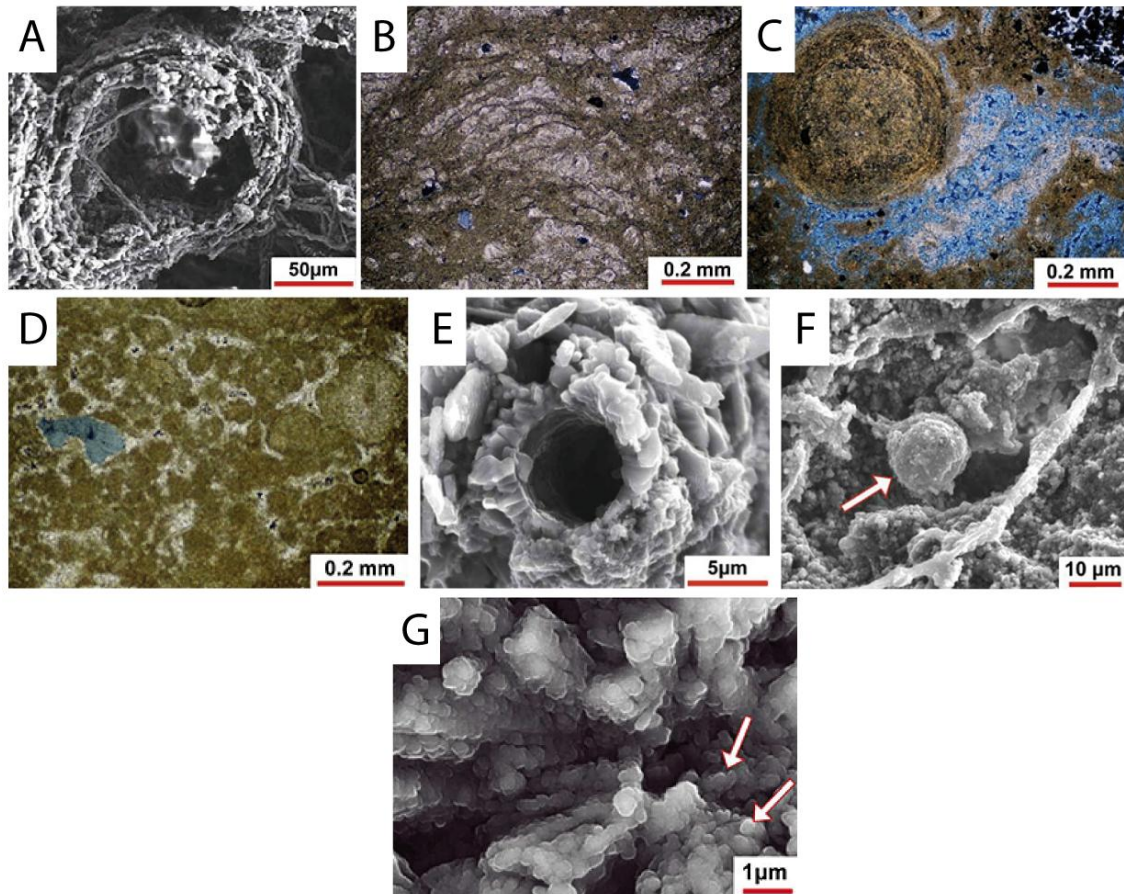


Figure I - 2 : Structures microscopiques observables au sein des horizons d'accumulations carbonatées (d'après Zhou et Chafetz [2009]) (A, E, F et G : MEB et B, C et D : microscope optique). **A** : rhizolithes ; **B** : structure laminaire ; **C** : revêtement pisolithique ; **D** : ensemble de péloïdes ; **E** : filament calcifié ; **F** : calcisphère (flèche) ; **G** : sphérulite.

d. FILAMENTS CALCIFIÉS ET CALCISPÈRES

Les filaments calcifiés sont un des composants biogéniques les plus communs constitutifs des croûtes laminaires [Klappa, 1979 ; Verrecchia *et al.*, 1995] et des revêtements pisolithiques [Calvet et Julia, 1983] (Figure I - 2 : E). Leur couleur varie de brun au vert foncé. La longueur moyenne des filaments est supérieure à 250 µm et les plus développés ont tendance à conserver leur forme tubulaire avec une cavité interne circulaire remplie ou non. Les diamètres internes et externes sont respectivement compris entre 0,6 et 20 µm et 2 et 22 µm.

Les cristaux qui précipitent et qui encroûtent les filaments peuvent présenter différentes formes :

- des cristaux de calcite avec une terminaison rhomboédrique (1 à 2 µm de long) ;

- des aiguilles de 1 à 5 μm de longueur et de 0,3 à 2 μm de largeur. Ces aiguilles sont orientées de manière perpendiculaire aux filaments ce qui dessine des motifs radiaux.

Les champignons sont les espèces qui sont les plus reconnues dans ces structures filamenteuses [e.g. Khale, 1977 ; Klappa, 1979 ; Jones, 1988 ; Bruand et Duval, 1999]. Cependant, les filaments qui possèdent un diamètre supérieur à 4 μm ont pour origine des algues, des cyanobactéries ou des racines.

Le processus de calcification influant sur la taille et la forme des filaments, l'identification des micro-organismes des sols par simple observation reste très limitée [Jones, 1988].

Les calcisphères semblent intimement associées aux filaments calcifiés. Elles sont sphériques à subsphériques et possèdent un diamètre compris entre 3 et 20 μm (Figure I - 2 : F). Ces calcisphères seraient selon Jones [1988] plus à mettre en lien avec des spores/sporangies fongiques.

e. SPHÉRULITES

Appelées aussi « polycristaux sphérulitiques calcitiques fibro-radiaux », les sphérulites sont sphériques ou ovales et d'un diamètre de 20 à 50 μm (occasionnellement supérieur à 100 μm) (Figure I - 2 : G). Elles sont quelques fois peu développées et se présentent sous une forme hémisphérique ou en éventail. Certaines s'imbriquent les unes dans les autres et forment des agrégats. Elles présentent un arrangement radiaire d'aiguilles de calcite de 1 à 2 μm de longueur pour un diamètre de 0,2 à 0,3 μm en moyenne.

Selon Wright *et al.* [1996], la présence de sphérulites est intimement liée à l'activité bactérienne, hypothèse appuyée par des expériences de cultures en laboratoire [e.g. Braissant *et al.*, 2003].

f. NEEDLE FIBER CALCITE (NFC)

La Needle Fiber Calcite est l'habitus le plus courant de la calcite dans les environnements vadoses et se retrouve sous toutes les latitudes [e.g. Millière *et al.*, 2011 ; Cailleau *et al.*, 2009 ; Bajnóczi et Kovács-Kis, 2006 ; Borsato *et al.*, 2000 ; Verrecchia et Verrecchia, 1994 ; Butel et Ducloux, 1984 ; Loisy, 1997 ; Durand, 1979...]. Il s'agit d'aiguilles de calcite majoritairement pauvres en magnésium et occasionnellement de lublinité ou d'aragonite. Ces aiguilles ont une longueur 4 à 10000 fois plus grande que leur largeur [Verrecchia et Verrecchia, 1994].

Les premières observations de cette NFC ont été réalisées par Lacroix [1901] qui la définissait comme « bacillaire », « fibreuse », « cotonneuse » ou « farineuse ». Dans

les calcrêtes, la NFC est la principale forme de cristallisation calcaire dans les espaces poreux [Coniglio et Harrison, 1983 ; Longman, 1980].

Lors de ses travaux de thèse, Cailleau [2005] réalise une synthèse des différents termes utilisés pour distinguer cette forme de calcite :

- **moonmilk** [Gessner, 1555] : dépôt de grotte présentant une phase aqueuse et une phase solide. Seule cette dernière phase contient de la NFC ; le moonmilk n'en est donc pas exclusivement constitué ;
- **lublinite** [Iwanoff, 1906] : correspond à la phase minérale constituée d'aiguilles du moonmilk. (La lublinite est également un terme ancien pour désigner un minéral bien distinct) ;
- **calcite en échelon** [Stoops, 1976] : inclut la lublinite dans une définition plus détaillée : l'aiguille est définie comme un empilement de cristaux de calcite ;
- **whisker crystals** [Supko, 1971] : baguettes de calcite de 2 à 4 μm de large et très longues (50 à 60 μm et jusqu'à 120 μm) ;
- **needle fiber of calcite** [James, 1972] : amas d'aiguilles présents dans les pores des croûtes calcaires qui mesurent 30 à 125 μm de long et 1,5 à 4 μm de large ;
- **rhomb chains** [Jones et Ng, 1988] : empilements de rhomboèdres subautomorphes à xénomorphes parfois arrondis ;
- **chaînes polycristallines** [Jones et Khale, 1993] : pourrait correspondre à la lublinite ou au *whisker crystals* qui ne serait pas monocristallin.

En ce qui concerne la morphologie même de ces cristaux aciculaire, Verrecchia et Verrecchia [1994] réalisent une classification qui a ensuite été actualisée par Cailleau [2005]. Ils divisent les aiguilles de calcite en deux groupes : les aiguilles monocristallines et les chaînes polycristallines.

➤ AIGUILLES MONOCRISTALLINES

Les aiguilles monocristallines sont d'une manière générale subdivisées en trois classes en fonction des arrangements qu'elles peuvent habituellement présenter (Figure I - 3) :

- les **micro-aiguilles simples (M)** ayant un diamètre inférieur à 0,5 μm et une longueur inférieure à 2 μm (« *micro-rod* », « *smooth* », « *single micro-rods* »). Il s'agit de la forme d'aiguilles la plus simple. Les micro-aiguilles peuvent être associées ou non à d'autres types d'aiguilles ;
- les **aiguilles formées par un regroupement de manière paire de baguettes élémentaires lisses (MA)** de 0,5 à 2 μm de diamètre et de longueur inférieure à 100 μm (« *smooth paired rods* »). Il s'agit du type d'aiguilles le plus commun. Il existe 4 arrangements possibles :
 - MA1 : association par deux et section en « 8 » ;

- MA2 : association par 3 ou plus qui forme des bandes (ou plaques) ;
- MA3 : association par quatre et section en « X » ;
- MA4 : association éclatée par quatre (« *bar bell* »).
- les **aiguilles complexes** formées par le regroupement de manière paire d'aiguilles monocristallines présentant des plaques dentelées sur leur longueur (MB) dont le diamètre varie entre 2 à 20 μm et la longueur entre 30 à 100 μm (« *serrated-edge paired rods* ») (Figure I.3). Ce groupe inclus trois formes qui peuvent se distinguer par le nombre de plaques et leur orientation relative par rapport à l'aiguille :
 - MB1 : 2 plaques dentelées situées au sommet et à la base du « 8 » perpendiculairement à son grand axe en coupe transversale ;
 - MB2 : quatre plaques dentelées se développent à 90 ° sur la section en « 8 ».
 - MB3 : association par quatre et section en « X » ;
 - il existe une forme intermédiaire entre les formes MA et MB nommée MAB.

➤ CHÂÎNES POLYCRISTALLINES

Les chaînes polycristallines ont été décrites pour la première fois par Supko en [1971]. Elles sont assez peu décrites dans la littérature car trop souvent confondues avec des formes monocristallines de type MA ou MB (Figure I - 3). Cependant, trois types peuvent tout de même être définis (Figure I - 3) :

- les **chaînes P1** formées par une juxtaposition de cristaux lenticulaires ;
- les **chaînes P2** composées de rhomboèdres de calcite jointifs dont l'axe c est perpendiculaire à l'axe d'allongement de l'aiguille. Elles ont une forme « en échelon » [Stoops, 1976]. C'est à cette forme que correspond le terme « lublinitite » ;
- les **chaînes P3** formées de chaînes de rhomboèdres qui se chevauchent ou en échelons.

Cette classification simplifiée donne une idée générale des différentes formes que peut prendre la « *needle fiber calcite* ». Il existe en réalité de nombreuses variations de ces morphologies [Cailleaux *et al.*, 2009].

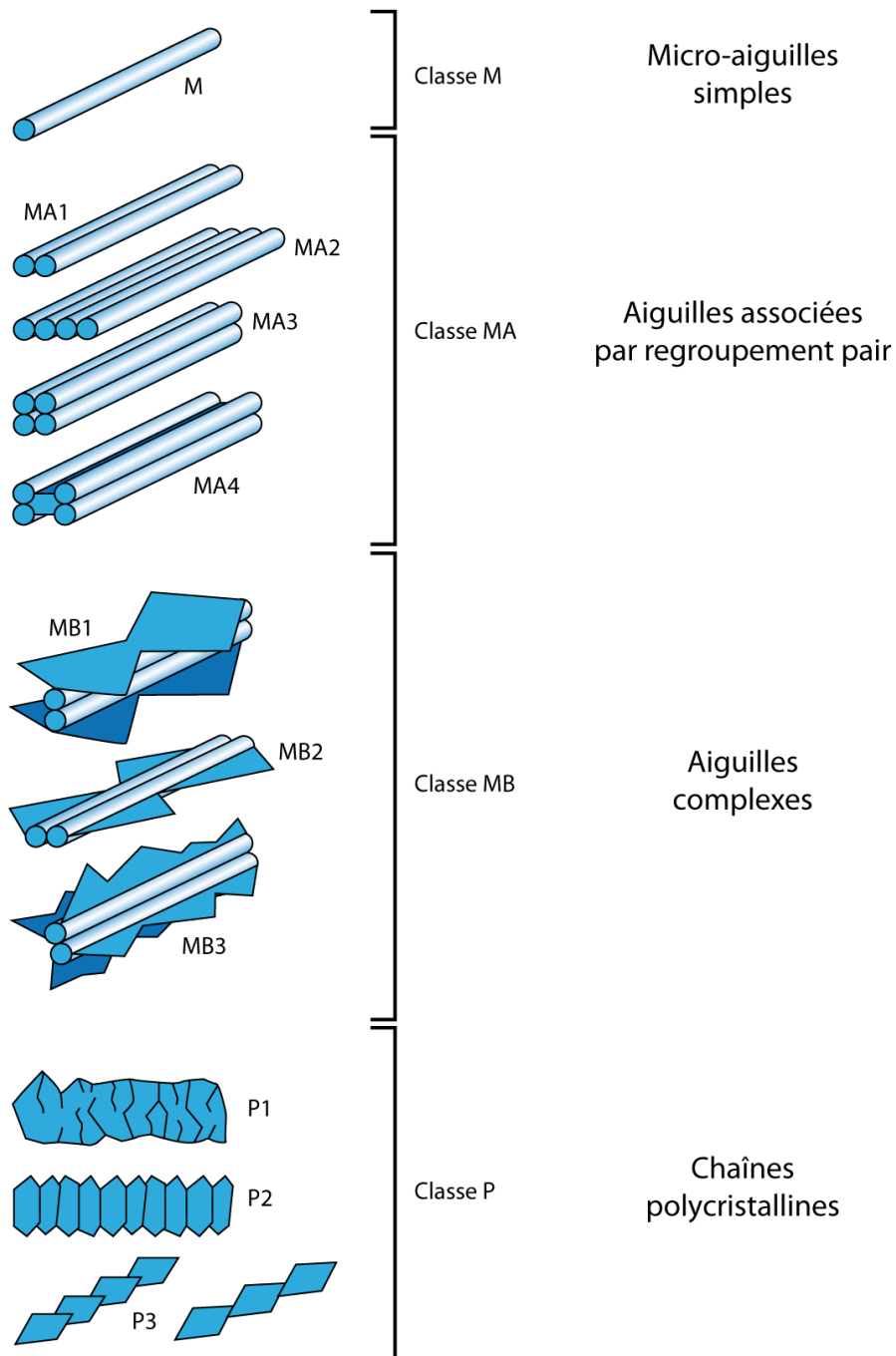


Figure I - 3 : Classification des arrangements de Needle Fiber Calcite (modifié d'après Verrecchia et Verrecchia [1994]).

➤ NANOBAGUETTES DE CALCITE

Sur de nombreux sites où sont observées des précipitations de carbonates sont également observées des pellicules composées de nanobaguettes de calcite, très souvent associées à la NFC [Loisy, 1997 et Loisy *et al.*, 1999 ; Bajnóczi et Kovács-Kis, 2006]. Ces nanofibres ont souvent été assimilées à la NFC [James, 1972] bien qu'elles aient un diamètre n'excédant jamais 30 μm et une longueur moyenne de 1,6 μm [Cailleau *et al.*, 2009].

Ces nanofibres ont souvent été considérées comme des cristaux précurseurs à la NFC [Borsato *et al.*, 2000 ; Jones et Kahle, 1993]. Mais Cailleau *et al.* [2009] montrent que ce type de structures est nettement différent de la NFC.

➤ ORIGINE DES AIGUILLES DE CALCITE

L'origine de ces aiguilles de calcite a été discutée pendant de nombreuses années et trois modèles de formation ont été couramment avancés :

- **l'origine purement physicochimique** s'appuie sur la possibilité de former des aiguilles de calcite dans des conditions de sursaturation très fortes obtenues lors d'une évaporation très rapide [James, 1972 ; Jones et Ng, 1988 ; Jones et Khale, 1993] ;
- **l'origine biologique indirecte** dans laquelle les micro-organismes sont responsables de la dissolution du matériau parent qui pourra fournir des ions carbonates pour une précipitation ultérieure [Borsato *et al.*, 2000] ;
- **l'origine biologique directe** dans laquelle les aiguilles précipitent au sein de parois bactériennes ou fongiques avant d'être libérées dans le sol lors de la dégradation de la matière organique [*e.g.* Callot *et al.*, 1985 ; Becze-Deak *et al.*, 1997 ; Loisy *et al.*, 1999 ; Bindschedler, 2011].

Les aiguilles de type MA et MB semblent être reconnues comme étant le résultat de biominéralisations fongiques [Verrecchia et Dumont, 1996 ; Verrecchia *et al.*, 1993 ; Wright, 1986 ; Callot *et al.*, 1985 ; Callot, 1984 ; Klappa, 1979 ; Loisy, 1997] tandis que les micro-aiguilles de type M seraient plus à attribuer à des biominéralisations bactériennes des genres *Bacillus* [Slepecky et Hemphill, 1992] et *Pseudomonas* [Schroth et Hilderbrand, 1992].

Verrecchia et Verrecchia [1994] proposent une hypothèse de formation de ces différentes morphologies. Après la formation des aiguilles MA à l'intérieur de champignons, ces aiguilles sont libérées dans le milieu. Une seconde évolution les fait passer progressivement de formes MA à MAB puis à des morphologies type MB.

En observant des calcifications centripètes autour d'un noyau organique, Loisy [1997 et 1999] souligne l'évidence de l'origine biologique des précipitations d'aiguilles carbonatées dans des HAC en Champagne.

Grâce à des études approfondies (observations au microscope électronique à balayage en basses températures, au microscope en transmission, étude des isotopes du carbone et de l'oxygène, microcristallographie...) sur des échantillons provenant de différentes localisations dans le monde (France, Suisse, Espagne, Côte-d'Ivoire, Cameroun et Mexique), Cailleau *et al.* [2009] rejettent l'hypothèse physico-chimique de l'origine de la « *Needle Fiber Calcite* ». Les mêmes auteurs tirent également de leurs observations que la formation des nanofibres de calcite peut être expliquée par des procédés autres qu'une pure précipitation physico-chimique. Des filaments en

décomposition et la présence de fibres suggèrent une origine organique. Des comparaisons entre des structures naturelles et des structures de synthèse semblent faire pencher la balance vers la cellulose.

IV. COLORIMÉTRIE

La présence d'un HAC sous-entend généralement une caractérisation du niveau par une couleur qui diffère des niveaux parents. Cette couleur peut être plus claire du fait de la concentration en carbonates mais peut également présenter des teintes plus grises, ocres à rouille en fonction des constituants intégrés à l'horizon d'accumulations carbonatées [Vogt, 1981 ; Schwertmann *et al.*, 1974 ; Durand, 1953]. Cette caractérisation colorimétriques n'est cependant que rarement abordée comme paramètre caractéristique dans la bibliographie de synthèse spécialisée sur ce type de structure [*e.g.* : Alonzo-Zarza et Wright, 2010 ; Durand *et al.*, 2010] et elle est généralement abordée comme un simple critère descriptif.

V. CLASSIFICATION

La classification des HAC est assez complexe du fait de l'utilisation de différents paramètres pour les décrire.

La première distinction sépare les HAC qui se forment au sein de profils de sol dans la zone vadose (« *pedogenic calcrete* ») de ceux formés au niveau de la frange capillaire issue des nappes phréatiques ou plus en profondeur à cause des déplacements latéraux de l'eau (« *groundwater carbonates* ») [Alonzo-Zarza et Wright, 2010]. Il existe également un troisième type d'HAC plus rare qui se forme lorsque des eaux de ruissellement enrichies en carbonates s'infiltrant au sein de sédiments de chenaux conduisant au colmatage de la couche sédimentaire par le ciment calcaire et la production de carbonates présentant une structure laminée [Mack *et al.*, 2000]. Un intérêt majeur est préférentiellement porté au premier type représentant les HAC au sein de profils de sol [Alonzo-Zarza et Wright, 2010].

En [1933], Price étudie des caliches dans le sud du Texas et définit un classement en trois stades établis en fonction de leur maturité : « *young caliche* », « *mature caliche* » et « *old caliche* ». Netterberg [1967 et 1980] puis Goudie [1983] établissent quant à eux une classification des HAC d'origine pédologiques en 9 catégories en fonction de leur morphologie. Cette classification est reprise par Wright et Tucker [1991] (Tableau I - 1).

Catégorie	Description
<i>calcareous soil</i>	Sols très faiblement ou non cimentés présentant des petites accumulations de carbonates telles que des revêtements de grains, des occurrences plus ou moins étendues de carbonates pulvérulents (les auteurs incluent la calcite en aiguilles), des fractures ayant subi des précipitations de carbonates et des petits nodules
<i>calcified soil</i>	Sols bien cimentés, potentiellement friables avec un certain nombre de nodules carbonatés et contenant des taux de carbonates allant de 10 à 50 %
<i>powder calcrete</i>	Niveau continu de fine poudre de carbonates qui ne présente généralement pas d'organisation particulière et sans occurrences de nodules carbonatés
<i>pedotubule calcrete</i>	Ensemble des carbonates secondaires formant des encroûtements autour des racines et en remplissages de fantômes racinaires ou de formes tubulaires diverses
<i>nodular calcrete</i> (= <i>glabular calcrete</i>)	Concrétions de carbonates plus ou moins cimentées qui peuvent former des pisolithes par dépôt en couches successives
<i>honeycomb calcrete</i>	Assemblage de nodules partiellement fusionnés dont les espaces interstitiels contiennent des éléments plus ou moins indurés
<i>hardpan calcrete</i> (= <i>petrocalcic horizon</i>)	Horizon induré à structure laminée présentant une micromorphologie complexe dont la surface supérieure est très nette contrairement à sa surface inférieure plus progressive
<i>laminar calcrete</i>	Feuillets de carbonates indurés généralement établis sur des cuirasses ou des substrats géologiques déjà indurés
<i>boulder/cobble calcrete</i>	Cuirasses altérées par de la fracturation, de la dissolution et de la fracturation d'origine racinaire

Tableau I - 1 : Classification morphologique des calcrêtes (issue de Wright et Tucker [1991] d'après Netterberg [1967 et 1980] puis Goudie [1983]).

Machette établit en [1985] un autre type de classification qui se base sur des étapes de développement des calcrêtes. L'auteur définit 6 stades de développement (Tableau I - 2) en tenant compte, par un paramètre simple, de la nature de la roche mère. Ce paramètre concerne la quantité de graviers (élevée, faible ou nulle) de roche présents dans le substrat géologique. La prise en compte de ce paramètre semble essentielle à l'auteur puisque la rapidité de mise en place des calcrêtes semble plus importante dans les substrats géologiques riches en graviers [Gile *et al.*, 1966 ; Machette, 1985 ; Treadwell-Steitz et McFadden, 2000].

Stade	Teneur en graviers	Caractéristiques
1	élevée	Revêtements carbonatés fins et discontinus généralement localisé sur la surface inférieure des graviers
	faible	Quelques filaments calcaires présents au sein du sol ou revêtement léger sur la surface des graviers
2	élevée	Revêtements calcaires continus fins à épais à la surface des graviers
	faible	Nodules calcaires dont le diamètre varie entre 4 et 40 mm
3	élevée	Accumulations massives de carbonates entre les différents éléments qui peuvent être extrêmement bien cimentées dans les formes les plus avancées
	faible	Existence de nombreux nodules calcaires coalescés dans une matrice plus ou moins cimentée
4	nulle	Lamines calcaires dont l'épaisseur peut aller jusqu'à 10 mm recouvrant des cuirasses préexistantes
5	nulle	Pisolithes calcaires surmontant des lamines carbonatées dont l'épaisseur est supérieure à 10 mm. Des lamines calcaires peuvent également recouvrir des surfaces de fractures
6	nulle	Matrice complexe constituée de plusieurs générations de lamines calcaires, bréchifiées, recimentées, pisolithiques... Présence d'un grand nombre de péloïdes et de pisolithes calcaires à l'intérieur des fractures

Tableau I - 2 : Classification des calcrêtes pédogéniques basée sur les 6 stades de développement (simplifiée de Wright et Tucker [1991] d'après Machette [1985]). Teneur en graviers élevée : > 50 % ; faible : < 20 %.

La classification des calcrêtes peut aussi être basée sur les microstructures qu'ils présentent. Wright [1990 et 2007] établit deux grands types de microstructures (Figure I - 4) :

- le premier est nommé « **alpha** » et se présente sous la forme d'un fond matriciel micritique à microsparitique qui contient différents types de structures d'origine abiotique ;
- le second, nommé « **bêta** », présente des microstructures dont les origines sont à mettre en lien avec processus d'origine biologique.

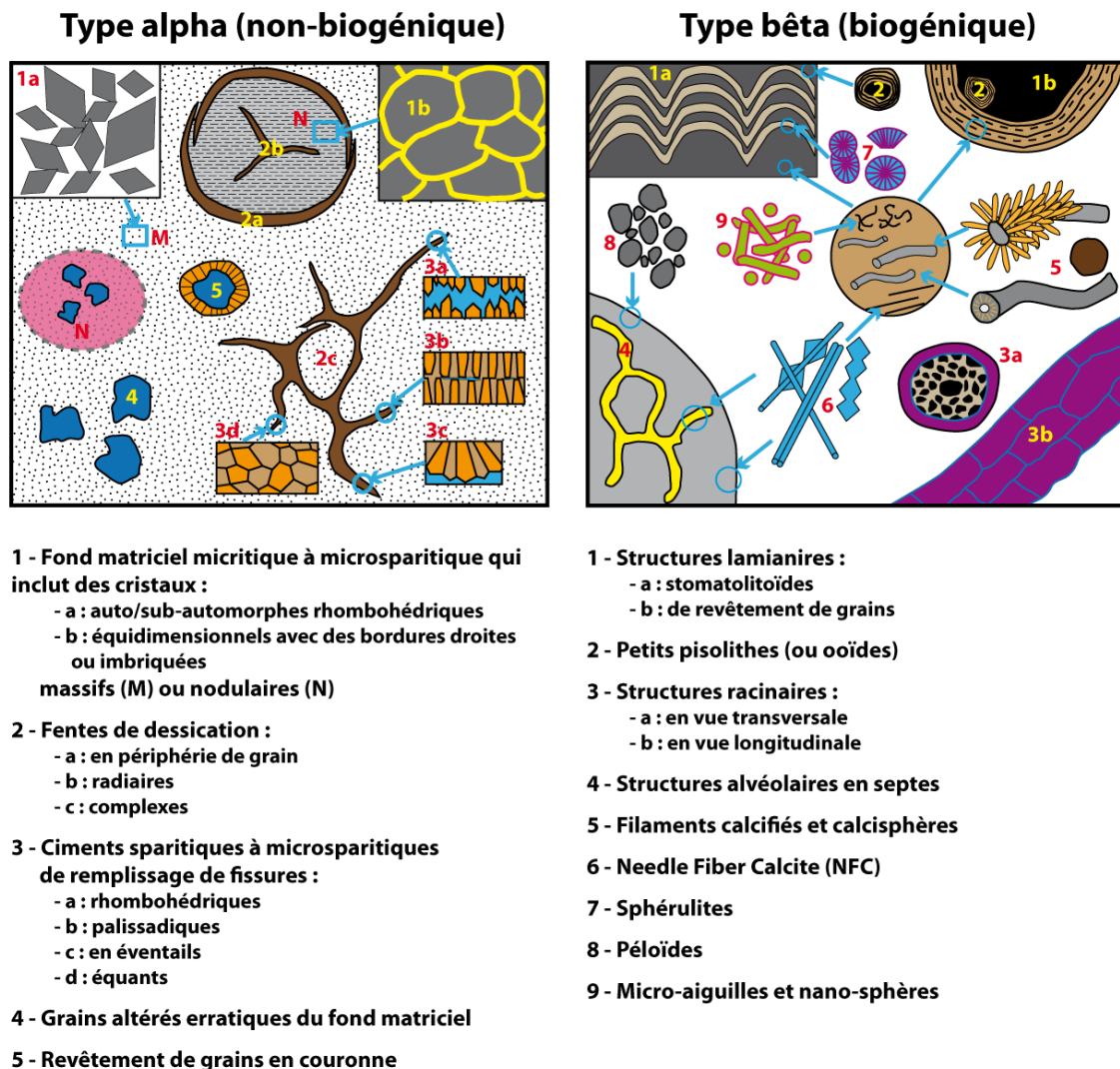


Figure I - 4 : Représentation schématique des deux types de microstructures (alpha et bêta) dans les calcrêtes établis par Wright [1990 et 2007], modifié d'après Zhou et Chafetz [2009].

Il existe de nombreuses autres classifications qui peuvent s'attacher à divers paramètres tels que le contexte hydrologique sommaire [Carlisle, 1983], la minéralogie générale [Netterberg, 1980], les microstructures [Wright et Tucker, 1991] etc..

VI. ÉCHELLE DE TEMPS

Des géomorphologues étudiant les formations périglaciaires quaternaires [e.g. Cailleux, 1964 ; Vogt, 1974] ont décrit des dépôts secondaires de carbonates (et/ou de fer). L'hypothèse avancée était une précipitation liée à la congélation. En effet, des travaux expérimentaux [e.g. Ek et Pissart, 1965 ; Adolphe, 1966 et 1972] ont montré que lors de la congélation d'une masse d'eau, la glace formée est très peu chargée en carbonates ce qui induit une augmentation très forte de la dureté de l'eau résiduelle. Il peut donc y avoir facilement précipitation. De plus, le dégagement de CO₂ observé indique que ce processus n'est pas immédiatement réversible [Ek et Pissart, 1965]. Il est donc possible que certaines de ces structures se soient formées dans le courant du Würm (voire même avant).

Loisy [1997] a étudié les différentes phases composant les encroûtements carbonatés champenois. Certaines d'entre elles présentent des caractéristiques nettement physico-chimiques tandis que d'autres sont chargées en aiguilles biominéralisées. Son hypothèse décrit une succession de phases diagénétiques se déroulant au cours du temps depuis plus de 14 000 ans BP ; l'optimum Holocène correspondant à la formation des phases à aiguilles biominérales (essor du développement des sols). La formation des HAC semble donc être un processus relativement long.

Cependant, d'autres références témoigneraient d'une cinétique de formation nettement plus rapide. Bouttemy *et al.* [1966] indique que ces « obstacles » peuvent être dissociés par sous-solage mais qu'ils ont tendance à se reformer assez rapidement sans donner d'échelle de temps. Les travaux d'Adolphe [1966 et 1972] indiquent que les micro-aiguilles de calcite qui remplissent plus ou moins partiellement la porosité des encroûtements (pseudomycélium et calcin en feutre) présentent des morphologies différentes en fonction de la période de prélèvement. Échantillonnées à la fin de l'hiver, elles sont rigoureusement cristallines avec une section en « x » et des stries transversales. A la fin de l'été, ces aiguilles ont un aspect plus filamenteux et boursouflé. Ces différentes observations permettent à l'auteur de présumer d'une cristallisation plutôt physico-chimique en hiver et biochimique à la belle saison.

Ces quelques sources ne permettent pas d'avoir une idée générale de la cinétique de mise en place des HAC.

VII. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Un des premiers impacts de la présence des HAC concerne l'enracinement des cultures [e.g. Bouttemy *et al.*, 1966 ; Nicoullaud *et al.*, 1995]. Un horizon de ce type peut en effet être très fortement impénétrable par les racines qui doivent donc extraire les nutriments et l'eau à partir d'une quantité réduite de sol [Siepel, 2001].

Les HAC riches en calcium ont aussi pour conséquence d'élever le pH au sein du profil de sol. Cette relativement forte basicité peut provoquer des anomalies d'assimilation de certains éléments tels que le fer et créer des carences importantes chez les plantes [Siepel, 2001].

Certaines études suggèrent que les HAC sont susceptibles de former une barrière plus ou moins importante aux transferts hydriques verticaux que ce soit par blocage des remontées capillaires [Spanneut, 1997] ou par simple réduction de la perméabilité du profil [Durand, 1979]. Dans certains cas, l'auteur s'interroge sur la possibilité que la lixiviation latérale devienne prépondérante.

Des études plus focalisées sur ces questions tendent à montrer que les HAC peuvent effectivement avoir des conséquences non-négligeables sur les transferts hydriques [e.g. Peugeot, 1995 ; Poulenard, 2005]. Le niveau induré pourrait donc restreindre les mouvements de l'eau au sens large et pourrait donc contribuer à des problèmes liés à l'insuffisance d'aération des racines [Siepel, 2001].

Bien sûr, l'impact potentiel des HAC sur les transferts hydriques dépend d'un grand nombre de paramètres tels que le type même de l'horizon, sa maturité, le contexte géologique et géomorphologique, le climat, *etc.*

VIII. CONCLUSIONS

Les horizons d'accumulations carbonatées sont une très grande famille de carbonates continentaux qui possèdent un grand nombre d'appellations différentes en fonction de leur nature ou simplement issues de la terminologie historique (encroûtements, croûtes calcaires, calcrêtes, caliches...).

La grandeur de cette famille et le grand nombre de structures parfois très différentes qu'elle regroupe semble donc assez souvent induire une difficulté à en présenter des caractéristiques générales, que ce soit sur leur origine, leur morphologie et micromorphologie, la cinétique de leur mise en place ainsi que sur leurs impacts potentiels sur l'environnement.

LES HAC EN CHAMPAGNE-ARDENNE

Ce chapitre présente d'abord le contexte géographique de l'étude en localisant la région Champagne-Ardenne ainsi qu'en en présentant les principales caractéristiques physiques et climatiques. Le discours poursuivra ensuite sur une présentation de la géologie régionale pour délivrer ensuite les connaissances actuelles concernant les HAC, de leur répartition aux conséquences de leur présence au sein des profils de sol en passant par leur micromorphologie, leur cinétique de formation ainsi que leur classification.

I. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE

1. LOCALISATION ET GÉOGRAPHIE ADMINISTRATIVE

La Champagne-Ardenne est une région du quart nord-est de la France qui regroupe les départements de l'Aube (10), des Ardennes (08), de la Marne (51) et de la Haute-Marne (52) (Figure II - 1). Elle possède des frontières communes avec la Picardie au nord-ouest (Aisne (02)), l'Île-de-France à l'ouest (Seine-et-Marne (77)), la Bourgogne au sud-ouest (Yonne (89) et Côte-d'Or (21)), la Franche-Comté au sud-est (Haute-Saône (70)), la Lorraine à l'est (Meuse (55) et Vosges (88)) et avec la Wallonie (Belgique) au nord.

La région présente un étirement selon une orientation nord-sud d'environ 300 km contre 150 km au maximum en est-ouest. Sa superficie de 25606 km² la place dixième plus grande région de France métropolitaine sur vingt-deux (Figure II - 1).

2. LE CLIMAT CHAMPARDENNAIS

De part sa position géographique, la région Champagne-Ardenne possède un climat tempéré intermédiaire entre océanique atténué et continental (données météorologiques en accès libre de Météo France).

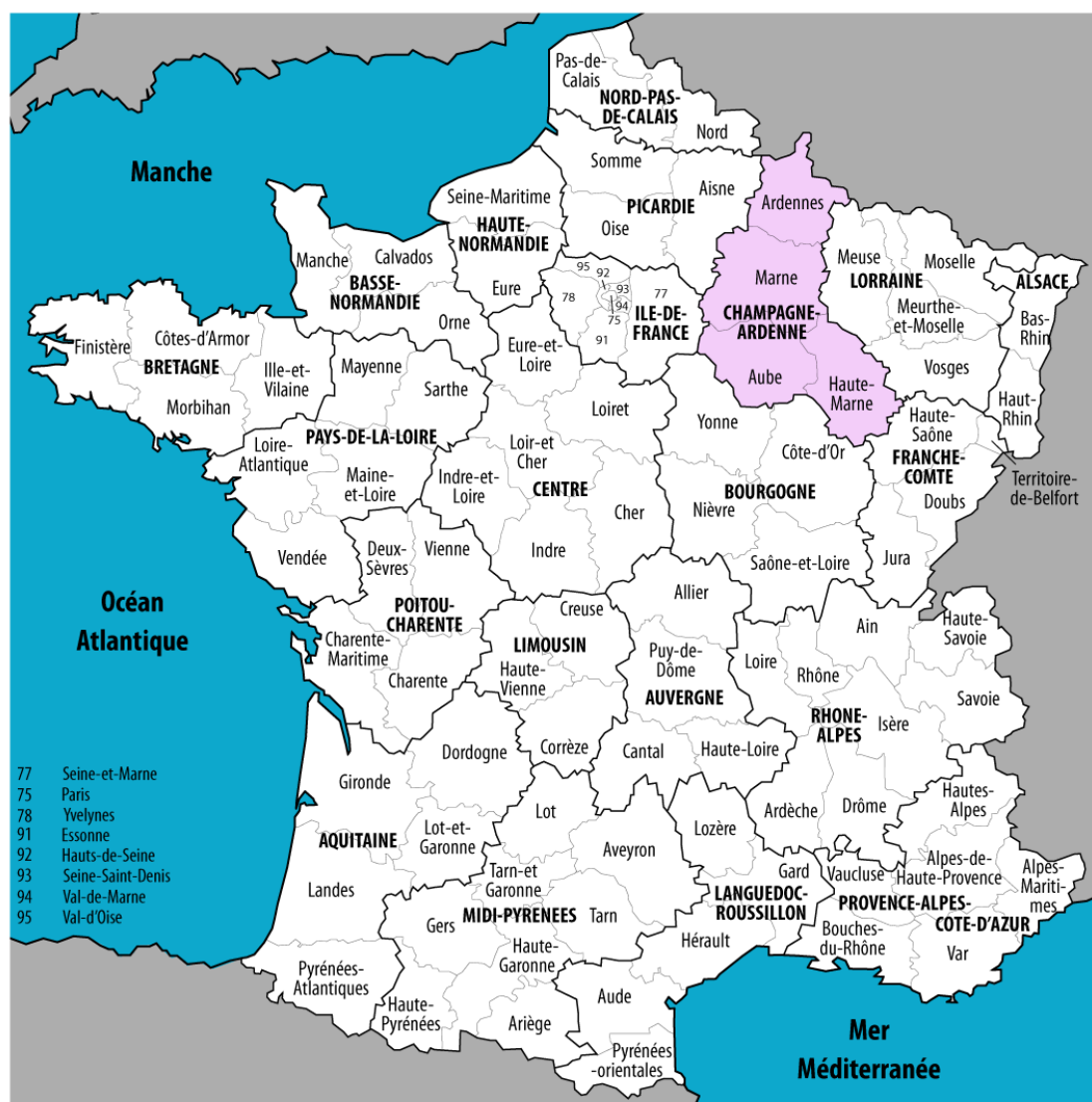


Figure II - 1 : Localisation géographique et administrative de la région Champagne-Ardenne et de ses quatre départements.

a. PRÉCIPITATIONS

Les influences continentales provenant de l'est sont contrebalancées par le passage de perturbations océaniques qui amène la plupart des pluies. Ceci induit une bonne répartition des précipitations à l'échelle annuelle.

Les différences de relief induisent cependant une répartition géographique non-homogène des précipitations. Les zones plus élevées reçoivent d'avantage de pluie que les zones de plus faible altitude. Ainsi, si les précipitations sont plutôt modérées (550 à 700 mm par an), il existe des variations spatiales du climat liées aux différentes zonations géographiques :

- dans la plaine de Champagne (Reims, Châlons-en-Champagne, Troyes...), le climat est généralement moins pluvieux qu'ailleurs avec 618 à 653 mm de précipitations annuelles ;
- au niveau des villes de Saint-Dizier et de Sainte-Menehould, les précipitations sont plus importantes (857 mm) ;
- les plateaux ardennais et langrois présentent un climat plus pluvieux (886 mm à Langres et 937 mm à Charleville-Mézières).

b. INSOLATION

La région Champagne-Ardenne présente un nombre d'heures d'ensoleillement relativement homogène correspondant à l'ensoleillement moyen du tiers nord de la France : 1750 heures.

c. TEMPÉRATURES

La région Champagne-Ardenne présente des températures moyennes annuelles proches de 10 °C. Cependant, les différences de relief induisent quelques nuances :

- dans la partie sud de la région, les températures moyennes deviennent plus élevées de juin à septembre à cause de la meilleure insolation. La plaine de Champagne présente par exemple une température moyenne annuelle de 10,5 °C ;
- la partie nord de la région est quant à elle un peu plus froide et notamment en janvier où les températures peuvent atteindre -15 °C ;
- les plateaux ardennais et langrois présentent également des températures moyennes annuelles plus faibles.

II. CONTEXTE GÉOLOGIQUE

1. RAPPELS GÉOLOGIQUES SUR LE BASSIN DE PARIS

a. LIMITES GÉOGRAPHIQUES

Le bassin de Paris est un des principaux grand ensembles géologiques français qui occupe la majeure partie de la moitié nord du Pays (Figure II - 2). Ce bassin intracratonique est subcirculaire avec des envergures est-ouest et nord-sud respectives de 600 et 500 kilomètres (Figure II - 2) [Pomerol, 1978].

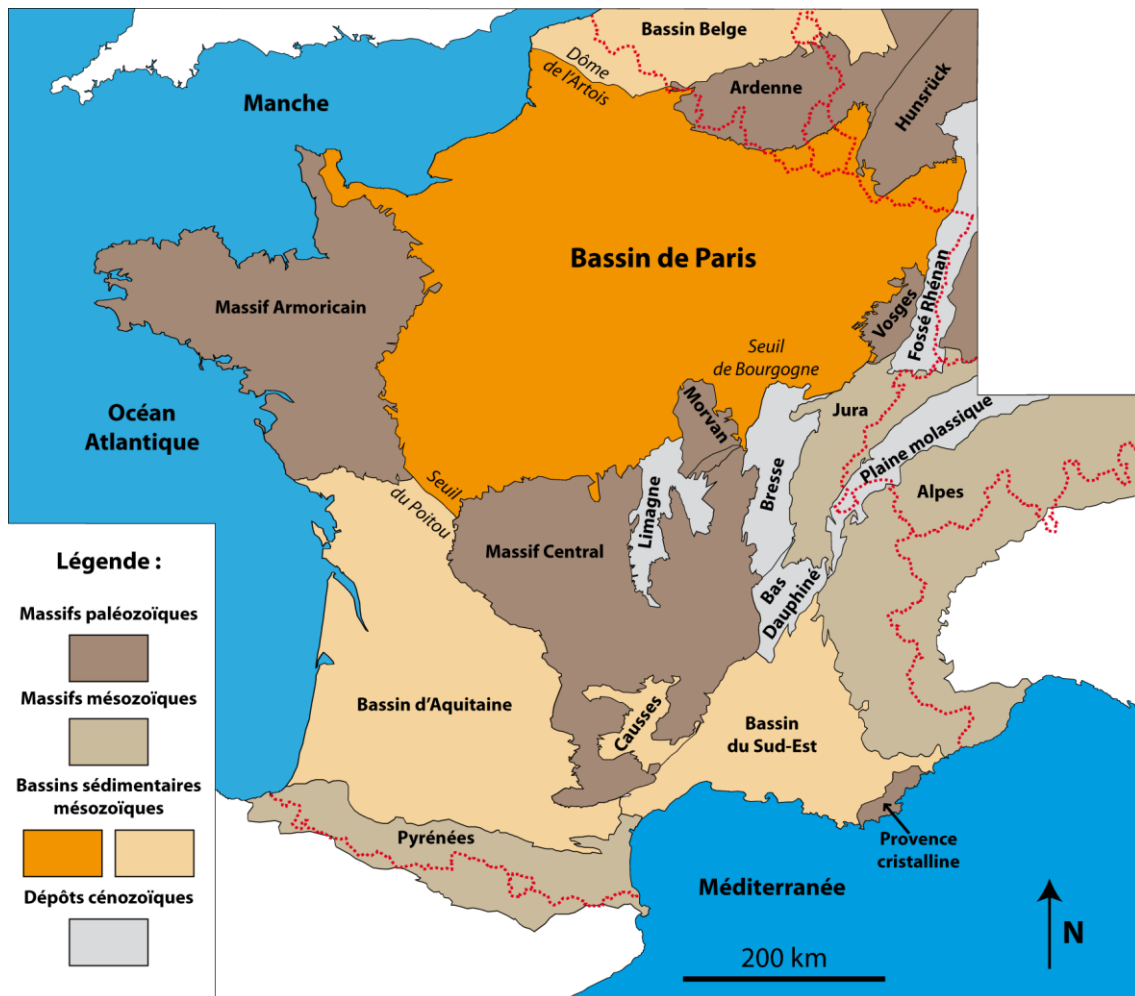


Figure II - 2 : Localisation du bassin de Paris par rapport aux autres grands ensembles géologiques français.

Au nord-ouest, le bassin de Paris s'ouvre sur la Manche tandis que le dôme de l'Artois en détermine la limite avec le bassin belge au nord (Figure II - 2). Sa limite sud-est avec le fossé bressan est marquée par le seuil de Bourgogne et le seuil du Poitou l'individualise du Bassin d'Aquitaine (Figure II - 2) [Pomerol, 1974].

b. LE SOCLE DU BASSIN DE PARIS}

Durant l'**ère primaire**, la dislocation de la Rodinia (entourée de la Mirovia) se réalise par la formation de différents océans (Centralien, Iapetus, Rhéique...). La seconde partie du cycle de Wilson voit ensuite ces océans se refermer par la recombinaison des paléocontinents se qui forme un nouveau continent unique appelée la Pangée (entourée de la Panthalassa). Ces fermetures océaniques provoquent la formation de la grande chaîne hercynienne.

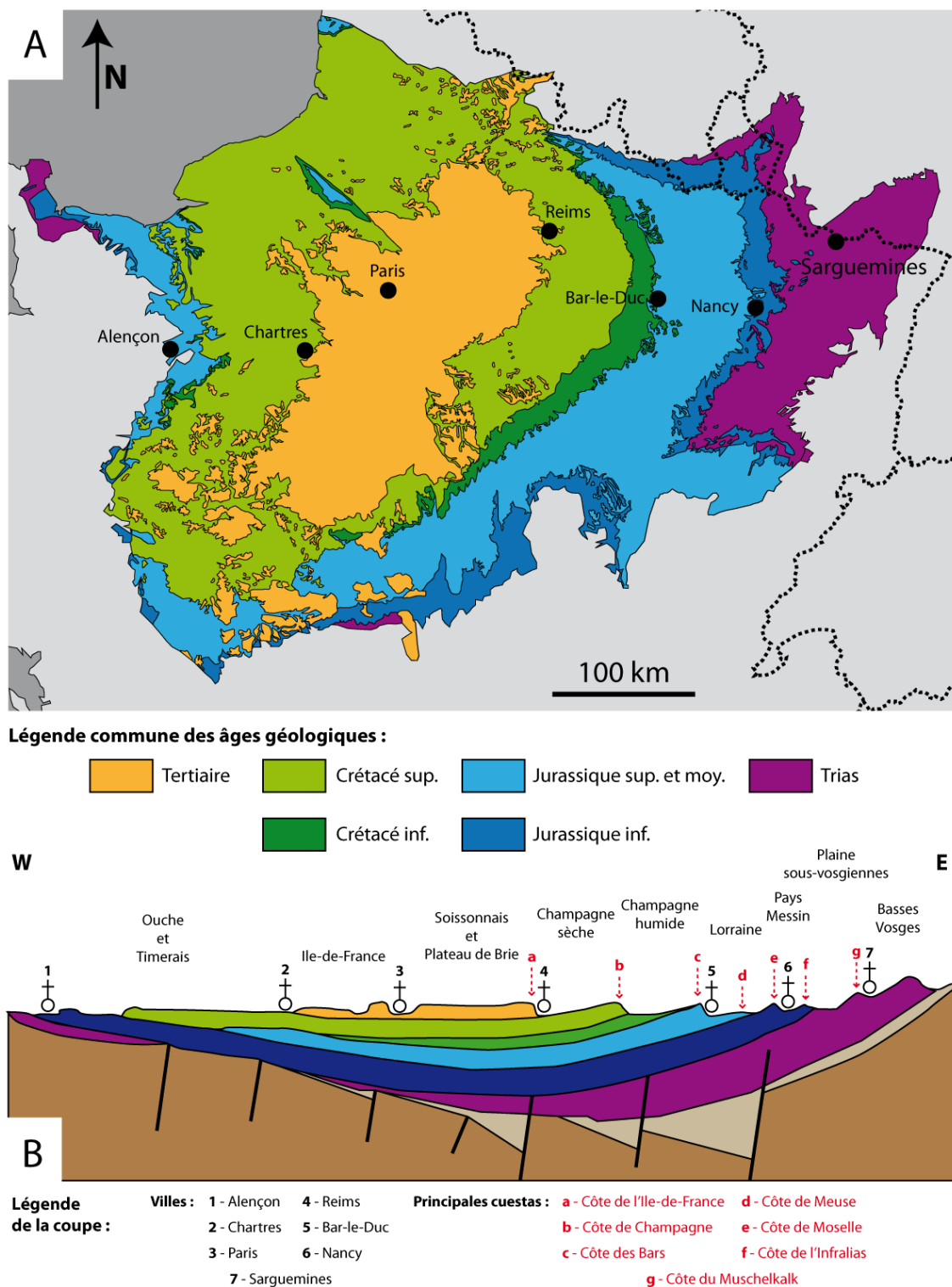


Figure II - 3 : Carte et coupe géologiques simplifiées du bassin de Paris.

Au **Carbonifère**, l'altération des reliefs de la chaîne hercynienne associée à une tectonique extensive tardive (failles de Bray, du Midi, Sillon Houiller...) participe à la mise en place de zones de dépôts détritiques continentaux [Cavelier *et al.*, 1980 ; Héritier et Villemin, 1971]. Ces dépôts forment les principaux bassins houillers : Franco-

belge, Sarro-lorrain, Aumance, Seize Berry etc. [Dercourt, 2002]. C'est à partir de ce stade que débute l'individualisation du bassin de Paris.

Au **Permien**, la chaîne hercynienne est localisée en zone intertropicale sous climat chaud et humide. Elle subit alors une érosion forte qui la transforme petit-à-petit en pénéplaine nivelée par des dépôts détritiques permien.

Le bassin de Paris est donc installé sur un socle primaire d'origine hercynienne dont les parties affleurantes en déterminent le contour (Figure II - 3) :

- le massif Armorica à l'ouest ;
- le massif Central au sud ;
- le Morvan au sud-est ;
- les Vosges à l'est ;
- le massif des Ardennes au nord-est.

C. HISTOIRE SÉDIMENTAIRE

A partir du Trias, différents cycles de transgressions/régressions marines vont affecter le socle et le remplissage sédimentaire du bassin de Paris débute. Le bassin de Paris est comblé par une succession de terrains d'origine sédimentaire et de nature diverse (sables, calcaires, argiles...) et les grandes fractures qui affectent le socle du bassin de Paris influent directement sur le taux de subsidence du bassin [Pomerol, 1974]. Les dépôts sédimentaires n'ont que peu subi les effets de l'orogénèse alpine qui ne se sont traduits que par quelques plis et la formation d'une fracturation souvent à la faveur du rejeu d'anciennes failles paléozoïques [Dercourt, 2002]. L'érosion a ensuite permis de mettre à l'affleurement une succession d'auréoles plus ou moins concentriques (les plus récentes au centre) formées de couches géologiques de lithologies et d'âges différents. L'image généralement utilisée décrit une morphologie en « pile d'assiettes » (Figure II - 3) [Pomerol, 1974].

Au **Trias**, le bassin de Paris est un golfe ouvert à l'ouest et forme la marge occidentale du bassin Germanique. Les terrains du Trias appartiennent donc aux faciès germaniques (Buntsandstein, Muschelkalk et Keuper). Les terrains du Trias inférieur sont majoritairement issus de l'altération des massifs hercyniens (grès, conglomérats) alors que ceux déposés au Trias supérieur témoignent d'un milieu de sédimentation lagunaire (évaporites). La fin du Trias montre des tendances marines régressives [Cavelier *et al.*, 1980]. L'altération différentielle des différents terrains déposés permet la formation de reliefs caractéristiques en cuesta : côte du Muschelkalk.

Au **Jurassique**, le bassin Parisien est le témoin d'un grand cycle marin avec une transgression progressive qui arrive à son maximum au Dogger puis une régression progressive jusqu'à la fin du Malm [Cavelier *et al.*, 1980]. La nature des terrains géologiques déposés varie en fonction de leur localisation dans le bassin. Il s'agit

principalement de calcaires au contenus fossilifères variés, de calcaires argileux, de marnes et d'argiles. L'exondation fini-jurassique se traduit par le dépôt de terrains à faciès fossilifères de plage [Cavelier *et al.*, 1980]. Par rapport aux couches plus meubles (marnes, argiles...), les terrains calcaires forment des reliefs positifs par érosion différentielle. Les reliefs calcaires définissent comme dans le Trias des *cuestas* nommées d'est en ouest, Côte de l'Infralias, Côte de Moselle (au niveau de Langres), Côte de Meuse (au nord-ouest de Chaumont) et Côte des Bars (entre Chaumont et Saint-Dizier).

Au **début du Crétacé**, une nouvelle transgression marine affecte le bassin de Paris. Les eaux proviennent désormais des mers alpines par dessus le Jura ce qui forme le golfe bourguignon. Les parties nord et nord-est du bassin de Paris appartiennent quant à elles au bassin Wealdien plus marécageux [Pomerol, 1974]. Les dépôts sédimentaires sont majoritairement représentés par des calcaires et des argiles.

La **fin du Crétacé inférieur** est le témoin d'une faible régression marine avant la grande transgression du Crétacé supérieur. Durant cette phase, la mer déborde largement de la zone actuelle que représente le bassin de Paris [Abrard, 1950]. Dans un premier temps, les terrains géologiques du Crétacé supérieur sont représentés majoritairement par des sables, des argiles, des marnes, des gaizes et par les premières craies dont le contenu détritique reste important [Cavelier *et al.*, 1980]. Le Turonien voit ensuite le dépôt de craies marneuses et de tuffeau et c'est au **Sénonien** que s'installe la mer de la Craie *sensu stricto* est que se déposent les importantes couches de craie très pure caractéristiques de cette période. La fin du Crétacé est alors le témoin d'une nouvelle régression marine avec le retrait de la mer de la Craie.

Au **Paléogène**, le bassin de Paris est définitivement séparé des mers Alpines et s'ouvre vers la mer du Nord et le jeune océan Atlantique par l'intermédiaire de la Manche [Pomerol, 1974]. Ce phénomène se traduit par l'arrivée des Nummulites dès le Cuisien [Cavelier *et al.*, 1980]. Des petits cycles de régression/transgression marine laissent tout de même quelques zones immergées de manière temporaire et les différents terrains géologiques ont tendance à se déposer plus localement et les variations latérales de faciès sont nombreuses. Le Paléogène est alors le témoin de dépôts de sédiments d'origines et de natures très variées : calcaires (pisolitiques, à algues encroûtantes, à Gastéropodes, à Miliolites...), marnes (à rognons calcaires, à Cérithes, magnésiennes, bleues, vertes...), travertins, tuffeaux, argiles (sableuses, glauconieuses, à silex, plastiques...), sables (glauconieux, littoraux...), conglomérats, grès, lignites... La fin du Paléogène est caractérisée par des dépôts témoignant d'environnements plus lagunaires et lacustres et la mer abandonne définitivement le bassin de Paris [Alimen, 1936].

Le **Néogène** voit donc le bassin de Paris évoluer essentiellement en conditions continentales [Cavelier *et al.*, 1980] avec des zones persistant en conditions palustres.

La mer ne revient qu'à deux reprises mais sur des étendues de bien moindre importance qu'auparavant. Les terrains déposés de manière plus locale sont majoritairement représentés par des sables, des marnes et des argiles et nombre d'entre eux présentent des faciès fluviatiles et témoignent de l'altération des massifs anciens [Mégnyen *et al.*, 1980].

Les périodes **quaternaires** sont le témoin des glaciations et déglaciation successives. Le bassin Parisien se trouve alors (au moins dans sa partie septentrionale) en conditions périglaciaires et les différents terrains géologiques vont subir des altérations qui génèreront des formations superficielles caractéristiques.

2. GÉOLOGIE DE LA CHAMPAGNE-ARDENNE

La région Champagne-Ardenne est située en majeure partie dans le bassin de Paris. Seule la pointe de Charleville-Mézières possède un substratum composé du socle hercynien faisant partie du massif des Ardennes .

a. LES SUBSTRATS GÉOLOGIQUES

➤ LE SOCLE HERCYNIEN

Le socle hercynien ardennais du Nord de la France fait partie d'un massif primaire qui se prolonge jusqu'au massif de l'Eifel (Allemagne occidentale) [Pomerol, 1974]. Il s'est formé par la collision au Silurien de la Laurussia (au nord) et du Protogondwana (au sud) lors de la fermeture des océans Médio-Européen et Rhéïque et forme le front nord-varisque [Elmi et Babin, 2002].

Les terrains géologiques du Cambrien et du Dévonien qui forment cette zone sont majoritairement constitués de quartzite, de schistes (notamment de l'ardoise) et d'importants bancs de marbre.

➤ LE TRIAS

Les terrains datés du Trias ne sont que très faiblement représentés en Champagne-Ardenne puisqu'ils ne sont présents que dans la partie la plus au sud-est du département de la Haute-Marne.

Ces couches sédimentaires consistent en une succession de grès (majoritaires), de calcaires et de marnes et argiles (principalement les argiles bariolées du Keuper). Ces différentes couches contiennent des occurrences parfois très importantes d'évaporites (notamment du gypse).

➤ LE JURASSIQUE

En Champagne-Ardenne, les terrains géologiques datés du Jurassique sont localisés dans la partie ouest du département de la Haute-Marne ainsi que dans la zone médiane du département des Ardennes.

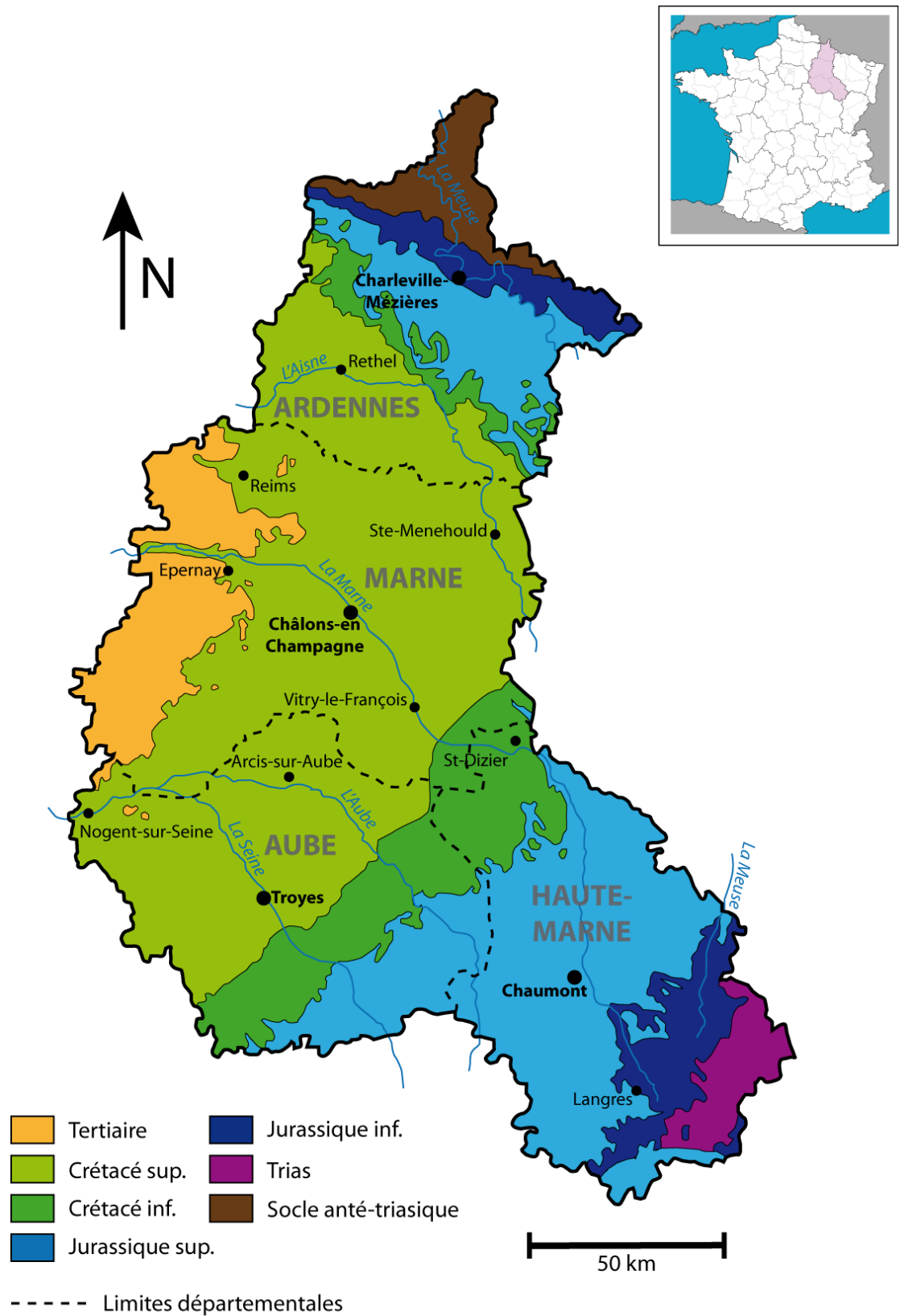


Figure II - 4 : Carte et coupe géologiques simplifiées du bassin de Paris.

➤ LE CRÉTACÉ

En Champagne-Ardenne, les couches géologiques affiliées au Crétacé sont situées dans la partie sud du département des Ardennes, sur une grosse partie est du département de la Marne et sur la majeure partie du département de l'Aube.

La dénomination « Champagne » vient du latin *Campania*, utilisé pour désigner une plaine cultivée en champs ouverts [Ballif *et al.*, 1995]. Dans le nord-est de la France, ce terme qualifie la grande plaine qui s'étend de la Picardie (au nord-est de Laon), au Pays d'Othe (au sud-ouest de Troyes).

La Champagne est habituellement divisée en deux entités bien définies :

- la **Champagne humide**, à l'est, possède un substratum composé de terrains sédimentaires du Crétacé inférieur dont la nature est principalement marno-argileuse et parfois sablo-gréseuse [Hilly et Haguenauer, 1979]. Elle forme une dépression bordée à l'est par les terrains du Secondaire ;
- la **Champagne sèche** (ou crayeuse) dont le substratum, à l'ouest, est composé de terrains sédimentaires du Crétacé supérieur de nature très majoritairement crayeuse (exception faite de quelques niveaux du Cénomanien). L'étude des foraminifères benthiques [Monciardini *et al.*, 1980 ; Pomerol *et al.*, 1983] a permis d'établir les limites des grandes unités biostratigraphiques allant du Turonien au Campanien. La craie est une roche calcaire composée à 80 % de restes de Coccolithophoridés (les coccolithes) qui se présentent sous la forme de disques de 4 µm de diamètre ainsi que des débris de mollusques, d'échinodermes, des spicules de spongiaires et des radiolaires [Cayeux, 1935]. Sa teneur en CaCO₃ est généralement de 90 % ou plus et sa porosité totale oscille entre 40 et 45 % [Vachier *et al.*, 1979]. La bordure est de la Champagne crayeuse définit un relief positif qui domine la Champagne humide. Cette entité forme la Côte (cuesta) de Champagne [Hilly et Haguenauer, 1979].

➤ LE TERTIAIRE

En Champagne-Ardenne, les terrain géologiques appartenant au Tertiaire forment le sous-sol de la partie la plus occidentale du département de la Marne. Ils sont constitués de couches déposées du Montien au Rupélien en discordance sur la craie de Champagne. Ils sont constitués d'une succession de marnes, de sables et grès tendres et de quelques calcaires marneux et se terminent par une couche d'argiles à meulière. Cette couche terminale, de part sa résistance à l'érosion, explique que les terrains du Tertiaire forment des reliefs malgré leurs compositions de roches plutôt meubles (Montagne de Reims, Massif de Saint-Thierry...).

La bordure est des terrains du Cénozoïque forment la Côte (Cuesta) de l'Île-de-France qui est entrecoupée par des entonnoirs de percées cataclinales formés par

l'incision des différentes rivières. Des buttes témoins tertiaires sont encore présentes sur la craie champenoise (Mont de Berru, Mont de Brimont...).

b. LES FORMATIONS SUPERFICIELLES

L'altération de ces substrats géologiques différents conditionne la présence ou non et le type de formations superficielles. Ces formations superficielles sont assez variées et peuvent être le résultat de différents processus.

➤ FORMATIONS ISSUES DE LA GÉLIFRACTION

Dans la plupart des cas, la craie est recouverte par des formations superficielles qui sont le produit de l'altération par le gel. Elles peuvent être de trois types principaux : les limons, les graveluches et les poches de cryoturbation.

▪ LES POCHES DE CRYOTURBATION :

Les poches de cryoturbation constituent des paléosols formés en conditions périglaciaires. Il s'agit de sols polygonaux qui trouvent leur origine au cours des périodes froides du Quaternaire, lorsque le climat permet l'existence saisonnière d'un mollisol surmontant un pergélisol.



Figure II - 5 : Cryoclaste de craie dont l'eau porale a été extraite par le phénomène naturel hivernal de cryosuccion.

Les phénomènes de gel/dégel au sein du mollisol vont induire la cryoclastie de la craie. En hiver, la cryosuccion (Figure II - 5) est responsable de l'extraction de l'eau contenue dans la craie. Cette eau cristallise à la périphérie des cryoclastes de craie ce qui implique une dilatation du sol et la formation de structures polygones dont les cloisons se soulèvent petit à petit [Laurain *et al.*, 1997].



Figure II - 6 : Poches de cryoturbation caractéristiques délimitées par des cheminées de poche.

Les parties soulevées (appelées « cheminées de poches » (Figure II - 6) de part leur morphologie en deux dimensions) subissent d'autant plus les phénomènes de cryoclastie. Ce phénomène induit la formation de cryoclastes encore plus petits qui rejoignent le centre des poches (moins élevé) par migration centripète (petits éboulements, pipkrakes...) causée par simple gravité (Figure II - 7).

Le comblement des poches a donc pour origine l'érosion des cheminées de poches, la décarbonatation de la craie [Dutil et Ballif, 1968], une accumulation des insolubles (silts, argiles et oxydes de fer) mais parfois aussi des apports éoliens (sables et loess) [Laurain *et al.*, 1995].

■ LES GRÈZES LITÉES OU « GRAVELUCHES » :

A la saison estivale, l'eau issue du dégel du mollisol ne peut s'infiltrer en profondeur dans le pergélisol qui reste gelé. L'ensemble des poches de cryoturbation constituent donc un matériau gorgé d'eau qui, petit à petit, va fluer en suivant la ligne de plus grande pente [Matsuoka, 2001 ; Harris *et al.*, 2009].

Les cheminées de poches vont s'obliquer petit à petit et les grèzes constituant l'intérieur des poches vont se déverser progressivement le long de la pente (Figure II - 8). Ce phénomène est appelé fluage des poches ou cryoreptation [Bertrand, 1992]. Dans les cas extrêmes, les cheminées de poches s'étirent au maximum et l'observation d'un sol strié est alors possible (Figure II - 9).

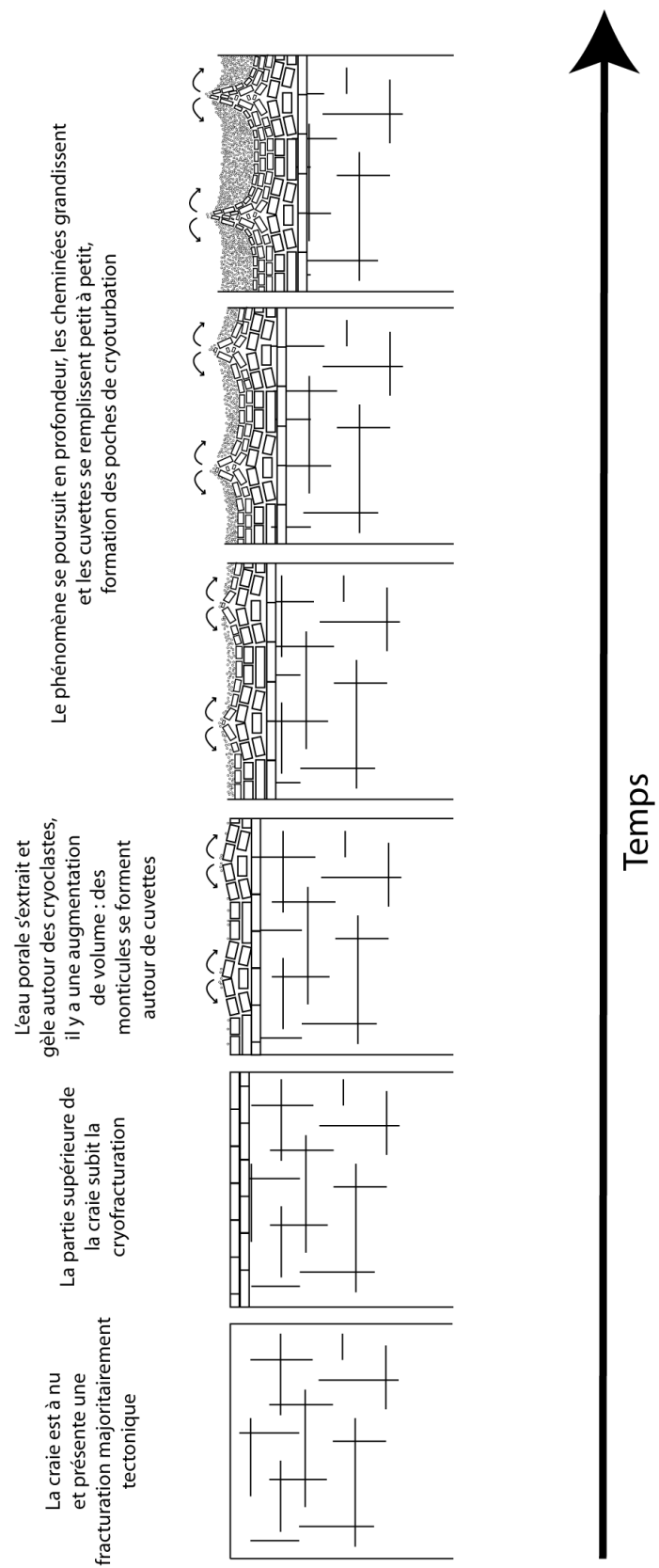


Figure II - 7 : Schéma explicatif de la formation des poches de cryoturbation d'après Laurain et al. [1997].

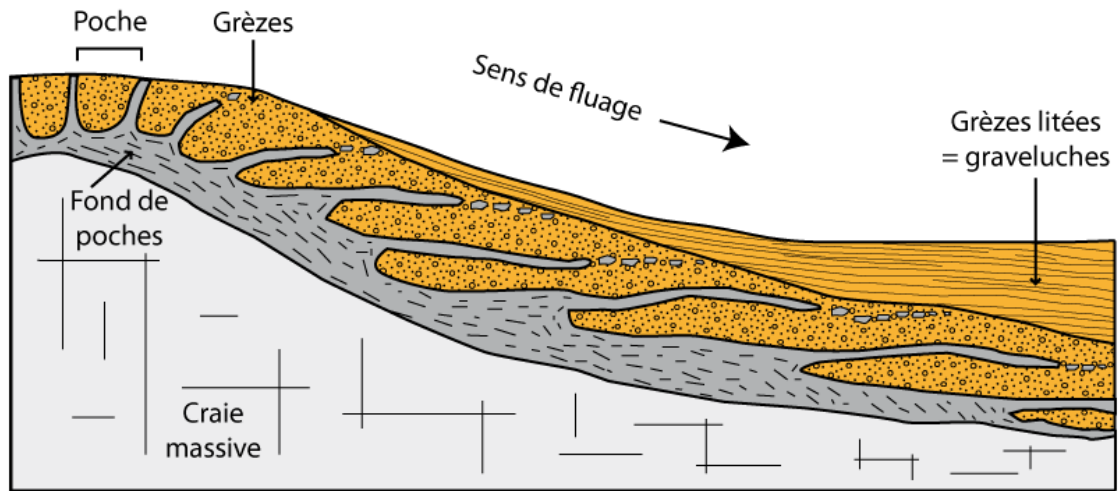


Figure II - 8 : Schéma explicatif de la formation des graveluches par fluage des poches de cryoturbation (d'après [Bontrond *et al.*, 2012]).

La succession de petits éboulements des éléments remplissant les poches le long de la pente vont former des grèzes litées constituées de lits gras et de lits maigres. Dans la région, ces formations sont appelées graveluches [Laurain *et al.*, 1995].

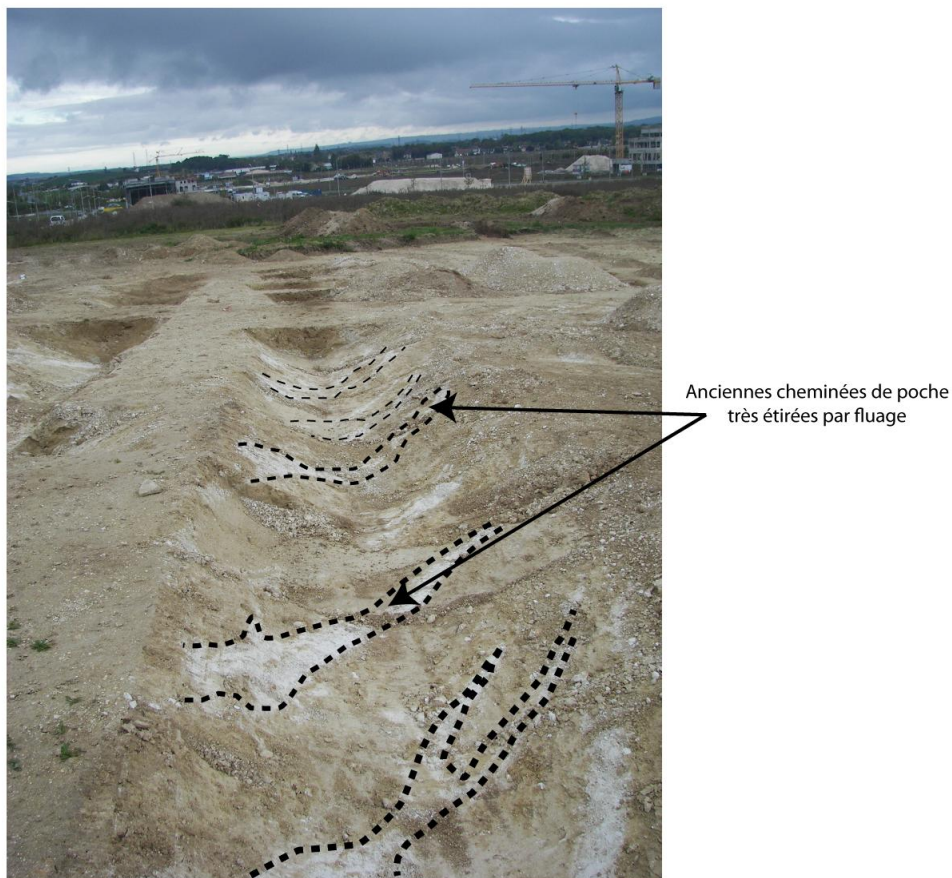


Figure II - 9 : Sol strié observé lors d'une expertise géomorphologique réalisée pour le service archéologique de Reims Métropole [Bontrond *et al.*, 2012].

➤ LES LIMONS

Les limons (ou lœss) sont des roches meubles formées par des phénomènes de déflation de roches préexistantes en contexte périglaciaire [Bordes, 1954]. Ces formations présentent une forte extension dans de nombreuses régions du globe [e.g. Begét, 2001 ; Porter, 2007 ; Muhs, 2013] et particulièrement en Europe de l'Ouest [Antoine, 2002].

Concernant la Champagne-Ardenne, les formations lœssiques sont très restreintes [Ballif *et al.*, 1995] ; leurs occurrences les plus importantes sont localisées dans les régions de Reims et de Reims [Durand, 1979]. Hors des limites régionales, c'est dans la partie nord-est du département de l'Aisne que les occurrences de limons sont les plus importantes.

La mise en place de ces formations superficielles serait selon Ballif *et al.* [1995] contemporaine et peut-être même antérieure à la période de genèse des poches de cryoturbation. Ils font également l'hypothèse que la Champagne centrale aurait pu être recouverte par une fine couche lœssique tardiglaciaire.

➤ LES ALLUVIONS

Les dépôts alluvionnaires sont dans la région majoritairement représentés par des graviers et des gravillons de calcaires (y compris la craie) ainsi que par quelques fragments de silex noirs emballés dans un sable calcaire grossier [Ballif *et al.*, 1995]. Les éléments de nature crayeuse sont très souvent issus de la reprise des cryoclastes de craie provenant des graveluches [Coulon, 2013].

Ballif *et al.* [1995] indiquent qu'il est assez fréquent que des dépôts tourbeux recouvrent les terrains alluvionnaires, et ce jusque dans les plus petites vallées sèches.

3. ESQUISSE PÉDOLOGIQUE

La variété de terrains géologiques présents sur le territoire de la Champagne-Ardenne se traduit par une répartition régionale de types de sols. Les informations suivantes sont principalement issues de l'Esquisse Pédologique des Sols de Champagne-Ardenne établie par l'Atelier Régional d'Études Économiques et d'Aménagement Rural d'après des sources provenant du Service Pédologique de la Société d'Aménagement des Friches de l'Est (M. Benoît-Janin) et de la Section d'Étude des Sols de la Chambre d'Agriculture de la Marne (MM. Magniant et Catillon).

Dans sa partie la plus septentrionale (région de Givet), le socle primaire est recouvert en majorité par des sols bruns. La partie sud-est de ce socle (Revin, Monthermé...) est quant à elle principalement surmonté de sols bruns acides. La partie sud-ouest supporte plutôt des sols de type sols bruns lessivés hydromorphes.

Les terrains triasiques de l'extrême sud-est de la Champagne-Ardenne sont principalement recouverts par des sols de type peu évolué.

Les alternances calcaire / marnes des terrains jurassiques sont responsables du développement de sols bruns calciques. Ils supportent également une forte proportion de sols bruns au niveau de leurs occurrences nord régionales (zone incluse entre Chaumont-Porcien, Novion-Porcien et Rumigny) et des sols bruns acides dans la partie sud-est et est de leurs zone de présence (Soulaines-Dhuys, Montier-en-Der, est et nord de Sainte-Menehould).

Sur la craie constituant la Champagne sèche se développent principalement des sols calci-magnésiques appelés rendzines. Si les rendzines grises sont localisées directement sur la craie, les rendzines brunes se forment essentiellement sur les produits d'altération de la craie (poches de cryoturbation, graveluches...). Des sols peu évolués (colluviosols) sont également présents au sein des vallées sèches. Il existe également des sols bruns calcaires développés sur des graveluches accumulées dans les dépressions topographiques de la surface de la craie cryoturbée.

La nature majoritairement marno-argileuse et sablo-gréseuse de la Champagne humide explique la forte prévalence de sols bruns lessivés hydromorphes.

Les terrains tertiaires supportent en majorité des sols bruns hydromorphes sur les terrains marno-argileux (zone Esternay, Montmirail, Montmort...), des sols bruns acides sur les sables et des sols bruns calcaires (et parfois sur sables). Les flancs des reliefs de la Côte de Champagne présentent des sols majoritairement calcaires, calciques et des rendzines.

Enfin, les zones les plus plates des vallées (les moins drainées) présentent souvent des sols qualifiés d'organiques ; il s'agit dans la plupart des cas de tourbières et de marais. A part dans la vallée de la Vesle où ces sols sont visibles jusque dans la vallée creusée au sein des terrains tertiaires (région de Fismes), les sols organiques sont généralement circonscrits à la Champagne crayeuse (marais de la Vesle, de Saint-Gond, de la Superbe, d'Athis-Cherville...).

4. PAYSAGE VÉGÉTAL

Les terrains tertiaires de la pointe de Givet sont en très grande partie recouverts par un vaste ensemble boisé composé majoritairement de chênes, de hêtres, de bouleaux et de charmes. Des conifères (épicéas et mélèzes) sont également présents. Plus au sud commencent à apparaître des pelouses calcaires localement appelées « tiennes ».

Les alternances des couches géologiques de natures différentes du Trias et du Jurassique sont marquées dans la végétation par une alternance de zones boisées et de zones de cultures et / ou de prairies (Figure II - 10).



Figure II - 10 : Représentation de la région Champagne-Ardenne sur un extrait des données Corine Land Cover 2006 (source : IGN-Géoportail).

La végétation naturelle de la Champagne crayeuse est un tapis d'herbes basses calcicoles sèches parsemé de buissons appelé « savart » [Durand, 1979]. Ces entités végétales ont aujourd'hui presque complètement disparu du paysage à part au niveau des différents camps militaires présents dans la région (Mourmelon, Suippes, Moronvilliers et Marigny). Une longue période prospère, des premiers siècles de notre ère jusqu'à la fin du XVII^{ème} siècle, est suivie par une période (XVIII^{ème} siècle) durant laquelle la Champagne crayeuse est définie comme stérile [Loisy, 1997] où ni arbres ni buissons ne sont visibles [d'Hailly, 1695]. La Champagne crayeuse tiendrait de cette période pauvre son nom de Champagne Pouilleuse (autre étymologie possible : affiliation à une herbe très commune des savart : le pouillot [Savart et Belnot, 2001]. La Champagne crayeuse a été partiellement reboisée de pins noirs et sylvestres d'Autriche au XIX^{ème} siècle lors de la révolution industrielle (bois pour machines à vapeur et bois de chauffage) et jusqu'aux années 1950. L'émergence de la fertilisation chimique des sols après la seconde guerre mondiale a transformé la Champagne pouilleuse en l'une des premières régions céréalières d'Europe et la première région mondiale productrice de luzerne. Cette zone particulière de la région Champagne-Ardenne est donc actuellement presque complètement recouverte par des cultures (Figure II - 10).

Les terrains du Tertiaire peuvent être recouverts par des forêts de feuillus (chênes, charmes, hêtres du Parc Naturel Régional de la Montagne de Reims et du Massif Forestier d'Épernay...) ainsi que par des zones de cultures plus au sud au niveau de la zone Montmirail-Fromentières-Esternay.

III. RÉPARTITION

Il n'existe pas d'étude spécifiquement axée sur la répartition des accumulations carbonatées champenoises. Quelques indices sont seulement extractibles des études peu nombreuses existantes sur ces structures champardennaises particulières.

L'étude de Loisy [1997] se focalise sur les « encroûtements carbonatés en substrat crayeux ». Elle comprend l'étude de treize sites répartis dans les régions de Châlons-en-Champagne, Reims et Nogent-sur-Seine (Figure II - 11).

Le site « Fa » étudié par Loisy [1997] localisé au nord-est de Châlons-en-Champagne sur des terrains de la station de l'INRA (Figure II - 11) a également fait l'objet d'études antérieures par des chercheurs focalisées plus spécifiquement dans le domaine de l'agronomie [Dever *et al.*, 1982 et 1983 ; Durand, 1973, 1979 et 1980].

IV. MICROMORPHOLOGIE

Les études descriptives les plus poussées concernant les accumulations carbonatées en Champagne se trouvent dans la thèse de Durand [1979] qui concerne la pédogenèse en pays calcaire dans le nord-est de la France puis la thèse de Loisy [1997]

qui se focalise sur les accumulations carbonatées en substrat crayeux dans l'est du Bassin de Paris et qui s'attache plus particulièrement aux rôles de la diagenèse et des actions biologiques.

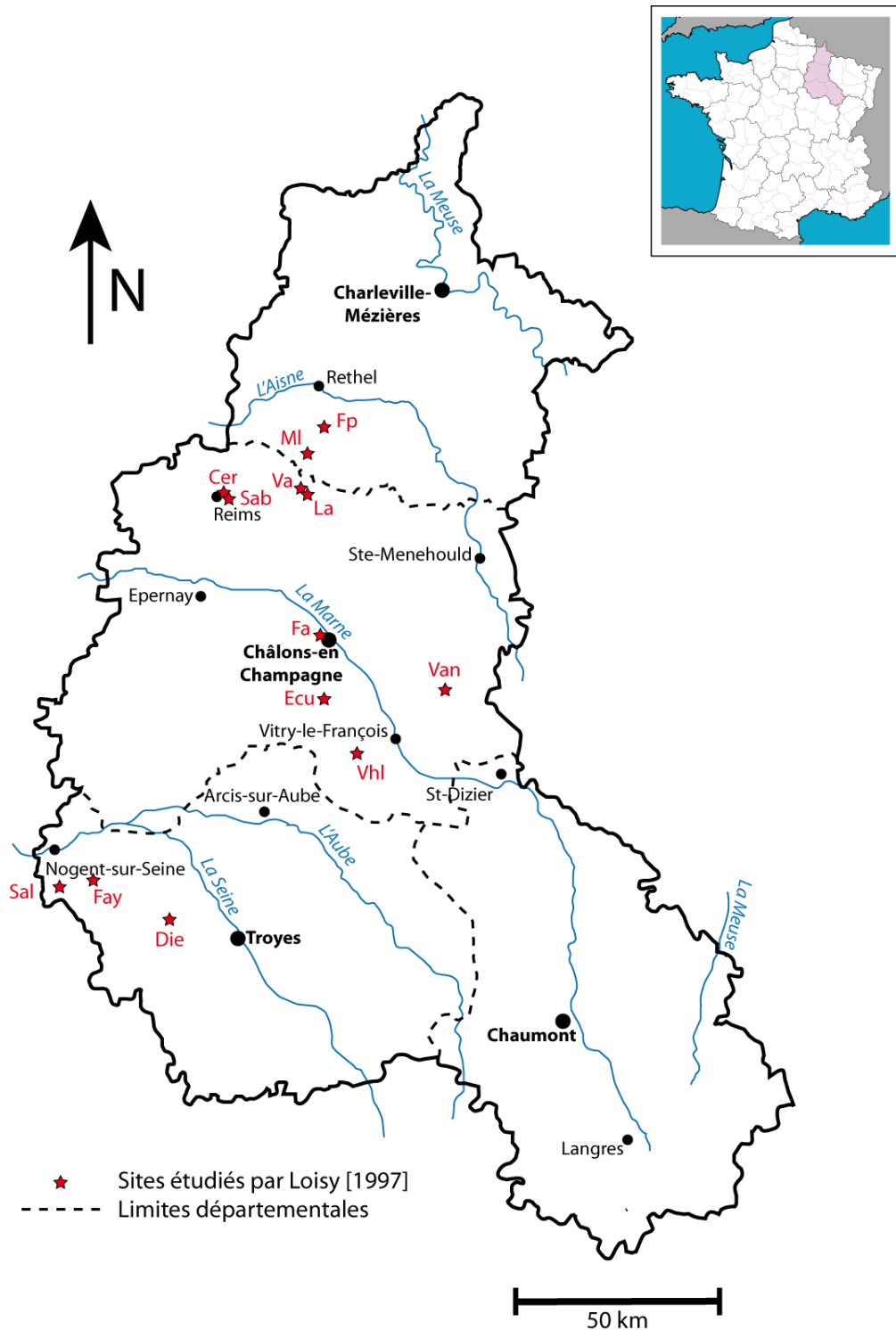


Figure II - 11 : Carte de répartition des sites étudiés par Loisy [1997].

D'un point de vue général, les horizons d'accumulations carbonatées (HAC) champenois se présentent comme un conglomérat constitué de cryoclastes de craie dont la taille varie de 100 μm à 1 cm, liés par un limon sablo-argileux à ciment carbonaté [Loisy, 1998] (Figure II - 12).

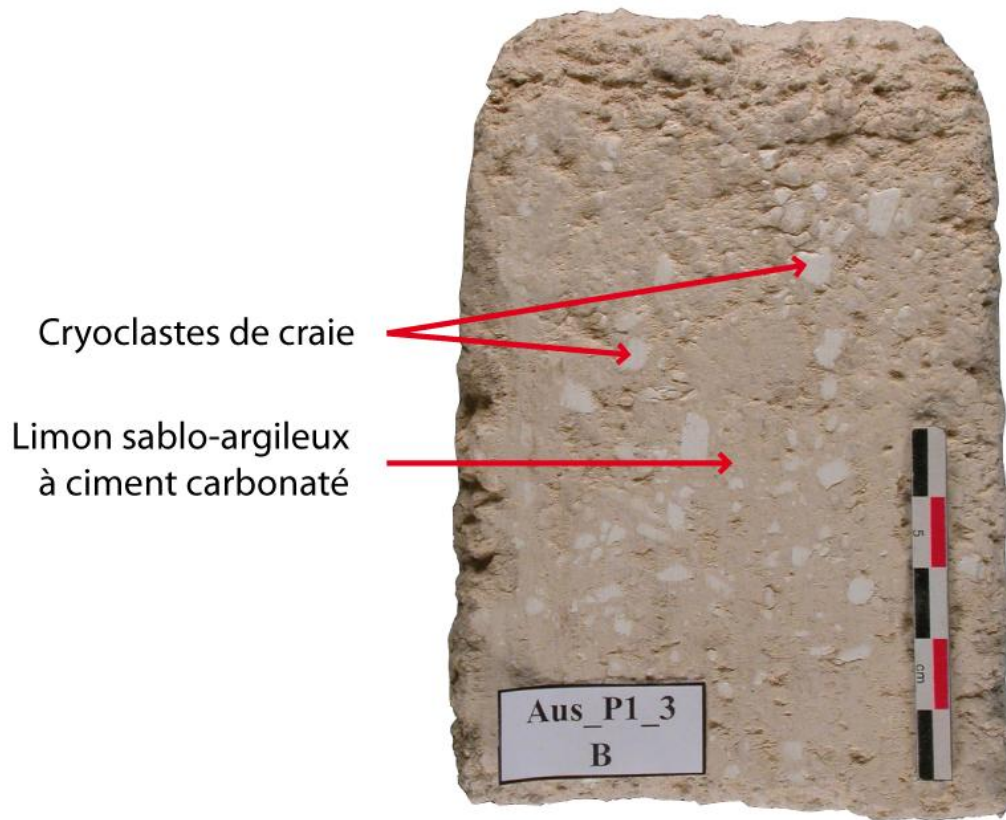


Figure II - 12 : Photographie d'un échantillon d'horizon d'accumulations carbonatées champenois.

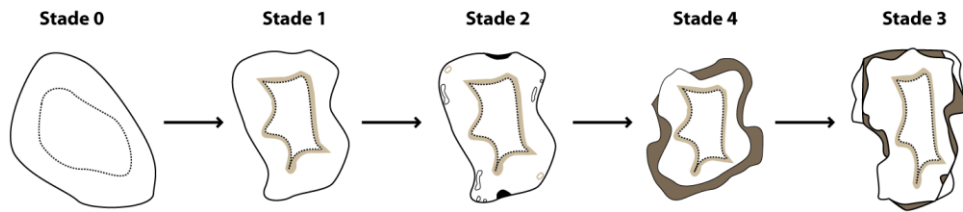
1. CRYOCLASTES DE CRAIE

Les cryoclastes de craie sont l'un des constituants essentiels et ubiquistes des HAC et des grès.

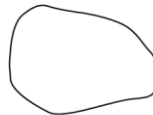
Issus de l'altération de la craie sous climat périglaciaire ces cryoclastes ont subi une évolution diagénétique. Suite à des observations macro et microscopiques et des analyses géochimiques (calcimétrie, teneurs en éléments majeurs, trace et isotopes stables du carbone et de l'oxygène), Richard [1996] distingue quatre stades évolutifs qui débutent par le développement d'une porosité secondaire. Cette nouvelle porogenèse se développe ensuite de manière centripète tout en étant associée à une induration des cryoclastes ainsi qu'à leur enrichissement en insolubles. L'altération se poursuit alors en suivant toujours une évolution centripète mais de manière dissymétrique jusqu'au démantèlement périphérique du cryoclaste (Figure II - 13).

Cryoclastes de type A :

Evolution diagénétique fondée sur une différenciation centripète [modifié par Loisy [1997] d'après Richard [1996]



Cryoclastes de type B :



Grains issus du démantèlement local et tardif du substrat crayeux

Cryoclastes de type C :



Grains biocariés par des algues

Cryoclastes de type D :



Grains issus d'une altération physico-chimique précoce et importante de craie héritée

Figure II - 13 : Les différents faciès de cryoclastes de craie rencontrable dans les horizons d'accumulations carbonatées champenois (modifié d'après Loisy [1997]).

Grâce à des observations au microscope à épifluorescence, Loisy [1997] décrit certaines morphologies supplémentaires :

- les **cryoclastes de type A** correspondent aux occurrences qui présentent une des morphologies décrites par Richard [1996] (Figure II - 13) ;
- les **cryoclastes de type B** présentent une porosité macroscopique de bordure très faible (voire inexistante) et peuvent parfois montrer une certaine fracturation. Ces éléments seraient issus du démantèlement local et tardif du substratum crayeux (Figure II - 13) ;
- les **cryoclastes de type C** ont un aspect spongieux et présentent des pores filamenteux alignés de manière radiaire dans la totalité du grain ou seulement en bordure. Ces cryoclastes auraient été biocariés par des algues (Figure II - 13) ;
- les **cryoclastes de type D** présentent une macroporosité importante et une bordure tortueuse. Ils seraient issus d'une altération physico-chimique précoce et importante de la craie (Figure II - 13).

Les cryoclastes de craie sont donc en grande majorité arrondis et présentent un cortex plus ou moins altéré.

La proportion et la répartition de ces cryoclastes de craie au sein des HAC sont décrites comme « variable et aléatoire d'un site à l'autre et même d'une lame mince à l'autre » [Loisy, 1997]. Ces éléments crayeux sont définis comme "non jointifs" [Loisy, 1997] et emballés dans un liant carbonaté composé de différentes phases extrêmement bien définies par l'auteur.

2. LIANT CARBONATÉ

Le liant carbonaté est représenté par 5 microfaciès bien cristallisés dont les transformations par les précipitations et les recristallisations conduisent à la différenciation des accumulations carbonatées [Loisy, 1997]. Un rappel sommaire de ces cinq microfaciès est proposé dans les parties suivantes.

a. MATRICE À ÉLÉMENTS DÉTRITIQUES

La matrice à éléments détritiques se présente comme une micrite contenant des oxydes de fer et des argiles et possède un squelette composé de différents éléments :

- dans une proportion allant de 5 à 10 %, les **grains de quartz** ont une taille allant de 10 à 600 μm et leur morphoscopie témoigne d'une origine éolienne ;
- les **feldspaths** (potassiques et plagioclases) représentent 3 à 7 % des éléments du squelette de la matrice à éléments détritiques et leur taille varie entre 10 et 50 μm . Ils auraient également une origine éolienne ;
- des petites occurrences de **glauconie** peuvent également être observées dont la taille est comprise entre 40 et 60 μm . La glauconie, minéral argileux d'origine marine, serait issue d'une libération lors de l'altération de la craie ou d'un transport éolien de minéraux d'altération des formations sédimentaires tertiaires ;
- des **autres minéraux argileux** faisant partie des minéraux insolubles de la craie sont également présents à hauteur de 5 à 15 % dans les échantillons totaux. Ces argiles sont représentées par des smectites, des illites et des inter-stratifiés illite-smectite.

La matrice à éléments détritiques présente également un cortège d'éléments figurés qui sont la plupart du temps liés à des activités biologiques :

- les **bioclastes** (coccolithes, foraminifères, lamellibranches) trouvent leur origine dans le démantèlement de la craie. Les dissolutions-recristallisations qu'ils ont généralement subies leur donne un aspect gonflé et craquelé ;
- quelques rares occurrences de **matière organique** sont relevées par Loisy [1997] dans certains macropores de la matrice à éléments détritiques. Ces résidus organiques épars sont interprétés par l'auteur comme étant le résultat de l'activité végétale ;

- les **sphéroïdes** (appelés glébules par Durand [1979] et nodules polycristallins transparents par Dever *et al.* [1983]) sont de nature calcitique et possèdent un cœur composé de cristaux de 20 à 60 μm circonscrit par un cortex de cristaux longs de 90 à 220 μm et larges de 50 à 150 μm . Ils s'organisent en rognons et trouvent leur origine dans les glandes calcifères des lombrics [Canti et Pearce, 2003] qui excrètent ainsi l'excès de calcium absorbé [Darwin, 1881 ; Robertson, 1936 ; Briones *et al.*, 2008] ;
- les **cristallarias intercalaires**, déjà décrites par Durand [1979] et Dever *et al.* [1983], se présentent sous la forme d'assemblages de cristaux de calcite rhomboédriques très bien développés dont la taille est comprise entre 10 à 80 μm . Loisy [1997] indique qu'ils représentent au maximum 5 % de la matrice à éléments détritiques. La formation de ces structures serait liée à des phénomènes physicochimiques saisonniers intervenant après la mise en place de la matrice.

La matrice à éléments détritiques présente une couleur brun à marron clair en atteignant parfois des teintes plus verdâtres.

b. CIMENTS MICROSPARITIQUE ET SPARITIQUE

Ces deux types de ciments trouvent leur origine dans des phénomènes physicochimiques et constituent selon Loisy [1997] la partie la plus indurée des encroûtements carbonatés :

- le **ciment microsparitique** est de couleur grise. Il présente des grains de 4 à 10 μm qui résultent de la coalescence des grains de la matrice à éléments détritiques. Il présente un aspect plus homogène que cette dernière. Il se développe en bordure des pores et sa répartition dans l'HAC varie verticalement. Le passage progressif de la matrice à éléments détritiques au ciment microsparitique localisé en bordure de pore permet de penser que ce dernier résulte d'une recristallisation de la matrice à éléments détritiques ;
- le **ciment sparitique** beige se présente sous la forme de plaques en écailles composées de cristaux de calcite supérieurs à 20 μm . Il traduit un stade plus poussé de recristallisation de la matrice à éléments détritiques (avec ou sans le passage par un ciment sparitique).

c. PHASES À AIGUILLES ET MICRO-AIGUILLES CALCITIQUES

A côté des processus d'indurations physicochimiques, il existe un deuxième mode d'induration lié à des biominéralisations et à la transformation diagénétique de ces productions (biodiagenèse). Ces biominéralisations vont permettre à Loisy [1997] de définir deux des cinq microfaciès qu'elle a pu caractériser :

- la **phase à aiguilles calcitiques** est constituée d'amas d'aiguilles monocristallines de calcite de 7 à 30 μm de long et de 0,6 à 30 μm de diamètre. Ces aiguilles sont de type MA [Verrecchia et Verrecchia, 1994] et se présentent soit en association par paires ou par 4 avec des sections bi ou quadrilobées, soit en bandes. Ces aiguilles se localisent à l'intérieur des pores de la matrice à éléments détritiques. Soit elles les remplissent complètement, soit elles forment des structures pontées. Dans tous les cas, il subsiste tout de même une grande porosité à l'échelle nanoscopique ;
- la **matrice lâche à aiguilles** est composée d'éléments repris de la matrice à éléments détritiques. Elle se présente sous la forme de mailles inframillimétriques formées de l'agglutination d'aiguilles de type MA et de micro-aiguilles de type M. Ces dernières peuvent recouvrir et contribuer à souder les aiguilles MA ; elles sont de 2 types : organiques ou carbonatées et parfois dans un état intermédiaire entre les 2 types.

3. RÉPARTITION VERTICALE DES PHASES DU LIANT CARBONATÉ

Dans ses travaux de thèse, Loisy [1997] donne également des appréciations de la répartition verticale des 5 microfaciès qu'elle a différenciés au sein des HAC champenois.

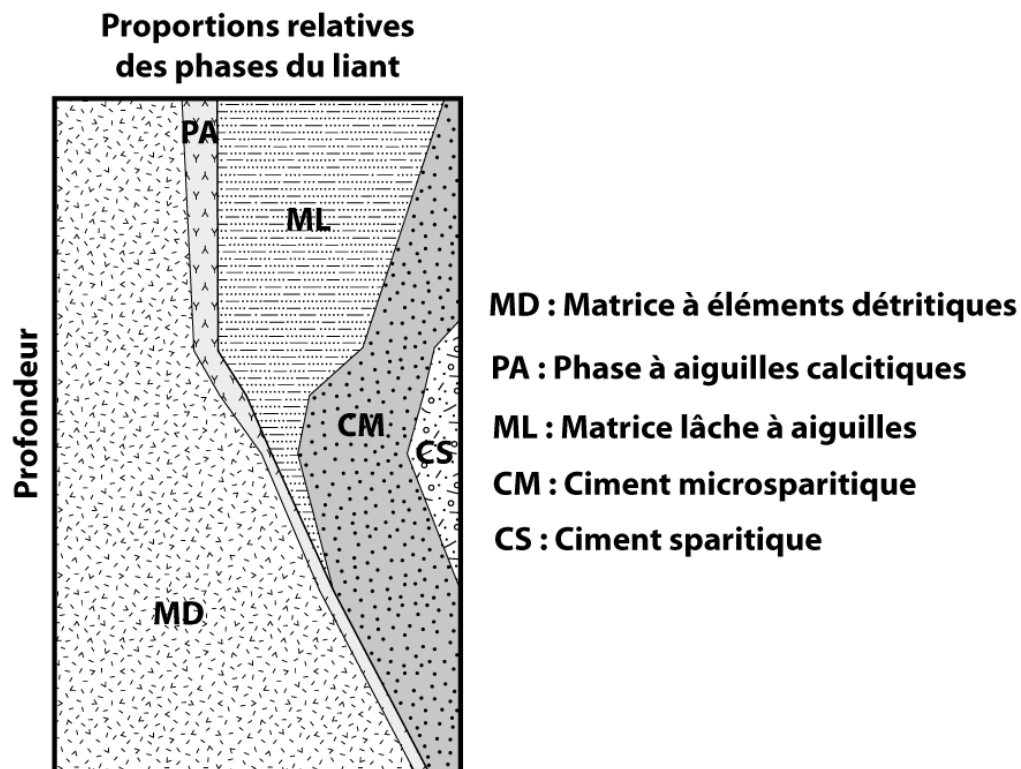


Figure II - 14 : Répartition verticale des 5 phases présentes au sein du liant carbonaté des horizons d'accumulations carbonatées (d'après Loisy [1997]).

La matrice à éléments détritiques représente 80 % du liant à la base de l'HAC et 30 % en son sommet. La phase à aiguilles calcitiques est omniprésente dans les pores de tout le profil de l'HAC avec une proportion allant de 3 à 5 %. La partie la plus dure de l'HAC est celle qui présente le plus de ciment microsparitique et de ciment sparitique au centre de l'HAC. La matrice lâche à aiguilles est essentiellement présente dans la partie supérieure de l'HAC où elle représente 45 à 70 % du liant (Figure II - 14).

V. MODALITÉS ET CHRONOLOGIES DE FORMATION

C'est sur l'origine des accumulations carbonatées champardennaises que les données sont les plus abondantes et les études les plus abouties. Un inventaire des concepts de mise en place des accumulations carbonatées est résumé dans les paragraphes suivants ; des premiers modèles conceptuels de Durand [1979 et 1980] aux hypothèses les plus récentes de Loisy [1997] en passant par celles de Dever [1983].

1. LE MODÈLE *PER DESCENSUM* [DURAND, 1979 ET 1980]

Durand [1979] s'intéresse à la pédogenèse en pays calcaire dans le Nord-Est de la France à travers une étude de la pédogenèse à une échelle globale sur la phase solide et la phase liquide. Pour lui, la calcite se dissout dès la surface du sol et l'ensemble du calcaire provenant de cette dissolution superficielle nourrit des précipitations lors des périodes d'arrêt du drainage. Lors du drainage, une fraction de ce calcium est lixiviée vers la profondeur et une fraction donne naissance à des précipitations. Ainsi, un HAC se forme sous l'horizon humifère.

Durand voit cette cyclicité comme fonction du climat, de la porosité du substratum et de l'occupation du sol. Pour lui, la formation des précipitations de calcite est essentiellement commandée par la dynamique de l'eau. La naissance et le développement de ce type d'HAC dépendent en majeure partie de l'intensité de l'évapotranspiration. L'intensité du drainage conditionne le transfert mais la composition de la solution, gouvernée par des phénomènes biochimiques différents en fonction de l'occupation du sol, intervient.

Durand part donc du principe que les aiguilles de calcite sont d'origine physico-chimique et que les précipitations s'effectueraient sous l'action de circulations *per descensum*. Cependant, cette hypothèse de croissance par le haut ne semble pas pour Loisy [1997] cohérente avec la limite très franche observée entre la partie supérieure de l'HAC et le sol sus-jacent.

Selon les calculs de Durand [1980] basés sur des estimations du taux de décalcarification/reprécipitation de calcium ainsi que sur les teneurs en silice et silicates contenus dans les différents compartiments des profils de sol sur craie, ceux-ci seraient plutôt jeunes avec un âge moyen voisin de 1000 ans. Les HAC le seraient encore plus en présentant un âge moyen de 400 ans.

2. UNE PÉDOGENÈSE BIPHASÉE [DEVER *ET AL.*, 1983]

Pour Dever *et al.* [1983], la lame d'eau participant à la recharge de la nappe est soumise à une reprise évaporatoire partielle et à une homogénéisation dans la zone de subsurface. La précipitation de calcite secondaire issue de la dissolution de la craie s'opère donc essentiellement par dégazage de la solution dans les deux premiers mètres du profil.

Leurs travaux sur les isotopes stables leur ont permis de proposer deux phases pédogénétiques majeures qui auraient affecté le substrat crayeux durant le Quaternaire récent :

- la première, qui se déroule sous climat périglaciaire, est représentée par des « nodules calcitiques colorés » à fortes teneurs en ^{13}C (+ 7 ‰) et datés d'environ 14000 ans BP. Ces fortes teneurs en isotopes stables résultent de dégazages successifs de la solution lors des changements d'état de l'eau au sein du mollisol ;
- la deuxième est une phase actuelle qui se surimpose à la première. Elle est caractérisée par des « nodules transparents » dont la teneur en ^{13}C (- 12,5 ‰) est proche de l'équilibre isotopique avec le carbone inorganique total dissous (CITD) de la solution qui percole actuellement.

Les bilans de masse isotopique permettent également à Dever *et al.* [1983] de reconstituer les parts relatives de carbonate propre à chacune de ces deux phases de pédogenèse (10 à 30 % pour la phase actuelle). Les aiguilles de calcite sont pour eux issues d'un processus de précipitation interannuelle (hors équilibre isotopique) par évaporation des solutions mères en périodes estivales. Cependant, leurs interprétations partent toujours de l'hypothèse de formation des aiguilles de calcite par phénomènes physico-chimiques uniquement.

3. LES HYPOTHÈSES GÉNÉTIQUES DE LOISY [1997]

Loisy [1997] propose une chronologie de la genèse des accumulations carbonatées champenoises suivant les études micromorphologiques, porosimétriques et géochimiques qu'elle a effectuées et croisées avec les données stratigraphiques, biogéographiques, paléoclimatiques et palynologiques concernant la région [Sauvage, 1954 ; Sernander, 1960 ; Elhaï, 1968 ; Blytt, 1876 et Chaline, 1985]. Cette chronologie se base sur une origine biominérale des aiguilles de calcite et la confirmation d'une mise en place polyphasée :

- **A** : l'érosion périglaciaire et la mise en place des poches de cryoturbation et des graveluches s'effectue **jusqu'à 14000 ans BP** (Tardiglaciaire). C'est à cette période que Loisy place la première apparition d'une phase indurée représentée par le **ciment microsparitique** (Figure II - 15 : A) ;

- **B** : la période suivante, **de 14000 à 9000 ans BP** (Préboréal), est marquée par une **forte érosion** et le développement peu important de la végétation et des sols. Le climat sec est favorable à des **cimentations physico-chimiques** sous conditions évaporatoires (Figure II - 15 : B) ;
- **C** : **de 9000 à 5000 ans BP** (optimum climatique Boréal-Atlantique), les conditions climatiques plus favorables qui règnent sur la région permettent le développement d'un sol avec une végétation importante. Les HAC déjà amorcés connaissent leur véritable essor grâce aux nombreuses biominéralisations qui forment les **phases à aiguilles calcitiques**. Cette phase de pédogenèse est déjà décrite par Bruand [1983] qui la date de 9000 à 8000 ans BP (Figure II - 15 : C) ;
- **D** : **de 5000 ans BP à la période subactuelle** (Subboréal-Subatlantique), des conditions climatiques et/ou anthropiques moins favorables entraînent une réduction de la végétation qui conduit à une **forte érosion des sols et de certains HAC**. La diminution des précipitations favorise une reprise des processus diagénétiques physico-chimiques (Figure II - 15 : D) ;
- **E** : **ces dernières décennies**, des conditions de nouveau favorables à une pédogenèse intense (surtout avec les pratiques culturales) ont conduit à la **formation d'un nouveau sol** recouvrant les restes des anciens sols et les HAC (Figure II - 15 : E).

De part des observations de phénomènes encore en cours, Loisy [1997] termine ses interprétations par une reprise à l'actuel des phénomènes de cimentation biologiques et probablement de phénomènes physico-chimiques à l'échelle saisonnière.

VI. CLASSIFICATION

A la suite de ses observations, Loisy [1997] propose de classer les HAC de Champagne dans une catégorie intermédiaire entre « *calcareous soil* » et « *hardpan calcrete* » selon la classification morpho-pédologique de Netterberg [1967 et 1980]. Dans la classification de Machette [1985], l'auteur place les HAC champenois dans le stade de développement numéro 3 (pourcentage de graviers inférieur à 20 %). Dans la classification de Carlisle [1983], les HAC de Champagne sont classés dans une catégorie réservée aux HAC localisés dans la zone vadose comprise entre la zone d'humectation du sol et la zone des eaux gravitaires. Enfin, selon la classification de Netterberg [1980], les HAC champenois sont classés comme des calcrêtes avec un pourcentage de dolomite inférieur à 5 %.

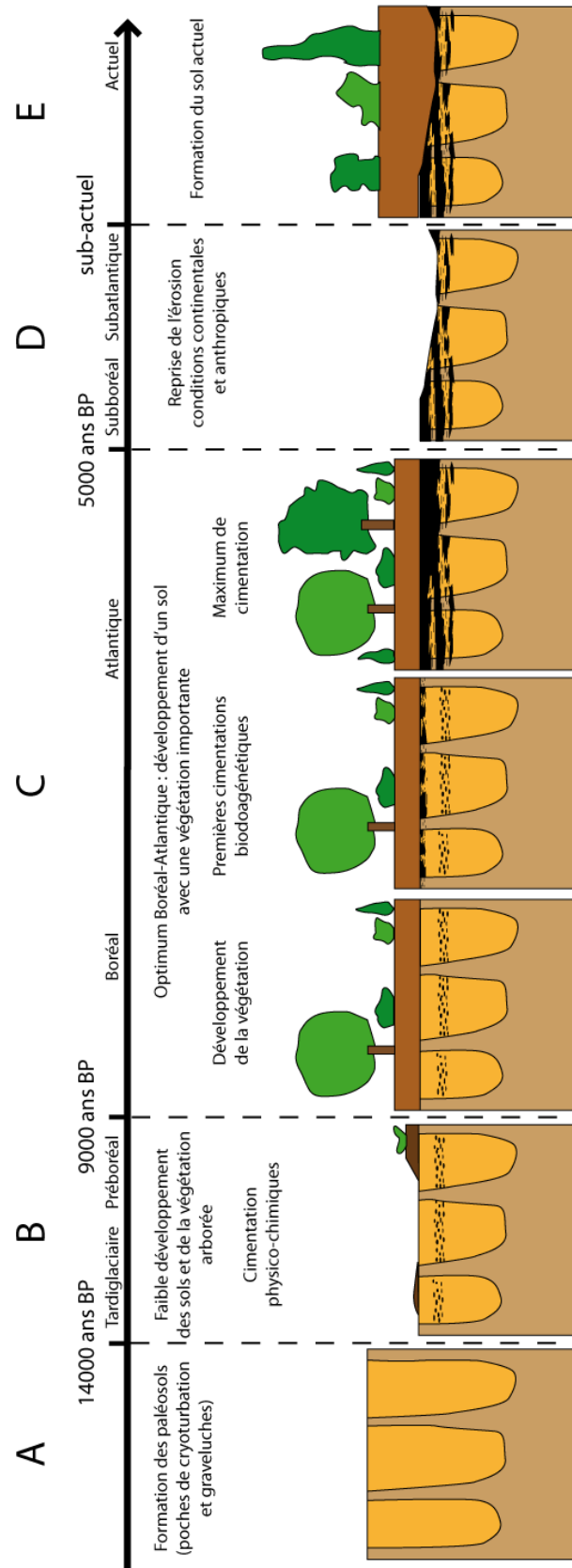


Figure II - 15 : Schéma représentant les hypothèses sur les stades de formation des horizons d'accumulations carbonatées champenois genèse (d'après Loisy [1997]).

VII. CONSÉQUENCES ENVIRONNEMENTALES

Comme pour l'aspect répartition, il n'existe pas d'étude spécifiquement axée sur l'impact environnemental des accumulations carbonatées champenoises. Il est seulement possible d'extraire quelques informations de certaines références bibliographiques.

L'impact des HAC sur l'enracinement des cultures a été signalé dans certains rapports d'études de la Chambre d'Agriculture de la Marne qui décrivent de manière plus ou moins succincte les HAC rencontrés au hasard de prospections à buts divers. Il est parfois indiqué qu'un arrêt de la pénétration des racines (de natures diverses) est parfois observé au sommet du niveau d'accumulation [Jamagne, 1964].

Des informations un peu plus complètes concernent les conséquences de la présence des HAC sur les transferts hydriques.

Selon Spanneut [1997], ces structures encroûtées constituent un obstacle aux remontées capillaires. Durand [1979] indique que la présence de ces structures dans un sol en réduit progressivement sa perméabilité et pourrait rendre prépondérante la circulation de l'eau et des solutés (lixiviation latérale). Les sols situés en pente pourraient voir leurs exportations (carbonates notamment) compensées par des apports de l'amont et l'érosion pourrait également s'accroître... Ballif *et al.* [1995] indiquent quant à eux seulement que ces HAC modifient les mouvements d'eau *per descensum* ou *per ascensum*.

Cependant, aucune expérimentation à ce jour n'a été conduite afin de disposer des données quantitatives sur l'impact des accumulations carbonatées sur la circulation de l'eau dans le sol.

RÉPARTITION RÉGIONALE DES HAC

Une approche bibliographique a été menée afin d'obtenir des informations nouvelles quant à la localisation préférentielle des horizons d'accumulations carbonatées (HAC) dans le paysage champardennais.

I. RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES

La littérature regorge de descriptions de fosses pédologiques réalisées dans des buts variés tels que des études préalables à des constructions privées ou publiques, environnementales ou pour la recherche fondamentale. Il existe donc des descriptions de profils pédologiques qui indiquent potentiellement la présence d'accumulations carbonatées.

Des recherches bibliographiques ont été réalisées afin de compiler le panel le plus grand possible de profils de sol possédant une description précise des différents horizons rencontrés. Tous ces sites ont été répertoriés dans une base de données et positionnés sur une carte de localisation (Figure III - 1).

Une grande partie des descriptions de profils proviennent d'études réalisées par la **Station d'Agronomie de l'INRA de Châlons-sur-Marne** [Durand, 1973 ; Muller et Ledain, 1987 ; Ledain et Müller, 1988 ; Ballif et Müller, 1991 ; Ballif *et al.*, 1992 ; Ledain *et al.*, 1992 ; Ballif, 1994 ; Ballif *et al.*, 1995], par la **Chambre d'Agriculture de la Marne** (anonymes) [C.-A.-M., 1998 ; C.-A.-M., 1999 ; C.-A.-M., 2000] et par le Service de Cartographie des Sols de la **Chambre d'Agriculture de l'Aisne** [Hebert et Jamagne, 1963 ; Hebert *et al.*, 1964 ; Hebert *et al.*, 1965 ; Bouttemy *et al.*, 1966 ; Rivière et Cruciani, 1970].

D'autres descriptions de profils ont également pu être relevées dans la thèse de **Loisy [1997]**, dans des travaux non-encore publiés livrés lors de communications personnelles ainsi que lors d'observations de terrain durant cette étude.

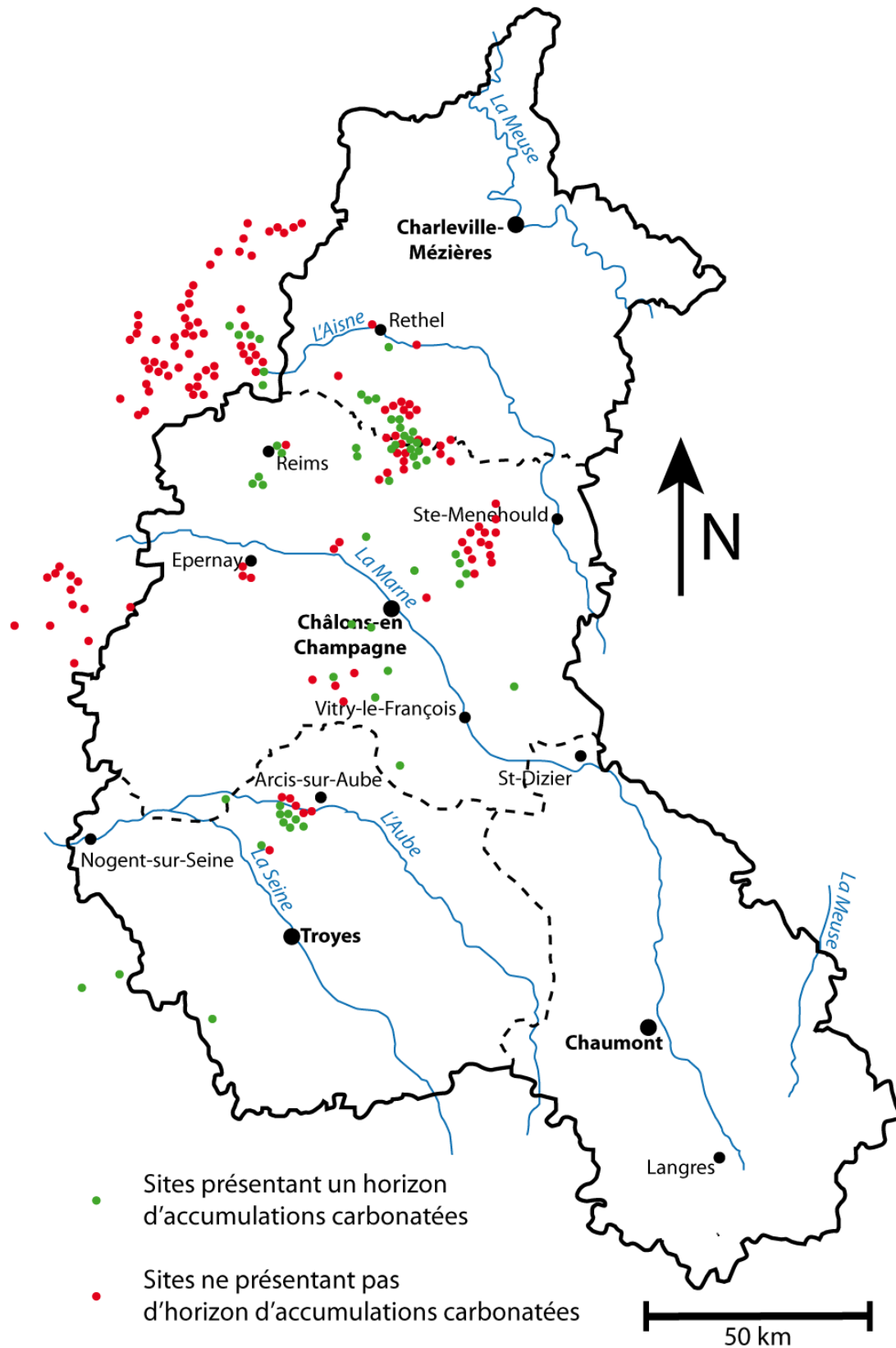


Figure III - 1 : Carte représentant l'ensemble des sites de la bibliographie situés en région Champagne-Ardenne ainsi que dans les terrains limitrophes proches.

II. ÉTABLISSEMENT DE LA BASE DE DONNÉES

La base de données comporte 21 champs classés en 3 grands axes : les informations de base, les informations de caractérisation générale du site et les informations concernant les HAC. Il faut noter que l'ensemble de ces informations n'est pas forcément renseignées pour l'intégralité des sites relevés dans les sources bibliographiques. La base de données contient 206 sites dont 57 présentent un HAC.

Site	MI	Région	Champagne-Ardenne
Topographie	Haut de pente	Département	Ardennes (08)
Exposition	SE	Commune	Aussoy
Type de sol	Rendzine grisâtre		
Formation superficielle	Poches de cryoturbation		
Substrat géologique	Craie	Latitude	49°21'39.13"N
		Longitude	4°18'6.51"E
		Altitude en m	145
Bibliographie	Loisy C. (1997) - Les encroûtements carbonatés quaternaires en substrat crayeux (Est du Bassin de Paris) : rôles de la diagenèse et des actions biologiques. <i>Thèse de l'Université de Reims Champagne-Ardenne</i> , 387p.		
Catégorie topo	Pente	Catégorie expo	SE
Catégorie FS	Cryoturbations	Catégorie couvert	Friche
Catégorie sol	Sol calcimagnésique	Catégorie substrat géologique	Craie

Figure III - 2 : Exemple d'une fiche issue de la base de donnée établie dans cette étude.

Les **informations de base** concernent l'identification et la localisation des sites. Les champs présents sont donc le nom du site tel qu'indiqué dans la bibliographie, la région, le département et la commune sur lesquels il est situé, les coordonnées GPS (WGS-84) ainsi que le référencement bibliographique (Figure III - 2).

Les **informations de caractérisation générale** regroupent les indications topographiques, la nature du substrat géologique, le type de formation superficielle s'il

en existe, le type de sol, la nature du couvert végétal ainsi que l'exposition (Figure III - 2).

Les **informations sur l'horizon d'accumulations carbonatées** est un champ à entrée binaire qui est utilisé pour indiquer la présence ou non d'un HAC au sein du profil étudié (Figure III - 2).

III. CLASSIFICATION DES VARIABLES

Les variables retenues dans le cadre de ce travail concernent le substrat géologique mais aussi l'allure de la topographie, la nature des formations superficielles si elles sont présentes, le type de sol, le type de couvert végétal ainsi que l'orientation topographique.

La grande variété des types de dénomination présente dans le champ de chaque variable a nécessité leur regroupement en classes établies en concordance avec le milieu naturel.

1. SUBSTRAT GÉOLOGIQUE

La première variable concerne la caractérisation du substrat géologique. Elle a été subdivisée en 4 classes différentes :

- la première classe regroupe les différents types d'**argiles** présentes dans la région. Ces argiles peuvent être de nature et d'âges différents (argiles du Sparnacien, du Lutétien supérieur, à meulière, du Sannoisien...) ;
- la seconde classe rassemble les substrats géologiques constitués de **sables**. Ces sables peuvent être de nature et d'âges différents (sables de Cuise, sables du Thanétien...) ;
- la troisième classe regroupe quant à elle l'ensemble des substrats géologiques constitués de terrains portant l'appellation de **calcaires**. Les calcaires du Lutétien, à Ditrupa et plus généralement les calcaires tertiaires et secondaires sont regroupés dans cette classe ;
- bien qu'il s'agisse également d'une roche calcaire, **la craie** fait l'objet d'une classe singulière de part son comportement particulier face à l'altération périglaciaire mais aussi de part l'homogénéité de son réseau poreux ainsi que des transferts hydriques qui en découlent.

Sur le total des 206 sites de la base de données, 29 ne contiennent pas d'indication sur la nature du substrat géologique. La plupart de ces sites n'étant pas géolocalisés (ou d'une manière pas assez précise), l'identification du substrat géologique n'a pas pu être réalisée par la lecture des cartes géologiques.

2. TOPOGRAPHIE

Il existe dans la bibliographie une multitude de termes utilisés afin de caractériser l'allure topographique de la zone étudiée. Ces qualificatifs vont de « *haut à mi-pente assez forte* » à « *sommet de plateau, pente légère, relief normal* » en passant par exemple par « *sommet ondulé* ». Des regroupements en classes ont donc dû être réalisés en concordance avec l'allure générale de la topographie régionale (Figure III.3) :

- la première classe, **sommet**, regroupe les appellations « *sommet* », « *sommet de butte* » et « *plateau* » ;
- la classe **versant** regroupe l'ensemble des termes concernant les « *pentes* » et les « *hauts de pentes* » (sauf « *bas de pente* ») ;
- la classe **bas de pente** correspond à la zone de transition entre la pente et une zone nettement plus plane de replat ou vallée ;
- la classe **replats** regroupe les sites situés dans des zones aplanies au sein même d'une pente ;
- la dernière classe regroupe les **vallées** des cours d'eau. D'un point de vue topographique, ces entités se présentent comme des zones plus ou moins planes localisées dans la partie la plus inférieure du relief où les eaux de ruissellement sont collectées.

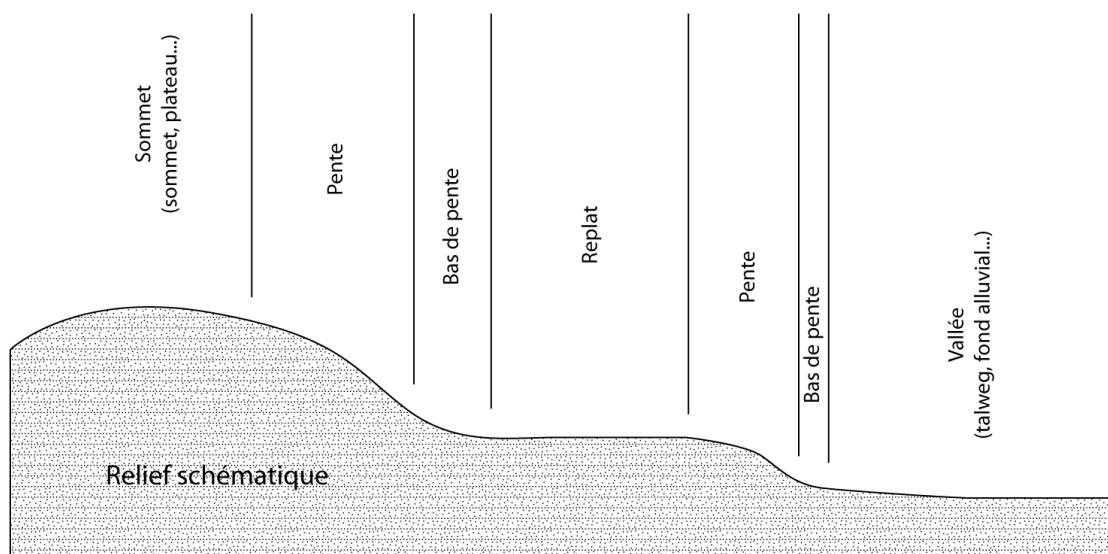


Figure III - 3 : Illustration schématique des classes de topographie retenues pour l'analyse statistique.

Les informations topographiques annexées aux descriptions de profils de sol présentes dans la bibliographie se sont parfois avérées peu précises. Pour les sites étant précisément géolocalisés, les informations concernant l'allure du relief ont pu être déduites de l'observation des cartes topographiques correspondantes.

Il existe dans la base de données 23 sites sur 206 qui ne présentent pas d'informations de topographie. L'absence d'une localisation précise de ces sites a empêché de renseigner les cases laissées vacantes par étude de la carte topographique.

3. FORMATION SUPERFICIELLE

L'observation de l'ensemble des termes utilisés pour décrire les formations superficielles rencontrées a permis de définir 6 classes différentes :

- la première caractérise les profils au niveau desquels **aucune** formation superficielle n'est visible ;
- la classe **cryoturbations** regroupe les poches de cryoturbations, les graveluches (grèzes litées) ainsi que les sols striés même si les graveluches sont en réalité des colluvions de par leur mode de mise en place. C'est leur composition très proche (cryoclastes de craie emballés dans une matrice silto-argileuse calcaire) qui justifie ici ce regroupement ;
- la classe **alluvions** regroupe l'ensemble des formations superficielles liées au réseau hydrologique ;
- la classe **colluvions** regroupe les formations superficielles meubles déposées sur un versant et mise en place par gravité (cette classe exclut les graveluches qui sont affiliées à la classe « cryoturbation ») ;
- les deux dernières classes regroupent les **recouvrements sableux** d'une part et les **limons** (loess) d'autre part.

Dans la base de données, 9 profils pédologiques sur 206 ne présentent pas d'information concernant la présence ou l'absence de formations superficielles.

4. SOL

Les différents termes utilisés pour décrire les sols ont permis l'établissement de 7 classes différentes. La terminologie employée dans les ressources bibliographiques étant tirée de la classification CPCS de 1967 [Baize *et al.*, 2008], c'est cette même terminologie qui a été utilisée afin de nommer les 7 classes retenues :

- les **sols minéraux bruts** ne présentent pratiquement aucune évolution et leur profil est de type C ou R à (A)/C ou (A)/R. Ils peuvent être dits *d'érosion* (souvent en rapport avec une influence anthropique antérieure ou une forte érosion) ou *d'apport* (éolien ou fluvial). Ces types de sols sont assez rares dans la région ;
- les **sols peu évolués** ne sont représentés ici que par des sols peu évolués d'apports colluviaux calcaires. Il s'agit de sols dont le profil se présente sous la forme A/C ou A/R ;
- les **sols calcimagnésiques** sont représentés par les rendzines (brune, brun foncé, grise ou grisâtre). Ces sols ont pour séquence d'horizon de référence

A/C comme les sols peu évolués mais la différence provient du matériau de base qui n'est pas issu ici d'un colluvionnement ;

- les **sols bruns** sont caractérisés par la succession d'un horizon de surface humifère bien différencié et d'un horizon inférieur dont le développement de structure dépend de l'âge du sol. Ils peuvent être eutrophes, modaux, vertiques ou fortement lessivés ;
- la principale caractéristique des **sols lessivés** est un appauvrissement des horizons supérieurs. Ces sols se développent selon le type A/B₂t/C. Ils regroupent les sols bruns lessivés ainsi que les sols lessivés et sols lessivés légèrement dégradés. La différences entre ces deux types de sols tient dans l'indice d'entraînement de l'argile (1,4 à 2 pour le premier et > 2 pour le second) ;
- les **sols podzolisés** sont majoritairement présents dans les matériaux filtrants et très siliceux. Leur stade d'évolution est très avancé. Ils se distinguent généralement en sols podzoliques, dont les horizons de surface montrent une mauvaise décomposition de la matière organique et en podzols qui sont très fortement évolués ;
- les **sols hydromorphes** se forment généralement dans des zones où la nappe phréatique, très persistante voire permanente, influence l'ensemble du profil. Ces sols peuvent être organiques (tourbes), moyennement organiques ou peu humifères (présence d'un horizon de gley).

Dans l'ensemble des ressources bibliographiques, les pédologues définissent le type de sol présent pour 201 des 206 sites étudiés.

5. COUVERT VÉGÉTAL

Les données sur le couvert végétal apparaissant dans les données bibliographiques ont permis de définir 4 grandes classes :

- la classe **cultures** regroupent l'ensemble des profils de sol dont la couverture végétale est constituée de champs cultivés quel que soit le type de culture. Cette classe regroupe par exemple les cultures de betterave, de pois, de blé, de colza... mais également les chaumes (éteules) ainsi que les champs en cours de déchaumage ;
- la classe **arbre** regroupe les profils sous tout type de végétation arborée (parfois combinée à quelques arbustes). Elle englobe les appellations arbres, forêt, futaie, taillis sous futaie, peupleraie, frênaie, chânaie, charmaie, *etc.* ;
- la troisième classe rassemble toutes les appellations **friches**. Il s'agit de zones présentant une végétation plutôt arbustive et souvent herbacée ;
- les ensembles présentant des étendues uniquement herbacées sont regroupées avec les dénomination **prairies** dans une classe éponyme.

Sur les 206 profils relevés dans la bibliographie, 31 ne présentent pas d'information concernant la nature du couvert végétal en place. Il n'est pas rare que la couverture végétale varie au cours du temps (passage de « culture » à « prairie », de « arbres » à « friche » ou « culture »...). Il n'a donc pas été possible de renseigner cette donnée pour les sites ne la présentant pas en observant la couverture végétale actuelle.

6. ORIENTATION TOPOGRAPHIQUE

Pour cette variable, 16 classes ont été établies en suivant simplement les orientations primaires (N, S, E, W, NE, SE, SW et NW) et secondaires (NNE, ENE, ESE, SSE, SSW, WSW, WNW et NNW) de la rose des vents. Les intervalles d'azimuts (22,5°) sont répertoriés pour information dans le tableau (III - 1).

Sur l'ensemble des 206 sites référencés, 76 ne portent pas de précision sur l'orientation topographique (Tableau III - 2). Ces 76 sites incluent les sites sur "sommet" qui ne possèdent bien sûr pas d'orientation topographique puisqu'ils sont situés sur un terrain plat.

Orientation	Intervalle d'azimutal nord (en °)
N	348,75 à 11,25
NNE	11,25 à 33,75
NE	33,75 à 56,25
ENE	56,25 à 78,75
E	78,75 à 101,25
ESE	101,25 à 123,75
SE	123,75 à 146,25
SSE	146,25 à 168,75
S	168,75 à 191,25
SSW	191,25 à 213,75
SW	213,75 à 236,25
WSW	236,25 à 258,75
W	258,75 à 281,25
WNW	281,25 à 303,75
NW	303,75 à 326,25
NNW	326,25 à 348,75

Tableau III - 1 : Intervalle azimutal pour chacune des 16 classes d'orientation définies par la rose des vents.

Classe	Sous-classes	Nombre de sites avec horizon d'accumulation	Nombre de sites sans horizon d'accumulation
Substrat géologique	Argiles	0	7
	Calcaires	0	19
	Craie	57	82
	Sables	0	12
	Donnée manquante	0	29
Total		57	149
Formation superficielle	Alluvions	5	16
	Aucune	1	37
	Colluvions	3	17
	Cryoturbations	38	41
	Limons	4	28
	Recouvrements sableux	3	4
	Donnée manquante	3	6
Total		57	149
Sol	Sols minéraux bruts	0	2
	Sols peu évolués	5	13
	Sols calcimagnésiques	47	83
	Sols bruns	0	14
	Sols lessivés	2	19
	Sols podzolisés	0	5
	Sols hydromorphes	0	11
	Donnée manquante	3	2
Total		57	149
Topographie	Bas de pente	6	14
	Replat	4	14
	Sommet	5	33
	Vallée	7	21
	Versant	26	53
	Donnée manquante	9	14
Total		57	149
Couvert végétal	Arbres	10	27
	Cultures	30	86
	Friches	2	5
	Marais	0	4
	Prairies	1	10
	Donnée manquante	14	17
Total		57	149

Tableau III - 2 : Ensemble des effectifs des sites présentant ou non un HAC en fonction des différentes variables et classes établies.

IV. EXPLORATION DES DONNÉES

Les tableaux (III - 1 et III - 2) présentent les effectifs des sites présentant ou non un HAC en fonction des différentes variables et classes établies.

La première information importante à tirer de cet état des lieux concerne le substrat géologique. En effet, les sites présentant un HAC sont en intégralité localisés sur des zones où le substrat est constitué de craie.

La figure (III - 4) focalise ensuite sur les sites présentant des HAC. Les quatre graphiques qu'elle contient représentent les effectifs de ces sites particuliers en fonction des classes de formation superficielle, de sol, de topographie et de couvert végétal.

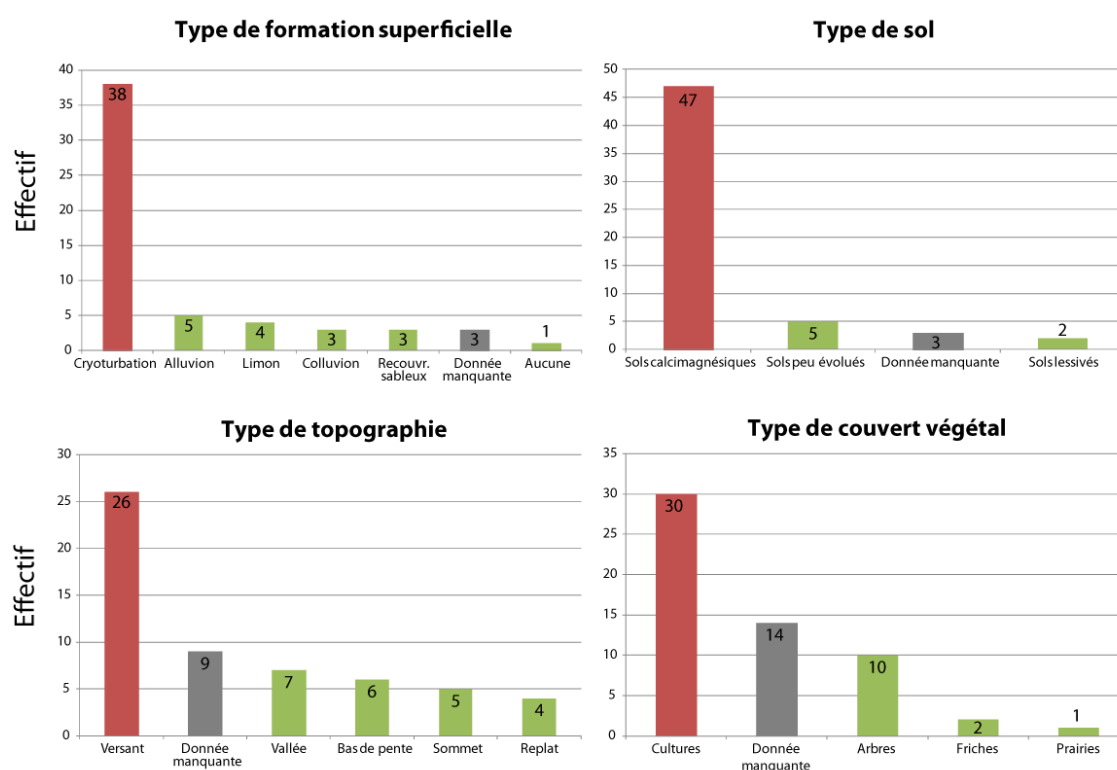


Figure III - 4 : Effectifs des sites présentant un horizon d'accumulations carbonatées en fonction des différentes classes des variables établies.

Sur les 57 profils présentant un HAC ainsi que l'information concernant les formations superficielles, 38 (66,7 %) sont localisés sur un substrat crayeux surmonté de terrains issus de la cryoturbation (poches de cryoturbation, graveluches et sols striés). Les autres types de formations superficielles semblent quant à elles nettement moins courantes lorsque la présence d'un HAC est avérée. L'information est manquante pour seulement 3 des 57 sites présentant un HAC (5,3 %).

Les HAC champardennais sont également majoritairement présents lorsqu'un sol calcimagnésique est observé. En effet, cette configuration correspond à 47 sites sur

54 qui présentent l'information de la classe « sol » (87,0 %). Il faut noter ici qu'il existe évidemment une relation entre le fait d'avoir un site présentant des formations superficielles de type cryoturbation issues de la craie et la présence d'un sol de type calcimagnésique. L'information est également manquante ici pour seulement 3 des 57 sites présentant un HAC (5,3 %).

Le critère topographique semble également avoir son importance quant à la présence d'un HAC. En effet, 26 des 48 sites présentant ce type de structure ainsi que l'information de la classe "topographie" sont localisés sur des versants (haut ou milieu de pente). Cette proportion correspond à un pourcentage de 54,2 %. Celui-ci est clairement plus faible que pour les deux variables précédentes et l'information de topographie est manquante pour 15,8 % des sites présentant un HAC.

Exposition	Nombre de sites avec horizon d'accumulation	Nombre de sites sans horizon d'accumulation
N	7	9
NNE	4	4
NE	5	5
ENE	1	0
E	2	4
ESE	7	2
SE	5	2
SSE	0	6
S	4	9
SSW	1	2
SW	1	10
WSW	1	7
W	5	2
WNW	1	8
NW	4	6
NNW	2	4
Donnée manquante	7	69
Total	57	149

Tableau III - 3 : Effectifs des sites présentant ou non un horizon d'accumulations carbonatées en fonction des différentes classes d'orientation topographiques.

L'information concernant la couverture végétale au droit du site montre qu'ici aussi, une tendance semble émerger puisque sur les 43 sites présentant un HAC et l'information de la classe « couverture végétale », 30 sont localisés dans des zones de culture (69,8 %). Cependant, il faut noter le grand nombre de sites ne comportant pas l'information sur le couvert végétal au moment de l'observation du profil pédologique (14 sur 57 : 24,6 %).

La dernière information concernant l'orientation topographique des sites présentant un HAC montre que ces derniers sont plus présents sur des versants orientés entre le nord et le nord-est (32,0 %) et entre l'est et le sud-est (28,0 %) (Figure III - 5). D'autres orientations semblent également se dégager (NW, W et S) mais de manière nettement moins marquée (respectivement 8,0, 10,0 et 8,0 %). L'information est manquante pour 12,3 % des sites présentant un HAC.

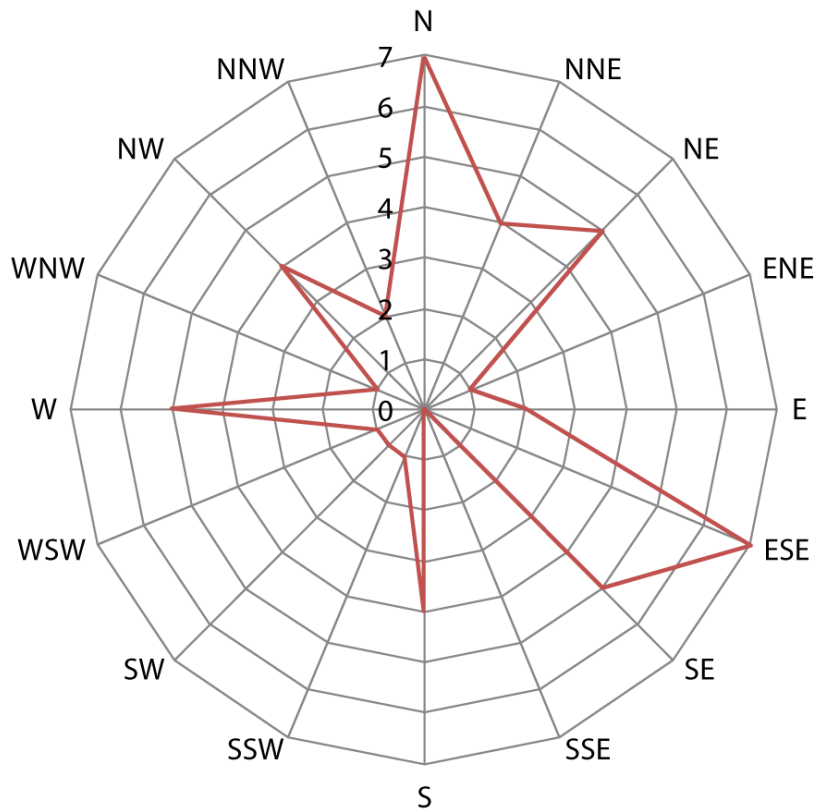


Figure III - 5 : Répartition des sites présentant un horizon d'accumulations carbonatées en fonction de l'orientation topographique.

V. CONCLUSION

L'exploration des données issues de la bibliographie montre que les horizons d'accumulations carbonatées champenois sont présents uniquement lorsque le substrat géologique est constitué de craie. Il apparaît également clairement que leur localisation est intimement liée à la présence de formations superficielles de type cryoturbation (poche de cryoturbation comme grèzes) (70,4 %) ainsi qu'à celle de sols calcimagnésique (87,0 %).

L'information sur la topographie des sites est manquante pour un nombre assez conséquent de sites présentant un horizon d'accumulations carbonatées (15,8 %) mais la tendance « versant » semble tout de même se dégager (54,2 %). Les horizons

d'accumulations carbonatées semblent également principalement localisés sur des terrains à orientation globalement NNE ou ESE (60,0 %).

Concernant la couverture végétale, les horizons d'accumulations carbonatées champenois semblent majoritairement localisés sous des cultures (69,8 %).

Ce chapitre présente d’abord le site principal étudié dans ce travail : le Mont du Ménil. D’autres sites également pris en compte dans cette étude seront ensuite présentés ainsi que les différentes stratégies d’échantillonnage.

I. LE SITE DU MONT DU MÉNIL

1. LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE

Le site du Mont du Ménil est situé à une vingtaine de kilomètres au nord-est de la ville de Reims (51) ainsi qu'à une quinzaine de kilomètres au sud-sud-ouest de la ville de Rethel (08) (Figure IV - 1). La zone d'étude prend place sur la commune d'Aussoince (08), du côté sud-ouest de la route départementale 15 reliant ce village à la commune de Ménil-Lépinois (08) (Figure IV - 1).

Après des siècles de cultures diverses, cette zone est devenue brièvement un dépôt d'ordures ménagères avant l'ouverture d'une carrière de craie sous forme massive ou de granulats dans les années 1950. Après la fermeture de la carrière, le carreau a servi de lieu de stockage de matériaux divers utilisés par les Ponts-et-Chaussées. Aujourd'hui il s'agit d'un terrain adapté de manière artisanale pour des entraînements d'airsoft.

2. LOCALISATION GÉOMORPHOLOGIQUE

Le site du Mont du Ménil est localisé dans le bassin versant de la Suippe, sur l'interfluve entre cette dernière et la Retourne. Ces deux rivières sont des affluents de l'Aisne et des sous-affluents de la Seine par l'entremise de l'Oise.

Le Mont du Ménil forme la partie nord-est de Mont de Warmeriville qui s'étend sur environ trois kilomètres de long dans une orientation NE-SW et dont le dénivelé maximum atteint la cinquantaine de mètres entre son sommet et le ruisseau d'Aussoince situé à un kilomètre de là au sud-est (Figure IV - 2). La pente maximum de ce mont typique de la région atteint les 11 % sur son flanc sud-est.

L'ancienne carrière du Mont du Ménil a été établie sur le flanc sud-est du mont dont l'altitude maximum atteint 151 mètres. Le site étudié est localisé dans un contexte

Première partie : Contexte général de l'étude

topographique de haut de pente et les altitudes moyennes de haut de gradin et de carreau sont respectivement de 145 et 139 mètres (Figure IV - 2).



Figure IV - 1 : Localisation générale de l'ensemble des sites étudiés : Mont du Ménil, Aussonce-Est, Aussonce-Nord-Ouest et Vieux-Mont (source : IGN-Géoportail).

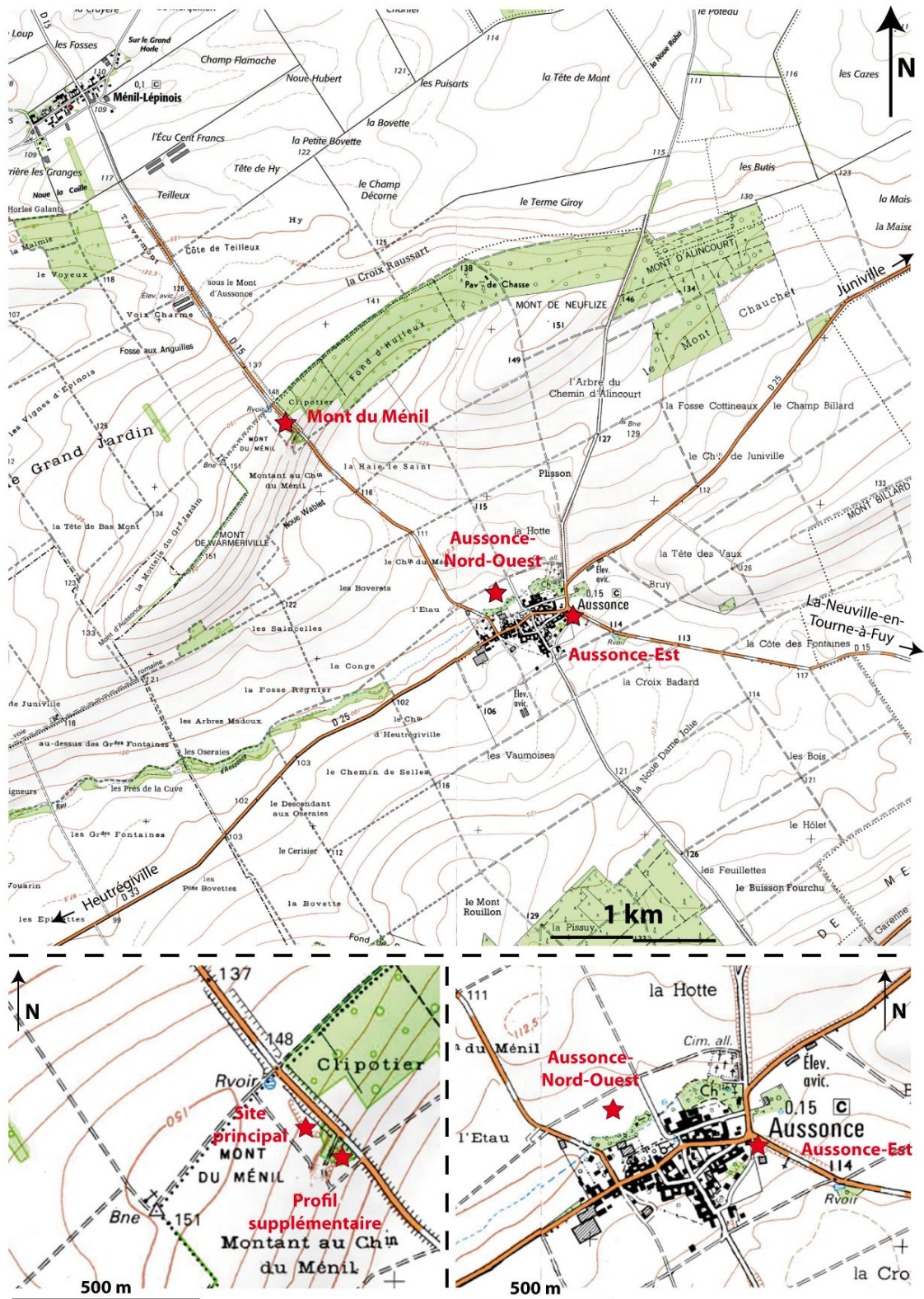


Figure IV - 2 : Localisation des sites Mont du Ménil, Aussyon-Est et Aussyon-Nord-Ouest sur un extrait de la carte topographique (source : IGN-Géoportail).

3. CONTEXTE GÉOLOGIQUE

D'un point de vue géologique, le site du Mont du Ménil est situé dans la moitié nord de la Champagne crayeuse sur de la craie blanche très pure à *Micraster* et à Bélemnites datée du Sénonien (Figure IV - 3 : c_{4-6g}), caractérisée dans cette zone par l'apparition de certains foraminifères (*Gavelinella hofkeri* Goel, *G. clementiana typica* (Marie), *S. exsculpta aspera* Hofker et *Bolivinoidea decoratus* Jones) [Pomerol *et al.*, 1975]. La région est couverte par la partie est de la carte géologique à 1/50000 d'Asfeld-la-Ville établie par Pomerol *et al.* [1975].

La carte géologique indique également la présence de « Grèzes crayeuses » (Figure IV - 3 : GP) qui sont couramment appelées « grève litée », « gravier crayeux » ou « graveluches ».

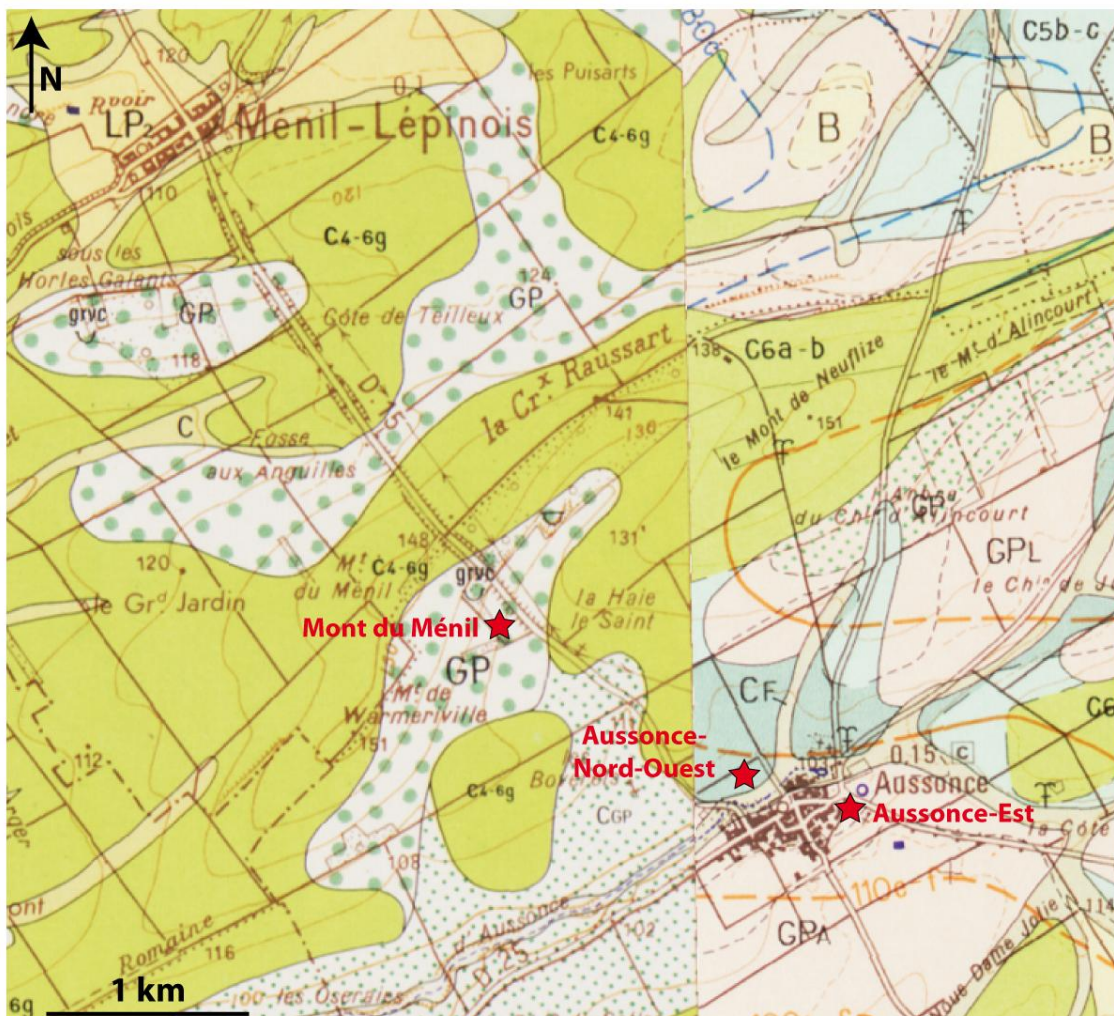


Figure IV - 3 : Localisation des sites du Mont du Ménil, d'Aussonce-Est et Aussonce-Nord-Ouest sur un extrait des cartes géologiques d'Asfeld-la-Ville [Pomerol *et al.*, 1975] et d'Attigny [Laurain *et al.*, 1990]. Légende : c_{4-6g} et c_{5b-c} : craie du Sénonien ; GP, GPA et GPL : graveluches (plus ou moins argileuses) ; C_{GP} : coulées limono-crayeuses ; LP et B : limons des plateaux (source : BRGM-Infoterre).



Figure IV - 4 : Panorama de la zone du front de taille étudiée de l'ancienne carrière du Mont du Ménil. RS : RENDOSOL ; HAC : horizon d'accumulations carbonatées ; GSP : grèzes et C : craie.

4. DESCRIPTION GÉNÉRALE DU FRONT DE TAILLE

Ce paragraphe présente de manière générale les différents horizons observés au niveau du front de taille de l'ancienne carrière du Mont du Ménil.

Le paragraphe suivant décrira de manière plus précise ces niveaux pédologiques au niveau des deux profils étudiés dans ce travail.

a. LA CRAIE SÉNONIENNE

L'ancien front de taille permet l'observation d'une succession typique d'horizons issus d'une altération de la craie en contexte périglaciaire (Figures IV - 4 et IV - 5).

La craie massive (C) est observée à la base du profil. Cette craie présente une fracturation principalement tectonique liée aux événements géologiques ayant affecté le bassin de Paris lors des orogènes alpines et pyrénéennes.

Dans sa partie supérieure, cette craie sénonienne présente un nouveau type de fracturation qui définit des blocs prismatiques décimétriques assez anguleux. Ce niveau épais d'une trentaine de centimètres trouve son origine dans les alternances gel/dégel qui ont affecté la région durant le Quaternaire.

b. LES FORMATIONS SUPERFICIELLES

Dans sa partie supérieure, le niveau à blocs prismatiques décimétriques est modifié pour former des invaginations plus ou moins importantes (Figures IV - 4 et IV - 5). Il s'agit d'un bel exemple de poches de cryoturbation dont l'intérieur est comblé par un matériau constitué de cryoclastes de craie centimétriques emballés dans un limon calcaire. Il s'agit du remplissage typique de grèzes des poches de cryoturbation.

Au niveau du front de taille étudiée, l'épaisseur de la couche de formation superficielle varie entre soixante-dix et cent-trente centimètres.

c. L'HORIZON D'ACCUMULATIONS CARBONATÉES

L'horizon d'accumulations carbonatées (HAC) affecte la partie supérieure des grèzes précédemment décrites (Figures IV - 4 et IV - 5). D'une manière générale, il présente des caractéristiques similaires à celles de ses matériaux parentaux (c'est à dire les grèzes composées de cryoclastes de craie, limon calcaire) mais sa couleur est sensiblement plus claire.

La morphologie générale de l'HAC varie cependant le long des huit mètres linéaires du profil étudié :

- dans la partie nord-ouest, l'HAC affecte les grèzes sur une épaisseur de vingt centimètres et présente un aspect assez massif ;

- dans la partie sud-est, l'HAC affecte les grèzes sur une épaisseur de cinq centimètres et présente cette fois-ci un aspect plutôt laminé et semble beaucoup moins cohérent que dans la partie nord-ouest.

Dans tous les cas, la limite de cet HAC avec le sol meuble sus-jacent d'une part et les grèzes sous-jacentes d'autre part est assez nettement définie.

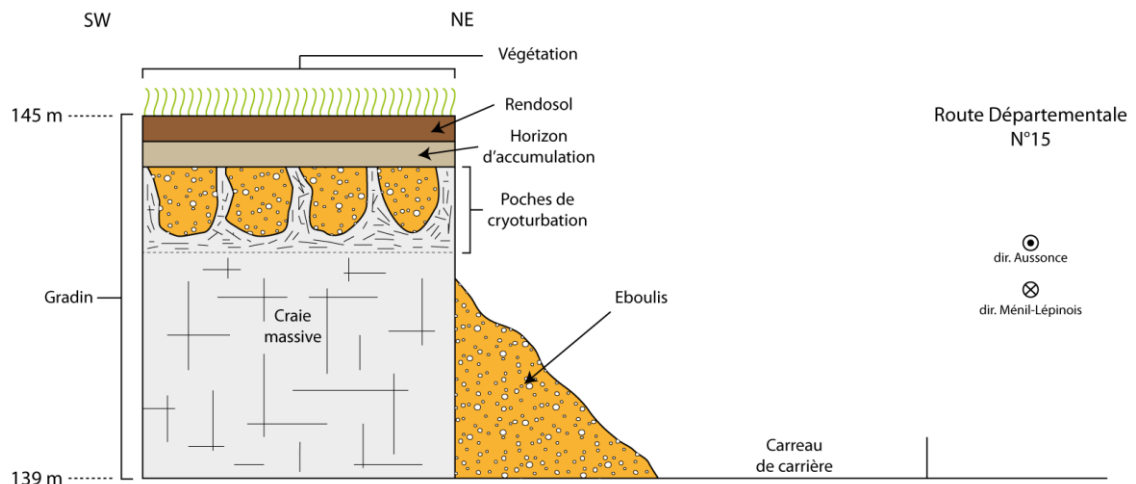


Figure IV - 5 : Schéma représentant une coupe de l'ancien front de taille de la carrière du Mont du Ménéil.

d. LE SOL

Le sol présent est de type RENDOSOL de couleur brun foncé dont l'épaisseur varie entre 20 et 30 centimètres d'épaisseur (Figures IV - 4 et IV - 5). Sa texture est limoneuse et ne présente qu'une assez faible quantité d'éléments grossiers constitués de cryoclastes de craie centimétriques.

5. DESCRIPTION DES PROFILS 1 ET 2 SUR L'ANCIEN FRONT DE TAILLE

Dans le profil 1, sous un RENDOSOL d'épaisseur 20 centimètres, l'HAC est épais de 20 centimètres également et présente un aspect plutôt homogène et massif (Figures IV - 6 et IV - 8). Cet horizon affecte le sommet des grèzes qui sont plus précisément représentées par des poches de cryoturbation dont les invaginations atteignent 72 centimètres. La limite inférieure de ces poches est constituée par la craie de fond de poche. La limite entre le RENDOSOL et l'HAC est franche.

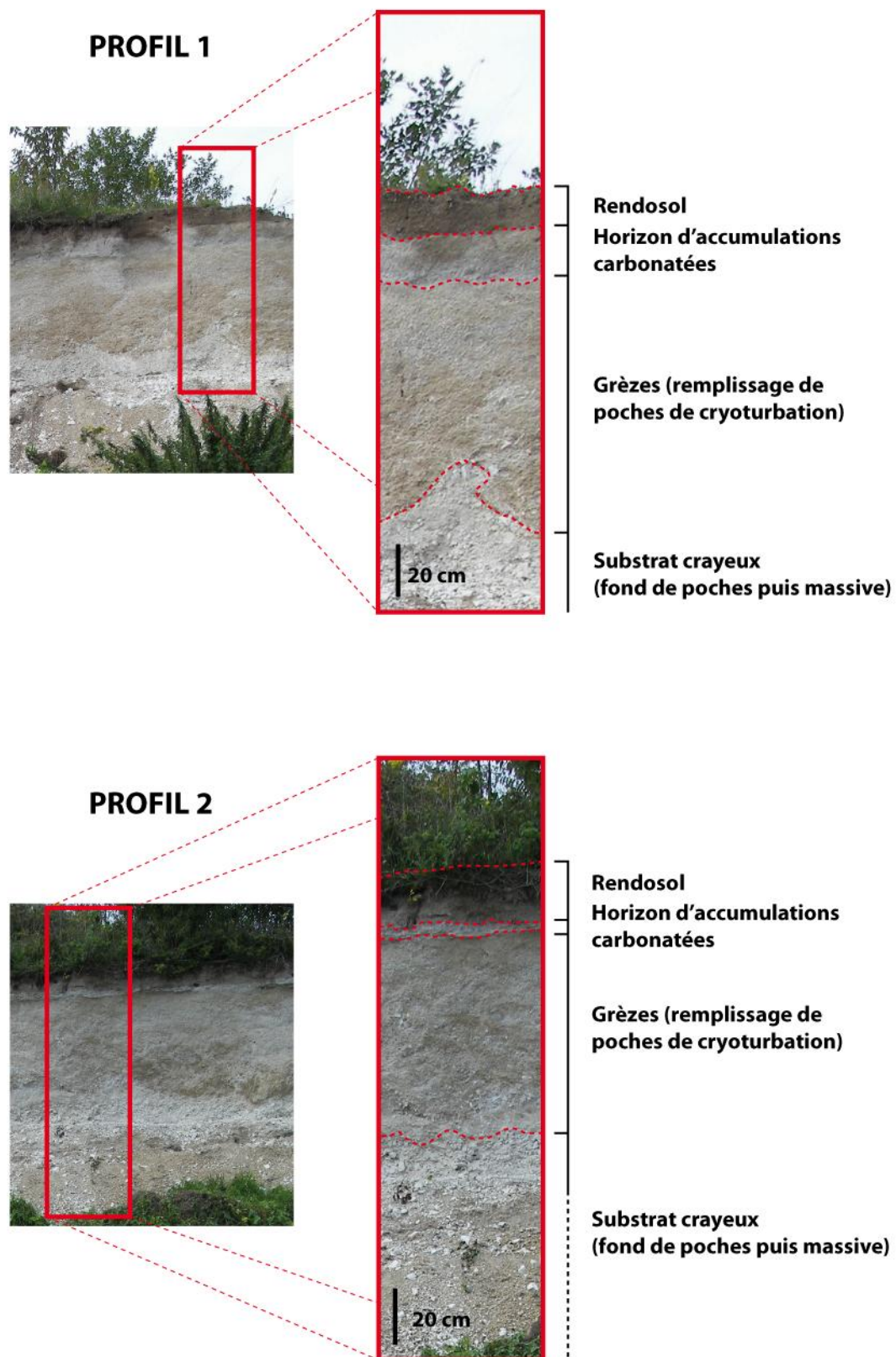


Figure IV - 6 : Présentation des deux profils étudiés au niveau de l'ancien front de taille de la carrière du Mont du Ménil.

Dans le profil 2, le RENDOSOL épais de 31 centimètres présente également une limite franche avec l'HAC sous-jacent (Figures IV - 6 et IV - 8). Ce dernier affecte la partie sommitale des grèzes (poches de cryoturbations également) sur 5 centimètres et présente un faciès assez laminé et plus friable. L'épaisseur des grèzes est ici de 124 centimètres.

6. DESCRIPTION DU PROFIL 3 SOUS BOIS

La partie sud-est de l'ancienne carrière présente une zone sous couvert boisé au sein de laquelle un petit talus permet l'observation d'un profil supplémentaire. Ce profil supplémentaire a également fait l'objet des différentes études réalisées dans le cadre de ce travail.

Comme l'ancien front de taille de la carrière, ce talus est localisé sur le flanc sud-est du Mont du Ménil mais à une altitude plus basse : 135 mètres, ce qui le place dans la sous-classe topographique des pentes tout comme le site principal. Son orientation est sud-ouest-nord-est (Figure IV - 2).

PROFIL 3

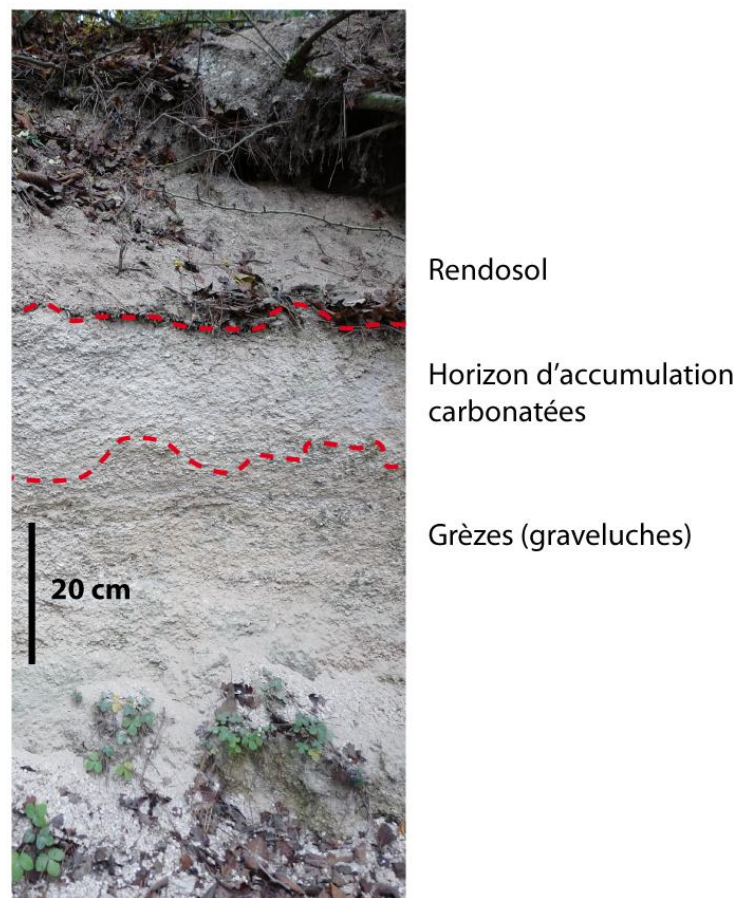


Figure IV - 7 : Présentation du profil supplémentaire (profil 3) étudié sous bois sur le site du Mont du Ménil.

Le talus haut d'environ 1,60 mètres ne permet pas l'observation du substrat crayeux mais uniquement des formations superficielles et du RENDOSOL qui les recouvre.

Le profil 3 sous bois présente un RENDOSOL (rendzine brune) épais de 30 centimètres (Figures IV - 7 et IV - 8). Il existe ici aussi une limite franche avec l'HAC sous-jacent. Cet HAC affecte les grèzes sous-jacentes (ici des grèzes litées) sur une épaisseur de 22 centimètres et paraît assez massif et homogène comme celui qui a pu être observé au sein du profil 1. Il est visuellement nettement moins différencié des grèzes qu'au sein des profils 1 et 2. En effet, il présente une couleur qui est assez proche de celle des grèzes et sa limite inférieure est parfois difficile à discerner.

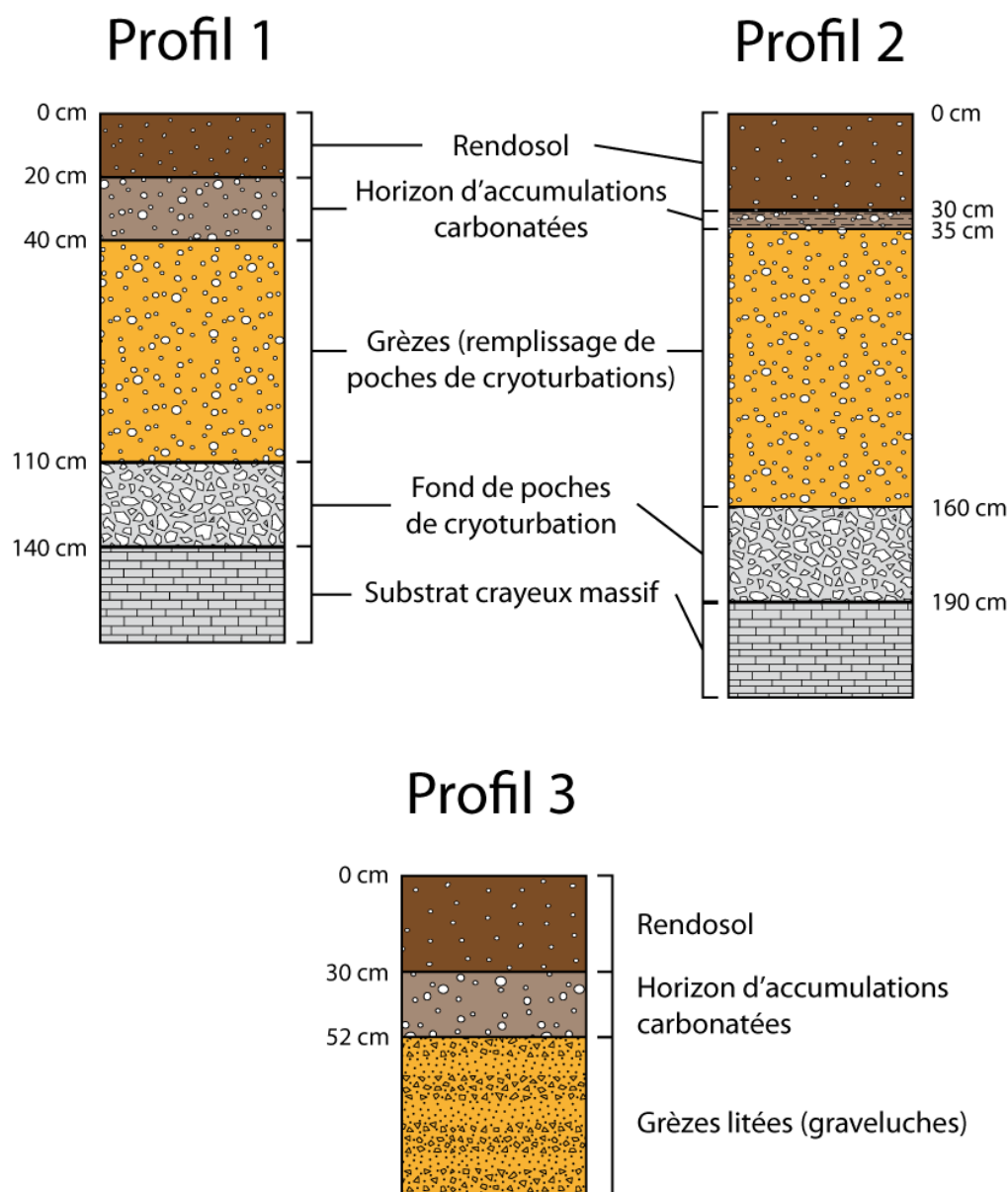


Figure IV - 8 : Représentation schématique des trois profils étudiés sur le site du Mont du Ménil (ancien front de taille et profil supplémentaire sous bois).

La localisation du talus plus ancrée dans la pente est responsable de la présence de formations superficielles de type grèzes litées (graveluches) qui sont observables sur une épaisseur de 110 centimètres (mais sont très certainement plus épaisses).

II. AUTRES SITES ÉTUDIÉS

Trois autres sites ont également été étudiés dans cette étude. L'ensemble des observations a pourtant été moins développé du fait de l'évolution rapide des lieux. En effet, les sites d'Aussonce-Ville et de la Croix Badard correspondent à des chantiers de construction de faible envergure au niveau desquels des HAC ont pu être vus et parfois prélevés.

Le troisième site, le Vieux Mont, est situé dans une carrière encore en activité dont la morphologie varie énormément sur des courtes échelles de temps.

Ces évolutions rapides au cours du temps n'ont pas permis des analyses aussi poussées qu'au Mont du Ménil.

1. SITE D'AUSSONCE-NORD-OUEST

Le site d'Aussonce-Nord-Ouest est localisé à la sortie nord-ouest de la commune d'Aussonce entre les lieux-dits l'Étau et la Hotte et à une centaine de mètres au nord-est de la Route Départementale 15 reliant les commune d'Aussonce et de Ménil-Lépinçois (Figure IV - 2). Les observations ont pu être réalisées brièvement lors de l'établissement de fondations d'un hangar agricole sur un ancien champ de betteraves.

Comme le Mont du Ménil, le site d'Aussonce-Nord-Ouest est situé dans le bassin versant de la Suippe sur l'interfluve séparant cette dernière de la Retourne. Il prend place sur le bas du versant sud-est du Mont du Ménil à une altitude de 102,5 mètres.

Localisé à 1,6 kilomètre au sud-est de la carrière du Mont du Ménil, le site d'Aussonce-Nord-Ouest présente un substrat géologique similaire constitué de craie sénonienne sur laquelle, bien que la carte géologique indique la présence de « colluvions de fond de vallée », se trouve des grèzes litées (graveluches) provenant du vidage des poches de cryoturbation présentes plus haut sur le versant par fluage (Figure IV - 3). L'ensemble est recouvert par un RENDOSOL assez remanié par les anciennes cultures dont l'épaisseur peut atteindre trente-cinq centimètres (Figure IV - 9).

2. SITE D'AUSSONCE-EST

Le site d'Aussonce-Est est situé sur le bord sud de la Route Départementale 15 (rejoignant La-Neuville-en-Tourne-à-Fuy à 3,6 kilomètres à l'est) au niveau de son intersection avec la Route Départementale 25 qui mène à Juniville (situé à huit kilomètres au nord-est) par le biais de la Route Départementale 985 et le Chemin des

Remparts (Figure IV - 2). Les observations ont pu ici aussi être réalisées brièvement lors de l'établissement de fondations mais cette fois-ci d'un petit pavillon privé.

Aussonce-Nord-Ouest



Aussonce-Est

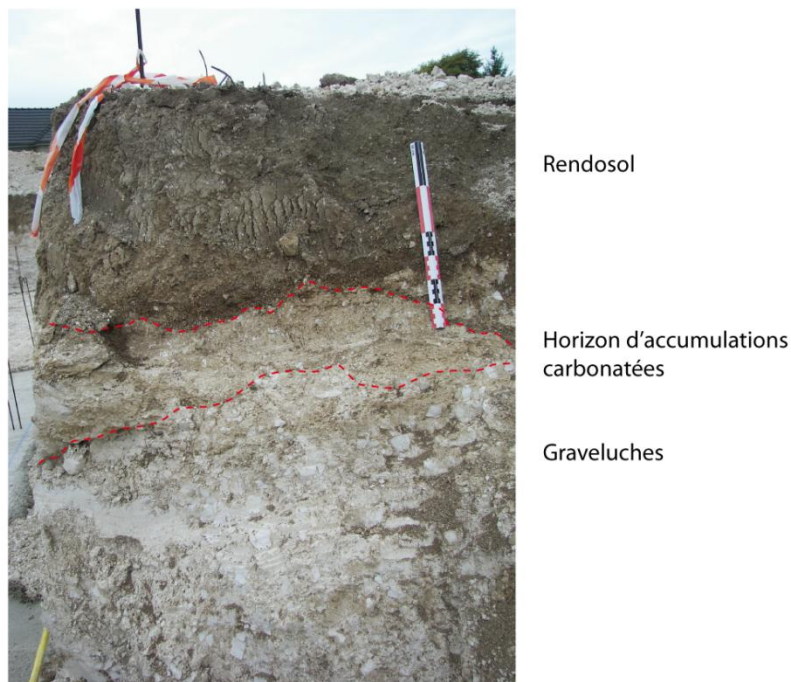


Figure IV - 9 : Photographies des profils supplémentaires d'Aussonce-Nord-Ouest et Aussonce-Est.

Aussonce-Est est également localisé dans le bassin versant de la Suippe dans la partie basse du versant nord-nord-est du Mont Rouillon (altitude maximum ≈ 130 mètres) et du versant sud-ouest du Mont Billard (Mont d'Alincourt) (altitude maximum : 146 mètres). L'altitude du site est de 105 mètres.

Le site est localisé non loin du site d'Aussonce-Nord-Ouest (520 mètres à l'est-sud-est) et possède également un substratum crayeux daté du Sénonien sur lequel repose une couche de graveluches pouvant atteindre deux mètres d'épaisseur sur site (Figure IV - 3). Le sol présent est un RENDOSOL dont l'épaisseur atteint au maximum vingt-cinq centimètres et la végétation avant travaux était représentée par des herbacées basses (Figure IV - 9).

3. SITE DU VIEUX MONT

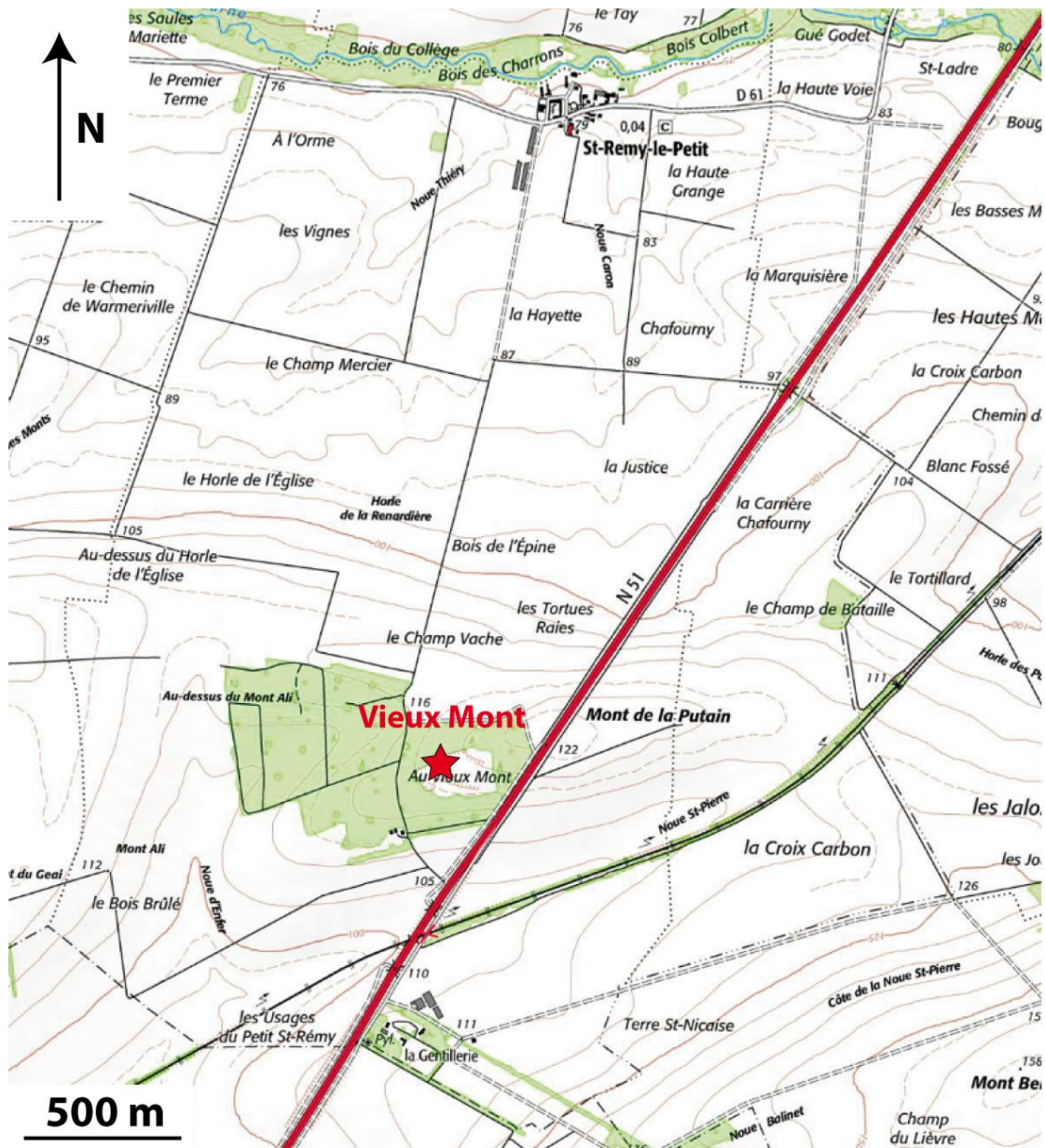


Figure IV - 10 : Localisation du site de la carrière du Vieux Mont sur la carte topographique (source : IGN-Géoportail).

Le site du Vieux Mont est une carrière de craie aujourd'hui encore en activité située sur la commune de Saint-Remy-le-Petit. L'exploitation est localisée sur le côté

nord-ouest de la Route Nationale 51 qui relie Reims (51) à Rethel (08). Elle est distante de la première de vingt kilomètres et de la deuxième de seize kilomètres (Figure IV - 1).

Le Vieux Mont est localisé sur le versant sud-ouest du Mont de la Putain dont l'altitude maximum est de 122 mètres (Figure IV - 10). Comme pour les autres sites, ce mont prend place sur l'interfluve entre la Retourne et la Suippe, dans le bassin versant de cette dernière.

Le substrat géologique est également représenté ici par de la craie Sénonienne mais contrairement à ce qui peut être visible sur la carte géologique à 1/50000, la présence de formations superficielles de type « poches de cryoturbations » peut être observée sur une épaisseur d'environ quatre-vingts centimètres (Figure IV - 11).

L'originalité de ce site est qu'aucun HAC n'est observé ; ainsi, le RENDOSOL dont l'épaisseur est d'environ trente centimètres repose directement sur des grèzes saines.

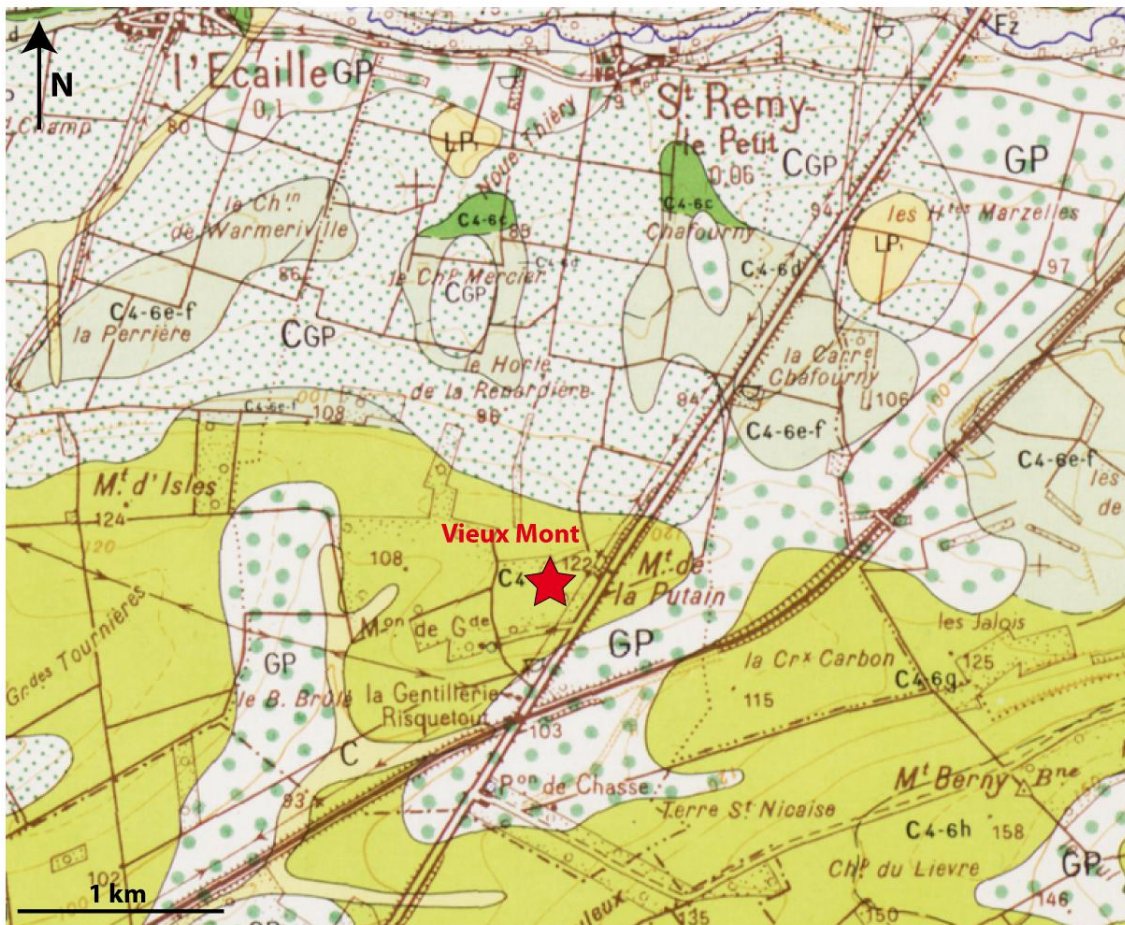


Figure IV - 11 : Localisation du site de la carrière du Vieux Mont sur la carte géologique d'Asfeld-la-Ville (source : BRGM-Infoterre).

III. ÉCHANTILLONNAGE

1. PRÉLÈVEMENTS *IN SITU*

Le RENDOSOL (peu cohérent) a été prélevé en deux parties représentant chacune la moitié de l'horizon : la partie supérieure et la partie inférieure. Les échantillons ont été conditionnés dans des sacs en polyéthylène jusqu'au retour au laboratoire.

L'échantillonnage des horizons plus cohérents que le sol meuble a été effectué par gros blocs détachés directement du front de taille à la scie (Figure IV - 12) :

- dans la zone nord-ouest où l'HAC est le plus épais, ce dernier ainsi que les grèzes ont été prélevés séparément en deux blocs d'environ 30 dm³ (50×30×20 cm) ;
- dans la zone sud-est où l'HAC est le plus fin, un seul bloc d'environ 45 dm³ (50×30×30 cm) contenant l'HAC ainsi que les grèzes a été prélevé.



Figure IV - 12 : Prélèvement à la scie des blocs massifs *in situ*.

2. SOUS-ÉCHANTILLONNAGE EN LABORATOIRE

Concernant le RENDOSOL, les différents échantillons ont été séchés à l'air libre puis divisés en deux. Une partie laissée telle quelle représente le sol total tandis que l'autre a été débarrassée de ses éléments supérieurs à 2 millimètres par tamisage. Cette dernière fraction a ensuite été broyée afin de pouvoir subir les différentes analyses présentées dans cette étude.

Un sous-échantillonnage a été réalisé en laboratoire afin d'obtenir les différents échantillons nécessaires aux analyses effectuées dans cette étude :

- pour les **études de transferts hydriques en laboratoire** (absorptions capillaires, évaporations, porosimétrie totale à l'eau), des pavés d'environ 7×7×12 centimètres ont été découpés à la scie en veillant à bien conserver l'orientation haut/bas des échantillons (Figure IV - 13) ;
- pour la **porosimétrie par injection de mercure**, des échantillons d'environ 1,5 cm³ ont été prélevés le long des gros blocs échantillonnés sur le terrain à un pas d'environ 1,5 centimètres (Figure IV - 14) (précisions dans le paragraphe focalisé sur cette méthode) ;
- pour l'**étude micromorphologique**, des pavés ont été inclus à la résine afin de permettre l'établissement des lames minces réalisées en quinconce le long des pavés (précisions dans le paragraphe focalisé sur cette méthode) ;
- pour l'**étude géochimique**, des échantillons d'environ 5 cm³ ont été prélevés puis broyés.

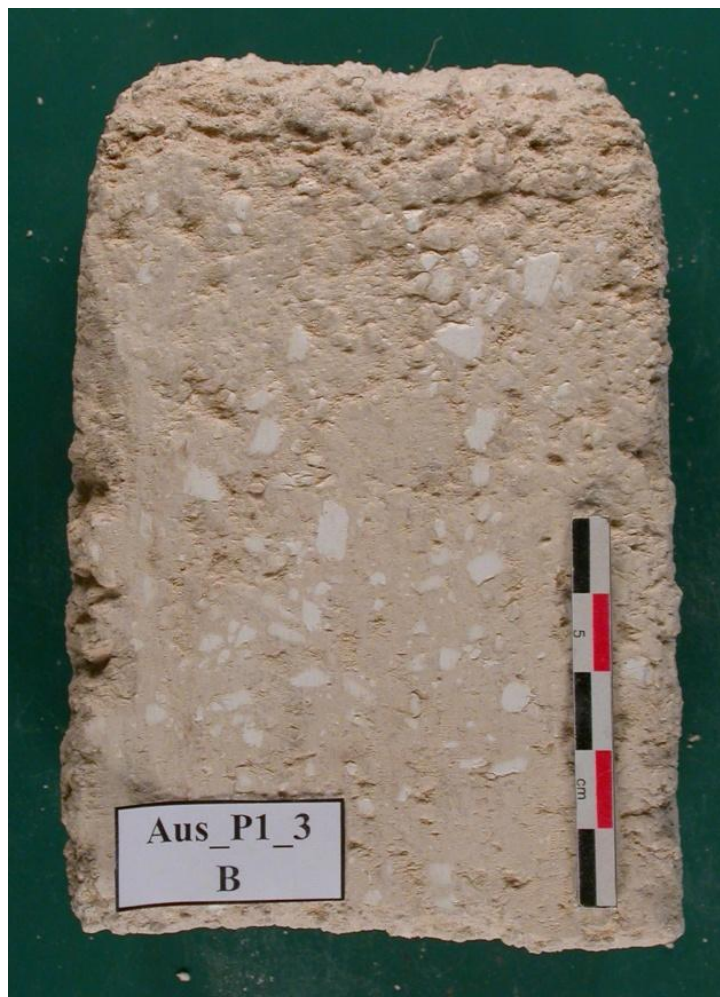


Figure IV - 13 : Échantillon type utilisé pour les études de transferts hydriques en laboratoire.

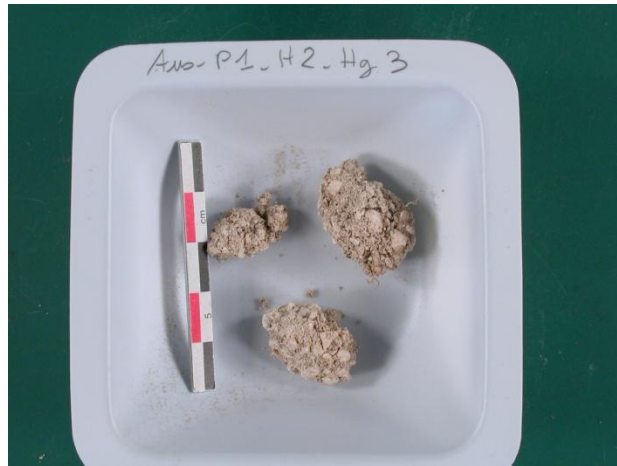


Figure IV - 14 : Échantillons types utilisés pour les analyses de porosimétrie par injection de mercure.

DEUXIÈME PARTIE

CARACTÉRISATION DES HAC

MÉTHODES ET TECHNIQUES DE CARACTÉRISATION

Ce chapitre présente et décrit l'ensemble des méthodes et techniques utilisées pour la caractérisation des horizons d'accumulations carbonatées de Champagne-Ardenne. Ces différentes méthodes sont regroupées en sept axes ; la colorimétrie, la pénétrométrie dynamique, la géochimie, la minéralogie, la micromorphologie, la porosimétrie et la datation ^{14}C .

I. CARACTÉRISATION COLORIMÉTRIQUE

L'étude colorimétrique a été réalisée dans deux buts bien distincts. Sur le terrain, les HAC semblent se distinguer des autres horizons (et notamment des grèzes) par une couleur plus claire. Le premier objectif de l'utilisation de cette méthode est donc de confirmer ou d'infirmer ces observations par l'analyse. Dans un deuxième temps, la colorimétrie a été utilisée afin de quantifier si elle existe cette différence de couleur et de la mettre potentiellement en lien avec d'autres paramètres.

La notion de couleur d'un objet est intimement liée à la perception ainsi qu'à l'interprétation de chaque individu. Il apparaît donc nécessaire d'utiliser une méthode standardisée de description des couleurs.

En 1909 par exemple, le peintre et professeur d'art Albert Henry Munsell conçoit une méthode qui consiste à comparer visuellement un échantillon coloré avec un grand nombre de pastilles de couleur classées selon leur teinte (teinte de Munsell H), leur clarté (clarté de Munsell V) et leur saturation (saturation de Munsell C). Il s'agit de l'Atlas de Munsell (ou Système Colorimétrique de Munsell). Cette classification des couleurs en fonction de la teinte (couleur) à l'aide d'une rose des couleurs, de la clarté (luminosité) selon un axe vertical, et de la saturation (intensité) qui varie par rapport à un point central, a permis la construction de divers solides des couleurs (en 3 dimensions) (Figure V - 1).

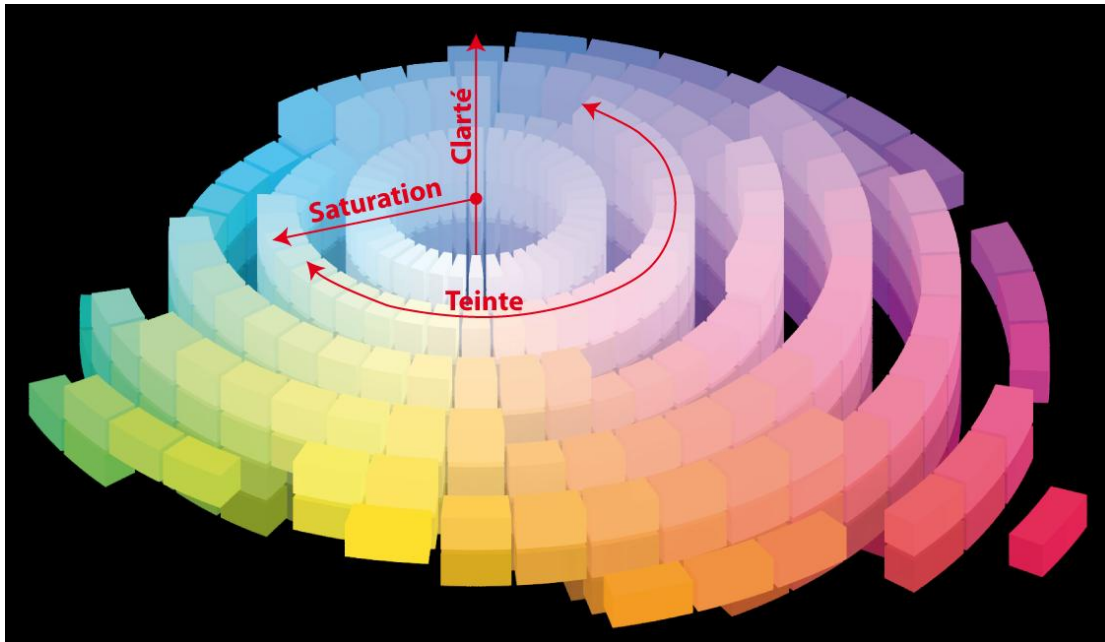


Figure V - 1 : Exemple de représentation de l'Atlas de Munsell présentant les trois paramètres utilisés : teinte, clarté et saturation.

Les méthodes actuellement les plus abouties et les plus utilisées ont été développées par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). Il s'agit notamment des systèmes XYZ et $L^*a^*b^*$.

La CIE a défini en 1931 un système qui classifie une couleur en fonction du système visuel humain (HVS : Human Visual System). Ce système utilise trois fonctions colorimétriques $\overline{b}(\lambda)$, $\overline{g}(\lambda)$ et $\overline{r}(\lambda)$, correspondant à la sensibilité de chacun des trois types de cônes récepteurs de la rétine (S : small ; M : medium et L : long) d'un observateur standard en fonctions des différentes longueurs d'onde du spectre visuel comprises entre 380 et 780 nm (Figure V - 2 : A). L'estimation de ces fonctions a été réalisée par Guild [1931] avec 7 observateurs sur un champs visuel limité à un angle de 2° afin que les flux lumineux soient essentiellement incidents sur la *macula lutea* (zone de la rétine comportant le maximum de cônes récepteurs).

1. SYSTÈME CIE-XYZ (CIE-Yxz)

a. DÉFINITION DU SYSTÈME

Le procédé décrit ci-dessus permet d'obtenir les trois composantes trichromatiques RGB d'une couleur donnée. Les fonctions colorimétriques correspondant à l'œil de l'observateur standard présentent cependant parfois des valeurs négatives (Figure V - 2 : A). Le système XYZ se base sur les fonctions colorimétriques $\overline{x}(\lambda)$, $\overline{y}(\lambda)$ et $\overline{z}(\lambda)$ définies en utilisant uniquement des valeurs positives (Figure V - 2 : B) par transformation linéaire de l'espace RGB selon les équations :

$$\overline{x(\lambda)} = 2,7688 \cdot \overline{r(\lambda)} + 1,7517 \cdot \overline{g(\lambda)} + 1,1301 \cdot \overline{b(\lambda)}$$

$$\overline{y(\lambda)} = \overline{r(\lambda)} + 4,5907 \cdot \overline{g(\lambda)} + 0,0601 \cdot \overline{b(\lambda)}$$

$$\overline{z(\lambda)} = 0,00001 \cdot \overline{r(\lambda)} + 0,0565 \cdot \overline{g(\lambda)} + 5,5942 \cdot \overline{b(\lambda)}$$

$\overline{x(\lambda)}$, $\overline{y(\lambda)}$ et $\overline{z(\lambda)}$: fonctions colorimétriques du système CIE XYZ ;

$\overline{b(\lambda)}$, $\overline{g(\lambda)}$ et $\overline{r(\lambda)}$: fonctions colorimétriques du système CIE RGB.

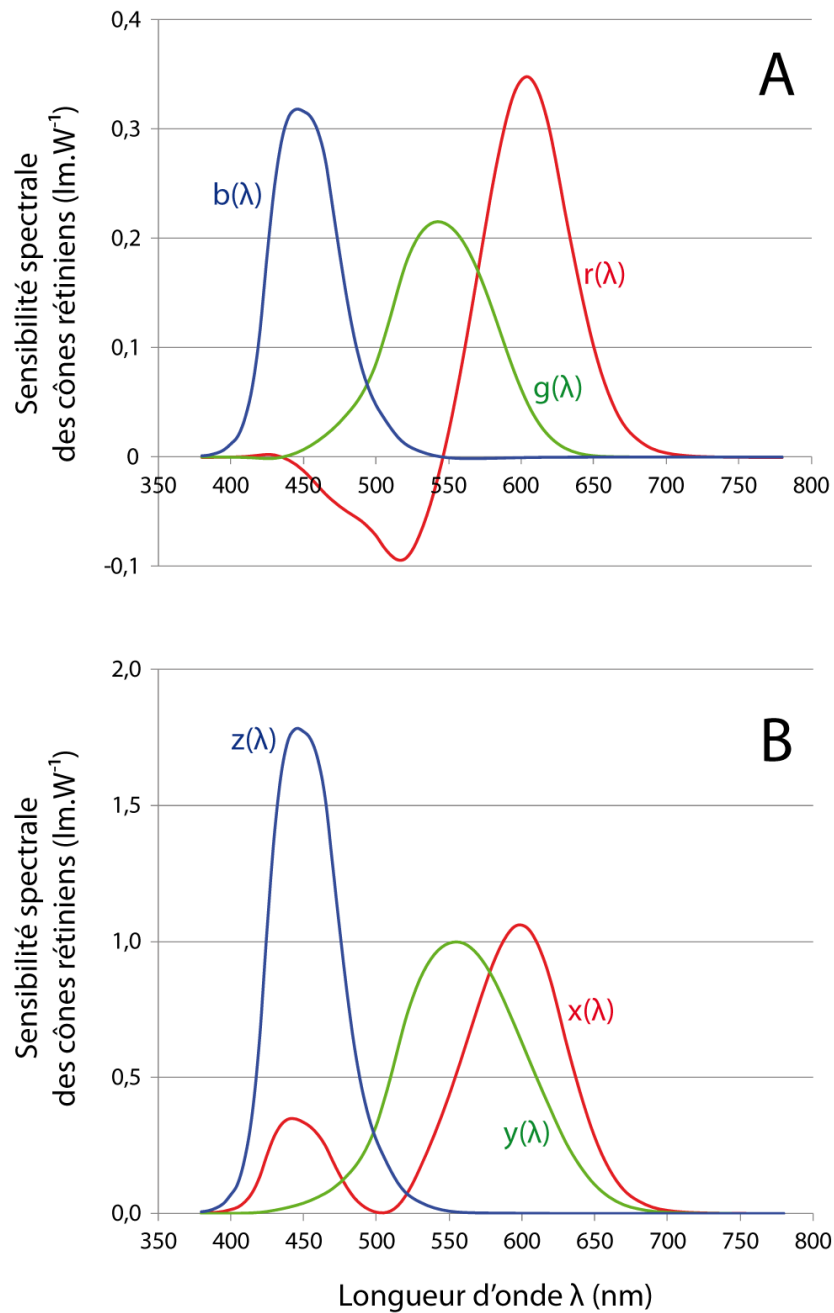


Figure V - 2 : Graphique de sensibilités des cônes rétiniens humains en fonction de la longueur d'onde. A : Système RGB et B : système XYZ.

N'importe quelle couleur pourra alors être caractérisée par un triplet de composantes trichromatiques X, Y et Z selon les relations :

$$X = K_m \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \overline{x(\lambda)} d\lambda$$

$$Y = K_m \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \overline{y(\lambda)} d\lambda$$

$$Z = K_m \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \overline{z(\lambda)} d\lambda$$

X, Y et Z : composantes trichromatiques du système CIE XYZ ;

K_m : efficacité lumineuse maximum en vision diurne ($= 683 \text{ lm.W}^{-1}$) ;

$S(\lambda)$: spectre d'émission de l'illuminant de référence (W.m^{-2}).

b. DIAGRAMME DE CHROMATICITÉ

Le système CIE XYZ définit Y comme la luminance. X correspond aux courbes de réponse des cônes rétiniens M et L tandis que Z correspond à la réponse des cônes rétiniens S. Toutes les chromaticités (mélange de X et Z) pourront donc être contenues sur un plan correspondant à une valeur de luminance Y donnée. Cette particularité permet de représenter l'ensemble des couleurs perceptibles dans un espace bidimensionnel appelé diagramme de chromaticité (Figure V - 3).

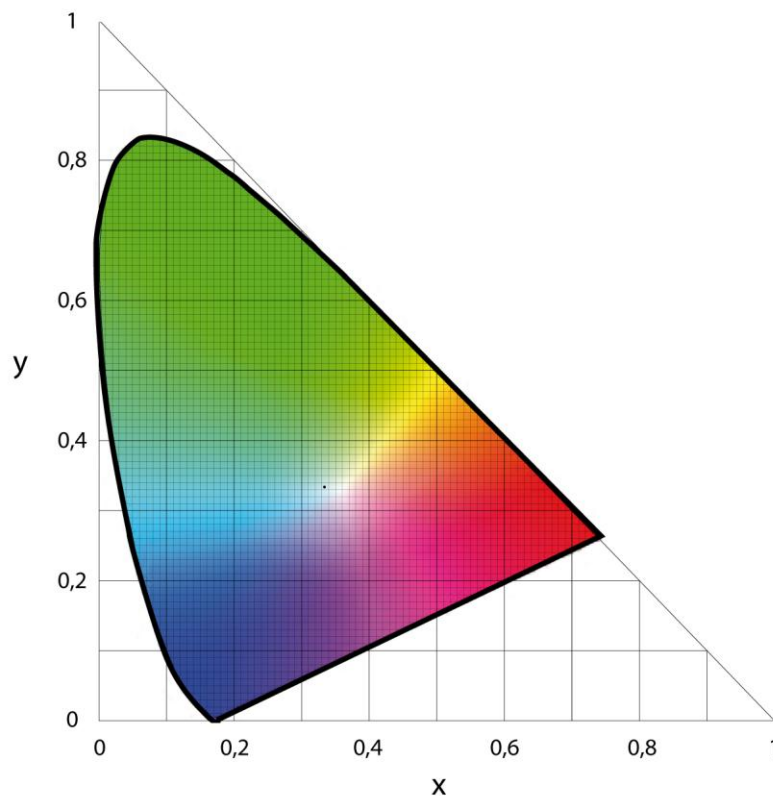


Figure V - 3 : Diagramme de chromaticité représentant couleurs dans un espace bidimensionnel à l'aide des coordonnées de chrominance x et z pour une luminance donnée z.

Pour ce faire, les composantes X, Y et Z doivent être rapportées à leur proportions relatives au sein de la couleur étudiée [Wright, 1928 - 29]. Cette conversion permet d'obtenir les coordonnées trichromatiques x, y et z et s'effectue à l'aide des équations :

$$\begin{cases} X \\ Y \\ Z \end{cases} \rightarrow \begin{cases} x = \frac{X}{X+Y+Z} \\ y = \frac{Y}{X+Y+Z} \\ z = \frac{Z}{X+Y+Z} \\ (x+y+z=1) \end{cases}$$

Un sous ensemble de couleurs caractéristique d'un matériaux particulier occupant une partie plus ou moins grande du diagramme de chromaticité est appelé gamut. Il existe par exemple des gamuts différents entre la plage colorimétrique d'un écran, d'une imprimante, d'une peinture...

2. SYSTÈME L*a*b*

a. DÉFINITION DU SYSTÈME

Le système CIE L*a*b* a quant à lui été établi en 1976. Comme le système CIE XYZ, il décrit une couleur en utilisant un paramètre d'intensité lumineuse et deux paramètres de chrominance qui définissent la couleur en elle-même. Le paramètre d'intensité est corrigé par rapport au paramètre Y du système CIE XYZ afin de mieux correspondre à la sensibilité de l'observateur standard vis à vis de l'intensité lumineuse. Ce paramètre L* est appelé alors luminosité et sa valeur peut varier entre 0 (noir) et 100 (blanc).

Les données ayant trait à la chromaticité s'appuient quant à elles sur deux axes de couleurs perpendiculaires. L'axe jaune/bleu et l'axe vert/rouge. L'opposition des couleurs est matérialisée par un point neutre central qui prend la valeur 0. Dans ce système les valeurs de chromaticité s'étalent entre -300 et +299 sur a et sur b, soit 600 échantillons. Ces trois paramètres sont calculés à partir des composantes trichromatiques X, Y et Z en suivant les relations :

$$\begin{cases} L^* = 116 \cdot f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \\ a^* = 500 \cdot \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right] \\ b^* = 200 \cdot \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right] \end{cases} \rightarrow \text{avec } f(t) = \begin{cases} t^{\frac{1}{3}}, & \text{si } t > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \\ \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{29}{6}\right)^2 \cdot t + \frac{4}{29}, & \text{sinon} \end{cases}$$

X, Y et Z : composantes trichromatiques du système CIE XYZ ;
 X_{η} , Y_{η} et Z_{η} : composantes trichromatiques du blanc de référence blanc décrit dans l'espace CIE XYZ.

b. COEFFICIENT DE DIFFÉRENCE DE COULEUR $\Delta E^* L^*A^*B^*$

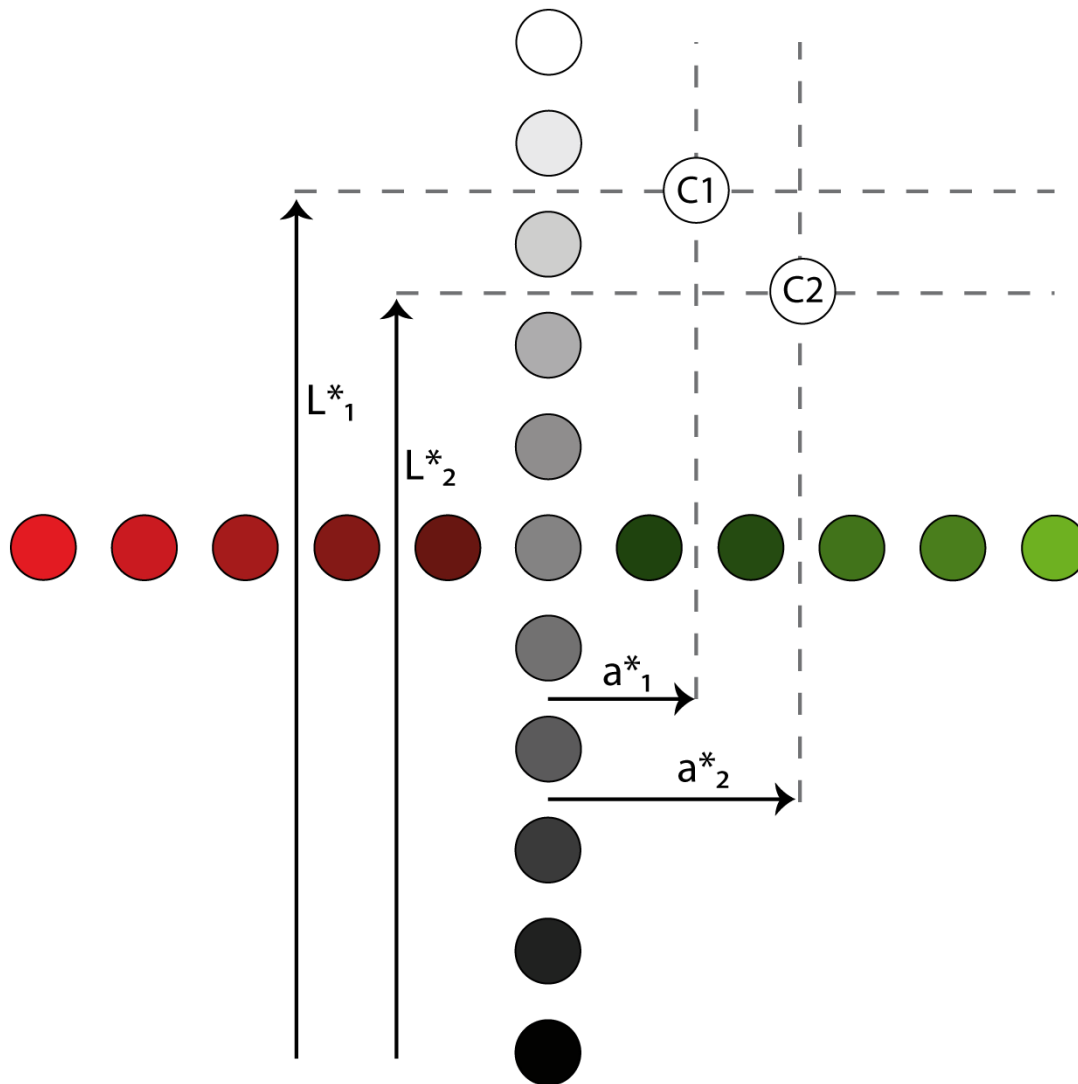


Figure V - 4 : Diagramme représentant une coupe réalisée dans l'espace colorimétrique CIE $L^*a^*b^*$ à b constant. Illustration du calcul des différences ($L^*_{c1} - L^*_{c2}$ sur l'axe de la luminosité et ($a^*_{c1} - a^*_{c2}$ sur l'axe rouge/vert).

Le calcul de la distance euclidienne dans l'espace colorimétrique CIE $L^*a^*b^*$ permet d'obtenir le coefficient ΔE^* (Figure V - 4). Ce coefficient correspond à la différence globale de couleur entre deux « objets » [Moreau, 2008]. La formule prend en chacune des coordonnées L^* , a^* et b^* des couleurs des deux objets étudiés :

$$\Delta E^*_{c1;c2} = \sqrt{(L^*_{c1} - L^*_{c2})^2 + (a^*_{c1} - a^*_{c2})^2 + (b^*_{c1} - b^*_{c2})^2}$$

$\Delta E^*_{c1;c2}$: coefficient de différence de couleur ;

L^*_{c1} , a^*_{c1} et b^*_{c1} : coordonnées de la couleur 1 dans le système colorimétrique CIE

$L^*a^*b^*$;

L^*_{c2} , a^*_{c2} et b^*_{c2} : coordonnées de la couleur 2 dans le système colorimétrique CIE

$L^*a^*b^*$;

Par convention, une différence de couleur égale à 1 est définie comme juste discernable [Viénot, 2006].

C. REPRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Dans le cas de l'utilisation de ce système colorimétrique, les trois paramètres L^* , a^* et b^* peuvent être placés simplement dans un diagramme ternaire classique.

3. APPAREILLAGE ET MÉTHODOLOGIE

Les mesures colorimétriques ont été réalisées à l'aide d'un colorimètre Chroma Meter CR-400 de Konica Minolta.

La source lumineuse de l'appareil et une lampe au xénon à arc pulsé et l'éclairage est diffus et réalisé avec un angle de lecture de 0 °. Cette méthode d'éclairage utilise des sources lumineuses d'une luminosité égale et illumine l'échantillon dans tous les sens, ce qui permet la réception de la lumière réfléchie verticalement par la surface de l'échantillon sur le récepteur constitué de six photocellules au silicium. La durée de la mesure est de 1 seconde. Pour chaque horizon testé, une moyenne a été calculée sur dix mesures réalisées de manière aléatoire.

II. CARACTÉRISATION PÉNÉTROMÉTRIQUE

Le principe de la pénétrométrie est de mesurer la résistance à l'enfoncement dans le sol d'un train de tiges en fonction de l'énergie qu'elle reçoit. Cette technique est très employée dans le génie civil et les études géotechniques [Philipponnat et Hubert, 2007]. Elle permet de connaître le niveau de compacité d'un sol, son indice de portance et également la présence de niveaux plus indurés.

Tout comme la colorimétrie, la pénétrométrie dynamique a également été utilisée dans deux buts distincts. Le premier objectif est d'essayer de discerner si les HAC présentent un comportement particulier vis-à-vis de la résistance de pointe qui permettrait de signaler leur présence dans un profil de sol de manière non-invasive. Si les HAC peuvent se caractériser par un comportement singulier, le second but de l'étude pénétrométrique sera de l'utiliser à grande échelle afin de générer une carte de localisation de ces structures particulières à l'échelle régionale.

Les essais pénétrométriques déterminent directement la résistance d'un terrain. Deux types de pénétromètres sont couramment utilisés :

- les pénétromètres **statiques** sont vérifiés petit à petit à vitesse lente et régulière dans les terrains étudiés. La résistance à l'enfoncement dans le sol est calculée en fonction de cet enfoncement constant et est appelée « résistance de pointe statique » (ou résistance de cône). Ces pénétromètres sont également appelés « pénétromètres quasi-statiques » par certains auteurs ;
- les pénétromètres **dynamiques** sont enfoncés dans les terrains étudiés par battage. Ces appareils sont principalement constitués d'un train de tiges équipé d'une pointe conique sur son extrémité inférieure. Le battage du train de tiges peut s'effectuer de manière automatisée (pénétromètre dynamique lourd à énergie constante) [Fauchard, 2004] ou peut s'effectuer à la main dans le cas du pénétromètre dynamique léger à énergie variable. La résistance à l'enfoncement dans le sol est appelée « résistance de pointe dynamique ».

Les mesures de pénétrométrie sont dépendantes de différents paramètres du milieu étudié comme la granulométrie, la structure et la compacité qui dépendent de la forme et du degré d'assemblage des différents constituants et la teneur en eau [To et Kay, 2005 ; Dexter *et al.*, 2007]. Ce type de méthode a donc été mise en œuvre afin de déterminer si une caractérisation potentielle des différents horizons d'accumulations carbonatées étudiés était possible à travers leurs comportements vis-à-vis de l'enfoncement de la pointe du pénétromètre par rapport aux autres horizons en présence.

1. PÉNÉTROMÉTRIE DYNAMIQUE À ÉNERGIE VARIABLE

Dans cette étude, la pénétrométrie dynamique à énergie variable a été retenue pour les nombreux avantages qu'elle présente. Outre le côté pratique de part sa facilité de transport (l'appareil pèse moins de 10 kg), l'intérêt principal du pénétromètre dynamique léger à énergie variable est la maîtrise de l'énergie de battage en modulant l'intensité des coups de marteau. Cette variation possible de l'énergie de battage au cours de l'essai rend le pénétromètre dynamique plus sensible aux faibles variations de résistance dynamique [Deplagne *et al.*, 1993]. Le battage manuel peut ainsi être adapté à la résistance des horizons traversés.

Le PANDA (Pénétromètre Autonome Numérique Dynamique Assisté par ordinateur) est un pénétromètre dynamique léger à énergie variable (Figure V - 5) conçu par le Laboratoire de Génie Civil de l'établissement public de formation *Polytech Clermont-Ferrand* (ancien Centre Universitaire Scientifique et Technique (CUST)) [Gourvès, 1991].

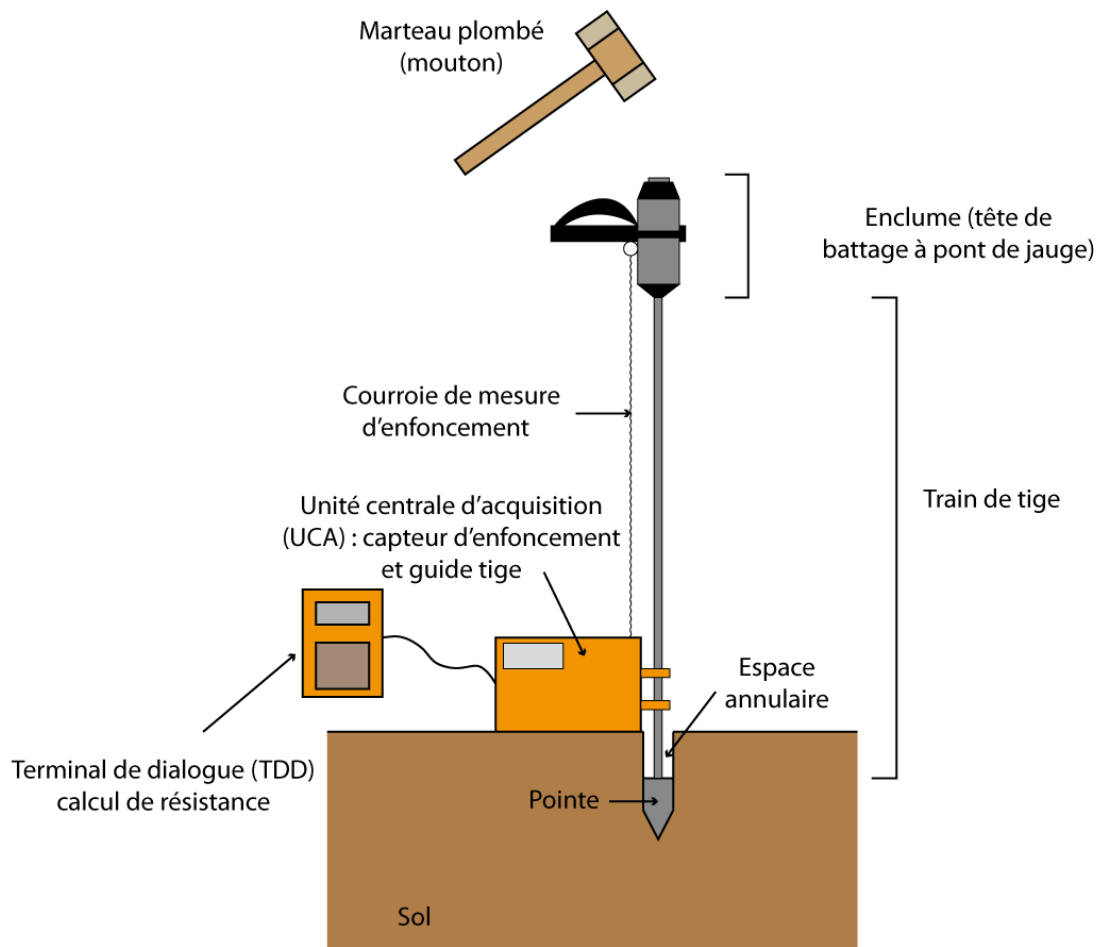


Figure V - 5 : Schéma général du Pénétromètre Autonome Numérique Dynamique Assisté par ordinateur (PANDA) d'après Maquaire [2002].

Ce système est utilisé couramment en géotechnique [Legendre, 2003 ; CETE, 2007 ; Mary *et al.*, 2013] mais devient également de plus en plus usité dans d'autres domaines d'application et notamment en archéologie [Laurent et Fondrillon, 2010] et dans l'étude des formations superficielles [Maquaire *et al.*, 2002 ; Lenoble et Martinaud, 2003].

L'appareil se présente sous la forme d'un train de tiges d'un centimètre de diamètre équipé d'une pointe de pénétration conique sur son extrémité inférieure. L'enfoncement dans le sol est assuré par battage manuel de la tête de battage à pont de jauge (enclume) par un marteau plombé (mouton) (Figure V - 5).

2. CALCUL DE LA RÉSISTANCE DE POINTE Q_d

A chaque coup de marteau, l'appareil enregistre automatiquement l'enfoncement du train de tiges à l'aide de la courroie de mesure d'enfoncement ainsi que la vitesse de frappe calculée par la tête de battage à pont de jauge. Un calculateur intégré au terminal de dialogue permet de calculer l'énergie cinétique de battage par la formule :

$$E = \frac{1}{2} m_f v_f^2$$

E : énergie cinétique de battage ($J = kg.m^2.s^{-2}$) ;

m_f : masse frappante (kg) ;

v_f : vitesse de frappe ($m.s^{-1}$).

Le terminal de dialogue calcule également la résistance de pointe au battage à l'aide de la formule des Hollandais :

$$Q_d = \frac{1}{A} \times \frac{E}{e} \times \frac{1}{1 + \frac{P_f}{m_f}}$$

Q_d : : résistance de pointe (Pa) ;

A : section de la pointe (m^2) ;

e : enfoncement du train de tiges (m) ;

P_f : masse frappée = masse enclume + masse du train de tiges + masse de la pointe (kg).

L'injection de l'équation l'avant-dernière équation dans la formule des Hollandais permet d'obtenir la formulation simplifiée de cette dernière :

$$Q_d = \frac{m_f^2 \cdot v_f^2}{A_f e (m_f + P_f)}$$

3. RESTITUTION DES COURBES DE PÉNÉTRATION

Les courbes de pénétration (Figure V - 6) présentent généralement les valeurs de résistance de pointe dynamique (en MPa) en abscisse sur une échelle logarithmique. L'axe des ordonnées présente quant à lui les valeurs de profondeur (m ou cm).

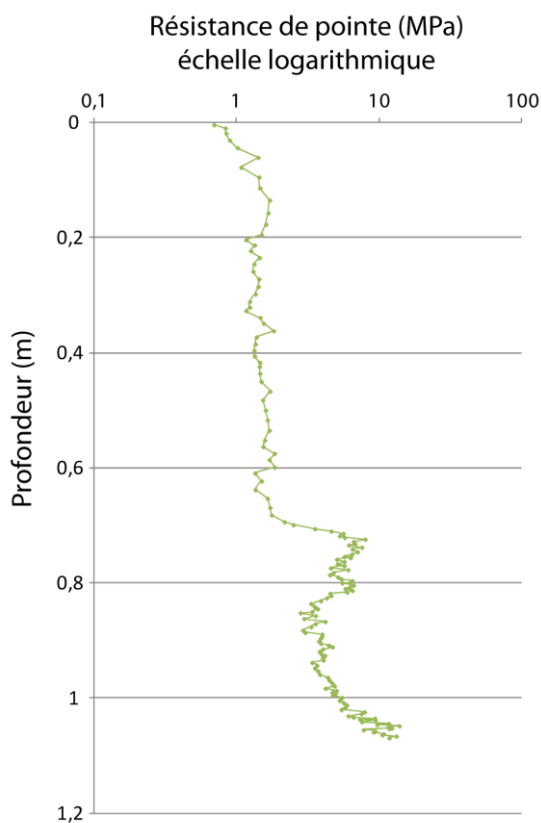


Figure V - 6 : Courbe type d'un essai au pénétromètre dynamique léger à énergie variable.

En génie civil, des logiciels préprogrammés permettent de dépouiller les courbes obtenues par reconnaissance de la résistance des matériaux étudiés. Dans cette étude, les épaisseurs des différents horizons mesurées sur le terrain ont été directement reportées sur les pénétrogrammes.

III. CARACTÉRISATION GÉOCHIMIQUE

Comme les deux méthodes d'analyses précédemment présentées, l'étude géochimique a été réalisée dans deux buts. Le premier est de caractériser les HAC par un contenu géochimique singulier comparé aux autres horizons des profils de sol. Le second objectif est de d'obtenir des arguments supplémentaires permettant de confirmer ou d'infirmes les hypothèses de genèses des HAC établies par Loisy [1997].

1. TENEURS EN CARBONATES ET CARBONE ORGANIQUE TOTAUX

Les concentrations en carbonate de calcium total ont été mesurées au calcimètre Bernard suivant la norme NF-ISO-10693 Afnor95. Les concentrations en Carbone Organique Total ont été quant à elles effectuées par oxydation sulfochromique selon la norme NF-ISO-14235 Afnor98. Ces deux types d'analyses ont été effectués par les laboratoires de la Chaîne d'Analyse Marne-Ardenne (laboratoires d'analyses agricoles et de biologie végétale) de Reims.

2. TENEURS EN ÉLÉMENTS MAJEURS ET TERRES RARES

Les autres analyses géochimiques ont été effectuées par la société canadienne AcmeLabs. L'analyse des **oxydes principaux** (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , P_2O_5 , MnO et Cr_2O_3) et des **terres rares** (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb et Lu) a été effectuée sur des échantillons d'une masse de 0,2 grammes mélangés à un flux de métaborate et tétraborate de lithium puis fondus dans un four à induction. L'ensemble est alors versé dans une solution d'acide nitrique à 5 % pendant environ 30 minutes jusqu'à dissolution complète.

Les quantités d'éléments ont été mesurées (en % ou ppm selon la quantité) par spectrométrie d'émission (ICP-AES) pour les oxydes principaux et par spectrométrie de masse (ICP-MS) pour les autres éléments.

Aucun élément bibliographique n'indiquant la conservation d'au moins un élément lors des différents phénomènes affectant le profil pendant tous les processus de son établissement, les calculs de balances de masses habituels n'ont pas pu être utilisés dans le but de caractériser le transferts potentiel des différents éléments chimiques [Walter *et al.*, 1995]. Les calculs de pourcentages de gain/perte ont été normalisés pour chaque horizon à la craie puis à l'horizon inférieur en suivant la méthode proposée par Laveuf *et al.* [2008]. Les valeurs ont été au préalables

rapportées à SiO_2 considéré comme iso-élément lors des processus de lessivage. L'équation de calcul se présente sous la forme :

$$\%_{\text{gain/perte}} = \left[\frac{\frac{C_{e,t}}{C_{i,t}}}{\frac{C_{e,r}}{C_{i,r}}} - 1 \right] \times 100$$

$C_{e,t}$: concentration en élément dans l'horizon testé (%) ;

$C_{i,t}$: concentration en iso-élément dans l'horizon testé (%) ;

$C_{e,r}$: concentration en élément dans l'horizon de référence (%) ;

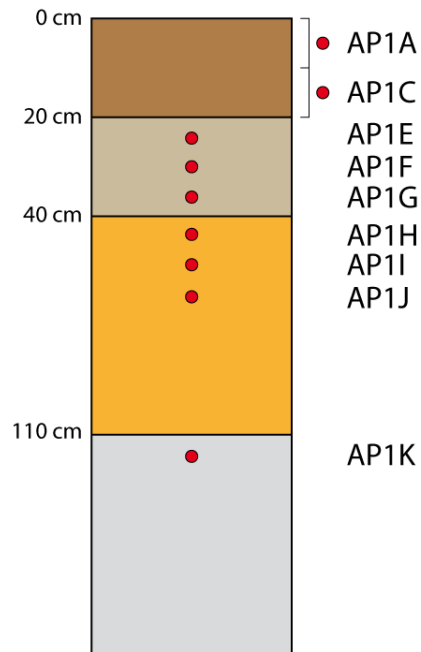
$C_{i,r}$: concentration en iso-élément dans l'horizon de référence (%).

Concernant les terres rares, la normalisation à la croûte continentale supérieure (U.C.C.) a été réalisée grâce aux données de Taylor et McLennan [1985] (Tableau V - 1).

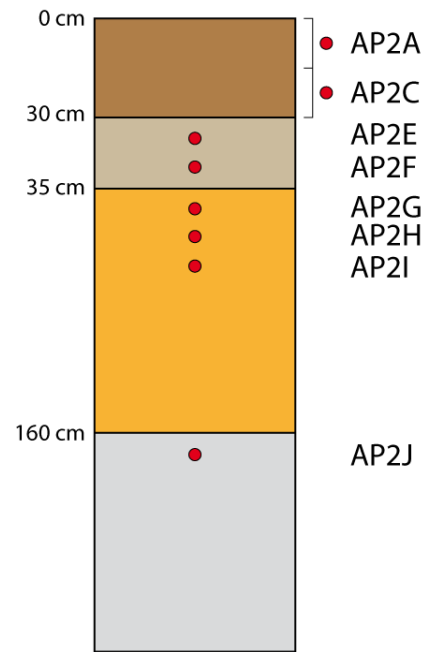
Terre rare	Lanthane	Cérium	Praséodyme	Néodyme	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutécium
Symbole	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Concentration dans l'U.C.C. (mg/kg)	30	64	7,1	26	4,5	0,88	3,8	0,64	3,5	0,8	2,3	0,33	2,2	0,32

Tableau V - 1 : Concentrations en terres rares dans la croûte continentale supérieure (U.C.C.) d'après Taylor et McLennan [1985].

Profil 1 : croûte épaisse (20 cm)
sur poches de cryoturbation



Profil 2 : croûte fine (5 cm)
sur poches de cryoturbation



Profil 3 : croûte épaisse (22 cm)
et grèzes litées

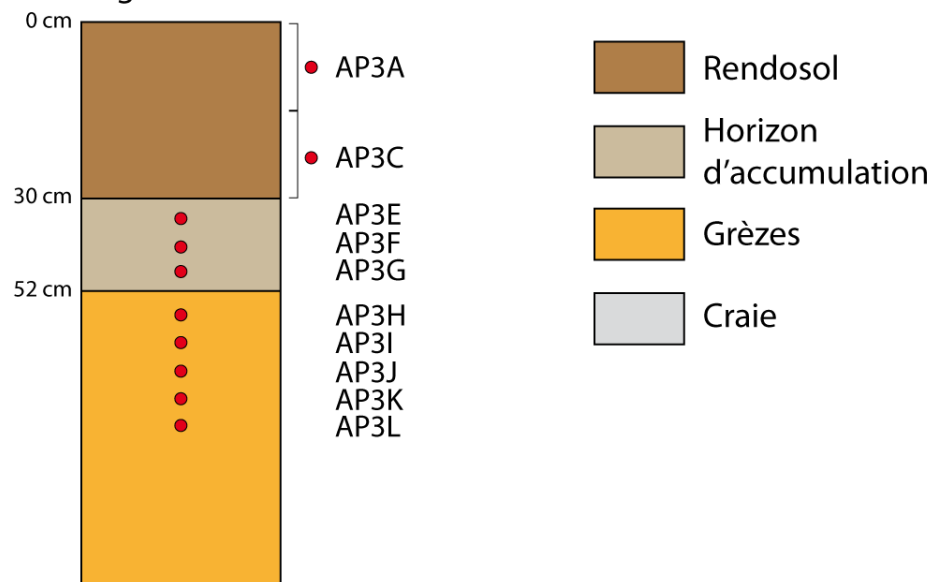


Figure V - 7 : Plan de prélèvement des échantillons utilisés pour l'étude géochimique des majeurs et traces.

3. ÉCHANTILLONNAGE

Les échantillons utilisés pour les analyses géochimiques ont été prélevés soit directement sur site (RENDOSOL) ou directement sur les blocs sous-échantillonnés en laboratoire (Figure V -7). Ces échantillons ont été broyés avant l'envoi à l'analyse.

IV. CARACTÉRISATION MINÉRALOGIQUE

La diffraction des rayons X a été réalisée afin de permettre une potentielle caractérisation des HAC comparé aux autres horizons des profils de sol. De plus, elle a été réalisée afin de pouvoir effectuer des liens avec la composition chimique des différents horizons.

Cette technique, utilisée couramment en sciences et notamment en sciences de la Terre, est basée sur la diffraction d'un faisceau de rayons X sur un échantillon qui suit la loi de Bragg qui lie la distance inter-réticulaire d'un cristal, le demi-angle de déviation, l'ordre de réflexion et la longueur d'onde des rayons X. La mesure des angles et de l'intensité des rayons réfractés permet d'établir un diffractogramme sur lequel les différents pics vont être associés à des entités minérales connues.

Les analyses par diffraction des rayons X ont été réalisées sur quatre échantillons (un par horizon) sur le RENDOSOL, l'HAC, les grèzes et la craie prélevés au niveau du profil 1 du site du Mont du Ménil.

La diffractométrie a été réalisée au Laboratoire Chrono-Environnement de l'Université de Franche-Comté sur un diffractomètre Brucker D8 Advance. Le panel des angles balayés couvre de 3 à 64 degrés 2θ avec un pas de 0,0109 degrés à raison de 89 secondes par incrément angulaire.

V. CARACTÉRISATION MICROMORPHOLOGIQUE

Les travaux de Loisy [1997] présentent une étude micromorphologique poussée focalisée sur les phases de liant du ciment carbonaté emballant les cryoclastes de craie. L'étude micromorphologique présentée ici propose principalement de discriminer des entités présentes ou non dans les HAC ainsi que dans les grèzes et d'observer les différences existant potentiellement entre les HAC et les grèzes. Cette étude micromorphologique abordera également la description porosimétrique des différents horizons étudiés.

1. RÉALISATION DES LAMES MINCES

Des lames minces ont été réalisées en quinconce le long des blocs prélevés sur les profils (Figure V - 8). Elle recouvrent donc les horizons d'accumulations carbonatées plus ou moins épais ainsi que les grèzes. La moyenne du nombre de lames minces

réalisées et étudiées pour une épaisseur d'horizon de vingt centimètres est proche de dix.

2. ANALYSE D'IMAGES SUR LAMES MINCES

Des analyses d'images sur lames minces ont été effectuées afin de quantifier la proportion surfaciques de cryoclastes de craie au sein des différents horizons.

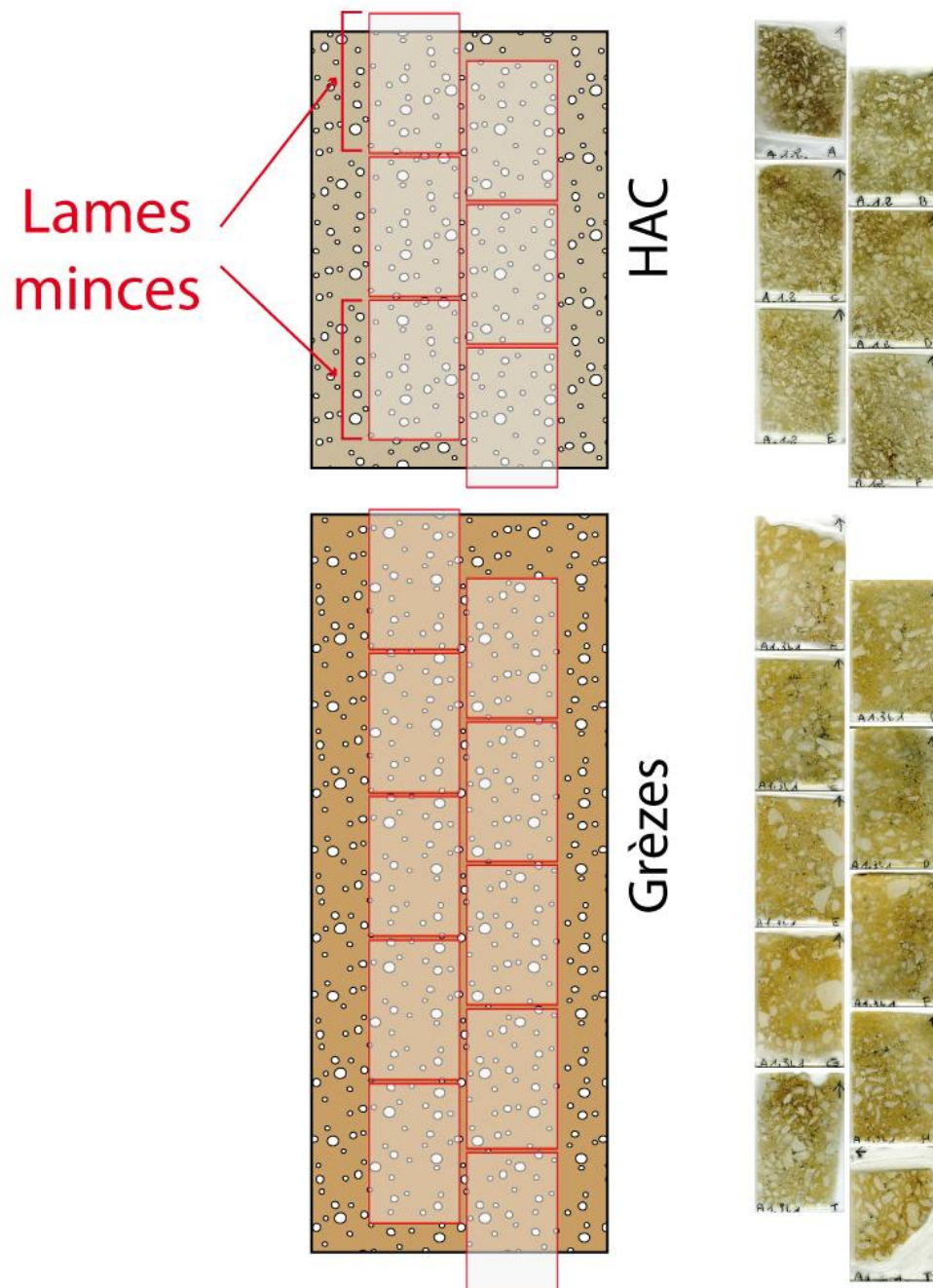


Figure V - 8 : Schéma de réalisation des lames minces sur les blocs sous-échantillonnés en laboratoire.

Les lames minces ont d'abord été scannées à haute définition. Les couleurs des différentes entités micromorphologiques étant très souvent proches, les différenciations de teintes se sont avérées très aléatoires par seuillage informatique. La technique utilisée a donc consisté en l'impression des scans de lames minces en grand format (A4) puis en un décalquage des contours des cryoclastes sur table lumineuse (Figure V - 9). Les calques ainsi obtenus ont alors pu être à leur tour scannés à haute définition afin de pouvoir recolorer simplement les cryoclastes à l'aide d'un logiciel de retouche d'image. Les fichiers ainsi obtenus présentent donc les cryoclastes de manière très contrastée par rapport au reste des constituants de la lame mince (Figure V - 9).

Ces nouveaux fichiers très contrastés ont ensuite pu être analysés simplement par seuillage noir/blanc à l'aide du logiciel Saisam de Microvision Instruments par analyse d'image.

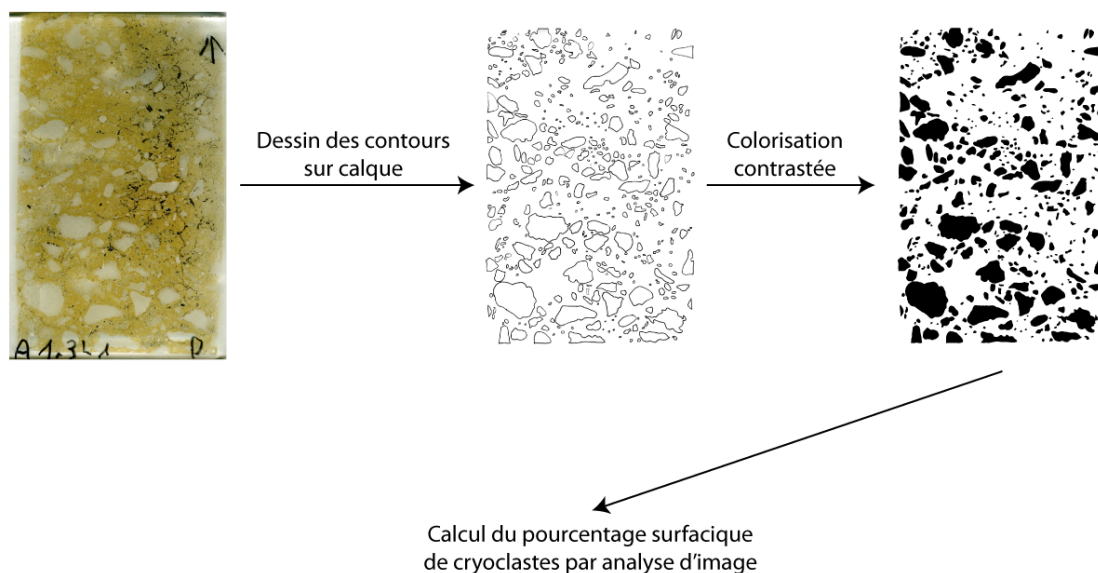


Figure V - 9 : Protocole pour le calcul du pourcentage surfacique de cryoclastes par analyse d'image à partir des lames minces.

3. MICROSCOPIE

Des observations microscopiques ont permis de réaliser une caractérisation micromorphologique des différents horizons étudiés. L'accent a été mis sur l'agencement des différents éléments observés ainsi que sur l'organisation du réseau poreux observable en fonction de la méthode utilisée.

a. MICROSCOPIE OPTIQUE

Les échantillons ont d'abord été observés au microscope optique en lumière polarisée non-analysée (LPNA) ainsi qu'en lumière polarisée analysée (LPA) à l'aide du modèle BX51 de la marque Olympus.

b. MICROSCOPIE ÉLECTRONIQUE À BALAYAGE

Les observations ont été réalisées à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) de paillasse Hitachi TM-1000 Table Top en mode électrons rétrodiffusés. Ce type de microscope ne requière pas la métallisation des échantillons et permet de réaliser des observations avec un grossissement de $\times 100$ à $\times 10000$. Des analyses EDX ont également été réalisées sur certains points des échantillons.

Une tension d'accélération de 15 kV a été utilisée ainsi qu'une distance de travail de 6 mm.

VI. CARACTÉRISATION DU MILIEU POREUX

L'étude du milieu poreux déjà abordée par l'étude micromorphologique a été réalisée afin d'ajouter une étape supplémentaire dans la caractérisation des HAC et dans leur comparaison aux autres horizons présents au sein des profils de sol. Cette étude permettra également de faire le lien avec la partie suivante concernant les transferts hydriques.

1. POROSITÉS ET MORPHOLOGIE DU MILIEU POREUX

a. LE MILIEU POREUX

Un matériau poreux est constitué d'une matrice solide composée d'éléments constitutifs et d'un ensemble d'espaces vides. Ce volume d'espaces vides constitue le milieu poreux [Dessandier, 1995 ; Bousquié, 1979 ; Thomas, 1938].

Le milieu poreux se définit comme milieu plus ou moins continu et irrégulier qui présente des limites géométriques difficiles à préciser [Jeannette, 1994].

b. LES TYPES DE POROSITÉ

Le milieu poreux fait l'objet d'un très grand nombre d'études depuis de nombreuses années et il existe beaucoup de termes spécifiques qui permettent de le décrire. Ce paragraphe présente les principales définitions qui sont indispensables à la compréhension et à la caractérisation du milieu poreux :

- les **porosités de fractures et de fissures** : dans ces porosités, deux dimensions sont très grandes comparées à la troisième. Elles peuvent apparaître à grande comme à petite échelle (massif, échantillon ou grain) [Bousquié, 1979] ;
- les **pores** : il s'agit des espaces poreux dont au plus une dimension est beaucoup plus grande que les deux autres [Bousquié, 1979]. Il existe différents types de qualificatifs qui permettent de décrire les pores. Certains

sont plus qualitatifs et concernent leur forme, leur localisation... et d'autres sont plus quantitatifs et concernent leurs dimensions principales ;

- les **porosités inter et intragranulaires** : la porosité intergranulaire est la porosité située entre les éléments figurés du squelette minéral alors que la porosité intragranulaire est définie comme la porosité située au sein même des éléments figurés. En science du sol, la porosité intergranulaire est appelée *porosité structurale* et la porosité intragranulaire est qualifiée de *porosité texturale* [Child, 1969] ;
- les **porosités occluses et ouvertes** : la porosité occluse regroupe en théorie l'ensemble des espaces poreux complètement déconnectés du reste du réseau poreux. Elle est en réalité en lien avec les méthodes de mesure employées. Dans cette étude, toute porosité qui ne peut être atteinte lors d'un essai porosimétrique au mercure sera considérée comme occluse (5 nm [Bousquié, 1979]). Rémy [1993] indique que ce type de porosité est très courante dans les roches cristallines (vacuoles, inclusions fluides ou gazeuses...) mais que ses occurrences sont rares dans les autres roches, notamment sédimentaires détritiques. A l'inverse, la porosité ouverte regroupe l'ensemble des pores ayant au moins une connexion avec le reste du réseau poreux ;
- les **porosités libres et piégées** : la porosité ouverte se distingue en deux volumes distincts appelés porosité libre et porosité piégée. La porosité libre correspond au volume du réseau poreux qui est librement accessible par l'eau lors d'une imbibition capillaire [Bousquié, 1979]. A l'inverse, la porosité piégée caractérise le volume du réseau poreux qui reste envahi par l'air lors d'une imbibition capillaire [Bousquié, 1979]. Elle est fonction de la géométrie du réseau poreux, de la distribution des pores et de la nature du couple de fluides [Thomachot, 2002]. Deux mécanismes de piégeage sont proposés par Bousquié [1979] :
 - l'air est piégé dans un macropore court-circuité (by-pass) au profit d'un capillaire plus fin (Figure V - 10 : A) ;
 - l'air est piégé dans un macropore dont la surface tapissée de rugosités permet à l'eau de le traverser sans le remplir complètement (Figure V - 10 : B).

A fluide identique, la distinction entre porosité libre et porosité piégée est donc principalement fondée sur les variations dimensionnelles entre les pores et leurs accès [Rémy, 1993].

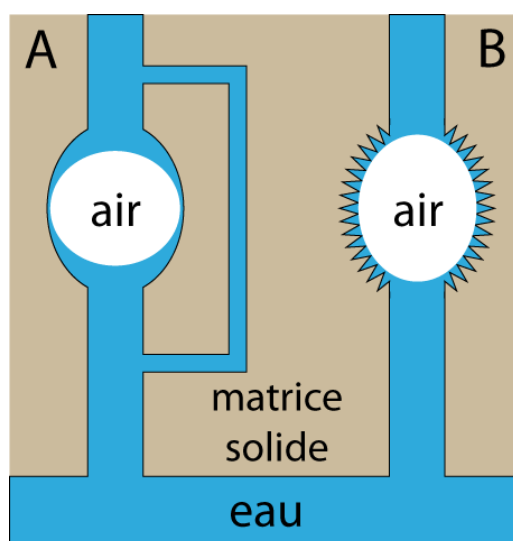


Figure V - 10 : Mécanismes de piégeage d'air lors d'une imbibition capillaire : A : piégeage par dérivation ; B : piégeage lié à une rugosité de surface [Bousquié, 1979].

C. LES CLASSES DE POROSITÉ

L'étude de la porosité consiste en l'examen de la taille des pores et des conduits leur donnant accès. Cet examen nécessite de regrouper les dimensions porales en différentes classes.

Une des principales classifications distingue la macroporosité et la microporosité. Cette séparation dépend de l'observateur et du mode d'observation. Arbitrairement, la limite entre macro et microporosité est définie par la limite discernable à l'œil :

- **au microscope optique** (lames minces), Choquette et Pray [1970] la placent à **62 μm** , Bousquié [1979] à **5 μm** , Zinszner [1980] à **10 μm** , Verrecchia [1992] à **25 μm** , Ballif *et al.* [1995], Loisy [1997] à **15 μm** , Fronteau [2000] entre **10 et 40 μm** (Tableau V - 2)... ;
- **au microscope électronique à balayage (MEB)**, Pittman [1971] place cette limite à **0,5 μm** (Tableau V - 2) ;
- **en porosimétrie par injection de mercure**, cette limite correspond généralement à un rayon de pores qui sont accessibles par le mercure à la pression atmosphérique, soit **7,5 μm** [Goni *et al.*, 1968 ; Mertz, 1991 ; Sizun, 1995 ; Dessandier, 1995 ; Fronteau, 2000]. Bousquié [1979] la place quant à lui à **1 μm** , Alonso [1965] à **0,1 μm** et Combarous et Marle [1965] à **0,01 μm** (Tableau V - 2).

Référence	Méthode	Rayon de pore (µm)															
		0,002	0,004	0,01	0,02	0,03	0,05	0,1	0,5	1	5	7,5	10	15	25	37,5	62
Brewer [1964]	théorie	cryptoporosité					ultra-microporosité		microporosité			mesoporosité			macroporosité		
Alonzo [1965]	porosimétrie mercure	microporosité		macroporosité													
Combarnous et Marle [1965]	porosimétrie mercure	microporosité		macroporosité													
Goni <i>et al.</i> [1968]	porosimétrie mercure	infraporosité					microporosité		macroporosité								
Choquette et Pray [1970]	lames minces				microporosité			microporosité			macroporosité						
Pittman [1971]	MEB				microporosité		macroporosité										
Haynes [1978]	théorie	microporosité	mésoporosité		macroporosité												
Bousquie [1979]	porosimétrie mercure	infraporosité		microporosité			macroporisité										
	lames minces				microporosité						macroporosité						
Zinszner [1980]	lames minces				microporosité												
Chrétien [1986]	lames minces				microporosité					mésoporosité		macroporosité					
Verrecchia [1992]	loupe binoculaire	infraporosité					microporosité		macroporosité								
Rémy [1993]	porosimétrie mercure				microporosité			macroporisité									
Mertz [1993]	porosimétrie mercure				microporosité			macroporosité									
Ballif <i>et al.</i> [1995]	?	nanoporosité						microporosité			macroporosité						
Sizun [1995]	porosimétrie mercure				microporosité			macroporosité									
Dessandlier [1995]	porosimétrie mercure	infraporosité					microporosité			macroporosité							
Loisy [1997]	porosimétrie mercure	infraporosité		ultra-microporosité		microporisité			macroporosité								
	lames minces				microporisité												
Fronteau [2000]	porosimétrie mercure				infraporosité						microporisité		macroporosité				

Tableau V - 2 : Limites des différentes classes de porosité en fonction des auteurs et des modes d'étude.

D'autres gammes de porosité dépendant également des auteurs et des méthodes d'étude existent. Les termes associés les plus couramment sont cryptoporosité, mésoporosité, ultra-microporosité et infraporosité. Comme pour la limite entre macroporosité et microporosité, les bornes de ces classes de porosité peuvent être très variables (Tableau V - 2).

Enfin, certains auteurs proposent un découpage de la porosité en différentes classes en rapport avec la fonctionnalité qu'elles peuvent posséder. C'est le cas de Brewer [1964] qui établit par exemple sa classification en fonction du rôle de la taille des pores et des relations eau- plante et de Haynes [1978], dont la classification est fonction de divers paramètres liant condensation et saturation à la taille des pores (Tableau V - 2).

2. POROSIMÉTRIE TOTALE À L'EAU

a. PRINCIPE

Dans sa définition la plus simple, la porosité totale N_t d'une roche est établie comme étant le rapport entre le volume de vide et le volume total de la roche [Monicard, 1975]. Cette valeur est exprimée en pourcentage :

$$N_t = \frac{V_p}{V_t} \times 100 = \frac{V_t - V_s}{V_t} \times 100$$

N_t : porosité totale de l'échantillon (%) ;

V_p : volume poreux de l'échantillon ;

V_t : volume total de l'échantillon ;

V_s : volume de la matrice solide de l'échantillon.

b. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Le protocole suivi est celui présenté par la norme NF EN 1936. L'échantillon est placé dans une étuve à 70 ± 5 °C jusqu'à masse constante puis refroidi à la température de la pièce dans une chambre de dessiccation. Il est ensuite pesé (masse sèche m_d) puis placé dans un dessiccateur dans lequel la pression est abaissée à $2 \pm 0,7$ kPa pendant 2 heures grâce à une pompe à vide. De l'eau déminéralisée est dégazée dans un second dessiccateur pendant 24 heures (Figure V - 11 : A).

Les deux dessiccateurs sont ensuite reliés afin de pouvoir imbiber progressivement l'échantillon. Le réajustement du niveau d'eau est effectué au fur et à mesure de la progression de la frange capillaire (Figure V - 11 : A : B et C).

Après immersion complète, la pression atmosphérique est rétablie dans le dessiccateur et l'échantillon est laissé sous l'eau pendant 24 heures (Figure V - 11 : A : D). Deux pesées sont alors effectuées. La première se réalise sous l'eau et donne la masse hydrostatique m_h l'échantillon. La deuxième est effectuée à l'air libre et donne la masse saturée m_s de l'échantillon.

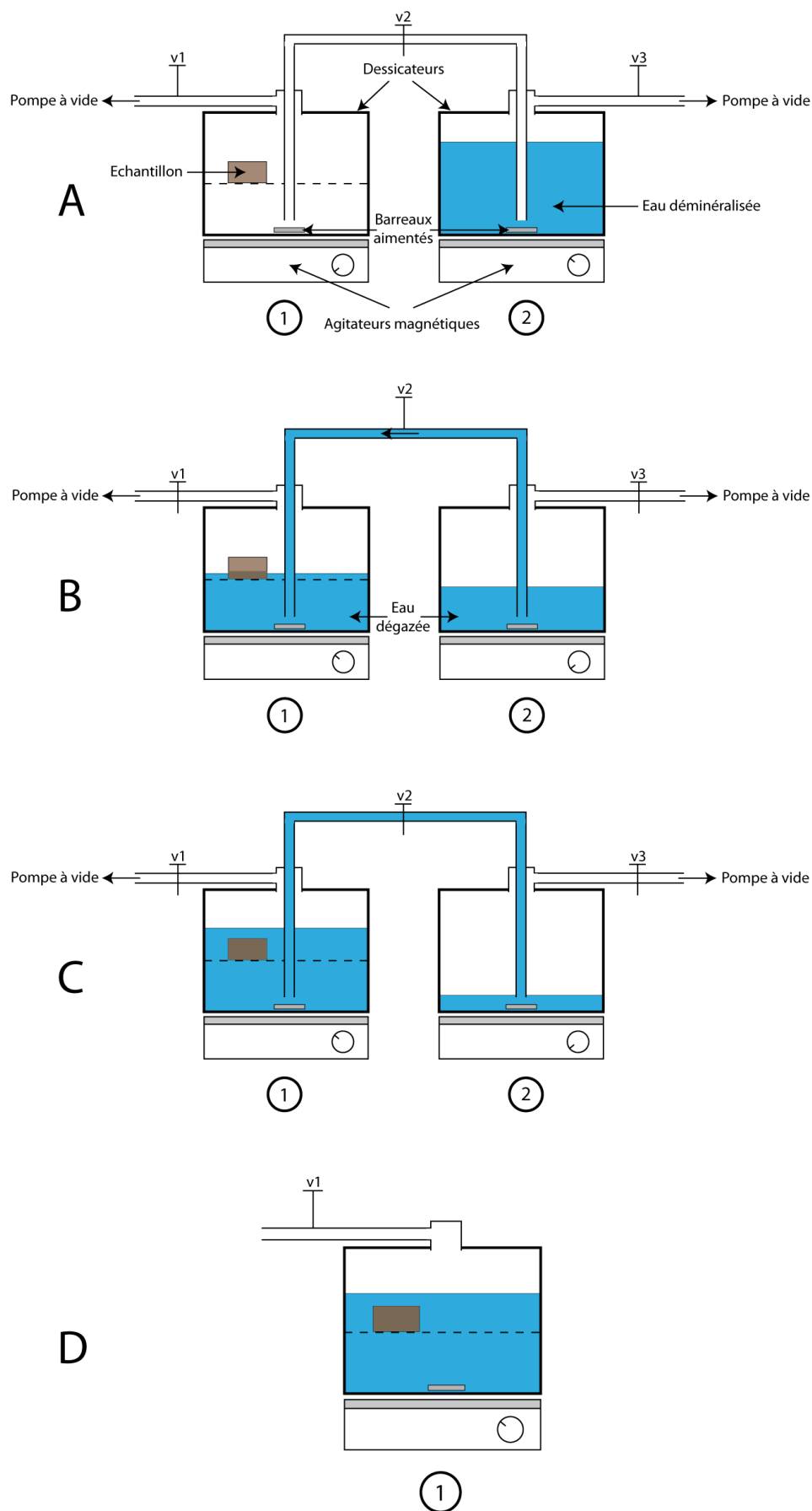


Figure V - 11 : Mode opératoire des mesures de porosité totale à l'eau.

c. CALCUL DE LA POROSITÉ TOTALE À L'EAU

La soustraction de la masse hydrostatique à la masse de l'échantillon saturé permet d'obtenir la masse du volume d'eau déplacé (théorème d'Archimède). Il est alors possible de calculer le volume total de l'échantillon en divisant cette masse par la masse volumique de l'eau :

$$V_t = \frac{m_s - m_h}{\rho_{\text{eau}}}$$

V_t : volume total de l'échantillon (dm^3) ;
 m_s : masse de l'échantillon saturé (g) ;
 m_h : masse hydrostatique (g) ;
 ρ_{eau} : masse volumique de l'eau ($1000 \text{ g}.\text{dm}^{-3}$).

La soustraction de la masse de l'échantillon sec à la masse de l'échantillon saturé permet d'obtenir la masse du volume poreux rempli d'eau. La division de cette masse par la masse volumique de l'eau permet quant à elle d'obtenir la valeur du volume poreux :

$$V_p = \frac{m_s - m_d}{\rho_{\text{eau}}}$$

V_p : volume poreux de l'échantillon (dm^3) ;
 m_s : masse de l'échantillon saturé (g) ;
 m_d : masse de l'échantillon sec (g) ;
 ρ_{eau} : masse volumique de l'eau ($1000 \text{ g}.\text{dm}^{-3}$).

La porosité totale N_t en % correspond au rapport entre le volume poreux et le volume total de l'échantillon. La masse volumique de l'eau ρ_{eau} s'annulant dans l'équation, la formule se simplifie sous la forme :

$$N_t = \frac{V_p}{V_t} \times 100 = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \times 100$$

d. ADAPTATION DE LA MÉTHODE AUX MATÉRIAUX ÉTUDIÉS

Les premiers tests réalisés se sont avérés peu concluants à cause de la mauvaise cohérence des échantillons saturés restés sous l'eau durant 24 heures.

La technique employée consiste à emballer les échantillons dans un filet de maille 5 millimètres afin d'éviter les pertes de matière qui fausseraient les mesures de porosité totale (Figure V - 12).

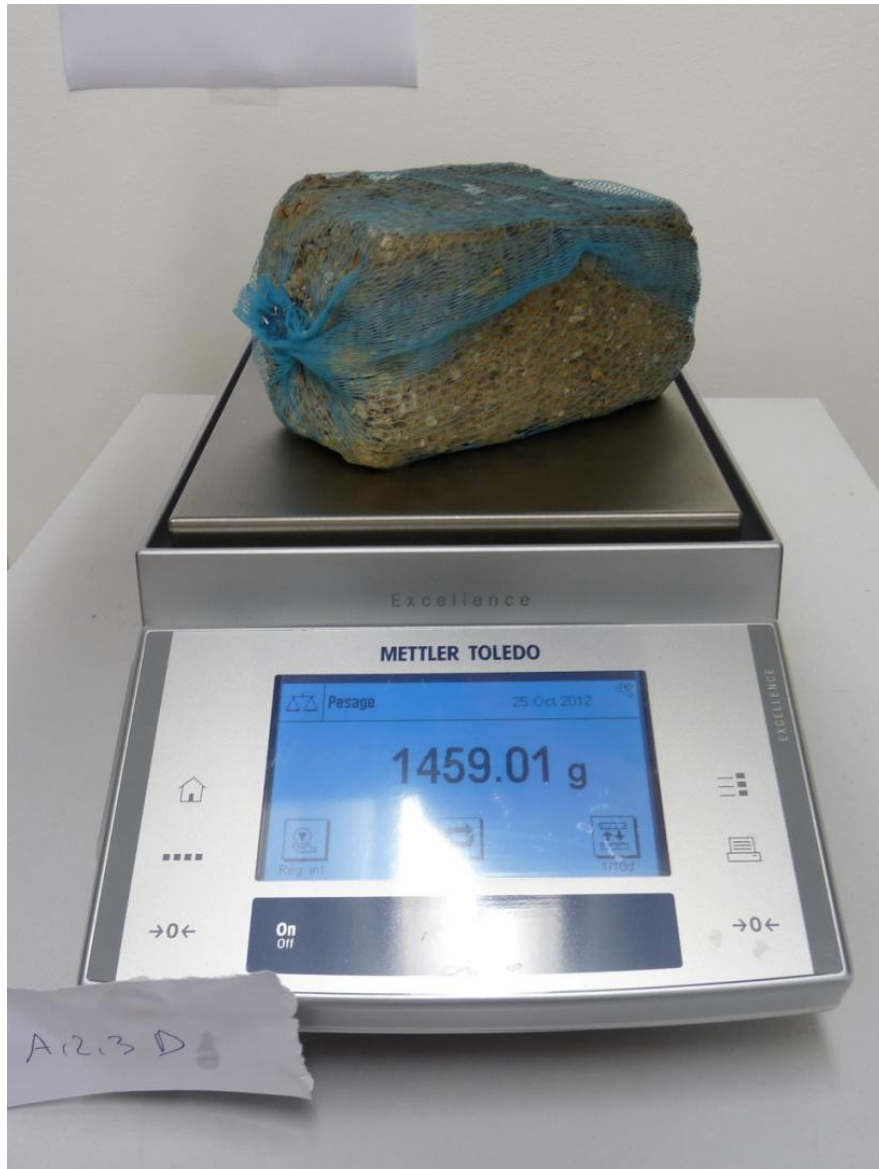


Figure V - 12 : Adaptation de la méthode de mesure de porosité totale aux échantillons étudiés.

3. POROSIMÉTRIE PAR INTRUSION DE MERCURE

Dans l'historique de la méthode de porosimétrie par intrusion de mercure qu'ils établissent en [1981], van Brakel *et al.* précisent que Smetana [1842] imagine déjà utiliser les propriétés du mercure pour étudier la structure interne du bois. Il faudra cependant attendre Washburn [1921a et b] pour que l'utilisation du mercure soit suggérée dans l'étude de la distribution des rayons d'accès aux pores dans les roches.

La porosimétrie par intrusion de mercure est aujourd'hui l'une des techniques les plus utilisées pour caractériser la structure poreuse des milieux naturels ou artificiels [Sasanian et Newson, 2013 ; Clarkson *et al.*, 2013 ; Chen et Wu, 2013 ; López-Arce *et al.*, 2013].

Comme la porosimétrie à l'eau, elle permet de connaître la valeur de porosité totale N_{Hg} mais elle fournit en plus la répartition du volume de mercure injecté dans les différentes parties du réseau poreux en fonction de la taille des interconnexions leurs donnant accès.

a. THÉORIE

➤ TENSION D'INTERFACE FLUIDE-FLUIDE : TENSION DE SURFACE

La surface de séparation de deux fluides non miscibles en contact l'un avec l'autre se comporte comme une membrane élastique tendue de façon uniforme [Rousset-Tournier, 2001]. La tension appliquée sur cette interface est appelée « tension de surface » [Defay et Prigogine, 1966 ; Joanny, 1985 ; Gueguen et Palciauskas, 1992]. Par rapport à l'air, cette tension est habituellement appelée tension superficielle.

➤ TENSION D'INTERFACE FLUIDE-SOLIDE : MOUILLABILITÉ

▪ ÉQUATION DE YOUNG :

Lorsqu'une goutte de liquide est en contact avec un solide en présence d'air, la surface du liquide et la surface plane du solide forment un angle α appelé « angle de contact ».

En projection sur le plan solide, l'équilibre mécanique se traduit par l'équation de Young [1805] (Figure V - 13) :

$$\sigma_{lg} \cdot \cos \alpha = \sigma_{sg} - \sigma_{sl}$$

σ_{lg} : tension interfaciale liquide-gaz ($N.m^{-1}$) ;
 α : angle de contact entre le liquide et le solide ($^{\circ}$) ;
 σ_{sg} : tension interfaciale solide-gaz ($N.m^{-1}$) ;
 σ_{sl} : tension interfaciale solide-liquide ($N.m^{-1}$).

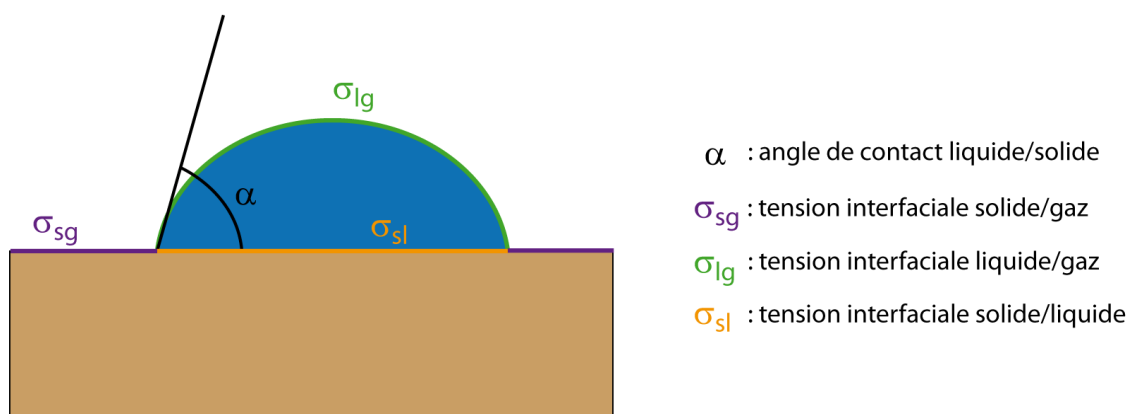


Figure V - 13 : Illustration de l'équation de Young [1805] en projection sur le plan solide.

■ **MOUILLABILITÉ :**

La valeur de l'angle α est utilisée pour qualifier le mouillage d'un fluide. Si $\alpha < 90^\circ$, le liquide est dit mouillant et si $\alpha > 90^\circ$, le liquide est dit non-mouillant (Figure V - 14 : A et C). Enfin, si $\alpha = 0^\circ$, le mouillage est dit parfait (Figure V - 14 : B).

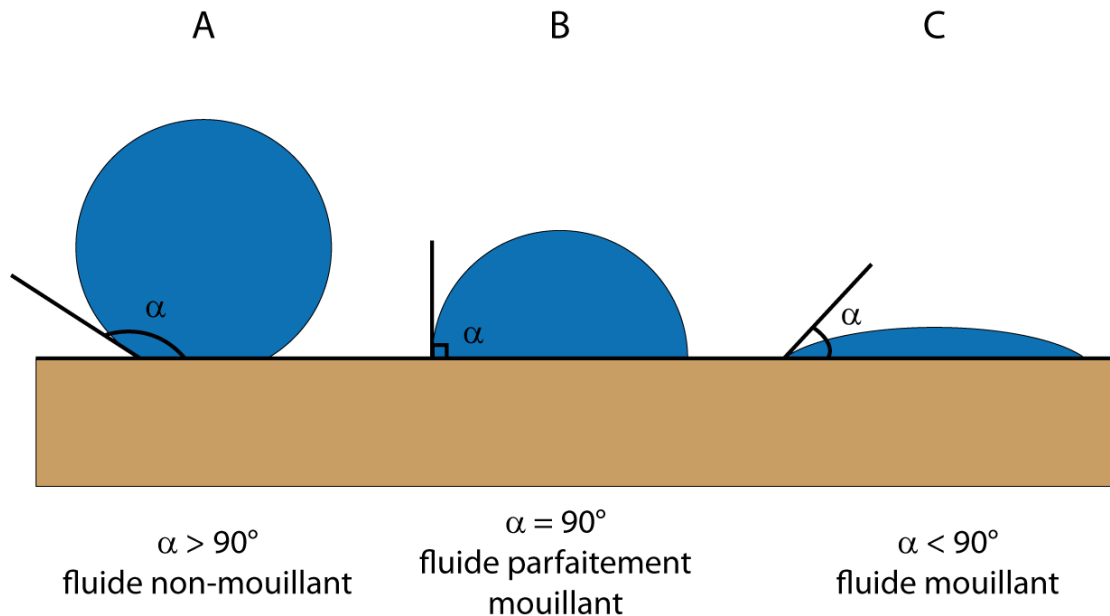


Figure V - 14 : Illustration du concept de mouillabilité d'un liquide.

Dans des conditions données, l'angle de contact entre un liquide et un solide est généralement constant. Cependant, cet angle peut varier en fonction des mouvements du liquide. Par exemple, une goutte d'eau pure forme un angle de 0° sur une surface parfaitement lisse et propre mais cet angle pourra varier sur une surface rugueuse ou couverte de couches adsorbées hydrophobes [Bouasse, 1924 ; Cassie et Baxter, 1944].

■ **PRESSION CAPILLAIRE**

La pression capillaire est la différence de pression qui existe de chaque côté du ménisque séparant deux fluides non-miscibles au sein d'un capillaire (Figure V - 15) :

$$P_c = P_0 - P_l$$

P_c : pression capillaire (Pa) ;

P_0 : pression du gaz (Pa) ;

P_l : pression du liquide (Pa).

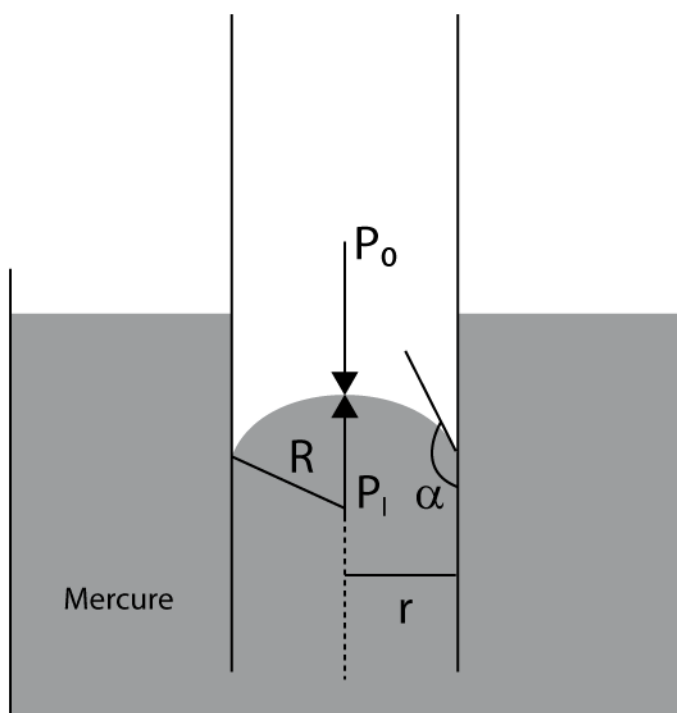


Figure V - 15 : Représentation schématique des différentes variables en jeu lors de l'ascension d'un liquide dans un tube capillaire (exemple du mercure) : P_0 : Pression du gaz ; P_1 : Pression du liquide ; α : angle de contact ; r : rayon du ménisque ; R : rayon de courbure du ménisque.

■ LA LOI DE LAPLACE

La loi de Laplace [1806] relie la pression capillaire aux rayons de courbure du ménisque et à la tension superficielle lorsqu'un capillaire est plongé dans un liquide en négligeant les effets de la gravité :

$$P_c = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

σ : tension superficielle (N.m^{-1}) ;
 R_1 et R_2 : rayons décrivant le ménisque (m).

Lorsque le capillaire est de petit diamètre, le ménisque est considéré comme sphérique et il n'existe donc qu'un seul rayon de courbure R :

$$P_c = \frac{2\sigma}{R}$$

Le rayon de courbure du ménisque peut s'exprimer en fonction du rayon r du capillaire par la relation :

$$R = \frac{r}{\cos \alpha}$$

L'équation de Laplace peut alors s'exprimer en fonction du rayon « r » du capillaire :

$$P_c = \frac{2\sigma \cos \alpha}{r}$$

Cette équation montre que la pression capillaire est inversement proportionnelle au rayon du capillaire.

b. APPLICATION À LA POROSIMÉTRIE AU MERCURE

Pour la porosimétrie par intrusion de mercure, l'équation de Laplace va permettre de relier la pression capillaire au rayon du pore considéré comme un simple capillaire.

La méthode consiste en l'injection de mercure à une pression donnée dans une enceinte sous un vide quasi-parfait ($\approx 2,6$ Pa) [Purcell, 1949 ; Pellerin, 1980 ; Bourbie *et al.*, 1986 ; Pittman, 1984 et 1992]. La vapeur de mercure (fluide mouillant : $\alpha < 90^\circ$) se trouve donc en équilibre avec le mercure liquide (fluide non-mouillant : $\alpha > 90^\circ$). La première goutte de mercure qui entre dans la cloche se vaporise instantanément. L'enceinte et le milieu poreux se trouvent donc saturé en vapeur de mercure et à la pression de vapeur saturante du mercure [Thomachot, 2002]. Le mercure liquide (fluide non-mouillant) ne peut pénétrer dans les capillaires fins si aucune pression n'est exercée. Il faut donc appliquer une pression supplémentaire pour que ce mercure puisse pénétrer à l'intérieur du réseau poreux de l'échantillon. L'angle de contact entre le mercure et la plupart des minéraux [Fripiat *et al.*, 1971] est compris entre 139 et 191° ; la valeur habituellement retenue pour les calculs est de 140° .

Pour le mercure, l'expression de la pression capillaire, qui est la différence de pression entre le fluide mouillant et le fluide non-mouillant, peut donc s'écrire :

$$P_c = P_{Hg} - P_{vap}$$

Lors de l'intrusion de mercure, la pression exercée (P_{Hg}) est parfaitement contrôlée. La pression de vapeur saturante du mercure n'étant que de $133,32$ Pa à 25°C , elle peut donc être considérée comme négligeable devant la pression appliquée sur le mercure liquide :

$$P_{Hg} \gg P_{vap}$$

Dans l'avant-dernière équation, la pression imposée au mercure liquide P_{Hg} devient donc égale à la pression capillaire P_c : $P_{Hg} = P_c$.

Dans l'équation de Laplace, la substitution de P_c par P_{Hg} permet d'obtenir une valeur de rayon d'accès aux pores pour chaque valeur de pression appliquée :

$$P_{Hg} = \frac{2\sigma \cos \alpha}{r} \Leftrightarrow r = \frac{2\sigma \cos \alpha}{P_{Hg}}$$

r : rayon d'accès aux pores (m) ;

σ : tension superficielle ($N.m^{-1}$) ;

α : angle de contact ($^\circ$) ;

P_{Hg} : pression appliquée sur le mercure (Pa).

Pour le mercure, la tension superficielle à 20°C est égale à 0,487 $N.m^{-1}$ et l'angle de contact retenu est de 140°. Dans la pratique, c'est la valeur absolue du cosinus de l'angle de contact qui est retenue. L'expression du rayon d'accès aux pores en fonction de la pression appliquée sur le mercure liquide devient donc :

$$r = \frac{2\sigma |\cos \alpha|}{P_{Hg}} \approx \frac{0,75}{P}$$

Pour chaque valeur de pression appliquée sur le mercure liquide il est donc possible d'associer une taille de rayon d'accès aux pores ainsi qu'un volume de mercure injecté.

Il est très important de toujours garder en mémoire que la porosimétrie par intrusion de mercure ne fournit pas la taille des pores mais celle de leurs accès [Wardlaw, 1976 ; Dullien, 1979 ; Chatzis et Dullien, 1981 ; Good et Mikhail, 1981 ; Melas et Friedman, 1992 ; Netto, 1993]. Il ne faut donc pas parler de rayon (ou diamètre) de pore lorsque l'on utilise la porosimétrie par intrusion de mercure (Figure V - 16).

C. L'ESSAI POROSIMÉTRIQUE

L'essai porosimétrique s'effectue en deux temps. Une première phase correspond à l'intrusion du mercure dans l'échantillon. La seconde consiste à l'extrusion du mercure injecté durant la première phase.

➤ INTRUSION DU MERCURE

L'intrusion de mercure est réalisée en deux temps : les mesures en basses pressions (du vide jusqu'à la pression atmosphérique) puis celles en hautes pressions (de la pression atmosphérique aux pressions les plus hautes).

L'échantillon d'un volume moyen de 1,5 cm^3 est séché à l'étuve jusqu'à masse constante puis placé dans la cloche du pénétromètre (Figure V - 17). Le système est ensuite placé dans le port « basses pressions » du porosimètre (Figure V - 21). Le vide est alors créé dans le pénétromètre et l'intrusion de mercure peut débuter.

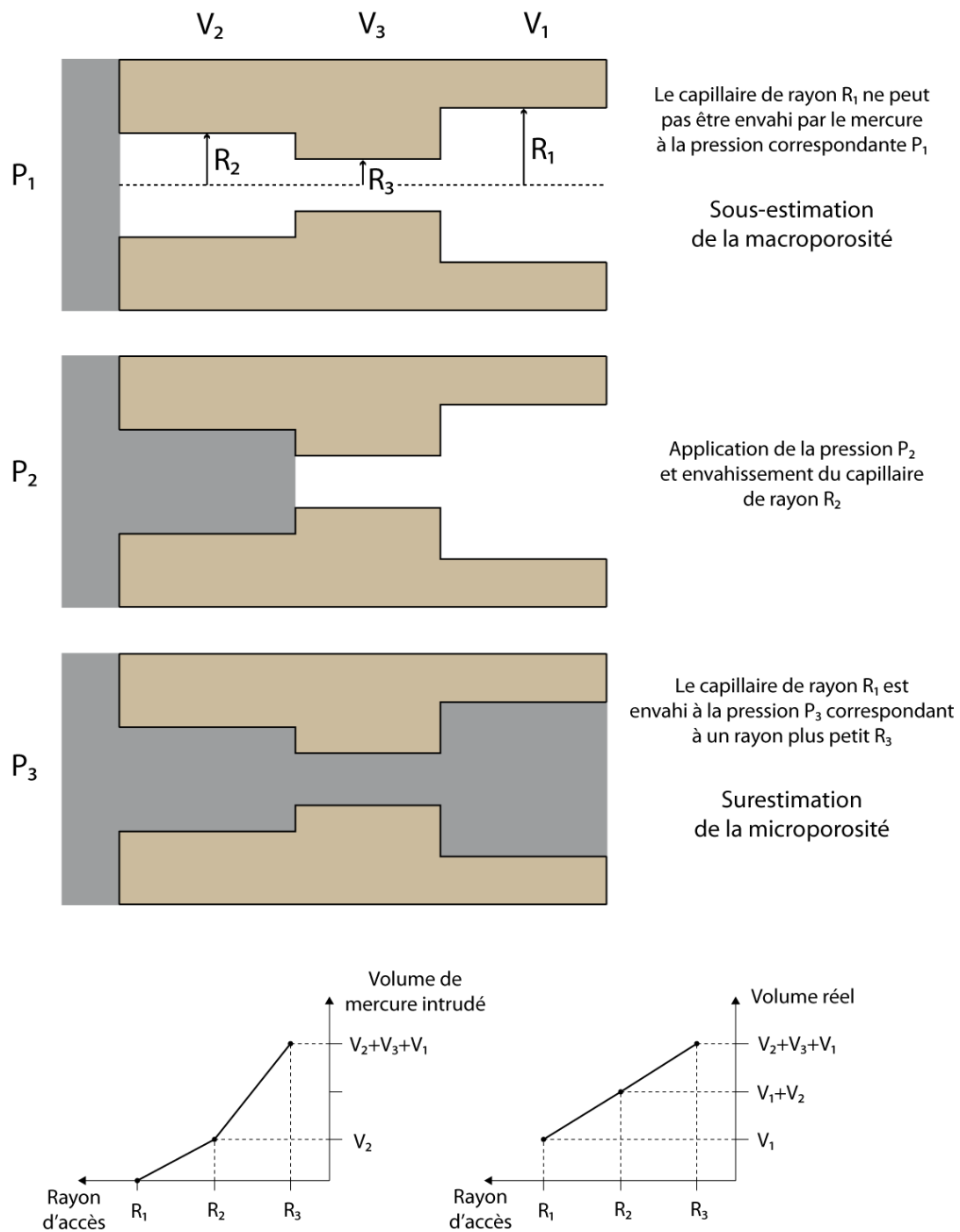


Figure V - 16 : Schéma explicatif de la notion de rayon d'accès aux pores essentielle en porosimétrie par intrusion de mercure ; sous-estimation de la macroporosité et surestimation de la microporosité [modifié d'après Thomachot, 2002 et Bousquié, 1979].

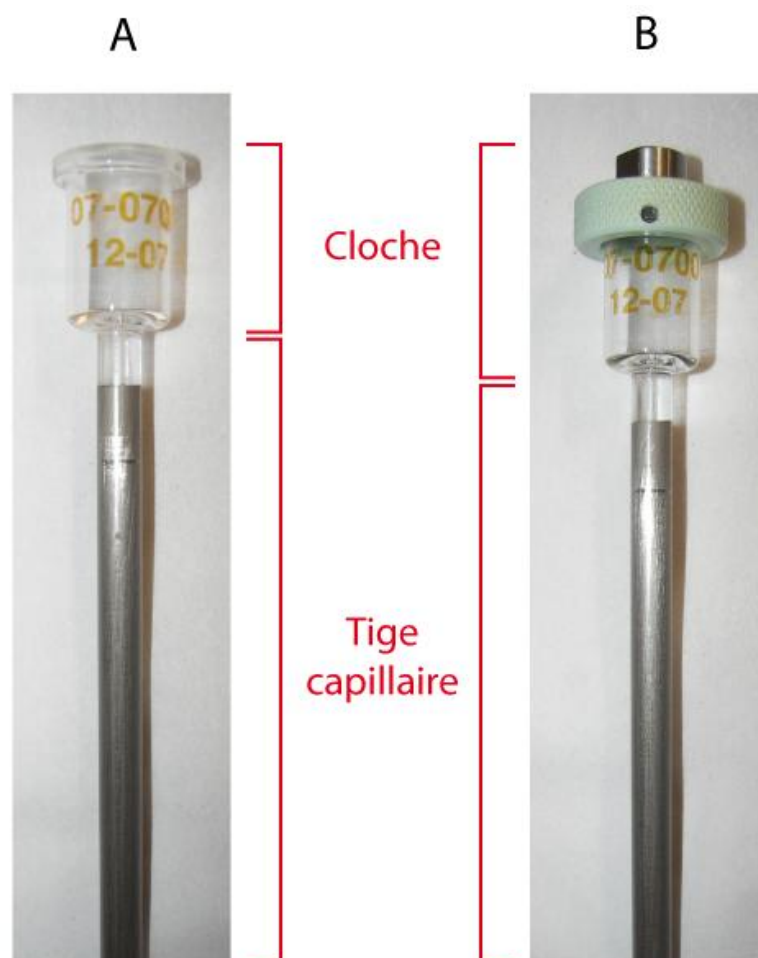


Figure V - 17 : Pénétrromètre utilisé en porosimétrie par intrusion de mercure : A : cloche ouverte et B : cloche fermée.

■ LA MESURE EN BASSES PRESSIONS :

L'intrusion de mercure est alors réalisée par augmentation incrémentale progressive de la pression jusqu'à la pression atmosphérique. Le mercure envahit progressivement le milieu poreux. L'équilibre s'établit pour chaque incrément de pression appliqué par résorption de la vapeur de mercure dans le mercure liquide (fluide non-mouillant). La pénétration n'étant pas instantanée, les porosimètres sont équipés d'un dispositif de régulation de pression jusqu'à stabilisation à la valeur de consigne. Le volume de mercure pénétré est mesuré après stabilisation à l'aide de la position du ménisque dans la tige capillaire du pénétrromètre (Figure V - 17) par une mesure d'impédance [Daïan, 2007].

A la fin de l'analyse en basses pressions, tous les pores ayant un rayon d'accès supérieur ou égal à $7,5 \mu\text{m}$ sont envahis. L'espace libre dans la cloche ainsi que la tige du pénétrromètre sont également envahis par le mercure.

■ **LA MESURE EN HAUTES PRESSIONS :**

Le système (pénétrromètre + échantillon) partiellement rempli de mercure est alors placé dans le port « *hautes pressions* » afin de pouvoir appliquer progressivement les pressions supérieures à la pression atmosphérique (Figure V - 21).

➤ **EXTRUSION DU MERCURE**

Durant cette deuxième phase, la pression imposée diminue par incrément et le mercure liquide quitte le réseau poreux et laisse ce dernier s'imbibber progressivement par la vapeur de mercure (fluide mouillant) en commençant par les capillaires les plus fins.

Sur les courbes de porosimétrie par intrusion de mercure, la courbe correspondant à cette phase de retrait ne coïncide pas à la courbe d'intrusion de la phase d'intrusion (Figure V - 18) ce qui indique qu'une partie du mercure liquide n'est pas évacué du réseau poreux. Ceci est dû à différents phénomènes de piégeage.

➤ **COURBES DE RESTITUTION**

Les courbes de restitution des essais au porosimètre à mercure se présentent sous la forme de graphiques dont l'axe des abscisses représente les rayons d'accès aux pores (en μm) sur une échelle logarithmique généralement en ordre inverse (Figure V - 18).

L'axe des ordonnées peut être utilisé pour représenter différentes valeurs. L'intrusion cumulée de mercure peut d'abord y être figurée (Figure V - 18 : A). Il est cependant possible d'y faire figurer l'intrusion incrémentale, l'intrusion différentielle, *etc.*. Dans cette étude, c'est la représentation différentielle logarithmique (dérivée au logarithme du rayon) qui a été choisie (Figure V - 18 : B). Ce mode de représentation permet de lisser les courbes incrémentales tout en gardant les modes au niveau des rayons d'accès aux pores leur correspondant [Thiery *et al.*, 2003]. Le calcul effectué automatiquement par le logiciel du porosimètre est défini selon l'équation :

$$I_{r_i} = \frac{-I_{r_{i-1}}}{\log r_i - \log r_{i-1}}$$

I_{r_i} : intrusion différentielle logarithmique pour un rayon i donné (mL.g^{-1}) ;

$I_{r_{i-1}}$: intrusion incrémentale sur l'intervalle de rayons $[i ; i-1]$ (mL.g^{-1}) ;

r_i et r_{i-1} : rayons d'accès aux pores de l'intervalle considéré (μm).

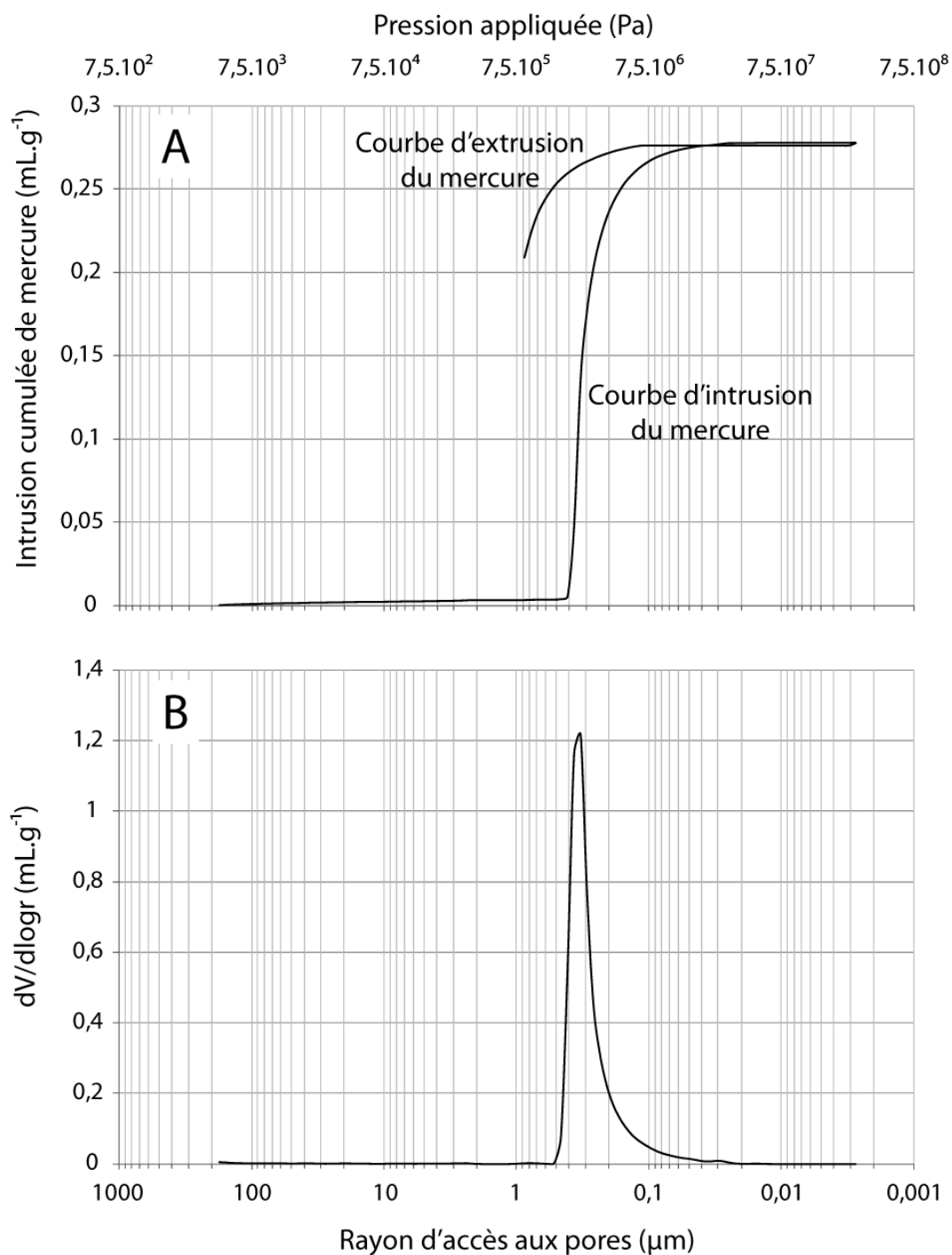


Figure V - 18 : Courbes théoriques d'un essai porosimétrique : A : Intrusion cumulée ; B : dérivée au logarithme du rayon.

➤ OUTILS DE DESCRIPTION DE L'ALLURE DES COURBES

Il existe différents outils permettant d'aider à décrire les courbes de porosimétrie au mercure. Certains caractérisent l'allure générale de la courbe (homogénéité ou hétérogénéité de la répartition des rayons d'accès aux pores sur l'ensemble du spectre porosimétrique...) alors que d'autres vont permettre de dépouiller le spectre.

▪ **LES FAMILLES DE PORES ET LE RAYON D'ACCÈS :**

Il existe différents paramètres qui permettent d'apporter des informations supplémentaires sur le spectre porosimétrique. Le seuil de percolation, par exemple, est la pression (ou le rayon) en dessous de laquelle aucun capillaire ouvert n'est accessible [Remy, 1993]. Une méthode de double tangentes sécantes imposées sur la partie positivement bombée de la courbe d'intrusion cumulée permet d'obtenir une valeur de rayon appelé « rayon d'accès » [Rousset-Tournier, 2001 ; Thomachot, 2002] ou encore « rayon seuil » [Beck, 2006]. L'inconvénient de cette valeur est qu'elle ne reflète pas les pics (ou modes) observés sur les courbes d'intrusion incrémentales (les mêmes que ceux observés sur les courbes d'intrusion différentielle logarithmiques).

Dans ce travail seront donc utilisées des valeurs appelées « rayons d'accès moyens » R_m . Ces rayons correspondent aux abscisses des points d'inflexion de la courbe d'intrusion cumulée et sont des rayons d'accès pour lesquels le volume intrusif est maximal [Rémy, 1993]. Les différents points d'inflexion sont déterminés graphiquement grâce à la méthode des tangentes habituelle (utilisée par exemple pour déterminer l'équivalence lors d'un titrage pH-métrique) (Figure V - 19).

Un spectre porosimétrique présente un seul ou une succession de modes plus ou moins bien définis. Ces modes pourront soit former chacun une famille de rayons d'accès aux pores à part entière, soit être regroupés.

▪ **LE COEFFICIENT DE DISPERSION C_d :**

L'étalement des courbes de porosimétrie par intrusion de mercure est caractérisé par le coefficient de dispersion [Wardlaw *et al.*, 1988 ; Géraud, 1991 ; Rémy, 1993] :

$$C_d = \frac{P_{80} - P_{20}}{P_{50}}$$

C_d : coefficient de dispersion (sans unité) ;

P_{20} , P_{50} et P_{80} : pressions d'injection pour l'envahissement de respectivement 20, 50 et 80 % du réseau poreux (Pa).

Un coefficient de dispersion $C_d < 1$ témoigne d'une répartition monomodale où les rayons d'accès aux pores sont resserrés autour d'une valeur [Rémy, 1993].

Un coefficient de dispersion $C_d > 1$ témoigne d'une distribution étalée des rayons d'accès aux pores. Selon Rémy [1993], cette catégorie regroupe :

- les réseaux poreux qui présentent tout de même une répartition des rayons d'accès aux pores monomodale mais de distribution étalée ;
- les réseaux poreux bimodaux et multimodaux.

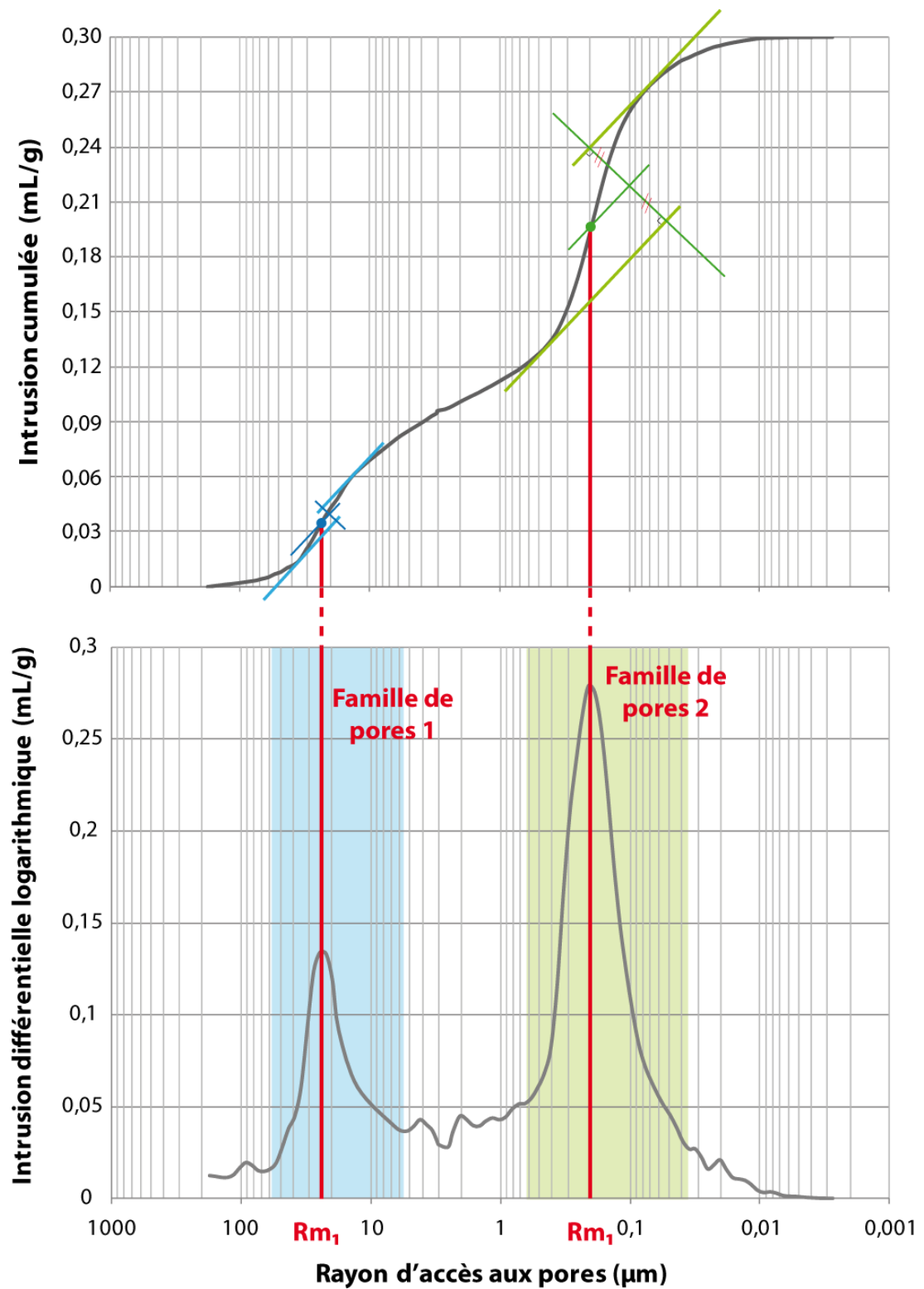


Figure V - 19 : Méthode de détermination des rayons moyens d'un échantillon par la méthode des tangentes.

➤ PIÉGEAGE DU MERCURE

Les courbes retrait du mercure n'étant pas analysées dans cette étude, la complexité des phénomènes de piégeage de mercure ne seront évoqués de manière succincte.

Le piégeage s'effectue principalement dans les macropores du réseau poreux dont l'accès se réalise par l'intermédiaire de capillaires plus fins. Lorsque la pression en cours de diminution atteint la valeur correspondant au rayon des capillaires donnant accès au macropore, ceux-ci se vident du mercure liquide dont ils étaient remplis. Des ruptures dans la continuité du réseau de mercure interviennent alors au niveau de la transition entre capillaires fins et macropore ce qui conduit à un piégeage du mercure dans le macropore par ségrégation [Wardlaw et McKellar, 1981].

➤ DIMENSION FRACTALE D

La dimension fractale D d'un solide est un paramètre qui caractérise le degré de rugosité de sa surface [Avnir, 1989].

Une surface parfaitement plane possède une aire qui peut être calculée en fonction d'une dimension caractéristique. La surface d'une sphère de rayon r sera par exemple égale à $4 \cdot \pi \cdot r^2$.

Toute rugosité ou porosité de surface présente sur cette sphère en augmente la surface jusqu'à une configuration extrême dans laquelle la surface de la sphère serait tellement poreuse que l'ensemble de son volume pourrait être occupé au sein de sa paroi. Dans cette configuration, l'aire de la surface serait égale au volume de la sphère $\left(\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3\right)$.

Les solides poreux réels présentent des surfaces qui sont proportionnelles à r^D avec une dimension fractale D qui est comprise entre 2 pour les surfaces planes (2 dimensions → aire) et 3 pour les surfaces extrêmement rugueuses (3 dimensions → volume).

Pfeifer et Avnir [1983] ont montré que pour les surfaces porales, la distribution des tailles de pores $-\frac{dV}{dr}$ peut s'exprimer sous la forme :

$$-\frac{dV}{dr} = k_1 \cdot r^{(2-D)}$$

k_1 : constante de proportionnalité (sans unité) ;

r : rayon de pore (m).

Le passage par l'équation de Washburn permet de réécrire cette équation en fonction de la pression P appliquée :

$$\frac{dV}{dP} = k_2 \cdot P^{(D-4)}$$

k_2 : autre constante de proportionnalité (sans unité) ;

P : pression appliquée (Pa).

L'utilisation des logarithmes permettent ensuite de linéariser cette expression sous la forme d'une fonction affine du premier degré :

$$\log \frac{dV}{dP} = (D - 4) \cdot \log(P) + \log(k_2)$$

Les valeurs de dimensions fractales D peuvent donc être déduites de la pente des courbes sur les graphiques représentant $\log\left(\frac{dV}{dP}\right)$ en fonction de $\log(P)$. Les surfaces lisses ($D = 2$) présentent des pentes proches de -2, tandis que les surfaces plus rugueuses (pour lesquels D s'approche 3) présentent des pentes approchant -1.

L'observation des courbes porosimétriques révèle que des pentes constantes sont souvent rencontrées dans des gammes de pression qui coïncident avec le remplissage des pores de tailles différentes. Ainsi, chaque étape d'une intrusion cumulée peut donner une valeur de D unique qui caractérise la gamme et le type de pores particuliers remplis à une pression donnée.

Une fois les pores d'une taille donnée remplis, le volume mercure cesse de changer de façon significative et $\frac{dV}{dP}$ diminue, ce qui complique les calculs fractals dans les zones de transition entre les plages de pores de matériaux avec des distributions de taille des pores multimodales.

En porosimétrie mercure, la dimension fractale est habituellement utilisée pour caractériser un échantillon dans son ensemble et non une gamme de porosité particulière présente au sein de cet échantillon.

La valeur de dimension fractale donnée automatiquement par le logiciel du porosimètre est calculée sur ce principe. Le logiciel détermine d'abord la pression seuil P_{seuil} . Cette pression seuil correspond à la pression à laquelle la pente de la courbe est la plus forte. La pression P est ensuite remplacée par $(P - P_{seuil})$ dans la dernière équation. La dimension fractale de l'échantillon peut finalement être facilement déterminée par le coefficient directeur de la droite dans un graphique représentant le logarithme de l'intrusion cumulée en fonction du logarithme de $(P - P_{seuil})$.

➤ LIMITES DE LA MÉTHODE

La porosimétrie par intrusion de mercure présente certaines limites qui expliquent les différences observées par rapport à d'autres techniques.

La principale provient de la taille de l'échantillon analysé ($\approx 1,5 \text{ cm}^3$ qui peut poser des problèmes de représentativité. Il existe également des biais dus au spectre de rayons d'accès pris en compte lors de l'analyse porosimétrique (0,0025 à $180 \mu\text{m}$) alors que l'eau peut par exemple imbiber des pores plus petits [Hammecker, 1993].

Carrio-Schaffhauser [1987] a calculé que l'incertitude sur la porosité totale déterminée par porosimétrie par injection de mercure est de 4 %.

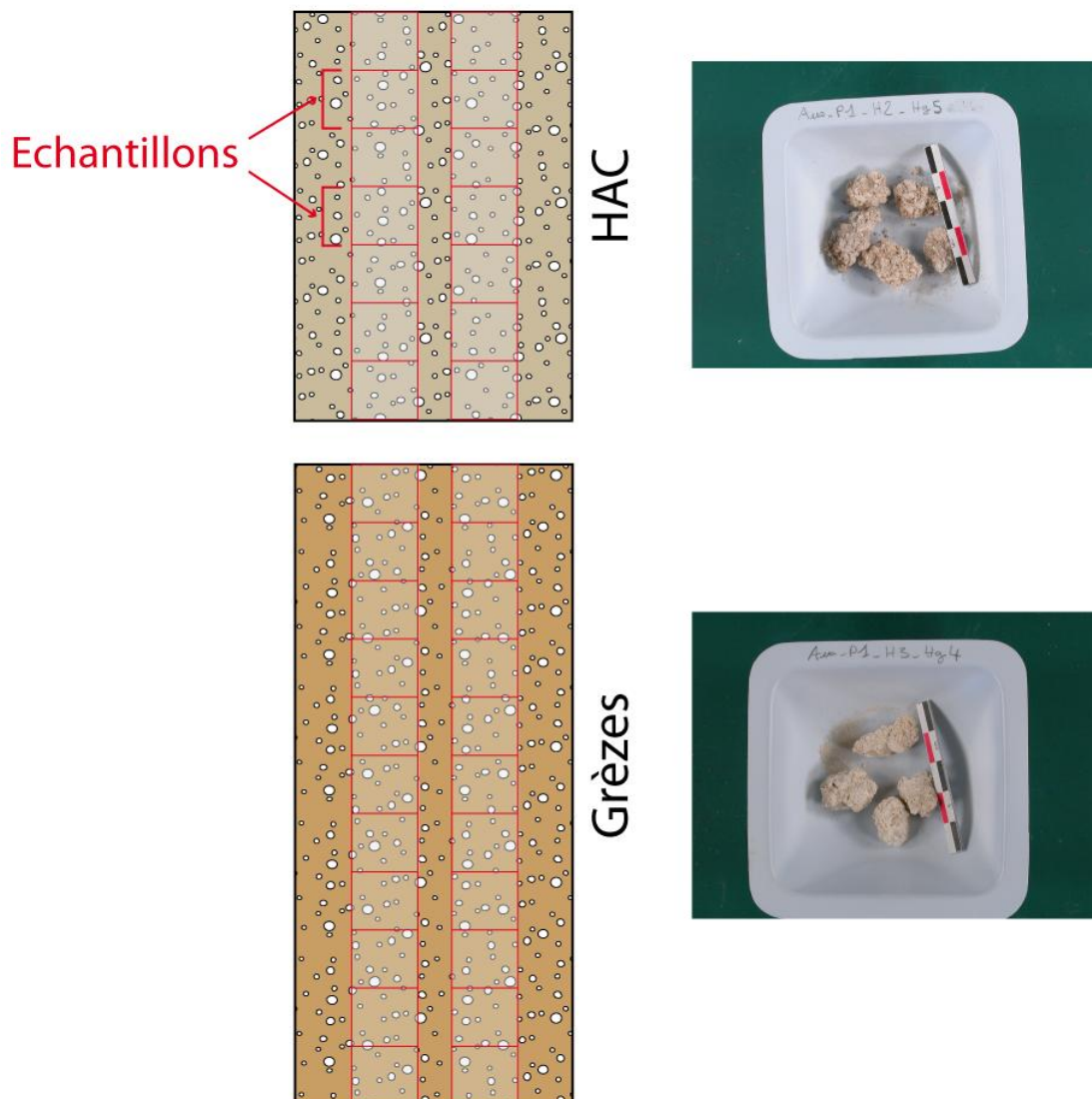


Figure V - 20 : Schéma d'échantillonnage des fragments étudiés en porosimétrie par injection de mercure.

d. ÉCHANTILLONS ÉTUDIÉS

Les échantillons utilisés pour les mesures porosimétriques par injection de mercure sont des fragments d'environ 1,5 cm³. Ces fragments ont été prélevés sur des pavés issus du sous-échantillonnage en laboratoire des blocs massif découpés à la scie sur le terrain (Figure V - 20).

Les fragments ont été prélevés successivement le long des pavés à raison de deux échantillons par niveau. Une moyenne de quinze à vingt-cinq fragments a été prélevée par niveau étudié (une centaine d'échantillons au total a été analysée) (Figure V - 20).

e. APPAREILLAGE

Les mesures de porosimétrie par injection de mercure ont été réalisées avec un porosimètre à mercure AutoPore IV 9500 Analyser distribué par la société Micromeritics (Figure V - 21).

En basses pressions, ce type d'appareil permet d'appliquer des pressions allant de 0 à 345 kPa avec une résolution de 69 Pa. Ceci permet d'étudier les réseaux poreux de l'échantillon ayant des rayons d'accès compris entre 1,8 et 180 µm.

En hautes pressions, il permet de soumettre l'échantillon à des pressions allant de la pression atmosphérique ($\approx 1013,25$ hPa) à 228 MPa. La résolution est alors de 689 Pa pour des pressions exercées allant de la pression atmosphérique à 21 MPa et de 1400 Pa pour des pressions exercées allant de 21 à 228 MPa. Cet intervalle de pressions permet d'étudier les pores de l'échantillon ayant un rayon d'accès compris entre 0,0025 et 3 µm.

VII. DATATION AU CARBONE 14

La datation au carbone ¹⁴C a été réalisée afin d'obtenir de nouvelles données quant à la cinétique de formation des HAC de Champagne-Ardenne.

La datation radiométrique par le carbone 14 se base sur le contenu en ¹⁴C d'un échantillon de matière organique. Elle permet de connaître l'âge absolu écoulé depuis la mort de l'être vivant. La période de demi-vie du ¹⁴C étant égale à 5734 ± 40 ans, cette technique permet d'obtenir un âge absolu pour des échantillons datant de quelques centaines d'années jusqu'à des âges de 50000 ans [Evin *et al.*, 2005].

Les mesures ont été réalisées par le Laboratoire Radiocarbon de Poznań en Pologne par spectrométrie de masse couplée avec un accélérateur (model 1,5 SDH-Pelletron « Compact Carbon AMS »). La calibration a été réalisée à l'aide du logiciel OxCal développé par l'unité Radiocarbon Accelerator de l'Université d'Oxford [Reimer *et*

al., 2013 ; Ramsey *et al.*, 2010]. Les calibrations obtenues par ce logiciel sont basées sur les données atmosphériques de Reimer *et al.* [2009].

Cette datation a pu être réalisée sur un fragment de charbon de bois hémicentimétrique découvert lors du prélèvement d'un bloc massif sur le site d'Aussonce-Est (Figure V - 22 et V - 23).

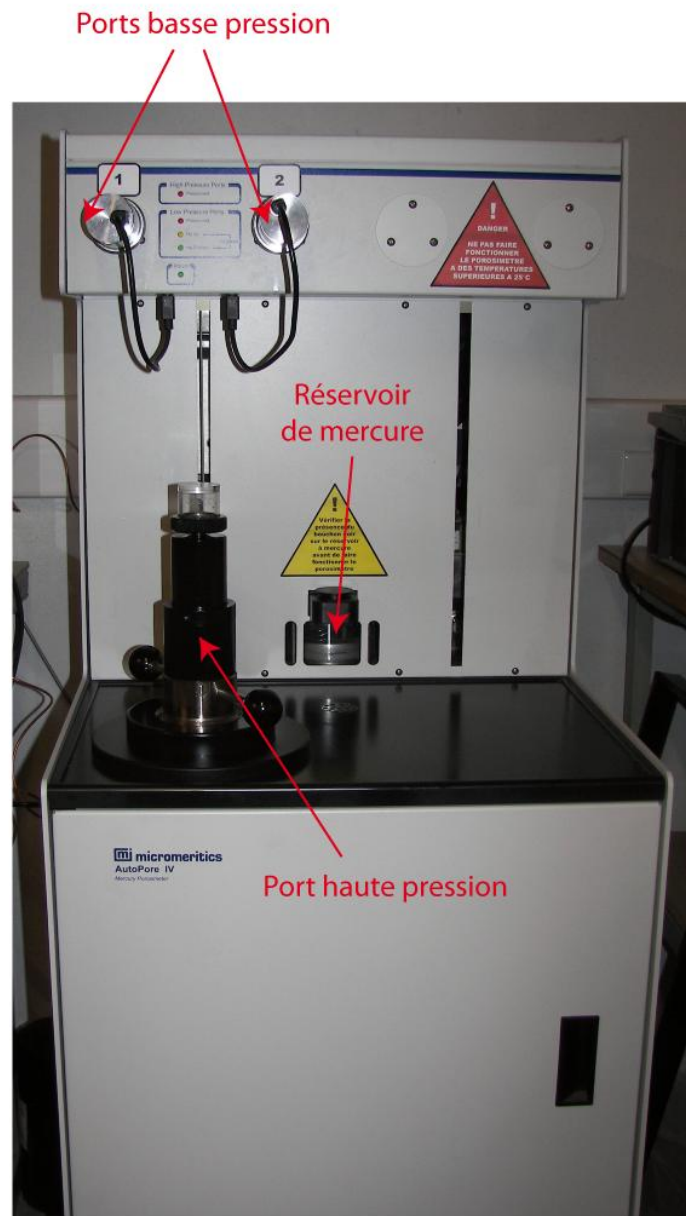


Figure V - 21 : Porosimètre par intrusion de mercure AutoPore IV 950 Analyser de Micromeritics utilisé dans le cadre de ce travail.

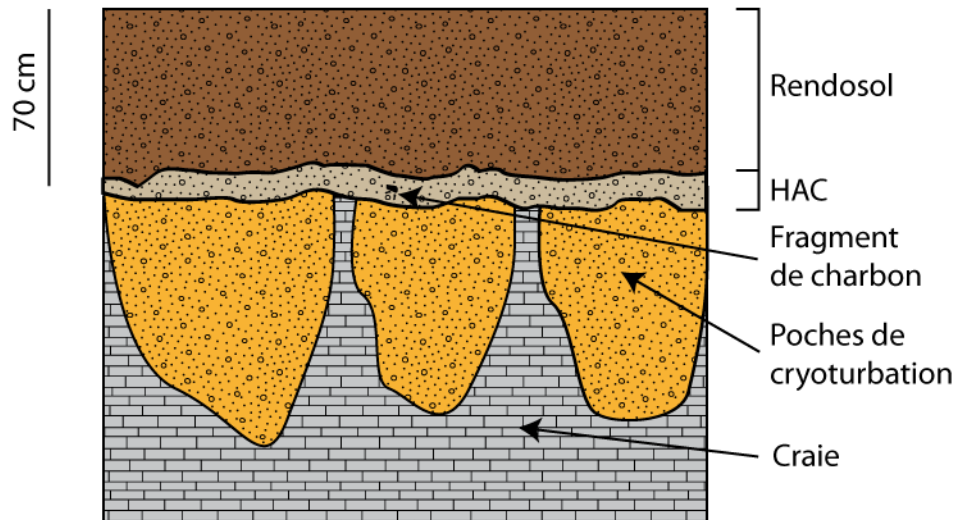


Figure V - 22 : Schéma de localisation du fragment de charbon découvert en position centrale de l'HAC prélevé sur le site d'Aussonce-Est.

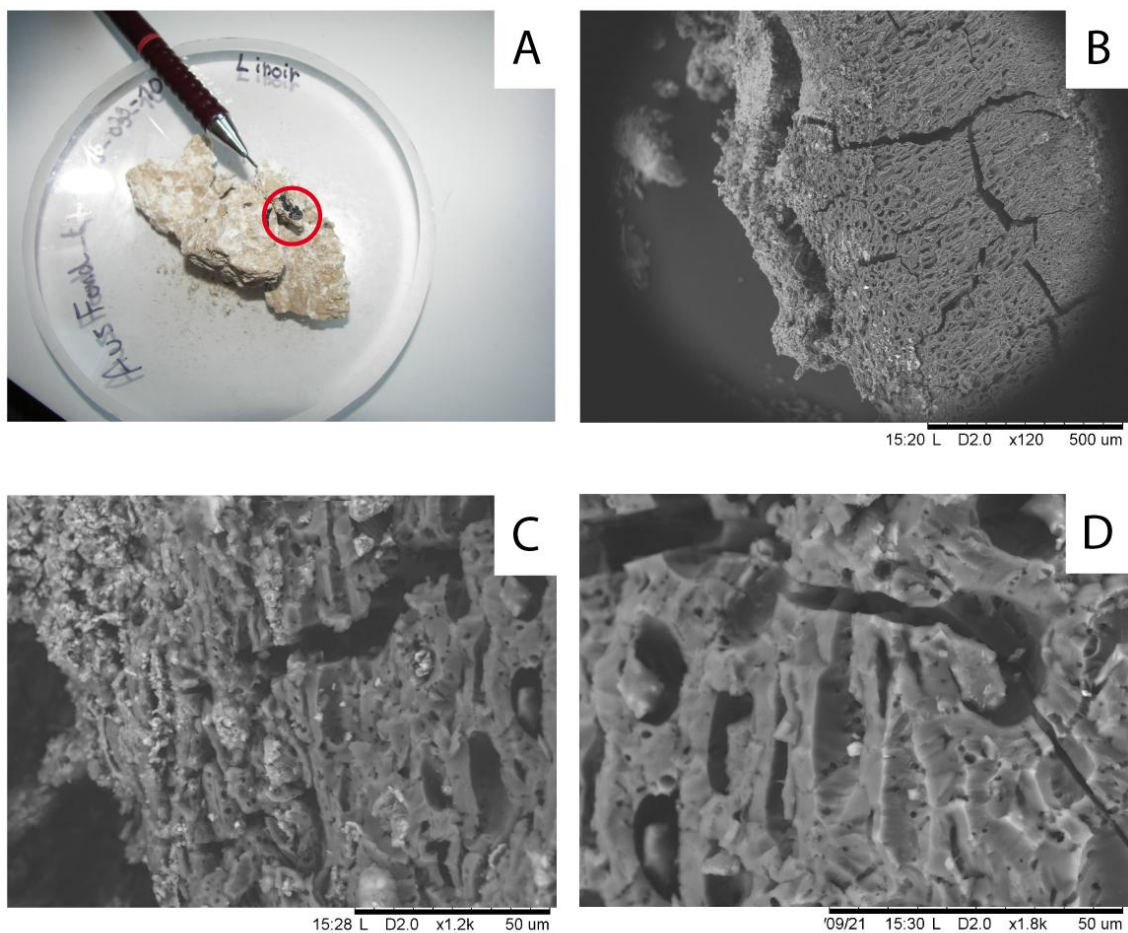


Figure V - 23 : Fragment de charbon daté au carbone 14. A : vue macroscopique ; B à D : vues au microscope électronique à balayage.

RÉSULTATS DE LA CARACTÉRISATION DES HAC

Ce chapitre présente l'ensemble des résultats issus des analyses ayant trait à la caractérisation des horizons d'accumulation carbonatées. Ces résultats sont organisés de la même façon que dans la partie précédente.

I. COLORIMÉTRIE

1. ESPACE CIE XYZ 1931

Les diagrammes de chromaticité réalisés en coordonnées x et y normalisées montrent que l'ensemble des mesures de colorimétrie obtenues sur les RENDOSOLS, les horizons d'accumulations carbonatées (HAC) ainsi que sur leurs grèzes associées montrent des valeurs rassemblées sur un gamut assez resserré sur des valeurs centrales (0,32 - 0,38 pour l'axe x et 0,33 - 0,37 pour l'axe y) (Figure VI - 1).

Les agrandissements de ce gamut permet de mettre en évidence les différences entre les trois profils étudiés (Figure VI - 1).

Une ségrégation des différents horizons est observable au sein des profils 1 et 2. Les HAC présentent en effet des valeurs plus faibles de x et y que les grèzes ($0,347 \pm 0,002$ et $0,345 \pm 0,002$ contre $0,358 \pm 0,002$ et $0,355 \pm 0,001$). Ceci se traduit par des couleurs contenant moins de nuances chaudes (rouges et jaunes) et moins de nuances affiliées aux verts. Les HAC présentent donc des teintes moins « brunes ». Cette différenciation est plus marquée dans le profil 2 que dans le profil 1 (Figure VI - 1).

Dans les profils 1 et 2 qui sont les seuls où la craie a pu être échantillonnée, le substrat crayeux se détache des autres horizons par des valeurs de x et de y plus faibles (respectivement 0,32 et 0,33). De plus, les coordonnées correspondant à ce substratum crayeux sont similaires entre les profils 1 et 2 ce qui témoigne de sa très bonne homogénéité.

Au sein du profil 3, seul le niveau correspondant au RENDOSOL se distingue ; les HAC et les grèzes ne sont pas différenciées. Ce qui se traduit sur le diagramme par l'inclusion des points correspondant à l'HAC dans ceux des grèzes (Figure VI - 1).

Deuxième partie : Caractérisation des HAC

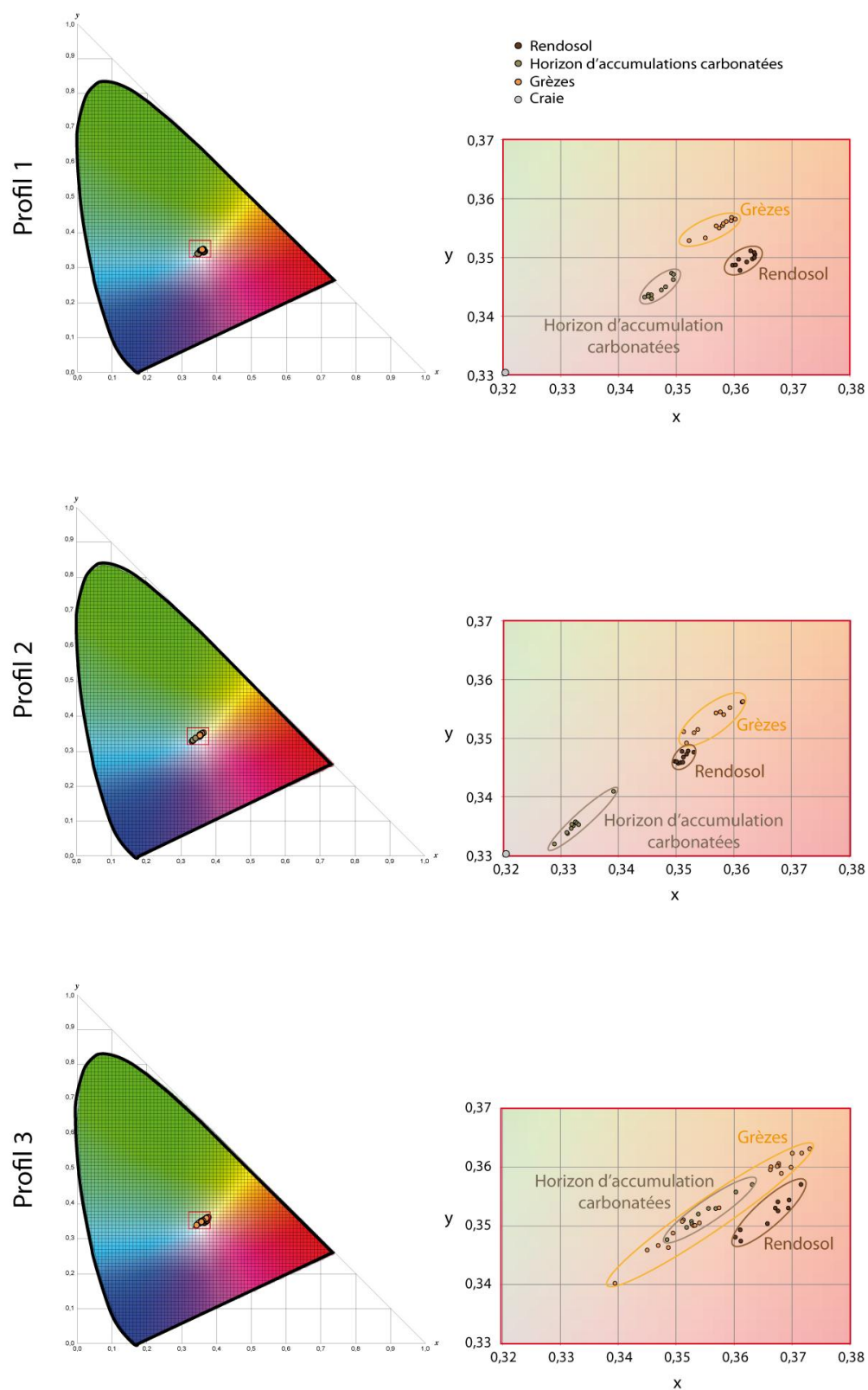


Figure VI - 1 : Visualisation des mesures de colorimétrie en coordonnées y et x dans le diagramme de chromaticité CIE-xy (observateur standard 2 °, 1931) au sein des RENDOSOLS, des HAC, des grèzes et de la craie au niveau des trois profils étudiés au Mont du Ménil. Les rectangles rouges indiquent les zones agrandies présentées sur les graphiques de droite.

L'étude colorimétrique dans le système CIE XYZ montre donc que les HAC se distinguent bien des grèzes et des RENDOSOLS. Cette différenciation se traduit par des teintes brunes plus marquées dans les grèzes et les RENDOSOLS.

Sur le terrain, l'HAC du profil 3 est visuellement peu différencié des grèzes. L'étude colorimétrique dans le système CIE XYZ confirme ces observations puisqu'il n'existe pas de différenciation colorimétrique entre l'HAC et des grèzes.

La dispersion la plus importante des points correspondant aux grèzes du profil 3 est à mettre en lien avec leur constitution. En effet, au niveau de ce profil, les grèzes sont de type graveluches qui sont constituées d'une succession de lits de nature différente. Les lits présentant des proportions importantes de cryoclastes de craie et des teneurs en matrice silto-argileuse plus faibles présenteront des teintes brunes moins prononcées que les lits affichant les caractéristiques inverses.

2. ESPACE CIE $L^*A^*B^*$

Le diagramme ternaire représentant les trois coordonnées du système $L^*a^*b^*$ permet d'observer que l'ensemble des points correspondant aux moyennes des différents horizons étudiés des trois profils sont regroupés dans des valeurs fortes de clarté L^* (Figure VI - 2).

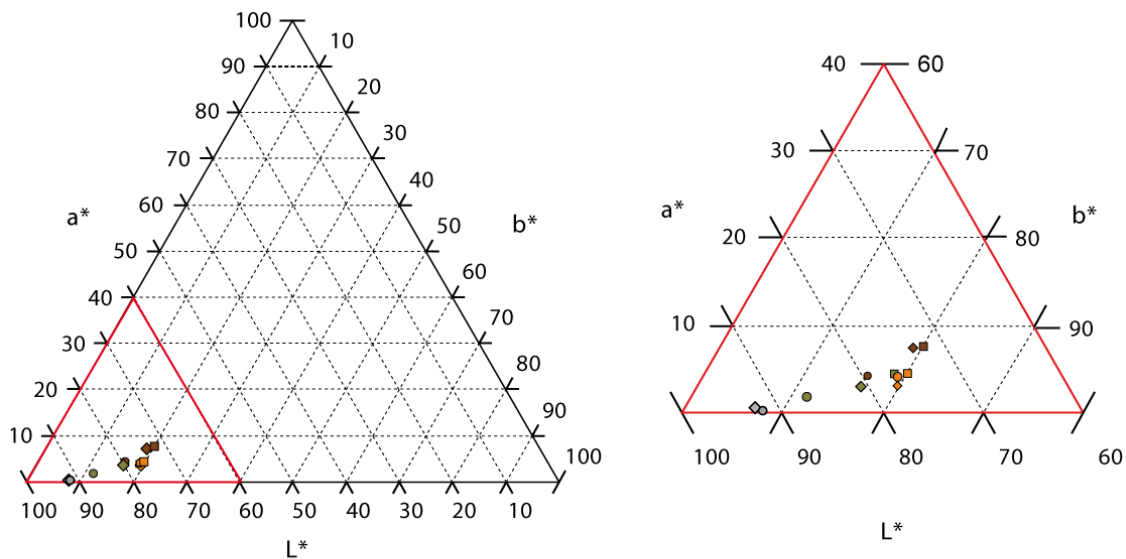
L'agrandissement de ce diagramme présenté à droite montre qu'une différenciation des horizons liée à la luminance L^* est observable (Figure VI - 2).

Les grèzes sont regroupées vers des valeurs de luminosité légèrement plus hautes que 75 %. Les RENDOSOLS présentent quant à eux des luminosités généralement plus faibles proches de 72 % excepté pour le RENDOSOL du profil 2 plus clair.

Les HAC des profils 1 et 2 présentent des valeurs de luminosité supérieures à celles des grèzes dépassant les 80 %. Ce phénomène n'est pas observé pour le profil 3 au sein duquel l'HAC présente des caractéristiques colorimétriques similaires à celles des grèzes.

Les échantillons de substrat crayeux sont quand à eux caractérisés par des valeurs de luminosité encore plus grandes que les RENDOSOLS, les HAC et les grèzes (> 92 %).

Les valeurs de ΔE^* bien supérieures à 1 calculées montrent bien la différenciation des HAC par rapport aux autres horizons des profils de sol sauf pour le profil 3 dans lequel la différenciation HAC/grèzes est très peu marquée (ΔE^* très proche de 1) (Tableau VI - 1). Les différences les plus grandes apparaissent entre les RENDOSOLS et la craie (jusqu'à 43,84 %).



Légende :

	Profil 1	Profil 2	Profil 3
Rendosol	◆	●	■
Horizon d'accumulations carbonatées	◆	●	■
Grèzes	◆	●	■
Craie	◆	●	

Figure VI - 2 : Diagramme ternaire présentant les trois composantes L^* , a^* et b^* au sein des RENDOSOLS, des HAC, des grèzes et de la craie au niveau des trois profils étudiés au Mont du Ménil.

Horizons comparés	Rendosol/ HAC	Rendosol/ grèzes	Rendosol /craie	HAC/ grèzes	HAC/ craie	Grèzes/ craie
Profil 1	13,91	16,81	43,84	4,63	30,06	28,51
Profil 2	13,92	4,14	32,51	12,65	18,63	30,7
Profil 3	13,88	12,73		1,36		

Tableau VI - 1 : Valeur du coefficient de différence de couleur $\Delta E^* L^*a^*b^*$ calculé entre le RENDOSOL, l'HAC, les grèzes ainsi que la craie pour chacun des trois profils étudiés au Mont du Ménil.

Cette étude réalisée dans le système CIE $L^*a^*b^*$ permet donc de confirmer la différenciation colorimétrique entre les HAC et les grèzes en fonction de la luminance L^* . Alors que les grèzes possèdent des caractéristiques très homogènes d'un point de

vue de la luminance (qu'il s'agisse de matériaux de remplissage de poches de cryoturbation ou de graveluches), les HAC des profils 1 et 2 sont nettement plus clairs.

L'absence de différenciation d'un point de vue de la luminance (clarté) observée entre l'HAC du profil 3 et les grèzes est ici aussi en concordance avec la faible différenciation entre les deux horizons observés sur le terrain.

II. GÉOCHIMIE

1. TENEUR EN CARBONATES

Les teneurs en carbonates de la craie sont égales pour les profils 1 et 2 localisés sur le front de taille : 880 g.kg^{-1} (Figure VI - 3). Sur les deux profils, l'HAC se détache par des teneurs en carbonates plus importantes que dans les autres horizons, RENDOSOLS et grèzes (respectivement $885,3 \pm 21,0$ contre $836,0 \pm 4,0$ et $826,7 \pm 15,1 \text{ g.kg}^{-1}$ pour le profil 1 et $896,0 \pm 0,0$ contre $860,0 \pm 4,0$ et $888,0 \pm 17,3 \text{ g.kg}^{-1}$ pour le profil 2) (Figure VI - 3). Cette quantité plus importante de carbonates dans les HAC est mieux marquée dans le profil 1 que dans le profil 2. En effet, ce dernier présente une teneur en carbonates importante dans le sommet des grèzes juste sous l'HAC (Figure VI - 3).

Le profil 3 présente des teneurs et des variations de carbonates qui diffèrent des profils 1 et 2. Les teneurs en carbonates du sol sont plus faibles ($808,0 \pm 8,0 \text{ g.kg}^{-1}$) (Figure VI - 3). Même si le centre de l'HAC présente des teneurs en carbonates plus importantes que sa base et son sommet (864 contre 784 à 800 g.kg^{-1}), ce pic de carbonates est nettement moins important que ceux observés dans les HAC des profils 1 et 2 (respectivement 804 et 896 g.kg^{-1}).

Il faut également noter que dans l'autre exemple d'HAC épais (profil 1), les teneurs les plus importantes en carbonates étaient observées à la base et au sommet et cet horizon présentait une diminution de la quantité de carbonates en son centre. Il y a donc ici un comportement inverse.

Dans ce troisième profil, les valeurs les plus importantes de carbonates mesurées (896 à 916 g.kg^{-1}) sont localisées dans les grèzes et pas uniquement dans leur partie supérieure très proche de l'HAC comme observé dans le profil 2 (Figure VI - 3). Ces valeurs correspondent aux valeurs mesurées dans l'HAC du profil 1.

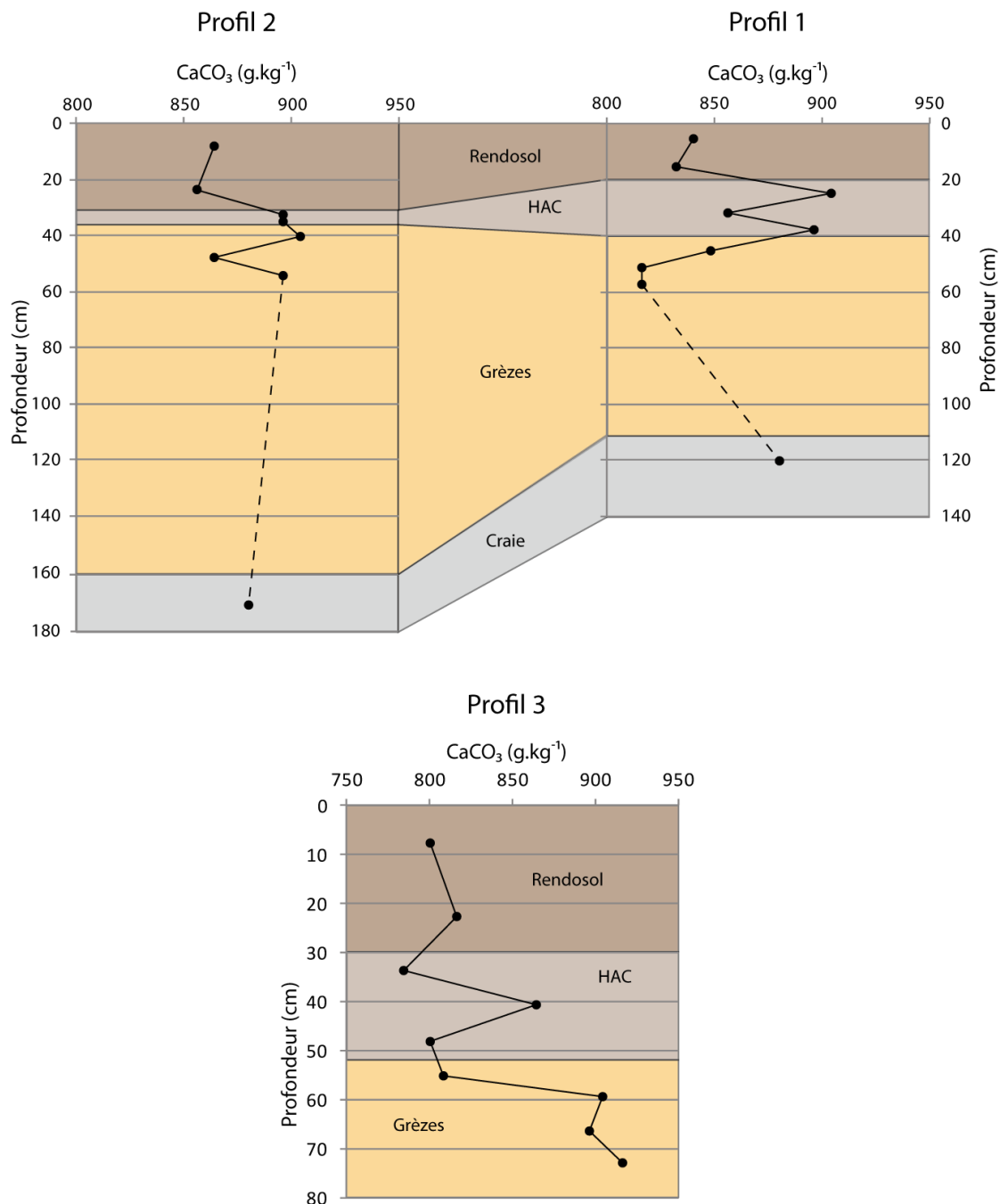


Figure VI - 3 : Évolution verticale de la teneur en carbonate de calcium total pour les 3 profils étudiés au Mont du Ménil.

2. TENEUR EN CARBONE ORGANIQUE TOTAL (COT)

Dans tous les profils, le carbone organique total (COT) diminue de la surface vers la profondeur (Figure VI - 4). Cette diminution peut s'effectuer de manière régulière ou en suivant des paliers correspondant aux différents horizons présents. Les ordres de valeurs sont sensiblement les mêmes dans chacun des horizons des profils 1 et 2 : $16,2 \pm 2,1$ et $16,3 \pm 2,3$ g.kg⁻¹ dans le sol, $7,2 \pm 0,2$ et $8,0 \pm 0,8$ g.kg⁻¹ dans l'HAC, $2,0 \pm 0,4$ et $3,1 \pm 0,7$ g.kg⁻¹ et $0,4 \pm 0,0$ et $0,8 \pm 0,0$ g.kg⁻¹ dans la craie (Figure VI - 4).

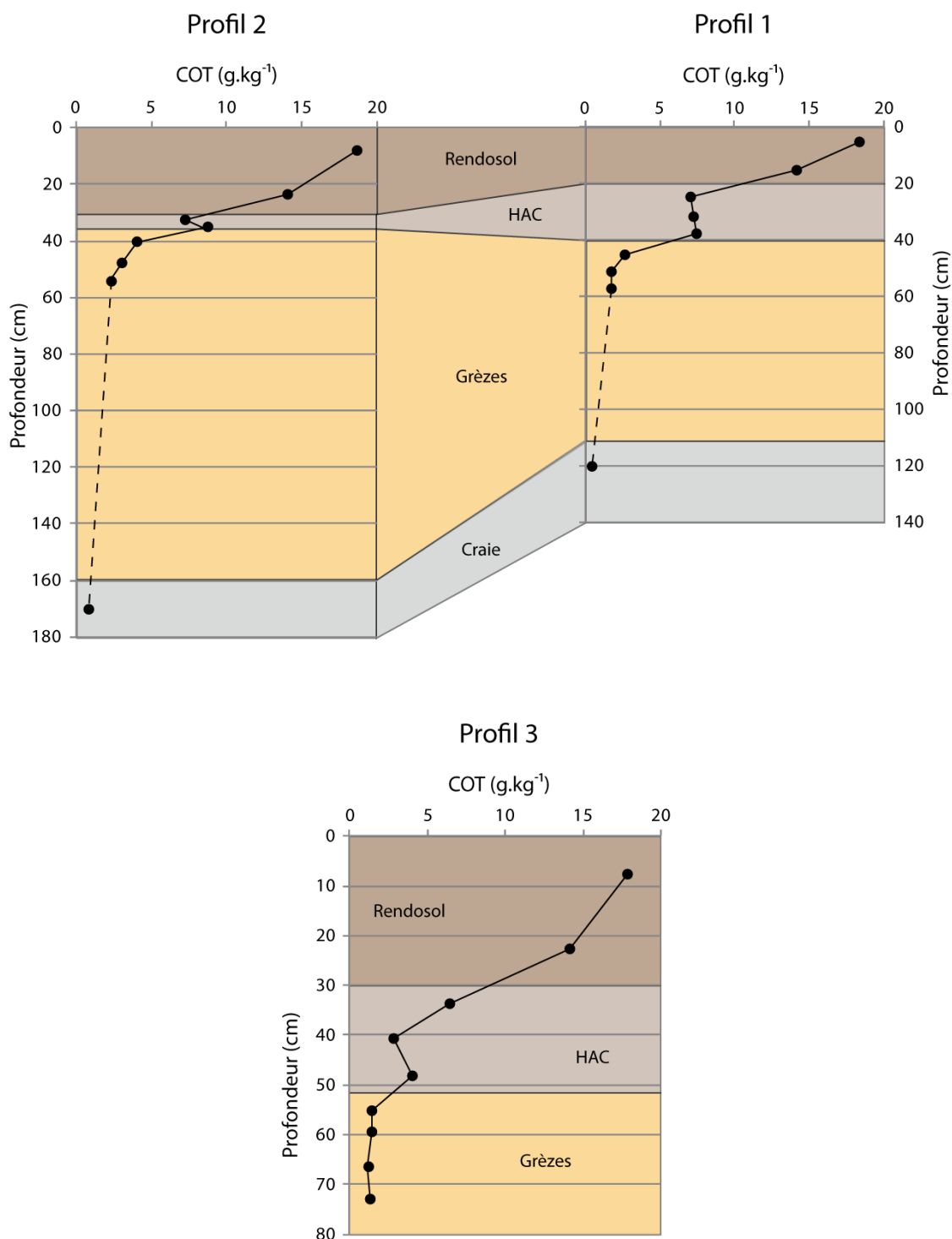


Figure VI - 4 : Évolution verticale de la teneur en carbone organique total pour les 3 profils étudiés au Mont du Ménil.

Dans le profil 3, les valeurs de COT dans le sol sont sensiblement les mêmes que dans les autres profils ($16,0 \pm 1,9 \text{ g.kg}^{-1}$). Pour l'HAC et les grèzes, les valeurs de COT sont légèrement plus faibles que celles observées dans les deux autres profils (respectivement $4,4 \pm 1,5$ et $1,3 \pm 0,1 \text{ g.kg}^{-1}$)(Figure VI - 4).

Il faut noter qu'au sein du profil 3, les plus fortes teneurs en COT de l'HAC sont observées en son sommet et non à sa base comme dans les autres profils.

3. ÉLÉMENTS MAJEURS

a. DESCRIPTION PRÉLIMINAIRE DES COURBES

Dans les profils 1 et 2, l'ensemble des éléments majeurs sont présents en concentrations plus faibles dans la craie que dans les horizons d'altération supérieurs excepté CaO (et Mg dans le profil 2) (Figures VI - 5 et VI - 6). SiO₂, Al₂O₃, MgO, Na₂O, K₂O et TiO₂ (et Fe₂O₃ dans le profil 2) sont présents en quantité plus faible dans l'HAC que dans les grèzes sous-jacentes et le sol sus-jacent. Le CaO présente la tendance inverse en étant le seul élément majeur dont la concentration est la plus forte dans l'HAC que dans l'ensemble des autres horizons. Le sol présente des concentrations en Fe₂O₃ très légèrement plus élevées que les horizons sous-jacents. Dans ces deux derniers horizons, les concentrations en Fe₂O₃ sont sensiblement les mêmes. Les teneurs en P₂O₅ sont similaires dans l'HAC et dans les grèzes. Le sol quant à lui présente des concentrations en P₂O₅ nettement supérieures. Le même type de courbes caractérise les teneurs en MnO avec cependant une très légère augmentation au centre de l'HAC (profil 1) ou une légère diminution pour un des deux échantillons issu de l'HAC (profil 2).

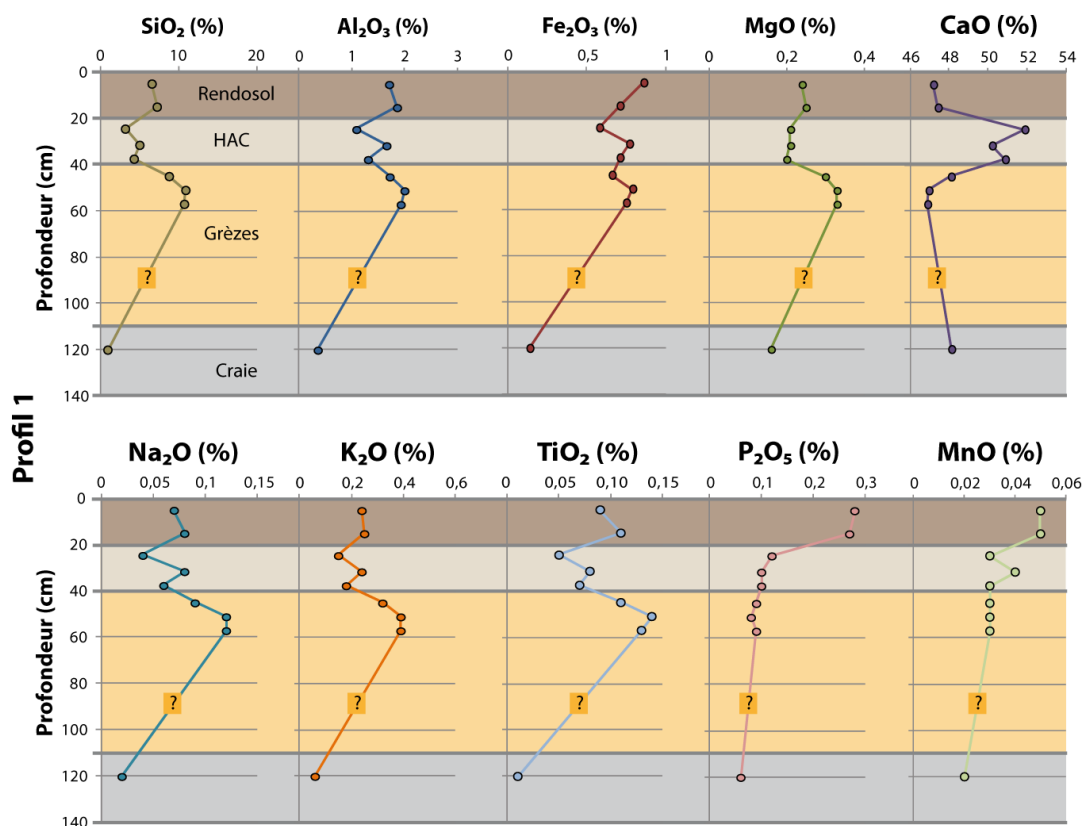
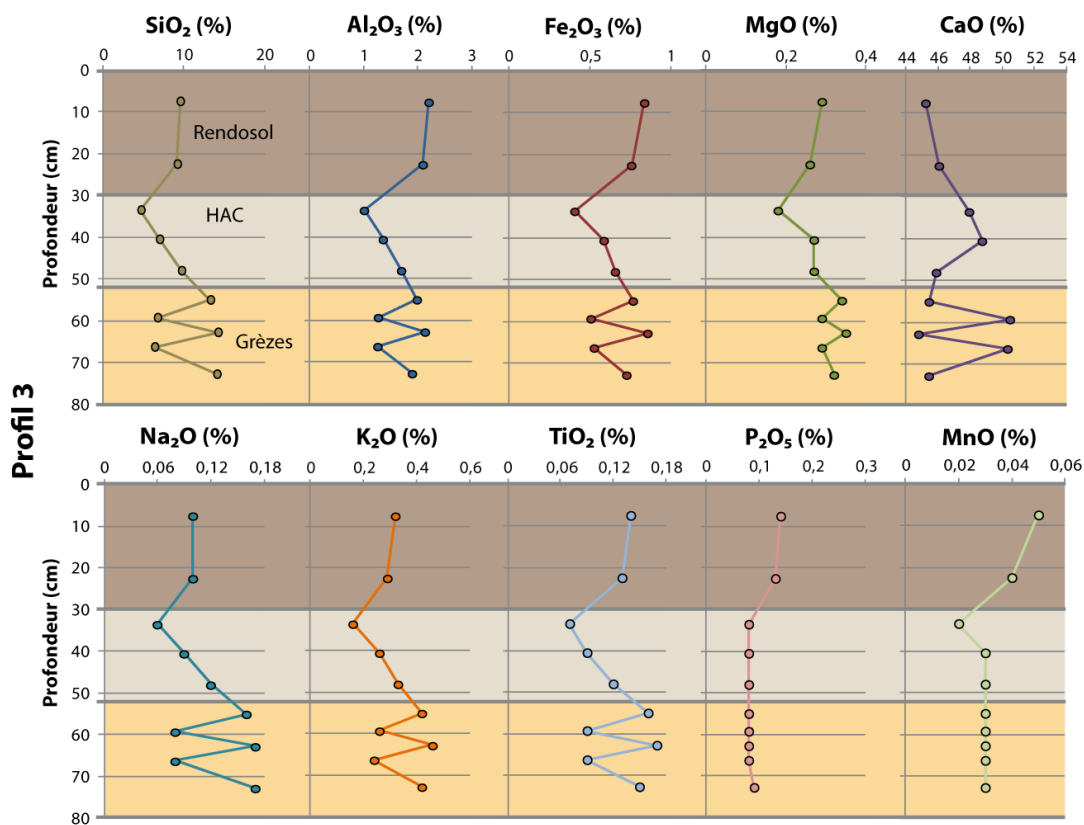
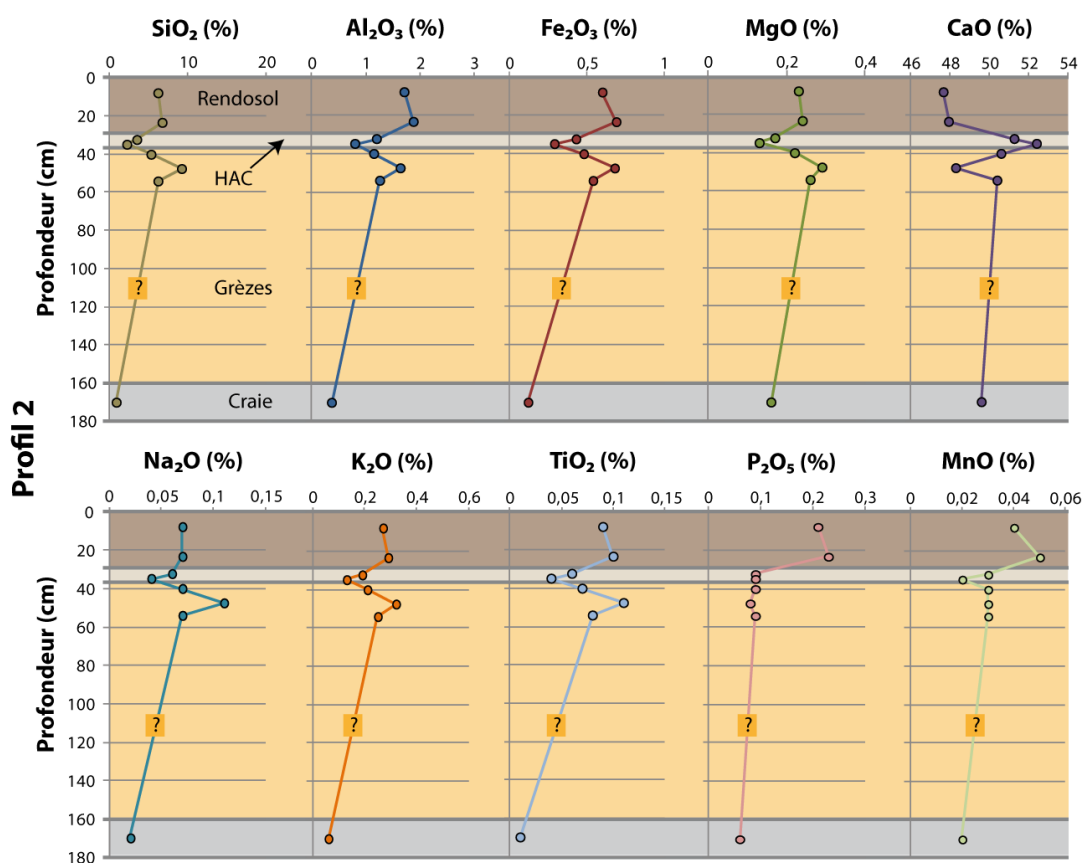


Figure VI - 5 : Teneurs en éléments majeurs dans le profil 1 du Mont du Ménil.



Dans le profil 3 (Figure VI - 7), le comportement des éléments chimiques est parfois assez différent de celui des deux autres profils. L'HAC présente des concentrations plus faibles en tous les éléments majeurs sauf le CaO. Les variations sont moins marquées que dans les deux autres profils. Dans les grèzes, on observe des variations brusques d'un échantillon à l'autre. Ces échantillons ont été prélevés alternativement dans les lits gras et lits maigres que cet horizon présente; elles sont anti-corrélées entre le CaO et tous les autres éléments majeurs excepté pour MnO et P₂O₅ pour lesquels aucune variation n'est visible dans les grèzes.

Il faut noter que dans l'ensemble des neuf graphiques, les trois points représentant trois des cinq échantillons de grèzes du profil 3 se situent dans les valeurs hautes de SiO₂. Ces trois échantillons correspondent à des lits maigres qui sont reconnus comme plus riches en quartz d'origine éolienne à mettre en lien avec la mise en place des grèzes litées (graveluches).

b. RAPPORTS ÉLÉMENT MAJEUR/SiO₂

➤ Al₂O₃ :

Concernant Al₂O₃ versus SiO₂, deux corrélations semblent exister (Figure VI - 8). La première regroupe l'ensemble des échantillons de sol des trois profils et les (HAC) des profils 1 et 2 (et la craie). Les HAC se distinguent tout de même des sols qui contiennent de plus importantes teneurs en SiO₂ et Al₂O₃ (SiO₂_{sols} : 6 à 9,5 % ; SiO₂_{HAC} : 2 à 5 % ; Al₂O₃_{sols} : 1,7 à 2,2 % ; Al₂O₃_{HAC} : 0,8 à 1,6 %). Il existe une seconde corrélation qui regroupe l'ensemble des grèzes des trois profils ainsi que l'HAC du profil 3 (et la craie). Il n'y a pas ici de distinction entre HAC et grèzes. L'HAC ne semble donc pas dans le profil 3 distinct des grèzes ce qui serait en accord avec son aspect très peu différencié des grèzes sur le terrain.

➤ Fe₂O₃ :

Le Fe₂O₃ comparé à SiO₂ semble permettre uniquement de discriminer l'HAC du profil 1 et un échantillon de sol (du même profil) (Figure VI - 8).

➤ CaO :

Une tendance corrélative inverse semble se dessiner entre CaO et SiO₂ (Figure VI - 8). Les HAC des profils 1 et 2 présentent les pourcentages de CaO les plus forts ce qui confirme ce qui a été observé sur les courbes de variation de la quantité de CaCO₃ en fonction de la profondeur. En accord avec ce qui a pu être précédemment observé sur ces courbes, les pourcentages de CaO de l'HAC du profil 3 sont dans les ordres de grandeur (voire plus faibles) que ceux des grèzes.

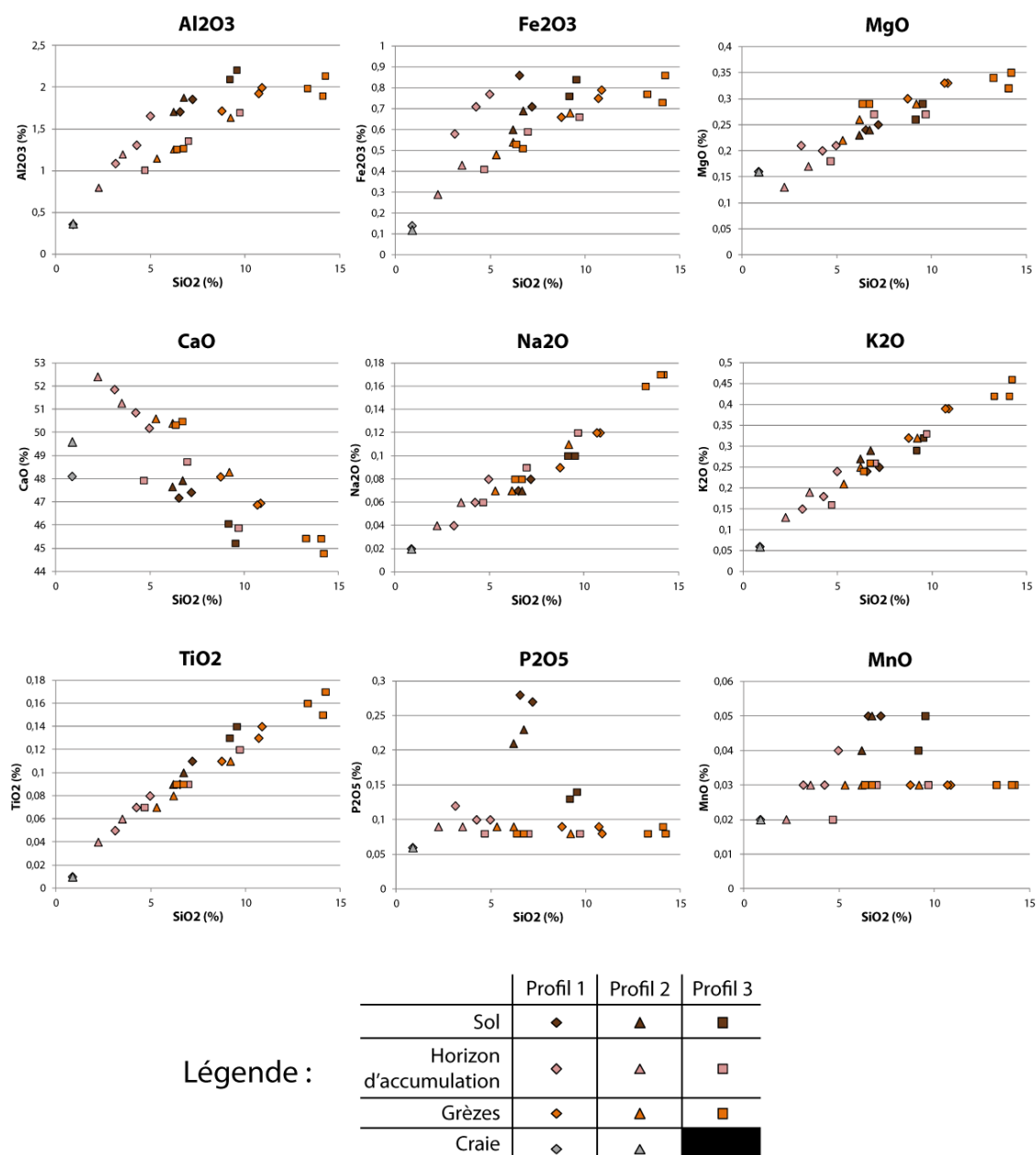


Figure VI - 8 : Rapports entre les teneurs en éléments majeurs et SiO₂ dans les horizons étudiés des 3 profils étudiés du Mont du Ménil.

➤ MgO, Na₂O, K₂O ET TiO₂ :

Pour MgO, Na₂O, K₂O et TiO₂, une bonne corrélation est observée en comparaison au SiO₂ (Figure VI - 8). Les coefficients de corrélation R² valent respectivement 0,85, 0,96, 0,96 et 0,95. Les teneurs en ces éléments majeurs varient donc de la même façon que SiO₂ considéré comme élément stable et ne permettent pas logiquement pas de discriminer les HAC ou un autre horizon.

➤ P₂O₅ :

Les variations du pourcentage de P₂O₅ en fonction de SiO₂ permettent de distinguer trois compartiments (Figure VI - 8). Le premier regroupe les sols même si

celui du profil 3 tend à s'éloigner de ceux des profils 1 et 2. Le deuxième regroupe les HAC ainsi que les grèzes et le troisième correspond aux échantillons de substratum crayeux.

➤ **MNO :**

Les pourcentages de MnO se situent proche de la limite basse de détection (0,01 %) et la précision de 0,01 % ne permet pas de tirer des informations exploitables quant à cet élément majeur présent en très faibles quantités dans l'ensemble des horizons (Figure VI - 8).

c. GAINS/PERTES EN ÉLÉMENTS MAJEURS NORMALISÉS À LA CRAIE

➤ **PROFILS 1 ET 2 : LE FRONT DE TAILLE :**

Bien qu'ils présentent un HAC de faciès différents, les profils 1 et 2 montrent des similitudes comportementales d'un point de vue géochimique.

D'une manière générale, un enrichissement en TiO_2 par rapport à la craie est observé sur l'ensemble du profil (cet enrichissement atteint 44 % dans le profil 1 et 58 % dans le profil 2) (Figure VI - 9). Les autres éléments majeurs présentent un appauvrissement. Une première famille regroupe les éléments majeurs dont l'appauvrissement maximum est compris entre 45 et 60 % (K_2O , Fe_2O_3 , Na_2O et Al_2O_3). La seconde rassemble les éléments majeurs dont l'appauvrissement maximum est compris entre 80 et 95 % (MgO , MnO , CaO et P_2O_5).

Au sein des deux profils, le P_2O_5 présente un appauvrissement progressif par rapport à la craie avec la profondeur (Figure VI - 9). Le TiO_2 présente quant à lui un enrichissement progressif du haut du profil vers la base de l'HAC. Cet enrichissement devient nettement moindre une fois les grèzes atteintes.

Les graphiques montrent cependant que la zone correspondant aux HAC se distingue par un appauvrissement moins important observé pour les deux familles (appauvrissement minimum de 30 % à un enrichissement de 15 % (Fe_2O_3) pour K_2O , Fe_2O_3 , Na_2O et Al_2O_3 et appauvrissement minimum de 58 à 60 % pour MgO , MnO et CaO) (Figure VI - 9).

➤ **CAS DU PROFIL 3 SOUS BOIS :**

La craie n'étant pas observée au niveau du profil 3, la normalisation à la craie a été effectuée par rapport aux valeurs moyennes des teneurs en éléments majeurs des échantillons de substrat crayeux prélevés sur les profils 1 et 2.

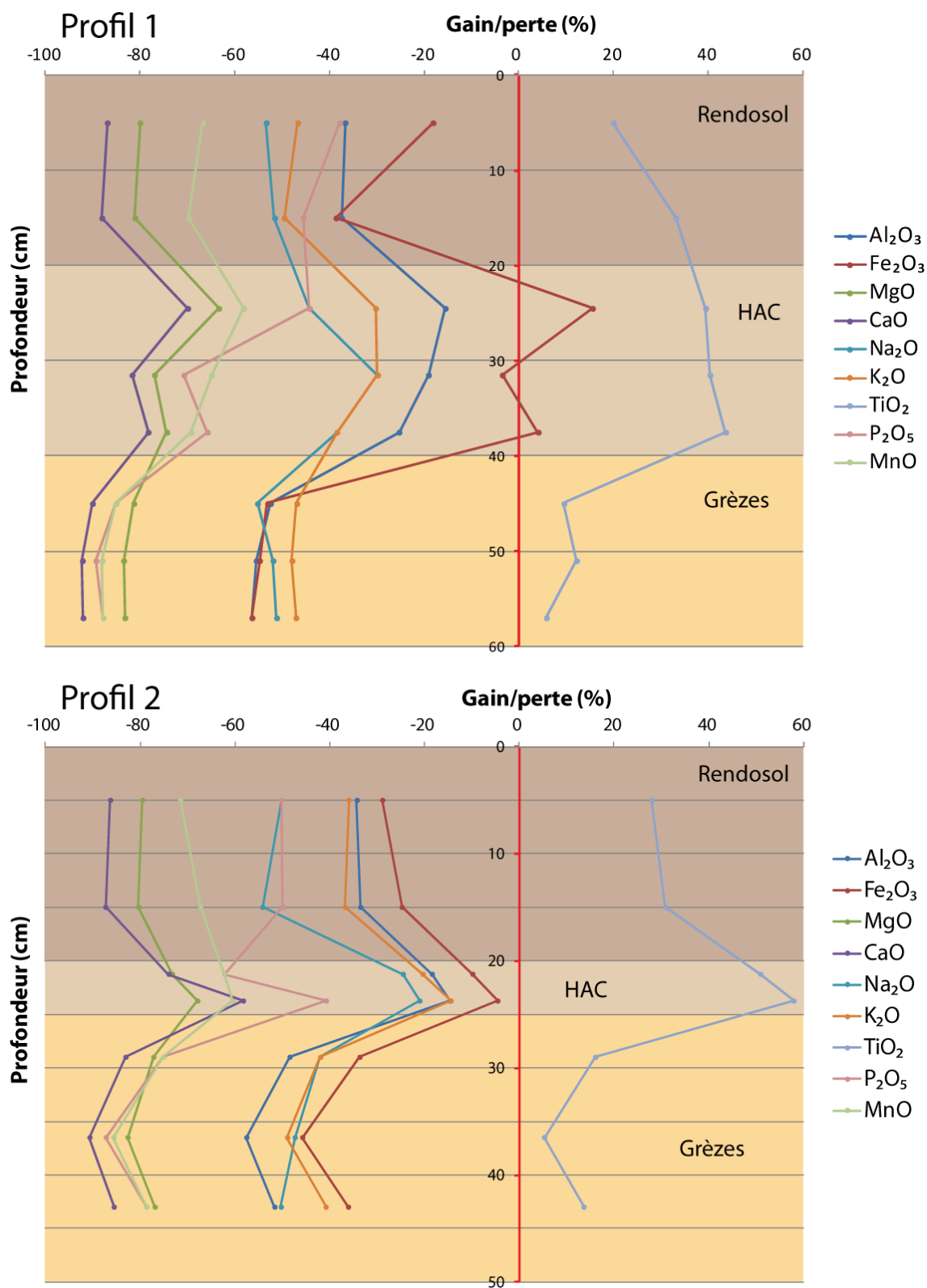


Figure VI - 9 : Teneurs en éléments majeurs du RENDOSOL, de l'HAC et des grèzes rapportées à SiO_2 et normalisées à la craie pour les profils 1 et 2 du Mont du Ménéil.

Comme pour les deux premiers profils, un enrichissement en TiO_2 est observé tandis que les autres éléments majeurs (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 et MnO) présentent un appauvrissement (Figure VI - 10). Un premier groupe contient les

éléments majeurs dont l'appauvrissement est compris entre 41 et 68 % (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O et Na_2O). Un second groupe regroupe les éléments majeurs dont l'appauvrissement est compris entre 75 et 95 % (CaO , P_2O_5 , MgO et MnO).

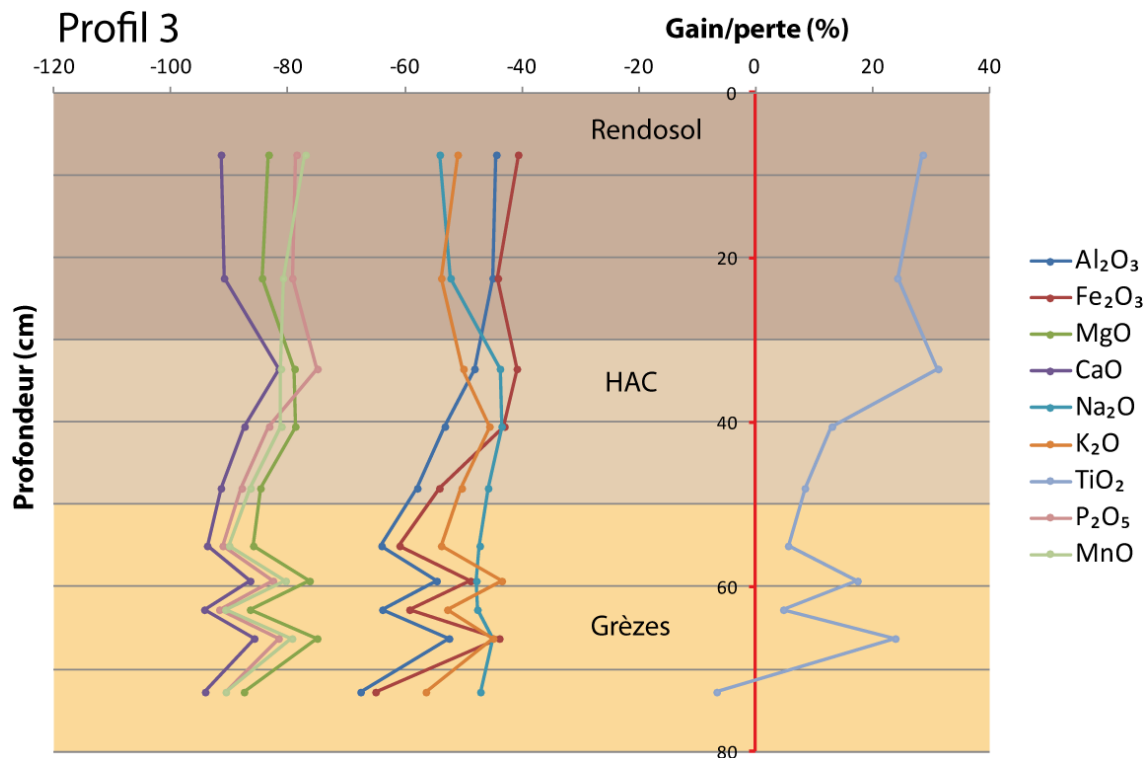


Figure VI - 10 : Teneurs en éléments majeurs du RENDOSOL, de l'HAC et des grèzes rapportées à SiO_2 et normalisées à la craie pour le profil 3 du Mont du Ménil.

Au sein des grèzes, les courbes d'enrichissement/appauvrissement de chacun des éléments majeurs présentent des oscillations qui sont à mettre en lien direct avec la nature même de ce matériau (Figure VI - 10). En effet, alors que dans les profils 1 et 2 ce matériau se présente sous la forme de poches de cryoturbation, celui du profil 3 se présente sous forme de graveluches qui sont une successions de lit au contenu différent.

d. GAINS/PERTES EN ÉLÉMENTS MAJEURS NORMALISÉS AUX GRÈZES

Les teneurs en éléments majeurs, toujours rapportées à SiO_2 , ont ensuite été normalisées aux grèzes. Une valeur moyenne à pour cela été calculée pour chacun des trois profils.

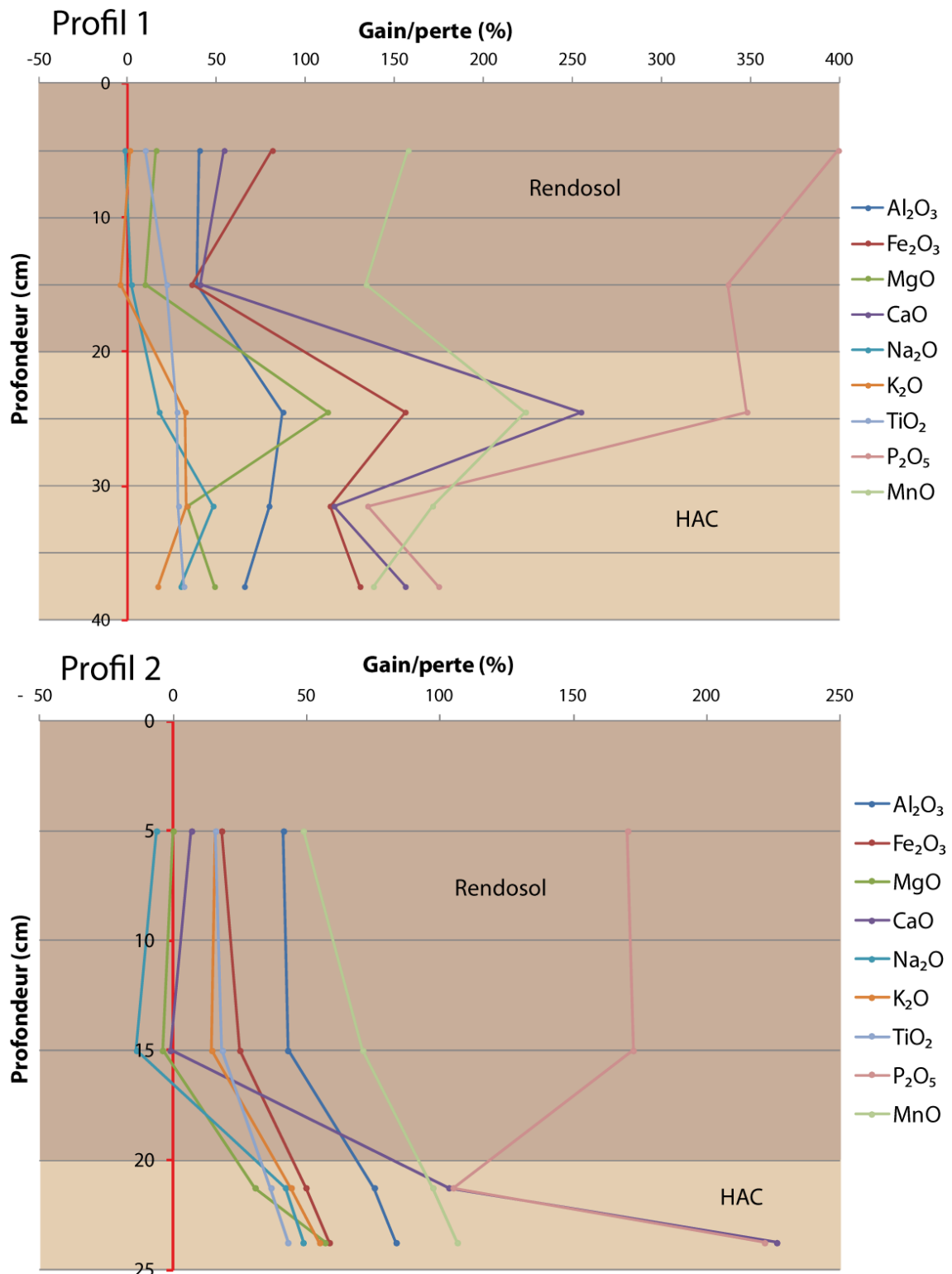


Figure VI - 11 : Teneurs en éléments majeurs du RENDOSOL et de l'HAC rapportées à SiO_2 et normalisées aux grès pour les profils 1 et 2 du Mont du Ménil.

➤ **PROFILS 1 ET 2 AU NIVEAU DU FRONT DE TAILLE :**

D'une manière générale, l'ensemble des éléments présentent un enrichissement dans le sol et dans l'HAC par rapport aux grès (seuls quelques éléments présentent parfois un léger appauvrissement au niveau du sol) (Figure VI - 11). Mis à part de P_2O_5

qui présente une courbe à tendance générale décroissante en progressant en profondeur dans le profil, un enrichissement plus ou moins important est observable pour les éléments majeurs au sein de l'HAC par rapport aux grès mais également par rapport au sol.

Dans le profil 1, les éléments pour lesquels l'enrichissement par rapport aux grès est minimum sont Na_2O , K_2O et TiO_2 (32 à 48 %) (Figure VI - 11). Viennent ensuite Al_2O_3 et MgO (87 à 112 %) puis Fe_2O_3 , MnO et CaO (156 à 255 %).

Dans le profil 2, les enrichissements minimum sont représentés par TiO_2 , Na_2O , K_2O , MgO et Fe_2O_3 (43 à 58 %) (Figure VI - 11). Suivent Al_2O_3 et MnO (83 à 106 %) puis CaO (226 %).

➤ PROFILS 3 SOUS BOIS :

Bien que les teneurs en éléments majeurs du profil 3 présentent quasi-uniquement des enrichissement par rapport aux grès comme dans les profils 1 et 2, il existe des différences dans leurs comportements (Figure VI - 12).

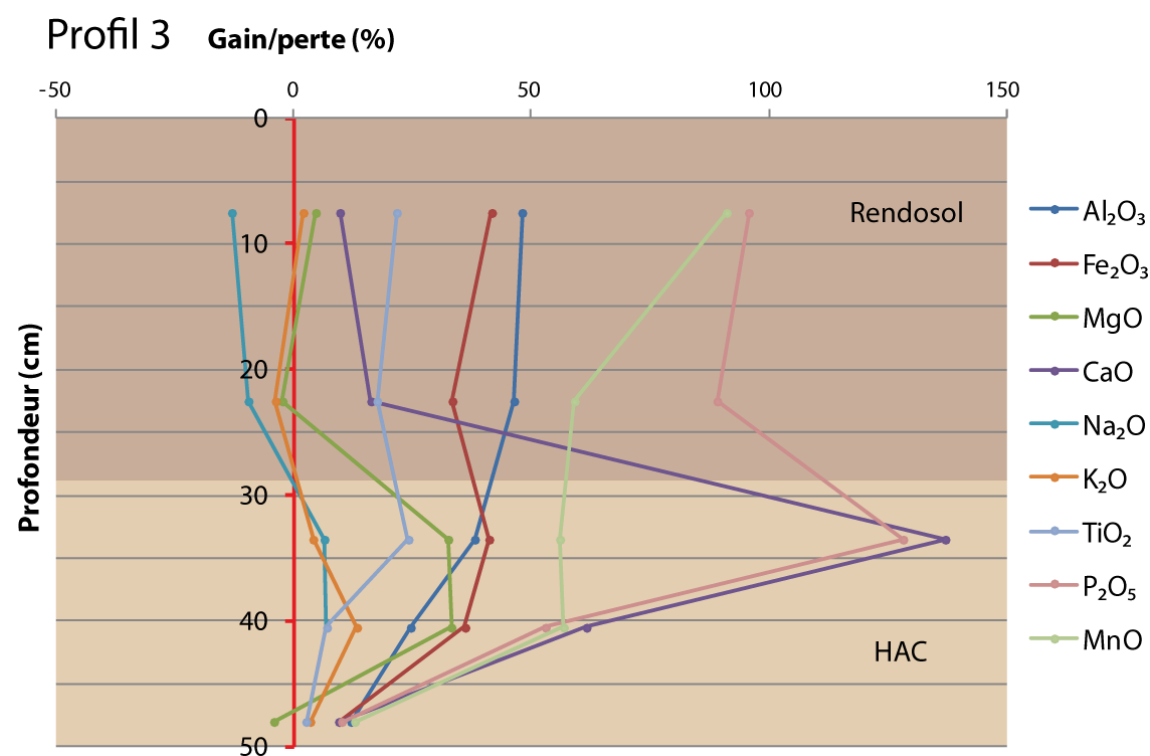


Figure VI - 12 : Teneurs en éléments majeurs du RENDOSOL et de l'HAC rapportées à SiO_2 et normalisées aux grès pour le profil 3 du Mont du Ménil.

Certains éléments présentent un enrichissement progressif des grès à la partie supérieure du sol (Al_2O_3 et MnO). Les autres éléments présentent comme dans les profils 1 et 2 un enrichissement plus important dans l'HAC et notamment dans sa partie supérieure. C'est le cas de Na_2O , MgO , CaO , Na_2O , K_2O et TiO_2 et P_2O_5 dans une moindre mesure. Il faut donc noter que P_2O_5 ne présente pas ici d'enrichissement

progressif de la base au sommet du profil. De plus, alors que dans les profils 1 et 2, l'enrichissement maximum en élément majeurs est compris entre 31 et 400 %, il varie seulement entre 6 et 137 % dans le profil 3.

e. ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES SUR LES MAJEURS

➤ DONNÉES DE L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES :

La composante principale 1 exprime 70,88 % de la variance et la composante principale 2 en exprime 19,91 %. Ces deux axes expriment donc à eux seuls 90,79 % de la variance (Figure VI - 13).

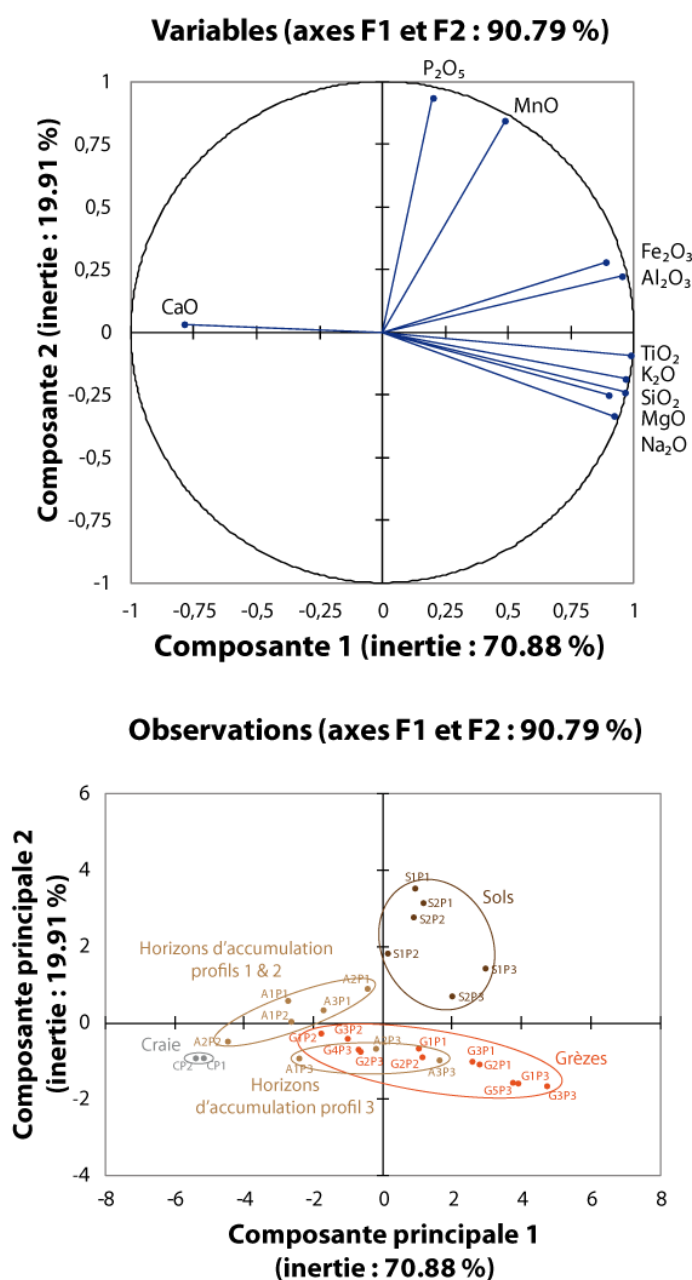


Figure VI - 13 : Analyse en composantes principales réalisée sur l'ensemble des éléments majeurs pour l'ensemble des horizons des trois profils étudiés au Mont du Ménéil.

Les éléments majeurs CaO , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 , K_2O , SiO_2 , MgO et Na_2O sont liés de manière significative à la composante principale 1 alors que P_2O_5 et MnO sont significativement liés à la composante principale 2.

➤ **GRAPHIQUE DES VARIABLES/INDIVIDUS SELON LES COMPOSANTES 1 ET 2 :**

Le **pôle P_2O_5 et le MnO** (Figure VI - 13) pourrait signer une influence anthropique en lien avec des épandages d'engrais (au moins pour le P_2O_5) et non pas en lien directe avec la matière organique. En effet, les échantillons qui se rapprochent de ce pôle sont ceux correspondant au sol. De plus, les échantillons de sol les plus proches de ce pôle « signature anthropique » sont ceux des profils 1 et 2 qui sont proches de champs cultivés alors que les échantillons de sol les plus éloignés sont ceux prélevés dans le profil 3 plus éloigné et sous bois qui n'a pas subi de grosse influence des activités culturelles anthropiques. Ceci peut s'observer également sur les graphiques de pourcentages de P_2O_5 au sein des trois profils en fonction de la profondeur. En effet, même si les teneurs en P_2O_5 sont toujours plus fortes dans les sols que dans les autres horizons, elles sont moindres dans le profil 3 que dans les deux autres profils (0,14 % contre 0,22 à 0,26 %). Cette tendance devrait logiquement être inversée si le P_2O_5 provenait de la matière organique.

Le **pôle CaO** est en lien évident avec les carbonates qu'ils soient directement originaires de la craie (cryoclastes au sein des horizons) ou issus de divers processus de dissolution/précipitation.

Le graphique des variables et des individus selon F1 et F2 permet également de montrer que les points correspondant aux échantillons de l'HAC du profil 3 sont localisés dans la zone correspondant aux grèzes ce qui appuie encore ici l'idée d'un HAC nettement moins différencié des grèzes que dans les deux autres profils situés sur le front de taille. L'influence des activités anthropiques et l'importance des carbonates y sont beaucoup moins marqué.

4. TERRES RARES

a. CONTENU EN TERRES RARES

Les teneurs en terres rares de la craie sont très proches de 20 ppm (Figure VI - 14). Il s'agit là des quantités de terres rares les plus faibles qui sont rencontrées sur l'ensemble des trois profils. Les teneurs moyennes en terres rares des grèzes des profils 1 et 3 sont respectivement de 46,5 et 48,0 ppm. Elles sont cependant plus faibles au sein du profil 2 (39,8 ppm). Les teneurs moyennes en terres rares diminuent ensuite au sein des HAC. Elles sont comprises entre 30,2 ppm pour le profil 2 où elles sont les plus faibles pour ce type d'horizon. Elles sont en revanche de 35,3 ppm dans les grèzes du profil 1 et de 36,6 ppm dans celles du profil 3. Les teneurs en terres rares ré-augmentent à nouveau à l'intérieur des sols où elles atteignent leurs valeurs les plus

élevées. Ces quantités de terres s'échelonnent entre 50,8 ppm pour le profil 1 et 63,3 ppm pour le profil 3 en passant par 57,5 ppm pour le deuxième profil.

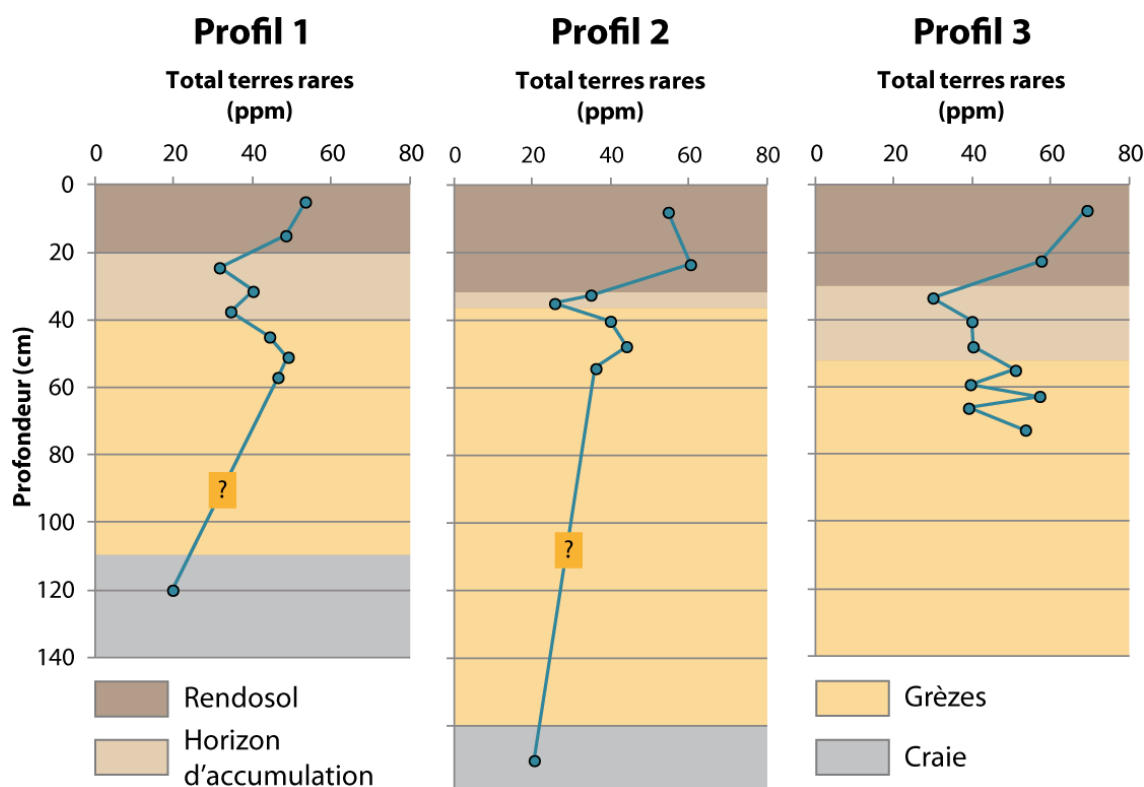


Figure VI - 14 : Contenu total en terres rares au sein des trois profils étudiés au Mont du Ménil.

b. GAIN/PERTE RAPPORTÉS À LA CRAIE ET AUX GRÈZES

Les graphiques de normalisation à la craie montrent que l'intégralité des horizons des trois profils présente un gain en terre rares (Figure VI - 15). Ce gain est significativement toujours plus élevé dans les RENDOSOLS que dans les HAC (profil 1 : $159,1 \pm 12,6$ contre $79,8 \pm 18,1$ % ; profil 2 : $182,1 \pm 13,9$ contre $48,4 \pm 22,7$ % et profil 3 : $216,5 \pm 29,2$ contre $82,9 \pm 23,8$ %). Les RENDOSOLS se distinguent donc des HAC sous-jacents par un enrichissement bien supérieur en terres rares par rapport à la craie. A la différence des deux autres horizons, les HAC présentent dans chacun des profils un gain moyen nettement moins important en terre rares par rapport à la craie. Il faut cependant noter que ce gain plus faible n'est significativement différent de celui des grèzes qu'au sein des profils 1 et 2.

Les grèzes sont le témoin d'un gain en terres rares de 100 à 140 % par rapport à leur matériau d'origine : le substrat crayeux.

L'approche par la comparaison aux grèzes montre que les HAC présentent des pertes en terres rares comprises entre 13 et 38 % (moyenne très proche entre les trois profils) alors que les RENDOSOLS montrent des gains en terres rares variant entre 15 et 51 % (Figure VI - 15). Le gain le plus faible en terres rares au sein des RENDOSOLS est

observé pour le profil 1 ($9,3 \pm 5,3 \%$) alors que celui le plus fort est localisé dans le profil 2 ($43,8 \pm 7,1 \%$). Le profil 3 présente comparativement un gain en terres rares moyen à fort par rapport aux grèzes ($32,0 \pm 9,9 \%$). Il est intéressant ici d'observer que la plus grosse différence de gain en terre rares au sein des sols par rapport aux grèzes met en opposition les profils 1 et 2 qui sont très proches l'un de l'autre et dont les grèzes et les RENDOSOLS semblent très peu différents. Seule une étude minéralogique pourrait apporter des explications à ce phénomène. Les RENDOSOLS présentent un gain en terres rares de 44 à 90 % par rapport à l'HAC.

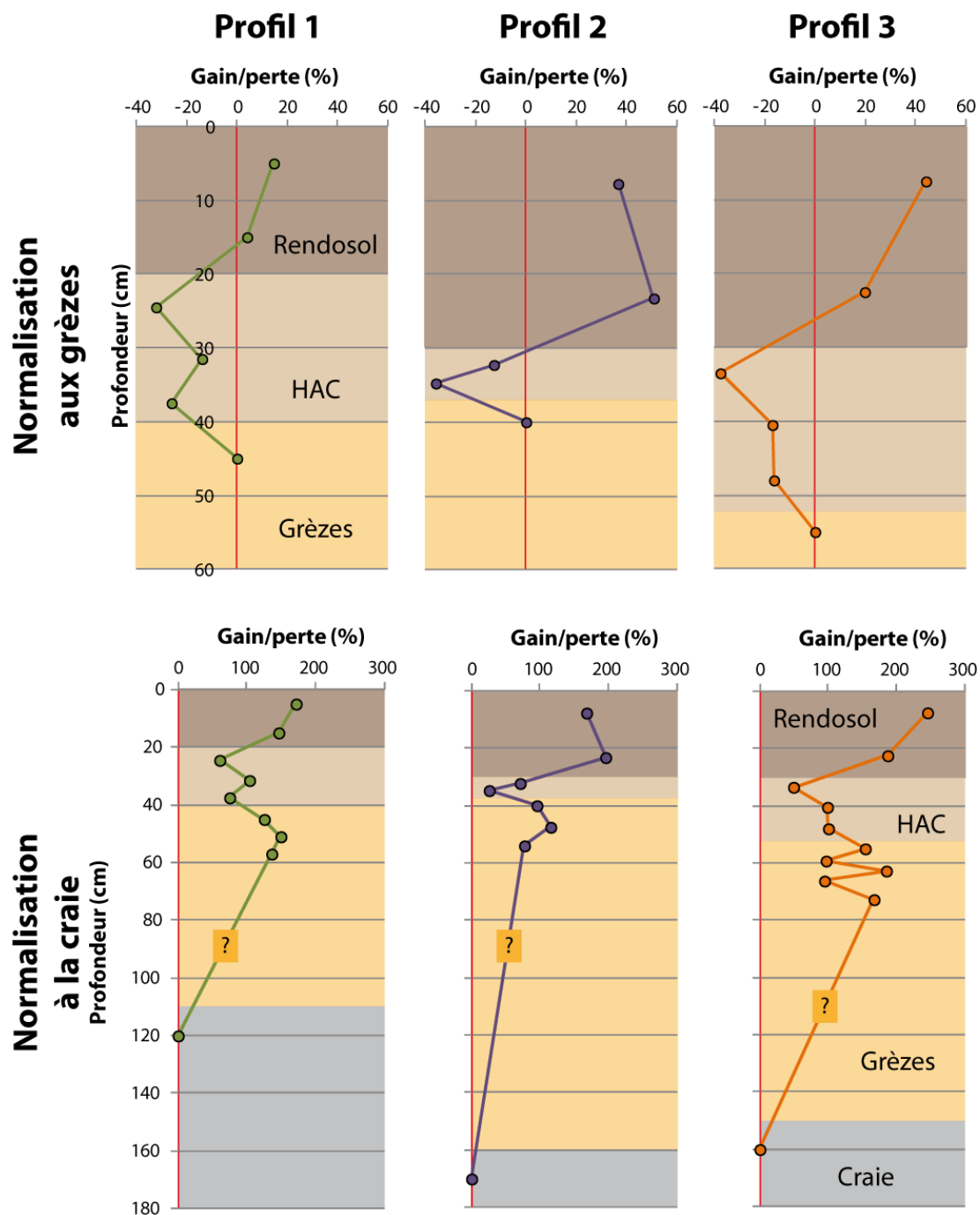


Figure VI - 15 : Pourcentages de gain/perte en terres rares normalisés au substrat crayeux ainsi qu'aux grèzes pour les trois profils étudiés au Mont du Ménil.

C. ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE SUR LES TERRES RARES

L'analyse en composantes principales a été réalisée sur l'ensemble des données de géochimie des terres rares et pour l'ensemble des échantillons prélevés dans les horizons des trois profils.

➤ LES DONNÉES DE L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES :

La composante principale 1 exprime 93,09 % de la variance et la composante principale 2 en exprime 2,12 % (Figure VI - 16). Ces deux axes expriment donc à eux seuls 95,21 % de la variance. L'ensemble des terres rares est lié de manière significative à la composante principale 1.

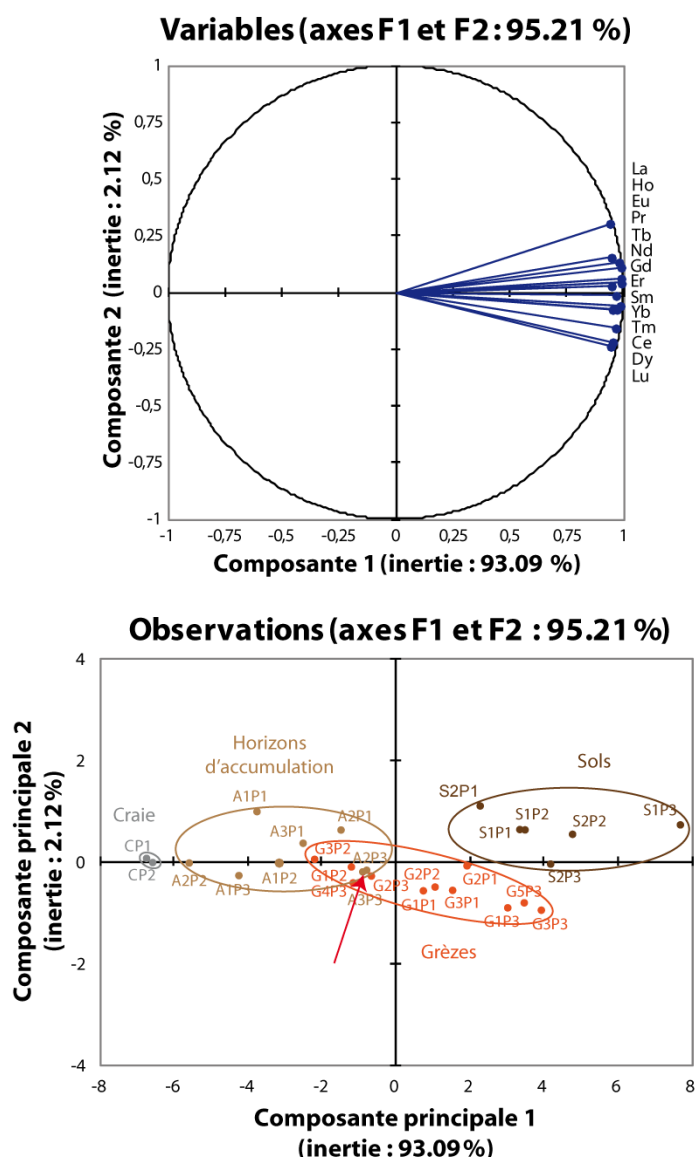


Figure VI - 16 : Analyse en composantes principales réalisée sur l'ensemble des terres rares pour l'ensemble des horizons des trois profils étudiés au Mont du Ménil.

➤ **GRAPHIQUE VARIABLES/INDIVIDUS SELON LES COMPOSANTES 1 ET 2 :**

Les échantillons correspondant aux différents horizons s'étalent sur tout l'axe de la composante principale 1 (Figure VI - 16). Les échantillons les plus proches du pôle terre rares sont ceux correspondant aux différents sols. Viennent ensuite les grèzes, les HAC puis le substrat crayeux qui s'éloigne le plus du pôle terres rares.

Deux des échantillons d'HAC du profil 3 sont localisés dans l'ensemble « grèzes » (flèche rouge) et très rapprochés des deux échantillons de grèzes litées du profil 3 (G2P3 et G4P3) qui se distinguent ici aussi des trois autres échantillons de grèzes litées prélevés dans ce même profil 3 mais dans des lits différents.

Cette analyse en composantes principales ne semble donc pas apporter d'information supplémentaire aux graphiques de teneurs en terres rares dans les différents horizons.

d. SPECTRES DE TERRES RARES

➤ **NORMALISATION À L'U.C.C. :**

Rapportés aux concentrations en terres rares de la croûte continentale supérieure (U.C.C.), l'ensemble des niveaux des trois profils étudiés présentent des teneurs en terres rares assez faibles ($[TR_{horizon}]/[TR_{U.C.C.}]$ compris entre 0,07 et 0,061) et le substrat crayeux présente une anomalie négative en cérium (Ce) et aucune anomalie en europium (Eu) (Figure VI - 17).

L'anomalie négative en Cérium est également clairement visible dans tous les horizons étudiés alors qu'une légère anomalie négative en Europium est observée pour l'ensemble des grèzes ainsi que pour l'ensemble des HAC mais de manière un peu moins marquée.

Les teneurs en terres rares des différents horizons normalisées à l'U.C.C. permettent d'établir trois groupes :

- le premier ensemble regroupe les horizons qui présentent les plus forts rapports $[TR_{horizon}]/[TR_{U.C.C.}]$ et comprend l'ensemble des sols des trois profils étudiés ainsi que les grèzes des profils 1 et 3 ;
- le second ensemble regroupe les horizons qui présentent des rapports $[TR_{horizon}]/[TR_{U.C.C.}]$ moyens et contient l'ensemble des HAC des trois profils étudiés ainsi que les grèzes du profil 2 ;
- le troisième n'est représenté que par le substrat crayeux qui présente des rapports $[TR_{horizon}]/[TR_{U.C.C.}]$ faibles.

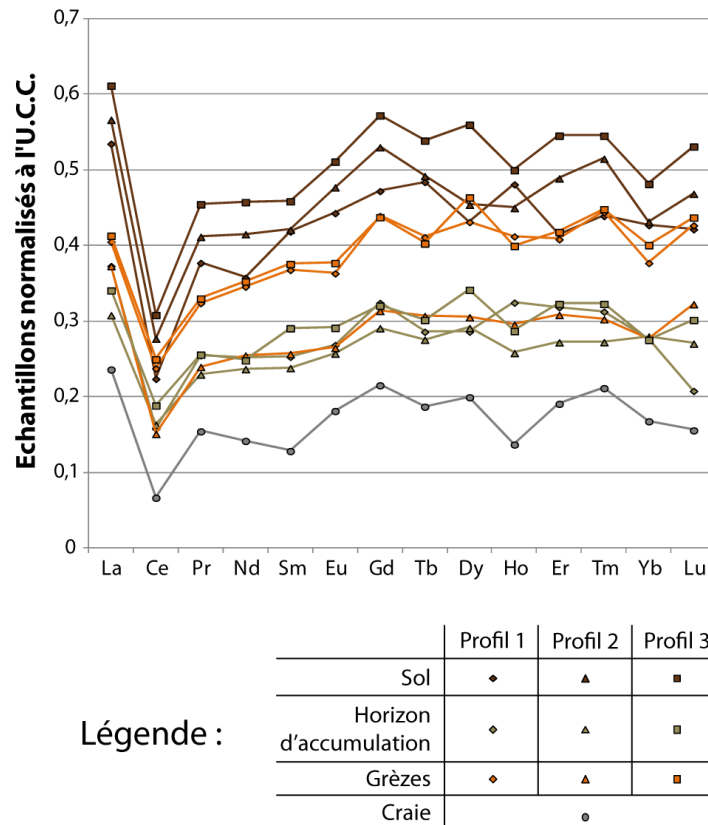


Figure VI - 17 : Diagramme général des concentrations en terres rares pour les RENDOSOLS, les HAC, les grèzes et la craie normalisées à la croûte continentale (U.C.C.) pour l'ensemble des profils étudiés sur le site du Mont du Ménil.

Une fois les spectres de terres rares réalisés par profils (Figure VI - 18), il apparaît clairement que les courbes des rapports $[TR_{horizon}]/[TR_{U.C.C.}]$ se disposent toujours de la même manière. Des rapports les plus faibles aux rapports les plus forts sont observés le substrat crayeux, l'HAC, les grèzes puis le RENDOSOL.

Il existe cependant certaines différences assez bien visibles entre les trois profils étudiés au Mont du Ménil :

- dans le profil 1, les rapports $[TR_{horizon}]/[TR_{U.C.C.}]$ du RENDOSOL et des grèzes sont assez proches alors que la courbe des rapport $[TR_{horizon}]/[TR_{U.C.C.}]$ de l'HAC trouve une place intermédiaire entre ce premier groupe et le substrat crayeux ;
- dans le profil 2, ce sont les rapports $[TR_{horizon}]/[TR_{U.C.C.}]$ de l'HAC et ceux des grèzes qui sont cette fois-ci très proches et en position intermédiaire entre le RENDOSOL et le substrat crayeux ;
- dans le profil 3, les courbes des rapports $[TR_{horizon}]/[TR_{U.C.C.}]$ se disposent très régulièrement et aucun regroupement particulier ne semble visible.

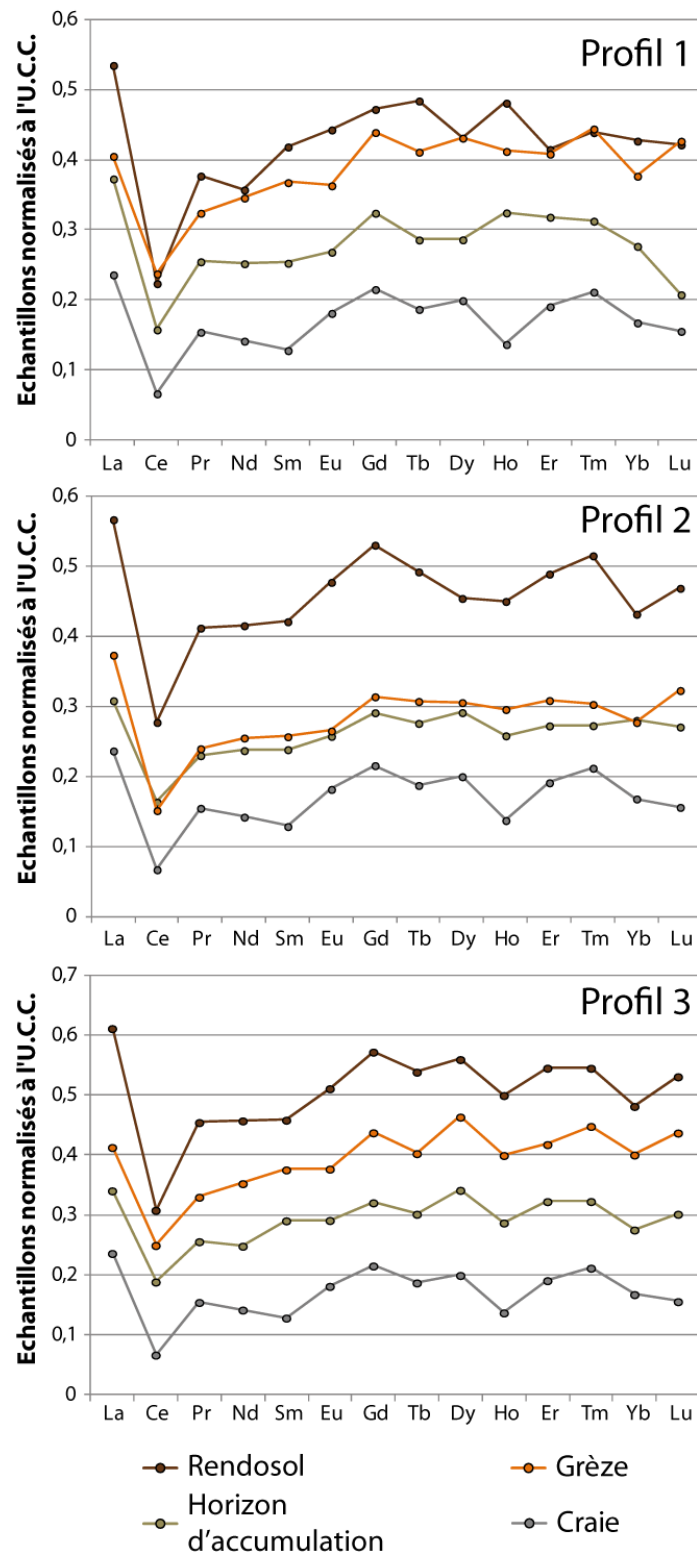
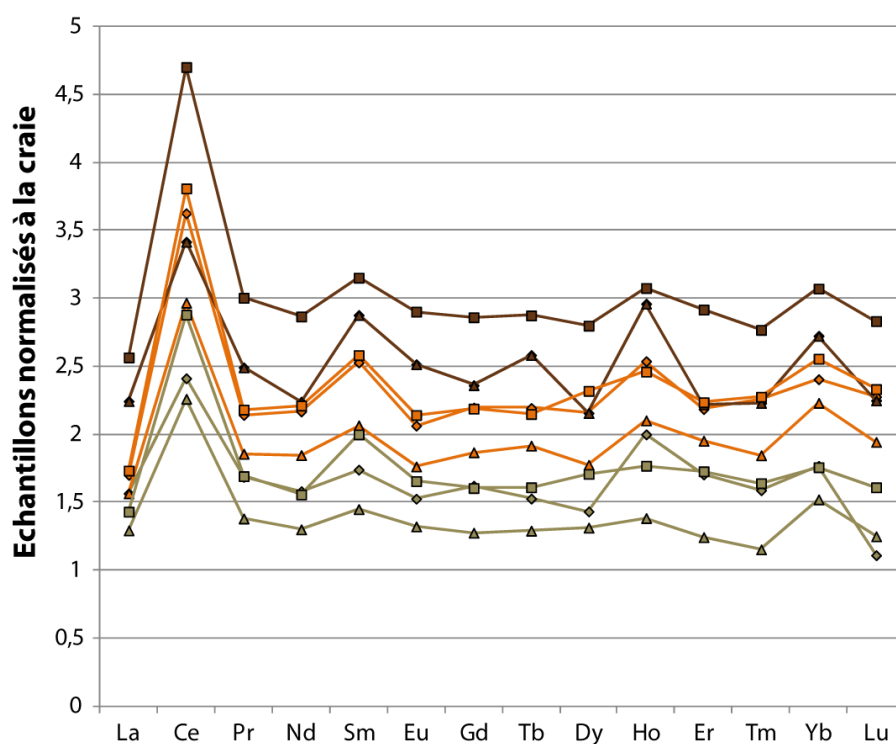


Figure VI - 18 : Diagramme des concentrations en terres rares pour les RENDOSOLS, les HAC, les grèzes et la craie normalisées à la croûte continentale supérieure (U.C.C.) pour chacun des trois profils étudiés sur le site du Mont du Ménil.

➤ NORMALISATION AU SUBSTRAT CRAYEUX :

Les différents horizons présentent un enrichissement en terres rares comparés au substrat crayeux, cependant, les HAC présentent toujours les rapports $[TR_{horizon}]/[TR_{craie}]$ les plus faibles (Figure VI - 19). Il s'agit donc de niveaux au sein desquels les terres rares sont présentes en moindre quantités. Les grèzes possèdent des teneurs en terres rares intermédiaires entre les HAC et le sol. En effet, les rapports $[TR_{horizon}]/[TR_{craie}]$ des grèzes ne dépassent que de très peu dans le profil 1 ceux obtenus pour le sol pour Ce, Tm (thulium) et Lu (lutétium).

La lecture plus claire des graphiques réalisés profils par profils (Figure VI - 20) permet de voir que la différence d'enrichissement en terres rares par rapport à la craie des HAC et des grèzes est assez semblable. Le RENDOSOL actuel présente quant à lui un enrichissement assez important par rapport au substratum crayeux et plus important que ceux des autres niveaux.



Légende :

	Profil 1	Profil 2	Profil 3
Sol	◆	▲	■
Horizon d'accumulation	◇	△	◻
Grèzes	♦	▴	▣

Figure VI - 19 : Diagramme général des concentrations en terres rares pour les RENDOSOLS, les HAC et les grèzes normalisées au substratum crayeux pour l'ensemble des profils étudiés sur le site du Mont du Ménil.

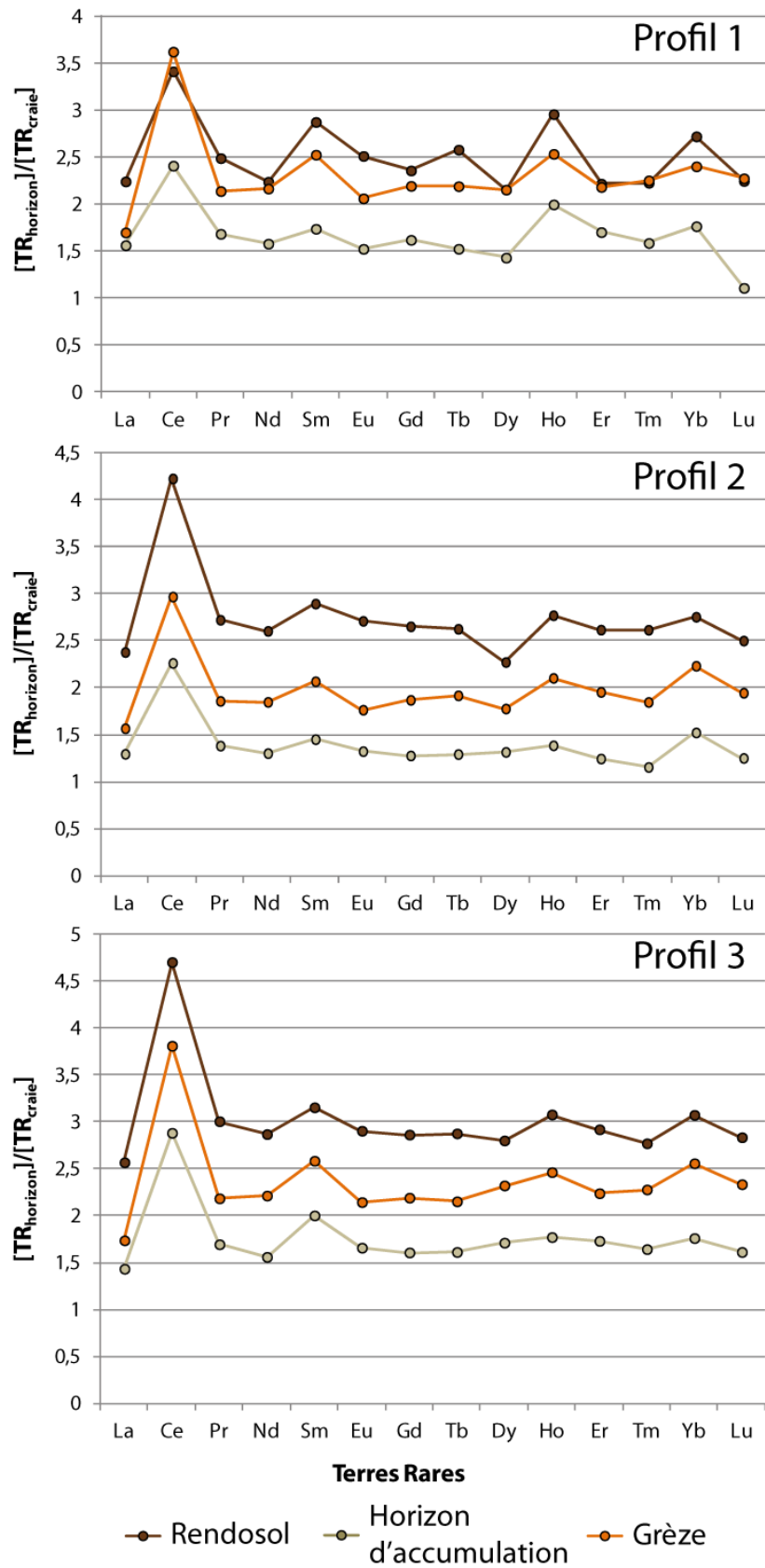


Figure VI - 20 : Diagramme des concentrations en terres rares pour les RENDOSOLS, les HAC et les grèzes normalisées à la craie pour chacun des trois profils étudiés sur le site du Mont du Ménil.

e. RAPPORTS ÉLÉMENTS MAJEURS/TERRES RARES TOTALES

Les graphiques représentant les éléments majeurs en fonction de la teneur totale en terres rares présentent différents types de morphologies en fonction de l'élément majeur pris en compte (Figure VI - 21)

- la première se traduit par un bon alignement de l'ensemble des points correspondants à l'ensemble des échantillons. Cette configuration ne concerne que les relations existantes entre Al_2O_3 et les terres rares.
- la seconde morphologie type montre comme la première une bonne corrélation entre majeur et terres rares. La différence avec le premier type est que les points correspondant aux échantillons de sol s'écartent de manière plus ou moins importante de cet alignement. Ce type de graphique s'observe pour SiO_2 , MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 et P_2O_5 .

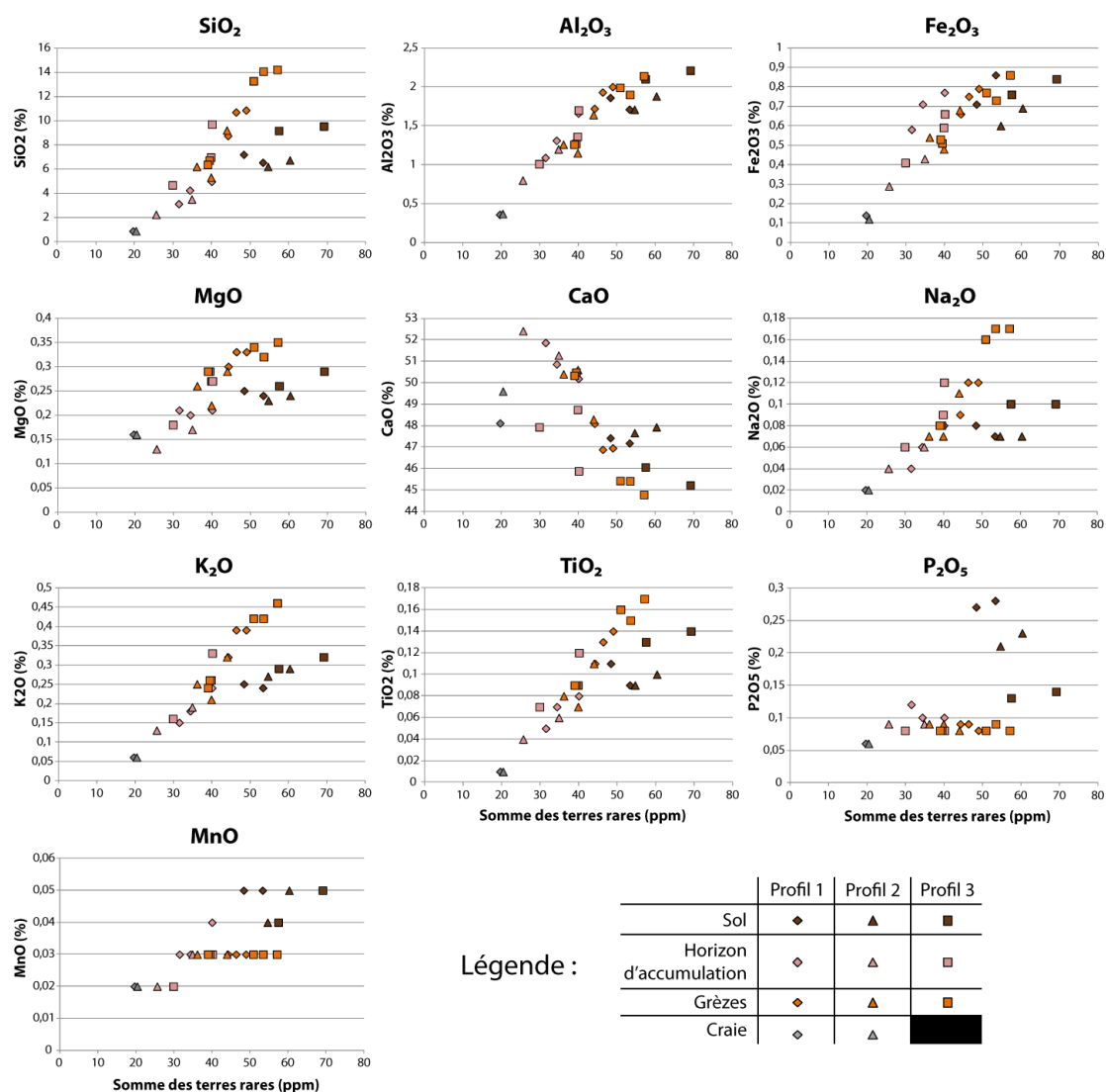


Figure VI - 21 : Rapports entre les teneurs en éléments majeurs et la teneur totale en terres rares dans les horizons étudiés des 3 profils étudiés du Mont du Ménil.

Le comportement de Fe_2O_3 en fonction de la teneur en terres rares semble se rapprocher du premier type de morphologie mais la bonne corrélation est entachée, d'une part, par les échantillons de sols appartenant au profil 2 et un échantillon appartenant au profil 3 et, d'autre part, par les échantillons d'HAC du profil 1 qui s'éloignent de la droite formée par l'ensemble des autres points.

Enfin, les pourcentages de MnO trop proches de la limite basse de détection (0,01 %) et la précision de 0,01 % ne permettent pas, comme dans le cas de l'étude des éléments majeurs précédemment développée, de tirer des informations quant aux relations MnO versus terres rares.

III. RÉSISTANCE DES HAC À LA PÉNÉTRATION

D'une manière générale, les HAC opposent une résistance à l'enfoncement du train de tige plus faible (en moyenne 3,5 à 4 contre 10 MPa) par rapport aux grèzes.

Dans les profils au sein desquels ils sont les plus épais (Figure VI - 22), pénétrogrammes 1 et 2), les HAC présentent une typologie assez typique. Dans leur partie supérieure, la résistance de pointe est plutôt moyenne et tend à augmenter avec la profondeur jusqu'à un maximum localisé environ au tiers supérieur de leur épaisseur (6 MPa pour le pénétrogramme 1 et 3,5 MPa pour le pénétrogramme 2). La résistance de pointe diminue ensuite jusqu'aux valeurs les plus faibles de résistance de pointe (3 MPa pour le pénétrogramme 1 et 2,5 MPa pour le pénétrogramme 2).

Avec le rétrécissement de l'HAC intervient un changement de son comportement vis à vis de l'enfoncement de la pointe du pénétromètre (Figure VI - 22), pénétrogrammes 4 et 5). Si l'HAC du pénétrogramme 3 présente encore une partie supérieure plus dure que sa partie inférieure, cette tendance semble s'atténuer voire même s'inverser dans ceux des pénétrogrammes 4 et 5. La dureté de ces HAC plus fins est en effet croissante du haut vers le bas.

L'HAC visible sous le bois du Mont du Ménil (profil 3) présente un comportement différent de celui présent sur le front de taille vis-à-vis de l'enfoncement du pénétromètre (Figure VI - 23). La structure présente des résistances de pointe équivalentes à celles de ses graveluches (≈ 9 MPa). De plus, la dureté de l'HAC est plus faible dans sa partie supérieure que dans sa partie inférieure ($\approx 6,5$ MPa contre ≈ 11 MPa) contrairement à ce qui a pu être observé sur ceux présents sur le front de taille (Figure VI - 22).

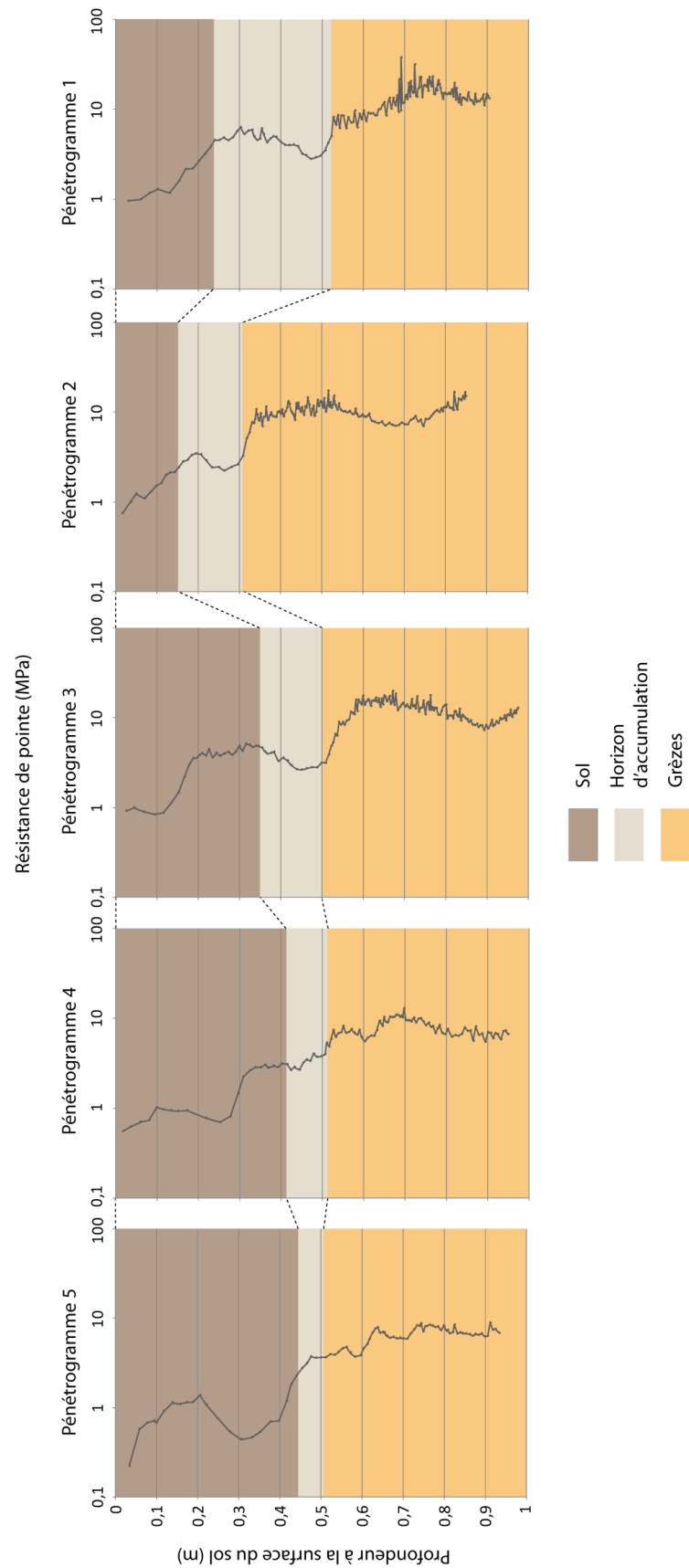


Figure VI - 22 : Pénétrogrammes obtenus le long de l'ancien front de taille de la carrière du Mont du Ménil. Les limites des différents horizons ont été placées à l'aide des observations *in situ*.

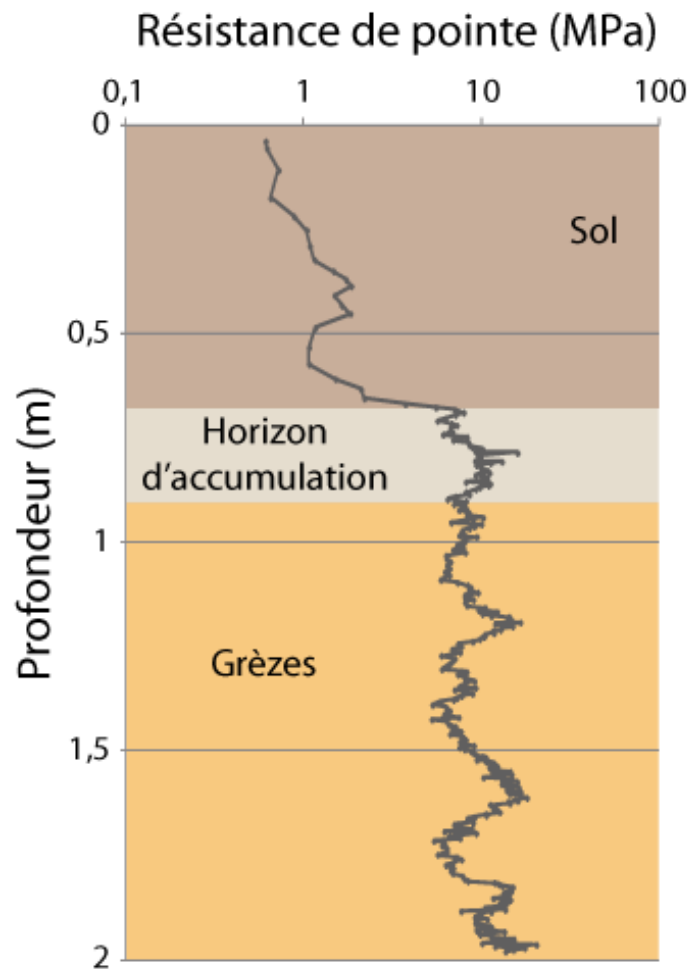


Figure VI - 23 : Pénétrogramme obtenu sous le bois du Mont du Ménénil (profil 3).

IV. CONTENU MINÉRALOGIQUE

L'observation des diffractogrammes obtenus par diffraction des rayons X sur le RENDOSOL, l'HAC, les grèzes ainsi que la craie du profil 1 Mont du Ménénil témoigne d'abord de très fortes teneurs en calcite (Figure VI - 24).

Les trois diffractogrammes des horizons d'altération (RENDOSOL, HAC et grèzes) témoignent également de la présence de quartz (Figure VI - 24). Le substratum crayeux ne semble quant à lui pas présenter de quartz ou au moins en quantités suffisantes pour être détectées.

Enfin, le diffractogramme obtenu pour l'échantillon de grèzes est le seul des quatre échantillons qui montre la présence de feldspaths plagioclases (Figure VI - 24).

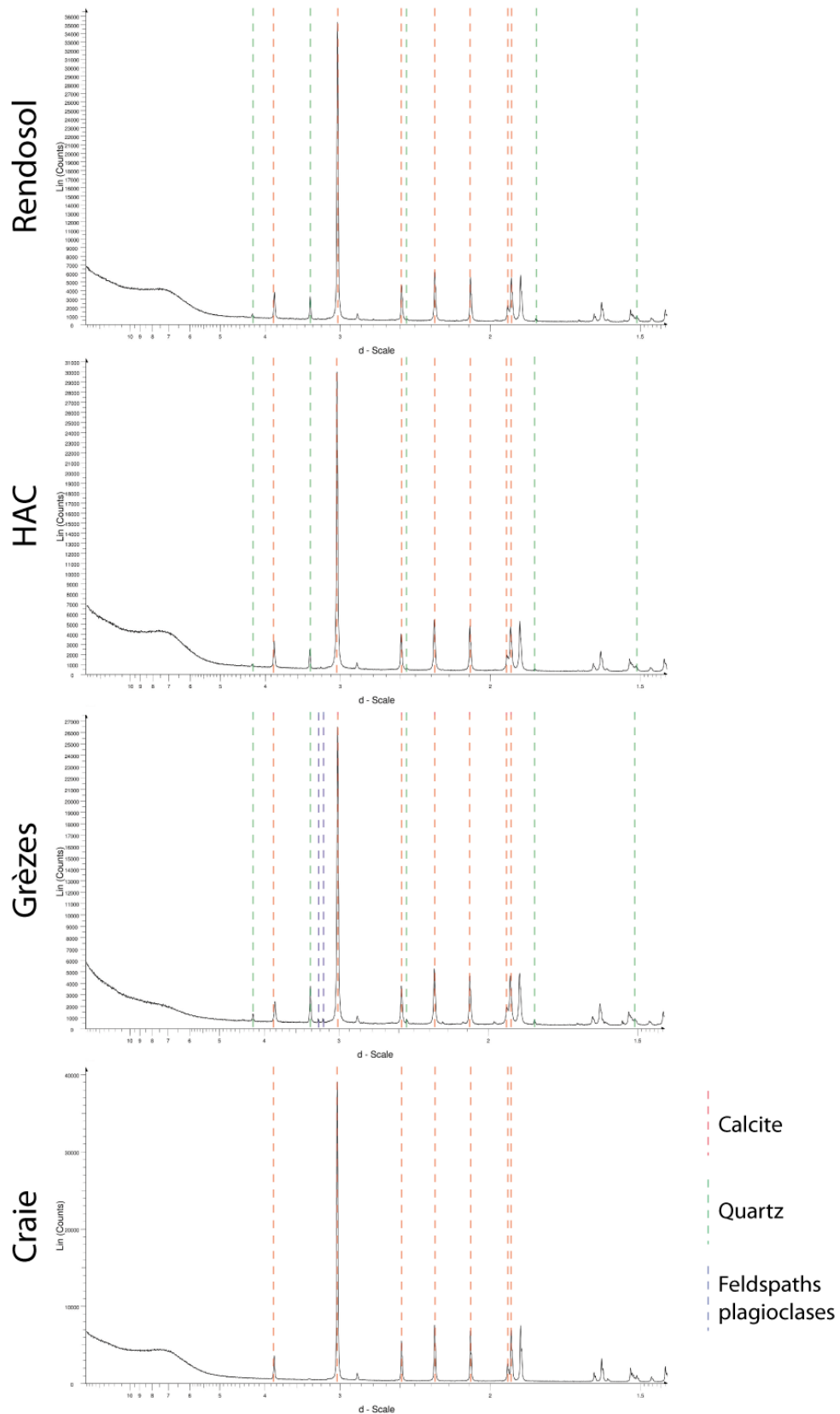


Figure VI - 24 : Diffractogrammes obtenu pour les 4 horizons étudiés au niveau du profil 1 du Mont du Ménil.

V. ÉTUDE MICROMORPHOLOGIQUE

Les observations au microscope électronique à balayage des échantillons de craie montrent que le substratum crayeux présent au niveau du site du Mont du Ménil est de composition assez classique. La roche est composée d'abondant fragments de coccolithes qui occupent tous les vides entre les coccolithes entiers ou légèrement brisés. Une porosité très fine et assez homogène reste cependant observable entre tous les éléments présents (Figure VI - 25).

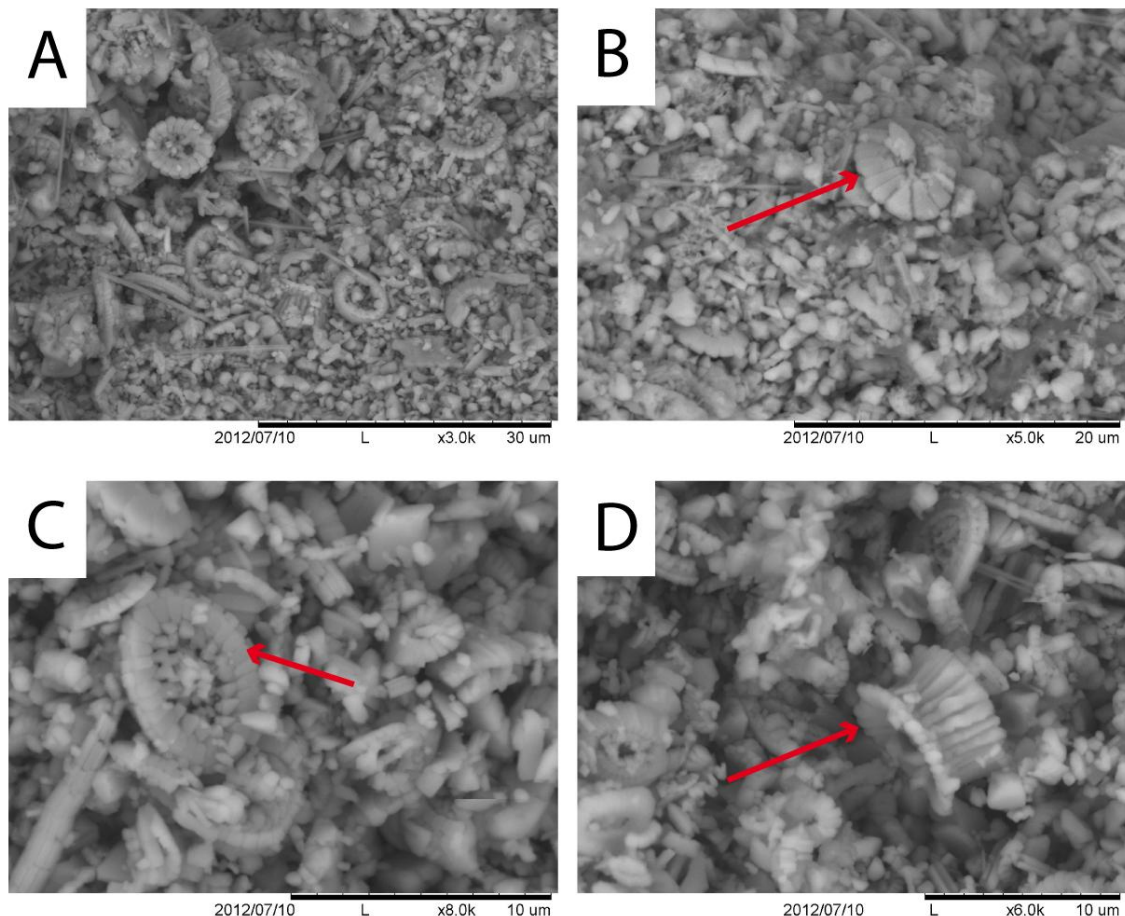


Figure VI - 25 : Échantillons de craie observés au microscope électronique à balayage. A : vue générale ; B, C et D : vues de quelques coccolithes particuliers (respectivement *Discorhabdus bellis n. sp.*, *Stradneria crenulata* et *Cylindralithus biarcus*).

Concernant les HAC et les grèzes, l'ensemble des observations microscopiques a permis de discriminer 5 entités micromorphologiques communes. La micromorphologie générale de ces différentes entités va cependant pouvoir changer en fonction de l'horizon étudié.

1. CONTENU GÉNÉRAL EN CRYOCLASTES

L'analyse d'image effectuée sur les scans des lames minces a permis d'apprécier la teneur générale en cryoclastes de craie dans les HAC ainsi que dans les grèzes.

Dans le profil 1, la teneur en cryoclastes de craie de l'HAC semble à première vue plus importante que dans les grèzes ($44,6 \pm 3,3$ contre $37,1 \pm 3,5$ %) (Figure VI - 26). Cependant, les écarts-types indiquent que cette différence n'est pas significative.

Dans le profil 2, la tendance est inversée. En effet, l'HAC présente un taux de cryoclastes de craie de $35,9 \pm 0,2$ % contre $47,5 \pm 6,9$ % dans les grèzes (Figure VI - 26). La faible épaisseur de l'HAC n'a cependant permis d'avoir que deux valeurs de pourcentage.

Dans le profil 3, il n'existe pas de différence entre la teneur en cryoclastes de l'HAC et celle des grèzes ($39,9 \pm 2,3$ contre $37,2 \pm 3,4$ %). Des oscillations sont visibles et sont à mettre en lien avec la morphologie litée des grèzes (graveluches) au niveau de ce profil localisé en milieu de pente (Figure VI - 26).

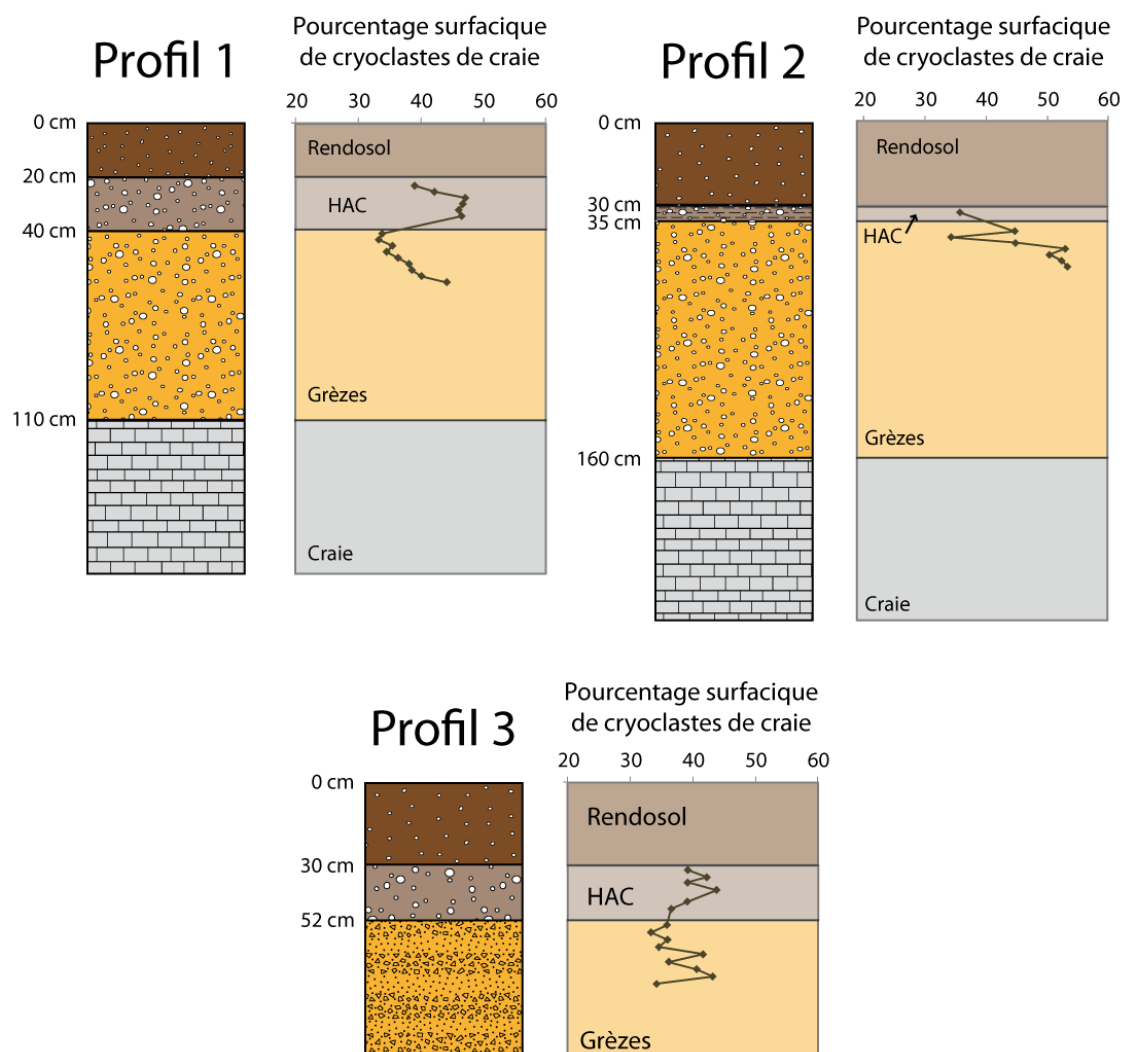


Figure VI - 26 : Pourcentage (surficiel) de cryoclastes au sein des profils 1 et 2 en fonction de la profondeur.

Il faut cependant bien garder à l'esprit que ces calculs de pourcentages de cryoclastes ont été réalisés à partir des lames minces en deux dimensions et qu'il existe peut-être des différences avec la teneur réelle en cryoclastes de craie.

Les observations microscopiques ont permis de distinguer deux grande famille au sein des cryoclastes de craie en fonction de leur organisation dans les horizons étudiés.

La première regroupe des cryoclastes de taille assez important et très souvent isolés : les macro-cryoclastes. La seconde englobe des cryoclastes de craie plus petits (micro-cryoclastes) qui forment un élément constitutif d'une seconde entité micromorphologique : les agrégats micro-cryoclastes/matrice détritique.

2. ENTITÉS PRINCIPALES CONSTITUTIVES FIGURÉES

Les entités principales figurées englobent les élément physiques majeurs qui constituent l'ossature des matériaux étudiés. Il s'agit des cryoclastes de craie et de la matrice détritique.

a. MACRO-CRYOCLASTES DE CRAIE

La première entité micromorphologique est formée par les cryoclastes de craie les plus gros dont le diamètre moyen est supérieur à 0,5 centimètres. Ils seront appelés dans cette étude « macro-cryoclastes ». Ces éléments crayeux présentent en grande majorité une forme ovoïde (subarrondie à circulaire) (Figure VI - 27). La bordure de ces macro-cryoclastes peut aller de assez nette à franchement altérée (Figure VI - 27 : B, C et D). La répartition verticale de ces éléments en fonction du degré d'altération de leur bordure ne semble pas présenter une organisation particulière. L'altération subie par ces éléments crayeux et le démantèlement plus ou moins important qu'ils ont subi dans leur périphérie permet tout de même d'apercevoir encore certains des éléments les plus gros les constituant (Figure VI - 27 : B), et les coccolithes, typiques du milieu crayeux, sont clairement visibles au microscope électronique à balayage (Figure VI - 27 : F).

Ces macro-cryoclastes sont toujours circonscrits par une pellicule de matrice à éléments détritiques plus ou moins fine dont l'épaisseur varie entre 20 et 50 μm (Figure VI - 27 : A, C et D). La variation de l'épaisseur de cette bordure de matrice détritique ne semble également pas présenter d'organisation verticale particulière.

La couleur des cryoclastes est assez logiquement liée à leur nature crayeuse. Ainsi, ils sont la plupart du temps blanc cassé à beige. Ils peuvent cependant prendre des teintes beige foncé voire franchement marron en fonction de leur degré d'altération.

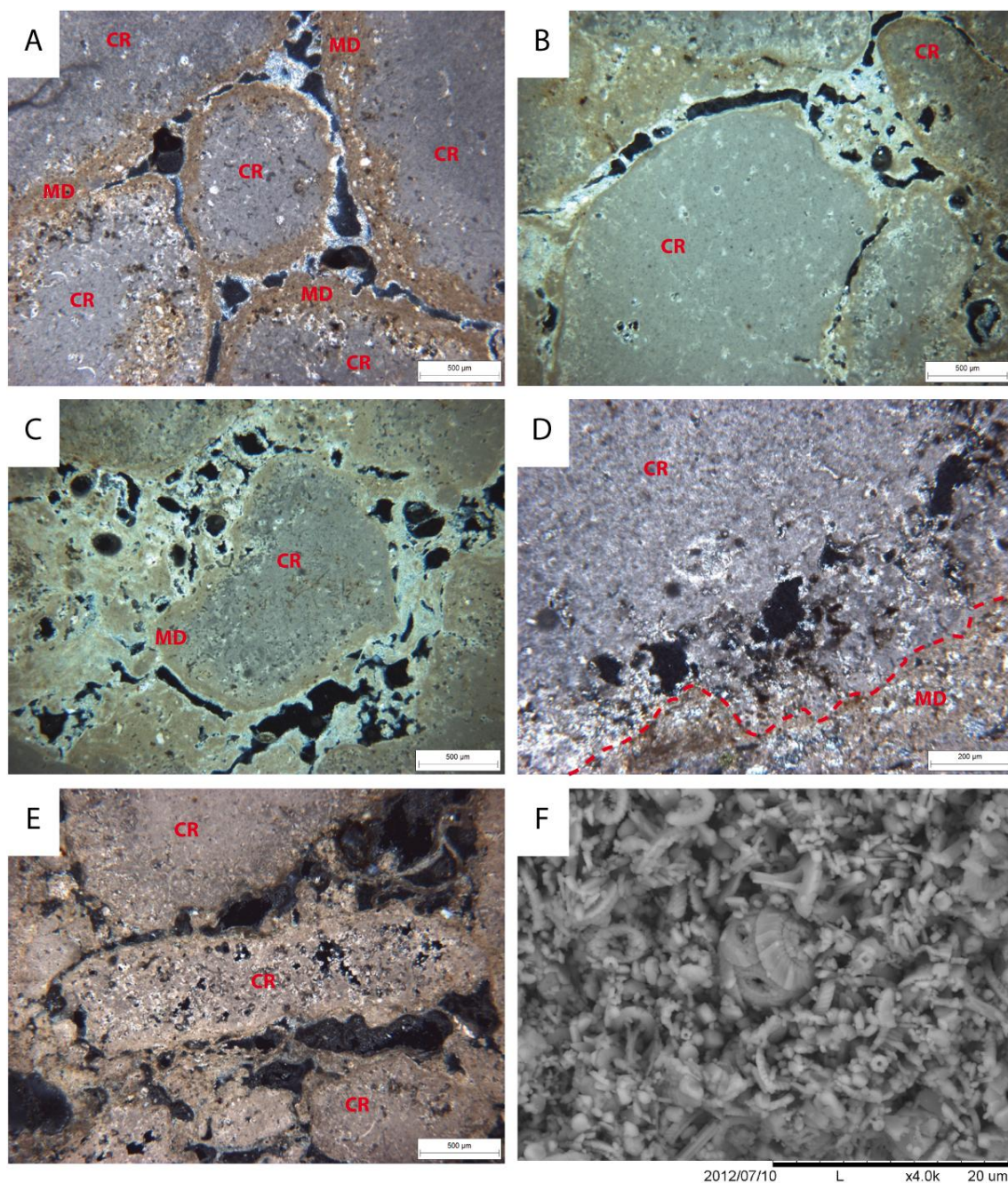


Figure VI - 27 : Macro-cryoclastes observés au microscope optique en LPA (A à E) et au MEB (F).
A : différents macrocryoclastes (CR) entourés par une couche de matrice détritique (MD) ; **B** : macro-cryoclaste présentant un contour relativement lisse (microfossile visible à gauche) ; **C** : macro-cryoclaste avec contour relativement bien altéré (couche de matrice détritique également observable) ; **D** : agrandissement d'un cryoclaste au contour très altéré (limite entre contour altéré du macro-cryoclaste et revêtement de matrice détritique figuré en pointillés) ; **E** : macro-cryoclaste avec altération importante ; **F** : vue des éléments microscopiques présents dans les cryoclastes.

b. AGRÉGATS MICRO-CRYOCLASTES/MATRICE DÉTRITIQUE

L'HAC comme les grèzes présentent également des agrégats constitués en grande partie de matrice à éléments détritiques mais contenant également des cryoclastes nettement plus petits que ceux observés précédemment (Figure VI - 28). Ces petits éléments crayeux seront ici appelés « micro-cryoclastes ».

Le diamètre moyen des micro-cryoclastes varie entre 50 et 600 μm (Figure VI - 28 : E). A l'instar des macro-cryoclastes, ils présentent des formes généralement arrondies (exemple Figure VI - 28 : A, B et D). L'altération périphérique est ici plus rarement observable du fait de leur taille plus petite et il existe des occurrences pour lesquelles le contour est assez mal défini et semble se fondre dans la matrice détritique (notamment VI - 28 : C et E). Il faut noter qu'en de rares occasions, certains agrégats peuvent contenir quelques faibles occurrences de macro-cryoclastes.

Il existe des différences entre les agrégats micro-cryoclastes/matrice détritique observés dans les HAC et ceux présents au sein des grèzes.

Dans les grèzes, les agrégats micro-cryoclastes/matrice forment des entités dont la dimension la plus grande peut atteindre 2 à 3 millimètres (Figure VI - 29). La taille de ces agrégats est généralement assez homogène au sein du niveau.

Au sein des HAC, ces agrégats peuvent présenter des étendues plus ou moins importantes. Comme dans les grèzes, ces entités peuvent être assez étendues (Figure VI - 29 : A et C) mais ces occurrences apparaissent plus rarement. Leur taille est généralement inférieure (environ 8 millimètres à 1,5 centimètre) (Figure VI - 29 : B). Il faut noter que dans certaines zones particulières et peu observées, ces agrégats peuvent être franchement plus petits (maximum 5 millimètres mais généralement entre 2 et 3 millimètres). Ces zones aux étendues généralement larges contiennent également des micro-cryoclastes en nombre parfois assez important (Figure VI - 29 - D). Elle ne peuvent pas être confondues avec les aires ouvertes qui comme il sera vu plus tard, présentent une morphologie bien différente au sein des HAC. Aucune franche différence n'a pu être observée entre les agrégats micro-cryoclastes/ matrice détritique des HAC des trois profils étudiés.

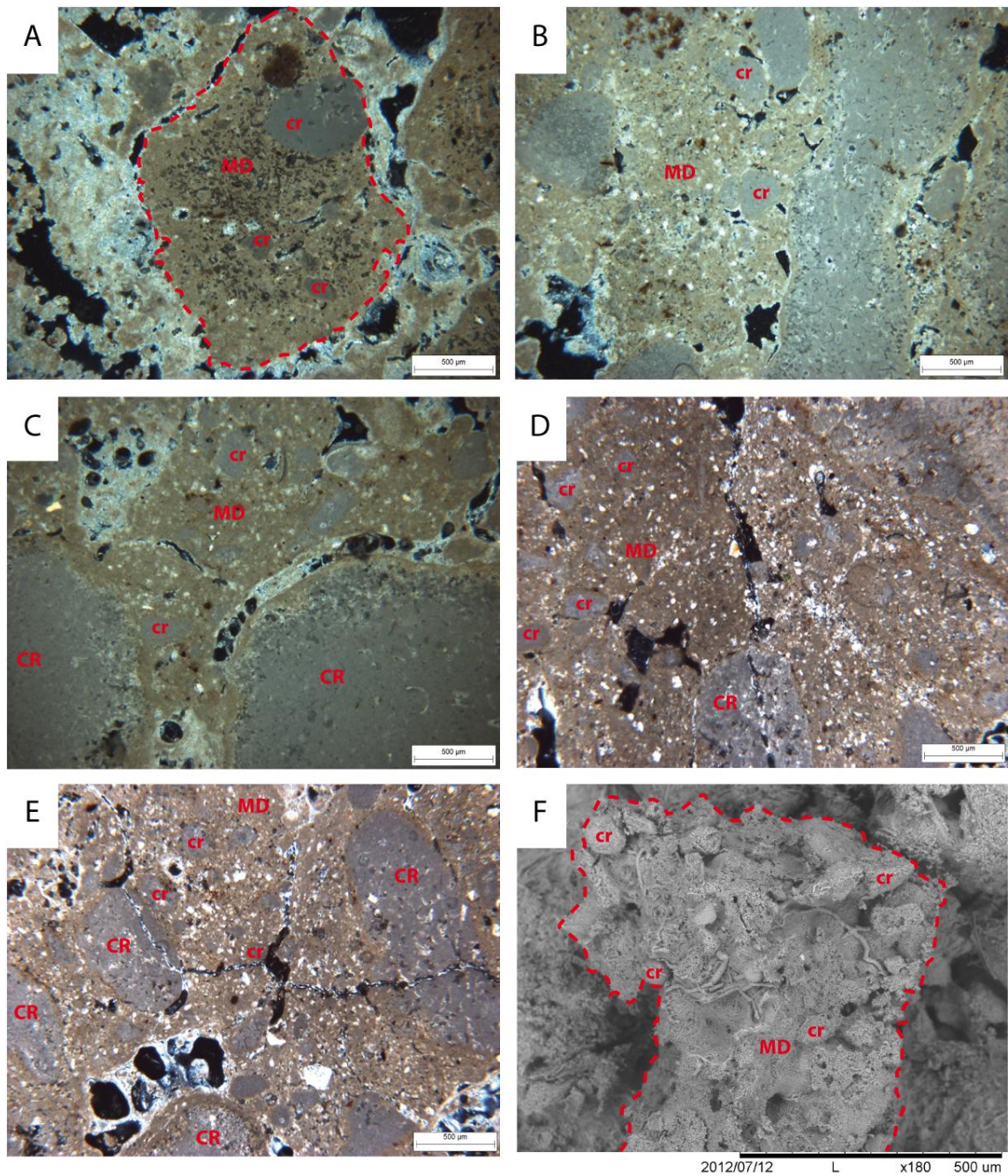


Figure VI - 28 : Agrégats de micro-cryoclastes et de matrice détritique observés au microscope optique en LPA (A à E) et au MEB (F). **A** : vue générale d'un agrégat (des micro-cryoclastes cr dont le contour est assez bien défini sont emballés dans de la matrice détritique MD) ; **B** : agrégat jouxtant un macro-cryoclaste (des micro-cryoclastes relativement petits se distinguent dans le fond matriciel détritique) ; **C** : les micro-cryoclastes les plus petits présentent un contour assez mal défini ; **D** : deux agrégats dont les micro-cryoclastes présentent un contour assez mal défini (la macroporosité est ici très peu présente) ; **E** : agrégat présentant une définition de contour variable et une macroporosité assez marquée ; **F** : composition d'un agrégat vue au MEB.

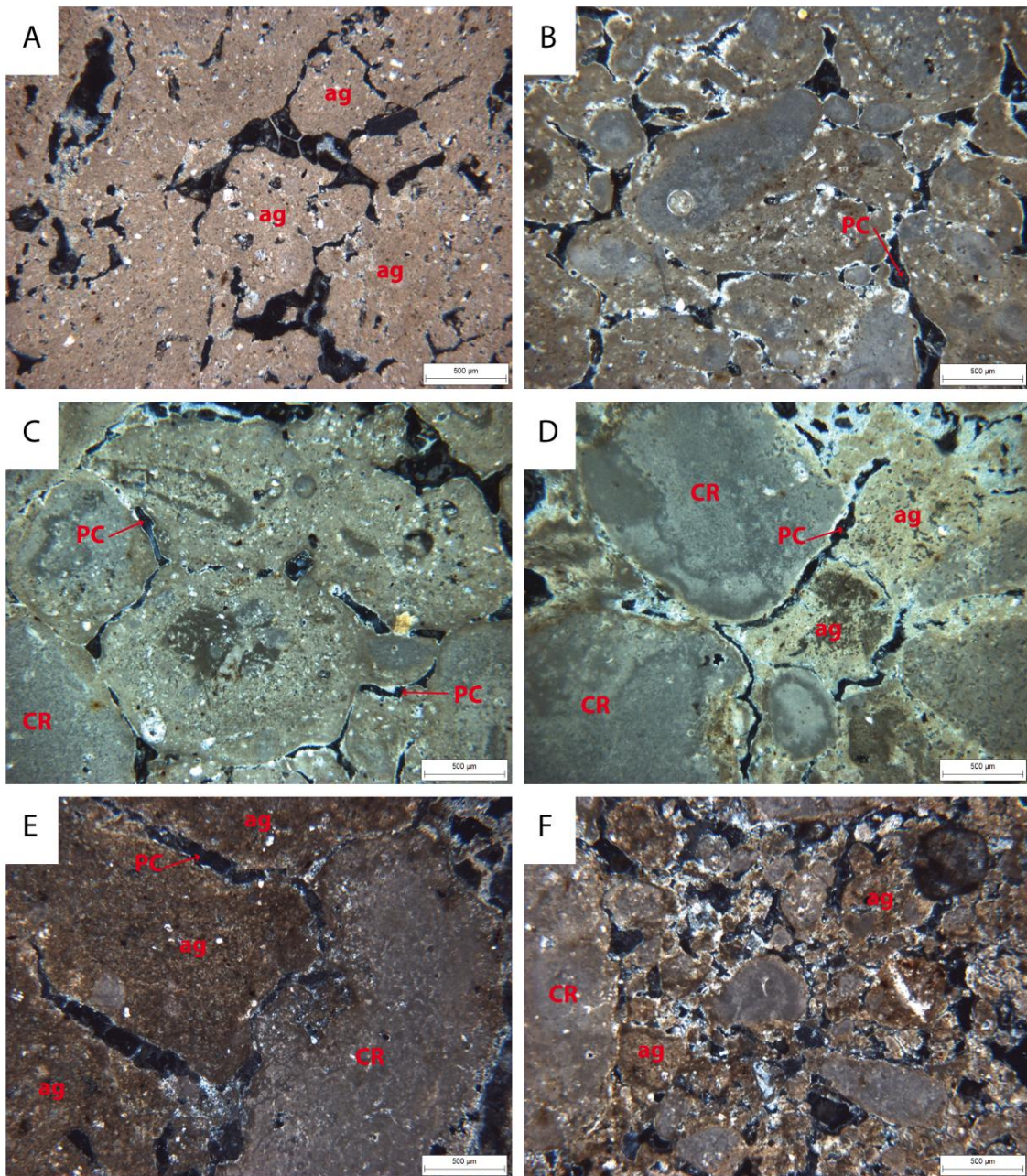


Figure VI - 29 : Agrégats micro-cryoclastes/matrice détritique caractéristiques des grèzes (A à C) et des HAC (D à F) vus au microscope optique en LPA. ag : agrégat micro-cryoclastes/matrice détritique ; CR : macro-cryoclaste ; PC : porosité de canaux.

3. ENTITÉS SECONDAIRES

Les entités secondaires sont définies par l'agencement des entités principales précédemment décrites. Il s'agit de différents types de porosités ainsi que des aiguilles de calcite.

a. POROSITÉ DE CANAUX

Les deux précédentes entités micromorphologiques (macro-cryoclastes et agrégats micro-cryoclastes/matrice détritique) sont séparées par une porosité qui se présente, en deux dimensions, comme des canaux allongés. Cette porosité peut être qualifiée d'inter-particulaire selon la classification de Choquette et Pray [1970] ou de structurale [Child, 1969].

La largeur moyenne de ces canaux peut varier entre 60 et 140 μm et elle peut présenter des quantités assez variables d'étranglements.

Dans les grèzes, la porosité de canaux semble plutôt étroite avec une largeur moyenne proche de 60 μm (Figure VI - 28 : B et C (porosité de canaux : PC)). Sur leur longueur, ces canaux présentent de nombreux étranglements.

Au sein des HAC, ces canaux présentent une largeur nettement plus importante que dans les grèzes en atteignant des valeurs moyennes qui peuvent atteindre les 140 μm (Figure VI - 28 : D et E (porosité de canaux : PC)). De plus, la connexion des différents canaux semble généralement meilleure et ils présentent nettement moins de zones à étranglements.

b. AIGUILLES DE CALCITE

Les aiguilles de calcite forment également une entité micromorphologique ubiquiste des HAC et des grèzes.

La longueur de ces éléments aciculaires varie entre 10 et 100 μm tandis que leur diamètre est toujours inférieur à 2 μm ce qui les classe dans la catégorie des aiguilles de type MA dans la classification de Verrecchia et Verrecchia [1994] (Figure VI - 30). C'est l'association par paires (avec section « en huit » qui est ici la plus observée ce qui en fait majoritairement des aiguilles de type MA1 selon la même classification.

L'ensemble de la porosité observée (microscopie optique et électronique à balayage) est tapissée par une fine couche d'aiguilles de calcite d'une épaisseur moyenne de 13 μm (Figure VI - 31 : A et B), que ce soit dans les HAC ou dans les grèzes.

L'agencement de ces aiguilles peut sembler complètement aléatoire ou former des structures généralement pontées (Figure VI - 31). Les ponts formés peuvent alors créer des contacts parfois nombreux entre les différentes entités micromorphologiques mais également entre les éléments les constituant.

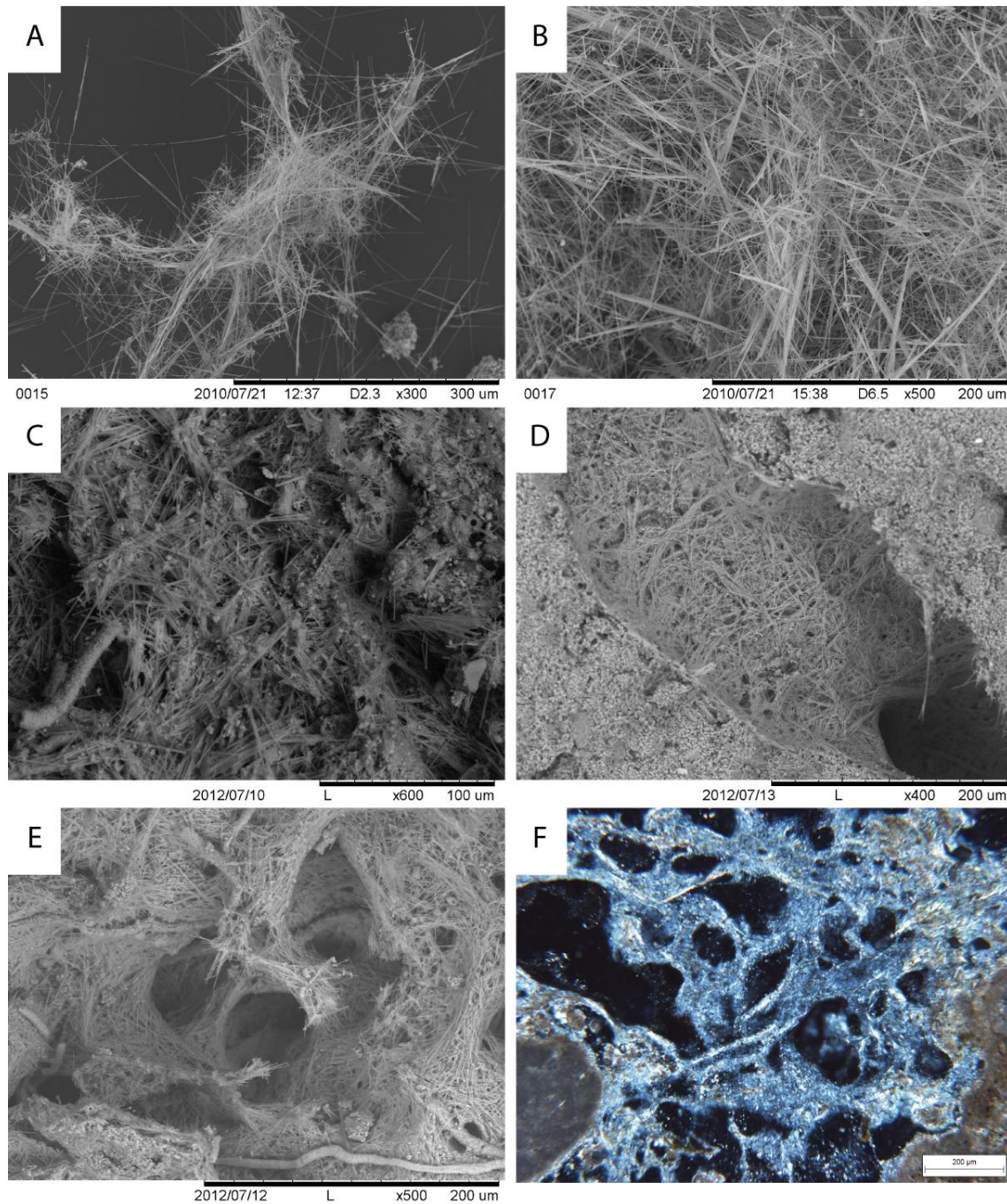


Figure VI - 30 : Aiguilles de calcite observées au MEB (A à E) ainsi qu'au microscope optique en LPA. **A et B** : aiguilles de calcite isolées ; **C et D** : aiguilles de calcite vues en contexte : placage qui présente peu d'organisation sur des éléments crayeux et détritiques ; **E** : structures ordonnées en ponts ; **F** : aiguilles de calcite parfois réparties de manière aléatoire ou en structures pontées.

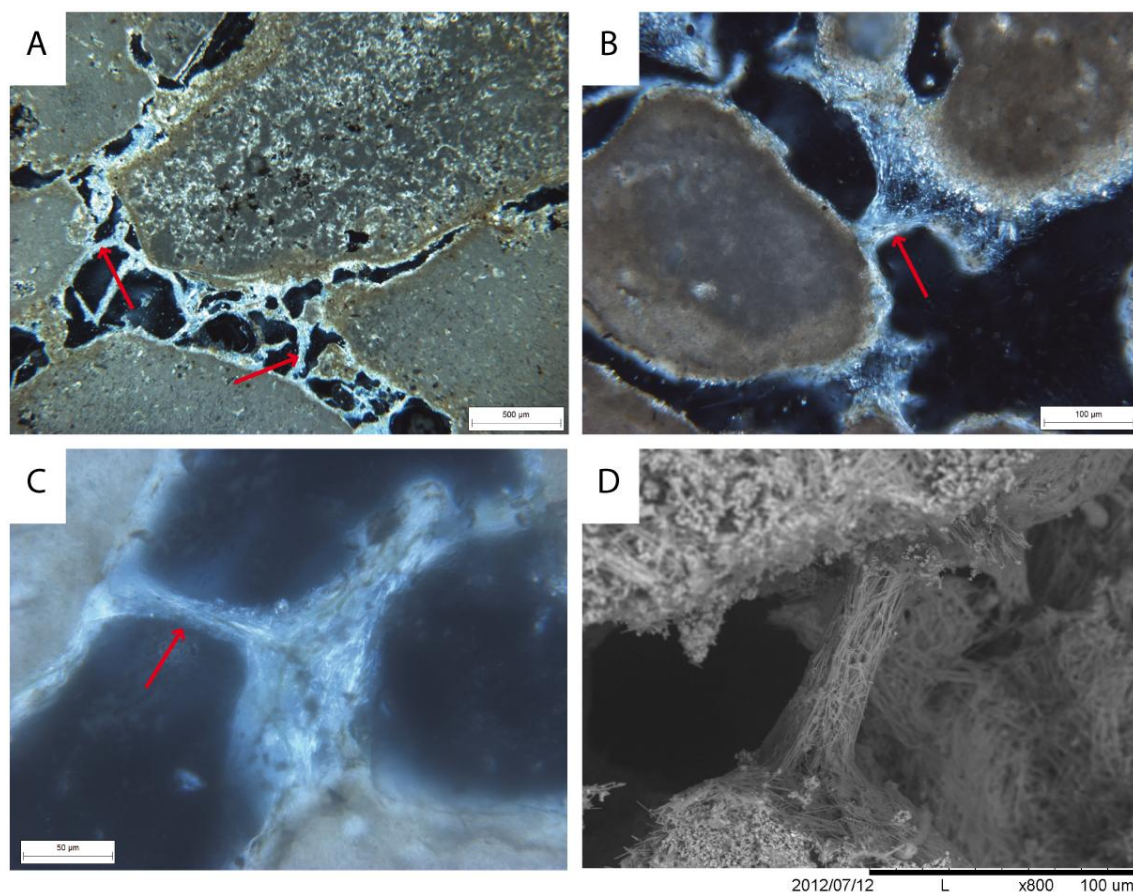


Figure VI - 31 : Aiguilles de calcite en structures pontées vues au microscope optique en LPA (A à C) ainsi qu'au MEB (D).

c. AIRES OUVERTES

La porosité inter-particulaire de canaux donne accès à des zones poreuses plus développées nommées "aires ouvertes" dans cette étude (Figure VI - 32 : B et D).

Loin de se présenter comme des larges pores, ces aires ouvertes contiennent des quantités variables de petits agrégats de matrice détritique (ag) dont le diamètre varie entre la dizaine de microns et le demi millimètre (Figure VI - 32).

Des petits cryoclastes (cr) peuvent également être présents de manière plus sporadique au sein de ces aires ouvertes qui présentent également des quantités variables d'aiguilles de calcite (Figure VI - 32 : B et C) en fonction de l'horizon étudié.

L'étendue de ces aires ouvertes peut être très variable en fonction du niveau étudié puisque leur diamètre moyen peut varier entre 400 μm et 3 millimètres. Elle présente une macroporosité généralement bien observable dont la quantité diffère en fonction des niveaux étudiés.

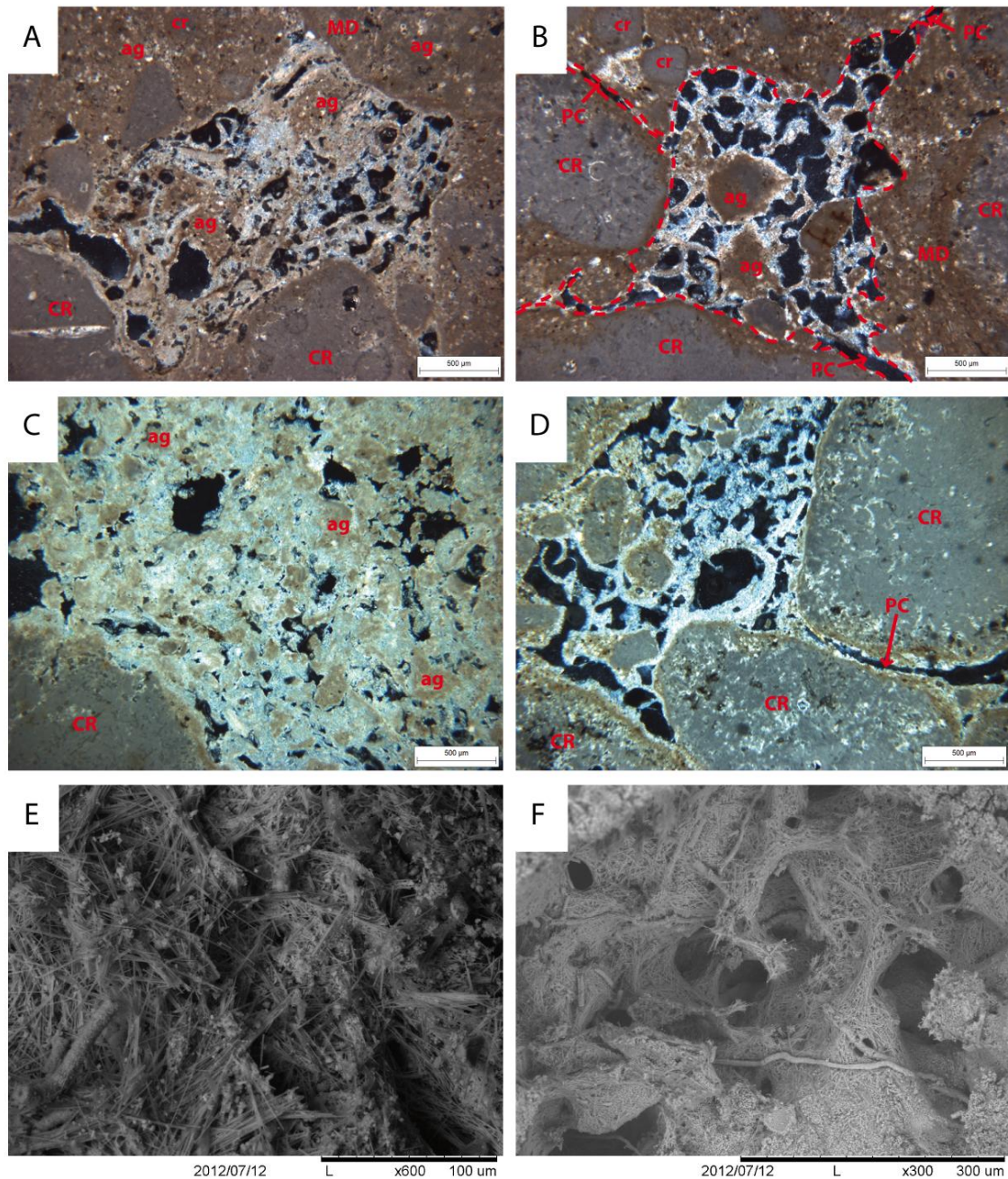


Figure VI - 32 : Aires ouvertes observées dans les grèses (A, B, D (LPA) et F (MEB)) et dans les HAC (C (LPA) et E (MEB)). Dans les grèses, les aires ouvertes sont de taille moyenne et semblent plutôt bien organisées. Dans les HAC, ces entités sont généralement plus grandes et présentent un aspect très désorganisé.

Dans les grèses, les aires ouvertes peuvent présenter un diamètre allant jusqu'à 3 millimètres (Figure VI - 32 : A et B). Dans les HAC, ces aires ouvertes montrent des dimensions qui peuvent être jusqu'à deux fois plus importantes (Figure VI - 32 : C). Certaines d'entre elles peuvent présenter une forme plus allongée et atteindre exceptionnellement les 8 centimètres (Figure VI - 33 : A).

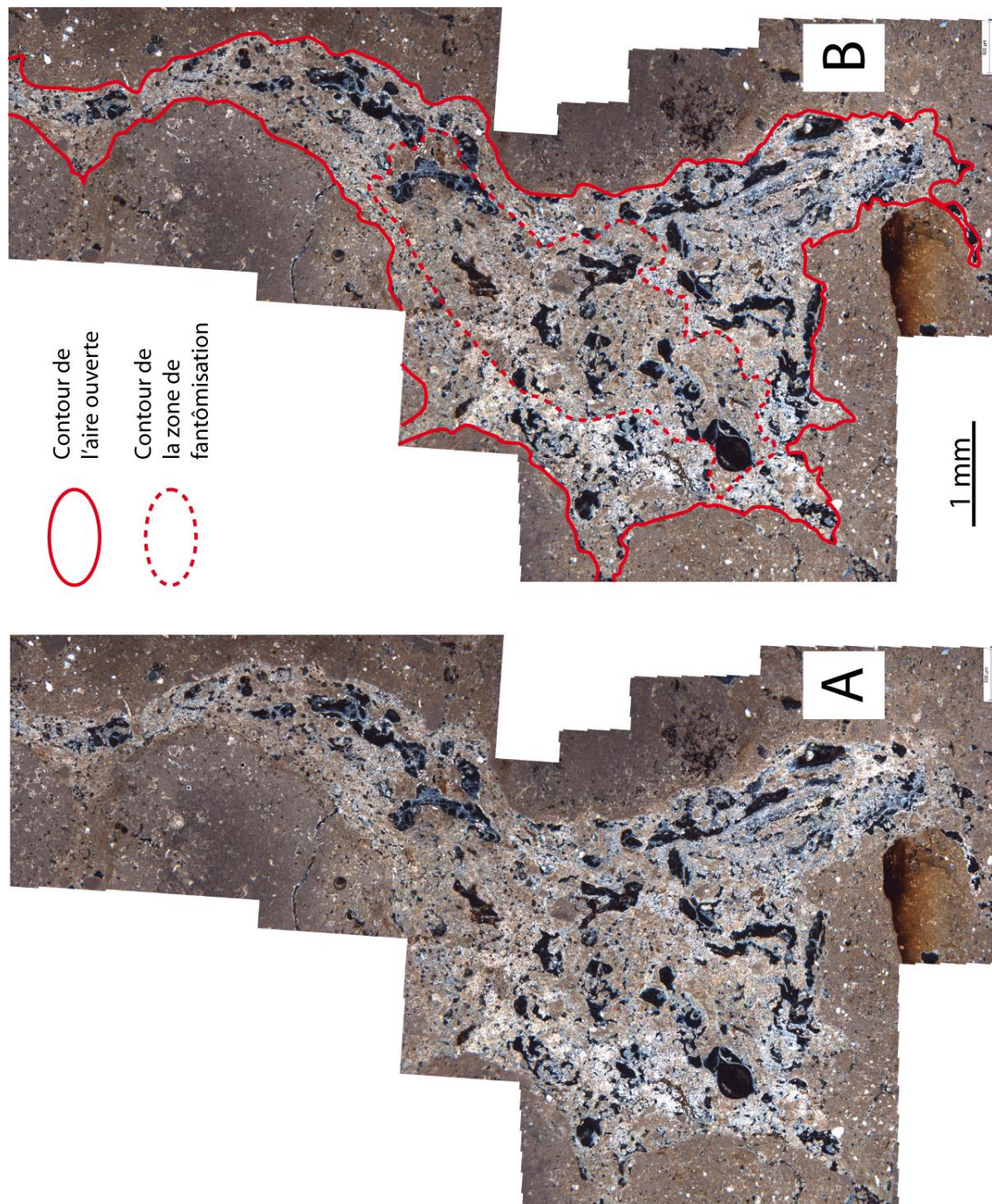


Figure VI - 33 : Panorama d'une aire ouverte exceptionnellement grande observée dans un échantillon d'HAC et visualisation de la zone de fantômisisation.

Les dimensions de ces aires ouvertes ne sont pas la seule caractéristique qui diffère entre les HAC et les grèzes. En effet, les aires ouvertes de ces dernières présentent une macroporosité généralement assez importante et les aiguilles de calcites organisées en structures pontées sont généralement bien présentes (Figure VI - 32 : A, B et F). Dans les HAC, les aires ouvertes apparaissent plus comme des structures assez peu organisées. La macroporosité y est nettement moins présente, les agrégats de matrice sont moins bien définis et les aiguilles de calcite, clairement plus

nombreuses, présentent une répartition franchement plus disparate (Figure VI - 32 : C, et E).

Au sein de certaines des larges aires ouvertes (et notamment les plus grandes) présentes dans les HAC peuvent être observées des zones différenciées qui se caractérisent par des concentrations plus importantes de matrice détritiques au détriment des amas d'aiguilles de calcite (Figure VI - 33 - B). Ces zones présentent des morphologies arrondies ou ovoïdes qui rappellent celles des macro-cryoclastes de craie tout comme leur taille. Ces zones pourraient être des fantômes d'anciens cryoclastes altérés de manière intense.

4. SYNTHÈSE

L'observation des lames minces permet donc de distinguer 5 entités micromorphologiques communes aux HAC et aux grèzes. Il existe cependant de notables différences dans l'agencement de ces phases entre les deux horizons.

Les grèzes présentent une structure plutôt bien organisée. Les entités principales laissent place à une porosité de canaux étroite présentant de nombreux étranglements qui donne accès à des aires ouvertes moyennes présentant des aiguilles généralement bien structurées et bien « aérées » (macroporosité importante) (Tableau VI - 2).

Entité micromorphologique	Horizon d'accumulations carbonatées	Grèzes
Macro-cryoclastes	Pas de différence visible	
Agrégats micro-cryoclastes/matrice	Mal définis, dimension faible	Assez distincts, jusqu'à 2 cm
Porosité de canaux	Assez large (larg. Moy. 140 µm), peu d'étranglements, bonne connexion entre canaux	Etroite (larg. Max. 60 µm), nombreux étranglements
Aires ouvertes	Diamètre max. moyen 6 cm, exceptionnellement jusqu'à 8 mm	Diamètre max. 3 mm
Aiguilles de calcite	Ubiquiste dans la porosité mais plus nombreuses et moins organisées dans les aires ouvertes des horizons d'accumulations carbonatées	

Tableau VI - 2 : Synthèse des différences HAC/grèzes en fonction des différentes entités micromorphologiques déterminées.

La structuration des HAC est plus complexe. La porosité de canaux formée par l'agencement des entités principales est plus large et forme un réseau poreux nettement plus continu que dans les grèzes de par la faible présence d'étranglements. La porosité de canaux donne accès à des aires ouvertes plus étendues dont la structure présente une complexité plus importante que celle des grèzes. Des petits agrégats

micro-cryoclastes/matrice détritique y sont emballés dans des grandes quantités d'aiguilles de calcite qui semblent très désorganisées.

Ces altérités permettent d'une part de caractériser les HAC champardennais mais vont également pouvoir expliquer une grande partie des caractéristiques hydriques intrinsèques de ces différents horizons.

VI. ÉTUDE POROSIMÉTRIQUE

1. POROSITÉ TOTALE À L'EAU

Les échantillons de craie prélevés au niveau du profil 1 présentent une porosité totale à l'eau moyenne de $42,8 \pm 0,8$ % (Figure VI - 34). Ceux prélevés au droit du profil 2 montrent une porosité totale à l'eau extrêmement proche de ceux du profil 1 : $43,4 \pm 0,1$ %. Ces valeurs concordent avec les porosités totales de la craie habituellement déterminées dans la bibliographie [*e.g.* : Ballif, 1978 ; Vachier *et al.*, 1979 ; Richard et Sizun, 2011 ; Descostes *et al.*, 2012 ; Nadah *et al.*, 2013].

La faible valeur des écarts-types (0,8 % pour le profil 1 et 0,1 % pour le profil 2) met en lumière la très bonne homogénéité du substrat crayeux.

Les grèzes des profils 1, 2 et 3 présentent des valeurs de porosités totales à l'eau respectives de $42,1 \pm 3,1$, $42,4 \pm 3,2$ et $44,2 \pm 1,4$ % (Figure VI - 34). Ces valeurs semblent donc assez homogènes bien que la porosité totale à l'eau des grèzes du profil 3 apparaisse légèrement plus élevée.

C'est au sein des HAC que les valeurs de porosités totales à l'eau sont les plus variables entre les trois profils étudiés.

D'une manière générale, les HAC présentent des valeurs de porosité totale à l'eau de 1,3 à 1,5 fois supérieures à celles des grèzes.

Les HAC épais et assez massifs des profils 1 et 3 présentent des valeurs de porosités totales à l'eau assez similaires qui valent respectivement $57,0 \pm 3,6$ et $56,3 \pm 3,8$ % (Figure VI - 34).

Le profil 2 qui présente un faciès plus fin et plus laminé montre des valeurs de porosités totales à l'eau plus importantes de $62,0 \pm 6,7$ % (Figure VI - 34). L'écart-type plus important calculé pour le profil 3 (6,7 % contre 3,6 et 3,8 % pour les profils 1 et 2) témoigne de la plus grande hétérogénéité de l'HAC du profil 3.

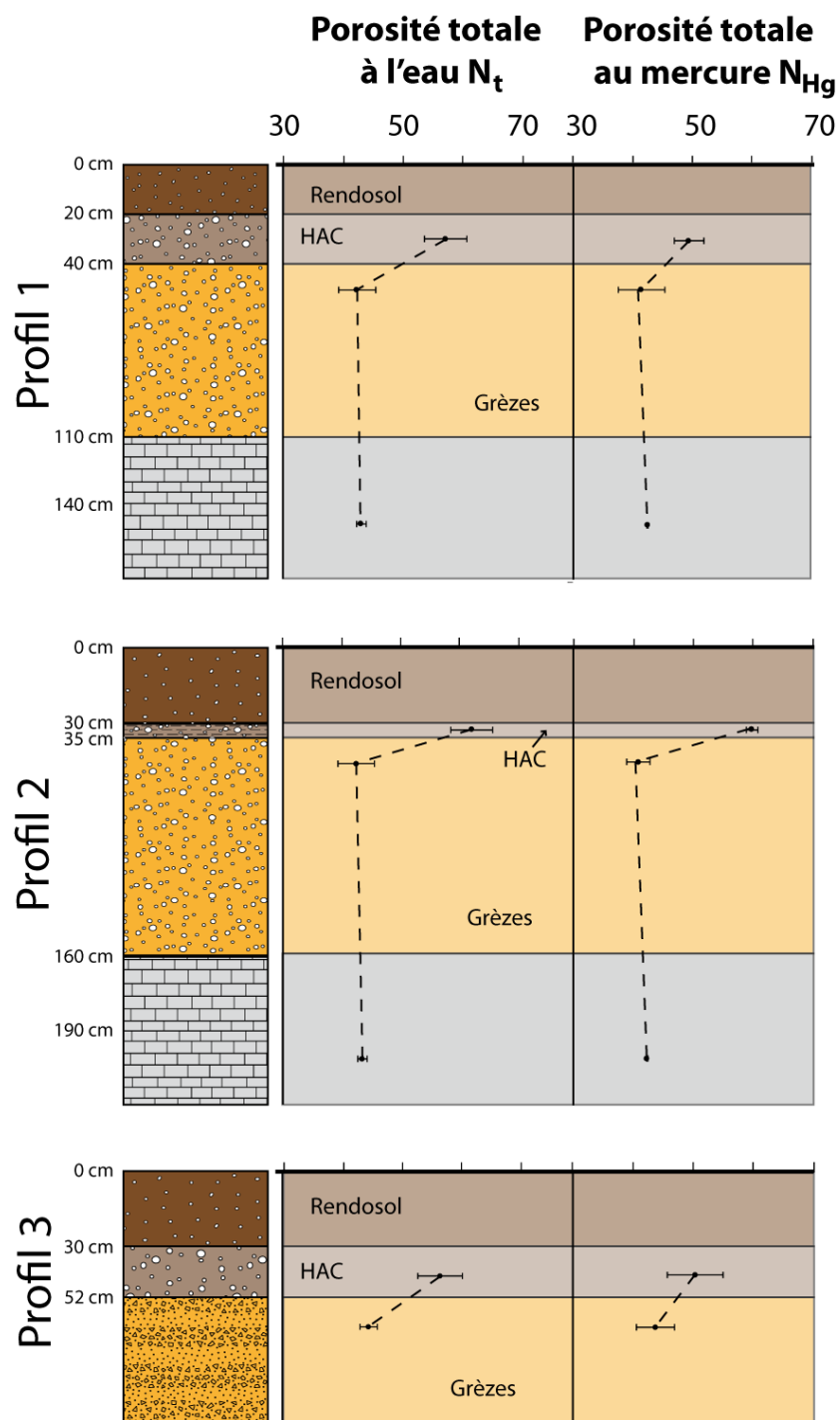


Figure VI - 34 : Graphique représentant les valeurs de porosités totales à l'eau N_t ainsi que les valeurs de porosités totales par injection de mercure N_{Hg} en fonction de la profondeur pour les 3 profils étudiés au Mont du Ménil.

2. POROSITÉ TOTALE PAR INJECTION DE MERCURE

D'une manière générale, les valeurs de porosités totales issues de la porosimétrie par injection de mercure sont inférieures à celles mesurées par la méthode de détermination de la porosimétrie totale à l'eau (Figure VI - 34).

L'homogénéité de la craie est retrouvée dans les mesures de porosité totale au mercure ; les valeurs mesurées pour les échantillons de craie des profils 1 et 2 sont en effet très proches (respectivement 42,4 et 42,1 %), les écarts-types sont très faibles (0,1 % pour les deux profils) et ces valeurs sont peu différentes de celles mesurées par la méthode à l'eau (Figure VI - 34).

Les valeurs de porosités totales au mercure des grèzes mesurées sur les trois profils sont également très proches (respectivement 41,3, 40,7 et 43,7 %) (Figure VI - 34). Ici aussi, la porosité totale au mercure des grèzes du profil 3 sont tout de même un peu plus élevée.

Dans les HAC des profils 1 et 3 (épais et homogènes), des valeurs proches de porosité totale sont également observées (respectivement 49,3 et 50,3 % (Figure VI - 34). La porosité totale au mercure est plus importante dans l'HAC du profil 2 (plus fin et laminé) : 59,7 %. Contrairement à ce qui a pu être observé dans les résultats des porosités totales à l'eau, l'écart-type des valeurs de porosités totales au mercure est plus faible pour le profil 2 (1,0 %) que pour les profils 1 et 3 (respectivement 2,5 et 4,6 %).

3. CARACTÉRISATION DU MILIEU POREUX PAR INJECTION DE MERCURE

a. LE SUBSTRAT CRAVEUX

Les courbes de restitution des essais porosimétriques au mercure effectués sur les échantillons de craie témoignent de l'extrêmement bonne homogénéité du substrat crayeux au niveau du site (Figure VI - 35).

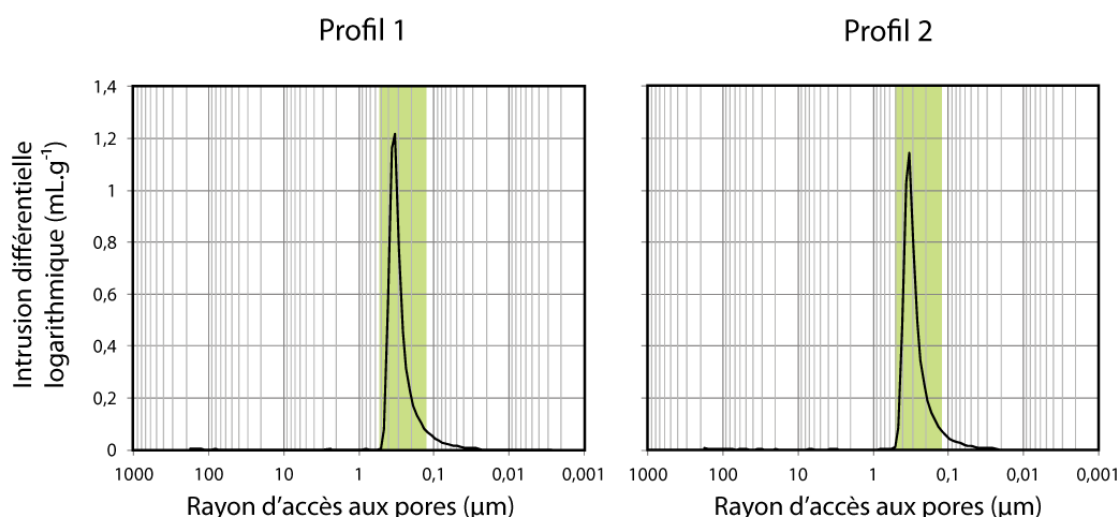


Figure VI - 35 : Courbes de restitution des essais au porosimètre à mercure caractéristiques des échantillons de craie prélevés au droit des profils 1 et 2 du Mont du Ménil.

Au sein de la craie, les transferts hydriques s'effectuent par des pores dont les rayons d'accès appartiennent à une famille d'étendue très restreinte centrée sur un rayon moyen (R_m) de $0,33 \mu\text{m}$ (Figure VI - 35). Ce mode unique induit des coefficients de dispersion C_d inférieurs à 1 et qui sont de plus très proches (respectivement $0,6 \pm 0,2$ et $0,7 \pm 0,1$) (Figure VI - 36).

La même famille de rayons d'accès aux pores bien centrée sur un rayon moyen de $0,33 \mu\text{m}$ est observable sur les courbes de restitution des essais porosimétriques au mercure effectués sur les échantillons de cryoclastes de craie. Son intensité est cependant de moindre importance (Figure VI - 37).

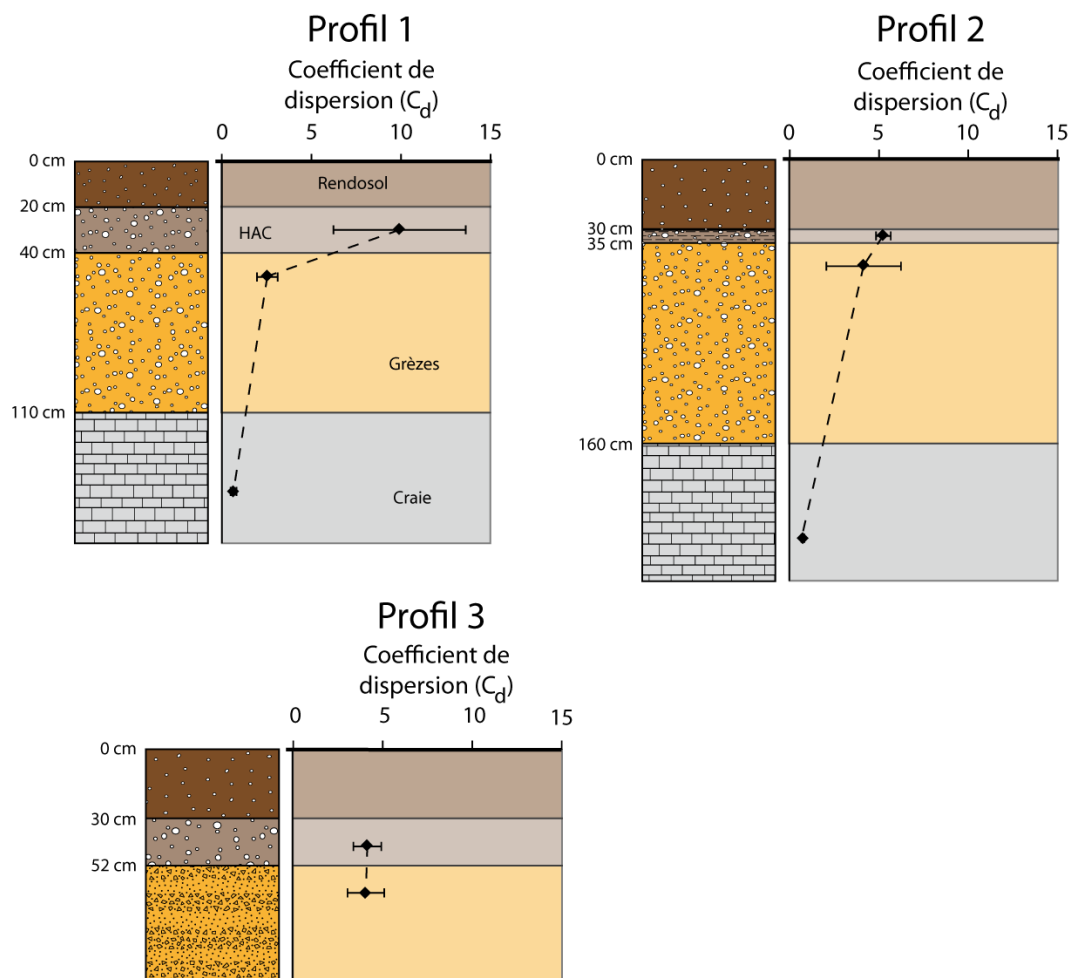


Figure VI - 36 : Coefficients de dispersion C_d de l'ensemble des niveaux étudiés dans les trois profils du Mont du Ménil en fonction de la profondeur.

Il existe également une seconde famille de rayons d'accès aux pores centrée sur $3,7 \mu\text{m}$ dont l'intensité est bien moins importante comparée à la première (Figure VI - 37).

Une quantité non négligeable du réseau poreux des cryoclastes de craie correspond aux rayons d'accès nettement plus importants sont localisés proche de la

limite supérieure de la méthode d'analyse (176,2 μm) (Figure VI - 37). Les cryoclastes de craie présentent une porosité totale de $35,4 \pm 3,0 \%$.

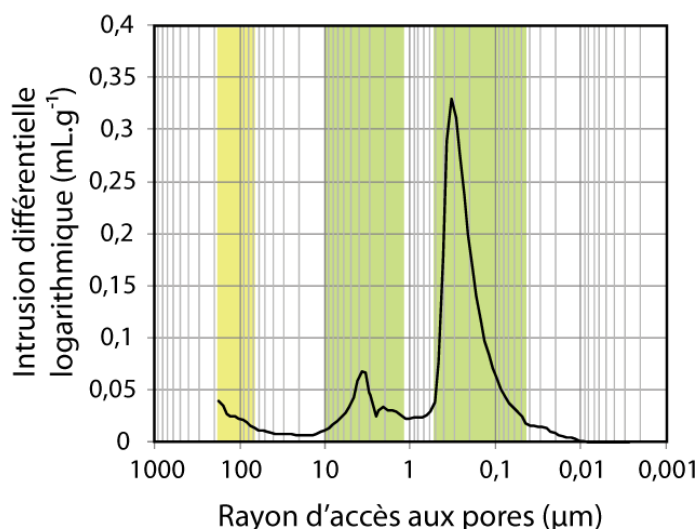


Figure VI - 37 : Courbes de restitution des essais au porosimètre à mercure caractéristiques des échantillons de cryoclastes de craie extraits des 3 profils du Mont du Ménéil.

b. LES GRÈZES

Les courbes de restitution des essais porosimétriques au mercure effectués sur les échantillons de grèzes des trois profils témoignent clairement de la bimodalité de leurs réseaux poreux ainsi que de leur homogénéité (Figure VI - 38).

La famille de rayons d'accès aux pores dont l'intensité est la plus importante est centrée sur des rayons d'accès compris entre 0,21 et 0,26 μm (Figure VI - 38). Cette famille est généralement très bien définie. La seconde famille de rayons d'accès aux pores présente une intensité de moindre importance. Elle est centrée sur des rayons d'accès compris entre 24,6 et 30,8 μm (Figure VI - 38).

La bimodalité des courbes porosimétriques des grèzes est reflétée par des valeurs de coefficients de dispersion C_d supérieures à 1 mais inférieures à 5. Ces valeurs sont assez proches dans les profils 2 et 3 (respectivement $5,2 \pm 0,4$ et $4,1 \pm 0,8$). Les grèzes issues du profil 1 présentent quant à elles un coefficient de dispersion inférieur dont la valeur calculée est de $2,5 \pm 0,6$ (Figure VI - 36).

c. LES HAC

Les courbes de restitution des essais porosimétriques au mercure effectués sur les échantillons d'HAC présentent des morphologies assez variables en fonction du profil étudié (Figure VI - 39).

Au sein des profils 1 et 2, les courbes de restitution des essais porosimétriques au mercure présentent un étalement clair des rayons d'accès aux pores (Figure VI - 39).

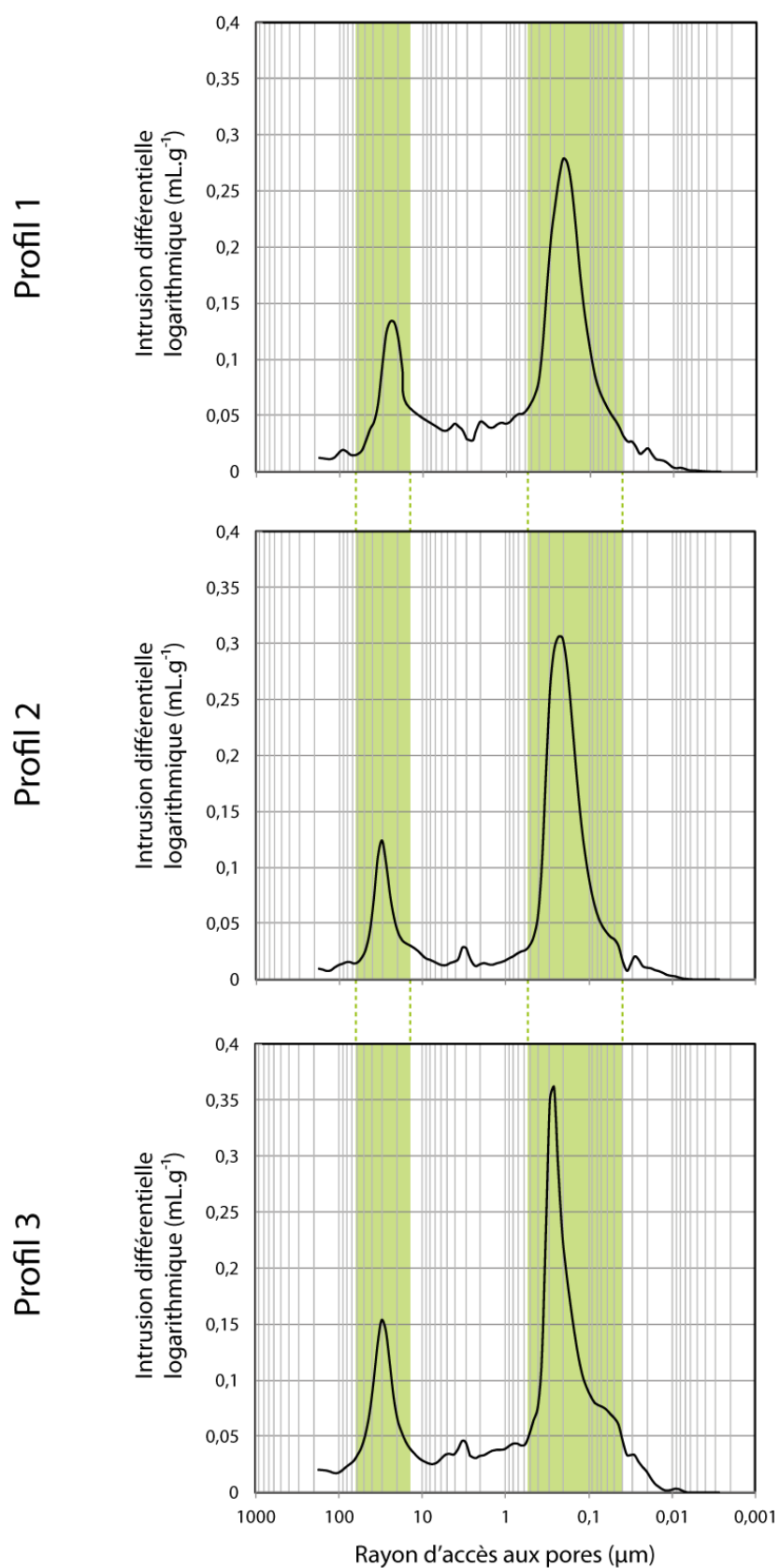


Figure VI - 38 : Courbes de restitution des essais au porosimètre à mercure caractéristiques des échantillons de grès prélevés sur les 3 profils du Mont du Ménil.

La courbe du profil 1 montre 3 principales familles moyennement bien définies de rayons d'accès aux pores qui sont centrés sur des rayons moyens R_m de 0,26, 3,0 et 48,1 μm . La famille de rayons d'accès aux pores centrée sur un rayon moyen de 3,0 μm permet l'accès à un volume poreux moindre que les deux autres (Figure VI - 39).

Dans le profil 2, l'HAC présente une répartition des rayons d'accès aux pores clairement dispersée. Deux familles de rayons d'accès aux pores semblent tout de même se distinguer bien qu'elles regroupent des intervalles de rayons d'accès aux pores étendus (Figure VI - 39) :

- la première comprend les rayons d'accès aux pores allant de 0,01 à 2,32 μm et présente trois « sous-familles » centrées sur 0,05, 0,19 et 0,72 μm . Le maximum du réseau poreux envahi par l'intermédiaire des rayons d'accès aux pores regroupés par cette famille est atteint pour le rayon moyen de 0,05 μm ;
- la seconde inclut les rayons d'accès aux pores compris entre 2,3 et 66,7 μm . Cette famille semble également présenter des « sous-familles » mais de moindre importance. Le maximum du réseau poreux envahi par l'intermédiaire des rayons d'accès aux pores regroupés par cette famille est atteint pour le rayon moyen de 10,14 μm .

La dispersion importante des rayons d'accès aux pores dans les HAC des profils 1 et 2 se retrouve dans les coefficients de dispersion élevés (respectivement $9,9 \pm 3,7$ et $5,2 \pm 0,4$) (Figure VI - 36).

Les courbes obtenues sur l'HAC du profil 3 est nettement plus proche de celle des grèzes que ce qui a pu être observé pour les deux autres profils (Figures VI - 39 et VI - 38) :

- une première famille de rayons d'accès aux pores bien définie et centrée sur un rayon moyen de 21,0 μm est d'abord observable (dans les grèzes, ce rayon moyen est égal à 30,79 μm) ;
- une seconde famille plus étendue qui regroupe les rayons d'accès aux pores compris entre 0,01 et 1,0 μm est également observable. Dans cette famille, l'injection maximum de mercure est atteinte pour des rayons d'accès moyens principalement centrés sur 0,05 et 0,26 μm (l'injection maximum de mercure est atteinte pour des rayons d'accès moyens de 0,05 ou 0,26 en fonction des différents échantillons testés).

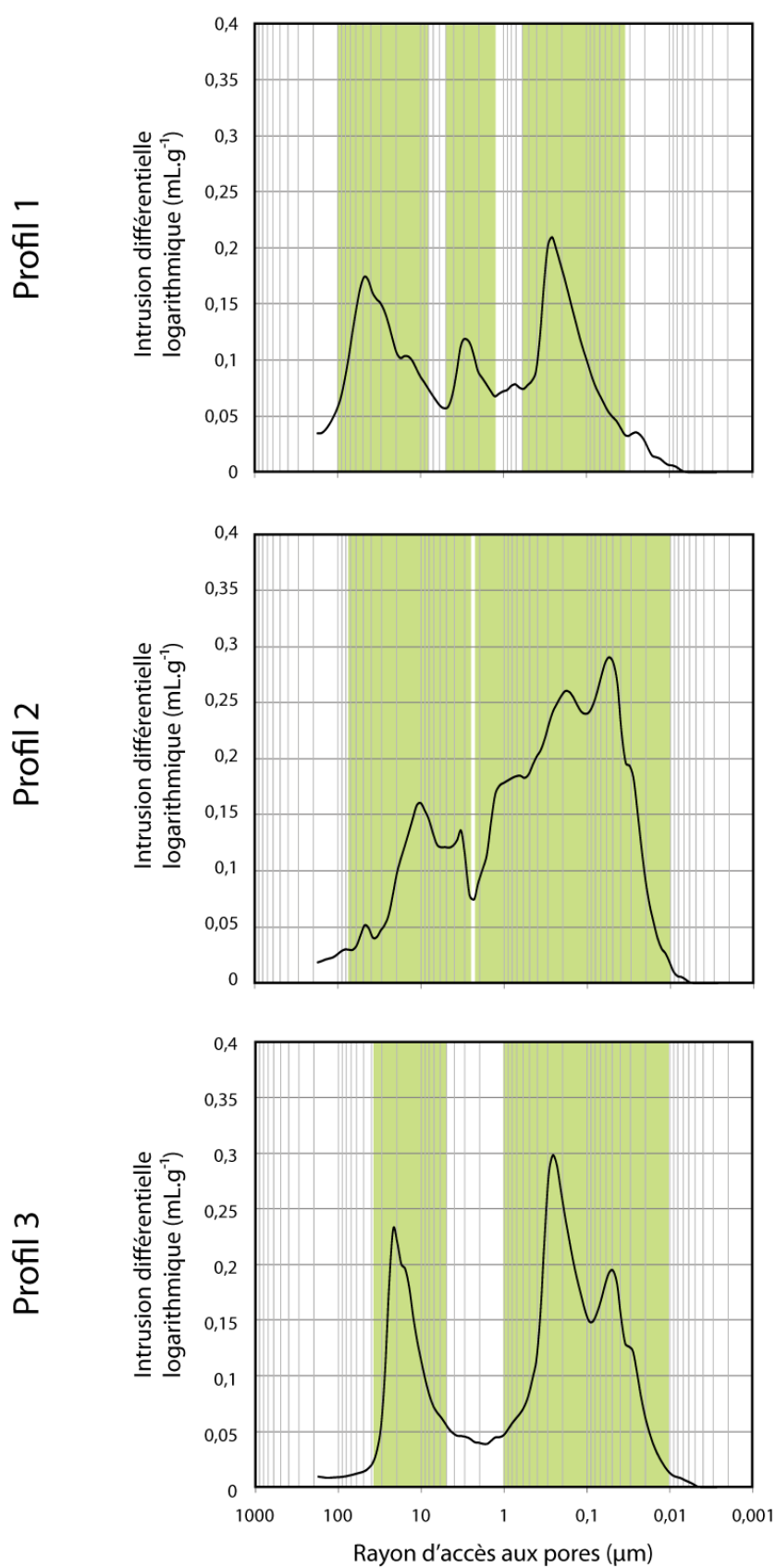


Figure VI - 39 : Courbes de restitution des essais au porosimètre à mercure obtenues pour les échantillons d'HAC prélevés sur les 3 profils du Mont du Ménil.

Dans ce troisième profil, la répartition des rayons d'accès aux pores plus proche de celle des grèzes se traduit par un coefficient de dispersion du même ordre que ces dernières ($4,1 \pm 0,8$) (Figure VI - 36).

4. DIMENSION FRACTALE

Comparés aux grèzes, les HAC des profils 1 et 2 du Mont du Ménil présentent des dimensions fractales plus importantes ($2,98 \pm 0,01$ contre $2,81 \pm 0,04$). Ceci indique que le réseau présente des rugosités indentées importantes.

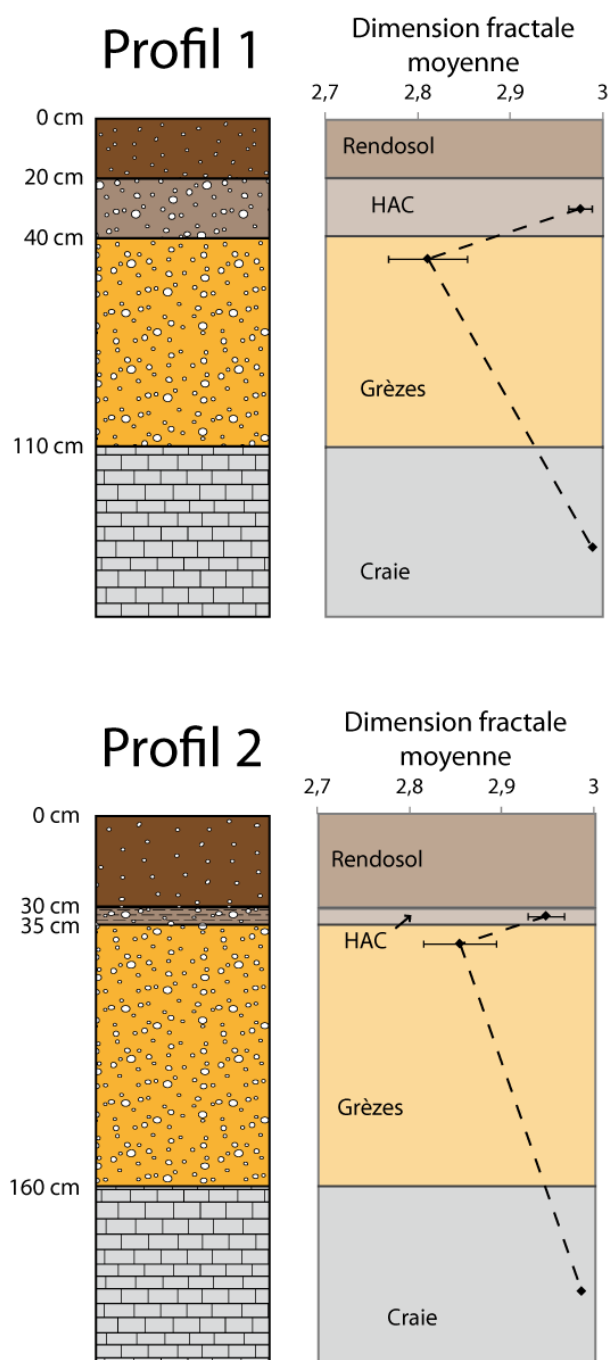


Figure VI - 40 : Dimensions fractales moyennes (et écarts-types) obtenues par porosimétrie par injection de mercure pour les HAC, les grèzes et la craie des profils 1 et 2 du Mont du Ménil.

Les dimensions fractales obtenues pour les échantillons de substrat crayeux ($2,99 \pm 0,00$) témoignent également d'un réseau poreux dont la rugosité et les indentations sont très importantes.

VII. DATATION DE L'HAC DU SITE AUSSONCE-EST

La datation au carbone 14 effectuée sur le fragment de charbon découvert lors du prélèvement partiel de l'HAC du site d'Aussonce-Est donne après calibration un âge de 7380 ± 50 ans BP.

DISCUSSION PARTIELLE

Les études ayant pour objectif la caractérisation des HAC considèrent généralement ces horizons de manière isolée, sans comparaison aux autres horizons en présence (horizon organo-minéral, grèze ou graveluche, substrat crayeux). La présente étude propose donc d'établir des éléments de caractérisation propres aux HAC de Champagne en déterminant les paramètres caractéristiques de ces structures en les comparant aux autres horizons des profils de sol.

I. COLORIMÉTRIE ET CARBONATES

La caractérisation des HAC par l'étude colorimétrique est rarement abordée dans la littérature de synthèse spécialisée sur les HAC [e.g. Alonzo-Zarza et Wright, 2010 ; Wright et Tucker, 1991]. Le paramètre couleur n'est en effet jamais pris en compte dans les diverses classifications de ce type de structure et n'est quasiment jamais cité. Les caractéristiques colorimétriques, lorsqu'elles sont indiquées, sont généralement données à titre indicatif descriptif [e.g. Loisy, 1997, Durand, 1979].

L'étude colorimétrique réalisée dans deux espaces colorimétriques différents au cours de ce travail (CIE-XYZ et CIE-L*a*b*) montre qu'au sein des profils pédologiques, les HAC de Champagne présentent une signature colorimétrique caractéristique par rapport aux autres horizons. Ces structures se distinguent en effet des autres horizons par des teintes moins brunes et plus claires.

D'un point de vue colorimétrique, les deux systèmes permettent d'observer un pôle craie pure duquel se rapprochent les HAC. Ce rapprochement est d'autant plus important que l'HAC est riche en carbonates. La différenciation significative entre les HAC et les grèzes confirmée par le calcul des valeurs de ΔE^* (CIE-L*a*b*) semble donc être en lien avec l'enrichissement en carbonates qui caractérisent les HAC [e.g. Chiquet *et al.*, 2000 ; Khalaf et Gaber, 2008 ; Guedria *et al.*, 1989]. Il faut cependant garder en mémoire que cette méthode est dépendante de l'humidité du sol et ne peut être valable sur le terrain que par temps sec.

II. COT ET P_2O_5

Les teneurs en COT décroissent avec l'enfoncement dans le profil. Ceci semble indiquer que le carbone organique trouve son origine dans la matière organique de la litière qui percole à travers les différents horizons par lessivage. Ce phénomène est également assez commun [e.g. Guibaud *et al.*, 1996 ; Kohler *et al.*, 2009]. Les teneurs en COT plus importantes observées à la base de l'HAC pourraient témoigner d'un ralentissement de la percolation à l'interface HAC/grèzes induit par ces niveaux particulier et voire même une fixation du COT.

Les pourcentage supérieurs de P_2O_5 dans les sols auraient tendance à être affilié aux teneurs plus importantes de COT que ces horizons superficiels présentent. Cependant, les teneurs en COT des sols des trois profils étant similaires, cette hypothèse n'explique pas les valeurs plus faibles de P_2O_5 dans le sol du profil 3. Le phosphore pourrait trouver son origine dans les engrais phosphatés déversés dans les cultures localisées à une vingtaine de mètres du front de taille [Kim *et al.*, 2011].

III. APPORTS DE L'ÉTUDE GÉOCHIMIQUE

1. ÉLÉMENTS MAJEURS

L'étude des éléments majeurs montre d'abord une baisse des teneurs assez généralisée dans les HAC (sauf $CaCO_3$) qui se retrouve dans les observations générales comme lors de la normalisation au substrat crayeux et aux grèzes. Au vu de la méthode d'analyse, la diminution de la quasi-totalité des teneurs en éléments majeurs est en lien avec les teneurs plus importantes en carbonates.

L'analyse en composantes principales met en lumière un pôle carbonates et un pôle anthropique par apport de phosphates qui, comme vu dans la section précédente, ne sont pas en lien direct avec la matière organique naturelle. Les horizons organo-minéraux sont assez logiquement proches du pôle anthropique. Les grèzes et le substrat crayeux sont les horizons qui s'éloignent le plus de ce pôle ce qui est expliqué par leur distance plus importante par rapport à la surface du sol. Les HAC tiennent quant à eux une place intermédiaire en accord avec leur position au sein des profils de sol. La ségrégation des différents horizons sur l'axe représentant le pôle carbonates est également assez logique puisque les HAC prennent une position intermédiaire entre le substrat crayeux aux forts taux de carbonates et les grèzes qui en présentent le moins.

2. TERRES RARES

Comme pour les éléments majeurs, l'analyse du contenu en terres rares totales met en lumière une baisse des teneurs dans les HAC. Cette baisse se retrouve ici aussi lors des normalisations au substrat crayeux et aux grèzes.

Le gain en terres rares des grèzes par rapport à leur matériau d'origine (le substrat crayeux) est à lier avec la fraction d'origine éolienne qu'acquière les grèzes lors de leur formation [Bertrand, 1992 ; Dutil et Ballif, 1968 ; Laurain *et al.*, 1995 ; Laurain *et al.*, 1997]. En effet, lors des périodes de formation des grèzes sont apportés par les vents des minéraux [Laurain *et al.*, 1995] qui peuvent s'avérer susceptibles de contenir des quantités de terres rares plus importantes. Ceci semble exclure le quartz et les feldspaths qui ne contiennent pas ou très peu de terres rares [Compton *et al.*, 2003 ; Condie *et al.*, 1995].

Les HAC sont le témoin d'un appauvrissement en terre rares qui singularise ces horizons dans un profil de concentrations en terres rares qui paraît relativement régulier. Cette perte en terres rares pourrait s'expliquer par un lessivage plus intense dans les HAC. Le gain en terres rares observé dans les RENDOSOLS comparés aux HAC serait peut-être à mettre en lien avec les apports ultérieurs de nature indéterminée. Aucune hypothèse ne peut encore être proposée afin d'apporter une explication potentielle à ce phénomène.

L'appauvrissement de l'ensemble des terres rares comparées à la croûte continentale (U.C.C.) est assez courant dans les roches calcaires [Bonnot-Courtois, 1981 ; Henderson, 1984 ; Reeder et America, 1983]. Les carbonates agissent généralement comme des diluants [Bernat, 1975], d'autant plus lorsqu'elles ne sont pas d'origine hydrothermales ou magmatiques [Christie *et al.*, 1998 ; Stipp *et al.*, 2006] (il est cependant courant que des enrichissements en terres rares soient observés dans certaines roches calcaires [Laveuf et Cornu, 2009 ; Lécuyer *et al.*, 1998 ; Picard *et al.*, 2002]). L'anomalie négative en cérium et l'absence d'anomalie en europium est également assez classique pour les roches carbonatées [Christie *et al.*, 1998 ; Kanazawa et Kamitani, 2006].

D'une manière générale, une anomalie positive assez forte en Ce (cérium) est observable pour l'ensemble des horizons étudiés normalisés aux grèzes. Ceci pourrait témoigner d'une rétention en cette terre rare. Laveuf *et al.* [2008 et 2009] indique que cette rétention de cérium dans tous les horizons serait à affilier à des processus d'oxydoréduction et en l'occurrence ici d'oxydation (anomalie positive) qui sont responsables de la précipitation d'oxydes de fer et de manganèse qui incorporent préférentiellement cette terre rare. Les teneurs en MnO étant assez faibles dans l'ensemble des niveaux observés, il faudrait plus se porter sur la formation d'oxydes de fer présent en quantités plus importantes.

La bonne corrélation observée entre Al_2O_3 et les terres rares pourrait mettre en lumière le lien existant entre ces dernières et les argiles. Les concentrations en terres rares seraient dues à leur stockage par adsorption au niveau de la surface [Wan et Liu, 2005] et des sites interfoliaires [Coppin *et al.*, 2002] de ce type de minéraux. En effet, si les minéraux argileux sont connus pour leur important contenu en terres rares

[Henderson, 1984 ; Li *et al.*, 2006 ; Roaldset, 1975], ils le sont tout autant comme porteurs secondaires de terre rares au sein des profils d'altération [Condie *et al.*, 1995 ; Galan *et al.*, 2007 ; Gnandi et Tobschall, 2003 ; Öhlander *et al.*, 1996 ; Papoulis *et al.*, 2004] et comme contrôleurs du stock de terres rares au sein des sols [Bonnot-Courtois, 1981 ; Ran et Liu, 1999 ; Walter, 1991 ; Xing et Dudas, 1993].

Les oxydes de fer (et de manganèse) peuvent contenir de fortes quantités de terres rares [Li *et al.*, 1998 ; Palumbo *et al.*, 2001 ; Rankin and Childs, 1976 ; Wang *et al.*, 2001 ; Zhang and Shan, 2001] qui sont substituées au Fe (ou Mn) [Braun *et al.*, 1993] et notamment dans les oxydes amorphes [Compton *et al.*, 2003 ; Courtois, 1974 ; Land *et al.*, 1999 ; Yan *et al.*, 1999]. Il est possible d'imaginer que l'horizon d'accumulation du profil 1 comporte moins de Fe sous forme d'oxydes que les autres échantillons. A l'inverse, les sols du profil 2 (et un des échantillons de sols du profil 3) pourraient posséder plus d'oxydes de fer que de Fe sous une autre forme moins riche en terres rares que les autres échantillons.

3. CONCLUSION

Bien que certaines variations des teneurs en éléments chimiques (majeurs et terres rares) restent encore hypothétiques ou non-expliquées à l'issue de l'étude géochimique initiée dans ce travail, il apparaît clairement que les HAC présentent une signature géochimique singulière qui permet de les caractériser. L'étude spécifique des terres rares semble plaider pour un lessivage relativement intense des HAC.

IV. PÉNÉTROMÉTRIE DYNAMIQUE

Ce travail présente pour la première fois une étude pénétrométrique réalisée dans le but de caractériser les HAC dans le contexte d'un profil de sol dans sa globalité d'une part, et d'autre part dans le but de pourvoir les localiser de manière indirecte.

Les essais de caractérisation par pénétrométrie dynamique sur toute la profondeur des profils de sol montre que les HAC présentent des indurations relativement faibles. Ces données nouvelles semblent aller à l'encontre des idées généralement avancées dans la bibliographie qui les définit habituellement comme des niveaux indurés (seul Durand [1979] nuance ce point en qualifiant les HAC de niveaux irrégulièrement cimentés).

Si cette faible induration permet de les différencier des grèzes qui présentent une induration nettement supérieure, elle ne permet pas d'être assuré de leur présence ni même de les localiser avec précision au sein du profil de sol lorsque leur présence est avérée.

Ajouté au fait que les HAC ne se distinguent pas par une induration plus importante, il ne ressort pas non plus de l'étude pénétrométrique une réponse

caractéristique de l'HAC puisque celle-ci évolue en fonction de sa typologie. L'allure des courbes de résistance de pointe à l'enfoncement au sein de l'HAC de type « épais et homogène » (profil 1) concorde avec les estimations de dureté qualitatives effectuées par Loisy [1997] qui distinguait trois niveaux de dureté dans les HAC épais : un niveau dur dans la partie supérieure, une zone médiane présentant une dureté maximum et un niveau inférieur moins dur que les niveaux précédents. Les deux autres types (fin-laminé et épais-homogène sous forêt) n'ont quant à eux pas été étudiés par Loisy [1997].

L'absence de signature caractéristique bien discernable des HAC au sein des profils de sol ne permet pas l'utilisation de la pénétrométrie dynamique comme méthode de prospection des HAC de Champagne au sein des profils de sol comme a pu le faire Maquaire [2002] pour estimer et cartographier la nature et l'épaisseur des couches d'un manteau d'altérites présent sur les marnes noires de Draix (Alpes de Haute Provence).

V. ÉTUDE MINÉRALOGIQUE

Les fortes teneurs en calcite mises en lumière par la diffraction des rayons X sur l'ensemble des horizons des profils de sol est en concordance avec les résultats de l'analyse géochimique et de l'étude colorimétrique. Ces hautes teneurs sont dues à l'ubiquité de la craie sur tout le profil (en place ou sous forme de cryoclastes).

La présence de quartz dans les horizons d'altération trouve son origine dans les apports éoliens synchrones de la mise en place des grèzes et seul ce dernier niveau présente des feldspaths plagioclases en quantités suffisantes. Ces minéraux sont également apportés par les vents lors de la mise en place des grèzes. Leur absence apparente dans les HAC pourrait être causée par une « dilution » par les grandes quantités de carbonates que ces niveaux présentent. Dans les RENDOSOL, leur absence pourrait être liée à des processus d'altération.

L'analyse par diffraction des rayons X des échantillons totaux broyés et non décarbonatés ne permet donc pas de caractériser les HAC de Champagne-Ardenne qui présentent les mêmes caractéristiques que les RENDOSOLS. Grâce à cette analyse, seules les grèzes se distinguent par la présence de feldspaths plagioclases. Le croisement avec l'étude colorimétrique peut cependant permettre de distinguer les HAC.

VI. MICROMORPHOLOGIE ET POROSITÉS

Les études micromorphologiques antérieures se sont focalisées uniquement sur les HAC dans l'objectif de comprendre le mode de formations de ce type de structures [Loisy, 1997 ; Durand, 1979]. La comparaison aux autres niveaux des profils de sols

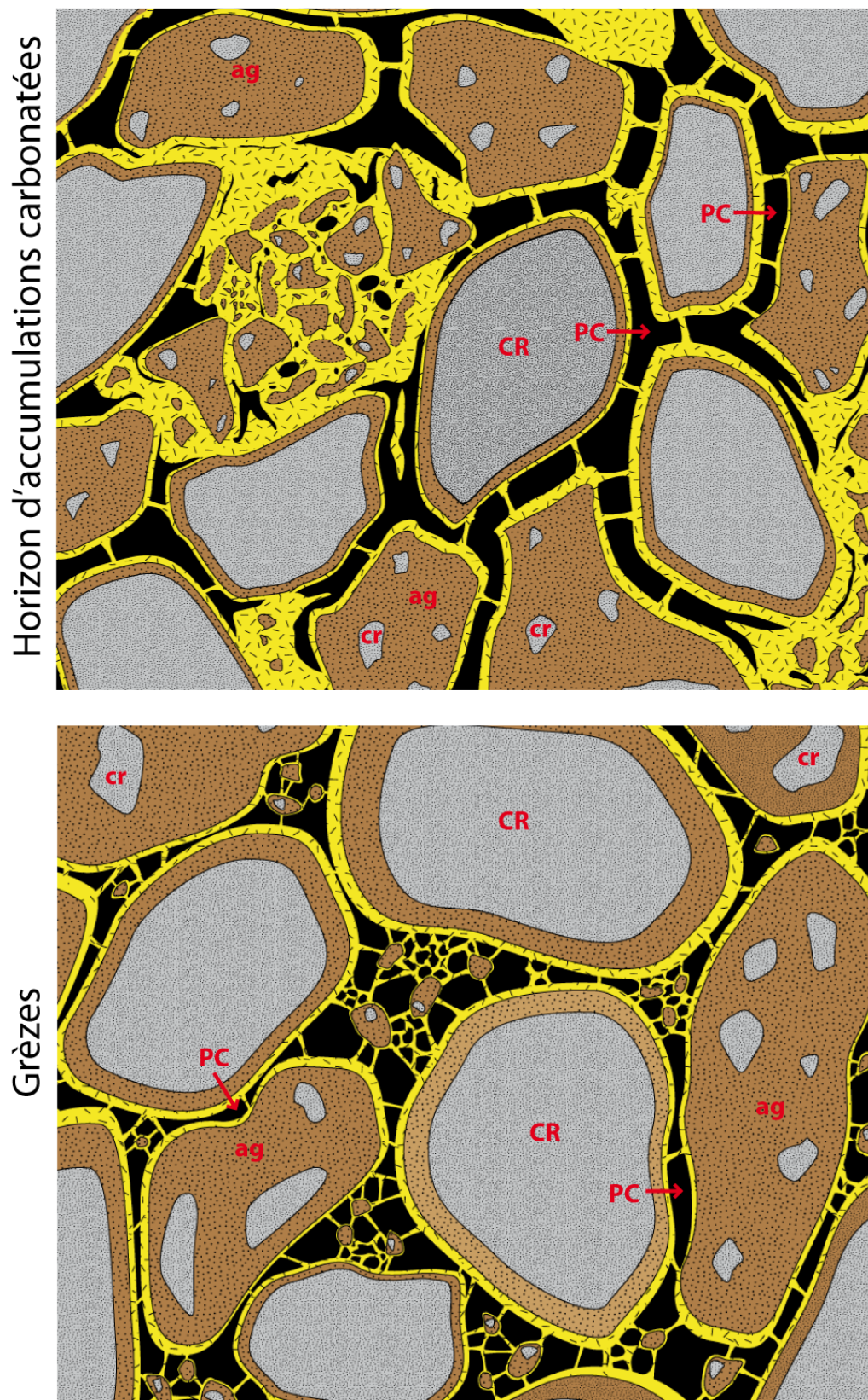
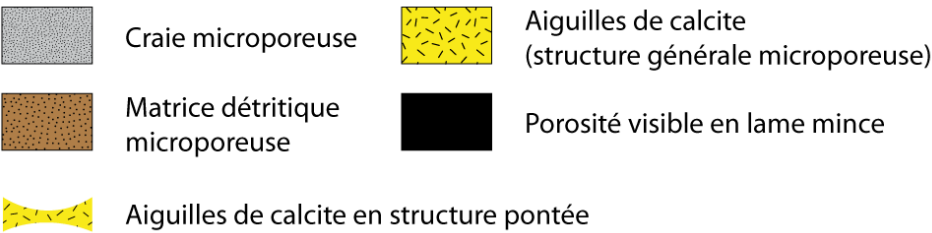
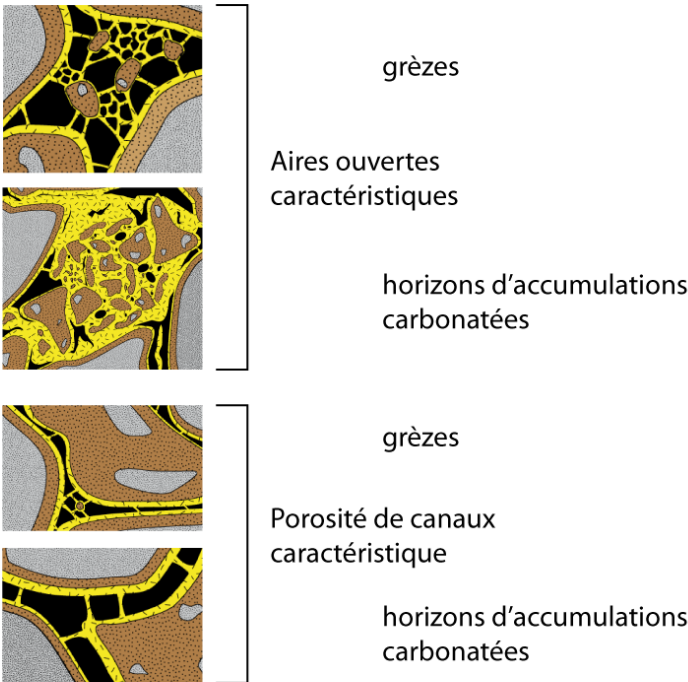
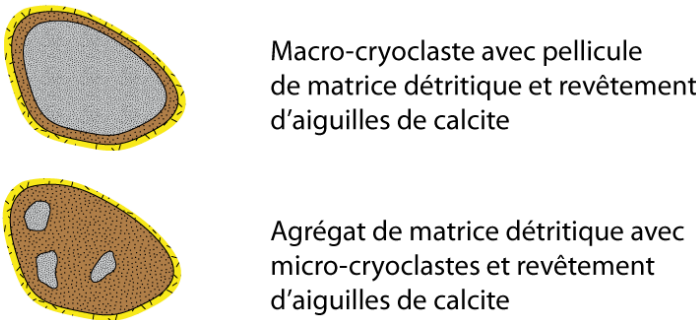


Figure VII - 1 : Schématisation de la micromorphologie générale des HAC ainsi que des grèzes (légende figure suivante).

- Légende générale



- Entités micromorphologiques



CR : Macro-cryoclaste	ag : Agrégat micro-cryoclaste/matrice détritique
cr : Micro-cryoclaste	PC : Porosité de canaux

Figure VII - 2 : Légende de la figure précédente schématisant la micromorphologie générale des HAC ainsi que des grèzes.

(notamment les grèzes) permet de montrer qu'il existe des différences entre ces dernières et les HAC.

Bien que les HAC et les grèzes présentent les mêmes entités micromorphologiques (macro-cryoclastes de craie, agrégats de micro-cryoclastes/matrice détritique, porosité de canaux, aires ouvertes et aiguilles de calcite), les variations morphologiques de ces entités sont responsables de différences de structure entre les HAC et les grèzes (Figures VII - 1 et VII - 2).

Les courbes de porosimétrie par injection de mercure des grèzes présentent deux familles de pores bien distinctes. La première, centrée sur des rayons d'accès aux pores compris entre 24,6 et 30,8 μm , est à mettre en lien avec la porosité interparticulaire de canaux observée en lames minces. La seconde, centrée sur des rayons d'accès aux pores compris entre 0,21 et 0,26 μm , est assez proche de la famille de pores observée pour le substrat crayeux dont le rayon moyen typique est proche de 0,33 μm (ce qui correspond à l'espace existant entre les coccolites [Price *et al.*, 2000]). Dans les grèzes, cette famille est plus étendue et prend en compte la porosité interne de la matrice détritique en plus de celle des cryoclastes de craie.

A l'inverse, les courbes de porosimétrie par injection de mercure des HAC présentent des réseaux poreux avec un nombre assez important de rayons d'accès aux pores ce qui se traduit par des coefficients de dispersion supérieurs à ceux calculés pour les grèzes (proches de 10). Comme dans les grèzes, la porosité de canaux observée en lames minces est visible sur les courbes de porosimétrie par injection de mercure des HAC. Cependant, elle recouvre des intervalles de rayons d'accès aux pores plus importants. En lames minces, la porosité de canaux des HAC présente moins d'étranglements que celle observée dans les grèzes. Les rayons d'accès affiliés dans les grèzes à la porosité intraparticulaire (cryoclastes de craie et matrice détritique) sont également visibles sur les courbes porosimétriques des HAC.

Bien que les aiguilles de calcite fassent également partie des entités micromorphologiques ubiquistes des HAC et des grèzes, elles sont nettement plus nombreuses et apparaissent clairement moins organisées dans les aires ouvertes des HAC que dans les grèzes. Cette caractéristique des HAC se retrouve bien dans leurs courbes de porosimétrie par injection de mercure dans l'étalement de la famille de rayons d'accès aux pores vers des valeurs plus petites.

Les valeurs de porosités totales mesurées grâce à la technique à l'eau sont toujours supérieures à celles mesurées par la méthode par injection de mercure. Cette différence est la conséquence de deux principaux phénomènes qui sont liés à l'échantillonnage ainsi qu'aux limites des méthodes.

Les échantillons utilisés pour la porosimétrie totale à l'eau sont des blocs dont le volume est nettement plus important comparé aux échantillons analysés au

porosimètre à mercure. Le sous-échantillonnage pour la porosimétrie mercure des matériaux pas forcément homogènes étudiés dans ces travaux peut alors être responsable de certaines différences de porosité totale mesurée entre les deux méthodes.

Le champ de pressions d'investigation du porosimètre à mercure permet d'accéder aux espaces poreux dont le rayon d'accès maximum est de 180 μm . Les sections du réseau poreux des différents échantillons dont les accès sont permis par des ouvertures dont le diamètre est supérieur à 0,36 mm ne sont donc pas prises en compte dans la mesure de porosité totale par injection de mercure.

Il faut également noter que même si les minéraux argileux ne représentent qu'une fraction très peu importante des échantillons, l'eau qui est adsorbée sur leur surface lors de l'analyse de la porosité totale à l'eau augmente indéniablement la valeur de porosité totale N_t obtenue à l'aide de cette technique [Kuila *et al.*, 2014].

Les données de porosités totales assez proches des grèzes témoignent d'une assez bonne homogénéité de ces niveaux. La porosité totale des grèzes du profil 3 semble tout de même très légèrement plus importante que celles mesurées pour les grèzes des profils 1 et 2. Ce phénomène pourrait être expliqué par le fait que la morphologie des grèzes du profil 3 situé sous bois diffère de celle des deux autres profils localisés

au niveau de l'ancien front de taille. Le profil sous bois présente en effet des grèzes de type graveluche présentant une alternance de lits contenant une forte proportion de cryoclastes de craie et de lits contenant des quantités de matériel silto/argileux plus importantes. Cette différenciation pourrait être responsable de la présence d'une porosité intergranulaire plus importante dans les lits à cryoclastes due à un agencement plus lâche des cryoclastes.

VII. DATATION

La nouvelle datation au ^{14}C (7380 +/- 50 ans BP) est en cohérence avec la cinétique de mise en place des HAC de Champagne-Ardenne établie par Loisy [1997]. En effet, cette datation place une étape importante de la formation des HAC entre le Boréal et l'Atlantique ce qui correspond à la phase C établie par Loisy [1997] au sein de laquelle les plus importantes cimentation calcaires (d'origine biologiques) sont décrites.

TROISIÈME PARTIE

*TRANSFERTS HYDRIQUES
DANS LES HAC*

MÉTHODES ET TECHNIQUES D'ÉTUDE DES TRANSFERTS HYDRIQUES

Si un grand nombre d'hypothèses ont été proposées quant à l'impact des horizons d'accumulations carbonatées (HAC) de Champagne-Ardenne sur les transferts hydriques, aucune étude ne s'est réellement attachée à la compréhension du fonctionnement hydrique de ce type de structures. L'ensemble des tests hydriques présentés dans cette partie ont donc été réalisés dans le but d'acquérir des données sur le comportement hydriques des HAC afin de pouvoir confirmer ou infirmer les hypothèses suggérées par la bibliographie dans un premier temps, et de pouvoir proposer de nouvelles hypothèses basées sur des données acquises sur les HAC mais également en comparaison avec celles obtenues sur les autres horizons des profils de sol.

Les horizons d'accumulations carbonatées de Champagne-Ardenne étant très difficilement décelables depuis la surface, la plupart des sites potentiels d'étude de ces structures sont mis en lumière lors de travaux de constructions diverses (bâtiments publics ou privés, installations agricoles, travaux de voirie, sites de fouilles archéologiques...) qui présentent une évolution rapide dans le temps et qui deviennent très vite inaccessibles. Les méthodes d'études hydriques *in situ* habituelles sont donc très difficiles à mettre en place sans interférer avec les travaux de construction en cours. Cette partie présente donc un panel de méthodes d'étude des transferts hydriques de laboratoire habituellement utilisées dans l'étude des pierres en œuvre. Après une phase de prélèvements sur le terrain, ces méthodes permettent d'étudier les échantillons sur du long terme et dans des conditions contrôlées et identiques pour tous les échantillons. Une technique de terrain sera cependant présentée : l'infiltrométrie à disque. Cette méthode a pu être testée sur le site du Mont du Ménil.

I. GÉNÉRALITÉS SUR LES TRANSFERTS HYDRIQUES

1. LES PHASES DE L'EAU

Lors de transferts en milieu poreux, l'eau se présente sous deux phases : la phase vapeur (vapeur d'eau) et la phase condensée (eau liquide). Cette deuxième phase est elle-même présente sous trois formes :

- **l'eau libre** (évaporable), dont les transferts sont régis par les équilibres capillaires ;
- **l'eau liée** (ou adsorbée), constituée de molécules disposées en couches et fixées sur la paroi solide (attraction moléculaire solide-liquide importante) ;
- **l'eau de constitution** qui entre dans la composition minérale de la matrice solide.

L'eau libre participe activement aux transferts massiques en milieu poreux. En revanche, l'eau liée n'y participe que très peu et l'eau de constitution quasiment pas.

2. L'ÉTAT SEC

Daïan [1986] définit l'état sec d'une roche comme l'état d'équilibre atteint par celle-ci dans une atmosphère à humidité relative nulle.

Dans le milieu naturel, cet état n'est jamais atteint et une roche a toujours une teneur en eau naturelle qui est fonction des conditions climatiques, de son exposition et des caractéristiques de son milieu poreux [Dessandier, 1995].

Le degré de saturation naturel n'est pas pris en compte lors des essais en laboratoire (tests d'imbibition capillaire) puisque les échantillons subissent un passage à l'étuve jusqu'à masse constante. Il peut cependant exister une saturation irréductible qui peut être limitée à une fraction de l'eau adsorbée piégée dans l'échantillon sous forme d'une très fine pellicule autour des grains [Rémy, 1993]

II. CINÉTIQUES D'IMBIBITIONS CAPILLAIRES

L'étude des cinétiques d'imbibition capillaires est couramment utilisée pour caractériser les propriétés hydrauliques des matériaux de construction, qu'il soient naturels [Beck *et al.*, 2003 ; Thomachot-Schneider *et al.*, 2008 ; Fronteau *et al.*, 2010] ou anthropiques [Garcia et Sousa-Coutinho, 2013 ; Zheng *et al.*, 2012].

L'étude des cinétiques d'imbibitions capillaires a été réalisée dans le but de caractériser les transferts hydriques par remontées capillaires s'opérant dans les différents horizons étudiés des profils de sol.

1. THÉORIE

a. LA LOI DE JURIN

La pression capillaire P_c présentée dans le chapitre V est aussi égale au poids de la colonne d'eau à l'équilibre dans le tube :

$$P_c = P_0 - P_l = \Delta\rho \cdot g \cdot h_c$$

P_c : pression capillaire (Pa) ;

P_0 : pression du gaz (Pa) ;

P_l : pression du liquide (Pa) ;

$\Delta\rho$: différence de masse volumique entre l'air et l'eau (kg.m^{-3}) ;

g : accélération de la pesanteur ($9,806 \text{ kg.s}^{-2}$) ;

h_c : hauteur d'ascension capillaire = hauteur atteinte par le ménisque à partir de la surface d'eau libre (m).

Le calcul de la hauteur d'équilibre h atteinte par le ménisque en fonction du rayon du capillaire est effectué en combinant l'équation précédente avec celle présentée dans le chapitre V qui permet d'obtenir une valeur de rayon d'accès aux pores pour chaque valeur de pression appliquée. La combinaison permet alors d'obtenir la loi de Jurin :

$$h_c = \frac{2\sigma \cdot \cos \alpha}{\Delta \cdot \rho \cdot g \cdot r}$$

σ : tension superficielle (N.m^{-1}) ;

α : angle de contact liquide/solide ($^\circ$) ;

r : rayon du capillaire (m).

Cette équation de la loi de Jurin montre donc que la hauteur atteinte par le ménisque est inversement proportionnelle au rayon du capillaire.

b. LA LOI DE HAGEN-POISEUILLE

La loi de Hagen-Poiseuille [1842] décrit l'écoulement d'un fluide newtonien en régime permanent à travers un tube cylindrique de section circulaire. Elle exprime la vitesse maximale d'écoulement au centre du tube $v_{\max}$ en fonction de sa longueur, de la viscosité dynamique du fluide et d'un gradient de pression :

$$v_{\max} = \frac{\Delta \cdot P \cdot r^2}{L \cdot 4\eta}$$

$v_{\max}$: vitesse maximale d'écoulement (m.s^{-1}) ;

ΔP : gradient de pression (Pa) ;

r : rayon du capillaire (m) ;

L : longueur du tube (m) ;

η : viscosité dynamique du fluide ($\text{Pa.s} = \text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$).

Cette relation témoigne de la proportionnalité qui lie la vitesse d'écoulement au carré du rayon du capillaire ; plus un capillaire est large, plus le fluide se déplace rapidement lors de l'imbibition capillaire.

Dans le tube, le débit du fluide Q suit la loi de Hagen-Poiseuille à travers la relation :

$$Q = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta P}{8\eta \cdot L}$$

Q : débit du fluide ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$).

c. L'ÉQUATION DE WASHBURN

En tenant compte de la gravité, la loi de Laplace exposée dans le chapitre V s'écrit :

$$\Delta P = \frac{2\sigma \cdot \cos \alpha}{r} - \rho \cdot g \cdot L$$

ΔP : gradient de pression (Pa) ;

σ : tension superficielle (N.m^{-1}) ;

α : angle de contact ($^\circ$) ;

r : rayon du capillaire (m) ;

ρ : masse volumique (kg.m^{-3})

L : longueur du tube (m).

L'injection de l'équation précédente dans l'avant-dernière équation permet d'obtenir la formulation générale de l'équation de Washburn :

$$Q = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \left(\frac{2\sigma \cdot \cos \alpha}{r} - \rho \cdot g \cdot L \right)}{8\eta \cdot L}$$

Cependant, l'expression du volume peut également s'écrire sous la forme :

$$Q = \frac{dV}{dt} = \pi \cdot r^2 \cdot \frac{dL}{dt}$$

L'égalisation des deux équations précédentes permet d'obtenir la relation :

$$\frac{dL}{dt} = \frac{r^2 \cdot \left(\frac{2\sigma \cdot \cos \alpha}{r} - \rho \cdot g \cdot L \right)}{8\eta \cdot L}$$

Dans un tube horizontal ou de faible hauteur, les forces gravitaires deviennent négligeables et l'équation précédente peut se simplifier sous la forme :

$$\frac{dL}{dt} = \frac{r \cdot \sigma \cdot \cos \alpha}{4\eta \cdot L} \Leftrightarrow L \cdot dL = \frac{r \cdot \sigma \cdot \cos \alpha}{4\eta} \cdot dt$$

La vitesse de déplacement du ménisque est reliée aux autres propriétés du système par l'équation de Washburn simplifiée en considérant l'angle de contact dynamique identique à l'angle de contact statique.

L'intégration de l'équation précédente permet d'obtenir une relation entre la hauteur du ménisque L et la racine carrée du temps :

$$L = r^{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{\frac{\sigma \cdot \cos \alpha}{2\eta}} \cdot t^{\frac{1}{2}}$$

d. COEFFICIENTS DE CAPILLARITÉ C_1 ET C_2

En posant le coefficient C_2 dépendant des propriétés du système tel que :

$$C_2 = r^{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{\frac{\sigma \cdot \cos \alpha}{2\eta}}$$

l'équation précédente devient :

$$L = C_2 \cdot t^{\frac{1}{2}}$$

Le coefficient C_2 est appelé coefficient de capillarité ou coefficient de migration linéaire de la frange capillaire.

Le volume d'eau V pénétrant à tout instant dans le capillaire peut s'écrire sous la forme :

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot L$$

En considérant un coefficient C_1 représentatif du volume d'eau pénétré dans l'échantillon par unité de temps (prise de poids en eau) :

$$C_1 = \pi \cdot r^{\frac{5}{2}} \cdot \sqrt{\frac{\sigma \cdot \cos \alpha}{2\eta}}$$

l'équation précédente devient :

$$V = C_1 \cdot t^{\frac{1}{2}}$$

Ces deux relations témoignent de la proportionnalité de la hauteur de la frange capillaire et de la prise de poids en eau de l'échantillon en fonction de la racine carrée du temps.

2. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

a. PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS

Le protocole utilisé est celui préconisé par la norme NF EN 1925 [1999]. L'échantillon est d'abord séché jusqu'à masse constante dans une étuve ventilée à 70 ± 5 °C avant d'être pesé pour obtenir la valeur de masse sèche m_d . La surface S_b de la base de l'échantillon est ensuite mesurée et exprimée en mètres carrés.

b. DÉROULEMENT DE L'EXPÉRIENCE

L'échantillon peut alors être placé dans une cuve contenant de l'eau distillée. Une fine bande de tissus éponge est placée entre l'échantillon et le fond de la cuve afin d'assurer une bonne conduction hydraulique. La cuve est fermée par un couvercle étanche qui assure une hygrométrie proche de 100 % ce qui permet de s'affranchir au maximum des phénomènes d'évaporation (Figure VIII - 1 et VIII - 2).

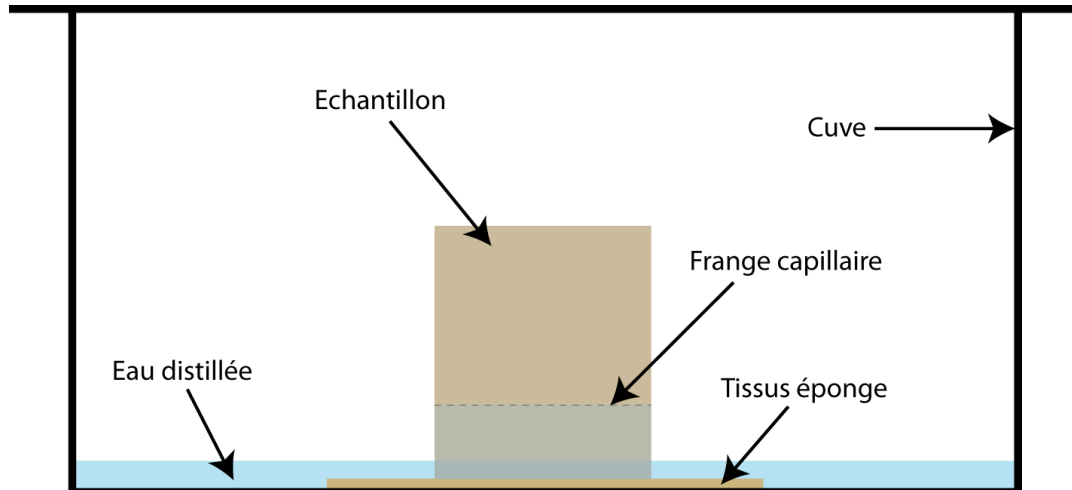


Figure VIII - 1 : Schéma du dispositif utilisé pour les tests d'absorptions capillaires.

Le chronomètre est déclenché au moment exact où l'échantillon est posé dans la cuve. Des pesées de l'échantillon vont pouvoir être effectuées régulièrement. Lors de ces pesées, la hauteur de la frange capillaire est également relevée.



Figure VIII - 2 : Photographie d'un échantillon en cours de test d'imbibition capillaire.

3. SIGNIFICATION DES COURBES D'IMBIBITION CAPILLAIRE

a. MIGRATION DE LA FRANGE CAPILLAIRE

Dans les roches, la cinétique d'imbibition capillaire est du même type que celle décrit par Washburn dans un tube cylindrique. La hauteur de la frange capillaire L (en m) est reportée en fonction de la racine carrée du temps ($\sqrt{t}$ en $s^{\frac{1}{2}}$) (Figure VIII - 3). La relation linéaire obtenue est du type :

$$L = C_2 \cdot \sqrt{t + L_0}$$

L : hauteur de la frange mouillée (m) ;

C_2 : coefficient représentatif de la migration de la frange capillaire ($m \cdot s^{\frac{1}{2}}$) ;

t : temps (s) ;

L_0 : ordonnée à l'origine de la frange mouillée = hauteur d'eau initiale dans la cuve (m).

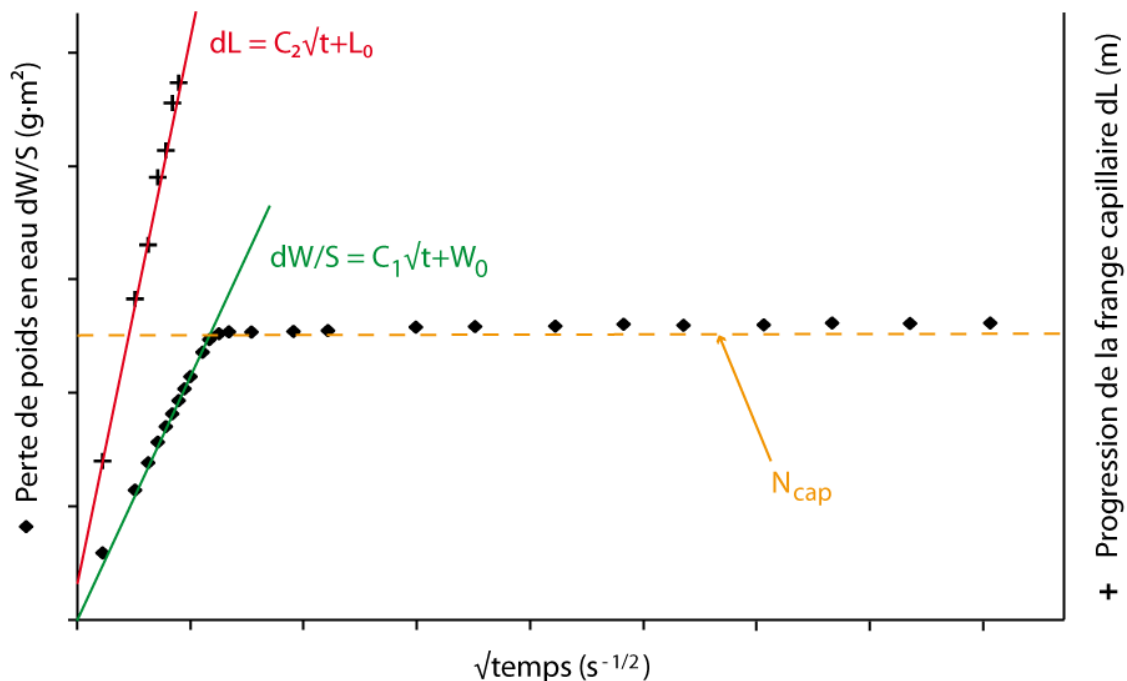


Figure VIII - 3 : Courbe caractéristique de restitution des tests d'imbibition capillaire.

b. ÉVOLUTION DE LA PRISE DE POIDS EN EAU

La prise de poids est rapportée à la surface de base de l'échantillon ($\frac{dW}{S}$ en g.m^{-2}) en fonction de la racine carrée du temps. La courbe obtenue est caractérisée par une évolution en deux parties distinctes (Figure VIII - 3).

➤ PREMIÈRE PHASE

La première partie de la courbe de prise de poids en eau est linéaire en fonction de la racine carrée du temps et du type :

$$\frac{dW}{S} = C_1 \cdot \sqrt{t} + W_0$$

$\frac{dW}{S}$: prise de poids en eau rapportée à la surface de la base de l'échantillon qui est immergée (g.m^{-2}) ;

C_1 : coefficient représentatif de la prise de poids en eau ($\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-\frac{1}{2}}$) ;
 t : temps (s) ;

W_0 : poids d'eau initial dans l'échantillon lors de l'immersion de l'échantillon (m).

Cette première droite de pente C_1 correspond à l'envahissement progressif par imbibition capillaire de la porosité libre accessible par capillarité.

A la fin de cette droite, toute la porosité libre accessible par capillarité est remplie ; le pourcentage de la porosité envahie est alors appelée porosité capillaire N_{cap} (Figure VIII - 3).

➤ DEUXIÈME PHASE

Une rupture de pente plus ou moins marquée caractérise la fin de la première partie de la courbe de prise de poids en eau (Figure VIII - 3).

Durant cette deuxième partie, la prise de poids se poursuit de manière également linéaire mais avec un coefficient directeur beaucoup plus faible. Cette cinétique correspond au remplissage de la porosité piégée par diffusion de l'air dans l'eau régie par la loi de Fick. L'air piégé et comprimé diffuse dans l'eau d'autant plus vite que le rapport surface/volume de la bulle d'air et que la quantité d'air sont importantes [Thomachot, 2002]. Il ne s'agit plus alors de cinétique d'imbibition capillaire mais de diffusion.

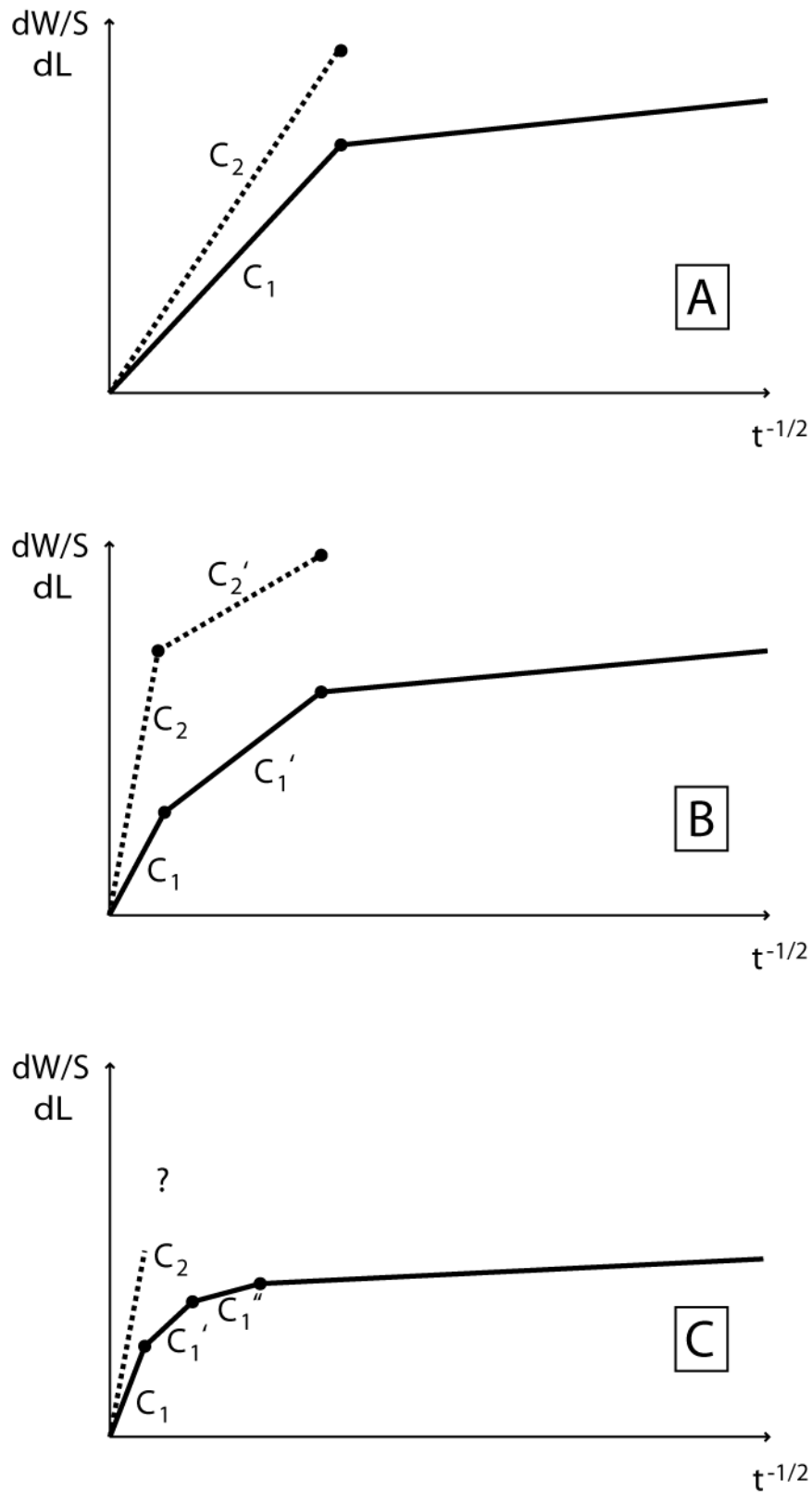


Figure VIII - 4 : Les différents types de réseaux poreux définis par l'allure des courbes d'imbibition capillaire. **A** : réseau unimodal ; **B** : réseau bimodal ; **C** : réseau hétérogène. [d'après Mertz, 1991].

C. TYPES DE RÉSEAUX POREUX

L'allure des courbes de restitution des tests de cinétiques d'imbibitions capillaires permet de discriminer trois grands types de réseau poreux : les réseaux monomodaux, bimodaux et hétérogènes.

➤ LE RÉSEAU MONOMODAL

La courbe de prise de poids en eau d'un échantillon présentant un réseau poreux unimodal ne présente qu'une seule rupture de pente entre une pente de coefficient directeur C_1 et une pente dont le coefficient directeur est beaucoup plus faible. Cette rupture de pente correspond également à l'arrivée de la frange mouillée au sommet de l'échantillon qui suit un coefficient directeur C_2 (Figure VIII - 4 : A).

Ce type de courbe témoigne de l'existence d'une famille de pores prédominante bien interconnectée et uniformément répartie dans l'échantillon.

➤ LE RÉSEAU BIMODAL

Dans le cas d'un échantillon présentant un réseau bimodal, la courbe de prise de poids en eau présente deux ruptures de pente. La droite de coefficient directeur C_1 devient une droite de coefficient directeur C_1' plus faible (Figure VIII - 4 : B).

Ce comportement témoigne de la coexistence de deux familles de pores au sein de l'échantillon : une première bien connectée remplie en premier et une seconde moins bien connectée dont le remplissage s'effectue plus lentement. La multiplication de nombre de ruptures de pente souligne l'hétérogénéité croissante du réseau poreux librement interconnecté.

La comparaison de la courbe de prise de poids en eau et de la courbe de migration de la frange capillaire permet de définir deux types de réseaux bimodaux :

- si la frange capillaire atteint le sommet de l'échantillon au moment de la première rupture de pente, la famille de pores bien connectée présente une répartition homogène au sein de tout l'échantillon ;
- si la frange capillaire présente elle-aussi une rupture de pente en même temps que la prise de poids en eau et arrive au sommet de l'échantillon lors de la seconde rupture de pente, il existe une répartition verticale hétérogène des deux familles de pores au sein de l'échantillon.

➤ LE RÉSEAU HÉTÉROGÈNE

Ce troisième type de réseau poreux est caractérisé par une frange capillaire qui n'atteint jamais le sommet de l'échantillon. Il existe plusieurs facteurs qui peuvent expliquer ce type d'ascensions incomplètes :

- les limites de la méthode lorsque les échantillons sont très peu poreux ;

- la très mauvaise interconnexion qui peut exister entre les multiples familles de pores.

d. RAYON ÉQUIVALENT R_{eq} ET NOMBRE DE CAPILLAIRE N

Dans le cas d'un réseau poreux unimodal, les coefficients d'imbibition capillaire déterminés durant l'expérience permettent de restituer la cinétique d'imbibition capillaire de façon schématique [Mertz, 1991].

D'après l'équation simplifiée de Washburn, le coefficient C_2 est fonction du rayon du capillaire. Il est donc possible de reproduire un réseau théorique équivalent constitué de N capillaires de rayon R_{eq} :

$$C_1 = R^{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{\frac{\sigma \cdot \cos \alpha}{2\eta}} \Leftrightarrow R_{eq} = \frac{2\eta \cdot C_2^2}{\sigma \cdot \cos \alpha}$$

C_2 : coefficient représentatif de la migration de la frange capillaire ($m \cdot s^{-\frac{1}{2}}$) ;

R : rayon du capillaire (m) ;

R_{eq} : rayon équivalent (m) ;

σ : tension superficielle ($N \cdot m^{-1}$) ;

α : angle de contact ($^\circ$) ;

η : viscosité dynamique du fluide ($Pa \cdot s = kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$).

et :

$$N = \frac{C_1}{\pi \cdot C_2 \cdot R_{eq}^2}$$

N : nombre de pores (sans unité) ;

R : rayon du capillaire (m) ;

R_{eq} : rayon équivalent (m) ;

C_1 : coefficient représentatif de la prise de poids en eau ($g \cdot m^{-2} \cdot s^{-\frac{1}{2}}$).

Le rayon équivalent R_{eq} est généralement très inférieur de plusieurs ordres de grandeur au rayon moyen réel car il ne tient pas compte de la complexité du réseau poreux et il n'a donc aucune signification hydraulique. Il permet de reconstruire un réseau schématique constitué de N capillaires droits de rayon R_{eq} ayant une cinétique d'imbibition connue [Mertz, 1991].

4. INFLUENCE DES FORCES GRAVITAIRES

Lors d'une imbibition capillaire, la vitesse de migration capillaire évolue au cours du temps. Au début, celle-ci est rapide car $\frac{dP}{dx} \approx \frac{P_c}{L}$ est grand. Cependant, L augmente au cours de l'expérience car la frange capillaire progresse et $\frac{dP}{dx}$ diminue [Thomachot, 2002].

Mertz [1991] indique qu'il existe un temps au bout duquel la vitesse de déplacement du ménisque au sein des capillaires de plus grand rayon diminue plus vite que dans les capillaires les plus fins. A l'inverse, la hauteur atteinte par l'eau à l'équilibre est inversement proportionnelle au rayon du capillaire (loi de Jurin).

Un échantillon qui présente des capillaires verticaux possédant un rayon de 100 μm voit sa cinétique d'imbibition capillaire perturbée que si sa hauteur dépasse 8 cm [Mertz, 1991]. Bien que les échantillons étudiés ici soient généralement plus grands, leur réseau poreux ne présente jamais de pore de ce type et les forces gravitaires peuvent donc être négligées.

III. CINÉTIQUES DE SÉCHAGE

L'étude des cinétiques de séchage permet de comprendre le comportement des échantillons des différents horizons étudiés vis-à-vis de la désaturation en eau lors des périodes plus sèches. *In situ*, ce séchage intervient théoriquement à la fin des transferts par remontées capillaires. L'étude des cinétiques de séchage a donc été réalisée sur les échantillons issus des tests d'imbibitions capillaires.

Le changement d'état d'un liquide en gaz est l'évaporation. Ce phénomène est entrete nu par la diffusion du gaz dans l'air et ce, tant que la pression de vapeur saturante de ce gaz dans l'air n'est pas atteinte.

Il existe différents paramètres qui régissent la diffusion lors du séchage d'un matériau poreux. Certains sont externes et sans aucune relation avec l'échantillon (humidité relative, température, circulation de l'air, quantité d'eau disponible et mode d'alimentation en eau) alors que d'autres sont internes et directement en lien avec les caractéristiques intrinsèques du matériau étudié (taille, forme, quantité et distribution des pores). D'autres dépendent du matériau et du mode de préparation des échantillons (aire de la surface évaporante).

1. PRINCIPE DE DIFFUSION

Le mécanisme physique de l'évaporation est la diffusion. Il s'agit d'un transfert d'atomes, de molécules, d'ions etc. dans un milieu immobile qui le freine [Crank, 1975].

La diffusion se produit lorsqu'un système n'est pas à l'équilibre. Les entités élémentaires se déplacent alors du milieu le plus concentré vers le milieu le moins concentré afin de ramener en tout point le système à sa composition d'équilibre [Gierst et Acouturier, 1968]. Dans le cas des cinétiques de séchages, c'est la vapeur d'eau qui se déplace dans l'air.

Les équations qui régissent le processus de diffusion ont été établies en [1855] par Fick. Elles sont analogues aux équations décrivant les transferts de chaleur ou de quantité de mouvement.

a. LES LOIS DE FICK

➤ PREMIÈRE LOI DE FICK

Un système constitué par deux masses de vapeur d'eau à des pressions partielles différentes se trouve en déséquilibre. La première loi de Fick traduit la proportionnalité qui existe entre le flux de déplacement des particules par unité de surface et le gradient de concentration :

$$q = -D \cdot \overrightarrow{\text{grad}C}$$

q : densité de flux massique = masse de vapeur d'eau qui transite entre deux points A et B par unité de temps et de surface ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) ;
D : coefficient de diffusion de vapeur d'eau dans l'air pur ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) ;
C : concentration massique de vapeur d'eau dans l'air ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$).

Lorsque le flux est unidirectionnel, l'équation précédente peut se simplifier sous la forme :

$$q = -D \cdot \frac{\partial C}{\partial x}$$

x : distance comprise entre les points A et B (m).

➤ DEUXIÈME LOI DE FICK

La répartition des molécules de vapeur d'eau dans le temps et l'espace au cours d'un phénomène de diffusion est régit par la seconde loi de Fick qui correspond à une équation de conservation de masse :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div} D \cdot (\overrightarrow{\text{grad}} C)$$

C : concentration massique de vapeur d'eau dans l'air (kg.m^{-2}) ;

t : temps (s) ;

D : coefficient de diffusion de vapeur d'eau dans l'air pur ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$) ;

x : distance (m).

Lorsque le flux est unidirectionnel et que D est constant dans l'espace, l'équation précédente peut se simplifier sous la forme :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

b. ALIMENTATION DE LA SURFACE LIBRE

Lorsque l'ensemble des pores d'un échantillon sont totalement saturés, les pores recoupés par les bords de l'échantillon sont alors occupés par les ménisques. Au cours de la désaturation, la migration des ménisques inférieurs vers l'intérieur de l'échantillon compense la perte d'eau par évaporation au niveau de la surface libre.

L'alimentation capillaire de la surface laissée libre finit par ne plus compenser l'évaporation. Les ménisques supérieurs se retirent au sein de l'échantillon ; l'évaporation s'effectue par diffusion de vapeur d'eau.

L'eau finit par ne plus former un film continu ; il n'y a donc plus de continuité hydraulique. La diffusion seule s'effectue à partir de ménisques dispersés dans l'échantillon.

2. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

a. PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS

Les échantillons parallélépipédiques saturés issus des tests d'absorption capillaire sont hermétiquement emballés dans un sachet en polyéthylène. L'étanchéité est assurée par un ruban de téflon et seule la surface supérieure est laissée libre de manière à ce qu'elle seule soit concernée par le séchage.

b. DÉROULEMENT DE L'EXPÉRIENCE

Les tests de séchage sont réalisés dans une pièce où la température est maintenue constante à 20 °C. Les échantillons préparés sont placés dans une enceinte hermétiquement fermée sans agitation d'air. La constance de l'humidité relative à 33 %

est assurée par une saumure saturée composée de chlorure de magnésium ($\text{MgCl}_2(6\text{H}_2\text{O})$) [Acheson, 1963 ; Schlünder, 1963] (Figure VIII - 5).

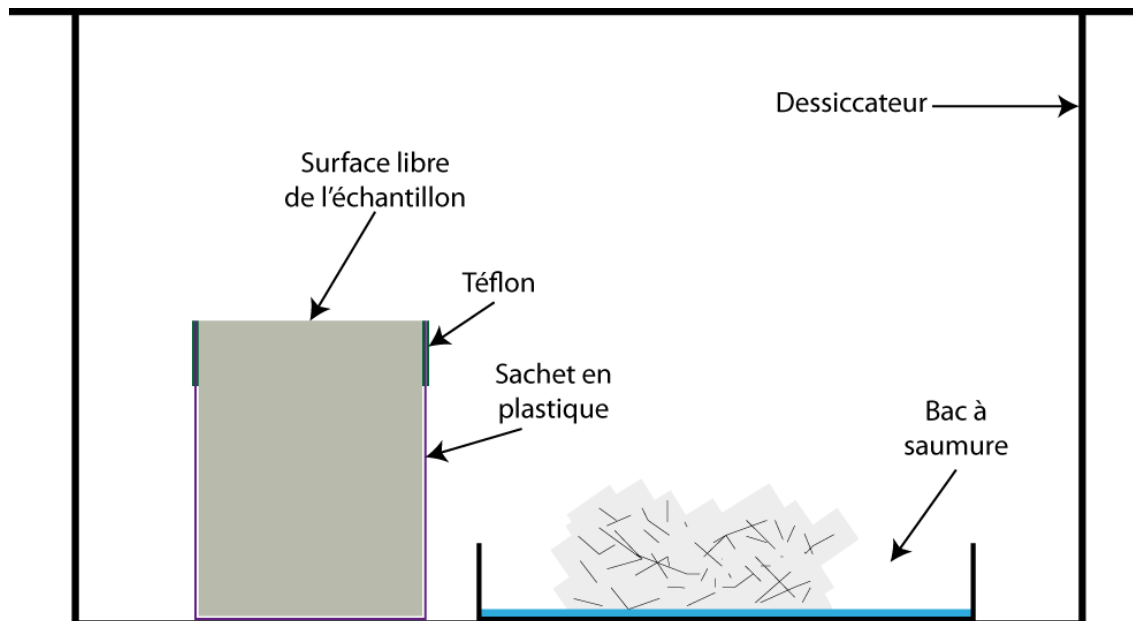


Figure VIII - 5 : Schéma du dispositif expérimental utilisé pour les tests de cinétiques de séchage.

3. SIGNIFICATION DES COURBES DE SÉCHAGE

La courbe de perte de poids en eau par unité de surface $\frac{dW}{S}$ (en g.m^{-2} où S est la surface macroscopique de l'échantillon) est tracée en fonction du temps (en seconde) pour chaque échantillon (Figure VIII - 6). Les courbes obtenues présentent habituellement trois phases [Pearse *et al.*, 1949 ; Jouany, 1981 ; Rousset-Tournier, 2001].

a. PHASE I (LINÉAIRE) ET SATURATION CRITIQUE

➤ LE FLUX D'ÉVAPORATION F

La première des phases observées lors des expériences de séchage se traduit par une droite de pente relativement forte qui indique d'une part que le flux d'évaporation F ($\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-2}$) est constant et, d'autre part, que l'évaporation est élevée (Figure VIII - 6).

La surface des échantillons reste humide durant toute cette phase à flux constant. Ceci indique que l'évaporation s'effectue uniquement à partir de la surface de l'échantillon. Cette phase se poursuit tant que l'alimentation capillaire vers la surface compense la perte d'eau par évaporation [Thomachot, 2002].

Pendant toute la durée de cette phase, le flux d'évaporation F est principalement contrôlé par les paramètres externes comme la température, l'humidité

relative et l'agitation de l'air. Rousset-Tournier [2001] a montré que ce flux est également indépendant de la longueur des échantillons. Les paramètres propres à la roche n'ont donc qu'une faible influence sur cette phase.

Lors d'expérimentations dans des conditions identiques, le flux dépend de la surface évaporante effective et est d'autant plus grand que cette surface est importante.

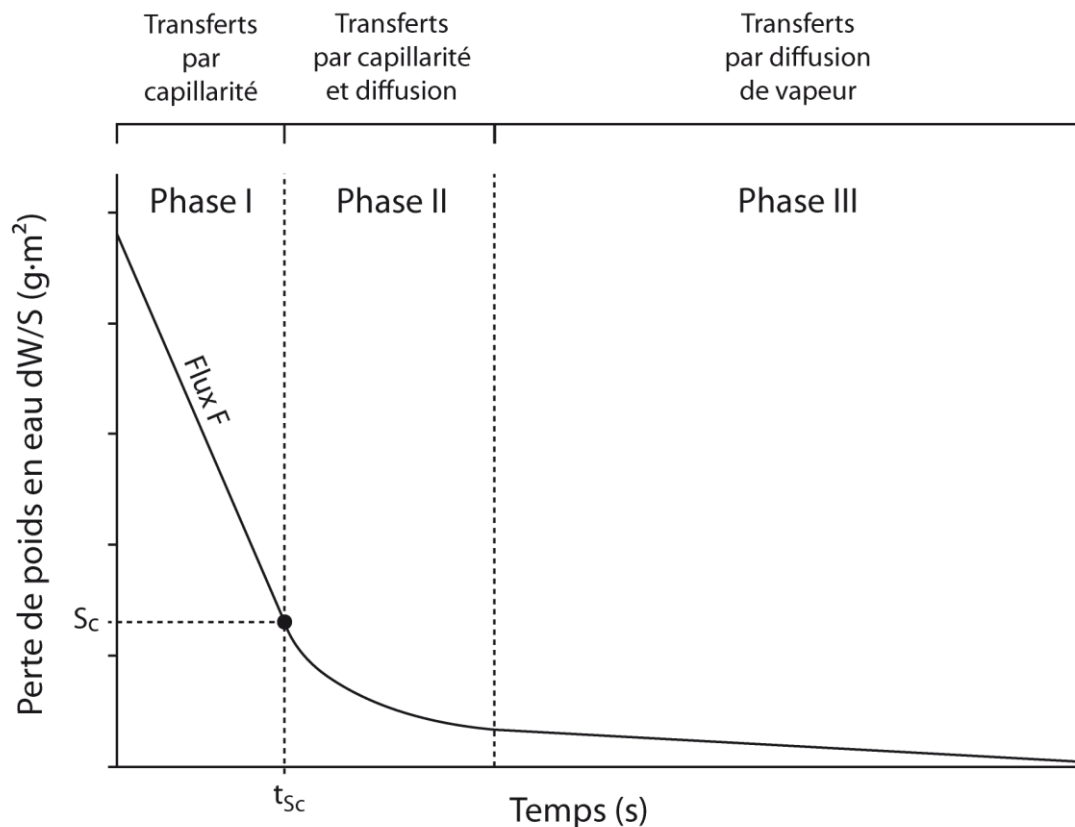


Figure VIII - 6 : Courbe typique de restitution des tests de séchage : S_c : saturation critique et t_{sc} : temps critique [d'après Rousset-Tournier, 2001].

➤ LA SURFACE ÉVAPORANTE EFFECTIVE

La surface évaporante effective dépend de la rugosité des minéraux ainsi que de la géométrie du réseau poreux qui détermine la taille des ménisques et le recouvrement d'eau en surface [Rousset-Tournier, 2001]. L'obtention de flux toujours supérieurs aux flux des surfaces d'eau libre équivalentes indique que la surface effective est toujours inférieure à l'interface air/minéral et supérieure à la surface macroscopique mesurée S_e .

➤ SATURATION CRITIQUE S_c ET TEMPS CRITIQUE T_{sc}

La saturation critique S_c et le temps critique t_{sc} correspondent respectivement à l'ordonnée et à l'abscisse de la fin de la première phase observée sur les courbes de restitution des cinétiques de séchage (Figure VIII - 6). La valeur de saturation critique S_c

est indépendante de la structure poreuse, du mode de saturation initiale ainsi que de la longueur de l'échantillon [Hammecker, 1993 ; Rousset-Tournier, 2001] mais dépend uniquement de l'humidité relative qui augmente avec le stress hydrique. Plus la valeur de S_c est faible, plus la désaturation par évaporation superficielle est importante.

b. PHASE II (COURBE)

La deuxième phase observée sur les courbes de restitution des cinétiques de séchage est curviligne et débute à partir du temps critique t_{sc} (Figure VIII - 6). Durant cette phase, le flux décroît car l'alimentation capillaire devient insuffisante pour maintenir toute la surface de l'échantillon humide.

Cette deuxième phase est une transition entre les phase I et III durant laquelle coexistent les deux mécanismes de transfert d'eau dans le réseau poreux : la capillarité (phase I) et la diffusion de vapeur (phase II).

c. PHASE III (LINÉAIRE)

La troisième phase observée sur les courbes de restitution des cinétiques de séchage est linéaire (Figure VIII - 6). Durant cette phase, la désaturation s'effectue par diffusion de la vapeur d'eau à travers le milieu poreux et le front mouillé se retire vers le cœur de l'échantillon. Dans le milieu poreux presque confiné, le gradient d'humidité est faible ce qui explique que le flux d'évaporation est faible (Figure VIII - 6). Thomachot [2002] ajoute que la tortuosité du réseau poreux augmente la longueur des cheminements et les étranglements limitent les échanges. Durant cette phase, le flux de vapeur d'eau est essentiellement contrôlé par la structure de la pierre.

IV. INFILTRATIONS À LA PIPETTE DE KARSTEN

La pipette de Karsten a été inventée à la fin des années cinquante afin de tester la résistance des façades contre les pluies battantes [Karsten, 1992 ; 1963]. Son utilisation s'est ensuite élargie aux mesures d'absorption d'eau des pierres naturelles puis le dispositif a par la suite été utilisé sur des briques de maçonnerie et pour l'étude de l'efficacité de divers traitements hydrofuges [Wittmann *et al.*, 1995].

Comme les méthodes de mesure des cinétiques d'imbibitions capillaires et de séchage, la pipette de Karsten est aujourd'hui une méthode couramment utilisée pour la caractérisation des matériaux de construction au sens large [*e.g.* Pinna *et al.*, 2012; Vandevorde *et al.*, 2013; Vandevorde *et al.*, 2009; Zárraga *et al.*, 2010].

Dans cette étude, les essais à la pipette de Karsten ont été réalisés afin de caractériser les transferts hydriques par infiltration au sein des différents horizons étudiés dans les profils de sol.

1. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

L'appareil se présente sous la forme d'un fin tube de verre gradué ouvert dans sa partie supérieure et dont l'extrémité inférieure débouche sur un cylindre de section plus importante ($5,73 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$) (Figure VIII - 7). La base de ce cylindre est fixée verticalement à la surface de l'échantillon à l'aide d'un bandeau de plastiline.

La pipette est ensuite remplie d'eau et la quantité d'eau infiltrée dans l'échantillon en fonction du temps est mesurée par lecture des graduations sur le tube de verre en suivant la recommandation Rilem II.4 [1980].

La colonne d'eau initiale haute de 9,8 cm correspond à une pression de $961,38 \text{ N.m}^{-1}$ appliquée à la surface de l'échantillon (Gérard, 1978). Cette pression correspond à un vent de vitesse $39,6 \text{ m.s}^{-1}$ [van Hees et Rob, 1996 ; Motteu, 1967].

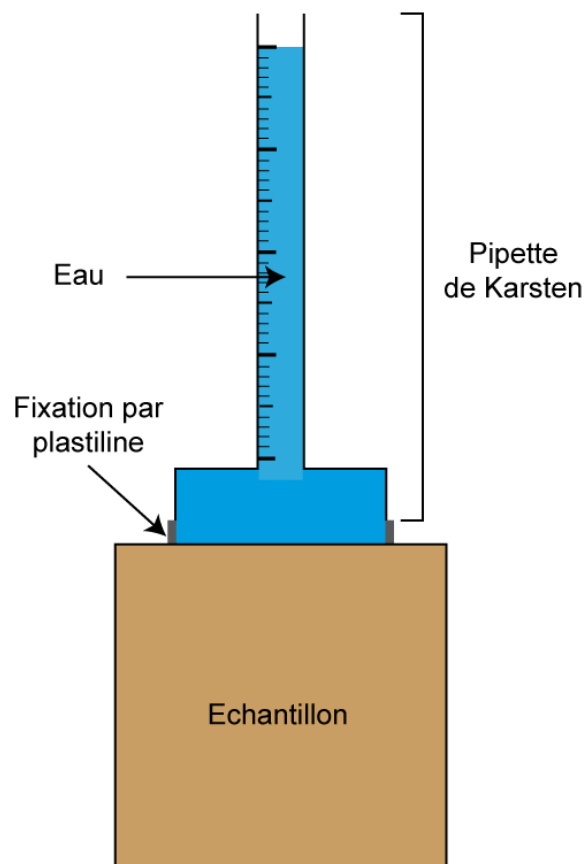


Figure VIII - 7 : Schéma du dispositif de mesure d'infiltration à la pipette de Karsten.

2. CALCUL DU COEFFICIENT MOYEN D'ABSORPTION W_A

Deux formules existent pour calculer le coefficient moyen d'absorption W_A en convertissant la quantité d'eau infiltrée en masse.

La première est utilisée lorsque l'infiltration de l'eau dans l'échantillon est assez longue :

$$W_a = \frac{m_{15\min} - m_{5\min}}{A_k \cdot t_{10\min}}$$

W_a : coefficient moyen d'absorption ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) ;
 $m_{15\min}$: masse d'eau infiltrée au bout de 15 minutes (g) ;
 $m_{5\min}$: masse d'eau infiltrée au bout de 5 minutes (g) ;
 A_k : surface de contact (m^2) ;
 $t_{10\min}$: temps (600 s).

La seconde est utilisée couramment lorsque l'eau a tendance à s'infiltrer plus rapidement au sein de l'échantillon :

$$W_a = \frac{m_{90s}}{A_k \cdot t_{90s}}$$

m_{90s} : masse d'eau infiltrée au bout de 90 secondes (g) ;
 t_{90s} : temps (90 s).

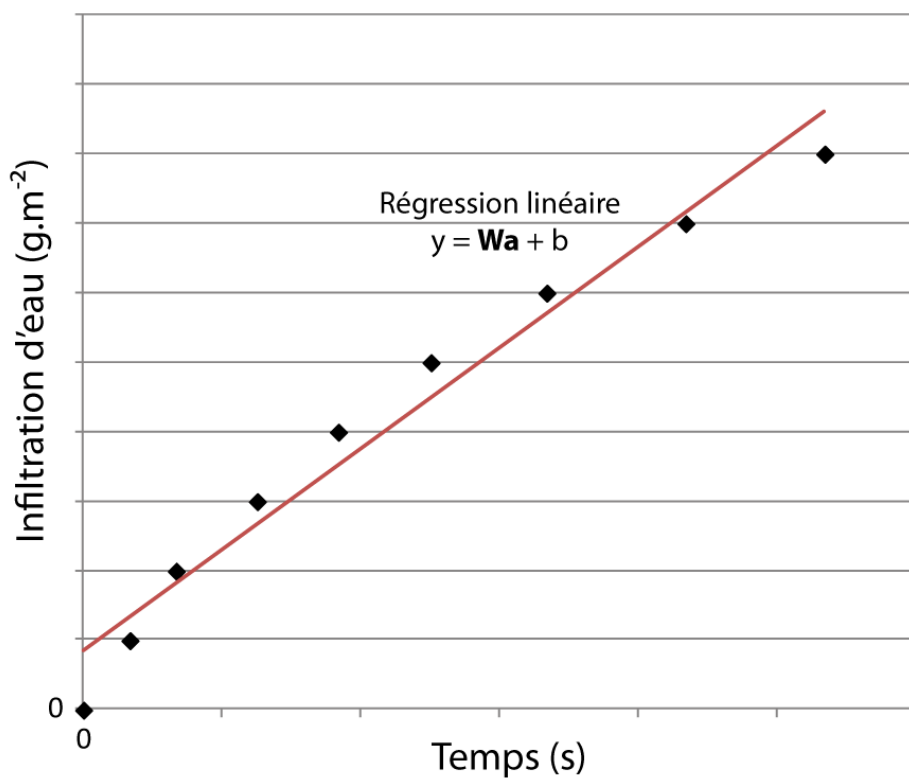


Figure VIII - 8 : Courbe typique de restitution des tests d'infiltration à la pipette de Karsten.

L'intégralité des échantillons de cette étude présentant une infiltration de l'eau assez rapide, le coefficient moyen d'absorption W_a a été assimilé au coefficient directeur de la droite de régression des courbes d'infiltration d'eau en fonction du temps (Figure VIII - 8).

V. INFILTROMÉTRIE À DISQUE

L'infiltrométrie à disque a été utilisée afin de tenter une caractérisation des transferts hydriques par infiltration directement sur le terrain. L'étude de la sorptivité capillaire S permet également d'avoir accès aux transferts hydriques verticaux de bas en haut uniquement régis par les forces capillaires sans tenir compte des écoulements dus aux forces gravitaires.

Le premier dispositif employé sur le terrain afin de réaliser des essais d'infiltration sous potentiel hydrique imposé à la surface du sol a été l'*anneau de Muntz* [Roche, 1963]. Le procédé consiste en un cylindre métallique enfoncé dans le sol dans lequel le niveau d'eau est maintenu constant à l'aide d'un réservoir gradué, les volumes infiltrés étant relevés au cours du temps.

Par la suite, une amélioration par utilisation d'un double anneau a été mise au point afin de palier à la surestimation de la conductivité hydraulique due à la quantité d'eau absorbée par le sol à l'extérieur de l'anneau.

Par rapport à ces méthodes, l'infiltromètre à disque permet de travailler en condition non-saturées afin d'étudier la variation des paramètres étudiés en fonction d'une tension appliquée.

1. APPAREILLAGE

L'infiltromètre à disque est constitué d'un réservoir d'eau qui alimente en continu un disque creux muni d'une membrane poreuse au niveau de son contact avec le sol. Le réservoir d'alimentation est gradué et fermé dans sa partie haute à l'aide d'une pince de Mohr.

Durant toute la durée d'une mesure, la pénétration de l'eau dans l'horizon testé par le biais du disque ne peut s'effectuer uniquement que si elle est remplacée par un même volume d'air. L'arrivée de cet air se réalise par le tube CD au point D qui relie le réservoir à un vase de Mariotte. L'air transite au sein de ce vase de Mariotte de A jusqu'à D (Figure VIII - 9).

L'air entre donc dans le vase de Mariotte par le tube AB au point A à la pression atmosphérique P_{atm} (Figure VIII - 9). Les bulles d'air formées au niveau de l'orifice B du tube AB (également à la pression atmosphérique P_{atm}) remontent dans l'eau du vase de Mariotte et rejoignent le volume d'air contenu initialement dans celui-ci (Figure VIII - 9).

La distance entre l'orifice B du tube AB et la surface de l'eau au sein du vase de Mariotte est appelée la charge hydrostatique h_1 (Figure VIII - 9). Le volume d'air du vase de Mariotte se trouve donc à une pression P_{airVM} qui est inférieure à la pression atmosphérique P_{atm} :

$$P_{\text{airVM}} = P_{\text{atm}} + \rho_{\text{eau}} \cdot h_1 \cdot g$$

P_{airVM} = pression de l'air dans le vase de Mariotte (Pa) ;

P_{atm} = pression atmosphérique (Pa) ;

ρ_{eau} = masse volumique de l'eau (1000 kg.m^{-3}) ;

h_1 = charge hydrostatique (m) ;

g = accélération de la pesanteur ($9,81 \text{ m.s}^{-2}$).

Lors de l'essai d'infiltration de l'eau dans l'horizon testé, l'air quitte le vase de Mariotte par le tube CD et rejoint le réservoir d'alimentation. Au niveau du point D, la pression de l'eau est identique à celle de l'air qui sort du tube, lui-même à la pression P_{airVM} . La pression de l'eau P_0 à la sortie du disque de l'infiltromètre est donc de :

$$P_0 = P_{\text{airVM}} + \rho_{\text{eau}} \cdot h_2 \cdot g = P_{\text{atm}} + \rho_{\text{eau}} \cdot (h_2 - h_1) \cdot g$$

P_0 = pression de l'eau à la sortie du disque (Pa).

Si h_1 est supérieure à h_2 , la pression d'eau à la base du disque exprimée en terme de hauteur d'eau h_0 sera donc négative (suction).

L'ensemble du dispositif permet donc le maintien d'une pression d'eau constante au niveau de l'interface infiltromètre/sol par l'intermédiaire du vase de Mariotte.

2. UTILISATION SUR LE TERRAIN

Une grande partie de la fiabilité de la mesure infiltrométrique repose sur la qualité du contact entre l'appareil au niveau de sa membrane poreuse et le sol. La surface du sol n'étant que très rarement plane et régulière, une fine couche de sable est disposée sur le sol avant d'y déposer l'infiltromètre. Le sable le plus couramment utilisé et de type Fontainebleau qui présente les caractéristiques requises (finesse du grain et bon tri) pour se saturer rapidement mais sans former une barrière capillaire en se désaturant aux faibles potentiels. La surface circulaire de cette couche de sable est

façonnée à un diamètre égal à celui du disque afin de conserver une surface d'infiltration identique.

La relation précédente devrait théoriquement être corrigée des pressions capillaires à la sortie des tubes AB et CD. Cet ajustement, dépendant des diamètres des tubes, est de l'ordre de 5 à 10 millimètres [Vandervaere, 1995]. Dans la pratique, la hauteur h_1 équivalente à $h_0 = 0$ est réglée en remontant le tube AB jusqu'à ce que l'eau coule au travers de la membrane. A cet instant, la pression P_0 est alors égale à la pression atmosphérique P_{atm} . L'enfoncement du tube AB dans le vase de Mariotte permet ensuite d'appliquer la tension (suction) désirée.

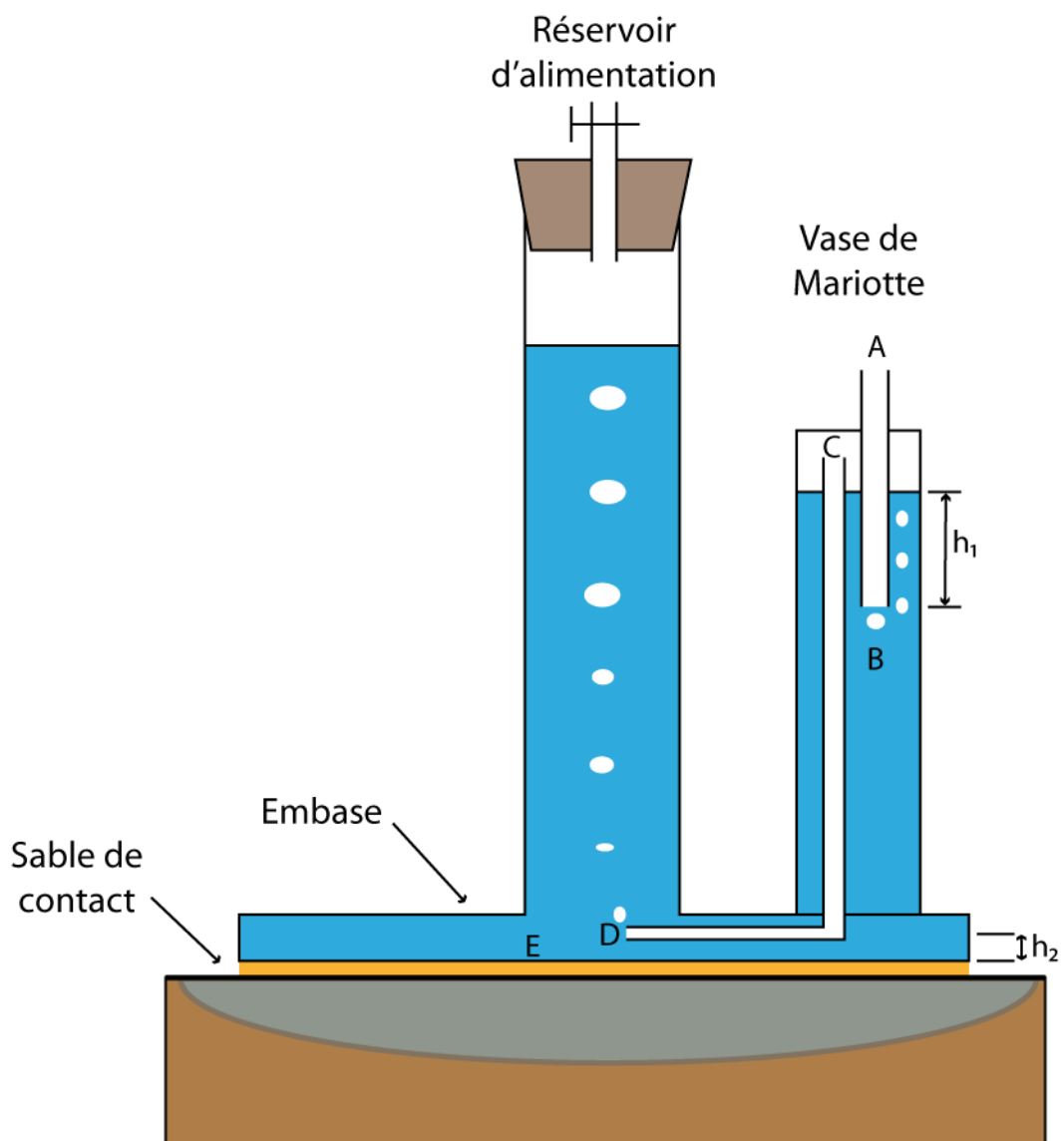


Figure VIII - 9 : Schéma général de l'infiltromètre à disque [d'après Vandervaere, 1995].

L'expérience débute dès la pose de l'infiltromètre sur la fine couche de sable. Un chronomètre est déclenché au même moment et la lame d'eau infiltrée I (m) est relevée très régulièrement (Figure VIII - 10 : A).

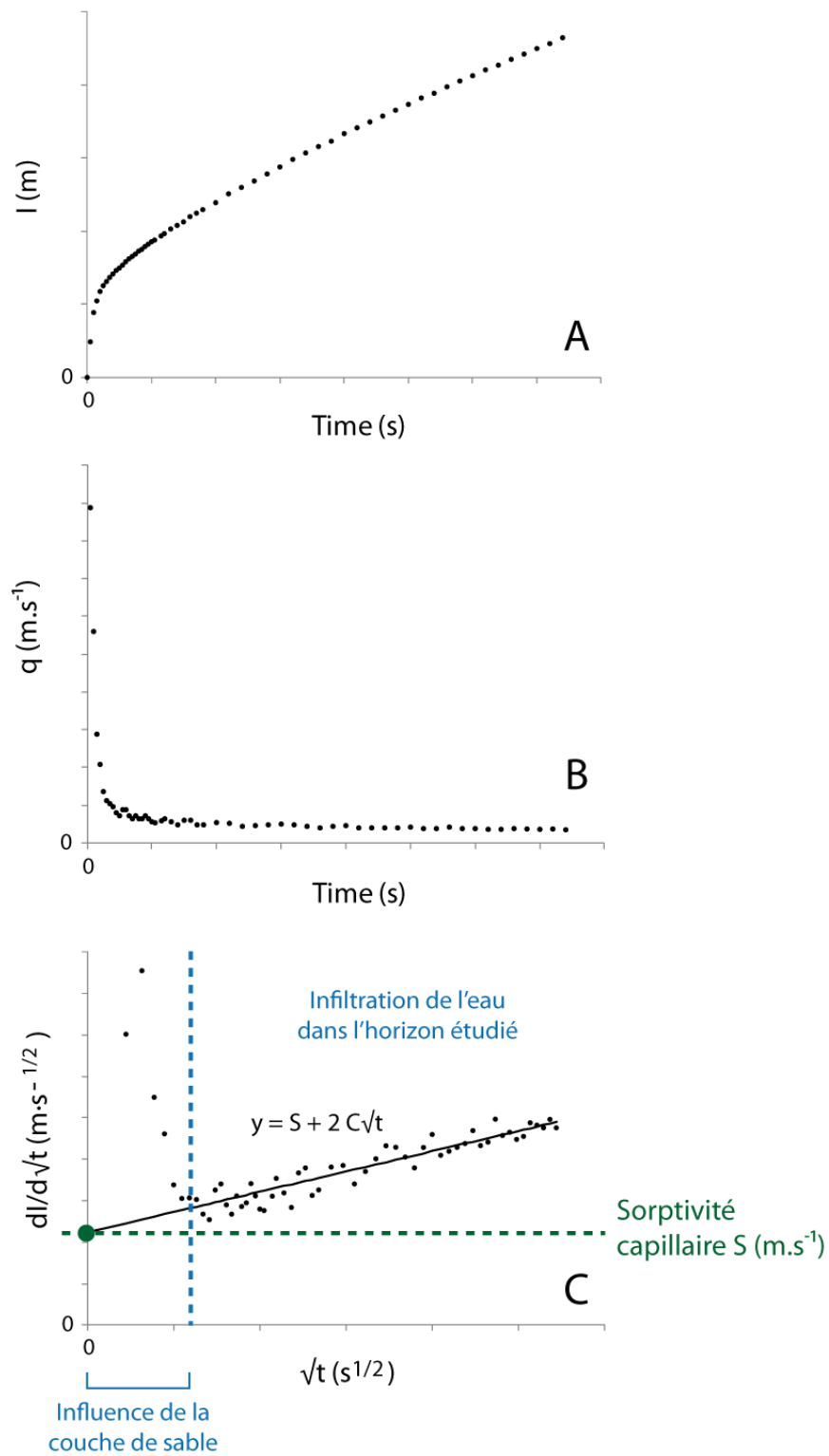


Figure VIII - 10 : Graphiques typiques obtenus grâce aux données d'infiltrométrie à disque. A : lame d'eau infiltrée ; B : flux d'infiltration et C : estimation de la sorptivité capillaire S .

3. DÉTERMINATION DE LA SORPTIVITÉ CAPILLAIRE S

Selon Vandervaere *et al.* [2000a], le régime transitoire d'une infiltration axisymétrique effectuée à l'infiltromètre à disque peut être décrite par une équation à deux termes qui est similaire à la relation établie par Philip [1957] qui décrit une infiltration verticale unidimensionnelle :

$$I = S \cdot \sqrt{t} + C \cdot t$$

I = lame d'eau infiltrée (m) ;

t = temps (s) ;

S = sorptivité capillaire (m.s⁻¹) ;

C = voir suite.

Selon Haverkamp *et al.* [1994], le coefficient C peut être représenté par la relation :

$$C = \frac{2-\beta}{3} \cdot K + \frac{\gamma \cdot S^2}{r_d \cdot (\theta_f - \theta_i)}$$

K = conductivité hydraulique (m.s⁻¹) ;

r_d = rayon du disque (m) ;

θ_i et θ_f : teneur en eau volumique initiale et finale de l'horizon testé (sans unité) ;

β et γ : voir suite.

Le paramètre β prend une valeur comprise sur l'intervalle [0 ; 1] que Vandervaere *et al.* [2000b] estiment à 0,6. Smettem *et al.* [1994] ont montré quant à eux par des études expérimentales que la valeur de γ était une constante égale à 0,75.

En suivant la méthode proposée par Vandervaere *et al.* [1997 ; 2000a], la différenciation de l'avant-dernière équation par rapport à la racine carré du temps donne l'équation :

$$\frac{dI}{d\sqrt{t}} = S + 2 \cdot C \cdot \sqrt{t}$$

Le calcul et le tracé de $\frac{dI}{d\sqrt{t}}$ en fonction de la racine carré du temps permet d'observer une courbe sur laquelle deux parties se distinguent (Figure VIII - 10 : C). La

première partie correspond à l'infiltration de l'eau au travers de la fine couche de sable de contact et n'est pas étudiée dans cette étude. La seconde correspond quand à elle à l'infiltration de l'eau au sein de l'horizon étudié.

La régression linéaire de cette seconde partie permet d'obtenir une droite dont l'équation correspond à la relation précédente. La valeur estimée de la sorptivité capillaire S correspond donc à l'ordonnée à l'origine de la droite de régression (Figure VIII - 10 : C).

RÉSULTATS OBTENUS POUR LES TRANSFERTS HYDRIQUES

Ce chapitre présente l'ensemble des résultats issus des analyses ayant attiré à l'étude des transferts hydriques au sein des profils de sol de Champagne-Ardenne et notamment des horizons d'accumulations carbonatées. Ces résultats sont organisés en quatre sections concernant respectivement les imbibitions capillaires, les cinétiques de séchage, les tests à la pipette de Karsten puis et à l'infiltromètre à disque.

I. RÉSULTATS DES TESTS D'IMBIBITIONS CAPILLAIRES

L'ensemble des courbes de restitution des tests d'imbibitions capillaires témoignent de part leur morphologie de la présence de réseaux poreux dits unimodaux au sein de la craie comme des autres niveaux étudiés (Figure IX - 2). Les transferts hydriques semblent donc essentiellement contrôlés par une famille de pores définie.

1. PRISE DE POIDS EN EAU C_1

Les échantillons de craie prélevés au droit des profils 1 et 2 exposent des coefficients de prise de poids en eau C_1 très proches valant respectivement $547,4 \pm 62,8$ et $563,7 \pm 41,6 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$ (Figure IX - 1 et IX - 2).

Le coefficient C_1 obtenus pour les grèzes sont inférieurs à ceux calculés pour les échantillons de craie. Le coefficient C_1 le plus faible est calculé pour les grèzes du profil 1 ($226,1 \pm 49,6 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$) tandis que la valeur la plus élevée du coefficient C_1 des grèzes est obtenue pour le profil 3 ($433,6 \pm 59,5 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$). Les grèzes du profil 2 présentent un coefficient d'absorption d'eau C_1 intermédiaire de $363,5 \pm 51,3 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$ (Figure IX - 1 et IX - 2).

Les coefficients C_1 obtenus pour les HAC sont toujours supérieurs à ceux obtenus pour les grèzes du même profil. Dans le profil 1, la valeur du coefficient C_1 de l'HAC est 3,5 fois supérieure à celle obtenue pour les grèzes ($780,1 \pm 53,8 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$). Cette augmentation du coefficient C_1 dans les HAC comparée aux valeurs obtenues dans les grèzes est moins importante dans les profils 2 et 3 puisque les coefficients C_1 y sont respectivement 1,9 et 1,5 fois plus importants ($672,7 \pm 88,0$ et $669,4 \pm 73,5 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$) (Figure IX - 1 et IX - 2).

L'ensemble de ces résultats montre donc que les forces capillaires permettent aux HAC de se gorger d'une masse d'eau plus importante par unité de temps (et de surface) que les grèzes.

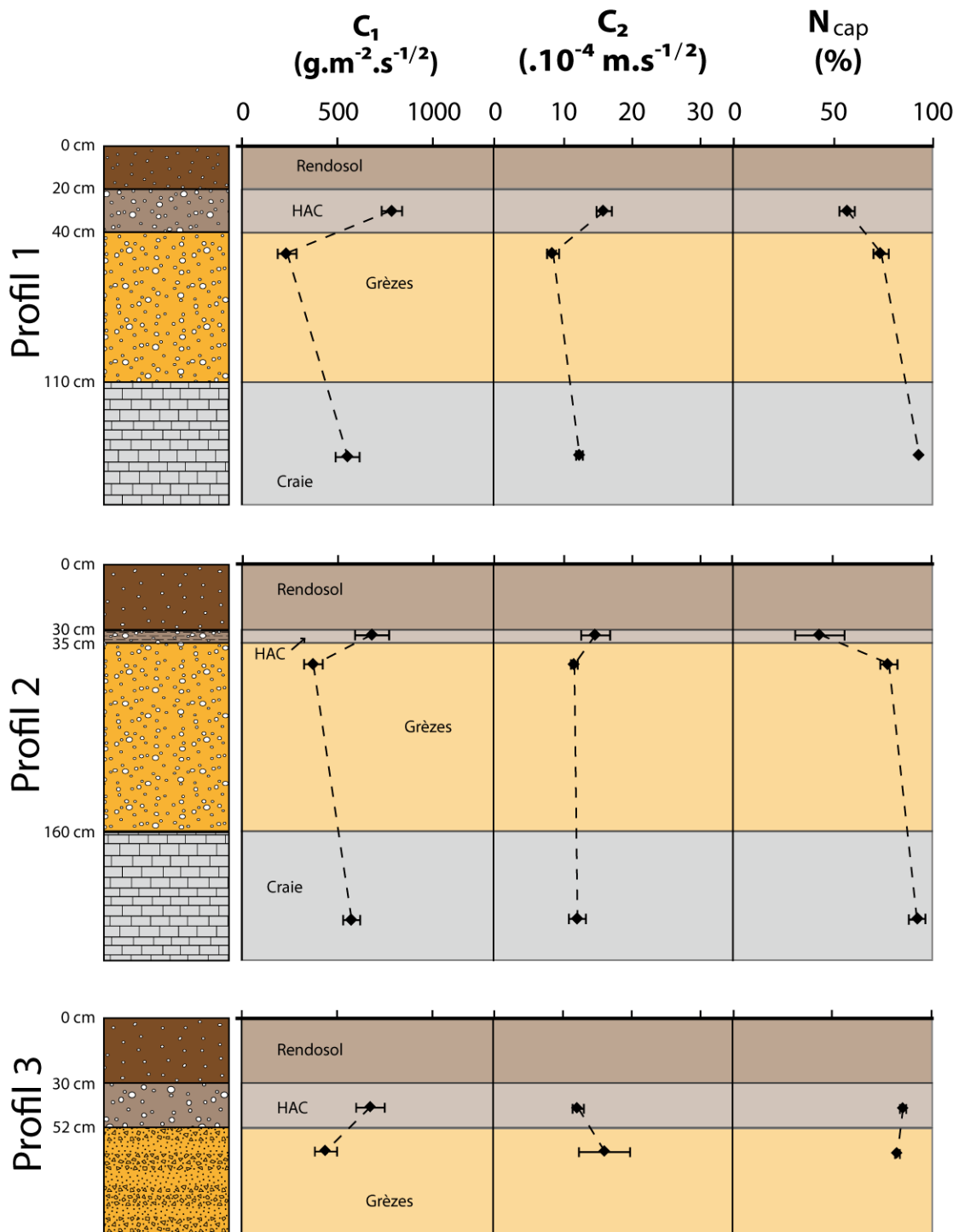


Figure IX - 1 : Variations du coefficient de prise de poids en eau, de coefficient de progression de la frange capillaire ainsi que de la porosité capillaire en fonction de la profondeur le long des profils étudiés sur le site du Mont du Ménil.

Cette différence HAC/grèzes est nettement plus importante dans le profil 1 que dans le profil 2. Le profil 3 semble quant à lui moins différencié des grèzes que les deux autres profils.

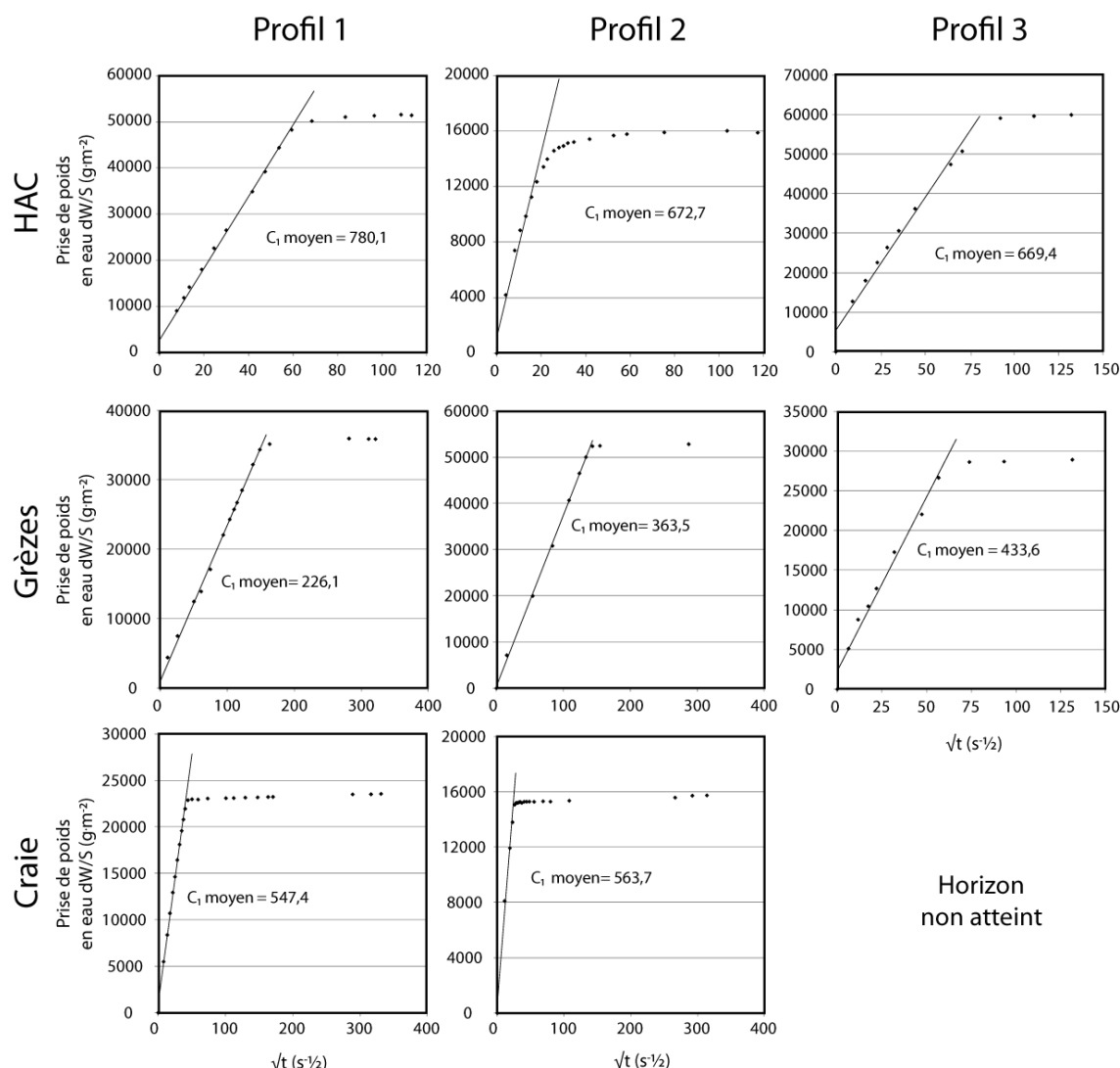


Figure IX - 2 : Courbes issues des tests d'imbibitions capillaires sur les trois horizons (horizon d'accumulations carbonatées, grèzes et craie) des trois profils étudiés sur le site du Mont du Ménil. Le coefficient d'absorption d'eau C_1 moyen est donné en $\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$.

2. MIGRATION DE LA FRANGE CAPILLAIRE C_2

Les valeurs du coefficient C_2 correspondant à la progression verticale de la frange capillaire en fonction de la racine carrée du temps sont homogènes pour les échantillons de craie prélevés au droit des profils 1 et 2 (respectivement $547,4 \pm 62,8$ et $563,7 \pm 41,6 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1/2}$ (Figures IX - 1 et IX - 3).

Les valeurs des coefficient C_2 obtenues pour les grèzes sont comprises entre $8,3 \pm 0,9 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1/2}$ pour le profil 1 et $16,0 \pm 3,7 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1/2}$ pour le profil 3 (Figures IX - 1 et IX - 3). Le coefficient C_2 des grèzes du profil 3 sont en moyenne de $11,5 \pm 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1/2}$.

^{1/2}. L'écart-type des valeurs de C_2 obtenues pour les grès du profil 3 est nettement plus important que ceux des grès des deux autres profils (3,7 contre 0,9 et $0,5 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1/2}$).

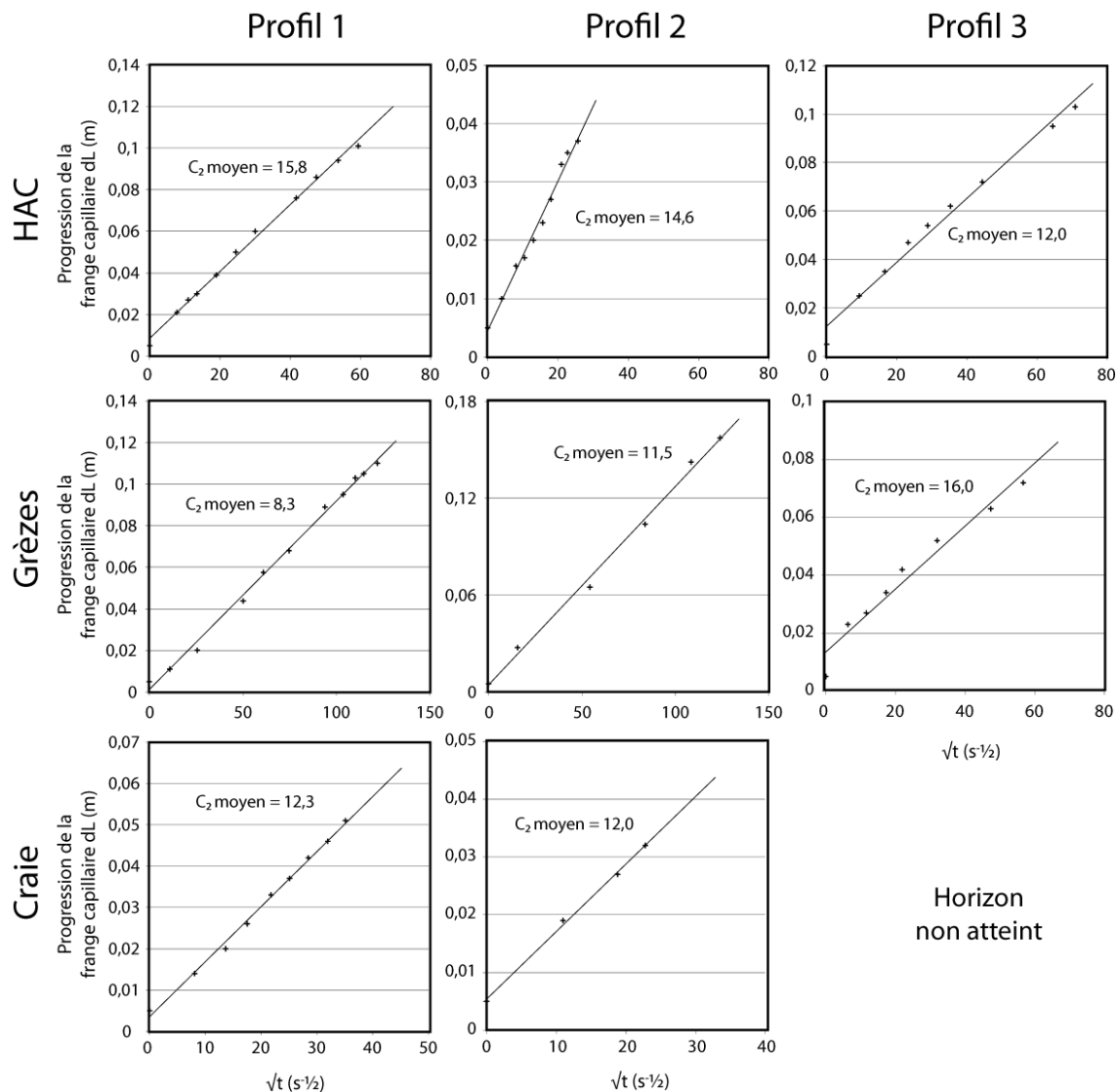


Figure IX - 3 : Courbes issues des tests d'imbibitions capillaires sur les trois horizons (HAC, grès et craie) des trois profils étudiés sur le site du Mont du Ménil. Le coefficient de capillarité (coefficient de progression de la frange capillaire) C_2 moyen est donné en $\text{m.s}^{-1/2}$.

Pour les profil 1 et 2, les coefficients C_2 obtenues pour les HAC sont supérieures à celles obtenues pour les grès (respectivement $15,8 \pm 1,1$ et $14,6 \pm 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1/2}$) (Figures IX - 1 et IX - 3). Les augmentations des valeurs de C_2 dans les HAC comparés aux grès sont respectivement de 1,8 et 1,3. Le comportement du profil 3 est différent puisque la valeur du coefficient C_2 de l'HAC est 1,3 fois inférieure à celui des grès ($12,0 \pm 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1/2}$).

Les résultats obtenus indiquent donc qu'en ce qui concerne les profils 1 et 2, la vitesse d'ascension de l'eau est plus rapide dans les HAC que dans les grèzes. Les différences HAC/grèzes sont plus importantes dans le profil 1 que dans le profil 2.

Dans le profil 3, les grèzes présentent des vitesses d'ascension de l'eau plus importantes que dans les deux autres profils et le comportement de l'HAC est inversé.

3. POROSITÉ CAPILLAIRE N_{CAP}

La porosité capillaire N_{cap} des échantillons de craie prélevés au droit du profil 1 est extrêmement proche de celle des échantillons prélevés au niveau du profil 2 (respectivement $93,0 \pm 0,3$ et $93,2 \pm 0,2$ %) (Figures IX - 1 et IX - 4).

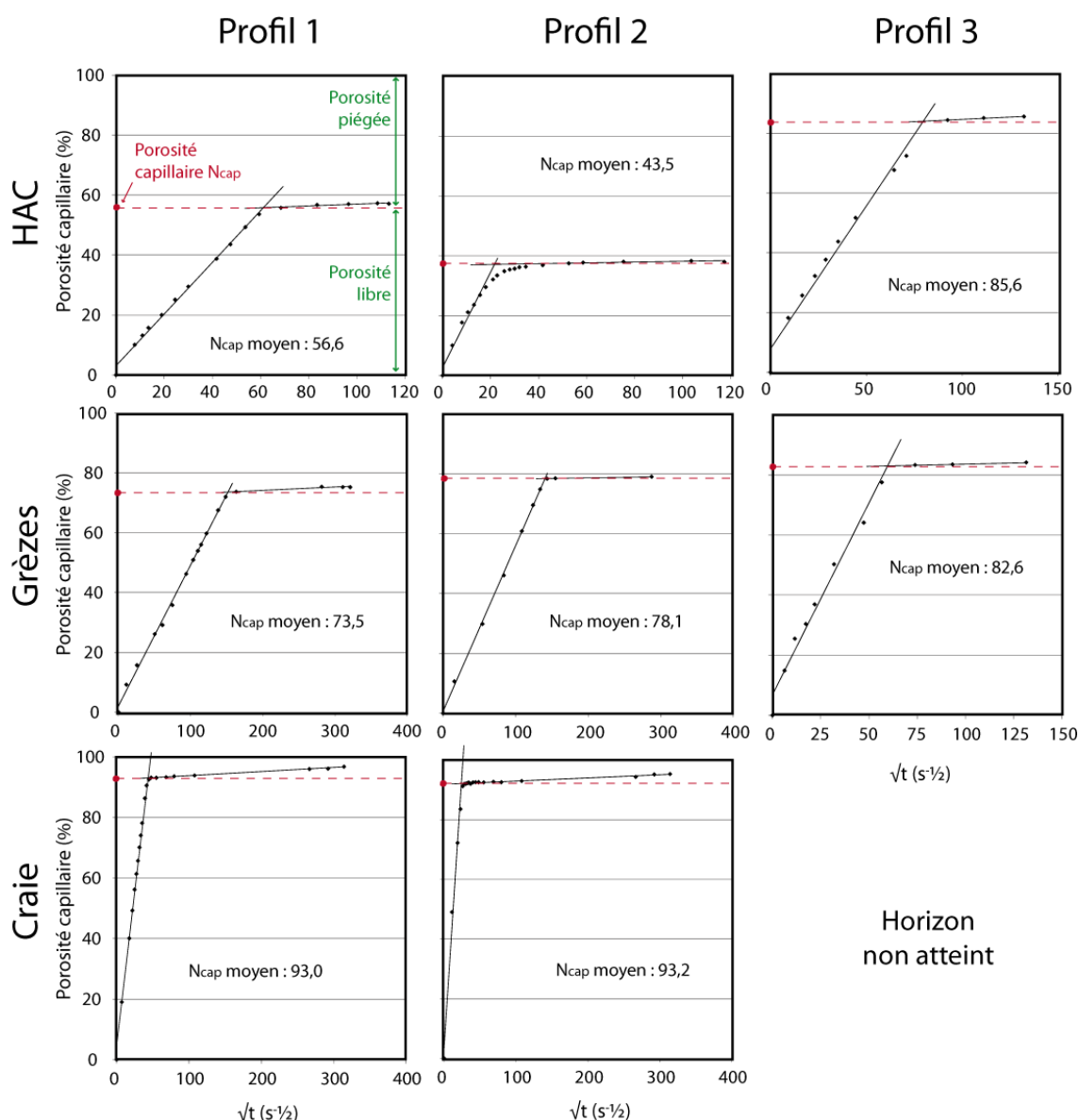


Figure IX - 4 : Courbes types de saturation des échantillons prélevés sur les trois horizons (HAC, grèzes et craie) des trois profils étudiés sur le site du Mont du Ménil. La porosité capillaire moyenne N_{cap} moyen est donnée en %.

Les valeurs de porosité capillaire N_{cap} des grèzes sont assez proches sur les trois profils étudiés et sont comprises entre $73,5 \pm 4,0 \%$ pour le profil 1 et $82,6 \pm 1,5 \%$ pour le profil 3 (Figures IX - 1 et IX - 4). La valeur du coefficient N_{cap} du profil 2 est quant à lui de $78,1 \pm 4,3 \%$.

Les valeurs de porosité capillaire N_{cap} des HAC des profils 1 et 2 sont 1,3 à 1,8 fois inférieures à celles des grèzes (respectivement $56,8 \pm 3,9$ et $43,5 \pm 12,8 \%$) (Figures IX - 1 et IX - 4). L'écart-type sur la valeur de porosité capillaire de l'HAC du profil 2 est nettement plus importante que celles calculées pour les deux autres profils (12,8 contre 3,9 et 1,7 %). La valeur de porosité capillaire de l'HAC observé sur le profil trois est extrêmement proche de celle obtenue pour les grèzes ($85,6 \pm 1,7 \%$).

Des valeurs de porosité capillaire plus faibles au sein des HAC indiquent que ces niveaux présentent une tendance nette à moins se saturer en eau que les grèzes lors de son ascension jusqu'à la surface supérieure des échantillons. Ceci témoigne de l'existence d'une fraction de réseau poreux qui se comporte comme une porosité piégée lors de la phase d'ascension de l'eau au sein des HAC.

L'écart-type plus important sur la valeur de porosité capillaire calculée pour l'HAC du profil 2 semble souligner ici l'hétérogénéité de ce niveau (lamination).

Enfin, ces résultats montrent également qu'en ce qui concerne ce paramètre, l'HAC du profil 3 est très peu différencié des grèzes.

II. RÉSULTATS DES CINÉTIQUES DE SÉCHAGE

1. FLUX D'ÉVAPORATION F

Les flux d'évaporation F mesurés sur les échantillons de craie prélevés au droit du profil 1 sont extrêmement proches de ceux obtenus pour les échantillons de craie du profil 2 ($42,8 \pm 4,3$ et $42,8 \pm 4,8.10^{-3} \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) (Figures IX - 5 et IX - 6).

Dans les grèzes, le coefficient F est assez proche pour les profils 1 et 2 (respectivement $12,9 \pm 2,3$ et $13,7 \pm 5,3.10^{-3} \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$). Les échantillons du profil 3 présentent une valeur moyenne de coefficient F un peu plus importante de $19,5 \pm 3,9.10^{-3} \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (Figures IX - 5 et IX - 6).

Le comportement des HAC vis-à-vis du flux d'évaporation F est assez variable. Dans le profil 1, il est plutôt proche de celui des grèzes ($11,7 \pm 2,0.10^{-3} \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$). Dans le profil 3, le coefficient F est 1,4 fois inférieur à celui des grèzes ($13,9 \pm 3,9.10^{-3} \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$). Ce n'est que dans le profil 2 que le flux d'évaporation F est bien supérieur à celui des grèzes puisqu'il atteint $24,2 \pm 5,3.10^{-3} \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (Figures IX - 5 et IX - 6).

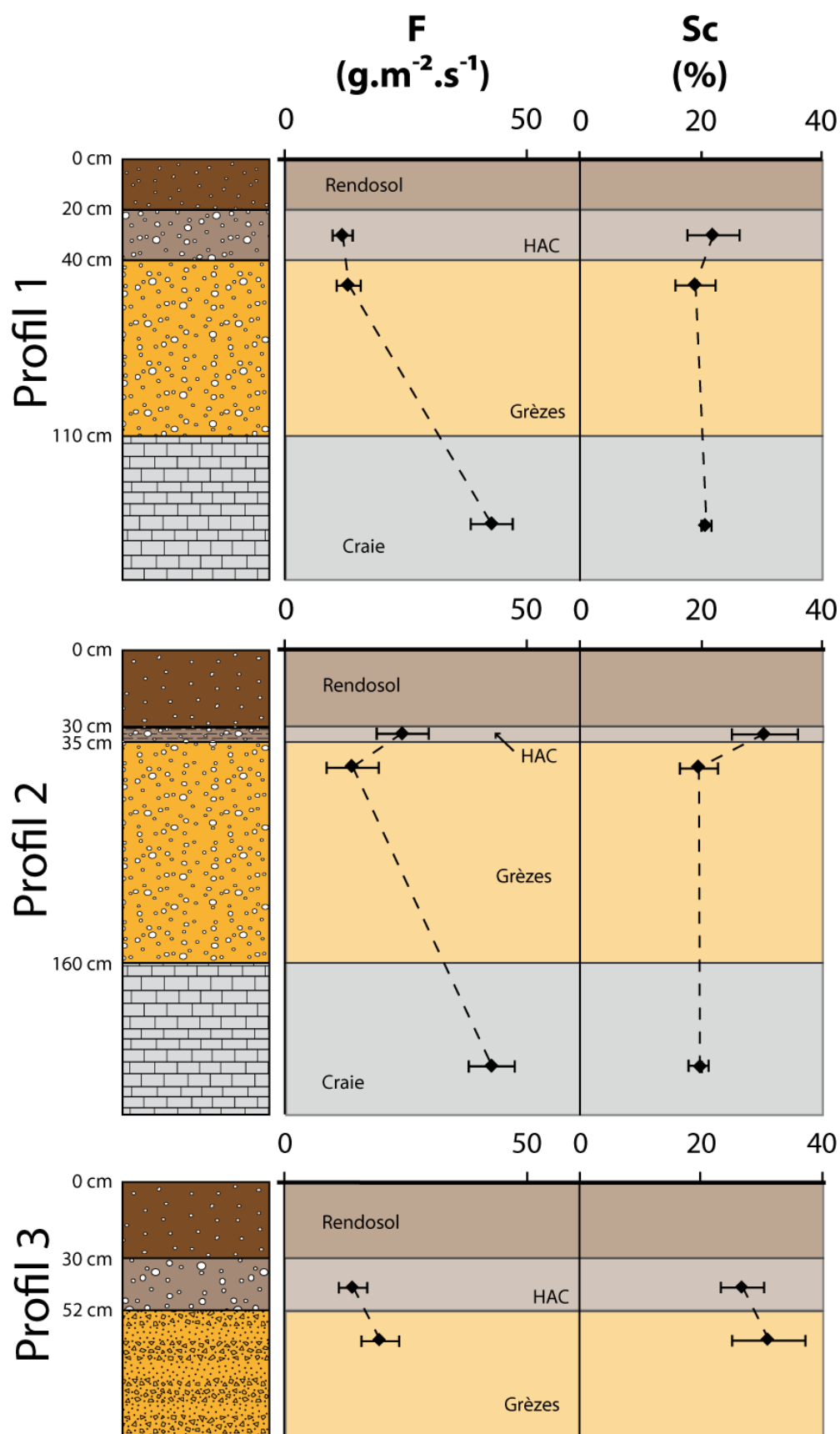


Figure IX - 5 : Courbes représentant le flux d'évaporation ainsi que la saturations critique en fonction de la profondeur le long des profils étudiés sur le site du Mont du Ménil.

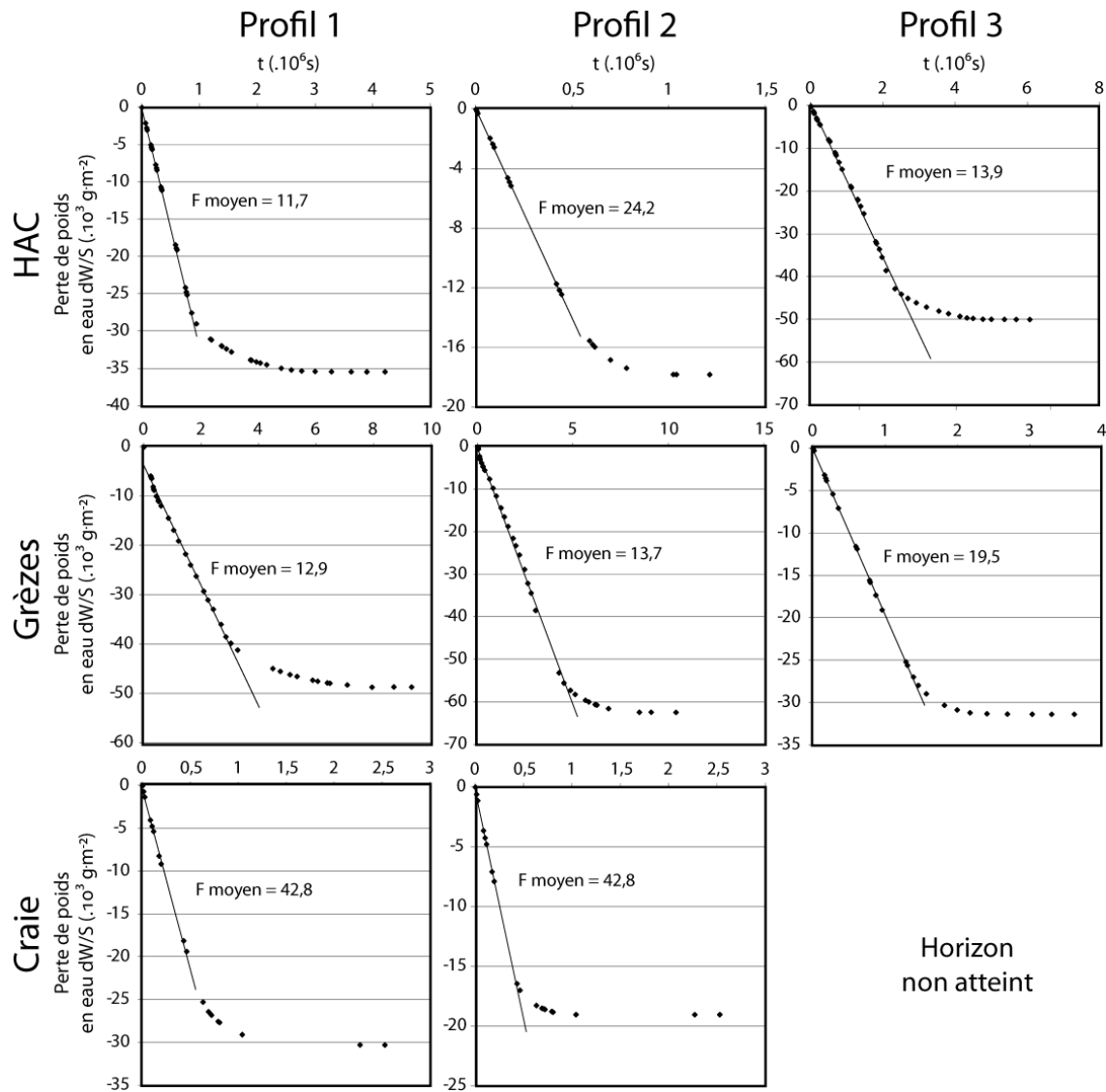


Figure IX - 6 : Courbes issues des tests d'évaporations sur les trois horizons (HAC, grèzes et craie) des trois profils étudiés sur le site du Mont du Ménil. Le flux d'évaporation F moyen est donné en $\text{g·m}^{-2}\text{·s}^{-1}$.

2. SATURATION CRITIQUE S_c

Concernant la saturation critique S_c , les échantillons de craie prélevés au droit des profils 1 et 2 semblent également assez homogènes (respectivement $20,7 \pm 0,8$ et $19,8 \pm 0,1$ %) (Figures IX - 5 et IX - 7).

Les grèzes des profils 1 et 2 semblent également assez homogènes vis-à-vis de la saturation critique S_c (respectivement $19,0 \pm 3,2$ et $19,5 \pm 3,2$ %) (Figures IX - 5 et IX - 7). Les valeurs de saturation critique des grèzes du profil 3 sont quant à elles plus importantes ($31,0 \pm 6,0$ %).

Dans les profils 1 et 2, les saturations critiques S_c sont respectivement 1,2 et 1,6 fois supérieures à celles obtenues pour les grèzes ($21,9 \pm 4,4$ et $30,4 \pm 5,5$ %) (Figures IX

- 5 et IX - 7). Dans le profil 3 en revanche, les saturations critiques S_c de l'HAC sont inférieures à celles obtenues pour les grèzes ($26,7 \pm 3,6$ %).

L'ensemble de ces résultats montrent que pour les profil 1 et 2, la quantité d'eau restante dans les HAC à la fin de la première phase des cinétiques de séchage est plus importante que dans les grèzes.

Ces résultats indiquent également que pour ce paramètre également, le profil 3 se distingue des deux autres profils étudiés. Le réseau poreux des graveluches contient plus d'eau que l'HAC à la fin de la première phase des cinétiques de séchage.

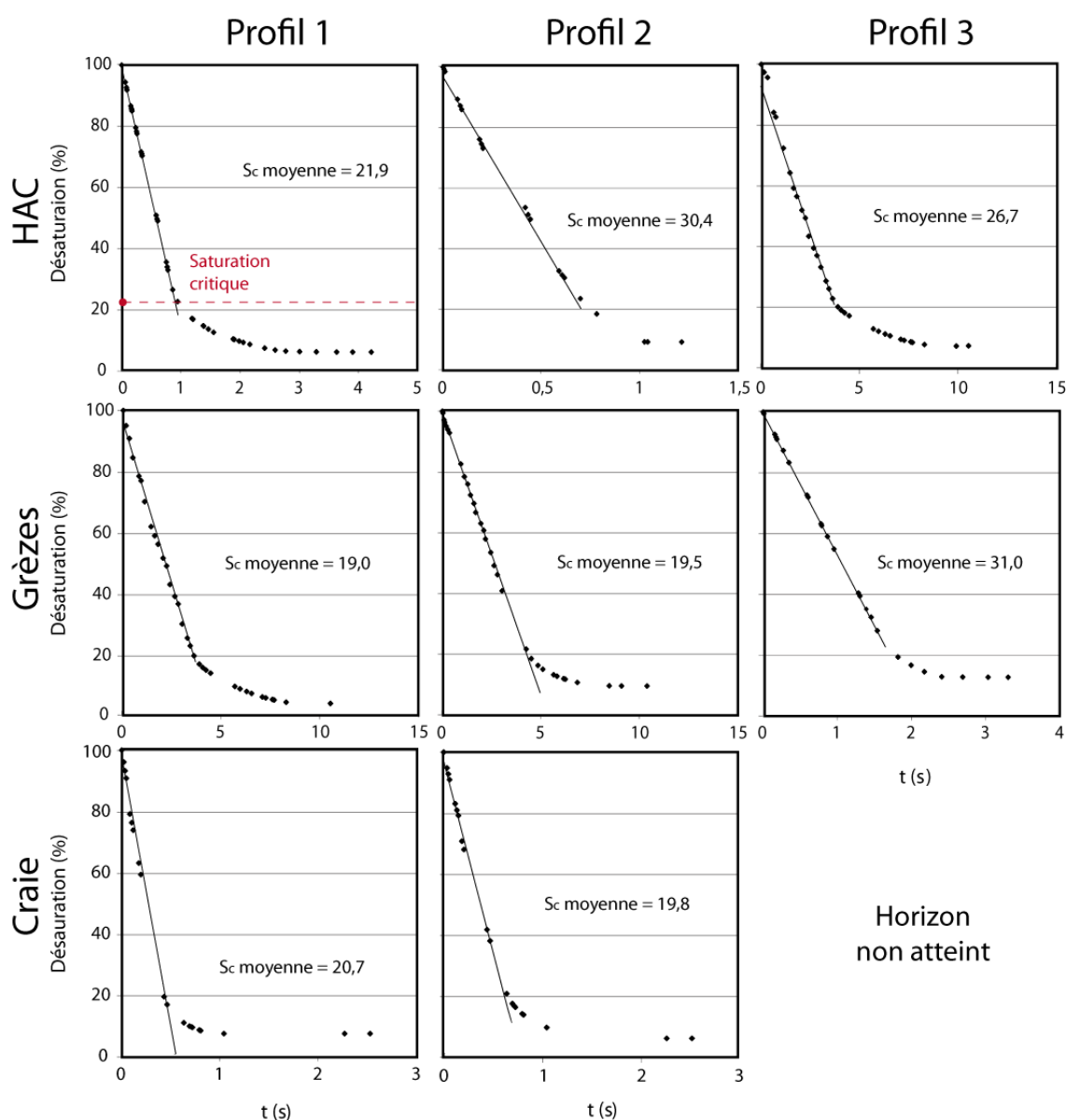


Figure IX - 7 : Courbes issues des tests d'évaporations sur les trois horizons (HAC, grèzes et craie) des trois profils étudiés sur le site du Mont du Ménil. La saturation critique S_c moyenne est donnée en %.

III. RÉSULTATS DES TESTS À LA PIPETTE DE KARSTEN

Concernant le coefficient W_a , les valeurs obtenues pour les échantillons de craie des profils 1 et 2 sont ici aussi assez proches (respectivement $138,4 \pm 12,3$ et $147,0 \pm 15,6 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) (Figure IX - 8).

Les grèzes présentent des valeurs de W_a assez basses qui sont comprises entre $41,3 \pm 9,9 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ pour le profil 1 et $54,2 \pm 13,1 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ pour le profil 3. Les échantillons de grèzes du profil 2 présentent quant à elles une valeur moyenne de W_a de $50,1 \pm 12,2 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (Figure IX - 8).

Les valeurs de W_a des HAC sont nettement supérieures à celles observées pour les grèzes. W_a vaut $227,6 \pm 32,5 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ pour le profil 1, $212,9 \pm 49,6 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ pour le profil 2 et $199,8 \pm 45,3 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ pour le profil 3 (Figure IX - 8).

L'ensemble de ces résultats montre d'abord clairement que les transferts hydriques verticaux *per descensum* étudiés en laboratoire sont nettement plus importants dans les HAC qu'au sein des grèzes.

De ces analyses ressort également qu'il existe une certaine homogénéité des échantillons de craie d'une part, et des grèzes d'autre part, vis-à-vis de ce type de transferts hydriques. Une certaine homogénéité est également observable entre les HAC des profils 1 et 2. L'HAC du profil 3 se distingue de ceux des profils 1 et 2 par une infiltration d'eau légèrement plus faible.

IV. RÉSULTATS DES TESTS À L'INFILTROMÈTRE À DISQUE

Les valeurs de sorptivités capillaires S obtenues sur les grèzes du profil 1 sont assez proches de celles mesurées sur les grèzes du profil 2 (respectivement $8,2 \pm 2,2$ et $9,8 \pm 1,0.10^{-4} \text{ m.s}^{-1/2}$) (Figure IX - 8).

Les valeurs de sorptivités capillaires S calculées pour les HAC des profils 1 et 2 sont en moyenne 1,4 fois inférieures à celles mesurées pour les grèzes (respectivement $5,8 \pm 1,3$ et $5,4 \pm 3,3.10^{-4} \text{ m.s}^{-1/2}$) (Figure IX - 8). L'écart-type sur la valeur moyenne de sorptivité capillaire mesurée sur l'HAC du profil 2 est tout de même plus important que celui calculé sur le même type d'horizon du profil 1 ($3,3$ contre $1,3.10^{-4} \text{ m.s}^{-1/2}$).

Les valeurs de sorptivité capillaires S sont également assez homogènes entre les RENDOSOLS des profils 1 et 2 puisque elles valent respectivement $2,2 \pm 0,6$ et $1,4 \pm 0,6.10^{-4} \text{ m.s}^{-1/2}$ (Figure IX - 8).

L'ensemble de ces résultats témoignent donc que les transferts hydriques *per descensum* gouvernés par les forces capillaires sur le terrain sont plus faibles dans les HAC que dans les grèzes. Cependant, le faible nombre d'essais (2 pour HAC et 3 pour grèzes) tend à démontrer la faible fiabilité de ces résultats.

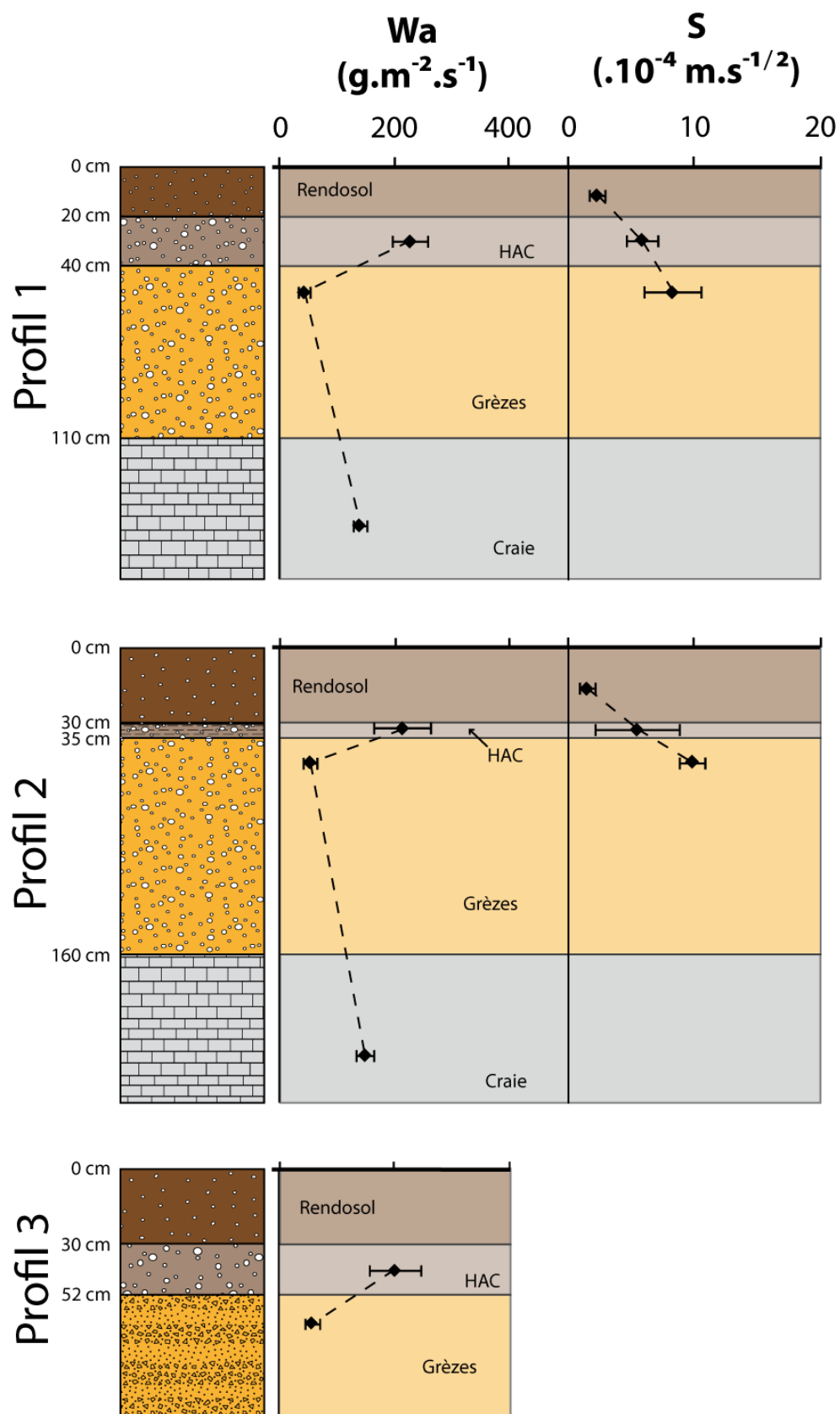


Figure IX - 8 : Courbes représentant les absorptions d'eau moyennes (pipette de Karsten) ainsi que les sorptivités capillaires (infiltrométrie à disque) en fonction de la profondeur le long des profils étudiés sur le site du Mont du Ménil.

DISCUSSION PARTIELLE

Bien qu'aucune étude n'ait jamais été réalisée dans le but de quantifier les transferts hydriques au sein des HAC de Champagne, la littérature admet généralement que ces structures forment un obstacle aux transferts hydriques par infiltration [Bruand, 1983 ; Ballif *et al.*, 1995 ; Loisy, 1997].

I. TRANSFERTS HYDRIQUES EN INFILTRATION

Les tests en laboratoire effectués dans le cadre de ce travail montrent que les HAC de Champagne ne forment pas un obstacle à l'infiltration de l'eau. Au contraire, l'infiltration de l'eau est de 4 à 5,5 fois supérieure dans les HAC que dans les grèzes et 1,5 fois supérieure dans les HAC que dans la craie.

L'infiltration plus rapide au sein des HAC comparé aux grèzes s'explique par le passage de l'eau qui est favorisé par leur porosité totale importante majoritairement constituée de canaux plus large et dans laquelle les étranglements par accollement des macro-cryoclastes et des agrégats de micro-cryoclastes/matrice détritique sont nettement moins importants.

II. TRANSFERTS HYDRIQUES PAR REMONTÉES CAPILLAIRES

En plus d'étudier l'impact des HAC sur l'infiltration de l'eau, les travaux présentés ici se sont également attachés à l'impact des HAC sur les remontées capillaires.

Les tests effectués en laboratoire montrent également que comparés aux autres horizons présents au sein des profils de sol, les HAC favorisent les remontées capillaires. Les vitesses de transferts hydriques liés aux forces capillaires sont en effet 1,3 à 1,9 fois supérieurs dans les HAC que dans les grèzes et 1,2 fois supérieurs dans les HAC comparé au substrat crayeux.

De part leur importante structure microporeuse (porosimétrie mercure), les grandes aires ouvertes présentes au sein des HAC favorisent les transferts hydriques par capillarité au détriment de la porosité de canaux. Celle-ci peut facilement s'en trouver court-circuitée (par phénomènes de by-pass). A l'arrivée de la frange capillaire au sommet de l'HAC, une partie plus ou moins importante de la porosité de canaux et des

macropores isolés dans les aires ouvertes ne sont pas remplis et la porosité capillaire est relativement faible (proche de 43,5 à 56,8 %) ce qui indique une porosité piégée importante (Figures X - 1 et X - 2).

Dans les grèzes, les aires ouvertes aux dimensions plus limitées présentent une structure nettement moins microporeuse (porosimétrie mercure) et se comportent comme de la macroporosité ce qui défavorise les transferts hydriques par capillarité et explique les transferts plus lents dans les grèzes que dans la craie ou les HAC. Cependant l'organisation plus aléatoire des aires ouvertes et de la porosité de canaux des grèzes par rapport aux HAC ($C_d < 5$) expliquent la porosité piégée moins importante que dans les HAC (porosité capillaire comprise entre 73,5 et 78,1 %).

III. CINÉTIQUES DE SÉCHAGE

Les valeurs de flux d'évaporation lors de la première phase de séchage (Phase I) où le séchage s'effectue en surface par alimentation de la surface par transfert capillaire, ne sont pas directement liés aux paramètres propres de l'échantillon mais dépendent des paramètres externes (humidité relative, température, agitation de l'air) [Rousset-Tournier, 2001]. Ces trois paramètres étant homogènes pour tous les échantillons testés, les différences de flux d'évaporation observées correspondent à des variations de la surface évaporante effective qui est quant à elle bien en lien avec la constitution de l'échantillon.

Au sein des différents horizons, les zones les plus susceptibles d'augmenter la surface évaporante lors des cinétiques d'imbibitions capillaires sont celles qui présentent les amas les plus importants d'aiguilles de calcite enchevêtrées : les aires ouvertes. Le flux d'évaporation est donc plus important dans les HAC qui en présentent d'importantes quantités. Il faut cependant bien garder à l'esprit que les tests d'évaporation sont réalisés en laissant la surface supérieure des échantillons libre. Si ce protocole est complètement justifié pour l'étude des pierres de construction ayant effectivement au moins une de leurs surfaces libre, ce n'est pas le cas des HAC et des grèzes au sein des profil de sol. L'évaporation de l'eau par leurs surfaces supérieures sera en effet conditionnée par le niveau qui les surmonte (grèzes pour le substrat crayeux, HAC pour les grèzes et RENDOSOL pour les HAC).

A partir du temps critique, l'alimentation capillaire de la surface des échantillons devient insuffisante pour maintenir la surface humide et les ménisques superficiels régressent vers l'intérieur de l'échantillon (Phase II) (Figures X - 1 et X - 2).

Dans les HAC, les aires microporeuses aux forces capillaires plus grandes vont provoquer des ruptures capillaires au niveau de la porosité de canaux leur donnant accès. Une forte teneur en eau liquide tend donc à rester piégée dans les HAC et à

s'évaporer en profondeur (22 à 30 %). Cette eau piégée finit par diffuser à travers le réseau poreux jusqu'à la surface (Figures X - 1 et X - 2).

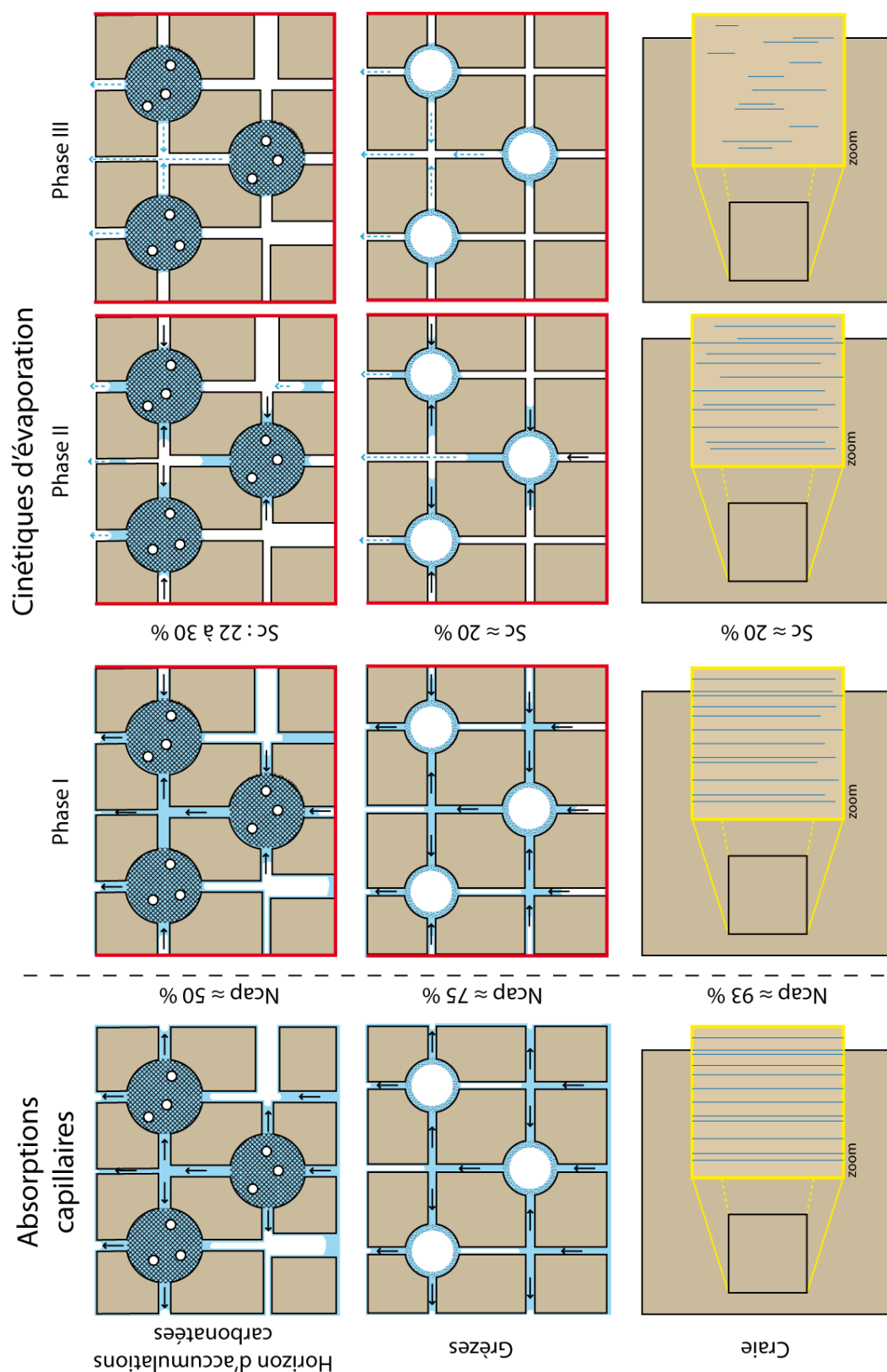


Figure X - 1 : Schématisation des transferts hydriques par capillarité et lors des évaporation au sein des HAC, des grèzes et de la craie (légende page suivante).

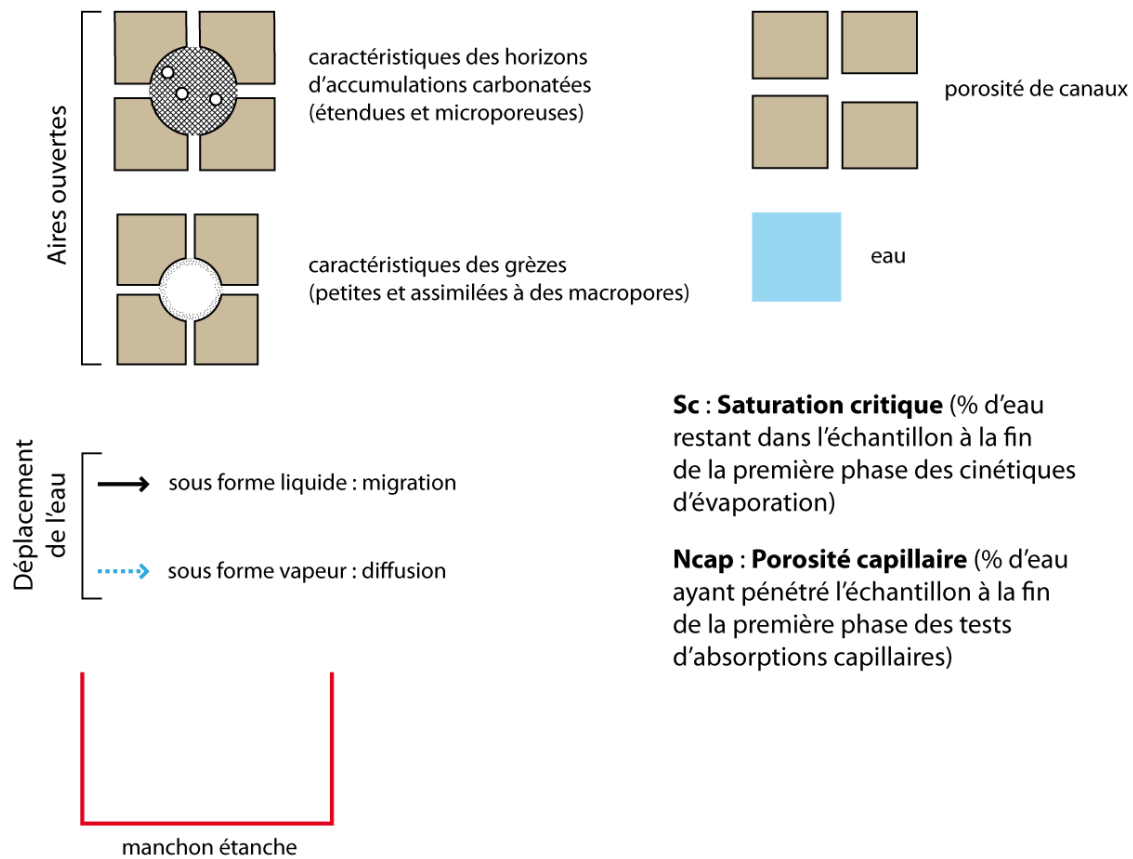


Figure X - 2 : Légende de la figure de la page précédente concernant la schématisation des transferts hydriques par capillarité et lors des évaporation au sein des HAC, des grèzes et de la craie.

IV. CONCLUSION

L'étude des transferts hydriques réalisée dans ce travail montre donc qu'étudiés séparément, les HAC favorisent les transferts hydriques que ce soit en infiltration comme en capillarité et en séchage. L'étude des transferts hydriques à plus grande échelle permettra de mieux comprendre le rôle des HAC dans les transferts hydriques au sein des profils de sol en regard des conditions environnementales actuelles.

DISCUSSION GÉNÉRALE

DISCUSSION GÉNÉRALE

Le travail présenté ici a été consacré à l'étude des caractéristiques micromorphologiques, physico-chimiques et aux propriétés de transfert des horizons d'accumulations carbonatées (HAC) dans les sols de Champagne. Il fait suite à une succession de recherches conduites de façon spécifiques sur ces HAC [Loisy, 1997 ; Durand, 1979] mais également à des études pédologiques plus générales des sols auxquels les HAC sont associés [*e.g.* Ballif *et al.*, 1995 ; Ballif, 1994 ; Dutil et Ballif, 1968 ; Bruand, 1983...].

Les HAC de Champagne se présentent comme des niveaux plus ou moins épais et sont issus de processus physico-chimiques et biologiques [Loisy, 1997]. Ces structures sont présentes de manière non systématique dans les profils pédologiques (notamment en contexte de pente) et occupent une position charnière entre l'horizon organo-minéral du sol et les niveaux sous-jacents (formations superficielles et substrats géologiques) [Durand, 1979 ; Bruand, 1983 et 1984].

Au delà des avancées significatives obtenues par les études antérieures dans la compréhension de la genèse de ces horizons particuliers, il reste encore beaucoup d'interrogations concernant les HAC et particulièrement sur leur localisation dans le contexte régional, leur caractérisation en regard des autres horizons des profils de sol et leur comportement hydrique.

Cette partie sera consacrée à la discussion générale des résultats majeurs obtenus à travers un travail de synthèse bibliographique et des travaux expérimentaux en laboratoire sur deux profils typiques représentatifs des HAC et un profil aux caractéristiques plus locales.

I. SCHÉMATISATION DU CYCLE HYDROLOGIQUE ACTUEL

Dans la littérature, les HAC de Champagne sont généralement considérés comme des niveaux faisant obstacle aux transferts hydriques que ce soit en période de drainage ou en période plus évaporatoire. L'étude séparée des différents horizons des profils de sol réalisée dans ce travail a montré que les HAC possèdent un comportement singulier vis-à-vis des transferts hydriques. Comparés aux grèzes et au substrat crayeux,

les HAC présentent en effet de meilleures propriétés de transferts de l'eau que ce soit en infiltration comme en capillarité. Ces variations verticales des cinétiques hydriques induisent la présence de discontinuités hydrauliques le long des profils de sol de Champagne.

Cette première partie présente une discussion sur les transferts hydriques dans un contexte global à l'échelle du profil de sol afin de mieux comprendre le rôle des différents horizons en présence et notamment celui des HAC de Champagne-Ardenne. Cette partie de la discussion s'établit d'abord sur un évènement pluvieux isolé pour ensuite s'élargir à une échelle annuelle.

1. SATURATION DU PROFIL DE SOL À L'ÉCHELLE D'UN ÉVÈNEMENT PLUVIEUX

Lors d'un évènement pluvieux, l'eau issue des pluies efficaces pénètre l'horizon organo-minéral pour arriver à l'interface RENDOSOL/HAC. L'HAC présentant d'excellentes propriétés de transfert, l'eau peut pénétrer aisément dans ce nouveau compartiment et l'infiltration se poursuit jusqu'à ce que l'eau rencontre une discontinuité hydrique au niveau de l'interface HAC/grèzes (Figure discussion - 1). Les propriétés de transferts hydriques des grèzes étant nettement moindres, l'infiltration de l'eau dans ce nouveau milieu ne peut pas compenser les apports provenant de la surface ; l'HAC se sature donc en eau et l'atmosphère du sol est progressivement chassée [Ballif, 1998].

Dans le cas d'un évènement pluvieux particulièrement intense, la saturation de l'HAC pourra être suivie de la saturation du RENDOSOL ce qui induira des phénomènes de ruissellement au niveau de la surface topographique [Ballif, 1999]. Il faut noter que ce ruissellement peut avoir lieu dès l'arrivée des pluies à la surface du RENDOSOL si celle-ci présente une croûte de battance [Bardet et Rouxel-David., 2002] (Figure discussion - 1).

Dans le contexte topographique des profils de localisation préférentielle des HAC (contexte de pente), la présence des grèzes à faibles perméabilités induirait la formation d'une nappe perchée temporaire dans l'HAC et des écoulements de subsurface (ruissellements hypodermiques) dans ces niveaux (Figure discussion - 1). Il existerait donc bien une latéralisation des transferts hydriques comme celle proposée par Durand [1979] mais contrairement à ses hypothèses, cette latéralisation aurait lieu dans l'HAC (à l'interface HAC/grèzes) et non pas au sein du RENDOSOL (à l'interface RENDOSOL/HAC) (Figure discussion - 1). Ce lessivage latéral peut expliquer la lixiviation importante de la quasi-totalité des terres rares des HAC mise en lumière par l'analyse géochimique (lixiviation hypodermique suggérée par Durand [1979]). La fraction de cette eau exportée par écoulement de subsurface n'a pas été estimée dans ce travail.

La fraction d'eau infiltrée au sein des grèzes percole (gravité et effet piston [Smith *et al.*, 1970]) jusqu'à l'interface grèzes/craie. La craie présentant de meilleures

propriétés de transfert que les grèzes, les eaux arrivant à cette interface peuvent s'écouler facilement dans la zone vadose de la craie et participer à la recharge de la nappe de la craie [Chiesi, 1993] (Figure discussion - 1).

Lors des phases de saturation des profils de sol, il apparaît donc assez clairement que l'impact des HAC sur les transferts hydriques est relativement mineur comparé à celui des grèzes. En effet, les écoulements de subsurface s'effectuant à l'interface HAC/grèzes seront également effectifs dans les profils ne présentant pas d'HAC. Cette latéralisation s'effectuera alors à l'interface RENDOSOL/grèzes. Il faut tout de même nuancer ces propos puisqu'une latéralisation au sein du RENDOSOL meuble aura plus tendance à le dégrader que si ces transferts hydriques de subsurface s'effectuent dans l'HAC plus résistant. La présence d'un HAC dans un profil de sol permettrait donc d'amoindrir l'érosion de l'horizon organo-minéral et de ralentir l'apparition du ruissellement de surface en créant une réserve d'eau supplémentaire.

A la fin de l'épisode pluvieux, les transferts hydriques (écoulements de subsurface dans l'HAC et percolation dans les grèzes et la craie) se poursuivent pendant quelques temps (durée non-estimée dans ce travail). Il s'agit de la phase de redistribution [Feodoroff, 1965]. Ces phénomènes de pertes en eau non compensées par les précipitations ajoutés au séchage de la partie supérieure du RENDOSOL induisent un nouveau remplissage de la porosité la plus large par de l'air [Ballif, 1998]. Le profil de sol arrive donc au point de ressuyage [Mathieu et Lozet, 2011] qui correspond à la quantité maximale d'eau que le sol puisse stocker [Feodoroff, 1962 ; Betremieux, 1975]. Les transferts hydriques par infiltration vont alors laisser une place prépondérante aux transferts hydriques régis par l'évaporation (et les prélèvements par la végétation) et les forces capillaires.

2. DÉSATURATION DU PROFIL DE SOL À L'ÉCHELLE D'UN ÉVÈNEMENT PLUVIEUX

La phase de séchage du RENDOSOL jusqu'à la capacité au champ s'effectue par évaporation et par l'utilisation de l'eau du sol par la végétation [Duchaufour, 2001]. Ce dessèchement progressif induit une augmentation des remontées capillaires provenant de la nappe perchée localisée au sein de l'HAC qui voit donc sa saturation en eau diminuer (Figure discussion - 2).

La présente étude a montré que les transferts capillaires s'effectuant dans les grèzes étaient moins efficaces que dans l'HAC. Les fortes pertes en eau de l'HAC ne pourront donc pas être compensées complètement par les faibles apports d'eau provenant des grèzes sous-jacentes par capillarité (Figure discussion - 2). Ce phénomène induit alors une rupture de la continuité hydraulique dans le profil de sol (rupture capillaire) au niveau de la base de l'HAC ce qui se traduit par une remontée des ménisques inférieurs au sein de ce niveau (Figure discussion - 2).

Lorsque la fréquence des événements pluvieux est faible, les deux horizons supérieurs (RENDOSOL et HAC) poursuivent leur séchage. La rupture de la continuité hydraulique entre les grèzes et l'HAC conditionne un séchage des grèzes uniquement réalisé par phénomènes évaporatoires (d'abord au niveau de leur limite supérieure puis à l'intérieur même de leur réseau poreux) (Figure discussion - 2). Il faut noter que l'eau évaporée au sein des grèzes pourra potentiellement en partie se condenser dans les horizons supérieurs (ici, HAC et RENDOSOL) [Bardet et Rouxel-David., 2002].

Dans les contextes où l'HAC est absent, la rupture capillaire aura lieu entre les grèzes et le RENDOSOL et le séchage des grèzes sera également réalisé par phénomènes évaporatoires. Cependant, la présence de l'HAC, qui de plus possède une plus forte porosité totale, induirait une réserve d'eau plus importante pour la partie supérieure du profil de sol (et donc pour la végétation). Ce propos doit être cependant nuancé. En effet, la proportion nettement plus importante de microporosité des HAC comparée à celle des grèzes mise en lumière par cette étude induira une forte tension capillaire dans ces niveaux particuliers [e.g. Durand, 1979 ; Duchaufour, 2001]. Cette succion capillaire plus forte dans les HAC serait responsable d'un piégeage d'eau plus important que dans les grèzes [e.g. Durand, 1979 ; Ballif, 1998]. Mais, contrairement aux périodes de saturation du profil de sol, l'HAC semblerait donc jouer un rôle plus important lors des périodes de désaturation.

Les calculs basés sur la loi de Jurin par l'étude du milieu poreux indiquent que l'ascension capillaire théorique de l'eau dans le substrat crayeux peut atteindre 40 mètres au dessus de la zone saturée [Chiesi, 1993]. En Champagne, bien que présentant des oscillations saisonnières, la profondeur du toit de la zone saturée de la craie est cependant toujours inférieure à cette valeur [e.g. Vachier *et al.*, 1979 ; Bardet et Rouxel-David., 2002]. De plus, un grand nombre d'études basées sur des bilans hydrologiques témoignent que les remontées capillaires provenant de la craie participent au renouvellement des eaux des profils de sol [e.g. Ballif, 1978, 1980 et 1981 ; Ballif *et al.*, 1990 ; Duermael et Morfaux, 1978]. De ces études ressort que les forces capillaires de la craie permettent d'alimenter partiellement en eau les horizons sus-jacents des profils de sols de Champagne (Figure discussion - 2). Dans ses études, Ballif [1980 et 1981] indique que si ces remontées capillaires semblent bien alimenter les profils de sol sur graveluches, elles seraient interrompues par le passage dans des poches de cryoturbation. La morphologie même des poches de cryoturbation et des graveluches permet de proposer une hypothèse expliquant ces comportements différents. En effet, si les graveluches sont composées de macro-cryoclastes emballés dans une matrice silto-argileuse calcaire directement déposés sur le substrat crayeux, le remplissage des poches de cryoturbation s'effectue dans des festons composés de fragments décimétriques de craie dont les points de contacts sont relativement peu nombreux et laissent apparaître une porosité centimétrique importante (notamment au niveau des fonds de poches) [Laurain, 2001]. De plus, la partie sous-jacente à ces fonds

de poches est également constituée sur une trentaine de centimètres de blocs décimétriques dont la disposition induit une forte porosité centimétrique [Laurain, 2001]. Ces niveaux à large porosité sont donc susceptibles de provoquer une rupture capillaire, l'eau ne pouvant progresser vers le haut que par les contacts directs entre les blocs de craie. Les déficits hydriques des horizons supérieurs des sols lors des périodes à pluviométrie restreinte pourront donc au moins partiellement être amoindris par les apports capillaires provenant du substrat crayeux. Ce phénomène sera plus important dans les profils sur graveluches que sur ceux établis sur poches de cryoturbation.

3. SAISONNALITÉ DES TRANSFERTS HYDRIQUES

Le climat de Champagne-Ardenne est le résultat de la combinaison d'une influence continentale venant de l'Est contrebalancée par le passage de perturbations océaniques provenant de l'ouest qui apportent la plupart des pluies. Chiesi [1993] étudie le différentiel entre l'évapotranspiration (calculée à l'aide de la température moyenne mensuelle, la radiation globale et l'humidité relative de l'air) et les précipitations en Champagne. Au cours d'une année hydrologique, deux phases se distinguent :

- de **septembre à avril**, les précipitations sont supérieures à l'évapotranspiration (Figure discussion - 1). Il s'agit donc d'une période d'excédent d'eau. Durant cette période, la désaturation des profils de sol sera relativement faible. La nappe perchée localisée au sein de l'HAC aura donc tendance à être relativement pérenne puisque le RENDOSOL ne sera que très rarement en contexte évaporatoire et les écoulements de subsurface (écoulements de hypodermiques) seront importants (Figure discussion - 1). Le profil de sol est donc en phase de réhumectation (saturation) et une partie des excédents d'eau pourra participer à la recharge de la nappe de la craie par drainage (Figure discussion - 1) ;
- de **mai à août**, bien que les précipitations soient presque équivalentes à celles de la période précédente, l'insolation, les températures et la production végétale plus élevées induisent une évaporation et une évapotranspiration plus importantes et les quantités d'eau extraites du profil de sol sont supérieures à celles apportées par les précipitations (Figure discussion - 2). Cette période de déficit hydrique induit donc l'entrée des profils de sol dans un stade de dessèchement (désaturation) [Ballif et Dutil, 1983]. La nappe perchée de l'HAC pourra alimenter le RENDOSOL en eau et les écoulements de subsurface (écoulements de hypodermiques) auront tendance à s'arrêter. Les eaux capillaires provenant de la craie pourront dans une certaine mesure et dans certains cas alimenter les profils de sol par le bas (Figure discussion - 2).

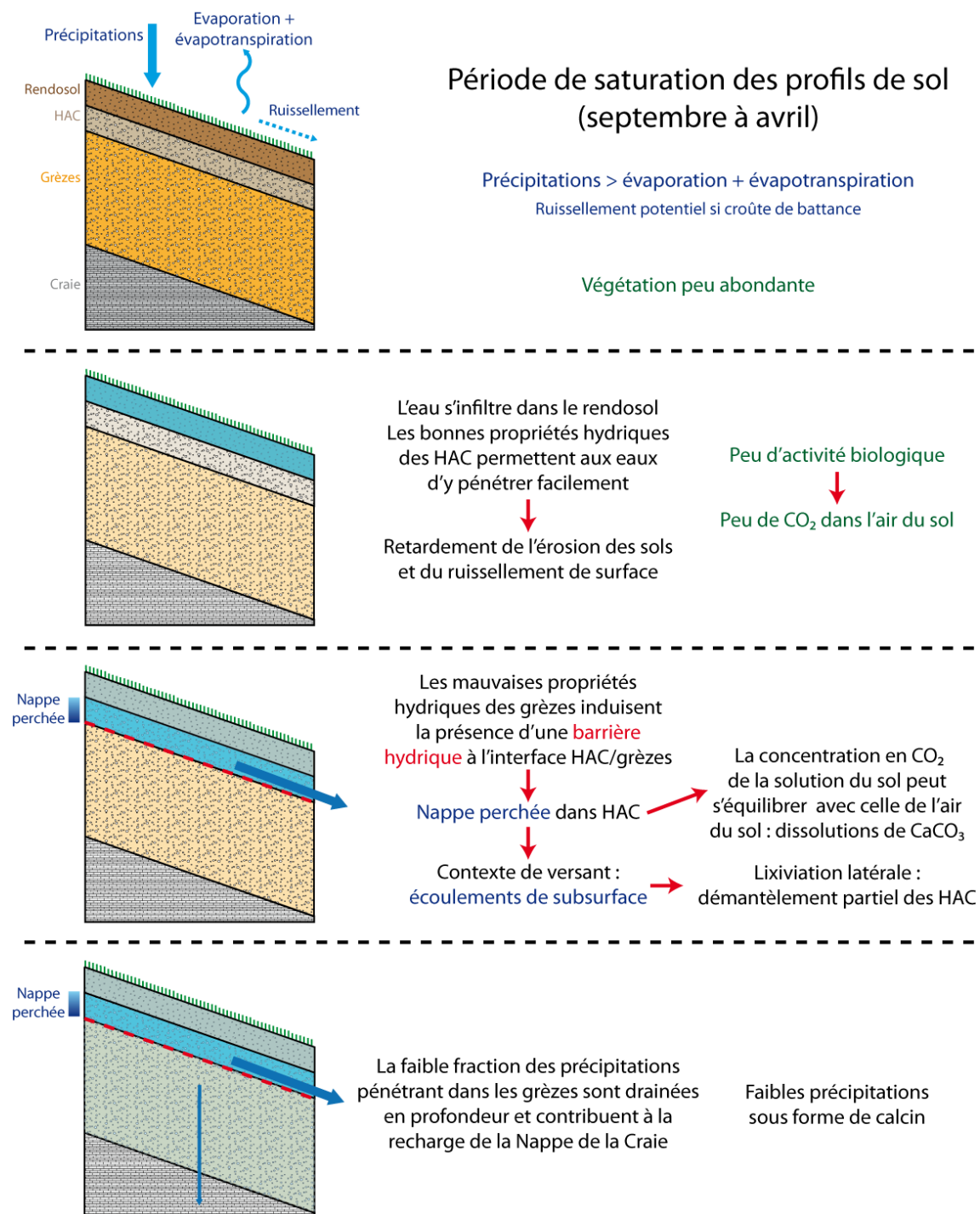


Figure discussion - 1 : Schéma général du fonctionnement hydrologique des profils de sol avec horizon d'accumulations carbonatées en périodes de saturation (septembre à avril).

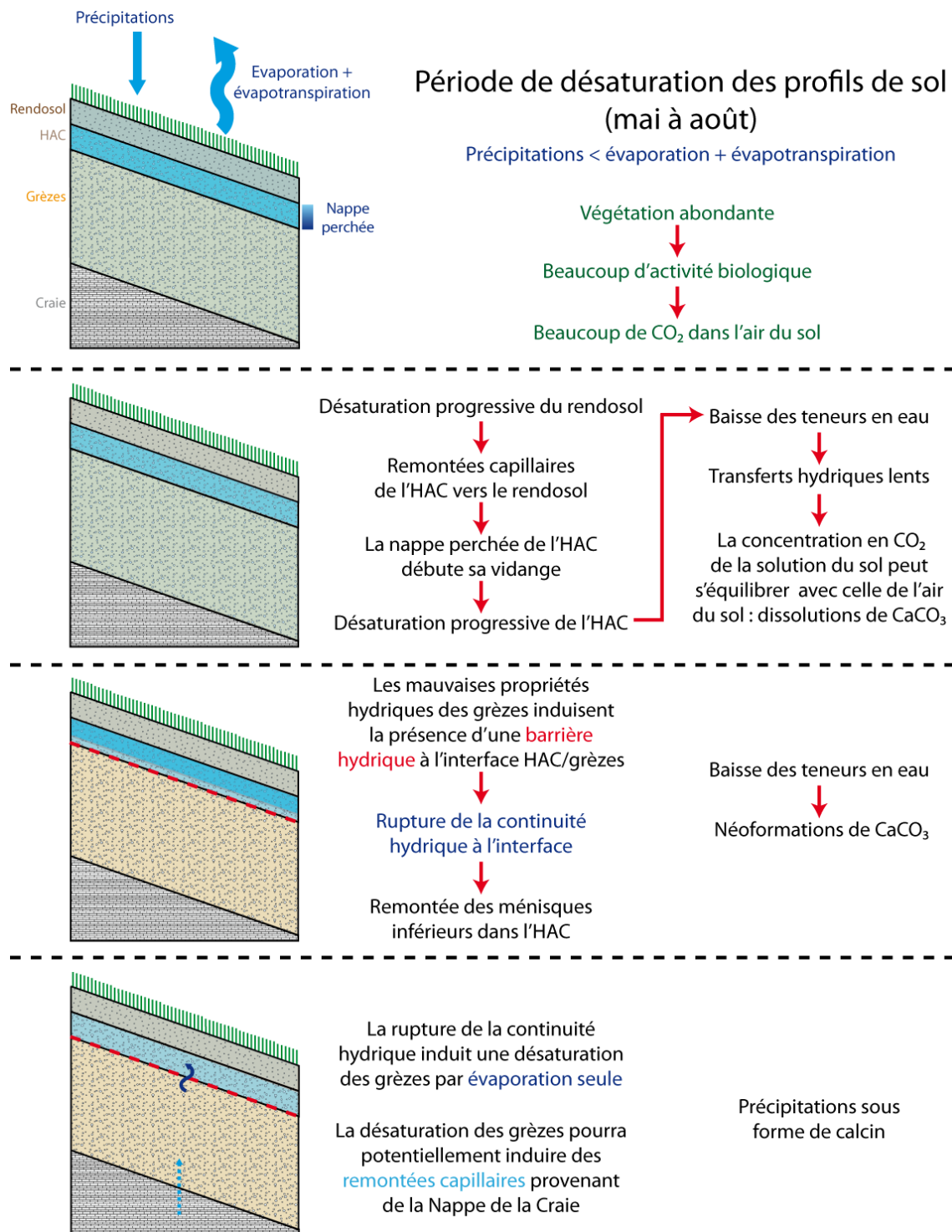


Figure discussion - 2 : Schéma général du fonctionnement hydrologique des profils de sol avec horizon d'accumulations carbonatées en périodes de désaturation (mai à août).

4. CONCLUSION

Les conditions environnementales de la Champagne sont responsables d'une saisonnalité des transferts hydriques dans les profils de sol présentant un HAC. De septembre à avril, les profils de sol sont dans des conditions de saturation tandis qu'ils entrent en contexte de désaturation durant les mois plus chauds de mai à août.

Lors des phases de saturation des profils de sol, il apparaît que l'importance d'un HAC est assez minime sur les transferts hydriques puisque l'horizon limitant l'infiltration des eaux et provoquant des écoulements de subsurface sont les grèzes. Les HAC peuvent cependant offrir aux RENDOSOLS une protection potentielle contre l'érosion en drainant les eaux par écoulement de subsurface. En périodes de désaturation, le facteur limitant est également représenté par les grèzes qui de part les moins bonnes propriétés de transfert hydrique qu'elles présentent seront responsables d'une rupture de la continuité hydrique dans les profils de sol. Cependant, la présence d'un HAC faisant office de réserve hydrique permettra de ralentir le dessèchement de l'horizon organo-minéral.

II. DONNÉES NOUVELLES SUR LA GENÈSE ET L'ÉVOLUTION DES HAC

L'étude du fonctionnement hydrique des profils de sol réalisée dans la section précédente est maintenant couplée aux cycles de mobilisation des carbonates pédologiques afin d'une part d'apprécier l'évolution actuelle des HAC et, d'autre part, de préciser certains processus anciens.

1. PROCESSUS ACTUELS

La dissolution et la précipitation de la calcite repose sur la réaction générale « $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ » et est donc en lien direct avec les concentrations en CO_2 dans les solutions et dans l'air [Roques, 1964]. Pour une température donnée, l'augmentation de la pression partielle de CO_2 de l'air du sol provoque la dissolution de ce gaz en phase aqueuse ce qui induit la dissolution de calcite ; sa diminution provoque au contraire un dégazage de la solution du sol et la précipitation de calcite. Pour une pression partielle de CO_2 donnée, l'augmentation de la température induit la précipitation de calcite alors que la calcite se dissout si la température diminue [Ballif, 1998].

Au sein des sols, la dissolution des carbonates est due à la pression partielle de CO_2 de l'atmosphère du sol venant de l'activité biologique (décomposition de la matière organique du sol, respiration des racines, de la faune et de la flore du sol) [Durand et Bellon, 1993 ; Duchaufour, 2001]. Les eaux provenant des pluies peuvent alors potentiellement s'enrichir en CO_2 ce qui permet d'apprécier leur pouvoir agressif sur les

carbonates [Durand, 1979]. Les précipitations de carbonates peuvent quant à elles être issues de trois processus [Loisy, 1997] :

- des mouvements de la solution du sol dans un milieu possédant une pression partielle de CO_2 plus faible ce qui induit un dégazage de la solution ;
- une évaporation de la solution du sol ;
- la dissolution incongruente d'une phase solide proche (les deux phases possédant des solubilités différentes). La calcite magnésienne peut par exemple être transformée petit-à-petit en calcite pure [Cojan et Renard, 2003] comme lors de l'altération des cryoclastes de craie [Richard, 1996].

Si la mise en solution du CO_2 depuis l'air du sol est relativement rapide, la réaction inverse de dégazage de CO_2 depuis la solution du sol vers l'air du sol est plus lente [Roques, 1964]. L'équilibre CO_2 dissout- CO_2 gazeux s'établit donc après un temps de contact suffisant entre la solution et l'air du sol [Durand, 1979]. L'ensemble de ces phénomènes de dissolution et de précipitation de calcaire dans les sols sont donc intimement liés à la cinétique des transferts hydriques dans les différents horizons [Durand, 1979] :

- la fraction des eaux de pluie qui transite rapidement dans le profil n'a pas le temps de s'équilibrer avec l'atmosphère du sol et reste relativement sous-saturée en CO_2 ;
- la fraction des eaux de pluie constituant l'eau utile séjourne plus longtemps dans le milieu et peut atteindre l'équilibre avec le CO_2 de l'air du sol ;
- la fraction des eaux de pluie stockée temporairement dans la porosité la plus fine atteint également l'équilibre en CO_2 avec l'air du sol ;
- par des phénomènes non-décrits ici [Durand, 1979], les eaux de fontes de neige sont naturellement sursaturées en CO_2 par rapport à l'air du sol.

Les différents paramètres régissant ces temps de séjour des eaux sont donc liés aux transferts hydriques. De plus, les concentrations en CO_2 sont quant à elles liées à l'activité biologique du sol. Les phénomènes de précipitation/dissolution des carbonates sont donc intimement reliés aux variations environnementales saisonnières. L'explication sommaire de ces variations générales dans les profils de sol de Champagne sans HAC est extraite des travaux de Durand [1979] et de Ballif [1998] :

- en **périodes automnales et hivernales**, la forte diminution de l'activité biologique induit une baisse de la production de CO_2 (Figure discussion - 1). Durant ces périodes, les sols sont humides et la percolation rapide. Les eaux ont moins le temps de se charger en CO_2 ce qui induit une agressivité moindre vis-à-vis des carbonates ; les dissolutions de carbonates sont donc faibles. Ces eaux peu chargées en CO_2 et en calcaire dissout sont entraînées plus en profondeur. Les températures étant plus faibles et la végétation

moins active et moins importante, l'évaporation et l'évapotranspiration sont plus faibles. **Ces périodes sont donc peu favorables aux productions de calcite** (Figure discussion - 1);

- en **périodes printanières et estivales**, la forte activité biologique induit une importante production de CO₂ qui résulte de la respiration des racines et des micro-organismes [Durand et Bellon, 1993] (Figure discussion - 2). Ce CO₂ se trouve sous forme gazeuse dans l'atmosphère du sol et va pouvoir passer en solution dans les eaux de pluie qui traversent le RENDOSOL. La saturation des eaux en CO₂ dépend donc de la vitesse des transferts hydriques. Plus l'eau circule vite, moins elle aura le temps de se charger en CO₂. Ceci détermine l'agressivité des eaux vis-à-vis des carbonates [Durand, 1979]. Les eaux qui transitent rapidement (porosité la plus large) ne contribuent que peu à la dissolution des carbonates. Les eaux qui diffusent vers la porosité la plus fine auront quant à elles le temps de se charger en CO₂ et pourront provoquer des dissolutions de carbonates. Les températures plus élevées qui caractérisent ces périodes ainsi que la végétation importante provoquent un dessèchement des profils de sol par évaporation et évapotranspiration. La solution du sol est rapidement saturée en carbonates dissouts ce qui **favorise les précipitations de carbonates** (Figure discussion - 2).

En résumé, sous le climat champenois actuel, les périodes chaudes sont caractérisées par de fortes dissolutions de carbonates (notamment dans la porosité la plus fine) qui pourront précipiter grâce au séchage important du profil de sol. Les périodes plus froides seront caractérisées par des dissolutions et des précipitations de carbonates moins intenses. Ces mécanismes de dissolution/précipitation des carbonates dans les sols de Champagne vont à présent être croisés avec les nouvelles données issues de l'analyse des transferts hydriques réalisée dans la section précédente :

- durant les **périodes de saturation** des profils de sol (septembre à avril), la barrière hydrique formée par l'interface HAC/grèzes ralentit considérablement la percolation de l'eau en profondeur ce qui provoque l'apparition d'une nappe perchée relativement pérenne (Figure discussion - 1). La formation de cette nappe perchée permet aux eaux de demeurer plus longtemps dans le milieu ce qui leur laisse le temps de s'équilibrer avec le CO₂ du sol (même si sa teneur reste plus faible qu'en période plus chaude). Ces eaux plus agressives pourront alors être responsables de dissolution de carbonates relativement fortes comparées à d'autres sols au sein desquels la percolation est plus rapide. Dans les profils caractéristiques en contexte de versant, les eaux enrichies en carbonates dissouts et autres éléments chimiques sont partiellement exportées vers l'aval par écoulement de subsurface dans l'HAC (Figure discussion - 1). Les HAC semblent donc dans

des phases de démantèlement en saisons humides. La faible fraction des eaux chargées en carbonates dissouts qui s'infiltre tout de même dans les grèzes va permettre l'établissement de néoformations de calcite sous forme de calcin [Durand, 1979] ;

- lors des **périodes de désaturation** des profils de sol (mai à août), les baisses de teneurs en eau provoquent une surconcentration en carbonates qui vont alors pouvoir précipiter (de manière physico-chimique ou par le biais de micro-organismes). Les pluies estivales ne provoquent qu'une faible réhumectation des profils [Durand, 1979]. Cependant, ces eaux qui transitent moins rapidement (et notamment dans la porosité la plus fine) ont le temps de se saturer en CO_2 dont les concentrations sont plus importantes dans l'air du sol à cause des activités biologiques (Figure discussion - 2). Pendant ces cycles courts d'humectation des sols par des épisodes pluvieux ponctuels d'été puis de séchage, les néoformations de calcite vont pouvoir s'établir et notamment dans la porosité la plus fine (au sein des aires ouvertes microporeuses) grâce aux cinétiques hydriques plus lentes. Les HAC semblent donc dans des phases de renforcement en saisons humides.

Bien que l'étude pénétrométrique réalisée dans ce travail n'ait pas permis de déterminer des caractéristiques singulières aux HAC, elle révèle des baisses de résistance au niveau de leur base et notamment pour les HAC aux épaisseurs les plus importantes. Si les HAC tendent à se renforcer en saisons sèches et à se dégrader en saison humide, cet affaiblissement de la base des HAC témoigne d'une tendance générale au démantèlement des HAC.

2. PROCESSUS ANCIENS

a. LES GRÈZES COMME FORMATION D'ACCUEIL

L'étude porosimétrique au mercure réalisée dans cette étude a montré que les modes observés dans les grèzes se retrouvent dans les HAC (bien que leurs spectres soient plus complexes). Dans ses interprétations, Loisy [1997] émet l'hypothèse que les HAC sont des niveaux installés au cours du temps dans la partie supérieure des grèzes qu'elle qualifie alors de « formation d'accueil ». La signature porosimétrique mise en lumière dans la présente étude tend donc à confirmer cette hypothèse ; les HAC sont donc bien des niveaux qui se sont installés dans la partie supérieure des grèzes. Cette zone a ensuite subi une succession de modifications qui ont contribué à la différenciation des HAC.

b. POROGENÈSE ET PORONÉCROSE ANCIENNES

La confirmation de cette hypothèse met alors en lumière un phénomène qui semble incohérent. Le comblement partiel de la porosité de la partie supérieure des grèzes au sein de laquelle s'établissent les HAC par des néoformations carbonatées

devrait induire des porosités totales plus faibles dans ces niveaux. Cependant, l'analyse porosimétrique réalisée dans ce travail a montré que les HAC présentent des porosités totales bien supérieures à celles de leurs grèzes d'accueil.

Afin d'expliquer ces observations à première vue paradoxales, deux hypothèses peuvent être avancées : une porogenèse précoce anté-formation de l'HAC et une porogenèse associée à une poronécrose lors de la mise en place de l'HAC.

La première hypothèse se base sur une altération préalable de la partie supérieure des grèzes d'accueil avant l'établissement des HAC qui aurait comme conséquence une porogenèse précoce.

La formation des grèzes (poches de cryoturbation et graveluches) s'est déroulée au Quaternaire ancien (jusqu'à 14000 ans BP) sous conditions périglaciaires [Dutil et Ballif, 1968 ; Laurain *et al.*, 1997]. Ces dépôts ont ensuite subi une phase de forte érosion jusqu'à l'entrée dans l'Interglaciaire holocène [Jamagne, 2011 ; Loisy, 1997]. Il est donc possible d'émettre l'hypothèse que cette période a été le témoin d'une altération de la partie supérieure des grèzes ayant provoqué une porogenèse. Les néoformations de calcite caractérisant l'installation postérieure de l'HAC (poronécrose) n'auraient alors pas compensé ces pores formés au préalable.

La porosité totale des HAC étant à l'heure actuelle très élevée (jusqu'à 62 %), cette hypothèse sous-entendrait que la porosité totale initiale des grèzes d'accueil (après cette phase d'altération) était bien supérieure à 62 %. Un tel matériau avec une porosité totale si importante n'aurait aucune cohésion ce qui infirme cette première hypothèse.

L'hypothèse précédente étant donc exclue par l'incohérence des porosités totales, un nouveau processus est imaginé afin qu'un niveau de grèzes puisse atteindre après recarbonatations une porosité supérieure au matériau initial. Cette nouvelle hypothèse associe donc de manière synchrone une porogenèse importante et une poronécrose dont l'importance lui est inférieure. Cette seconde hypothèse est étayée par l'observation des différences de structures entre les HAC et des grèzes réalisée dans ce travail.

Le matériau originel d'accueil (grèzes) se présente comme une fabrique à support par grains en contacts par points [Chamley, 2000] ce qui est en cohérence avec leur mode de mise en place. Les espaces inter-granulaires (aires ouvertes) sont relativement restreints entre les macro-cryoclastes de craie et les agrégats de micro-cryoclastes (assez bien définis)/matrice détritique qui se sont amoncelés. La porosité de canaux est quant à elle relativement étroite avec de nombreux étranglements correspondant aux contacts entre les entités micromorphologiques principales. Dans l'HAC en revanche, les aires ouvertes sont beaucoup plus grandes et microporeuses. De plus, elles contiennent des micro-cryoclastes aux contours mal définis et un grand

nombre d'aiguilles de calcite très enchevêtrées qui trouvent leur origine dans des activités biologiques [Loisy, 1997] (après la mise en place du matériau originel). La porosité de canaux y est également plus large.

S'il paraît assez clair que la mise en place des enchevêtrements désordonnés d'aiguilles de calcite (et le tapissage de la porosité de canaux) est responsable de la poronécrose, reste à définir quelles sont les zones qui subissent la porogenèse synchrone.

Les HAC s'installant dans la partie supérieure des grèzes, leurs structures initiales sont donc nécessairement très similaires. Il paraît alors sensé de définir les zones de porogenèse comme étant les grandes aires ouvertes et, dans une moindre importance, les parois de la porosité de canaux plus large. L'étude a montré que les aires ouverte plus larges observées dans les HAC diffèrent de celles présentes dans les grèzes par une macroporosité nettement moins importante. De plus, les aires ouvertes les plus larges observées dans les HAC présentent parfois pour les plus grandes des zones constituées de concentrations plus importantes de matrice détritique au détriment d'aiguilles de calcite. Les observations microscopiques montrent également que la morphologie arrondie à ovoïde et la dimension de ces zones sont similaires à celles des macro-cryoclastes.

A partir de ces observations, deux processus sont envisageables pour expliquer la formation de ces zones particulières :

- le premier se base sur une altération de certains agrégats de micro-cryoclastes (bien définis)/matrice détritique qui serait responsable de la porogenèse. Cependant, aucune hypothèse ne pourrait expliquer pourquoi l'ensemble des agrégats pourtant initialement similaires ne sont pas tous au même stade d'altération. De plus, les aires ouvertes présentes au sein des HAC sont bien plus grandes que le reste des agrégats que ces niveaux particuliers présentent ;
- le second envisage une altération de certains cryoclastes. En effet, les macro-cryoclastes de craie composant les grèzes d'accueil trouvent comme les agrégats leur origine dans la mise en place de ces formations superficielles durant la dernière période glaciaire au gré des différents cycles gel/dégel en conditions périglaciaires [Laurain *et al.*, 1995 ; Matsuoka, 2001 ; Harris *et al.*, 2009]. Ces macro-cryoclastes de craie se trouvent donc au moment de la mise en place des HAC à des stades d'évolution différents vis-à-vis de l'altération ce qui se traduit par une porogenèse plus ou moins avancée [Loisy, 1997 ; Richard, 1996] (Figure discussion - 3). La poursuite de l'altération de ces macro-cryoclastes provoquant la porogenèse serait donc responsable de la désagrégation presque complète des macro-cryoclastes les plus altérés au préalable et de l'altération périphérique d'autres

cryoclastes qui agrandirait la porosité de canaux (Figure discussion - 3). Cette hypothèse est appuyée par la taille similaire des zones ovoïdes et des macro-cryoclastes de craie (qui pourraient former les fantômes des macro-cryoclastes disparus) ainsi que par la présence dans ces zones de micro-cryoclastes aux contours mal définis qui seraient alors des reliquats (Figure discussion - 3).

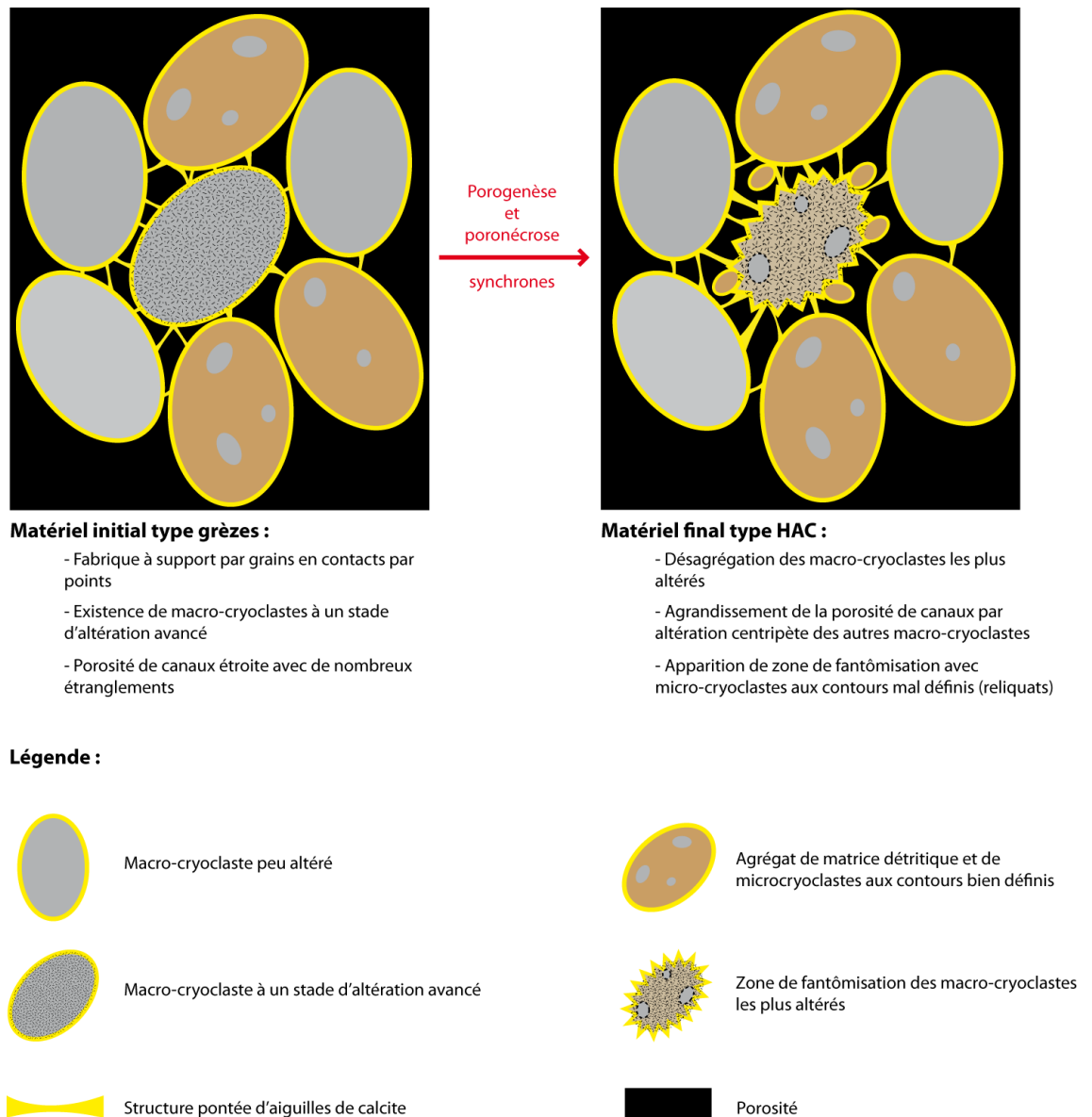


Figure discussion - 3 : Illustration de l'hypothèse de porogenèse et poronécrose synchrones pour expliquer les porosités totales plus importantes observées dans les HAC.

Dans les deux cas, la porogenèse formée et les éléments chimiques provenant de la dissolution des entités pourraient être utilisés pour la formation sub-synchrone des aiguilles de calcite d'origine biologique qui sont responsables de la poronécrose.

Le deuxième processus exposé semble donc plus crédible avec une phase d'intense dissolution de certains des macro-cryoclastes les plus altérés au préalable et la remobilisation (au moins partielle) sub-synchrone des carbonates dans les nombreuses aiguilles de calcite et dans les formes de matrice calcaire à plus forte porosité.

En appliquant aux réflexions sur l'évolution actuelle des HAC le principe d'actualisme, ce processus prend d'un point de vue temporel nécessairement place lors d'une période où les conditions environnementales sont particulières :

- nécessité de la présence d'une végétation importante afin que la production de CO₂ du sol permette la dissolution de carbonates en quantités suffisantes (et pour une évapotranspiration forte) ;
- nécessité d'une forte activité microbiologique (pour la formation des aiguilles de calcite) ;
- températures relativement chaudes pour permettre le séchage des sols (et donc la concentration des solutions du sol en carbonates dissouts).

En regard de l'histoire de la formation des HAC établie par Loisy [1997], cette phase de porogenèse associée à une poronécrose pourrait donc prendre place durant l'optimum Boréal/Atlantique entre 9000 et 5000 ans BP.

C. HYPOTHÈSE SUR LA PRÉSENCE DE CROÛTES CALCAIRES AU SOMMET DE LA CRAIE

Lors de ces travaux de thèse, des expertises réalisées en parallèle pour différents groupes d'archéologues (Reims Métropole et INRAP) lors de fouilles avec décapage du RENDOSOL ont permis l'observation régulière d'une fine couche (quelques millimètres) d'accumulation calcaire non-systématiquement représentée au sommet du substrat crayeux (Figure discussion - 3). Cette croûte calcaire relativement indurée n'est présente que si la formation superficielle sus-jacente est de type graveluche et toujours en association avec des systèmes racinaires (chablis) aujourd'hui disparus.

Ce type d'accumulation calcaire (non étudiée dans ces travaux) n'a pas fait l'objet de description ni de publication spécifique. Cependant, leur formation pourrait être expliquée par l'interaction entre les micro-organismes responsables des biominéralisations de calcaire qui sont associés aux systèmes racinaires et le ralentissement des eaux capillaires chargées en carbonates à l'entrée dans les graveluches. L'absence de ce type de croûte calcaire à l'interface poches de cryoturbation/craie pourrait alors être expliquée par la mauvaise conduction capillaire

entre ces deux niveaux [Ballif, 1980 et 1981] due à la présence de la zone de craie fracturée en blocs décimétriques entre les poches et le substrat crayeux plus massif.



Figure discussion - 4 : Fine couche d'accumulation calcaire observée au sommet de la craie après décapage des graveluches sus-jacentes (photographie de Gilles Fronteaux).

III. RÉPARTITION RÉGIONALE DES HAC

La première des difficultés rencontrées lors de l'étude des HAC est la non-connaissance de leur répartition dans le paysage régional. Si les études antérieures les décrivent comme des niveaux non-continus présents de manière non-systématique, aucune d'entre elles ne s'est attachée à leur répartition en Champagne-Ardenne.

Bien que l'étude pénétrométrique réalisée dans ce travail ait montré que les HAC ne sont pas des niveaux indurés (contrairement à ceux observés dans les grèzes charentaises par Butel et Ducloux [1984] par exemple) et qu'ils ne présentent pas de signature caractéristique, l'analyse de la base de données établie à l'aide d'informations issues de la bibliographie a montré que les HAC ne sont pas géographiquement répartis de manière aléatoire. Ces structures sont à l'heure actuelle majoritairement localisées sur substrat crayeux recouvert de formations superficielles issues de son altération en contexte périglaciaire (poches de cryoturbations et graveluches) sous des sols calcimagnésiques (RENDOSOL). Les HAC sont également majoritairement présents au

niveau de versants orientés sur les intervalles [N ; NE] et [ESE ; SE] et sous cultures (au moment de la description du profil).

Le recoupement des paramètres caractérisant ce contexte de localisation préférentielle permet de mieux comprendre la présence préférentielle des HAC dans ce type de contexte.

1. PARAMÈTRE FORMATION SUPERFICIELLE ET SUBSTRAT GÉOLOGIQUE

Le développement des HAC dans la partie supérieure de grèzes litées et de poches de cryoturbation (d'origines crayeuses ou non) a déjà été observé par le passé [e.g. Butel et Ducloux, 1984 ; Ducloux et Butel, 1983 ; Butel, 1982 ; Wieder et Yaalon, 1974]. Les différents auteurs insistent sur l'importance de la micromorphologie de ce type de formations superficielles (porosité notamment) qui favorise les précipitations de calcite (d'origine physico-chimique ou biologique). La mise en place de ces précipitations de calcite ne semble en effet pas possible à l'intérieur de la craie saine ni de la craie fracturée en gros blocs [Ballif *et al.*, 1995]. Ceci explique également la présence systématique d'un substrat crayeux duquel les grèzes litées de Champagne sont originaires.

Dans le bassin de Paris, d'autres HAC étudiés [Ould-Mohamed et Bruand, 1994] sont présents sur un autre substrat géologique (calcaires de Beauce) mais toujours recouverts de formations superficielles issues de la cryoturbation offrant des structures assez similaires à celles des grèzes de Champagne. A ce jour, aucune occurrence d'HAC en Champagne-Ardenne ne semble avoir été décrite sur d'autres substrats géologiques que la craie.

2. PARAMÈTRE TOPOGRAPHIE

Dans ce travail, les grèzes litées (graveluches) ont été associées aux poches de cryoturbation sous le terme « grèzes » de par leurs compositions extrêmement proches (cryoclastes de craie emballées dans une matrice silto-argileuse calcaire). Le remplissage des poches de cryoturbation présente donc comme les grèzes litées un milieu propice à l'établissement des HAC. Différentes études [e.g. cette étude, Loisy, 1997, Durand, 1979 ; Bruand, 1983 et 1984, Ballif *et al.*, 1995] montrent de plus que les HAC peuvent être présents dans la partie supérieure de poches de cryoturbation qui sont présentes sur les sommets et au niveau des hauts de pente. Cependant, les HAC sont majoritairement localisés sur les versants et très rarement sur les sommets. Cette question de l'absence d'HAC dans certains contextes est soulevée par Loisy [1997] qui suggère trois hypothèses :

- la première propose l'absence de néoformation carbonatée dans les zones où les HAC sont absents. Les HAC étant reconnus comme étant des horizons non-continus à l'échelle locale présents de manière non-systématique dans les profils de sol de Champagne-Ardenne, il existe par définition des zones au

niveau desquelles l'HAC ne s'est pas développé mais ces zones ne sont pas exclusivement localisées dans les grèzes au niveau des sommets. Bien que cette étude ne se soit pas attachée à la recherche des conditions particulières qui seraient responsables du non-développement des HAC dans certaines zones à l'échelle locale, cette hypothèse ne peut pas expliquer la présence quasi-exclusive de ce type d'horizons sur les versants ;

- la seconde hypothèse repose sur la reprise par dissolution des carbonates présents dans les HAC. Dans les contextes topographiques de sommet, la nappe perchée de l'HAC ne subit que peu de latéralisation. Les équilibres de CO₂ entre l'air du sol et les eaux de cette nappe ont donc plus de temps pour s'effectuer et les eaux s'en trouvent plus agressives vis-à-vis des carbonates. La faible latéralisation réduit les départs d'eaux chargées en carbonates dissous vers l'aval et leurs reprécipitations seront plus nombreuses lors des périodes de désaturation mais également lors des périodes de saturation des profils de sols. Dans ces contextes de sommet, les HAC auraient donc moins tendance à se détruire que dans les contextes de pente. L'absence d'HAC en contexte de sommet ne peut donc pas être expliquée par une reprise par dissolution des carbonates ;
- la troisième ferait intervenir une érosion différentielle. Les conditions environnementales du Subboréal et du Subatlantique (5000 ans BP au subactuel) décrites par Loisy [1997] induisent selon l'auteure une forte érosion des sols et d'une partie des HAC. Sur les sommets de Champagne, les poches de cryoturbation présentent généralement des profondeurs d'invaginations moins importantes du fait d'une érosion plus importante [Jamagne, 2011]. L'hypothèse d'une érosion différentielle entre les sommets et les versants est donc plus en concordance avec l'absence quasi-systématique des HAC sur les sommets.

3. PARAMÈTRE ORIENTATION TOPOGRAPHIQUE

Le mode de mise en place des grèzes litées a fait l'objet de nombreuses études. Ce type de dépôt issu de la gélifraction est en relation directe avec des champs de neige permanents [Guillien, 1949 et 1951]. L'auteur précise que la fonte partielle des neiges fournit l'eau qui permet d'assurer l'efficacité des cycles gel/dégel et le transport des éléments le long de la pente (par vidange des poches de cryoturbations localisées en haut de versant pour ce qui concerne la Champagne). La nécessité d'un grand nombre de cycles gel/dégel (allant jusqu'à 200 par an [Francou, 1989]) assurée par des oscillations nombreuses autour d'une température proche de 0 °C ainsi que la présence d'un gélisol saisonnier induit la formation de ces grèzes litées sur des versants au réchauffement diurne important mais non-excessif. En Champagne, comme dans le reste du Bassin de Paris en contexte périglaciaire au Quaternaire, ces conditions sont retrouvées sur les versants exposés sur un intervalle [NNE-SE], les versants nord et

nord-ouest étant trop froids et les versants du quart [S-W] trop chauds [Journeau, 1976]. La présence à l'heure actuelle des HAC sur certains versants aux orientations particulières est donc conditionnée par la présence même des grèzes sur ce type de versants.

4. PARAMÈTRE TYPE DE SOL

Les sols calcimagnésiques (majoritairement représentés par des RENDOSOLS) sont des sols qui caractérisent les affleurements calcaires [Duchaufour, 2001]. Ce type de sol est extrêmement bien représenté en Champagne sur tous types de substrats (craie simple, graveluches, craie solifluée, craie gélifractée, certaines alluvions anciennes [Ballif *et al.*, 1995]) et la simple observation des cartes pédologiques établies par Ballif *et al.* [1995] permet de voir que ce type de sols caractérise une grande partie de la région. De plus, l'histoire pédologique de la Champagne crayeuse décrit une pédogenèse biphasée avec des RENDOSOLS actuels relativement récents (environ 1000 ans [Durand, 1980]) après une large phase d'érosion des sols mis en place au préalable (5000 ans BP à la période sub-actuelle [Loisy, 1997]). La mise en place des HAC ayant débuté bien avant ces phases [Loisy, 1997], le type de sol actuel ne semble pas avoir d'importance sur la présence ou l'absence d'HAC. Le paramètre pédologique représenté par le type de sol en présence à l'heure actuelle n'est donc pas caractéristique de la présence des HAC.

5. PARAMÈTRE COUVERT VÉGÉTAL

Le paramètre couvert végétal correspond à la couverture végétale actuelle des sites présentant un HAC (au moment de la description du profil de sol). Au sortir de la présente étude, il apparaît que les HAC sont à l'heure actuelle majoritairement localisés dans des zones de culture. La région est cependant la première région française pour son agriculture puisque 62 % de ses terres sont consacrées à cette activité (données de la Chambre d'Agriculture de Champagne-Ardenne). La Champagne crayeuse est notamment caractérisée par de très grandes cultures. Il paraît alors évident que de très larges zones géographiques sont caractérisées par la présence de cultures (qu'il y ait présence d'HAC ou non) dans tous contextes de topographie ou d'exposition. De plus, cet essor des grandes cultures est relativement récent car facilité par l'utilisation de différents engrais après la seconde Guerre Mondiale alors que l'histoire de la mise en place des HAC proposée par Loisy [1997] s'étend sur 14000 ans avec des variations parfois importantes de la couverture végétale. Ceci est appuyé par le fait qu'il s'agit du paramètre le moins représentatif au regard des valeurs obtenues dans cette étude.

La variable couvert végétal n'est donc pas un paramètre essentiel conditionnant la présence ou non des HAC à l'heure actuelle. Ceci semble de prime abord permettre d'exclure un impact anthropique important quant à la présence actuelle des HAC dans le paysage régional. Cependant, l'intensification de l'agriculture responsable d'une augmentation des taux de CO₂ dans l'atmosphère du sol [Blet et Charaudeau, 1988] et

les irrigations printanières et estivales (non-systématiques) [Ballif, 1998] sont susceptibles de modifier les équilibres calco-carboniques. Au vu des relations entre les transferts hydriques et les phases de dissolution/précipitations des carbonates établies dans cette étude, ces pratiques anthropiques pourraient amplifier le phénomène de démantèlement partiel des HAC en réduisant la concentration en carbonates et en augmentant le pouvoir agressif de la solution du sol.

6. CONCLUSION

L'analyse de la répartition actuelle des HAC permet donc de mettre en lumière l'importance de la présence de grèzes (poches de cryoturbation et graveluches) de par leur micromorphologie singulière qui forment un milieu favorable à leur établissement. Le mode de mise en place de ces formations superficielles induit des conditions d'exposition particulières et la présence d'un substrat crayeux. Cette étude montre également l'importance cruciale de la phase d'érosion datée du Subboréal-Atlantique qui a permis un démantèlement presque systématique des HAC en contexte de sommet.

L'ensemble de ces nouvelles observations et interprétations permet de compléter les connaissances actuelles concernant la mise en place et l'évolution des HAC de Champagne-Ardenne établie par Loisy [1997] (Figure discussion - 5) :

- **A : jusqu'à 14000 ans BP (Tardiglaciaire) :** érosion périglaciaire et mise en place des formations d'accueil des HAC (**poches de cryoturbation et graveluches**). L'installation de ces formations n'est pas homogène puisque elle s'effectue sur **substrat crayeux** et en très grande majorité sur les **sommets et les versants orientés [NNE - SE]**. Durant cette période, Loisy [1997] place la première apparition d'une phase indurée représentée par le ciment microsparitique (Figure discussion - 5 : A). Cette phase indurée **apparaît de manière non-systématique dans l'ensemble des formations superficielles qui forment un milieu propice ;**
- **B : de 14000 à 9000 ans BP (Préboréal) :** forte érosion des terrains et développement peu important de la végétation et des sols. Selon Loisy [1997], le climat sec est favorable à des cimentations physico-chimiques sous conditions évaporatoires (Figure discussion - 5 : A) ;
- **C : de 9000 à 5000 ans BP (optimum climatique Boréal-Atlantique) :** conditions climatiques plus favorables qui permettent le développement important d'un sol avec une végétation importante. La mise en place non-systématique des HAC déjà amorcée connaît un véritable essor grâce aux nombreuses biominéralisations qui forment les phases à aiguilles calcitiques (Figure discussion - 5 : B) ;
- **D : de 5000 ans BP à la période subactuelle (Subboréal-Subatlantique) :** conditions climatiques et/ou anthropiques moins favorables qui entraînent

une réduction de la végétation ce qui conduit à une forte érosion différentielle des sols et de certains HAC et formations superficielles. Ce **décapage des sommets induit la disparition des HAC** présents auparavant dans ces contextes. La diminution des précipitations favorise une reprise des processus diagénétiques physico-chimiques (Figure discussion - 5 : C) ;

- **E : ces dernières décennies :** conditions de nouveau favorables à une pédogenèse intense (surtout avec les pratiques culturales) qui ont conduit à la formation d'un nouveau sol recouvrant les restes des anciens sols et les HAC. Ces structures possèdent une évolution saisonnière dont le bilan annuel semble démontrer que les HAC sont dans une période de démantèlement partiel par lixiviation latérale (Figure discussion - 5 : D).

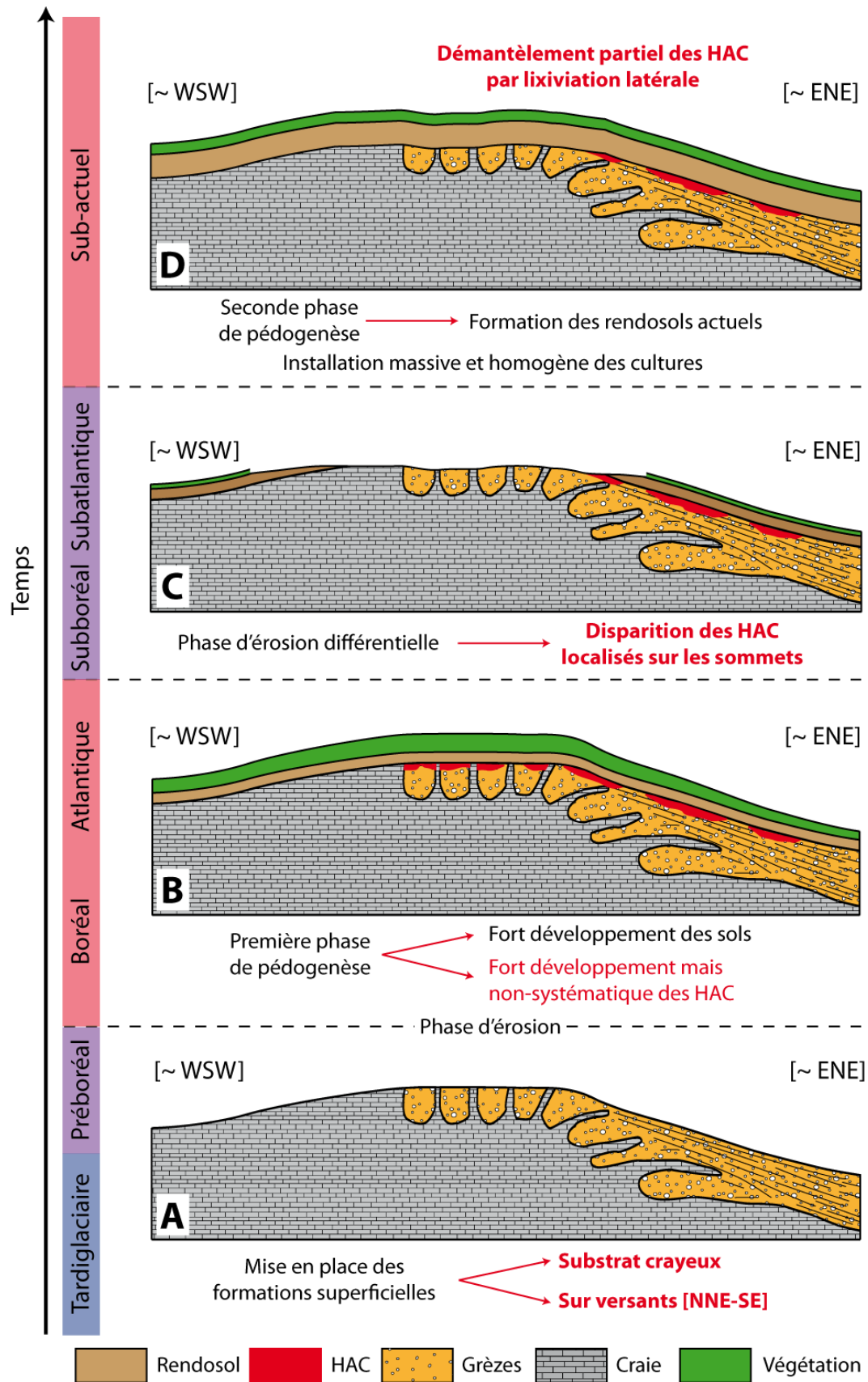


Figure discussion - 5 : Schéma expliquant la présence préférentielle actuelle des HAC en fonction des compléments apportés par cette étude sur leur genèse.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Les profils de sol de Champagne-Ardenne présentent de manière non-systématique des horizons particuliers caractérisés par des concentrations en carbonates plus importantes. Lorsqu'ils sont présents, ces horizons d'accumulations carbonatées (HAC) sont localisés dans la partie supérieure de terrains d'origine périglaciaires (poches de cryoturbation et grèzes litées) juste sous l'horizon organo-minéral avec lequel ils forment une limite franche.

L'étude micromorphologique a d'abord confirmé que les HAC se sont mis en place dans la partie supérieure des formations superficielles et non dans la partie inférieure du RENDOSOL. Elle a également permis de mettre en évidence des différences de réseau poreux caractéristiques entre les HAC et leurs grèzes d'accueil.

L'étude séparée des différents horizons par des méthodes pétrophysiques en laboratoire a montré qu'ils possèdent des capacités hydrodynamiques différentes ce qui induit l'apparition de discontinuités hydrauliques à l'échelle des profils de sol.

Les grèzes sont les horizons présentant les propriétés hydrauliques les moins bonnes et elle ont donc tendance à s'opposer aux transferts hydriques. Dans les profils de sol, elle sont responsable lors des périodes de drainage (septembre à avril) de la formation d'une nappe perchée plus ou moins pérenne :

- dans les profils en pente dépourvus d'HAC, la nappe perchée s'installe au sein du RENDOSOL. La structure meuble du RENDOSOL l'expose à une érosion relativement importante. Les HAC forment l'horizon qui présente les meilleurs propriétés de transfert ;
- dans les profils en pente avec HAC, cette nappe perchée s'installe dans ce dernier ce qui permet de retarder l'érosion du RENDOSOL plus meuble ainsi que le ruissellement de surface.

Lors des périodes d'arrêt du drainage (mai à août) et du séchage du RENDOSOL par évaporation et évapotranspiration, les bonnes propriétés de transferts hydriques des HAC permet aux eaux de la nappe perchés qu'ils contiennent d'alimenter le

RENDOSOL. Les HAC forment donc une réserve d'eau qui ralentit le dessèchement de l'horizon organo-minéral. Les écoulements de subsurface effectifs lors des périodes de drainage sont responsables d'un démantèlement partiel des HAC par lessivage latéral tandis que les stagnations d'eau en périodes d'arrêt du drainage permettent aux eaux de se saturer en CO₂ et en carbonates ce qui favorise la néoformation de calcite et la pérennisation des HAC. Cette saisonnalité des mobilisations de carbonates semble tout de même induire un bilan annuel actuel en faveur d'un démantèlement partiel des HAC appuyé par les essais pénétrométriques.

Le croisement des données hydrologiques et des observations micromorphologiques suggère une phase ancienne de porogenèse et poronécrose sub-synchrones qui pourrait prendre place durant l'optimum Boréal/Atlantique en concordance avec les conditions environnementales passées et les hypothèses de genèse des HAC établies par Loisy [1997].

L'ensemble des études concernant les HAC ont montré que ces structures sont très difficilement décelables depuis la surface. Ces nouveaux travaux ont montré que la présence ou l'absence d'un HAC dans un profil de sol n'est pas déterminable à l'aide de méthodes de prospection simples (pénétrométrie dynamique à énergie variable). Cependant, un nouvel axe de recherche basé sur l'établissement d'une base de données importante à l'aide de sources bibliographiques diverses ainsi que son exploitation a permis de déterminer des zones actuelles de localisation préférentielles des HAC de Champagne-Ardenne. Ces structures sont préférentiellement localisés dans des formations superficielles d'origine périglaciaires (poches de cryoturbation et graveluches) qui présentent des caractéristiques propices à leur mise en place. La localisation non-aléatoire de ces formations superficielles de type grèze dans le paysage ainsi que la phase de forte érosion des sol au Subboréal et au Subatlantique conditionne la présence d'HAC sur des substrats géologiques crayeux et des versants orienté vers le NE ou le SE. La longue histoire de la mise en place des HAC ainsi que la présence d'horizons organo-minéraux actuels relativement jeunes exclut un conditionnement de la présence actuelle des HAC par les paramètres type de sol (sol calcimagnésique) et type de couvert végétal (culture) qui apparaissent comme trop généralistes. Cependant, les pratiques agricoles actuelles pourraient amplifier les phénomènes de démantèlement des HAC de Champagne par modification des équilibres calco-carboniques.

L'ensemble de cette étude s'est particulièrement attaché à l'étude conjointe des HAC et de leurs grèzes d'accueil qui sont des matériaux à première vue assez proches. L'ensemble du travail a permis de mettre en lumière un panel de caractéristiques qui sont propres au HAC de Champagne. Ces différents paramètres sont rappelés succinctement dans le tableau XX.

Méthodologie		HAC	Grèzes	Singularité des HAC	Remarque
Colorimétrie	CIE-XYZ	Teinte moins brune	Teinte plus brune	Oui	
	CIE-L*a*b*	Forte luminance	Faible luminance	Oui	Lié à CaCO ₃
Géochimie	Majeurs	CaCO ₃ fort ; autres faibles	CaCO ₃ faible ; autres forts	Oui	
	Terres rares	Faibles	Fortes	Oui	
Pénétrométrie		Faible résistance	Forte résistance	Non	Peu de différence rendosol/HAC ; baisse de résistance à la base des HAC les plus épais
Diffraction des rayons X		Calcite, quartz	Calcite, quartz, plagioclases	Oui/Non	Faibles différences : échantillons devraient être décarbonatés
Micromorphologie	Contenu en cryoclastes	Variable	Variable	Non	Dépend de la nature des grèzes
	Macro-cryoclastes	Pas de différence visible		Non	
	Agrégats micro-cryoclastes/matrice	Mal définis, dimension faible	Assez distincts, jusqu'à 2 cm	Oui	
	Porosité de canaux	Large ; peu d'étranglements ; bonne connexion	Etroite ; nombreux étranglements	Oui	
	Aires ouvertes	Grandes (jusqu'à 8 mm)	Petites (jusqu'à 3 mm)	Oui	
	Aiguilles de calcite	Ubiquistes		Oui	
		Nombreuses et mal organisées	Moins nombreuses et mieux organisées	Oui	
Porosité totale à l'eau		Forte	Faible	Oui	
Porosimétrie mercure	Porosité totale	Forte	Faible	Oui	
	Spectre porosimétrique	Dispersé	Bimodal	Oui	Signature des grèzes dans HAC
Capillarité	Ascension eau	Forte	Faible	Oui	
	Prise de poids en eau	Forte	Faible	Oui	
	Porosité piégée	Faible	Forte	Oui	
Séchage	Flux	Variable ; généralement fort	Faible	Oui/Non	
	Saturation critique	Variable ; généralement fort	Faible	Oui/Non	
Infiltration	Karsten	Très forte	Très faible	Oui	
	Disque	Différences non-significatives		Non	Augmenter le nombre d'essais

Tableau conclusion - 1 : Synthèse des caractéristiques étudiées : singularité des HAC de Champagne-Ardenne.

Conclusion générale

Bien que le site étudié ne soit pas localisé sur le bassin versant de la Vesle, sa situation correspond aux zones de localisations préférentielles des horizons d'accumulations carbonatées de Champagne-Ardenne. Ceci permet l'extrapolation des données nouvelles concernant le rôles des HAC et des autres horizons des profils de sol dans le contexte plus global de compréhension des transferts hydriques dans les différents compartiments verticaux entre la surface du sol et les aquifères porté par le

Contrat	d'Objectifs	AQUAL.
---------	-------------	--------

PERSPECTIVES DE RECHERCHE

PERSPECTIVES DE RECHERCHE

En partant de l'ensemble des résultats, il existe différents travaux réalisables à plus ou moins grande échelle de temps et d'espace afin de pouvoir poursuivre cette étude en en gardant l'optique générale :

- étendre le type d'analyses effectuées à d'autres sites pourrait permettre de renforcer d'un point de vue général la pertinence de l'ensemble de ces travaux. Ceci permettrait de s'assurer que toutes les caractéristiques des HAC qui ressortent de l'étude du site de Mont du Ménil sont bien typiques des HAC en général ou si certaines d'entre-elles ne sont typiques que de ce site ;
- l'acquisition de cartes précises des formations superficielles et des sols sur l'ensemble de la Champagne-Ardenne (diverses études de terrain à grande échelle) pourrait permettre de proposer une carte de répartition potentielle des HAC à l'échelle régionale par combinaison des probabilités de leur présence en fonction des différents paramètres de site ;
- d'autre part, d'autres techniques de détection non-invasives pourraient être développées au vu de la différence structurale entre les HAC et les autres horizons des profils de sol. Il pourrait s'agir de l'étude de la susceptibilité magnétique volumique (couramment utilisée pour détecter des structures archéologiques enfouies en faible profondeur), la sismique réfraction, la résistivité électrique ou le géoradar ;
- les analyses minéralogiques (DRX) pourraient être complétées par des analyses plus fines des argiles. La connaissance de la composition minéralogique plus précise des différents niveaux étudiés pourrait confirmer ou réfuter les hypothèses de sources des différents éléments chimiques ;
- les données d'infiltration d'eau sont issues des tests à la pipette de Karsten (surface prise en compte : $5,7 \text{ cm}^2$). Des tests in situ (initiés dans cette étude) à l'infiltromètre à disque (surface prise en compte : 314 cm^2) pourraient être réalisés en routine afin d'obtenir directement des valeurs de conductivité hydraulique à saturation et prendre en compte une surface plus large et donc plus représentative ;

- la présente étude a montré toute l'importance des interfaces entre les différents horizons des profils de sol. L'étude de ces interfaces pourrait d'abord permettre de mieux comprendre les phénomènes régissant le passage de l'eau d'un horizon à l'autre. L'étude de l'interface craie/grèzes pourrait permettre de comprendre la formation de la fine croûte calcaire présente de manière non-systématique dans la partie sommitale de la craie en association avec des paléo-chablis. L'étude de l'interface grèzes/HAC permettrait de mieux comprendre les phénomènes régissant la dégradation actuelle de la base des HAC et potentiellement obtenir de nouvelles informations sur l'initiation de la formation des HAC dans le passé ;
- la collaboration avec des agronomes permettrait de tester le développement de différents types de cultures afin de préciser les interactions existant entre les plantes et ces horizons à la structure interne et aux paramètres hydriques particuliers.



BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

A

- ACHESON, D. T. (1963) - **Vapor pressure of saturated aqueous salt solutions** - 3. Dans : *Humidity and Moisture*, Rheinhold, New York, pp. 535 - 544.
- ADOLPHE, J.-P. (1966) - **Étude de quelques cristallisations provoquées par le gel expérimental** - *Cahiers Géologiques*, **79 - 80**, pp. 909 - 918.
- ADOLPHE, J.-P. (1972) - **Obtention d'encroûtements carbonatés par gel expérimental** - *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, **274, (D)**, pp. 1139 - 1142.
- ALIMEN, H. (1936) - **Étude sur le Stampien du Bassin de Paris** - *Mémoires de la Société Géologique de France (nouvelle série)*, **14, (31)**, 309 p..
- ALONSO, M. (1965) - **Contribution à l'étude des propriétés de surface des roches naturelles** - 2ème Colloque de l'Association de Recherche sur les Techniques de Forage et de Production, 31 mai - 4 juin, Technip, 573 p..
- ALONZO-ZARZA, A. M. (1999) - **Initial stages of laminar calcrete formation by roots: examples from the Neogene of central Spain** - *Sedimentary Geology*, **126, (1-4)**, pp. 177 - 191.
- ALONZO-ZARZA, A. M. et ARENAS, C. (2004) - **Cenozoic calcretes from the teruel graben, Spain: microstructures, stable isotopes geochemistry and environmental significance** - *Sedimentary Geology*, **167**, pp. 91 - 108.
- ALONZO-ZARZA, A. M. et JONES, B. (2007) - **Root calcrete formation on quaternary karstic surfaces of Grand Cayman** - *Geologica Acta*, **5**, pp. 77 - 88.
- ALONZO-ZARZA, A. M. et WRIGHT, V. P. (2010) - **Chapter 5: Calcretes** - Dans : *Carbonates in continental settings; facies, environments and processes*, Eds. ALONZO-ZARZA, A. M. and TANNER, L. H., Elsevier, Amsterdam, pp. 225 - 267.
- ANTOINE, P. (2002) - **Les loëss en France et dans le nord-ouest européen** - *Revue Française de Géotechnique*, **99**, pp. 3 - 21.

AUBERT, D., STILLE, P. et PROBST, A. (2001) - REE fractionation during granite weathering and removal by waters and suspended loads: Sr and Nd isotopic evidence - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **65**, pp. 387 - 406.

AVNIR, D. (1989) - The fractal approach to heterogeneous chemistry: surface, colloids, polymers - Eds. Wiley & Sons Ltd, Chichester, **2**, (9), 441 p..

B

BAIZE, D., GIRARD, M.-C., JABIOL, B., ROSSIGNOL, J.-P., EIMBERCK, M. et BEAUDOU, A. (2008) - *Référentiel pédologique* - Association Française pour l'Étude du Sol (AFES), Eds. Quae, 405 p..

BAJNOCZI, B. et KOVACS-KIS, V. (2006) - Origin of pedogenic needle-fiber calcite revealed by micromorphology and stable isotope composition - a case of study of a quaternary paleosol from Hungary - *Chemie der Erde - Geochemistry*, **66**, (3), pp. 203 - 212.

BALLIF, J.-L. (1978) - Porosité de la craie, appréciation de la taille et de la répartition des pores - *Annales Agronomiques*, **29**, pp. 123 - 131.

BALLIF, J.-L. (1980) - Caractères et réserves hydriques des sols sur craie et sur gravelles en Champagne - *Annales Agronomiques*, **29** (4), pp. 473 - 485.

BALLIF, J.-L. (1981) - Comportement hydrique d'une rendzine brune sur craie sous influence de la sécheresse - *Comptes-Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, **67** (5), pp. 395 - 403.

BALLIF, J.-L. (1994) - Etude pédo-agronomique de nouvelles parcelles du domaine du Lycée Agricole de la Marne - Ferme de la Poste à Somme-Vesle - Carte des sols du domaine - INRA - Travaux de la Station d'Agronomie de Châlons-sur-Marne, **286**, 11 p..

BALLIF, J.-L. (1998) - Dynamique de l'eau et irrigation en Champagne - Eds. Johanet, Paris, 120 p..

BALLIF, J.-L. (1998) - Ruissellement et érosion en Champagne : sur sols de vignes et de culture - Observations, mesures, prévision et remèdes - Eds. Johanet, Paris, 157 p..

BALLIF, J.-L. et DUTIL, P. (1983) - Lysimétrie en sol de craie non remanié - I : drainage, évaporation et rôle du couvert végétal - *Agronomie*, **3** (9), pp. 857 - 866.

- BALLIF, J.-L., GUERIN, H. et MULLER, J.-C. (1995) - *Éléments d'agronomie champenoise - connaissance des sols et de leur fonctionnement - rendzines sur craie et sols associés - esquisse géomorphopédologique* - Eds. INRA, Versailles, 104 p..
- BALLIF, J.-L., HERRE, C. et GOBERT, D. (1990) - *Dix-huit années de mesure et d'analyses chimiques mensuelles des eaux d'un bassin agricole en Chmapagne Crayeuse 1971-1988* - INRA - *Travaux de la Station d'Agronomie de Châlons-sur-Marne*, **72**, 80 p..
- BALLIF, J.-L. et MULLER, J.-C. (1991) - *Extension du périmètre d'épandage des eaux résiduaires de la sucrerie de Sillery (51)* - INRA - *Travaux de la Station d'Agronomie de Châlons-sur-Marne*, **213**, 14 p..
- BALLIF, J.-L., MULLER, J.-C. et PATIN, M.-C. (1992) - *Extension du périmètre d'épandage des eaux résiduaires de la distillerie de Betheniville* - INRA - *Travaux de la Station d'Agronomie de Châlons-sur-Marne*, **240**, 16 p..
- BARDET, C., et ROUXEL-DAVID, E. (2002) - *Synthèse des études menées sur le bassin versant du champ captant de Couraux (Marne)* - *Rapport BRGM-FREDONCA*, 164 p..
- BECK, K. (2006) - *Étude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité* - *Thèse de Troisième Cycle, Université d'Orléans*, 226 p..
- BECK, K. AL-MUKHTAR, M., ROZENBAUM, O. et RAUTUREAU, M. (2003) - *Characterization, water transfert properties and deterioration in tuffeau: building material in the Loire valley - France* - *Building and Environment*, **38** (9-10), pp. 1151 - 1162.
- BECZE-DEAK, J. LANGOHR, R., et VERRECCHIA, E. P. (1997) - *Small scale secondary CaCO₃ accumulations in selected sections of the European loess belt; morphological forms and potential for paleoenvironments reconstruction* - *Geoderma*, **76**, pp. 221 - 252.
- BEGET, J. E. (2001) - *Continuous late quaternary proxy climate records from loess in beringia* - *Quaternary Science Reviews*, **20**, (1-3), pp. 499 - 507.
- BERNAT, M. (1975) - *Les isotopes de l'uranium et du thorium et les terres rares dans l'environnement marin* - *Cahiers ORSTOM, Série Géologie*, **7**, pp. 65 - 83.
- BERTRAND, P. (1992) - *Micromorphologie de grèzes litées des Charentes et du châtellonnais (France)* - *Quaternaire*, **3**, (1), pp. 4 - 15.
- BETREMIEUX, R. (1975) - *Réflexions à propos de la capacité au champs et de sa mesure ; actualisation et réhabilitation de cette notion* - *Rapport GEPPA et INRA*, 41 p..

Bibliographie

- BINDSCHIEDLER, S. (2011) - *The role of fungi in the precipitation of calcite; relationships between fungal filaments, nanofibres and needle fiber calcite* - *Thèse de Troisième Cycle, Université de Neuchâtel*, 226 p..
- BLET-CHARAUDEAU, C. (1988) - *Les rythmes de production de gaz carbonique dans les sols carbonatés de Champagne* - *Thèse de Troisième Cycle, Université Pierre et Marie Curie de Paris VI*, 186 p..
- BLYTT, A. (1876) - *Essay on the immigration of the Norwegian flora during alternating rainy and dry periods* - Eds. CAMMERMEYER, A., Christiana, 89 p..
- BONNOT-COURTOIS, C. (1981) - *Géochimie des terres rares dans les principaux milieux de formation et de sédimentation des argiles* - *Thèse de Troisième Cycle, Université de Paris Sud*, 217 p..
- BONTROND, R., BOUQUIN, D., BRIVES, A.-L., HUART, L., POUPON, F., CABART, H., CORBINEAU, R., FRONTEAU, G., GARNIER, N., HOBECK, M., LAROSE, J., LINOIR, D., LECLERC, L., MAAMES, K., et PILON, F. (2012) - *Rapport final d'opération, Bezannes « Le Haut Torchant » (ZAC de Bezannes, tranche 2, secteur 4)* - Eds. service archéologique de Reims métropole, Reims,.
- BORDES, F. (1954) - *Les limons quaternaires du Bassin de la Seine : Stratigraphie et archéologie paléolithique* - *Archives de l'Institut de Paléontologie Humaine, Mémoire*. Eds. Masson & Cie., 472 p..
- BORSATO, A., FRISIA, S., JONES, B. et van der BORG, K. (2000) - *Calcite moonmilk: crystal morphology and environment of formation in caves in the Italian Alps* - *Journal of Sedimentary Research*, **70**, (5), pp. 1179 - 1182.
- BOUASSE, H. (1995) - *Capillarité, phénomènes superficiels* - Librairie Delagrave, Eds. Bibliothèque Scientifique de l'Ingénieur et du physicien, Paris, 437 p..
- BOURBIE, T., COUSSY, O., et ZINSZNER, B. (1975) - *Acoustique des milieux poreux* - Cours de Production de l'IFP, 94 p..
- BOUSQUIE, P. (1979) - *Texture et porosité de roches calcaires ; relation avec perméabilité, ascension capillaire, gélivité et conductivité thermique* - *Thèse de Troisième Cycle, Université Pierre et Marie Curie de Paris VI*, 191 p..
- BOUTTEMY, R., HEBERT, J. et MAUCORPS, J. (1966) - *Craonne 3/4-7/8, Asfeld-la-Ville 1/2-5/6* - Service de Cartographie des Sols de la Chambre d'Agriculture de l'Aisne, 289 p..
- BRAISSANT, O., CAILLEAUX, G., DUPRAZ, C. & VERRECCHIA, E. P. (2003) - *Bacterially induced mineralization of calcium carbonate in terrestrial environments: the role*

- of exopolysaccharides and amino acids - *Journal of Sedimentary Research*, **73**, pp. 485 - 490.
- BRANNER, J. C. (1911) - Aggrades limestone plains of the interior of Bahia and the climatic changes suggested by them - *Geological Society of America Bulletins*, **22**, pp. 187 - 206.
- BRAUN, J.-J., PAGEL, M., HERBILLN, A., et ROSIN, C. (1993) - Mobilization and redistribution of REEs and thorium in a syenitic lateritic profile: a mass balance study - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **57**, pp. 4419 -4434.
- BRETON, G., JUINET, P. & LEFEBVRE, D. (1989) - Gélifracsts cimentés (= calcrêtes) de Saint-Martin-aux-Bruneaux (76) et de Sasselot-le-Mauconduit (76) – Eds. LECOLLE, F. - *Bulletins du Centre de Géomorphologie de Caen*, **37**, fiche n° 5.
- BRETON, G., JUINET, P., et LEFEBVRE, D. (1989) - Gélifracsts cimentés (= calcrêtes) de Saint-Martin-aux-Bruneaux (76) et de Sasselot-le-Mauconduit (76) - *Bulletins du Centre de Géomorphologie de Caen*, **37**, fiche 5.
- BREWER, R. (1964) - *Fabric and mineral analysis of soil* - Eds. John Wiley and Sons, New-York, 470 p..
- BRIONES, M. J. I., OSTLE, N. J., et PIEARCE, T. G. (2008) - Stable isotopes reveal that the calciferous gland of earthworms is a CO₂-fixing organ - *Soil Biology and Biochemistry*, **40**, pp. 554 - 557.
- BRUAND, A. (1984) - Succession de pédogenèse en Champagne sèche (deuxième partie) - *Préhistoire et Protohistoire en Champagne-Ardenne*, **8**, pp. 3 - 9.
- BRUAND, A. (1983) - Succession de pédogenèse en Champagne sèche (première partie) ; les principales données actuelles concernant cette succession - *Préhistoire et Protohistoire en Champagne-Ardenne*, **7**, pp. 3 - 9.
- BRUAND, A. et DUVAL, O. (1999) - Calcified fungal filaments in the petrocalcic horizon of Eutrochrepts in Beauce, France - *Soil Science Society of America Journal*, **63**, pp. 164 - 169.
- BRUNAUER, S., EMETT, P. H., et TELLER, E. (1938) - Adsorption of gazes in multimolecular layers - *Journal of the American Chemical Society*, **60**, pp. 309 - 318.
- BUTEL, P. et DUCLOUX, J. (1984) - Accumulations carbonatées dans une toposéquence de sols de l'ouest de la France : organisation et distribution dans le paysage - *Science du Sol, Bulletin de l'Association Française d'Étude des Sols*, **22**, (1), pp. 63 - 74.

BUTEL, P. (1982) - **Formes et mécanismes de l'accumulation carbonatée dans les sols de la Plaine Poitevine** - *Thèse de Troisième Cycle, Université de Poitier*, 123 p..

C

C.-A.-M. (2000) - **Contrat rural de Suippes ; description des profils pédologiques et résultats analytiques** - 22 p..

C.-A.-M. (1998) - **Tourbe eau pure ; description des profils pédologiques et résultats analytiques** - 16 p..

C.-A.-M. (1998) - **Banque de données azote ; description des profils pédologiques et résultats analytiques** - 10 p..

CAILLEAU, G. (2005) - **Cycle du carbone et biominéralisation carbonatée en milieu continental : la diagenèse des phases oxalate-carbonate** - *Thèse de Troisième Cycle, Université de Neuchâtel*, 177 p..

CAILLEAU G., DADRAS M., ABOLHASSANI-DADRAS S., BRAISSANT O. & VERRECCHIA E. P. (2009) - **Evidence for an organic origin of pedogenic calcitic nanofibres** - *Journal of Crystal Growth*, **311**, pp. 2490 - 2495.

CAILLEUX A. (1964) - **Genèse possible de dépôts chimiques par congélation** - *Compte-Rendu Sommaire de Séances de la Société Géologique de France*, pp. 11 - 12.

CALLOT, G. (1984) - **Structure pédologique et fonctionnement du sol en relation avec la production végétale** - *Science du sol*, **2**, pp. 167 - 181.

CALLOT, G., GUYON, A. et MOUSSAIN, D. (1985) - **Inter-relations entre aiguilles de calcite et hyphes mycéliens** - *Agronomie*, **5**, pp. 209 - 216.

CALVET, F. et JULIA, R. (1983) - **Pisoids in the caliche profile of Tarragona (NE Spain)** - Dans : *Coated grains*, Eds. PERYT, T. M., Springer, Berlin, pp. 456 - 473.

CANTI, M. G. et PIEARCE, T. G. (2003) - **Morphology and dynamics of calcium carbonate granules produced by different earthworm species** - *Pedobiologia*, **47**, pp. 511 - 521.

CARLISLE, D. (1983) - **Concentration of uranium and vanadium in calcretes and gypcretes** - Dans : *Residual deposits*, Eds. WILSON, R. C. L., *Geological Society of London*, Special Publication, **11**, pp. 185 - 195.

CARRIO-SCHAFFHAUSER, E. (1987) - **Évolution des propriétés pétrophysiques d'un calcaire : le rôle de la dissolution-cristallisation dans une déformation cassante** - *Thèse de Troisième Cycle, Université d'Aix-Marseille I*, 291 p..

- CASSIE, A. B. D. et BAXTER, S. (1944) - **Wettability of porous surfaces** - *Transaction of the Faraday Society*, **40**, pp. 546 - 551.
- CAVELIER, C., MEGNIEN, C., POMEROL, C., et RAT, P. (1980) - **Le bassin de paris** - Congrès du Centenaire ; Association des Géologues du Bassin de Paris, France - *Introduction à la Géologie du Bassin de Paris*, pp. 3 - 51.
- CAYEUX, L. (1935) - **Les roches sédimentaires de France ; roches carbonatées** - Eds. Masson, Paris, 447 p..
- CETE. (2007) - **Remblayage des tranchées et réfection des chaussées ; compléments au guide sétra-LCPC de mai 1994** - *Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes*, 9 p..
- CHAFETZ, H. S. (1986) - **Marine peloids: a product of bacterially induced precipitation of calcite** - *Journal of Sedimentary Petrology*, **56**, pp. 812 - 817.
- CHAFETZ, H. S. et FOLK, R. L. (1984) - **Travertines: depositional morphology and the bacterially constructed constituents** - *Journal of Sedimentary Petrology*, **54**, pp. 289 - 316.
- CHAFETZ, H. S. et BUTLER, J. C. (1981) - **Petrology of recent caliche pisolites, spherulites and speleothem deposits from Central Texas** - *Sedimentology*, **27**, pp. 497 - 518.
- CHALINE, J. (1985) - **Histoire de l'Homme et des climats au Quaternaire** - Eds. Doin, Paris, 350 p..
- CHAMLEY, H. (2000) - **Bases de sédimentologie** - Eds. Dunod, Paris, 178 p..
- CHATZIS, I. et DULLIEN, F. A. L. (1981) - **Mercury curves of sandstones. mechanisms of mercury penetration and withdrawal** - *Powder Technology*, **9**, pp. 117 - 125.
- CHEN, X., MCKENZIE, N., et ROACH, I. (2002) - **Distribution in Australia: calcrete landscape** - Dans : *Calcrete: characteristics, distribution and use in mineral exploration*, Eds. CHEN, X. Y., LINTERN, M. J. et ROACH, I.C, *Cooperative Research Centre for Landscape Environments and Mineral Exploitation*, Perth, Western Australia, pp. 110 - 138.
- CHEN, X. et WU, S. (2013) - **Influence of water-to-cement ratio and curing period on pore structure of cement mortar** - *Construction and Building Materials*, **38**, pp. 804 - 812.
- CHIESI, F. (1993) - **Transfert et épuration dans la zone non saturée de la craie en Champagne : étude de quelques cas concernant les nitrates et l'atrazine** - *Thèse de Troisième Cycle*, Université de Reims Champagne-Ardenne, 197 p..

Bibliographie

- CHILD, E. C. (1969) - **An introduction to the physical basis of soil water phenomena** - Eds. John Wiley and Sons, London, 443 p..
- CHIQUET, A., COLIN, F., HAMELIN, B., MICHARD, A., et NAHON, D. (2000) - **Chemical mass balance of calcrete genesis on the toledo granite (spain)** - *Chemical Geology*, **170**, (1-4), pp. 19 - 35.
- CHOQUETTE, P. W. et PRAY, L. C. (1970) - **Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates** - *American Association of Petroleum Geologists*, **54**, (2), pp. 207 - 250.
- CHRETIEN, J. (1986) - **Rôle du squelette dans l'organisation des sols ; conséquences sur les caractéristiques de l'espace poral des sols sur les arènes et sur les terrasses fluviales** - *Thèse de Troisième Cycle, Université de Dijon*, 412 p..
- CHRISTIE, T., BRATHWAITE, B., et TULLOCH, A. (1998) - **Rare earth and related elements: New zealand mining** - *Mineral Commodity, Report 17*, **24**, pp. 7 - 19.
- CLARKSON, C. R., SOLANO, N., BUSTIN, R. M., BUSTIN, A. M. M., CHALMERS, G. R. L., HE, L., MELNICHENKO, Y. B., RADLINSKI, A. P., et BLACH, T. P. (2013) - **Pore structure characterization of north american shale gas reservoirs using USANS/SANS, gas adsorption, and mercury intrusion** - *Fuel*, **103**, pp. 606 - 616.
- COJAN, I. et RENARD, M. (2003) - **Sédimentologie** - Eds. Dunod, Paris 416 p..
- COMBARNOUS, M. et MARLE, C. (1965) - **Méthodes d'études de la texture des solides poreux** - *Génie Chimique*, **94**, (2), pp. 29 - 45.
- COMPTON, J. S., WHITE, R. A., et SMITH, M. (2003) - **Rare earth element behavior in soils and salt pan sediments of a semi-arid granitic terrain in the western cape, South Africa** - *Chemical Geology*, **201**, pp. 239 - 255.
- CONDIE, K. C., DENGATE, J., et CULLERS, R. L. (1995) - **Behavior of rare earth elements in a paleoweathering profile on granodiorite in the front range, Colorado, USA** - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **59**, pp. 279 - 294.
- CONIGLIO, M. et HARRISON, R. S. (1983) - **Holocene and pleistocene caliche from big pine key** - *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, **31**, pp. 3 - 13.
- COPPIN, F., BERGER, G., BAUER, A., CASTET, S., et LOUBET, M. (2002) - **Sorption of lanthanides on smectite and kaolinite** - *Chemical Geology*, **182**, pp. 57 - 68.
- COULON, M. (2013) - **Reconnaissance par sondages pénétrométriques et histoire du couloir alluvial de la Vesle au niveau du champ captant de Couraux** - *Bulletin de la Société d'Étude des Sciences Naturelles de Reims*, **25**, pp. 3 - 14.

COURTOIS, C. (1974) - **Les terres rares dans quelques minerais de fer ; entraînement expérimental des lanthanides sur hydroxyde ferrique** - *Thèse de Troisième Cycle, Université de Paris Sud*, 141 p..

CRANK, J. (1975) - **The mathematics of diffusion** - Eds. Clarendon Press, Oxford, 414 p..

D

DAIAN, J.-F. (1986) - **Processus de condensation et de transfert d'eau dans un matériau méso et macroporeux ; étude expérimentale du mortier de ciment** - *Thèse de Troisième Cycle, Université Joseph Fourier de Grenoble*, 319 p..

DAIAN, J.-F. (2007) - **Porométrie au mercure : le modèle XDQ** - Technical Report, Laboratoire d'Étude des Transferts en Hydrologie et Environnement, Université Joseph Fourier, Grenoble, 97 p..

DARWIN, C. R. (1881) - **The formation of vegetable mould through the action of worms with observations on their habits** - Eds. John Murray, London, 326 p..

DEFAY, R. et PRIGOGINE, I. (1966) - **Surface tension and adsorption** - Eds. Longmans, Green and Co. Ltd., London, 432 p..

DEPLAGNE, F., BACCONNET, C., et ROYET, P. (1993) - **Intérêt du pénétromètre léger pour le contrôle du compactage des barrages en terre** - Journées Nationales d'Étude « Petits Barrages », AFEID-CFGB, 2-3 février.

DERCOURT, J. (2002) - **Géologie et géodynamique de la France outre-mer et européenne** - Eds. Dunod, Sciences Sup, Paris, 329 p..

DESCOSTES, M., PILI, E., FELIX, O., FRASCA, B., RADWAN, J. et JUERY, A. (2012) - **Diffusive parameters of tritiated water and uranium in chalk** - *Journal of Hydrology*, **452 - 453**, pp. 40 - 50.

DESSANDIER, D. (1995) - **Étude du milieu poreux et des propriétés de transfert des fluides du tuffeau blanc de Touraine ; application à la durabilité des pierres en œuvre** - *Thèse de Troisième Cycle, Université de Tours*, 228 p..

DEVER, L., DURAND, R., FONTES, J.-C. et VACHIER, P. (1982) - **Géochimie et teneurs isotopiques des systèmes saisonniers de dissolution de la calcite dans un sol sur craie** - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **46, (10)**, pp. 1947 - 1956.

DEVER, L., DURAND, R., FONTES, J.-C. et VACHIER, P. (1983) - **Étude pédogénétique et isotopique des néoformations de calcite dans un sol sur craie : caractéristiques et origines** - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **47, (12)**, pp. 2079 - 2090.

Bibliographie

- DEXTER, A. R., CZYZ, E. A. et GATE, O. P. (2007) - **A method for prediction of soil penetration resistance** - *Soil and Tillage Research*, **93**, (2), pp. 412 - 419.
- d'HAILLY, P.-L. J. (1695) - **Journal de Voyage**, **24** - Dans : *Annales du Comité Flamand de France*, Lille. pp. 435 - 471.
- DUCHAUFOUR, P. (2001) - **Introduction à la science du sol ; sol, végétation, environnement** - Eds. Dunod, Paris, 331 p..
- DUCLOUX, J. et BUTEL, P. (1983) - **Micromorphology of calcretes in a slope deposit in the Poitevine Plain, France** - Sixth International Working-Meeting on Soil Micromorphology, Londres, août. Eds. BULLOCK, P. et MURPHY, C. P, pp. 637 - 646.
- DUERMAEL, G. et MORFAUX, P. (1978) - **Infiltration en aquifère crayeux. Mouvements d'eau dans la zone non-saturée et leur incidence sur l'évapotranspiration et l'alimentation de la nappe** - Colloque Régional : Hydrogéologie de la craie du Bassin de Paris, 25-26 mai, Rouen, *Documents du BRGM*, **42**, 97 p..
- DULLIEN, F. A. L. (1979) - **Porous Media; Fluid transport and pore structure** - Eds. Academic Press, New York, 396 p..
- DURAND, J. H. (1954) - **Les sols d'Algérie** - Gouvernement Général de l'Algérie, Direction du Service de la Colonisation et de l'Hydraulique, Service des Études Scientifiques, Alger, 244 p..
- DURAND, N., CURTIS MONGER, H. et CANTI, M. G. (2010) - **Calcium Carbonate Features** - Dans : *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*, Eds. STOOPS, G., MARCELINO, V. et MEES, F., Elsevier, pp. 149 - 194.
- DURAND, R. (1973) - **Étude des sols du périmètre d'épandage d'eaux résiduares de la sucrerie d'Arcis-sur-Aube** - INRA - *Travaux de la Station d'Agronomie de Châlons-sur-Marne*, 78 p..
- DURAND, R. et BELLON, N. (1993) - **Comparaison d'une méthode de diffusion et d'une méthode géochimique pour estimer la production racinaire de CO₂** - *Science du Sol*, **31**, (3), pp. 97 - 107.
- DURAND, R. (1980) - **Variations saisonnières de la concentration des solutions et des gaz du sol en milieu crayeux** - *Science du Sol*, **3**, pp. 217-230.
- DURAND, R. (1979) - **La pédogenèse en pays calcaire dans le nord-est de la France** - *Thèse de Troisième Cycle*, Université Louis Pasteur de Strasbourg, 198 p..
- DUTIL, P. et BALLIF, J.-L. (1968) - **Sur la présence fréquente en Champagne Crayeuse de rendzines développées sur paléosols cryoturbés** - *Sciences du Sol*, **2**, pp. 79 - 91.

E

- EK, C. et PISSART, A. (1965) - **Dépôt de carbonates de calcium par congélation et teneur en bicarbonates des eaux résiduelles** - *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, **260, (D)**, pp. 929 - 932.
- ELHAI, H. (1968) - **Biogéographie** - Eds. Librairie Armand Colin, Collection U, Paris, 320 p..
- ELMI, S. et BABIN, C. (2002) - **Histoire de la Terre** - Eds. Dunod, Univers Sciences, Paris, 222 p..
- EVIN, J., LAMBERT, G.-N., LANGOUET, L., LANOS, P. et OBERLIN, C. (2005) - **La datation en laboratoire** - Eds. Errance, Collection Archéologiques, Paris, 198 p..

F

- FAUCHARD, C. et MERIAUX, P. (2004) - **Méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic des digues de protection contre les crues : guide pour la mise en oeuvre et l'interprétation** - Cemagref, 124 p..
- FEODOROFF, A. (1965) - **Étude expérimentale de l'infiltration de l'eau non saturante ; cas d'un sol initialement sec et d'un arrosage sans formation de plan d'eau en surface** - *Thèse de troisième cycle, INRA*, 92 p..
- FEODOROFF, A. (1962) - **Ressuyage du sol et capacité de rétention pour l'eau** - *Annales Agronomiques*, **13, (6)**, pp. 523 - 547.
- FERRON, M. (1995) - **Le Chemin des Dames** - Eds. Bibliothèque Québécoise, Montréal, 183 p..
- FICK, A. (1855) - **Ueber discusion** - *Annalen der Physik*, **1**, pp. 59 - 86.
- FOLEY, K., LYONS, W., BARRETT, J. et VIRGINIA, R. (2006) - **Pedogenic carbonate distribution within glacial till in Taylor Valley, Southern Victoria Land, Antarctica** - Dans : *Paleoenvironmental record and application of calcretes and palustrine carbonates*, Eds. ALONZO-ZARZA, A.M. and TANNER, L.H., *Geological Society of America - Special paper*. pp. 89 - 104.
- FRANCOU, B. (1989) - **Régime thermique des sols et rôle du gel dans la dynamique des versants d'un milieu subéquatorial d'altitude : les Andes Centrales du Pérou** - *Géographie physique et Quaternaire*, **43, (1)**, pp. 97 - 112.

- FREYTET, P. (1971) - **Paléosols résiduels et paléosols alluviaux hydromorphes dans le Crétacé supérieur et l'Éocène basal du Languedoc** - *Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique*, **13**, (2), pp. 245 - 268.
- FREYTET, P. et PLAZIATA, J.-P. (1982) - **Continental carbonate sedimentation and pedogenesis, late cretaceous and early tertiary of southern france ; contribution to Sediment** - **12**, Schweizertbart'che Verlag, Stuttgart, 231 p..
- FREYTET, P. et VERRECCHIA, A. P. (1989) - **Les carbonates continentaux du pourtour méditerranéen : microfaciès et milieux de formation** - *Méditerranée*, **2**, (3), pp. 5 - 28.
- FRIPIAT, J., CHAUSSIDON, J. et JELLI, A. (1971) - **Chimie physique des phénomènes de surface** - Eds. Masson et Cie., Paris, 387 p..
- FRONTEAU, G. (2000) - **Comportement télogénétiques des principaux calcaires de Champagne-Ardenne, en relation avec leur faciès de dépôt et leur séquençage diagénétique** - *Thèse de Troisième Cycle, Université de Reims Champagne-Ardenne*, 304 p..
- FRONTEAU, G., MOREAU, C., THOMACHOT-SCHNEIDER, C. et BARBIN, V. (2010) - **Variability of some Lutetian building stones from the Paris Basin, from characterisation to conservation** - *Engineering Geology*, **115**, (3-4), pp. 158 - 166.

G

- GALAN, E., FERNANDEZ-CALIANI, J. C., MIRAS, A., APARICIO, P. et MARQUEZ, M. G. (2007) - **Residence and fractionation of rare earth elements during kaolinization of alkaline peraluminous granites in NW Spain** - *Clay Minerals*, **42**, pp. 341 - 352.
- GARCIA, M. D. L. et SOUSA-COUTINHO, J. (2013) - **Strength and durability of cement with forest waste bottom ash** - *Construction and Building Materials*, **41**, pp. 897 - 910.
- GERARD, R. (1978) - **L'état de surface d'un matériau poreux caractérisé par une mesure d'absorption d'eau** - Colloque International UNESCO-RILEM : *Altérations et protection des monuments en pierre*, Paris, 5 - 9 juin.
- GERAUD, Y. (1991) - **Déformation thermodynamique et porosité des roches granitiques ; évolution des espaces poreux** - *Thèse de Troisième Cycle, Université de Provence*, 329 p..
- GESSNER, K. (1555) - **Descriptio montis fracti sive montis pilat ut vulgo nominat, juxta lucernam in helvetia** - Lucernae.

- GIERST, L. et ACOUTURIER, M. (1968) - **Diffusion** - Encyclopédie Universalis, pp. 618 - 622.
- GILE, L., PETERSON, F. et GROSSMAN, R. (1965) - **The k horizon: a master horizon of carbonate accumulation** - *Soil Science*, **97**, pp. 74 - 82.
- GILE, L., PETERSON, F. et GROSSMAN, R. (1966) - **Morphological and genetic sequences of carbonate accumulations in desert soils** - *Soil Science*, 100, pp. 347 - 360.
- GNANDI, K. et TOBSCHALL, H. J. (2003) - **Distribution patterns of rare earth elements and uranium in tertiary sedimentary phosphorites of Hahotoe-Kpogame, Togo** - *Journal of African Earth Sciences*, **37**, pp. 1 - 10.
- GONI, I., RAGOT, J.-P. et SIMA, A. (1968) - **Méthode d'étude au champ microfissural des minéraux et des roches et possibilités d'application en géologie** - *Bulletins du BRGM (2^{ème} série)*, **4, (2)**, pp. 51 - 92.
- GOOD, R. J. et MIKHAIL, R. S. (1981) - **The contact angle in mercury porosimetry** - *Powder Technology*, **29**, pp. 53 - 62.
- GOUDIE, A. S. (1973) - **Duricrusts in tropical and subtropical landscapes** - Eds. Clarendon Press, Oxford, 174 p..
- GOUDIE, A. S. (1983) - **Calcrete** - Dans : *Chemical Sediment and Geomorphology*, Eds. GOUDIE, A.S. and PYE, K., Academic Press, London. pp. 93 - 131.
- GOURVES, R. (1991) - **Le PANDA ; Pénétrromètre dynamique léger à énergie variable pour la reconnaissance des sols** - Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, Laboratoire de Génie Civil. Eds. CUST, 12 p..
- GUEDRIA, A., TRICHET, J. et WILHEM, E. (1989) - **Behaviour of lead and zinc in calcrete-bearing soils around Bou Grine, Tunisia; its application to geochemical exploration** - *Journal of Geochemical Exploration*, **32, (1-3)**, pp. 117 - 132.
- GUEGUEN, Y. et PALCIAUSKAS, V. (1992) - **Introduction à la physique des sols** - Eds. Hermann, Paris, 299 p..
- GUIBAUD, G., AYELE, J., et MAZET, M. (1996) - **The influence of some parameters upon the aluminum leaching out by Limousin soils through batch reactor** - *Water Science and Technology*, **33, (6)**, pp. 271 - 277.
- GUILD, J. (1931) - **The colorimetric properties of the spectrum** - *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Serie A*, **230**, pp. 149 - 187.
- GUILLIEN, Y. (1951) - **Les grèzes litées de Charente** - *Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, **22**, pp. 153 - 162.

GUILLIEN, Y., (1949) - **Gel et dégel du sol : les mécanismes morphologiques** - Dans : *L'information géographique*, **13**, (3), Numéro Spécial de Morphologie, pp. 104 - 116.

H

HAMIDI, E. M., COLIN, F., MICHARD, A., BOULANGE, B. et NAHON, D. (2001) - **Isotopic tracers of the origin of ca in a carbonate crust from the middle Atlas, Morocco** - *Chemical Geology*, **176**, (1-4), pp. 93 - 104.

HAMMECKER, C. (1993) - **Importance des transferts d'eau dans la dégradation des pierres en œuvre** - *Thèse de Troisième Cycle*, Université Louis Pasteur de Strasbourg, 254 p..

HARRIS C., ARENSON L. U., CHRISTIANSEN H. H., ETZELMULLER B., FRAUNFELDER R., GRUBER S., HAEBERLI W., HAUCK C., HOLZLE M., HUMLUM O., ISAKSEN K., KAAB A., KERN-LUTSCHG M. A., LEHNING M., MATSUOKA N., MURTON J. B., NOTZLI J., PHILLIPS M., ROSS N., SEPPALA M., SPRINGMAN S. M. et VONDER MUHLL D. (2009) - **Permafrost and climate in europe : monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses** - *Earth-Science Reviews*, **92**, (3-4), pp. 117 - 171.

HAVERKAMP, R., ROSS, P. J., SMETTEM, K. R. J. et PARLANGE, J. Y. (1994) - **Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer: II: physical based infiltration equation** - *Water Ressources Research*, **30**, pp. 2931 - 2935.

HAWKER, H. W. (1927) - **A study of the soils of hidalgo county, Texas, and the stages of their soil-lime accumulation** - *Soil Science*, **23**, pp. 475 - 485.

HAYNES, J. M. (1978) - **La structure poreuse et son influence sur les mécanismes de transfert** - Dans : *Le comportement thermique des matériaux dans la construction*, Séminaire tenu a Saint-Rémy-lès-Chevreuse, 18-20 janvier, Éditions du Bâtiment et des Travaux Publics, Presses de l'Université du Québec, Québec, pp. 11 - 28.

HEBERT, J. et JAMAGNE, M. (1963) - **Craonne (1-2)** - Service de Cartographie des Sols de la Chambre d'Agriculture de l'Aisne, 161 p..

HEBERT, J., JAMAGNE, M. et BLIET, L. (1965) - **Château-Thierry (7-8), Épernay (5-6)** - Service de Cartographie des Sols de la Chambre d'Agriculture de l'Aisne, 207 p..

HEBERT, J., JAMAGNE, M. et BOUTTEMY, L. (1964) - **Craonne (5-6)** - Service de Cartographie des Sols de la Chambre d'Agriculture de l'Aisne, 198 p..

HENDERSON, P. (1984) - **Rare Earth Element Geochemistry** - Eds. Elsevier, Amsterdam, Paris, 510 p..

HERITIER, F. et VILLEMIN, J. (1971) - **Mise en évidence de la tectonique profonde du bassin de paris pour l'exploration pétrolière** - *Bulletins de BRGM*, Orléans, **1**, (2), pp. 11 - 30.

HILLY, J. et HAGUENAUER, B. (1979) - **Guides Géologiques Régionaux : Lorraine, Champagne** - Eds. Masson, Paris, 215 p..

I

ITKIN, D. (2014) - **Anthropo-calcretisation: human effects on calcrete formation** - EGU General Assembly, 27 avril-2 mai, Vienne, *Geophysical Research Abstracts*, **16**.

IWANOFF, L. L. (1906) - **Ein wasserhaltiges calcium carbonat aussen umgebungen von nowo-alexandria (gouv. Lublin)** - *Annalen des Geologie und Mineralogie der Russland*, **8**, p. 2325.

J

JAFFEL, H. (2006) - **Caractérisation multi-échelles de matériaux poreux en évolution : cas du plâtre** - *Thèse de Troisième Cycle*, École Polytechnique de Palaiseau, 180 p..

JAMAGNE, M. (1964) - **Introduction à une étude pédologique dans la partie nord du Bassin de Paris** - *Pédologie*, **14**, (2), pp. 228 - 342.

JAMAGNE, M. (2011) - **Grands paysages pédologiques de France** - Editions Quae, Paris, 535 p..

JAMES, N. P. (1972) - **Holocene and Pleistocene calcareous crust (caliche) profiles: criteria for subaerial exposure** - *Journal of Sedimentary Petrology*, **42**, pp. 817 - 836.

JARANOFF, R. (1937) - **Étude de géologie dynamique au Maroc, dans les confins algéro-marocains et en Afrique occidentale française** - *Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique*, **10**, (2), pp. 135 - 141.

JEANNETTE, D. (1994) - **Structures de porosité, mécanismes de transfert des solutions et principales altérations des roches des monuments** - Dans : *La pietra dei monumenti in ambiente fisico e culturale*, Centro Universitario Europeo per i Beni Culturali, Ravello, pp. 49 - 77.

JOANNY, J.-F. (1985) - **Le mouillage ; quelques problèmes statiques et dynamiques** - *Thèse de Troisième Cycle*, Université Pierre et Marie Curie de Paris VI, 260 p..

- JONES, B. (1988) - **The influence of plants and micro-organisms on diagenesis in caliche: example from the Pleistocene ironshore formation on Cayman brac, British west indies** - *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, **36**, pp. 191 - 201.
- JONES, B. et KHALE, C. F. (1993) - **Morphology, relationship, and origin of fiber and dendrite calcite crystals** - *Journal of Sedimentary Petrology*, **63**, pp. 1018 - 1031.
- JONES, B. et NG, K.-C. (1988) - **The structures and diagenesis of rhizoliths from Cayman brac, British west indies** - *Journal of Sedimentary Petrology*, **58**, pp. 1002 - 1007.
- JONES, B. et SQUAIR, C. A. (1989) - **Formation of peloids in plants rootlets, grand Cayman, British west indies** - *Journal of Sedimentary Petrology*, **59**, pp. 1002 - 1007.
- JOUANY, C. (1981) - **Transfert d'eau par évaporation dans les milieux argileux** - *Thèse de Troisième Cycle, Université Paul Sabatier de Toulouse*, 102 p..
- JOURNEAU, A. (1976) - **Les grèzes litées du Châtillonnais** - *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, **3-4**, pp. 123 - 138.

K

- KAHLE, C. F. (1977) - **Origin of subaerial holocene calcareous crusts: role of algae, fungi and sparmicritisation** - *Sedimentology*, **24**, pp. 413 - 435.
- KANAZAWA, Y. et KAMITANI, M. (2006) - **Rare earth minerals and resources in the world** - *Journal of Alloys and Compounds*, **408**, pp. 1339 - 1343.
- KARSTEN, R. (1963) - **Zur Frage einer Prüfung von Mörtel auf Wasserdichtigkeit** - Dans : *Das Baugerwerbe*, **43, (13 S)**, pp. 885 - 886.
- KARSTEN, R. (1992) - **Bauchemie: Handbuch für Studium und Praxis** - Eds. MULLER, C.F. Verlag, Heidelberg, 425 p..
- KHALAF, F. I. et GABER, A. S. (2008) - **Occurrence of cyclic palustrine and calcrete deposits within the lower Pliocene hagul formation, east Cairo district, Egypt** - *Journal of African Earth Sciences*, **51, (5)**, pp. 298 - 312.
- KIM, M.-K., KWON, S.-I., JUNG, G.-B., KIM, M.-Y., LEE, S.-B. et LEE, D.-B. (2011) - **Phosphorus losses from agricultural soils to surface waters in a small agricultural watershed** - *Biosystems Engineering*, **109, (1)**, pp. 10 - 14.
- KLAPPA, C. F. (1978) - **Biolithogenesis of microcodium : elucidation** - *Sedimentology*, **25**, pp. 489 - 522.

- KLAPPA, C. F. (1979) - Lichen stromatolites: criterion for subaerial exposure and a mechanism for the formation of laminar calcrete (caliches) - *Journal of Sedimentary Petrology*, **49**, pp. 387 - 400.
- KLAPPA, C. F. (1980) - Rizholiths in terrestrial carbonates : classification recognition, genesis and significance - *Sedimentology*, **27**, pp. 613 - 629.
- KOHLER, S. J., BUFFAM, I., SEIBERT, J., BISHOP, K. H. et LAUDON, H. (2009) - Dynamics of stream water TOC concentrations in a boreal headwater catchment: Controlling factors and implications for climate scenarios - *Journal of Hydrology*, **373**, (1-2), pp. 44 - 56.
- KOPPI, A. J., EDIS, R., FIELD, D. J., GEERING, H. R., KLESSA, D. A. et COCKAYNE, D. J. H. (1996) - Rare earth element trends and cerium-uranium-manganese associations in weathered rock from Koongarra, northern territory, Australia - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **60**, pp. 1695 - 1707.
- KOWALINSKI, S., PONS, L. J. et SINGER, S. (1972) - Micromorphological comparison of three soils derived from loess in different climatic regions - *Geoderma*, **7**, pp. 141 - 158.
- KRUMBEIN, W. E. et GIELE, C. (1979) - Calcification in a coccoid; cyanobacterium associated with the formation of desert stromatolites - *Sedimentology*, **26**, pp. 593 - 604.
- KUULA, U., MCCARTHY, D. K., DERKOWSKI, A., FISCHER, T. B. et PRASAD, M. (2014) - Total porosity measurement in gas shales by the water immersion porosimetry (wip) method - *Fuel*, **117**, pp. 1115 - 1129.

L

- LACROIX, A. (1901) - *Minéralogie de la France et de ces anciens territoires d'Outre-mer* - Librairie A. BLANCHARD, Paris, 816 p..
- LAND, M., OHLANDER, B., INGRI, J. et THUNBERG, J. (1999) - Solid speciation and fractionation of rare earth elements in a spodosol prole from northern Sweden as revealed by sequential extraction - *Chemical Geology*, **160**, pp. 121 - 138.
- LAPLACE, P. S. (1806) - *Traité de Mécanique Céleste* - Eds. Courcier, Paris, 552 p..
- LATTMAN, L. H. (1973) - Calcium carbonate cementation of alluvial fans in southern Nevada - *Bulletin of Geological Society of America*, **84**, pp. 3013 - 3018.
- LAURAIN, M., ALLOUC, J., GUÉRIN, H., LE ROUX, J., COULON, M., FRIZON de LAMOTTE, D., MONCIARDINI, C. et P., M. (1990) - *Carte géologique de la France à 1/50000*,

- feuille 109 : Attigny - Orléans, BRGM, 1 feuille en couleur et une notice explicative par LAURAIN, M. *et al.*, 43 p.
- LAURAIN, M., MARRE, A. et GUERIN, H. (1997) - La cryosuccion : un des mécanismes de formation des poches de cryoturbation sur les substrats crayeux - *Annales de la Société Géologique du Nord*, **5**, (2), pp. 373 - 379.
- LAURAIN, M., GUERIN, H., MARRE, A. et RICHARD, J. (1995) - Processus génétiques à l'origine des formations de pente à graviers de craie en Champagne - *Permafrost and Periglacial Processes*, **6**, pp. 103 - 108.
- LAURENT, A. et FONDRILLON, M. (2010) - Mesurer la ville par l'évaluation et la caractérisation du sol urbain : l'exemple de Tours - *Revue Archéologique du Centre de la France*, **49**, pp. 307 - 343.
- LAURIOL, B. et CLARK, I. (1999) - Fissure calcretes in the arctic: a paleohydrologic indicator - *Applied Geochemistry*, **14**, (6), pp. 775 - 785.
- LAVEUF, C. et CORNU, S. (2009) - A review on the potentiality of rare earth elements to trace pedogenetic processes - *Geoderma*, **154**, (1-2), pp. 1 - 12.
- LAVEUF, C., CORNU, S. et JUILLOT, F. (2008) - Rare earth elements as tracers of pedogenetic processes - *Comptes Rendus Geosciences*, **340**, (8), pp. 523 - 532.
- LECUYER, C., GRANDJEAN, P., BARRAT, J.-A., NOLVAK, J., EMIG, C., FLORENTIN, P. et ROBARDET, M. (1998) - $\delta^{18}\text{O}$ and REE contents of phosphatic brachiopods: a comparison between modern and lower paleozoic populations - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **62**, pp. 2429 - 2436.
- LEDAIN, C., BALLIF, J.-L. et MULLER, J.-C. (1992) - Épandage des eau résiduaire de la sucrerie d'Arcis-sur-Aube ; Extension 1991 ; étude pédologique - *INRA - Travaux de la Station d'Agronomie de Châlons-sur-Marne*, **216**.
- LEDAIN, C. et MULLER, J.-C. (1988) - Étude pédologique du périmètre d'épandage des eaux résiduaire de la Coopérative Agricole de déshydratation de Recy (51) - *INRA - Travaux de la Station d'Agronomie de Châlons-sur-Marne*, **140**.
- LEGENDRE, A. (2003) - Reconnaissance des sols de surface ; application à la scarification - *Thèse de Troisième Cycle, Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand*, 204 p..
- LENOBLE, A. et MARTINAUD, M. (2003) - Apports du pénétromètre à la connaissance d'un site préhistorique ; le cas de l'abri de Diepkloof, Province du Cap, Afrique du Sud - *Revue d'Archéométrie*, **27**, pp. 27 - 36.

- LI, F., SHAN, X., ZHANG, T. et ZHANG, S. (1998) - **Evaluation of plant availability of rare earth elements in soils by chemical fractionation and multiple regression analysis** - *Environmental Pollution*, **102**, pp. 269 - 277.
- LI, X., HAN, Z., YANG, D. et CHEN, Y. (2006) - **REE geochemistry of Xiashu loess in Zhenjiang, Jiangsu province** - *Acta Pedologica Sinica*, **43**, pp. 1 - 7.
- LOISY, C. (1997) - **Les encroûtements carbonatés quaternaires en substrat crayeux (Est du Bassin de Paris) : rôle de la diagenèse et des actions biologiques** - *Thèse de Troisième Cycle, Université de Reims Champagne-Ardenne* - 289 p..
- LOISY, C. et PASCAL, A. (1998) - **Les encroûtements carbonatés (« calcrêtes ») en Champagne Crayeuse : rôles de la diagenèse et des actions biologiques sous climat tempéré** - *Bulletin de la Société Géologique de France*, **169**, (2), pp. 189 - 201.
- LOISY, C., VERRECCHIA, E. P. et DUFOUR, P. (1999) - **Microbial origin for pedogenic micrite associated with a carbonate paleosol (Champagne, France)** - *Sedimentary Geology*, **126**, (1-4), pp. 193 - 204.
- LONGMAN, M. W. (1980) - **Carbonate diagenetic textures from nearsurface diagenetic environments** - *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **64**, pp. 461 - 487.
- LOPEZ-ARCE, P., ZORNOZA-INDART, A., GOMEZ-VILLALBA, L., PEREZ-MONSERRAT, E. M., de BUERGO, M. A., VIVAR, G. et FORT, R. (2013) - **Archaeological ceramic amphorae from underwater marine environments: influence of ring temperature on salt crystallization decay** - *Journal of the European Ceramic Society*, **33**, (10), pp. 2031 - 2042.

M

- MACHETTE, M. (1985) - **Calcic soils of the south-western united states** - *Geological Society of America, Special Paper*, **203**, pp. 1 - 21.
- MACK, G., COLE, D. et TREVINO, L. (2000) - **The distribution and discrimination of shallow, authigenic carbonate in the pliocene-pleistocene Palomas Basin, southern Rio Grande rift** - *Geological Society of America Bulletin*, **112**, (5), pp. 643 - 656.
- MACK, G. et JAMES, W. (1994) - **Paleoclimate and the global distribution of paleosols** - *Journal of Geology*, **102**, pp. 360 - 366.

- MAQUAIRE, O., RITZENTHALER, A., FABRE, D., AMBROISE, B., THIERY, Y., TRUCHET, E., MALET, J. P. et MONNET, J. (2002) - **Caractérisation des profils de formations superficielles par pénétrométrie dynamique à énergie variable : application aux marnes noires de Draix (Alpes-de-Haute-Provence, France)** - *Comptes Rendus Géoscience*, **334**, pp. 835 - 841.
- MARY, B., SARACCO, G., PEYRAS, L., MERIAUX, P., VENNETIER, M. et ZANETTI, C. (2013) - **Vers la développement de méthodes géophysiques pour la détection de racines ligneuses dans les ouvrages hydrauliques en remblai** - 31^{èmes} Rencontres de l'Association Universitaire de Génie Civil, École Normale Supérieure de Cachan, 29-31 mai.
- MATHIEU, C. et LOZET, J. (2011) - **Dictionnaire encyclopédique de science du sol ; avec index anglais/français** - Eds. TEC & DOC, Paris, 733 p..
- MATSUOKA, N. (2001) - **Solifluction rates, processes and landforms: a global review** - *Earth-Science Review*, **55**, (1-2), pp. 107 - 134.
- MEGNIEN, C., MEGNIEN, F. et DEBRAND-PASSARD, S. (1980) - **Synthèse géologique du Bassin de Paris, stratigraphie et paléogéographie** - *Mémoires du BRGM*, **101**, 466 p..
- MELAS, F. F. et FRIEDMAN, G. M. (1992) - **Petrophysical characteristics of the Jurassic smackover formation, jay field, Conecuh embayment, Alabama and Florida** - *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **76** (1), pp. 81 - 100.
- MERTZ, J.-D. (1991) - **Structures de porosité et propriétés de transport dans les grès** - *Thèse de Troisième Cycle, Université Louis Pasteur de Strasbourg*, 149 p..
- MILLIERE, L., HASINGER, O., BINDSCHEDLER, S., CAILLEAU, G., SPANGENBERG, J. E. et VERRECCHIA, E. P. (2011) - **Stable carbon and oxygen isotope signatures of pedogenic needle fibre calcite** - *Geoderma*, **161**, (1-2), pp. 74 - 87.
- MILLOT, G., NAHON, D., PAQUET, H., RUELLAN, A. et TARDY, Y. (1977) - **L'épigénie calcaire des roches silicatées dans les encroutements carbonatés en pays sub-aride, Anti-Atlas, Maroc** - *Sciences Géologiques Bulletin*, **30**, (3), pp. 129 - 152.
- MOCOCHAIN, L., CLAUZON, G. et BIGOT, J.-Y. (2006) - **Réponses de l'endokarst ardéchois aux variations eustatiques générées par la crise de salinité messinienne** - *Bulletins de la Société Géologique de France*, **177**, (1), pp. 27 - 36.
- MONCIARDINI, C., ALCAYDE, G. et ROBAZYNSKI, F. (1980) - **Sénonien** - Dans : *Synthèse géologique du Bassin de Paris, Mémoires BRGM*, **101**, Orléans, pp. 302 - 309.
- MONICARD, R. (1975) - **Caractéristiques des roches réservoirs; analyse des carottes - cours de production de l'IFP**, 94 p..

- MOREAU, C. (2008) - **Vieillissement naturel en milieu urbain de pierres calcaires hydrofugées : évaluation de la durabilité des traitements et de leur impact sur le nettoyage** - *Thèse de Troisième Cycle, Université de Reims Champagne-Ardenne*, 200 p..
- MOSELEY, F. (1965) - **Plateau calcrete, calcreted gravels, cemented dunes and related deposits of the Maalleggh-Bomba region of Libya** - *Zeitschrift für Geomorphologie*, **9**, pp. 168 - 185.
- MOTTEU, H. (1967) - **Les systèmes d'unités** - *CSTC revue*, **4**, pp. 15 - 25.
- MUHS, D. R. (2013) - **Loess and its Geomorphic, Stratigraphic, and Paleoclimatic Significance in the Quaternary** - Dans : *Treatise on Geomorphology*, Academic Press, San Diego, pp. 149 - 183.
- MULLER, J.-C. et LEDAIN, C. (1987) - **Étude pédologique du périmètre d'épandage de la Coopérative de déshydratation et de séchage de l'Arne et Retourne, Pauvres (08)** - *INRA - Travaux de la Station d'Agronomie de Châlons-sur-Marne*, **137**.

N

- NADAH, J., BIGNONNET, F., DAVY, C. A., SKOCZYLAS, F., TROADEC, D. et BAKOWSKI, S. (2013) - **Microstructure and poro-mechanical performance of Haubourdin chalk** - *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **58**, (0), pp. 149 - 165.
- NAHON, D. et RUELLAN, H. (1975) - **Les accumulations de calcaire sur les marnes éocènes de la falaise de Thiès (Sénégal). Mise en évidence des phénomènes d'épigénie** - Dans : *Types de croûtes calcaires et leur répartition régionales*, Eds. VOGT, T., Strasbourg, pp. 7 - 11.
- NETTERBERG, F. (1967) - **Some road marking properties of south African calcretes** - Preceeding of the fourth Regional Conference for Africa Soil Mechanics and Foundation Engineering of the South African Institution of Civil Engineers, BALKEMA, A. A., Cape Town, p. 77 - 81.
- NETTERBERG, F. (1980) - **Geology of southern African calcretes: 1: terminology, description, macrofeatures and classification** - *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **83**, (2), pp. 255 - 283.
- NETTO, A. S. T. (1993) - **Pore-size distribution in sandstones** - *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **77**, (6), pp. 1101 - 1104.

Bibliographie

- NF-EN-1925 (1999) - AFNOR B10-613 : Méthodes d'essai pour pierres naturelles ; détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité - 10 p..
- NF-EN-1936 (2007) - AFNOR B10-615 : Méthodes d'essai pour pierres naturelles ; détermination de la densité réelle, de la densité apparente et de la porosité totale et ouverte - 10 p..
- NF-ISO-10693 (1995) - AFNOR : Qualité du sol ; Détermination de la teneur en carbonate ; méthode volumétrique - 10 p..
- NF-ISO-14235 (1998) - AFNOR : Qualité du sol ; Dosage du carbone organique par oxydation sulfochromique - 10 p..
- NICOULLAUD, B., DARTHOUT, R. et DUVAL, O. (1995) - Étude de l'enracinement du blé tendre d'hiver et du maïs dans les sols argilo-limoneux de Petite Beauce - *Étude et Gestion des Sols*, **2**, (3), pp. 183 - 200.

O

- OHLANDER, B., LAND, M., INGRI, J. et WIDERLUND, A. (1996) - Mobility of rare earth elements during weathering of till in northern Sweden - *Applied Geochemistry*, **11**, pp. 93 - 99.
- OULD-MOHAMED, S. et BRUAND, A. (1993) - Morphology and origin of secondary calcite in soils from Beauce, France - *Developments in Soil Science*, **22**, pp. 27 - 36.

P

- PALUMBO, B., BELLANCA, A., NERI, R. et ROE, M. J. (2001) - Trace metal partitioning in Fe-Mn nodules from Sicilian soils, Italy - *Chemical Geology*, **173**, pp. 257 - 269.
- PAPOULIS, D., TSOLIS-KATAGAS, P. et KATAGAS, C. (2004) - Monazite alteration mechanisms and depletion measurements in kaolins - *Applied Clay Science*, **24**, pp. 271 - 285.
- PEARSE, J. F., OLIVIER, T. R. et NEWITT, D. M. (1949) - The mechanisms of drying of solids : I. the forces giving rise to movement of water in granular beds during drying - *Transactions of the Institution of the Chemical Engineers*, **27**, pp. 1 - 8.
- PELLERIN, F. (1980) - La porosimétrie au mercure appliquée à l'étude géotechnique des sols et des roches - *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **106**, pp. 105 - 116.

- PEUGEOT, C. (1995) - **Influence de l'encroûtement superciel du sol sur le fonctionnement hydrologique d'un versant sahélien (Niger) ; expérimentations *in situ* et modélisation** - *Thèse de Troisième Cycle, Université Joseph Fourier de Grenoble*, 305 p..
- PFEIFER, P. et AVNIR, D. (1971) - **Chemistry in no-integer dimensions between 2 and 3; I: fractal theory of heterogeneous surfaces, Part 2: fractal surfaces of absorbants** - *The Journal of Chemical Physics*, **79**, (7), pp. 3558 - 3571.
- PHILIP, J.-R. (1957) - **Theory of infiltration: 4: sorptivity and algebraic infiltration equation** - *Soil Science*, **84**, pp. 257 - 264.
- PHILIPPONNAT, G. et HUBERT, B. (2007) - **Fondations et ouvrages en terre** - Eds. Eyrolles, Paris, 548 p..
- PICARD, S., LECUYER, C., BARRAT, J.-A., GARCIA, J.-P., DROMART, G. et SHEPPARD, S. M. F. (2002) - **Rare earth element contents of jurassic fish and reptile teeth and their potential relation to seawater composition (Anglo-Paris Basin, France and England)** - *Chemical Geology*, **186**, pp. 1 - 16.
- PINNA, D., SALVADORI, B. et GALEOTTI, M. (2012) - **Monitoring the performance of innovative and traditional biocides mixed with consolidants and water-repellents for the prevention of biological growth on stone** - *Science of The Total Environment*, **423**, pp. 132 - 141.
- PITTMAN, E. D. (1971) - **Microporosity in carbonate rocks** - *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **10**, pp. 1873 - 1881.
- PITTMAN, E. D. (1984) - **The pore geometries of reservoir rocks** - *American Institute of Physics Conference Proceedings*, **107**, (1), pp. 1 - 20.
- PITTMAN, E. D. (1992) - Relationship of porosity and permeability to various parameters derived from mercury injection-capillary pressure curves for sandstone - *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **76**, (2), pp. 191 - 198.
- POISEUILLE, J. L. M. (1842) - **Recherches expérimentales sur le mouvement des liquides dans les tubes de très petits diamètres** - *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, **15**, pp. 1167 - 1186.
- POMEL, A. (1972) - **Le Sahara ; observations de géologie et de géographie physique et biologique, avec des aperçus sur l'atlas et le soudan et discussion sur l'hypothèse de la mer saharienne à l'époque préhistorique** - *Bulletin de la Société Climatique d'Alger*, **8**, pp. 792 - 794.
- POMEROL, B., BELLIER, J.-P., DAMOTTE, R., FAUCONNIER, D., FOURAY, M., MANIVIT, H. et MONCIARDINI, C. (1983) - **Précisions lithostratigraphiques et**

- biostratigraphiques sur le Sénonien stratotypique** - *Géologie Méditerranéenne*, **10**, (3-4), pp. 15 - 29.
- POMEROL, C. (1974) - **Le Bassin de Paris** - Dans : *Géologie de la France*, DEBELMAS, J., Eds. Doin, Paris. 544 p..
- POMEROL, C. (1978) - **Évolution paléogéographique et structurale du Bassin de Paris, du Précambrien à l'actuel, en relation avec les régions avoisinantes** - *Géologie in Mijnbouw*, **57**, (4), pp. 533 - 543.
- POMEROL, C., MATHIEU, C., MAUCORPS, J., DUERMAEL, G., MONCIARDINI, C., LE CALVEZ, Y., COMBEMOREL, R. et M., P. (1975) - **Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 108 : Asfeld-la-Ville ; 1ère édition** - *Orléans, BRGM*, 1 feuille en couleur et une notice explicative par MAUCORPS, J et al., 16 p..
- PORTER, S. C. (2007). LOESS RECORDS - China. In : *Encyclopedia of Quaternary Science*. Elsevier, Oxford. pp. 14291440.
- POULENARD, J., DESCROIX, L., GONZALEZ-BARRIOS, J. L., VIRAMONTES, D. et JANEAU, J. (2005) - **Un encroûtement des sols limitant l'infiltration** - Dans : *La Sierra Madre occidentale : Un château d'eau menacé* - Eds. DESCROIX, L., ESTRADA, J., GONZALEZ-BARRIOS, J. L. et VIRAMONTES, D., IRD, pp. 155 - 169.
- PRICE, M., LOW, R. G. et McCANN, C. (2000) - **Mechanisms of water storage and flow in the unsaturated zone of the chalk aquifer** - *Journal of Hydrology*, **233**, (1-4), pp. 54 - 71.
- PRICE, W. A. (1933) - **Reynosa problem of south Texas, and origin of caliche** - *American Association of Petroleum Geology Bulletin*, **17**, (5), pp. 488 - 522.
- PURCELL, W. R. (1949) - **Capillary pressures: their measurement using mercury and the calculation of permeability there from** - *Journal of Petroleum Technology*, **2544**, pp. 39 - 48.
- PURVIS, K. et WRIGHT, V. P. (1991) - **Calcrete related to phreatophytic vegetation from middle Triassic otter sandstone of south west England** - *Sedimentology*, **38**, pp. 539 - 551.

R

- RAMSEY, B., DEE, M., LEE, S., NAKAGAWA, T. et STAFF, R. (2010) - **Developments in the calibration and modeling of radiocarbon dates ; radiocarbon** - *Journal of Rare Earths*, **52**, (3), pp. 953 - 961.

- RAN, Y. et LIU, Z. (1999) - **Contents and distribution of rare earth elements in main types of soil in china** - *Journal of Rare Earths*, **17**, pp. 213 - 217.
- RANKIN, P. C. et CHILDS, C. W. (1976) - **Rare-earth elements in iron-manganese concretions from some New Zealand soils** - *Chemical Geology*, **18**, pp. 55 - 64.
- REEDER, R. J. et AMERICA, M. S. O. (1983) - **Carbonates: mineralogy and chemistry** - Eds. Mineralogy Society of America, Washington D. C., Paris, 499 p..
- REIMER, P. J., BAILLIE, M. G. L., BARD, E., BAYLISS, A., BECK, J. W., BLACKWELL, P. G., BRONK RAMSEY, C., BUCK, C. E., BURR, G. S., EDWARDS, R. L., FRIEDRICH, M., GROOTES, P. M., GUILDERSON, T. P., HAJDAS, I., HEATON, T. J., HOGG, A. G., HUGHEN, K. A., KAISER, K. F., KROMER, B., McCORMAC, F. G., MANNING, S. W., REIMER, R. W., RICHARDS, D. A., SOUTHON, J. R., TALAMO, S., TURNEY, C. S. M., van der PLICHT, J. et WEYHENMEYER, C. E. (2009) - **Intcal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000years cal. BP** - *Radiocarbon*, **51**, (4), pp. 1111 - 1150.
- REIMER, P. J., BARD, E., BAYLISS, A., BECK, J. W., BLACKWELL, P. G., BRONK RAMSEY, C., BUCK, C. E., CHENG, H., EDWARDS, R. L., FRIEDRICH, M., GROOTES, P. M., GUILDERSON, T. P., HAFLIDASON, H., HAJDAS, I., HATTE, C., HEATON, T. J., HOFFMANN, D. L., HOGG, A. G., HUGHEN, K. A., KAISER, K. F., KROMER, B., MANNING, S. W., NIU, M., REIMER, R. W., RICHARDS, D. A., SCOTT, E. M., SOUTHON, J. R., STAFF, R. A., TURNEY, C. S. M. et van der PLICHT, J. (2013) - **Intcal13 and marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal. BP** - *Radiocarbon*, **55**, (4), pp. 1869 - 1887.
- REMY, J.-M. (1993) - **Influence de la structure du milieu poreux carbonaté sur les transferts d'eau et les changements de phase eau-glace ; application à la durabilité au gel de roches calcaires de Lorraine** - *Thèse de Troisième Cycle*, Institut National Polytechnique de Lorraine, 327 p..
- RENAULT-MISKOVSKY, J. (1992) - **La palynologie du quaternaire européen : chronostratigraphie-paléoclimatique et paléoenvironnement végétal de l'homme fossile** - *Géochronique*, **44**, pp. 21 - 24.
- RICHARD, J. (1996) - **L'altération des craies de Champagne : de l'analyse de terrain aux traceurs géochimiques** - *Thèse de Troisième Cycle*, Université de Reims Champagne-Ardenne, 240 p..
- RICHARD, J. et SIZUN, J.-P. (2011) - **Pressure solution-fracturing interactions in weakly cohesive carbonate sediments and rocks: example of the synsedimentary deformation of the campanian chalk from the Mons Basin (Belgium)** - *Journal of Structural Geology*, **33**, (2), pp. 154 - 168.

Bibliographie

- RIGBY, J. (1953) - **Some transverse stylolites** - *Journal of Sedimentary Petrology*, 23, (4), pp. 267 - 271.
- RILEM - II.4 (1980) - **Recommendations for the testing and use of constructions Material: BW-1 General recommendations for methods of testing load-bearing walls** - 7 p..
- RIVIERE, J.-M. et CRUCIANI, P.-M. (1970) - **Laon (3/4-7/8) ; Château-Porcien (1/2-5/6)** - *Service de Cartographie des Sols de la Chambre d'Agriculture de l'Aisne*, 241 p..
- ROALDSET, E. (1975) - **Rare earth element distributions in some precambrian rocks and their phyllosilicates, numedal, norway** - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39, pp. 455 - 469.
- ROBERTSON, J. D. (1936) - **The function of the calciferous glands of earthworms** - *Journal of Experimental Biology*, 13, pp. 279- 297.
- ROCHE, M. (1963) - **Hydrologie de surface** - Eds. Gauthier-Villars, Paris, 429 p..
- ROQUES, H. (1964) - **Contribution à l'étude statique et cinétique des systèmes gaz carbonique-eau-carbonates** - *Annales de Spéléologie*, 19, (2), pp. 255 - 484.
- ROUSSET-TOURNIER, B. (2001) - **Transferts par capillarite et évaporation dans des roches - rôle des structures de porosité** - *Thèse de Troisième Cycle, Université Louis Pasteur de Strasbourg*, 204 p..

S

- SASANIAN, S. et NEWSON, T. A. (2013) - **Use of mercury intrusion porosimetry for microstructural investigation of reconstituted clays at high water contents** - *Engineering Geology*, 158, pp. 15 - 22.
- SAUVAGE, J. (1954) - **Palynologie et pétrographie de tourbes et de sédiments de la cuvette parisienne et des Ardennes** - *Mémoires du Service de la Carte Géologique d'Alsace et de Lorraine*, 12, 69 p..
- SAVART, E. et BELNOT, E. (2001) - **Les milieux naturels remarquables de Champagne-Ardenne** - Direction Régionale de l'Environnement ; Champagne-Ardenne, 59 p..
- SCHLESINGER, W. H. (1985) - **The formation of caliche in soils of the Mojave desert, California** - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49, (1), pp. 57 - 66.
- SCHLUNDER, E. U. (1963) - **A simple procedure for measurement of vapor pressure over aqueous salt solutions; 3** - Dans : *Humidity and Moisture*, Eds. Rheinhold, New York. pp. 521 - 530.

- SCHMITT, J.-M. et SIMON-COINCON, R. (1985) - **La paléosurface infraliasique en Rouergue : dépôts sédimentaires et altérations associées** - *Bulletin du BRGM, Géologie de la France*, **2**, pp. 125 - 135.
- SCHROTH, M. N. et HILDEBRAND, D. C. (1992) - **Phytopathogenic Pseudomonads and related plant-associated Pseudomonads** - Dans : *The prokaryotes*, Eds. BALOWS, A., TRUPER, H. G., DWORKIN, W. H. et SCHLEIFER, K. H., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York. pp. 3104 - 3131.
- SCHWERTMANN, U., FISCHER, W. R. et TAYLOR, R. M. (1974) - **New aspects of iron oxide formation in soils** - 10th International Congress of Soil Science, Moscow.
- SERNANDER, R. (1894) - **Studier öfver den Gotländska vegetationens utvecklingshistoria** - Eds. Akademisk Afhandlin, Uppsala, 112 p..
- SIEPEL, C. E. (2001) - **Managing caliche in your yard** - Guide (New Mexico State University. Cooperative Extension Service), New Mexico State University, Cooperative Extension Service : College of Agriculture and Home Economics.
- SIZUN, J.-P. (1995) - **Modifications des structures de porosité de grès lors de la transformation pétrographiques dans la diagenèse et l'hydrothermalisme** - *Thèse de Troisième Cycle*, Université Louis Pasteur de Strasbourg, 256 p..
- SLEPECKY, R. et HEMPHILL, H. E. (1992) - **The genus Bacillus - Nonmedical** - Dans : *The prokaryotes*, Eds. BALOWS, A., TRUPER, H. G., DWORKIN, W. H. et SCHLEIFER, K. H., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York. pp. 1663 - 1696.
- SMETANA, J. F. (1842) - **Sjlozpyt čili fysika** - Nàkladem Českého Museum, **17**, 11 p..
- SMETTEM, K. R. J., PARLANGE, J. Y., ROSS, P., et HAVERKAMP, R. (1994) - **Three dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer; 1: a capillary based theory** - *Water Ressources Research*, **30**, pp. 2925 - 2929.
- SMITH, D. B., WEARN, P. L. et RICHARD, H. J. (1970) - **Water movement in the unsaturated zone of high and low permeability strata by measuring natural tritium** - Symposium de l'International Atomic Energy Agency, Vienne, 9-13 mars, pp. 73 - 87.
- SPANNEUT, B. (1997) - **Tourbe eau pure, fonctionnement hydrogéologique du bassin versant de la Tourbe** - 24 p..
- STIPP, S. L. S., CHRISTENSEN, J. T., LAKSHTANOV, L. Z., BAKER, J. A. et WAIGHT, T. E. (2006) - **Rare earth element (REE) incorporation in natural calcite: upper limits for actinide uptake in a secondary phase** - *Radiochimica Acta*, **94**, pp. 523 - 528.

STOOPS, G. J. (1976) - **On the nature of "lublinite" from Hollanta (Turkey)** - *American Mineralogist*, **61**, 172 p..

SUPKO, P. R. (1971) - **"Whisker" crystal cement in a Bahamian rock** - Dans : *Carbonate Cements*, Eds. BRICKER, O. P., *Studies in Geology*, **19**, Johns Hopkins University Press, Baltimore, pp. 143 - 146.

T

TALLON, J.-P. (1976) - **Influence de la texture sur certaines propriétés géotechniques des craies franches** - *Thèse de Troisième Cycle, Université Pierre et Marie Curie de Paris VI et ENSMP*, 253 p..

TAYLOR, R. M. et McLENNAN, S. M. (1985) - **The continental crust : its composition and evolution** - Eds. Blackwell, Oxford 312 p..

THIERY, M., VILLAIN, G. et JAAFAR, W. (2003) - **Estimation de la perméabilité des matériaux cimentaires par porosimétrie au mercure** - *Bulletin du Groupe Francophone d'Humidité et Transferts en Milieux Poreux (GFHN)*, **46, (49)**, pp. 139 - 144.

THOMACHOT, C. (2002) - **Modification des propriétés pétrophysiques de grès soumis au gel ou recouverts « d'encroutements noirs vernissés »** - *Thèse de Troisième Cycle, Université Louis Pasteur de Strasbourg*, 263 p..

THOMACHOT-SCHNEIDER, C., GOMMEAUX, M. et FRONTEAU, G. (2008) - **Modifications of the porous network of sandstone accompanying the formation of black varnish** - *Environmental Geology*, **56, (3)**, pp. 571 - 582.

THOMAS, W. (1938) - **Experiments on the Freezing of Certain Building Materials** - Technical paper, Eds. MADISON, H. M. Stationery Office, 146 p..

TO, J. et KAY, B. D. (2005) - **Variation in penetrometer resistance with soil properties: the contribution of effective stress and implication for pedotransfer function** - *Geoderma*, **126**, pp. 261 - 276.

TREADWELL-STEITZ, C. et McFADDEN, L. D. (2000) - **Influence of parent material and grain size on carbonate coatings in gravelly soils, Palo Duro wash, New Mexico** - *Geoderma*, **94, (1)**, pp. 1 - 22.

V

VACHIER, P., CAMBIERR, P. et PROST, R. (1979) - **Structure d'un milieu poreux : la craie** - *Annales Agronomiques*, **39, (3)**, pp. 247 - 263.

- van BRAKEL, J., MODRY, S. et SVATA, M. (1981) - **Mercury porosimetry: state of the art** - *Powder Technology*, **29**, pp. 1 - 12.
- van HEES, R. et ROB, P. J. (1996) - **Test methods for the evaluation of the *in situ* performance of water-repellent treatments** - *Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen*, **2**, (2), pp. 117 - 132.
- VANDERVAERE, J.-P. (1995) - **Caractérisation hydrodynamique du sol *in situ* par infiltrométrie à disques ; analyse critique des régimes pseudo-permanents, méthodes transitoires et cas des sols encroutés** - *Thèse de Troisième Cycle*, Université Joseph Fourier de Grenoble, 301 p..
- VANDERVAERE, J.-P., VAUCLIN, M., et ELRICK, D. E. (2000a) - **Transient flow from tension infiltrometers; I: the two-parameter equation** - *Soil Science Society of American Journal*, **64**, (4), pp. 1263 - 1272.
- VANDERVAERE, J.-P., VAUCLIN, M., et ELRICK, D. E. (2000b) - **Transient flow from tension infiltrometers; II: four methods to determine sorptivity and conductivity** - *Soil Science Society of American Journal*, **64**, (4), pp. 1273 - 1284.
- VANDEVOORDE, D., CNUDDLE, V., DEWANCKELE, J., BRABANT, L., de BOUW, M., MEYNEN, V. et VERHAIVEN, E. (2013) - **Validation of *in situ* applicable measuring techniques for analysis of the water adsorption by stone** - *Procedia Chemistry*, **8**, pp. 317 - 327.
- VANDEVOORDE, D., PAMPLONA, M., SCHALM, O., VANHELLEMONT, Y., CNUDDLE, V. et VERHAIVEN, E. (2009) - **Contact sponge method: Performance of a promising tool for measuring the initial water absorption** - *Journal of Cultural Heritage*, **10**, pp. 41 - 47.
- VAUDOUR, J. (1981) - **Travertins et croûtes calcaires** - Actes du Colloque de l'Association des Géographes Français : *Formations carbonatées externes, tufs et travertins*, Association Française de Karstologie, *Mémoire* 3, pp. 193 - 198.
- VERRECCHIA, A. P., DUMONT, J.-L. et VERRECCHIA, K. E. (1993) - **Role of calcium oxalate: biomineralisation by fungi in the formation of calcretes: a case study from Nazareth, Israel** - *Journal of Sedimentary Petrology*, **63**, pp. 1000 - 1006.
- VERRECCHIA, A. P., FREYTET, P., VERRECCHIA, K. E. et DUMONT, J.-L. (1995) - **Spherulites in calcrete laminar crust: biogenic CaCO₃ precipitation as a major contributor to crust formation** - *Journal of Sedimentary Research*, **A65**, pp. 690 - 700.
- VERRECCHIA, E. P. (1984) - **Analyse critique de la notion de calcrete ; introduction à l'étude microcyclothémique des croûtes, calcaires** - *Mémoire de D.E.A.*, Université de Paris-Sud, 177 p..

- VERRECCHIA, E. P. (1992) - **Le rôle de la sédimentation, de l'activité biologique et de la diagenèse dans l'édification des Nari-calcrêtes de Nazareth (Galilée, Israël)** - *Thèse de Troisième Cycle, Université Pierre et Marie Curie de Paris VI*, 339 p..
- VERRECCHIA, E. P. et DUMONT, J.-L. (1996) - **A biogeochemical model for chalk alteration by fungi in semiarid environment** - *Bio-geochemistry*, **35**, pp. 447 - 470.
- VERRECCHIA, E. P. et VERRECCHIA, K. E. (1994) - **Needle fiber calcite: a critical review and a proposed classification** - *Journal of Sedimentary Research*, **64**, pp. 650 - 664.
- VIENTOT, F. (2006) - **Introduction à la couleur : de l'expérience visuelle à la mesure** - 12^{èmes} Journées d'Etude de la SFIC « Couleur et Temps » : la couleur en conservation et restauration, Paris, 21 - 24 juin.
- VOGT, T. (1974) - **Étude en lame mince d'un dépôt quaternaire à encroûtement calcaire** - *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, **279, (D)**, pp. 1999 - 2002.
- VOGT, T. (1981) - **Croûtes calcaires et sols rouges en France méditerranéenne : trois exemples** - *Recherche Géographique*, **12**, pp. 13 - 22.
- VOGT, T. (1983) - **Croûtes calcaires : types et genèse** - *Thèse de Troisième Cycle, Université Louis Pasteur de Strasbourg*, 228 p..
- VOGT, T. et CORTE, A. E. (1996) - **Secondary precipitates in Pleistocene and present cryogenic environments (Mendoza Precordillera, Argentina, Transbailalia, Siberia and Seymour island, Antarctica)** - *Sedimentology*, **43**, pp. 53 - 64.

W

- WALTER, A. V. (1991) - **Caractérisation géochimique et minéralogique de l'altération de la carbonatite du complexe alcalin de Juquia (Brésil) ; comportement des terres rares dans les milieux phosphatés** - *Thèse de Troisième Cycle, Université d'Aix-Marseille 3*, 247 p..
- WALTER, A. V., NAHON, D., FLICOTEAUX, R., GIRARD, J. P. et MELFI, A. (1995) - **Behaviour of major and trace elements and fractionation of REE under tropical weathering of a typical apatite-rich carbonatite from brazil** - *Earth and Planetary Science Letters*, **136, (3-4)**, pp. 591 - 602.
- WAN, Y. et LIU, C. (2005) - **Study on adsorption of rare earth elements by kaolinite** - *Journal of Rare Earths*, **23**, pp. 377 - 381.
- WANG, Q., HUANG, B., GUAN, Z., YANG, L., et LI, B. (2001) - **Speciation of rare earth elements in soil by sequential extraction then HPLC coupled with visible and icp-ms detection: Fresenius** - *Journal of Analytical Chemistry*, **370**, pp. 1041 - 1047.

- WARDLAW, N. C. (1976) - **Pore geometry of carbonate rocks as revealed by pore casts and capillary pressure** - *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **60**, (2), pp. 245 - 257.
- WARDLAW, N. C. et McKELLAR, M. (1981) - **Mercury porosimetry and interpretation of pore geometry in sedimentary rocks and artificial models** - *Powder Technology*, **29**, pp. 127 - 143.
- WARDLAW, N. C., McKELLAR, M. et LI, Y. (1988) - **Pore and throat size distribution determined by mercury porosimetry and by direct observations** - *Carbonates and Evaporites*, **3**, (1), pp. 1 - 15.
- WASHBURN, E. W. (1921a) - **Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material** - *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **7**, pp. 116-116.
- WASHBURN, E. W. (1921b) - **The dynamics of capillary flow** - *Physical Review*, **13**, (3), pp. 273 - 283.
- WATTS, N. L. (1980) - **Quaternary pedogenetic calcretes from the Kalahari (Southern Africa): mineralogy, genesis and diagenesis** - *Sedimentology*, **27**, pp. 661 - 686.
- WIEDER, M. et YAALON, D. H. (1974) - **Effect of matrix composition on carbonate nodule crystallization** - *Geoderma*, **11**, pp. 95 - 121.
- WITTMANN, F. H., SIEMES, T. A. J. M. et VERHOEF, L. G. W. (1995) - **Surface treatment of building materials with water repellent agents** - Eds. Publikatieburo Bouwkunde, Uppsala, 364 p..
- WRIGHT, V. P. (1986) - **The role of fungal biomineralisation in the formation of early carboniferous soil fabrics** - *Sedimentology*, **33**, pp. 831 - 838.
- WRIGHT, V. P. (1990) - **A micromorphological classification of fossil and recent calcic and petrocalcic microstructures** - Dans : *Soil micro-morphology: a basic and applied science*, Eds. DOUGLAS, L. A., *Developments in Soil Science*, **19**, Elsevier, Amsterdam. pp. 401 - 407.
- WRIGHT, V. P. (2007) - **Calcrete** - Dans : *Geochemical Sediments and Landscapes*, Eds. NASH, D. J. et McLAREN, S. J., Blackwell, Oxford. pp. 10 - 45.
- WRIGHT, V. P., BECK, V. H. et SANZ-MONTERO, M. E. (1996) - **Spherulites in calcrete laminar crust: biogenic CaCO₃ precipitations as a major contributor to crust formation; discussion** - *Journal of Sedimentary Research*, **66**, pp. 1040 - 1041.

Bibliographie

WRIGHT, V. P., PLATT, N. H., et WIMBLEDON, W. A. (1988) - **Biogenic laminar calcretes: evidence of calcified root-mat horizons in paleosols** - *Sedimentology*, **35**, pp. 603 - 620.

WRIGHT, V. P. et TUCKER, M. E. (1991) - **Calcretes: An introduction** - Dans : *Calcretes*, Eds. WRIGHT, V. P. et TUCKER, M. E., Blackwell Publishing Ltd., pp. 1 - 22.

WRIGHT, W. D. (1928-29) - **A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours** - *Transactions of the Optical Society of London*, **30**, pp. 141 - 164.

X

XING, B. et DUDAS, M. J. (1993) - **Trace and rare earth element content of white clay soils of the three river plain, Heilongjiang province, p.r. China** - *Geoderma*, **58**, pp. 181 - 199.

Y

YAALON, D. H. (1988) - Calcic horizon and calcrete in acidic soils and paleosols: progress in the last twenty two years - *Soil Science Society of American Agronomy Abstracts*.

YAALON, D. H. et SINGER, S. (1974) - **Vertical variation in strength and porosity of calcrete (nari) on chalk, Shefela, Israel and interpretation of its origin** - *Journal of Sedimentary Petrology*, **44**, (4), pp. 1016 - 1023.

YAN, X.-P., KERRICH, R. et HENDRY, M. J. (1999) - **Sequential leachates of multiple grain size fractions from a clay-rich till, saskatchewan, canada: implications for controls on the rare earth element geochemistry of porewaters in an aquitard** - *Chemical Geology*, **158**, pp. 53 - 79.

YOUNG, T. (1805) - **An essay on the cohesion of fluids** - *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **95**, pp. 65 - 87.

Z

ZARRAGA, R., CERVANTES, J., SALAZAR-HERNANDEZ, C. et WHEELER, G. (2010) - **Effect of the addition of hydroxyl-terminated polydimethylsiloxane to teos-based stone consolidants** - *Journal of Cultural Heritage*, **11**, pp. 138 - 144.

ZHANG, S. et SHAN, X.-Q. (2001) - **Speciation of rare earth elements in soil and accumulation by wheat with rare earth fertilizer application** - *Environmental Pollution*, **112**, pp. 395 - 405.

- ZHENG, H., LI, W., MA, F., et KONG, Q. (2012). **The effect of a surface-applied corrosion inhibitor on the durability of concrete** - *Construction and building materials*, **37**, pp. 36 - 40.
- ZHOU, J. et CHAFETZ, H. S. (2009) - **Biogenic caliches in Texas: the role of organisms and effect of climate** - *Sedimentary Geology*, **222**, pp. 207 - 225.
- ZINSZNER, B. (1980) - **Généralités sur les relations entre les propriétés pétrophysiques matricielles et les caractéristiques pétrographiques des roches carbonatés** - *IFP Géologie*, **24**, 120 p..

LISTE DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES ILLUSTRATIONS

PREMIÈRE PARTIE : CONTEXTE GÉNÉRAL DE L'ÉTUDE5

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES HAC7

Figure I - 1 : Structures macroscopiques observables au sein des horizons d'accumulations carbonatées (d'après Zhou et Chafetz [2009]). A : rhizolithes (flèches rouges) ; B : Pisolithes (P) et C : croûtes laminaires (L).....10

Figure I - 2 : Structures microscopiques observables au sein des horizons d'accumulations carbonatées (d'après Zhou et Chafetz [2009]) (A, E, F et G : MEB et B, C et D : microscope optique). A : rhizolithes ; B : structure laminaire ; C : revêtement pisolithique ; D : ensemble de péloïdes ; E : filament calcifié ; F : calcisphère (flèche) ; G : sphérulite.....13

Figure I - 3 : Classification des arrangements de Needle Fiber Calcite (modifié d'après Verrecchia et Verrecchia [1994].17

Figure I - 4 : Représentation schématique des deux types de microstructures (alpha et bêta) dans les calcrêtes établis par Wright [1990 et 2007], modifié d'après Zhou et Chafetz [2009]......21

CHAPITRE II : LES HAC EN CHAMPAGNE-ARDENNE25

Figure II - 1 : Localisation géographique et administrative de la région Champagne-Ardenne et de ses quatre départements.26

Figure II - 2 : Localisation du bassin de Paris par rapport aux autres grands ensembles géologiques français.28

Figure II - 3 : Carte et coupe géologiques simplifiées du bassin de Paris.29

Figure II - 4 : Carte et coupe géologiques simplifiées du bassin de Paris.33

Figure II - 5 : Cryoclaste de craie dont l'eau porale a été extraite par le phénomène naturel hivernal de cryosuccion.35

Figure II - 6 : Poches de cryoturbation caractéristiques délimitées par des cheminées de poche.36

<i>Figure II - 7 : Schéma explicatif de la formation des poches de cryoturbation d'après Laurain et al. [1997].</i>	37
<i>Figure II - 8 : Schéma explicatif de la formation des graveluches par fluage des poches de cryoturbation (d'après [Bontrond et al., 2012].</i>	38
<i>Figure II - 9 : Sol strié observé lors d'une expertise géomorphologique réalisée pour le service archéologique de Reims Métropole [Bontrond et al., 2012].</i>	38
<i>Figure II - 10 : Représentation de la région Champagne-Ardenne sur un extrait des données Corine Land Cover 2006 (source : IGN-Géoportail).</i>	41
<i>Figure II - 11 : Carte de répartition des sites étudiés par Loisy [1997].</i>	43
<i>Figure II - 12 : Photographie d'un échantillon d'horizon d'accumulations carbonatées champenois.</i>	44
<i>Figure II - 13 : Les différents faciès de cryoclastes de craie rencontrable dans les horizons d'accumulations carbonatées champenois (modifié d'après Loisy [1997]).</i>	45
<i>Figure II - 14 : Répartition verticale des 5 phases présentes au sein du liant carbonaté des horizons d'accumulations carbonatées (d'après Loisy [1997]).</i>	48
<i>Figure II - 15 : Schéma représentant les hypothèses sur les stades de formation des horizons d'accumulations carbonatées champenois genèse (d'après Loisy [1997]).</i>	52
CHAPITRE III : RÉPARTITION RÉGIONALE DES HAC	55
<i>Figure III - 1 : Carte représentant l'ensemble des sites de la bibliographie situés en région Champagne-Ardenne ainsi que dans les terrains limitrophes proches.</i>	56
<i>Figure III - 2 : Exemple d'une fiche issue de la base de donnée établie dans cette étude.</i>	57
<i>Figure III - 3 : Illustration schématique des classes de topographie retenues pour l'analyse statistique.</i>	59
<i>Figure III - 4 : Effectifs des sites présentant un horizon d'accumulations carbonatées en fonction des différentes classes des variables établies.</i>	64
<i>Figure III - 5 : Répartition des sites présentant un horizon d'accumulations carbonatées en fonction de l'orientation topographique.</i>	66
CHAPITRE IV : SITES ÉTUDIÉS	69
<i>Figure IV - 1 : Localisation générale de l'ensemble des sites étudiés : Mont du Ménil, Aussonce-Est, Aussonce-Nord-Ouest et Vieux-Mont (source : IGN-Géoportail).</i>	Erreur ! Signet non défini.
<i>Figure IV - 2 : Localisation des sites Mont du Ménil, Aussonce-Est et Aussonce-Nord-Ouest sur un extrait de la carte topographique (source : IGN-Géoportail).</i>	71

<i>Figure IV - 3 : Localisation des sites du Mont du Ménéil, d'Aussonce-Est et Aussonce-Nord-Ouest sur un extrait des cartes géologiques d'Asfeld-la-Ville [Pomerol et al., 1975] et d'Attigny [Laurain et al., 1990]. Légende : c4-6g et c5b-c : craie du Sénonien ; GP, GPA et GPL : graveluches (plus ou moins argileuses) ; CGP : coulées limono-crayeuses ; LP et B : limons des plateaux (source : BRGM-Infoterre).</i>	72
<i>Figure IV - 4 : Panorama de la zone du front de taille étudiée de l'ancienne carrière du Mont du Ménéil. RS : RENDOSOL ; HAC : horizon d'accumulations carbonatées ; GSP : grèzes et C : craie.</i>	73
<i>Figure IV - 5 : Schéma représentant une coupe de l'ancien front de taille de la carrière du Mont du Ménéil.</i>	75
<i>Figure IV - 6 : Présentation des deux profils étudiés au niveau de l'ancien front de taille de la carrière du Mont du Ménéil.</i>	76
<i>Figure IV - 7 : Présentation du profil supplémentaire (profil 3) étudié sous bois sur le site du Mont du Ménéil.</i>	77
<i>Figure IV - 8 : Représentation schématique des trois profils étudiés sur le site du Mont du Ménéil (ancien front de taille et profil supplémentaire sous bois).</i>	78
<i>Figure IV - 9 : Photographies des profils supplémentaires d'Aussonce-Nord-Ouest et Aussonce-Est.</i>	80
<i>Figure IV - 10 : Localisation du site de la carrière du Vieux Mont sur la carte topographique (source : IGN-Géoportail).</i>	81
<i>Figure IV - 11 : Localisation du site de la carrière du Vieux Mont sur la carte géologique d'Asfeld-la-Ville (source : BRGM-Infoterre).</i>	82
<i>Figure IV - 12 : Prélèvement à la scie des blocs massifs in situ.</i>	83
<i>Figure IV - 13 : Échantillon type utilisé pour les études de transferts hydriques en laboratoire.</i>	84
<i>Figure IV - 14 : Échantillons types utilisés pour les analyses de porosimétrie par injection de mercure.</i>	85

DEUXIÈME PARTIE : CONTEXTE GÉNÉRAL DE L'ÉTUDE87

CHAPITRE V : MÉTHODES ET TECHNIQUES DE CARACTÉRISATION89

<i>Figure V - 1 : Exemple de représentation de l'Atlas de Munsell présentant les trois paramètres utilisés : teinte, clarté et saturation.</i>	90
<i>Figure V - 2 : Graphique de sensibilités des cônes rétinien humains en fonction de la longueur d'onde. A : Système RGB et B : système XYZ.</i>	91

<i>Figure V - 3 : Diagramme de chromaticité représentant couleurs dans un espace bi-dimensionnel à l'aide des coordonnées de chrominance x et z pour une luminance donnée z.</i>	92
<i>Figure V - 4 : Diagramme représentant une coupe réalisée dans l'espace colorimétrique CIE $L^*a^*b^*$ à b constant. Illustration du calcul des différences ($L^*c1 - L^*c2$ sur l'axe de la luminosité et $a^*c1 - a^*c2$ sur l'axe rouge/vert).</i>	94
<i>Figure V - 5 : Schéma général du Pénétrömètre Autonome Numérique Dynamique Assisté par ordinateur (PANDA)d'après Maquaire [2002].</i>	97
<i>Figure V - 6 : Courbe type d'un essai au pénétromètre dynamique léger à énergie variable.</i>	99
<i>Figure V - 7 : Plan de prélèvement des échantillons utilisés pour l'étude géochimique des majeurs et traces.</i>	101
<i>Figure V - 8 : Schéma de réalisation des lames minces sur les blocs sous-échantillonnés en laboratoire.</i>	103
<i>Figure V - 9 : Protocole pour le calcul du pourcentage surfacique de cryoclastes par analyse d'image à partir des lames minces.</i>	104
<i>Figure V - 10 : Mécanismes de piégeage d'air lors d'une imbibition capillaire : A : piégeage par dérivation ; B : piégeage lié à une rugosité de surface [Bousquié, 1979].</i>	107
<i>Figure V - 11 : Mode opératoire des mesures de porosité totale à l'eau.</i>	110
<i>Figure V - 12 : Adaptation de la méthode de mesure de porosité totale aux échantillons étudiés.</i>	112
<i>Figure V - 13 : Illustration de l'équation de Young [1805] en projection sur le plan solide.</i>	113
<i>Figure V - 14 : Illustration du concept de mouillabilité d'un liquide.</i>	114
<i>Figure V - 15 : Représentation schématique des différentes variables en jeu lors de l'ascension d'un liquide dans un tube capillaire (exemple du mercure) : P_0 : Pression du gaz ; P_l : Pression du liquide ; α : angle de contact ; r : rayon du ménisque ; R : rayon de courbure du ménisque.</i>	115
<i>Figure V - 16 : Schéma explicatif de la notion de rayon d'accès aux pores essentielle en porosimétrie par intrusion de mercure ; sous-estimation de la macroporosité et surestimation de la microporosité [modifié d'après Thomachot, 2002 et Bousquié, 1979].</i>	118
<i>Figure V - 17 : Pénétrömètre utilisé en porosimétrie par intrusion de mercure : A : cloche ouverte et B : cloche fermée.</i>	119
<i>Figure V - 18 : Courbes théoriques d'un essai porosimétrique : A : Intrusion cumulée ; B : dérivée au logarithme du rayon.</i>	121

<i>Figure V - 19 : Méthode de détermination des rayons moyens d'un échantillon par la méthode des tangentes.</i>	<i>123</i>
<i>Figure V - 20 : Schéma d'échantillonnage des fragments étudiés en porosimétrie par injection de mercure.</i>	<i>126</i>
<i>Figure V - 21 : Porosimètre par intrusion de mercure AutoPore IV 950 Analyser de Micromeritics utilisé dans le cadre de ce travail.</i>	<i>128</i>
<i>Figure V - 22 : Schéma de localisation du fragment de charbon découvert en position centrale de l'HAC prélevé sur le site d'Aussonce-Est.</i>	<i>129</i>
<i>Figure V - 23 : Fragment de charbon daté au carbone 14. A : vue macroscopique ; B à D : vues au microscope électronique à balayage.</i>	<i>129</i>
CHAPITRE VI : RÉSULTATS DE LA CARACTÉRISATION DES HAC	131
<i>Figure VI - 1 : Visualisation des mesures de colorimétrie en coordonnées y et x dans le diagramme de chromaticité CIE-xy (observateur standard 2 °, 1931) au sein des RENDOSOLS, des HAC, des grèzes et de la craie au niveau des trois profils étudiés au Mont du Ménil. Les rectangles rouges indiquent les zones agrandies présentées sur les graphiques de droite.</i>	<i>132</i>
<i>Figure VI - 2 : Diagramme ternaire présentant les trois composantes L*, a* et b* au sein des RENDOSOLS, des HAC, des grèzes et de la craie au niveau des trois profils étudiés au Mont du Ménil.</i>	<i>134</i>
<i>Figure VI - 3 : Évolution verticale de la teneur en carbonate de calcium total pour les 3 profils étudiés au Mont du Ménil.</i>	<i>136</i>
<i>Figure VI - 4 : Évolution verticale de la teneur en carbone organique total pour les 3 profils étudiés au Mont du Ménil.</i>	<i>137</i>
<i>Figure VI - 5 : Teneurs en éléments majeurs dans le profil 1 du Mont du Ménil.</i>	<i>138</i>
<i>Figure VI - 6 : Teneurs en éléments majeurs dans le profil 2 du Mont du Ménil.</i>	<i>139</i>
<i>Figure VI - 7 : Teneurs en éléments majeurs dans le profil 3 du Mont du Ménil.</i>	<i>139</i>
<i>Figure VI - 8 : Rapports entre les teneurs en éléments majeurs et SiO₂ dans les horizons étudiés des 3 profils étudiés du Mont du Ménil.</i>	<i>141</i>
<i>Figure VI - 9 : Teneurs en éléments majeurs du RENDOSOL, de l'HAC et des grèzes rapportées à SiO₂ et normalisées à la craie pour les profils 1 et 2 du Mont du Ménil.</i>	<i>143</i>
<i>Figure VI - 10 : Teneurs en éléments majeurs du RENDOSOL, de l'HAC et des grèzes rapportées à SiO₂ et normalisées à la craie pour le profil 3 du Mont du Ménil.</i>	<i>144</i>
<i>Figure VI - 11 : Teneurs en éléments majeurs du RENDOSOL et de l'HAC rapportées à SiO₂ et normalisées aux grèzes pour les profils 1 et 2 du Mont du Ménil.</i>	<i>145</i>

<i>Figure VI - 12 : Teneurs en éléments majeurs du RENDOSOL et de l'HAC rapportées à SiO₂ et normalisées aux grèzes pour le profil 3 du Mont du Ménil.</i>	<i>146</i>
<i>Figure VI - 13 : Analyse en composantes principales réalisée sur l'ensemble des éléments majeurs pour l'ensemble des horizons des trois profils étudiés au Mont du Ménil.</i>	<i>147</i>
<i>Figure VI - 14 : Contenu total en terres rares au sein des trois profils étudiés au Mont du Ménil.</i>	<i>149</i>
<i>Figure VI - 15 : Pourcentages de gain/perte en terres rares normalisés au substrat crayeux ainsi qu'aux grèzes pour les trois profils étudiés au Mont du Ménil.</i>	<i>150</i>
<i>Figure VI - 16 : Analyse en composantes principales réalisée sur l'ensemble des terres rares pour l'ensemble des horizons des trois profils étudiés au Mont du Ménil.</i>	<i>151</i>
<i>Figure VI - 17 : Diagramme général des concentrations en terres rares pour les RENDOSOLS, les HAC, les grèzes et la craie normalisées à la croûte continentale (U.C.C.) pour l'ensemble des profils étudiés sur le site du Mont du Ménil.</i>	<i>153</i>
<i>Figure VI - 18 : Diagramme des concentrations en terres rares pour les RENDOSOLS, les HAC, les grèzes et la craie normalisées à la croûte continentale supérieure (U.C.C.) pour chacun des trois profils étudiés sur le site du Mont du Ménil.</i>	<i>154</i>
<i>Figure VI - 19 : Diagramme général des concentrations en terres rares pour les RENDOSOLS, les HAC et les grèzes normalisées au substratum crayeux pour l'ensemble des profils étudiés sur le site du Mont du Ménil.</i>	<i>155</i>
<i>Figure VI - 20 : Diagramme des concentrations en terres rares pour les RENDOSOLS, les HAC et les grèzes normalisées à la craie pour chacun des trois profils étudiés sur le site du Mont du Ménil.</i>	<i>156</i>
<i>Figure VI - 21 : Rapports entre les teneurs en éléments majeurs et la teneur totales en terres rares dans les horizons étudiés des 3 profils étudiés du Mont du Ménil.</i>	<i>157</i>
<i>Figure VI - 22 : Pénétrogrammes obtenus le long de l'ancien front de taille de la carrière du Mont du Ménil. Les limites des différents horizons ont été placées à l'aide des observations in situ.</i>	<i>159</i>
<i>Figure VI - 23 : Pénétrogramme obtenu sous le bois du Mont du Ménil (profil 3).</i>	<i>160</i>
<i>Figure VI - 24 : Diffractogrammes obtenu pour les 4 horizons étudiés au niveau du profil 1 du Mont du Ménil.</i>	<i>161</i>
<i>Figure VI - 25 : Échantillons de craie observés au microscope électronique à balayage. A : vue générale ; B, C et D : vues de quelques coccolithes particuliers (respectivement <i>Discorhabdus bellis</i> n. sp., <i>Stradneria crenulata</i> et <i>Cylindralithus biarcus</i>).</i>	<i>162</i>
<i>Figure VI - 26 : Pourcentage (surfacique) de cryoclastes au sein des profils 1 et 2 en fonction de la profondeur.</i>	<i>163</i>

- Figure VI - 27 : Macro-cryoclastes observés au microscope optique en LPA (A à E) et au MEB (F). A : différents macrocryoclastes (CR) entourés par une couche de matrice détritique (MD) ; B : macro-cryoclaste présentant un contour relativement lisse (microfossile visible à gauche) ; C : macro-cryoclaste avec contour relativement bien altéré (couche de matrice détritique également observable) ; D : agrandissement d'un cryoclaste au contour très altéré (limite entre contour altéré du macro-cryoclaste et revêtement de matrice détritique figuré en pointillés) ; E : macro-cryoclaste avec altération importante ; F : vue des éléments microscopiques présents dans les cryoclastes. 165
- Figure VI - 28 : Agrégats de micro-cryoclastes et de matrice détritique observés au microscope optique en LPA (A à E) et au MEB (F). A : vue générale d'un agrégat (des micro-cryoclastes cr dont le contour est assez bien défini sont emballés dans de la matrice détritique MD) ; B : agrégat jouxtant un macro-cryoclaste (des micro-cryoclastes relativement petits se distinguent dans le fond matriciel détritique) ; C : les micro-cryoclastes les plus petits présentent un contour assez mal défini ; D : deux agrégats dont les micro-cryoclastes présentent un contour assez mal défini (la macroporosité est ici très peu présente) ; E : agrégat présentant une définition de contour variable et une macroporosité assez marquée ; F : composition d'un agrégat vue au MEB. 167
- Figure VI - 29 : Agrégats micro-cryoclastes/matrice détritique caractéristiques des grèzes (A à C) et des HAC (D à F) vus au microscope optique en LPA. ag : agrégat micro-cryoclastes/matrice détritique ; CR : macro-cryoclaste ; PC : porosité de canaux. 168
- Figure VI - 30 : Aiguilles de calcite observées au MEB (A à E) ainsi qu'au microscope optique en LPA. A et B : aiguilles de calcite isolées ; C et D : aiguilles de calcite vues en contexte : placage qui présente peu d'organisation sur des éléments crayeux et détritiques ; E : structures ordonnées en ponts ; F : aiguilles de calcite parfois réparties de manière aléatoire ou en structures pontées. 170
- Figure VI - 31 : Aiguilles de calcite en structures pontées vues au microscope optique en LPA (A à C) ainsi qu'au MEB (D). 171
- Figure VI - 32 : Aires ouvertes observées dans les grèzes (A, B, D (LPA) et F (MEB)) et dans les HAC (C (LPA) et E (MEB)). Dans les grèzes, les aires ouvertes sont de taille moyenne et semblent plutôt bien organisées. Dans les HAC, ces entités sont généralement plus grandes et présentent un aspect très désorganisé. 172
- Figure VI - 33 : Panorama d'une aire ouverte exceptionnellement grande observée dans un échantillon d'HAC et visualisation de la zone de fantômisation. 173
- Figure VI - 34 : Graphique représentant les valeurs de porosités totales à l'eau N_{t} ainsi que les valeurs de porosités totales par injection de mercure N_{Hg} en fonction de la profondeur pour les 3 profils étudiés au Mont du Ménil. 176

<i>Figure VI - 35 : Courbes de restitution des essais au porosimètre à mercure caractéristiques des échantillons de craie prélevés au droit des profils 1 et 2 du Mont du Ménil.</i>	<i>177</i>
<i>Figure VI - 36 : Coefficients de dispersion Cd de l'ensemble des niveaux étudiés dans les trois profils du Mont du Ménil en fonction de la profondeur.</i>	<i>178</i>
<i>Figure VI - 37 : Courbes de restitution des essais au porosimètre à mercure caractéristiques des échantillons de cryoclastes de craie extraits des 3 profils du Mont du Ménil.</i>	<i>179</i>
<i>Figure VI - 38 : Courbes de restitution des essais au porosimètre à mercure caractéristiques des échantillons de grèzes prélevés sur les 3 profils du Mont du Ménil.</i>	<i>180</i>
<i>Figure VI - 39 : Courbes de restitution des essais au porosimètre à mercure obtenues pour les échantillons d'HAC prélevés sur les 3 profils du Mont du Ménil.</i>	<i>182</i>
<i>Figure VI - 40 : Dimensions fractales moyennes (et écarts-types) obtenues par porosimétrie par injection de mercure pour les HAC, les grèzes et la craie des profils 1 et 2 du Mont du Ménil.</i>	<i>183</i>

CHAPITRE VII : DISCUSSION PARTIELLE..... 185

<i>Figure VII - 1 : Schématisation de la micromorphologie générale des HAC ainsi que des grèzes (légende figure suivante).....</i>	<i>190</i>
<i>Figure VII - 2 : Légende de la figure précédente schématisant la micromorphologie générale des HAC ainsi que des grèzes.....</i>	<i>191</i>

TROISIÈME PARTIE : TRANSFERTS HYDRIQUES DANS LES HAC.....195

CHAPITRE VIII : MÉTHODES ET TECHNIQUES D'ÉTUDE DES TRANSFERTS HYDRIQUES..... 197

<i>Figure VIII - 1 : Schéma du dispositif utilisé pour les tests d'absorptions capillaires.....</i>	<i>203</i>
<i>Figure VIII - 2 : Photographie d'un échantillon en cours de test d'imbibition capillaire...203</i>	
<i>Figure VIII - 3 : Courbe caractéristique de restitution des tests d'imbibition capillaire....204</i>	
<i>Figure VIII - 4 : Les différents types de réseaux poreux définis par l'allure des courbes d'imbibition capillaire. A : réseau unimodal ; B : réseau bimodal ; C : réseau hétérogène. [d'après Mertz, 1991].</i>	<i>206</i>
<i>Figure VIII - 5 : Schéma du dispositif expérimental utilisé pour les tests de cinétiques de séchage.....</i>	<i>212</i>

<i>Figure VIII - 6 : Courbe typique de restitution des tests de séchage : S_c : saturation critique et t_{Sc} : temps critique [d'après Rousset-Tournier, 2001].</i>	213
<i>Figure VIII - 7 : Schéma du dispositif de mesure d'infiltration à la pipette de Karsten.</i>	215
<i>Figure VIII - 8 : Courbe typique de restitution des tests d'infiltration à la pipette de Karsten.</i>	216
<i>Figure VIII - 9 : Schéma général de l'infiltromètre à disque [d'après Vandervaere, 1995].</i>	219
<i>Figure VIII - 10 : Graphiques typiques obtenus grâce aux données d'infiltrométrie à disque. A : lame d'eau infiltrée ; B : flux d'infiltration et C : estimation de la sorptivité capillaire S.</i>	220
CHAPITRE IX : RÉSULTATS OBTENUS POUR LES TRANSFERTS HYDRIQUES	223
<i>Figure IX - 1 : Variations du coefficient de prise de poids en eau, de coefficient de progression de la frange capillaire ainsi que de la porosité capillaire en fonction de la profondeur le long des profils étudiés sur le site du Mont du Ménil.</i>	224
<i>Figure IX - 2 : Courbes issues des tests d'imbibitions capillaires sur les trois horizons (horizon d'accumulations carbonatées, grèzes et craie) des trois profils étudiés sur le site du Mont du Ménil. Le coefficient d'absorption d'eau C_1 moyen est donné en $g.m^{-2}.s^{-1/2}$.</i>	225
<i>Figure IX - 3 : Courbes issues des tests d'imbibitions capillaires sur les trois horizons (HAC, grèzes et craie) des trois profils étudiés sur le site du Mont du Ménil. Le coefficient de capillarité (coefficient de progression de la frange capillaire) C_2 moyen est donné en $m.s^{-1/2}$.</i>	226
<i>Figure IX - 4 : Courbes types de saturation des échantillons prélevés sur les trois horizons (HAC, grèzes et craie) des trois profils étudiés sur le site du Mont du Ménil. La porosité capillaire moyenne N_{cap} moyen est donnée en %.</i>	227
<i>Figure IX - 5 : Courbes représentant le flux d'évaporation ainsi que la saturations critique en fonction de la profondeur le long des profils étudiés sur le site du Mont du Ménil.</i>	229
<i>Figure IX - 6 : Courbes issues des tests d'évaporations sur les trois horizons (HAC, grèzes et craie) des trois profils étudiés sur le site du Mont du Ménil. Le flux d'évaporation F moyen est donné en $g.m^{-2}.s^{-1}$.</i>	230
<i>Figure IX - 7 : Courbes issues des tests d'évaporations sur les trois horizons (HAC, grèzes et craie) des trois profils étudiés sur le site du Mont du Ménil. La saturation critique S_c moyenne est donnée en %.</i>	231
<i>Figure IX - 8 : Courbes représentant les absorptions d'eau moyennes (pipette de Karsten) ainsi que les sorptivités capillaires (infiltrométrie à disque) en fonction de la profondeur le long des profils étudiés sur le site du Mont du Ménil.</i>	233

CHAPITRE X : DISCUSSION PARTIELLE	235
<i>Figure X - 1 : Schématisation des transferts hydriques par capillarité et lors des évaporation au sein des HAC, des grèzes et de la craie (légende page suivante).</i>	<i>237</i>
<i>Figure X - 2 : Légende de la figure de la page précédente concernant la schématisation des transferts hydriques par capillarité et lors des évaporation au sein des HAC, des grèzes et de la craie.</i>	<i>238</i>
 DISCUSSION GÉNÉRALE	 239
<i>Figure discussion - 1 : Schéma général du fonctionnement hydrologique des profils de sol avec horizon d'accumulations carbonatées en périodes de saturation (septembre à avril).</i>	<i>246</i>
<i>Figure discussion - 2 : Schéma général du fonctionnement hydrologique des profils de sol avec horizon d'accumulations carbonatées en périodes de désaturation (mai à août).</i>	<i>247</i>
<i>Figure discussion - 3 : Illustration de l'hypothèse de porogenèse et poronécrose synchrones pour expliquer les porosités totales plus importantes observées dans les HAC.</i>	<i>254</i>
<i>Figure discussion - 4 : Fine couche d'accumulation calcaire observée au sommet de la craie après décapage des graveluches sus-jacentes (photographie de Gilles Fronteaux).</i>	<i>256</i>
<i>Figure discussion - 5 : Schéma expliquant la présence préférentielle actuelle des HAC en fonction des compléments apportés par cette étude sur leur genèse.</i>	<i>262</i>

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

PREMIÈRE PARTIE : CONTEXTE GÉNÉRAL DE L'ÉTUDE 5

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES HAC 7

Tableau I - 1 : Classification morphologique des calcrêtes (issue de Wright et Tucker [1991] d'après Netterberg [1967 et 1980] puis Goudie [1983]). 20

Tableau I - 2 : Classification des calcrêtes pédogéniques basée sur les 6 stades de développement (simplifiée de Wright et Tucker [1991] d'après Machette [1985]). Teneur en graviers élevée : > 50 % ; faible : < 20 %...... 20

CHAPITRE III : RÉPARTITION RÉGIONALE DES HAC 55

Tableau III - 1 : Intervalle azimutal pour chacune des 16 classes d'orientation définies par la rose des vents...... 62

Tableau III - 2 : Ensemble des effectifs des sites présentant ou non un HAC en fonction des différentes variables et classes établies...... 63

Tableau III - 3 : Effectifs des sites présentant ou non un horizon d'accumulations carbonatées en fonction des différentes classes d'orientation topographiques. 65

DEUXIÈME PARTIE : CONTEXTE GÉNÉRAL DE L'ÉTUDE..... 87

CHAPITRE V : MÉTHODES ET TECHNIQUES DE CARACTÉRISATION 89

Tableau V - 1 : Concentrations en terres rares dans la croûte continentale supérieure (U.C.C.) d'après Taylor et McLennan [1985]...... 100

Tableau V - 2 : Limites des différentes classes de porosité en fonction des auteurs et des modes d'étude...... 108

CHAPITRE VI : RÉSULTATS DE LA CARACTÉRISATION DES HAC 131

Tableau VI - 1 : Valeur du coefficient de différence de couleur $\Delta E^ L^* a^* b^*$ calculé entre le RENDOSOL, l'HAC, les grèzes ainsi que la craie pour chacun des trois profils étudiés au Mont du Ménil.*..... 134

<i>Tableau VI - 2 : Synthèse des différences HAC/grèzes en fonction des différentes entités micromorphologiques déterminées.....</i>	<i>174</i>
--	------------

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE.....263

<i>Tableau conclusion - 1 : Synthèse des caractéristiques étudiées : singularité des HAC de Champagne-Ardenne.....</i>	<i>267</i>
--	------------

ANNEXES

LISTE DES ANNEXES

TABLEAU DE VALEURS

Caractérisation	329
Eléments majeurs	331
Terres rares	333
Transferts hydriques	335

AUTRES DONNÉES

Rapport de datation ¹⁴ C	337
---	-----

ADMINISTRATIF SUR MÉMOIRE DE THÈSE

Pré-rapport de Corinne Loisy	339
Pré-rapport d'Yves Géraud	343

ADMINISTRATIF GÉNÉRAL

Procès verbal de soutenance de thèse	345
Rapport de soutenance de thèse	347

TABLEAU DE VALEURS : CARACTÉRISATION

Méthode	Valeur mesurée	Unité	Profil 1				Profil 2				Profil 3		
			Rendosol	HAC	Grèzes	Craie	Rendosol	HAC	Grèzes	Craie	Rendosol	HAC	Grèzes
Colorimétrie	X	sans unité	15,1 ± 0,9	28,3 ± 2,0	32,2 ± 1,9	74,7 ± 0,8	24,1 ± 1,4	43,8 ± 2,3	30,4 ± 3,5	74,4 ± 2,1	17,2 ± 0,9	31,8 ± 3,3	30,4 ± 4,4
	Y	sans unité	14,6 ± 0,9	28,2 ± 2,1	32,1 ± 2,0	76,2 ± 0,8	23,8 ± 1,4	44,1 ± 2,3	30,1 ± 3,5	75,9 ± 2,1	16,5 ± 0,9	31,6 ± 3,4	30,0 ± 4,6
	Z	sans unité	12,0 ± 0,7	25,2 ± 2,0	25,9 ± 1,8	79,3 ± 1,3	20,8 ± 1,1	43,8 ± 2,5	24,7 ± 3,1	79,1 ± 3,1	13,2 ± 0,6	26,3 ± 3,2	24,5 ± 5,4
	L *	sans unité	46,5 ± 1,3	60,3 ± 1,8	62,8 ± 1,6	89,9 ± 0,4	57,7 ± 1,4	71,3 ± 1,5	60,2 ± 3,1	89,8 ± 1,0	49,1 ± 1,2	62,7 ± 2,7	61,5 ± 4,0
	a *	sans unité	4,6 ± 0,2	2,8 ± 0,2	2,9 ± 0,3	0,1 ± 0	3,1 ± 0,1	1,5 ± 0,2	3,3 ± 0,4	0,1 ± 0,1	5,2 ± 0,3	3,2 ± 0,5	3,6 ± 1,0
	b *	sans unité	11,9 ± 0,5	12,1 ± 0,6	16,0 ± 0,6	7,6 ± 0,4	11,7 ± 0,5	9,2 ± 1,0	15,0 ± 1,2	7,5 ± 0,7	13,5 ± 1,2	15,4 ± 1,1	15,9 ± 2,5
Nombre d'échantillons			10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	20
Géochimie (partiel)	CaCO ₃ total	g.kg ⁻¹	836,0 ± 4,0	858,3 ± 21,0	826,7 ± 15,1	880,0 ± 0	860,0 ± 4,0	896,0 ± 0	888,0 ± 17,3	880,0 ± 0	808,0 ± 8,0	816,0 ± 34,6	881,0 ± 42,7
	COT	g.kg ⁻¹	16,2 ± 2,1	7,2 ± 0,2	2,0 ± 0,4	0,4 ± 0	16,3 ± 2,3	8,0 ± 0,8	3,1 ± 0,7	0,8 ± 0	16,0 ± 1,9	4,4 ± 1,5	1,3 ± 0,1
Nombre d'échantillons			2	3	3	1	2	2	3	1	2	3	4
Analyse d'image	Qté. de cryoclastes	% (surfaccique)	non mesuré	44,6 ± 3,3	37,1 ± 3,5	non mesuré	non mesuré	35,9 ± 0,2	47,5 ± 6,9	non mesuré	non mesuré	39,9 ± 2,3	37,2 ± 3,4
Nombre d'échantillons			6	9	9			2	7			6	9
Porosité totale à l'eau	Porosité totale N _t	%	non mesuré	57,02 ± 3,6	42,1 ± 3,1	42,8 ± 0,8	non mesuré	62,0 ± 6,7	42,4 ± 3,2	43,4 ± 0,1	non mesuré	56,3 ± 3,8	44,2 ± 1,4
Nombre d'échantillons			5	6	3	3		5	6	2		6	6
Porosimétrie par injection de mercure	Porosité totale N _{Hg}	%	non mesuré	49,3 ± 2,5	41,3 ± 3,9	42,4 ± 0,1	non mesuré	59,7 ± 1,0	40,7 ± 2,0	42,1 ± 0,1	non mesuré	50,3 ± 4,6	43,7 ± 3,2
	Coeff. de dispersion C _d	sans unité	non mesuré	9,9 ± 3,7	2,5 ± 0,6	0,6 ± 0,2	non mesuré	5,2 ± 0,4	4,1 ± 2,1	0,7 ± 0,1	non mesuré	4,1 ± 0,8	4,0 ± 1,0
Nombre d'échantillons			14	10	2	2		4	10	2		14	8

TABLEAU DE VALEURS : ÉLÉMENTS MAJEURS

Profil	Horizon	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
Profil 1	Rendosol	6,53	1,71	0,86	0,24	47,2	0,07	0,24	0,09	0,28	0,05
		7,19	1,86	0,71	0,25	47,4	0,08	0,25	0,11	0,27	0,05
	Horizon d'accum.	3,12	1,09	0,58	0,21	51,9	0,04	0,15	0,05	0,12	0,03
		4,96	1,66	0,77	0,21	50,2	0,08	0,24	0,08	0,1	0,04
		4,24	1,31	0,71	0,2	50,9	0,06	0,18	0,07	0,1	0,03
	Grèzes	8,74	1,72	0,66	0,3	48,1	0,09	0,32	0,11	0,09	0,03
		10,9	2	0,79	0,33	47	0,12	0,39	0,14	0,08	0,03
		10,7	1,93	0,75	0,33	46,9	0,12	0,39	0,13	0,09	0,03
	Craie	0,87	0,36	0,14	0,16	48,1	0,02	0,06	0,01	0,06	0,02
Profil 2	Rendosol	6,19	1,71	0,6	0,23	47,7	0,07	0,27	0,09	0,21	0,04
		6,73	1,88	0,69	0,24	47,9	0,07	0,29	0,1	0,23	0,05
	Horizon d'accum.	3,5	1,2	0,43	0,17	51,3	0,06	0,19	0,06	0,09	0,03
		2,23	0,8	0,29	0,13	52,4	0,04	0,13	0,04	0,09	0,02
	Grèzes	5,31	1,15	0,48	0,22	50,6	0,07	0,21	0,07	0,09	0,03
		9,2	1,64	0,68	0,29	48,3	0,11	0,32	0,11	0,08	0,03
		6,2	1,26	0,54	0,26	50,4	0,07	0,25	0,08	0,09	0,03
	Craie	0,88	0,37	0,12	0,16	49,6	0,02	0,06	0,01	0,06	0,02
Profil 3	Rendosol	9,53	2,21	0,84	0,29	45,2	0,1	0,32	0,14	0,14	0,05
		9,16	2,1	0,76	0,26	46,1	0,1	0,29	0,13	0,13	0,04
	Horizon d'accum.	4,67	1,01	0,41	0,18	47,9	0,06	0,16	0,07	0,08	0,02
		6,97	1,36	0,59	0,27	48,7	0,09	0,26	0,09	0,08	0,03
		9,69	1,7	0,66	0,27	45,9	0,12	0,33	0,12	0,08	0,03
	Grèzes	13,3	1,99	0,77	0,34	45,4	0,16	0,42	0,16	0,08	0,03
		6,71	1,27	0,51	0,29	50,5	0,08	0,26	0,09	0,08	0,03
		14,2	2,14	0,86	0,35	44,8	0,17	0,46	0,17	0,08	0,03
		6,36	1,26	0,53	0,29	50,3	0,08	0,24	0,09	0,08	0,03
		14,1	1,9	0,73	0,32	45,4	0,17	0,42	0,15	0,09	0,03

TABLEAU DE VALEURS : TERRES RARES

Profil	Horizon	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Profil 1	Rs	16,3	14,7	2,74	11	1,96	0,39	1,81	0,31	1,49	0,38	0,86	0,16	1,06	0,15
		15,8	14	2,62	7,6	1,81	0,39	1,78	0,31	1,53	0,39	1,05	0,13	0,82	0,12
	Ha	9,8	8,3	1,57	7	0,86	0,2	1,21	0,15	0,8	0,28	0,77	0,1	0,39	0,05
		12,9	11,6	2,01	7,4	1,3	0,26	1,2	0,2	1,11	0,27	0,74	0,1	0,85	0,08
		10,9	10,5	1,86	5,3	1,26	0,25	1,29	0,2	1,1	0,23	0,69	0,11	0,59	0,07
	G	11,8	14,2	2,16	8,7	1,58	0,3	1,61	0,25	1,37	0,3	0,91	0,14	0,76	0,15
		12,7	16,4	2,44	9,4	1,72	0,33	1,71	0,27	1,51	0,38	0,96	0,15	0,85	0,13
		12	15,1	2,31	8,9	1,67	0,33	1,69	0,27	1,65	0,31	0,95	0,15	0,88	0,13
	C	7,1	4,3	1,1	3,7	0,58	0,16	0,82	0,12	0,7	0,11	0,44	0,07	0,37	0,05
Profil 2	Rs	16,5	16,7	2,75	10	1,78	0,41	1,93	0,3	1,6	0,37	1,08	0,17	0,9	0,14
		17,5	18,8	3,1	11,6	2,01	0,43	2,1	0,33	1,58	0,35	1,17	0,17	1	0,16
	Ha	10,5	10,8	1,66	6,7	1,03	0,23	1,07	0,17	1,11	0,22	0,57	0,08	0,62	0,09
		8	8,2	1,31	4,1	0,87	0,18	0,87	0,14	0,73	0,14	0,5	0,07	0,43	0,06
	G	11,3	12,4	1,93	7,7	1,32	0,27	1,38	0,22	1,22	0,26	0,81	0,12	0,8	0,11
		12	13,8	2,23	8,2	1,61	0,3	1,61	0,26	1,48	0,32	0,97	0,14	0,89	0,14
		10,3	11,2	1,83	7,1	1,13	0,25	1,27	0,21	1,03	0,24	0,74	0,1	0,62	0,1
	C	7,2	4,1	1,05	4,6	0,73	0,15	0,7	0,12	0,7	0,15	0,42	0,06	0,32	0,07
Profil 3	Rs	20,1	20,7	3,51	13,9	2,26	0,51	2,33	0,38	2,14	0,46	1,3	0,19	1,17	0,18
		16,6	18,8	2,95	9,9	1,87	0,39	2,02	0,31	1,78	0,34	1,21	0,17	0,95	0,16
	Ha	8,7	9,5	1,52	5,3	1,12	0,19	1,02	0,15	0,95	0,18	0,6	0,08	0,46	0,08
		11,4	12,7	1,97	7,1	1,38	0,29	1,35	0,22	1,37	0,28	0,85	0,12	0,66	0,11
		10,6	14,1	1,97	7	1,43	0,29	1,29	0,21	1,27	0,23	0,78	0,12	0,7	0,1
	G	13,2	18,1	2,5	8,2	1,91	0,35	1,75	0,29	1,79	0,35	1,06	0,17	1,06	0,15
		10,6	11,9	1,89	8,4	1,37	0,3	1,4	0,21	1,27	0,29	0,79	0,13	0,73	0,12
		14,3	19,4	2,73	11,3	1,95	0,37	1,96	0,29	2,06	0,34	1,14	0,15	0,91	0,17
		10,5	13	2,04	7,2	1,33	0,29	1,38	0,21	1,08	0,26	0,73	0,12	0,7	0,11
		13,4	17,6	2,57	10,8	1,9	0,35	1,83	0,29	1,92	0,36	1,09	0,17	1,01	0,15

TABLEAU DE VALEURS : TRANSFERTS HYDRIQUES

Méthode	Valeur mesurée	Unité	Profil 1				Profil 2				Profil 3	
			Rendosol	HAC	Grèzes	Craie	Rendosol	HAC	Grèzes	Craie	HAC	Grèzes
Absorptions capillaires	Coeff. de prise de poids en eau	$\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$	non mesuré	780,1 ± 53,8	226,1 ± 49,6	547,4 ± 62,8	non mesuré	672,7 ± 88,0	363,5 ± 51,3	563,7 ± 41,6	669,4 ± 73,5	433,6 ± 59,5
	Coeff. de migration de la frange capillaire C_2	$.10^{-4} \text{ m.s}^{-1/2}$		15,8 ± 1,1	8,3 ± 0,9	12,3 ± 0,5		14,6 ± 2,2	11,5 ± 0,5	12,0 ± 0,1	12,0 ± 0,8	16,0 ± 3,7
	Porosité capillaire	%		56,8 ± 3,9	73,5 ± 4,0	93,0 ± 0,3		43,5 ± 12,8	78,1 ± 4,3	93,2 ± 0,2	85,6 ± 1,7	82,6 ± 1,5
Cinétiques de séchage	Flux de séchage F	$\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$	non mesuré	11,7 ± 2,0	12,9 ± 2,3	42,8 ± 4,3	non mesuré	24,2 ± 5,3	13,7 ± 5,3	42,8 ± 4,8	13,9 ± 2,9	19,5 ± 3,9
	Saturation critique S_c	%	mesuré	21,9 ± 4,4	19,0 ± 3,2	20,7 ± 0,8	mesuré	30,4 ± 5,5	19,5 ± 3,2	19,8 ± 0,1	26,7 ± 3,6	31,0 ± 6,0
Pipette de Karsten	Absorption d'eau moyenne W_a	$\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$	non mesuré	227,6 ± 32,5	41,3 ± 9,9	138,4 ± 12,3	non mesuré	212,9 ± 49,6	50,1 ± 12,2	147,0 ± 15,6	199,8 ± 45,3	54,2 ± 13,1
Infiltrométrie à disque	Sorptivité capillaire S	$.10^{-4} \text{ m.s}^{-1/2}$	2,2 ± 0,6	5,8 ± 1,3	8,2 ± 2,2	non mesuré	1,4 ± 0,6	5,4 ± 3,3	9,8 ± 1,0	non mesuré	non mesuré	
Nombre d'échantillons			2	5 (2 pour S)	6 (3 pour S)	3	2	5 (2 pour S)	6 (3 pour S)	2	6	6

RAPPORT DE DATATION ^{14}C

Poznań, 06-10-2011

Report*on C-14 dating in the Poznań Radiocarbon Laboratory*

Customer: **Damien Linoir**
 University of Reims Champagne-Ardenne
 GEGENA (EA 3795)
 2 Esplanade Roland Garros
 51100- Reims
 France

Job no.: 5473/11

<i>Sample name</i>	<i>Lab. no.</i>	<i>Age ^{14}C</i>	<i>Remark</i>
Aus Fond 4	Poz-42954	7380 $\pm$ 50 BP	

Comments: Wyniki kalibracji dat ^{14}C w załączeniu*Head of the Laboratory**Prof. dr hab. Tomasz Goslar*

06-10-2011

Job no.: 5473/11

Page 1 from 1

Results of calibration of ^{14}C dates – order 5473/11.

Given are intervals of calendar age, where the true ages of the samples encompass with the probability of ca. 68% and ca. 95%. The calibration was made with the OxCal software.

OxCal v4.1.5 Bronk Ramsey (2010); r:5
 Atmospheric data from Reimer et al (2009);
 Aus Fond 4 R_Date(7380,50)
 68.2% probability
 6365BC (36.5%) 6281BC
 6275BC (31.7%) 6215BC
 95.4% probability
 6387BC (77.6%) 6202BC
 6195BC (17.8%) 6096BC

PRÉ-RAPPORT : CORINNE LOISY



Ecole Nationale Supérieure
en Environnement,
Géorressources et Ingénierie
du Développement durable

1 allée Fernand Daguin
33607 PESSAC CEDEX
Tél. : 05 57 12 10 00
Fax : 05 57 12 10 01
www.ensegid.fr



Rapport sur le manuscrit intitulé « Les horizons d'accumulations carbonatées en Champagne-Ardenne : répartition régionale, caractérisation et impact sur les transferts hydriques » par Damien LINOIR en vue de l'obtention du diplôme de Docteur de l'Université de Reims Champagne-Ardenne (ED Sciences, Technologie, Santé, Spécialité : Sciences de la Terre et de l'Univers).

Ce travail de thèse s'est déroulé dans le cadre du Contrat d'Objectifs AQUAL dont l'objectif principal est la lutte contre les pollutions diffuses en milieu rural sur le bassin versant de la Vesle. Ce type de recherches nécessite la compréhension des transferts hydriques dans la zone vadose.

En Champagne-Ardenne, des horizons d'accumulations carbonatées se développent dans les horizons superficiels. Ce travail se propose donc de répondre à trois questions :

- Quelle est la répartition géographique de ces horizons d'accumulations ?
- Quelles sont les caractéristiques de ces horizons d'accumulations en comparaison avec les autres niveaux des profils de sol ?
- Est-ce que ces horizons d'accumulations font obstacle aux transferts hydriques ?

Le manuscrit se compose de 8 chapitres répartis dans trois parties suivies d'une discussion et des conclusions.

Dans son manuscrit, Damien Linoir a fait le choix de ne pas faire un gros chapitre sur les méthodes. Il les présente dans chaque partie auxquelles elles sont rattachées.

La première partie de ce manuscrit présente le contexte général de l'étude.

Le chapitre 1 présente des informations bibliographiques générales concernant les horizons d'accumulations carbonatées (HAC) : leur localisation, les processus de mise en œuvre pour leur formation, leurs caractéristiques morphologiques, leurs classifications et leurs impacts sur l'environnement.

L'utilisation du terme « sol » prête parfois à confusion dans ce chapitre (p7). Au sens strict, le sol est l'horizon pédologique. Les HAC n'affectent pas uniquement les sols au sens strict mais plutôt la « subsurface » ou la « proche surface » composée des horizons pédologiques mais aussi des formations superficielles.

Ce chapitre est un peu court et aurait mérité un point bibliographique récent sur les calcifications ou carbonatations d'origine biologique et notamment bactérienne.

Le chapitre 2 présente le contexte géographique (§1), le contexte géologique qui va des formations géologiques du bassin de Paris aux sols (§2). Puis, il fait le point sur la bibliographie concernant la répartition des HAC (§3), puis la micromorphologie des HAC (§4), les modalités de formation des HAC (§5), la classification bibliographique des HAC (§6) et enfin les conséquences environnementales des HAC (§7).

Attention au terme de « terrains géologiques », il faut plutôt parler des « formations sédimentaires du bassin de Paris ».



DÈS SEPTEMBRE 2014

L'ENSEGD SE DOTE

D'UNE NOUVELLE

IDENTITÉ



COMMUNAUTÉ
D'UNIVERSITÉS
ET ÉTABLISSEMENTS
D'AQUITAINE



Ecole Nationale Supérieure
en Environnement,
Géoressources et Ingénierie
du Développement durable

1 allée Fernand Daguin
33607 PESSAC CEDEX
Tél. : 05 57 12 10 00
Fax : 05 57 12 10 01
www.ensegid.fr



DÈS SEPTEMBRE 2014
L'ENSEGI D SE DOTE
D'UNE NOUVELLE
IDENTITÉ



Les propos du paragraphe 2.1 sur la présentation des substrats géologiques auraient été plus mis en valeur en ajoutant une figure représentant une coupe Est-Ouest du bassin de Paris avec ses formations sédimentaires et sa structurale.

Le chapitre 3 a pour but de faire une synthèse des informations sur la localisation préférentielle des HAC en Champagne et ceci en créant une base de données.

Ce chapitre 3 nommé « Approche bibliographique » porte mal son nom qui est trop générique (proposition de titre : Analyses des critères de développement des HAC sur des données bibliographiques).

Page 59, il est dit que les HAC sont majoritairement présents lorsque le sol est calcimagnésique. Cette remarque n'est pas très pertinente puisque mis à part le Trias qui est peu présent en Champagne, le substratum est composé essentiellement de roches carbonatées. Donc très normalement sur ce type de substratum se développe des types de sols magnésiques qui n'ont rien avoir avec les HAC ou ne sont pas le critère principal à leur développement.

Page 62, le développement des HAC est directement relié à l'orientation. Hors dans la littérature (Campy, ...), il a été montré que les formations superficielles telles que les grèzes ou les poches de cryoturbation se développent de manières préférentielles en fonction des orientations des versants et des climats régionaux lors de leurs formations. Donc, il faudrait mieux envisager ou discuter comme cause de développement des HAC, la nature des formations superficielles qui elles se sont développées suivant une orientation préférentielle.

Je trouve que vos critères d'approches sur le développement des HAC sont pertinents cependant, il manque une réelle analyse des données de votre base avec une analyse croisée des critères. Le développement des HAC n'est-il pas le cumul de plusieurs critères ? Il faut mieux valoriser l'ensemble des informations de votre base en essayant de croiser les critères à l'aide d'études statistiques. La quantité de données n'est peut-être pas suffisante pour faire des ACP mais des analyses ascendantes hiérarchiques sont possibles.

Le chapitre 4 présente les 6 différents sites d'études.

La deuxième partie s'attache à la caractérisation multi-proxy des horizons d'accumulations carbonatées.

Les méthodes sont d'abord présentées avant de décrire les résultats puis de faire les interprétations.

Le chapitre 5 correspond à la description des méthodes et techniques utilisées : 1. Colorimétrie, 2. Pénétrométrie dynamique, 3. Teneurs en carbonates et carbone organique totaux, 4. Micromorphologie, 5. Etude du milieu poreux.

Page 95 : Il manque des explications sur le type d'éléments bibliographiques qui aurait pu indiquer la conservation d'au moins un élément lors des différents phénomènes affectant le profil superficiel pendant la formation des HAC ?

Page 95 : Pourquoi avoir normalisé le pourcentage gain/perte pour chaque horizon à la craie ? (craie de l'horizon R pour chaque profil ou une craie quelconque ?).

La bibliographie sur les classes de pores par porosimétrie mercure n'est pas exhaustive.

COMMUNAUTÉ
D'UNIVERSITÉS
ET ÉTABLISSEMENTS
D'AQUITAINE



Ecole Nationale Supérieure
en Environnement,
Géoressources et Ingénierie
du Développement durable

1 allée Fernand Daguin
33607 PESSAC CEDEX
Tél. : 05 57 12 10 00
Fax : 05 57 12 10 01
www.ensgid.fr



Le chapitre 6 présente les résultats concernant la caractérisation multi-proxy des HAC et de leur profil. Le manque des barres d'erreur sur les graphiques rend difficile leurs exploitations. Par exemple page 124, on ne peut pas conclure que l'on a un ralentissement de la percolation dans la partie inférieure des HAC, si l'on se trouve dans la barre d'erreur des mesures de deux profondeurs.

Par ailleurs, ce chapitre ne montre pas bien quel est l'apport et l'intérêt de chaque méthode pour l'étude des HAC et quelles en sont les limites. Les résultats ne sont pas suffisamment commentés.

Il est nécessaire dans chaque paragraphe du chapitre 6 de donner les objectifs d'utilisation de chaque méthode, de faire un point bibliographique sur l'utilisation de cette méthode, puis de présenter les faits et enfin de faire une conclusion avec une ou des hypothèses d'interprétation par rapport aux objectifs annoncés. Il faut absolument mieux expliquer la démarche analytique, lui trouver un sens dans la caractérisation des HAC. Cette thèse ne peut se résumer à une juxtaposition de techniques.

La troisième partie focalisera ensuite sur les propriétés de transferts hydriques au sein des horizons d'accumulations carbonatées champenois.

Les méthodes sont d'abord présentées avant de décrire les résultats puis de faire les interprétations.

Le chapitre 7 présente les méthodes d'études des propriétés des transferts hydriques. Il aurait été intéressant dans ce chapitre de discuter de ce que l'on attend de chaque méthode (même remarque que pour la partie précédente).

Le chapitre 8 présente les résultats et les interprétations des transferts hydriques.

Il faudrait mieux expliquer l'apport de chaque méthode et leurs limites afin que l'on ne croit pas que les résultats sont antagonistes.

Par ailleurs ce chapitre montre les caractéristiques hydrauliques et hydriques des différents horizons mais à aucun moment ne les replace dans un système naturel en continuité hydraulique. Cela manque beaucoup pour l'explication du fonctionnement des transferts hydriques dans les HAC.

De manière générale, il manque aux différents chapitres une introduction et une conclusion partielle.

La partie discussion :

La discussion se fait que résumé les 8 chapitres sans plus de discussion que dans les chapitres ni de synthèse des résultats. A aucun moment, une approche intégrative des résultats dans les différents domaines n'a été faite. Je déplore que les méthodes ne soient pas croisées. Il faut montrer l'intérêt et l'apport de chaque technique d'observation et d'analyse dans l'étude de la répartition des HAC, dans de leur caractérisation et dans l'étude de leur impact sur les transferts hydriques. Une ou des figures de synthèse seraient nécessaires à ce stade. Par ailleurs en termes de caractérisations des transferts hydriques, il est indispensable de ne pas raisonner par compartiments mais dans une continuité hydrologique de la surface



DÈS SEPTEMBRE 2014

L'ENSEGI D SE DOTE

D'UNE NOUVELLE

IDENTITÉ



COMMUNAUTÉ
D'UNIVERSITÉS
ET ÉTABLISSEMENTS
D'AQUITAINE



Ecole Nationale Supérieure
en Environnement,
Géoresources et Ingénierie
du Développement durable

1 allée Fernand Daguin
33607 PESSAC CEDEX
Tél. : 05 57 12 10 00
Fax : 05 57 12 10 01
www.ensgid.fr



vers la nappe (recharge gravitaire) ou de la nappe vers l'atmosphère (évaporation ou évapotranspiration). Il faut proposer un schéma conceptuel hydrodynamique du fonctionnement du profil superficiel.

La partie conclusion :

Elle présente les résultats qui ressortent de cette étude sur les horizons d'accumulations carbonatées en Champagne-Ardenne.

En conclusion, sur la base de la lecture de ce manuscrit, cette thèse présente une grande quantité de données et d'informations nouvelles sur les HAC. Je regrette que l'ensemble des données n'ai pas fait l'objet de plus de synthèse et d'émission d'hypothèse et de discussion. Malgré mes quelques réserves, je donne un avis favorable à la présentation des travaux de Damien Linoir en vue de l'obtention du grade de Docteur. Je demande cependant une modification postérieure à la soutenance du manuscrit avec l'ajout de figures de synthèse dans la partie discussion.

Talence, le 6 juin 2014

Corinne LOISY
Professeur des Universités,
ENSEGD-IPB



DÈS SEPTEMBRE 2014
L'ENSEGD SE DOTE
D'UNE NOUVELLE
IDENTITÉ



COMMUNAUTÉ
D'UNIVERSITÉS
ET ÉTABLISSEMENTS
D'AQUITAINE

PRÉ-RAPPORT : YVES GÉRAUD



Yves Géraud
Professeur

Ref : 23/2013

Sujet : **rapport sur le manuscrit de thèse de Damien Linoir**

Rapport sur le manuscrit présenté par Damien Linoir intitulé « Les horizons d'accumulations carbonatées en Champagne-Ardenne : Répartition régionale, caractérisation et impact sur les transferts hydriques » pour obtenir le grade de docteur de l'université Reims Champagne-Ardenne.

L'objectif de ce travail est d'étudier des profils de sols présentant des accumulations de carbonates, en se focalisant sur trois points, leur localisation en région Champagne-Ardenne, les caractéristiques structurales et les conséquences de ces caractéristiques sur les propriétés de transfert hydriques. Ce travail associe deux approches. Une approche bibliographique et de recherche documentaire qui ont pour but de localiser ces horizons, et une approche analytique qui a pour but de caractériser ces niveaux.

Le document présenté comprend 270 pages organisées en une introduction, une première partie qui permet de présenter le contexte de l'étude, une deuxième partie qui présente les caractéristiques structurales et physiques des accumulations carbonatées, une troisième partie qui est focalisée sur les propriétés hydriques de ces formations et une conclusion.

La première partie « contexte général de l'étude » comprend quatre chapitres. Le premier chapitre présente des généralités sur les horizons d'accumulations carbonatés avec des éléments de classifications qui seront fort utiles pour la lecture de la suite du document. Le deuxième chapitre décrit les niveaux de sols dans la région Champagne-Ardenne, les éléments micro-morphologiques et les chronologies de mise en place. Dans le troisième chapitre, l'auteur propose une analyse bibliographique, lui permettant de faire ressortir les paramètres pertinents conduisant à la localisation des horizons carbonatés. Cette analyse conduit au chapitre 4 qui présentent les sites étudiés. La description des trois profils étudiés permet d'identifier des différences morphologiques et structurales. Cet ensemble cohérent de données permet une bonne mise en perspective du travail et des résultats présentés ensuite.

La deuxième partie « caractérisation des accumulations carbonatées » comprend deux chapitres. Le premier porte sur les méthodes de caractérisation de ces formations, avec l'utilisation de la colorimétrie, la pénétrométrie dynamique, la caractérisation du réseau poreux avec l'analyse des différentes morphologies et l'utilisation de différentes techniques de saturation à l'eau et au mercure. La présentation des techniques permet de faire ressortir les paramètres structuraux qui seront mis en évidence. Le second chapitre présente les résultats obtenus. Plusieurs remarques sont à faire concernant ce chapitre. Concernant le COT, L'organisation « particulière » que l'auteur propose pour le profil 3, ne peut elle pas être due à un problème de distribution des échantillons ? En tout cas la présentation avec des lignes, des graphes, contrarie cette remarque, une présentation par point serait préférable. Concernant les éléments majeurs, sur la forme, un redoublement de la figure VI.8 en VI.9 est à noter, ainsi que des figurés peu lisibles sur ces figures. Sur le fond, globalement pour ces données, une analyse plus détaillée serait nécessaire, comme par exemple pour le Fe₂O₃ ou CaO où un comportement en deux groupes est possible. Concernant l'analyse des pertes et des gains, pourquoi ne pas avoir pris le TiO₂ pour élément le moins mobile ? Est ce que P₂O₃ peut être pris comme un marqueur de la « perméabilité » du milieu ? Concernant les terres rares, il aurait été intéressant d'identifier les phases porteuses, oxydes de fer, sous quelle forme, des nanoparticules ?? Cette

École Nationale Supérieure de Géologie
Rue du Doyen Roubault – BP 40
54501 Vandœuvre-lès-Nancy CEDEX
Tél : + 33(0)3 83 59 64 46
Fax : + 33(0)3 83 59 64 64
yves.geraud@univ-lorraine.fr
www.ensg.inpl-nancy.fr



identification serait nécessaire notamment pour interpréter la figure VI.23. où différents comportements sont visibles et donc peut être des phases différentes. Concernant l'étude micro morphologique, il serait important de préciser le nombre de lames analysées ainsi que le nombre de point, ce qui permettrait de relativiser les écart-types. Pour la taille des canaux, aucune information n'est donnée sur le nombre de points analysés. Une remarque équivalente peut être faite pour les aires ouvertes, où des diamètres moyens de 3cm sont surprenant car correspondant à la taille de la lame mince. Si par exemple les figures VI.33 et 34 sont significatives, une analyse statistique par seuillage des images serait probablement plus significative. Concernant les données de porosité, eau et mercure, le nombre d'échantillons n'est pas précisé, et les écarts types pour la porosité mercure ne sont pas précisés. La remarque concernant l'effet des argiles sur la valeur de porosité est assez surprenante, page 165. Il aurait été intéressant de faire les mesures de retrait pour caractériser l'hétérogénéité du réseau poreux. L'ensemble des données rassemblées est important et de bonne qualité et malgré des compléments à apporter sera très utile à la communauté.

La troisième partie concerne « les propriétés de transferts hydriques » et comprend également deux chapitres. Le premier est consacré aux techniques de mesures, le second aux résultats. Sur la forme, il aurait préférable de mettre les courbes de migration de frange et de prise de poids sur les mêmes figures. Sur le fond, plusieurs imprécisions sont à noter, la première concerne le rôle des forces capillaires sur le débit, page 199. Les forces capillaires sont inversement proportionnelles aux diamètres alors que le débit lui est proportionnel aux diamètres. Le concept de porosité piégée est à préciser, car il semble être confondu avec le concept de tortuosité. Le calcul de rayon hydraulique aurait également permis de distinguer ces différents échantillons. L'ensemble de données présenté est intéressant et permet d'appréhender les caractéristiques du réseau poreux et des propriétés de transfert, même si des précisions auraient été opportunes. Un tableau de synthèse, reprenant les différents paramètres ainsi définis, aurait été utile pour la discussion. La confrontation entre les différentes données de porosité et les paramètres de migration capillaire aurait permis de préciser le modèle morpho-structural proposé dans la discussion.

La partie « discussion » synthétise l'ensemble des données et propose un modèle d'organisation des structures et du réseau poreux ; un rappel des paramètres microstructuraux à côté des modèles aurait permis une meilleure intégration des données. Ce travail de thèse présente un ensemble de données importantes et originales sur une formation peu étudiée. Malgré un manque d'intégration des informations et de discussion de ces données, qui pourra être très facilement corrigé, je donne un avis favorable à la soutenance.



Yves Géraud.

Yves Geraud

PROCÈS VERBAL DE SOUTENANCE DE THÈSE



UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE
Ecole Doctorale Sciences, Technologies, Santé



PROCES-VERBAL DE SOUTENANCE DE THESE (1)

Le : 24 juin 2014

à : REIMS

A été soutenue par **Monsieur Damien LINOIR**

Né le : 9/11/1985

à Belfort Dept/Pays. : Territoire de Belfort FRANCE

Une thèse en vue d'obtenir le doctorat en Sciences

sur le sujet suivant : "Les horizons d'accumulations carbonatées en Champagne-Ardenne : répartition régionale, caractérisation et impact sur les transferts hydriques"

Section du CNU : 36 - Terre solide : géodynamique des enveloppes supérieures, paléobiosphère

Le jury était constitué par :

Mr Oumarou MALAM ISSA

Membre

Mr Vincent BARBIN

Membre

Mme Céline SCHNEIDER

Membre

Mme Corinne LOISY

Membre

Mr Yves GERAUD *(Absent pour raisons de santé)*

Membre

Mme Anne-Véronique WALTER-SIMONNET

Membre

Mr Jean-Pierre VANDERVAERE

Membre

Mr Ary BRUAND *Président*

Membre

03 FEV. 2015

Après avoir examiné les titres initiaux présentés, pris connaissance des conclusions des rapporteurs et entendu le candidat, le jury l'a déclaré digne du grade de Docteur

Mention : ☐ honorable

☒ très honorable

☐ très honorable avec félicitations (2)

AUTORISATION DE DIFFUSION :

La thèse présentée peut être diffusée électroniquement :

☐ En l'état

☒ Après corrections (3 mois maximum) (3)

☐ Ne peut être diffusée, pour cause de confidentialité, avant le (4)

Les Membres du Jury, <i>(Signatures)</i> V. BARBIN A. BRUAND J.P. VANDERVAERE C. LOISY A.V. Walter-Simonnet C. SCHNEIDER O. MALAM ISSA	Vu le Président de l'Université, <i>(Signature)</i> Laurent MARTINY
---	--

(1) Ce document doit être accompagné du rapport de soutenance établi par le Président du Jury et signé par l'ensemble des membres du jury.

(2) La plus haute mention, réservée à des candidats aux qualités exceptionnelles démontrées par les travaux et la soutenance, ne peut être décernée qu'après un vote à bulletin secret et unanime des membres du jury. Dans ce cas, le président du jury établit un rapport complémentaire justifiant cette distinction.

(3) En cas de corrections, ce document doit être accompagné du Formulaire de suivi des corrections établi et signé par le Président du Jury.

(4) Demande effectuée avant la soutenance avec le Formulaire 'demande de confidentialité'.

ATTENTION, la notion de confidentialité dispense pas du référencement obligatoire (titres, résumés et mots-clés en français et en anglais), ni du dépôt du manuscrit pour conservation. Le manuscrit ne pourra pas être consulté, ni au sein de l'Etablissement ni a fortiori sur Internet, avant expiration du délai. Il sera par contre signalé sous forme des référencements précités.

RAPPORT DE SOUTENANCE DE THÈSE



UNIVERSITE DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE
ECOLE DOCTORALE SCIENCES TECHNOLOGIES SANTE (ED 547)

RAPPORT DE SOUTENANCE SUR LA THESE DE DOCTORAT
DE L'UNIVERSITE DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE PRESENTEE PAR :

Damien LINOIR

Sujet : Les horizons d'accumulations carbonatées en Champagne-Ardenne : répartition régionale, caractérisation et impact sur les transferts hydriques

Soutenue le 24 juin 2014

Spécialité : Géosciences

Les membres du jury ont unanimement relevé la grande qualité de l'exposé oral. Damien Linoir a su faire des choix judicieux parmi les résultats présentés dans son manuscrit de thèse et ajouter des éléments nouveaux qui témoignent de la progression de sa réflexion concernant la synthèse des travaux réalisés. Il a bien présenté l'originalité de la démarche suivie et des résultats obtenus. Cet exposé didactique a en outre mis en valeur ses qualités de pédagogue. Les questions ont porté sur l'ensemble de la thèse, tant sur la démarche et les méthodes utilisées que sur les résultats et interprétations qui en ont été tirés. En l'absence du rapporteur Yves Géraud qui n'a pu rejoindre le jury pour des raisons de santé, le président a fait part à l'impétrant des commentaires et questions que celui-ci aurait souhaité faire s'il avait été présent. Damien Linoir a répondu à l'ensemble des questions posées avec honnêteté, faisant preuve d'une maîtrise tout à fait satisfaisante de la majeure partie des méthodes mises en oeuvre dans la thèse. La discussion a permis de mettre en valeur les apports de cette thèse à la connaissance des caractéristiques et propriétés hydriques des horizons à accumulations carbonatées ainsi que des formations superficielles et sols auxquels elles sont associées dans les paysages champenois. Le jury a insisté sur la qualité des données acquises et la nécessité de les valoriser dans des revues à large audience. Il a encouragé Damien Linoir à poursuivre son travail de synthèse et à le concrétiser dans l'exemplaire définitif de son mémoire de thèse, ce qui facilitera la valorisation de ses données au niveau souhaité.

INDEX

INDEX

A			
aiguilles			
monocristallines appariées MA	15		
monocristallines complexes MB	16		
monocristallines M	15		
origine biologique directe	18		
origine biologique indirecte	18		
origine physicochimique	18		
aiguilles monocristallines	15		
alluvions	39		
analyse d'images	103		
angle de contact α	113		
Anneau de Muntz	217		
anthropo-calcretisation	9		
biogeochemical	9		
hydropedological	9		
AQUAL	3		
Atlantique	51		
Aussonce	69		
B			
bassin			
belge	28		
d'Aquitaine	28		
d'Aumance	30		
de Paris	27		
de Seize Berry	30		
Franco-belge	29		
Germanique	30		
intracratonique	27		
Sarro-lorrain	30		
Wealdien	31		
Boréal	51		
<i>by-pass</i>	106		
C			
calcisphères	14		
		calcite en échelon	15
		calcrêtes	7
		caliches	7
		chaîne hercynienne	28
		chaînes polycristallines	15, 16
		Champagne	
		crayeuse	34
		humide	34
		pouilleuse	42
		sèche	34
		ciment	
		microsparitique	47
		sparitique	47
		coefficient	
		de capillarité C_1	202
		de capillarité C_2	201
		de dispersion	122
		moyen d'absorption	215
		ΔE^*	94
		Commission Internationale de l'Éclairage (CIE)	90
		composantes trichromatiques	90
		conductivité hydraulique	217
		côte (cuesta)	
		de Champagne	34
		de l'Ile-de-France	34
		de l'Infralias	31
		de Meuse	31
		de Moselle	31
		des Bars	31
		du Muschelkalk	30
		cristallarias intercallaires	47
		croûte	
		continentale supérieure	100
		croûtes	
		laminaires	11
		croûtes calcaires	7
		cryoclastes de craie	44
		cryoclastie	35
		cryoreptation	36

Index

cryosuccion	35	Infiltrométrie à disque	217
cryptoporosité	108	infraporosité	108
cuesta	30		
		L	
D		lame d'eau infiltrée	220
débit du fluide	200	limons	39
diagramme de chromaticité	92	loess	39
diffusion	209	loi	
dimension fractale	124	de Hagen-Poiseuille	199
dôme de l'Artois	28	de Jurin	199
		de Laplace	115, 200
E		deuxième de Fick	210
eau		première de Fick	210
de constitution	198	lublinite	15
libre (évaporable)	198	luminosité	93
liée (adsorbée)	198		
énergie cinétique de battage	98	M	
entonnoirs de percées cataclinales	34	<i>macrofeatures</i>	10
équation		macroporosité	107
de Laplace	116	massif	
de Philip	221	Armoricaïn	30
de Washburn	200	Central	30
de Young	113	de l'Eifel	32
état sec	198	de Saint-Thierry	34
		des Ardennes	30
F		matrice à éléments détritiques	46
filaments calcifiés	13	matrice lâche à aiguilles	48
flux d'évaporation	212	<i>mature caliche</i>	19
fonctions colorimétriques	90	Ménil-Lépinois	69
formule des Hollandais	98	mer	
fossé bressan	28	Alpine	31
		de la Craie	31
G		du Nord	31
gamut	93	Manche	31
gélifraction	35	mercure	
golfe bourguignon	31	extrusion du	120
graveluches	38	intrusion du	117
grèzes litées	38	piégeage du	124
<i>groundwater carbonates</i>	19	mésoporosité	108
		<i>microfeatures</i>	10
H		microporosité	107
horizon		<i>micro-rod</i>	15
d'accumulations carbonatées (HAC)	7	microstructure	
K 7		alpha	21
Human Visual System	90	bêta	21
I		milieu poreux	105
infiltration verticale unidimensionnelle	221	Mirovia	28
		modèle	
		géochimique	9

Index

<i>rhomb chains</i>	15	structures	
Rodinia	28	laminaires	12
<i>root casts</i>	11	macroscopiques	10
<i>root moulds</i>	11	microscopique	11
<i>root petrifications</i>	11	Subatlantique	51
<i>root tubules</i>	11	Subboréal	51
rugosité	213	surface évaporante effective	213
degré de	124	surface libre d'évaporation	211
S			
saturation		système colorimétrique	
critique	213	CIE-L*a*b*	93
savart	42	CIE-XYZ	90
<i>serrated-edge paired rods</i>	16	RGB	90
seuil		T	
de Bourgogne	28	Tardiglaciaire	50
de percolation	122	temps	
du Poitou	28	critique	213
<i>single micro-rods</i>	15	tension	
<i>smooth paired rods</i>	15	de surface	113
<i>smooth rod</i>	15	superficielle	113
socle hercynien	32	tiennes	40
sols		U	
bruns	61	ultra-microporosité	108
calcimagnésique	60	V	
hydromorphes	61	Vosges	30
lessivés	61	W	
minéraux bruts	60	<i>whisker crystals</i>	15
peu évolués	60	Y	
podzolisés	61	<i>young caliche</i>	19
polygonaux	35		
striés	36		
sorptivité capillaire	221		
sphéroïdes	47		
sphérulites	14		

Ce manuscrit final à été rédigé sous Microsoft Word 2007 après corrections en tenant compte des commentaires et remarques établies par l'ensemble des membres du jury dans leurs rapports et lors de la soutenance.

Les horizons d'accumulations carbonatées (HAC) en Champagne-Ardenne

répartition régionale, caractérisation et conséquences sur les transferts hydriques

Les sols de Champagne-Ardenne présentent de manière non-systématique des horizons d'accumulations carbonatées (HAC) localisés sous l'horizon organo-minéral. Des études antérieures ont permis de mieux comprendre leur formation mais des questions subsistent encore en ce qui concerne leur localisation régionale, leur caractérisation par rapport aux autres horizons des profils ainsi que leur rôle dans les transferts hydriques. La localisation des HAC par reconnaissance indirecte s'avère difficile mais l'analyse de données bibliographiques a permis la détermination de leur contexte actuel de localisation préférentielle. La caractérisation multi-proxy des HAC montre qu'ils sont clairement différents des horizons sus et sous-jacents. L'étude des transferts hydriques réalisée par analyses pétrophysiques montre que contrairement à ce qui est généralement avancé dans la bibliographie, les HAC ne font pas obstacle aux transferts hydriques mais les favorisent. Les HAC permettent de retarder l'érosion du RENDOSOL ainsi que le ruissellement de surface en période humide et forment une réserve d'eau qui ralentit le dessèchement du RENDOSOL en période sèche. L'évolution annuelle des équilibres calco-carboniques permet de mettre en lumière une saisonnalité de l'évolution des HAC. Ces HAC sont dans des dynamiques de genèse en périodes sèches et dans des dynamiques de dégradation en périodes plus humides. Le bilan annuel montre que les HAC sont dans une dynamique générale de dégradation et notamment dans leur partie la plus inférieure. Ce phénomène pourrait être accentué par les pratiques agricoles.

Mots-clefs : horizons d'accumulations carbonatées (HAC) ; Champagne-Ardenne ; profil pédologique ; répartition régionale ; analyses pétrophysiques ; transferts hydriques.

Carbonate accumulation horizons (CAH) in Champagne-Ardenne (north-east of Paris basin, France)

regional breakdown, characterization and impacts on water transfers

Carbonate accumulation horizons (CAH) are structures un-systematically present in Champagne-Ardenne soils (NE of France) and localized directly under de rendic leptosol. They have already been studied but their regional localization, characterization compared to other soil horizons and impact on water transfers remain unknown. On the field, CAH cannot be directly localized by indirect recognition but preferential location areas have been determined by literature analyze. CAH multi-proxy characterization showed that they are clearly different from the over and underlying horizons. Water transfers studied by petrophysical methods showed that CAH do not impede water transfers contrary to what is generally stated into literature. CAH delay rendic leptosol erosion and surface runoff during humid periods and form a water reserve which supplies the rendic leptosol during dry periods. Annual calco-carbonic balance evolution allows to suggest a CAH seasonal evolution. CAH develop during dry periods and decline during wetter periods but the annual balance suggests that CAH are actually in a degradation period at their lower part. This may be exacerbated by actual farming practices.

Key-words: carbonate accumulation horizons (CAH); Champagne-Ardenne; soil profile; regional localisation; petrophysical analyses; water transfers.