

Etude de paléoaaltération météorique (Crétacé Inférieur à Néogène) sur socle silicoclastique hétérogène : caractérisation et essai de cartographie d'altérites en Région Wallonne (Belgique).

François BARBIER



Février 2012

FACULTE DES SCIENCES

DÉPARTEMENT DE GÉOLOGIE

Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en Sciences

Remerciements

Une thèse est un travail de longue haleine, un défi que l'on se lance. Mais c'est surtout une formidable histoire de relations, de rencontres et d'amitié. Je tiens à remercier ici toutes les personnes m'ayant aidé tout au long de ce parcours.

En premier lieu, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Johan Yans et à Vincent Hallet pour avoir cru en moi. Je les remercie chaleureusement pour leur encadrement, leur œil critique, leur disponibilité, leur suivi quotidien de mes travaux, leurs précieux conseils et leur soutien constant tout au long de cette expérience.

Je remercie également Florence Quesnel, Frédéric Boulvain, Christian Dupuis et Michel Everaerts d'avoir accepté de faire partie du comité d'accompagnement et/ou du jury de cette thèse. Merci pour leurs remarques constructives (nécessaires et nombreuses), pour m'avoir transmis une partie de leurs connaissances et de leur savoir-faire.

Cette ouvrage est le fruit de nombreuses collaborations entre le secteur public (FUNDP-Namur, les pouvoirs locaux) et le secteur privé (HeidelbergCement groupe, Sablière de Mettet (sibelco), Argilières Hins, Groupe Monier).

Merci à Mr Guillaume, échevin de la commune de Libin ; à Geoffroy Bultynck, Philippe Delporte, Pierre Koch, Samuel Wittemans, Bertin Michael, Gregory Claustriax, Sébastien Foguene, Etienne Meunier, Alain Nicolas qui travaillent ou ont travaillé chez HeidelbergCement Groupe ; à Mr Huyghebaert, géologue chez Sibelco (Sablière De Mettet) ; à Mr Hins des Argilières Hins ; Mr Favre et Mr Woitrin du Groupe Monier.

Merci aux membres de la SPW et à ceux qui y ont travaillé : Philippe Welter du Ministère de l'Équipement et des Transports pour la campagne d'essais de sol réalisés sur le site de Gembes ; Capucine Bertolat, Caroline Vaneste, Daniel Pacyna, Christian Laloux, du service de cartographie géologique de la Région Wallonne.

Merci aux cartographes de la nouvelle carte géologique de Wallonie : Sabine Blockmans, Virginie Dumoulin (FUNDP-Namur), Isabelle Belanger et Pierre Ghysel (SGB). Merci pour leur aide lors de la réalisation de la carte des altérites Paliseul-Vivy.

Merci à Alain Herbosh, de l'ULB, pour m'avoir fait découvrir les affleurements altérés du Massif du Brabant et à Michel Blondiau pour le site de Villance.

Les datations ont été réalisées par Mr Ruffet de l'Université de Rennes et par Mr Clauer de l'Université de Strasbourg pour les datations K-Ar et Ar-Ar et par Caroline Prognon du BRGM pour les datations paléomagnétiques. Je les remercie pour tout le travail qu'ils ont accompli et pour les discussions enrichissantes concernant ce sujet parfois épineux.

Merci à Mr Thimus, de l'UCL, pour les essais mécaniques des roches en son laboratoire.

Merci à Robert Colbach, du Service géologique du Luxembourg, Eric Goemaere, Michel Duser et Walter Devos, du SBG, Laurent Bock, de Gembloux Agro-Bio Tech (ULg), Alain Demoulin, de l'ULg, ainsi qu'à Abdelilah Mokadem, Milly Caudron, Partick Engels et Vincent Brahy, de la SPW, pour leur aide et l'intérêt porté à ce projet.

Merci à tous les membres du BRGM GEO/G2R qui ont collaboré et m'ont aidé à dissiper mes doutes concernant la radiométrie aéroportée.

Merci à Denis Schumer et Frédéric Cerfontaine, du bureau d'études en stabilité BECS, pour leur avis concernant l'utilité et l'utilisation d'une cartographie des roches altérées en RW.

Remerciements

Merci aux membres du département de géologie et du département de géographie pour les éclats de rire lors des pauses de midi, pour leurs encouragements nécessaires par moment et pour leurs avis scientifiques. Un merci tout particulier à Gaëtan pour ses "coups de mains" lors des levés de terrain parfois acrobatiques, lors des tomographies qui n'en finissent pas et pour les heures passées dans le labo.

Merci à Pascal Vanbel pour avoir sauvé les données après les différents crashes de mes ordi.

Merci à tous ceux que je n'ai pas eu l'occasion de citer mais qui ont apporté leur contribution de près ou de loin à cette aventure.

Un tout tout grand merci à Bernadette, Calou, Yves et Papa qui ont endossé la difficile (et peut-être pénible) tâche de corriger l'orthographe de ce travail.

Merci à tous ceux qui sont venus nous aider à détruire et reconstruire notre maison, ça défoule bien. Un merci particulier à Yan et Céline, Corentin et Stéphanie, Vinch, amis de toujours, pour m'avoir diverti et encouragé pendant la longue période de rédaction.

Merci à toute ma famille et plus particulièrement à mes parents, ma sœur, mon frère, mes beaux-frères, mes belles-sœurs et mes filleuls pour leurs encouragements et leur compréhension.

Je dédie cette thèse à mon épouse adorée et à ma petite Loulou, qui m'ont entouré de tout leur amour pendant ces années, je les remercie pour leur soutien quotidien indéfectible et pour leur enthousiasme à l'égard de mes travaux, comme dans la vie en général...

Résumé

Les roches silicoclastiques hétérogènes altérées par des fluides météoriques sont omniprésentes en Région Wallonne. Cette étude vise, dans un premier temps, à les **caractériser** et, dans un second temps, à les **cartographier** ; la caractérisation détaillée demeurant une étape indispensable à la cartographie.

Dans un premier temps, les roches altérées (altérites) de l'Allochtone Ardennais (Anticlinorium de l'Ardenne et Synclinorium de Dinant) et du Parautochtone Brabançon (Massif du Brabant) sont caractérisées. Sur base d'observations macroscopiques, une classification du degré d'altération des altérites est proposée. La minéralogie (DRX, lames minces) et la géochimie (éléments majeurs, en traces, Terres rares) des sites étudiés sont assez cohérentes avec ces différentes catégories.

Les évolutions des paragenèses argileuses et de l'indice d'altération V de Vogt (1927) traduisent le degré d'altération à l'échelle régionale.

Les altérites datées confirment la présence de cinq périodes propices à l'altération météorique en Région Wallonne : Permo-Trias, Crétacé Inférieur, Crétacé "moyen", Paléocène-Eocène et Miocène. Au sein de ces périodes, l'altération météorique est activée durant des phases particulièrement favorables. Un modèle chronologique de saprolitisation est proposé à l'échelle de la Région Wallonne : une relation entre les phases d'altération, le climat et les variations relatives du niveau marin est suggérée.

Dans un second temps, les connaissances acquises par la caractérisation de l'altération météorique en Région Wallonne facilitent la cartographie des roches altérées dans la région de la Haute-Lesse.

Les outils et méthodes testés dans ce travail montrent plusieurs avantages et inconvénients pour la cartographie des roches altérées silicoclastiques hétérogènes. Ceux qui sont retenus autorisent une distinction entre les différentes catégories d'altérites.

Une méthodologie basée sur la radiométrie aéroportée permettant de cartographier les roches silicoclastiques hétérogènes altérées à l'échelle régionale est développée. En confirmant l'uplift de l'Ardenne, la radiométrie aéroportée s'avère être également un outil géomorphologique intéressant.

La cartographie des roches altérées en Région Wallonne passerait par un levé de terrain sur des cartes topographiques à 1/10 000. La notice explicative serait alors le lien entre la caractérisation des roches altérées et leur cartographie.

Le processus d'altération en Région Wallonne est assez homogène d'un site à l'autre. En revanche, l'altération sur des lithologies différentes forme des profils différents dont l'intensité et l'épaisseur peuvent varier fortement. Une étude préalable de caractérisation des roches altérées en Région Wallonne est donc nécessaire à la cartographie, quelles que soient l'échelle et la précision souhaitées.

Mots-clés : *paléoaltération météorique, minéralogie, indice d'altération, datation, cartographie, Transinne, Villance, Morialmé, Ottignies, Belgique.*

Abstract

Weathered heterogeneous siliciclastic rocks are ubiquitous in the Walloon Region. This study first aims to characterize and secondly to map the weathered rocks, the characterization remaining an essential step of the mapping work.

Firstly the characterization was performed on the Ardennian Allochthonous (Ardenne Anticlinorium and Dinant Synclinorium) and the Brabant Parautochthonous (Brabant Massif). Based on macroscopic observations, classification of weathering degrees of alterites is proposed. The mineralogy (XRD, thin section) and the geochemistry (major elements, trace elements, REE) of the studied sites are quite consistent with these categories.

The evolutions of clay parageneses and Vogt's weathering index (1927) provide representative results of the weathering degree at the regional scale.

The dated alterites do confirm the presence of five weathering periods in the Walloon Region: Permian-Triassic, Early Cretaceous, "middle" Cretaceous, Paleocene-Eocene and Miocene. Within these periods, the weathering is induced during favorable phases. A chronological model of saprolitisation is proposed for the Walloon Region: a relationship between weathering phases, climate and relative sea-level changes is suggested.

Secondly the knowledge acquired by the characterization of the weathering profiles in the Walloon Region facilitates the mapping of the weathered rocks in the Haute-Lesse area.

The tools and methods tested in this work show several advantages and disadvantages for the mapping of weathered siliciclastic rocks. Those selected allow a distinction between the different types of alterites.

A methodology based on the airborne radiometry to map the weathered heterogeneous siliciclastic rocks at the regional scale is developed. Confirming the uplift of the Ardennes, the airborne radiometry is a suitable tool for geomorphology.

The mapping of weathered rocks in the Walloon Region would be useful through a field survey on topographic maps at the 1/10.000 scale. The explanatory notes would supply the link between the weathering profiles characterization and their mapping.

The weathering processes in the Walloon Region are fairly uniform from one site to another. On the other hand, the results of weathering processes on different lithologies are different in intensity and thickness. A preliminary characterization study of the weathered rocks in the Walloon Region is required for mapping, regardless of the scale and accuracy.

Key-word: *paleoweathering, mineralogy, weathering index, dating, mapping, Transinne, Villance, Morialmé, Ottignies, Belgium.*

Table des matières

Introduction générale : les roches altérées en Région Wallonne	19
1 Introduction	21
2 Intérêts et buts de ce travail	22
3 Définition et Processus d'altération	23
3.1 Définition	23
3.1.1 La classification de Pain <i>et al.</i> (1991)	25
3.1.2 La classification de Tardy (1993)	25
3.1.3 Classification de Wyns <i>et al.</i> (2004)	26
3.1.4 Front d'altération	27
3.1.5 La classification utilisée dans ce travail	28
3.1.5.1 Roches saines	28
3.1.5.2 Roches légèrement altérées à altérées	28
3.1.5.3 Roches altérées à fortement altérées	29
3.1.5.4 Les roches très fortement altérées	29
3.1.5.5 Roches du front d'altération	31
3.2 Processus d'altération généraux	32
3.3 Fluides météoriques	34
4 Implication dans la vie économique	36
4.1 Domaine de l'extraction	36
4.2 Secteur de la construction	36
4.3 Domaine environnemental	37
4.4 Domaine hydrogéologique	37
4.5 Domaine agricole et forestier	37
Partie 1 : Caractérisation des roches altérées en Région Wallonne	39
1 Introduction	41
2 Méthodologies	43
2.1 Indices d'altération	43
2.1.1 Principe des indices d'altération	43
2.1.2 Description des principaux indices d'altération	44
2.1.2.1 Ruxton Ratio (R)	44
2.1.2.2 Weathering Index of Parker (WIP)	45

Table des matières

2.1.2.3	Vogt's Residual Index (V).....	45
2.1.2.4	Chemical Index of Alteration	45
2.1.2.5	Chemical index of weathering	46
2.1.2.6	Plagioclase Index of Alteration.....	46
2.1.2.7	Silica Titania Index	46
2.1.3	Conclusions.....	47
2.2	Datation.....	48
2.2.1	Méthode Stratigraphique.....	49
2.2.2	Méthodes radiométriques K/Ar et $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	49
2.2.3	Paléomagnétisme	50
2.2.4	Les traces de fission sur apatite.....	50
3	Caractérisation des sites étudiés	52
3.1	Anticlinorium de l'Ardenne	52
3.1.1	Introduction	52
3.1.2	Transinne	54
3.1.2.1	Localisation	54
3.1.2.2	Contexte géologique	54
3.1.2.3	Description de la carrière et du sondage SGB 194E-495	55
3.1.2.4	Minéralogie.....	58
3.1.2.5	Chimie	63
3.1.2.6	Modèle de saprolitisation à Transinne	67
3.1.2.7	Indices d'altération	68
3.1.2.8	Essais mécaniques des roches en laboratoire.....	74
3.1.2.9	Conclusions.....	77
3.1.3	Villance.....	80
3.1.3.1	Localisation	80
3.1.3.2	Contexte géologique	80
3.1.3.3	Description de l'affleurement.....	80
3.1.3.4	Minéralogie.....	81
3.1.3.5	Chimie	83
3.1.3.6	Indice d'altération	86

Table des matières

3.1.3.7	Conclusions.....	87
3.1.4	Nouvelles datations à Villance et à Transinne	88
3.1.4.1	Villance.....	88
3.1.4.2	Transinne	89
3.1.4.3	Discussion : précision du modèle d'altération météorique en Ardenne.....	90
3.1.4.4	Intégration des résultats : facteurs influençant la saprolitisation	93
3.1.4.4.1	Corrélation entre les datations et le paléoenvironnement	93
3.1.4.4.2	Datations similaires d'altérations météoriques en Région Wallonne.....	97
3.1.4.5	Conclusions.....	100
3.2	Massif du Brabant	103
3.2.1	Introduction	103
3.2.2	Ottignies	107
3.2.2.1	Contexte géologique	107
3.2.2.2	Localisation	108
3.2.2.3	Description des coupes et du forage.....	109
3.2.2.3.1	Forage TGV, échantillon DB6	109
3.2.2.3.2	Forage F08.....	109
3.2.2.3.3	Beaurieu	111
3.2.2.3.4	Coupe de la gare (OTT08)	111
3.2.2.4	Constitution d'un profil d'altération composite	113
3.2.2.5	Minéralogie.....	113
3.2.2.6	Chimie	121
3.2.2.7	Vers un modèle de saprolitisation du Massif du Brabant	131
3.2.2.8	Indice d'altération	135
3.2.2.9	Datation	139
3.2.3	Conclusions.....	140
3.3	Synclinorium de Dinant	142
3.3.1	Introduction	142
3.3.2	Morialmé	144
3.3.2.1	Localisation	144
3.3.2.2	Contexte géologique	144

Table des matières

3.3.2.3	Description des coupes étudiées	145
3.3.2.4	Minéralogie.....	153
3.3.2.5	Chimie	162
3.3.2.6	Vers un modèle de saprolitisation des roches de Morialmé.....	168
3.3.2.7	Indice d'altération	171
3.3.2.8	Datation.....	176
3.3.2.8.1	Présentation des résultats.....	176
3.3.2.8.2	Discussion	181
3.3.2.8.3	Interprétation des datations.....	182
3.3.3	Conclusions.....	182
4	Conclusions : vers une intégration des résultats à l'échelle régionale	185
4.1	Minéralogie.....	185
4.2	Géochimie	188
4.3	Indice d'altération	190
4.4	Vers un modèle de saprolitisation à l'échelle régionale	192
4.5	Intégration des nouvelles datations aux phases d'altération reconnues en Belgique et régions limitrophes	194
4.6	Facteurs influençant la saprolitisation	200
Partie 2 : Cartographie des roches altérées en Région Wallonne		205
1	Introduction	207
2	Contexte géologique	209
3	Outils de cartographie	212
3.1	Méthodes directes.....	212
3.1.1	Levé de terrain (affleurements)	212
3.1.2	Forages.....	215
3.1.3	Sondage à la Tarière.....	216
3.2	Méthodes indirectes	217
3.2.1	Géophysique	217
3.2.1.1	Tomographie électrique	217
3.2.1.1.1	Principe	217
3.2.1.1.2	Résultats	219

Table des matières

3.2.1.2	Sondage électrique	225
3.2.1.2.1	Principe	225
3.2.1.2.2	Résultats	225
3.2.1.3	Profil sismique réfraction.....	228
3.2.1.3.1	Principe.	228
3.2.1.3.2	Résultats.	230
3.2.2	Essais de sol.....	235
3.2.3	Etude des cartes pédologiques.....	239
3.2.4	Radiométrie aéroportée U-Th-K.....	242
3.3	Synthèse des différentes méthodes.....	243
4	Applications.....	245
4.1	Cartographie à l'échelle d'un gisement	245
4.1.1	Méthodologie.....	245
4.1.2	Résultats	248
4.1.2.1	Calcul du volume et du tonnage des roches du gisement	251
4.1.2.2	Calcul du taux d'exploitation.....	251
4.1.2.3	Calcul des réserves du gisement de Transinne.	253
4.1.2.4	Conclusions.....	253
4.2	Cartographie locale.....	255
4.2.1	Présentation des zones cartographiées.....	255
4.2.1.1	Malvoisin	256
4.2.1.2	Paliseul.....	257
4.2.1.3	Anloy	260
4.2.2	Discussion.....	263
4.2.3	Conclusions.....	268
4.3	Cartographie régionale.....	269
4.3.1	Données bibliographiques.....	269
4.3.2	Utilisation de la radiométrie aéroportée comme outil de cartographie	272
4.3.2.1	Technique et mesure de la radiométrie aéroportée	272
4.3.2.2	Radiométrie aéroportée en Belgique.	273
4.3.2.3	Méthodologie.....	278

Table des matières

4.3.2.3.1	Connaissances actuelles	278
4.3.2.3.1.1	Traitements et contrôles des données	278
4.3.2.3.1.2	Contrôle altimétrique de la saprolite.....	289
4.3.2.3.1.3	Variations minéralogique et géochimique dans un profil d'altération.....	289
4.3.2.3.2	Corrélation des données de radiométrie aéroportée avec les données relatives aux connaissances actuelles sur les altérites	290
4.3.2.3.3	Extrapolation d'une carte des zones potentiellement altérées	295
4.3.2.4	Limite de la méthode.....	297
4.3.2.5	Cas particulier et autres méthodes	304
4.3.2.5.1	Intégration du basculement du front d'altération à la méthodologie.....	304
4.3.2.5.2	Les profils radiométriques	309
4.3.2.6	Validation de la méthodologie en comparaison avec d'autres méthodologies	311
4.3.3	Conclusions.....	313
4.4	Représentation des zones altérées.....	314
4.4.1.1	Quelle échelle utiliser ?	315
4.4.1.2	Quel support utiliser ?	316
4.4.1.3	Comment représenter les zones altérées ?	317
4.4.1.4	Comment structurer les informations dans une notice explicative ?	318
4.4.1.5	Exemple de réalisation d'une carte des roches altérées.....	319
4.4.1.5.1	Méthodologie.....	319
4.4.1.5.1.1	Carte générale	320
4.4.1.5.1.2	Carte de l'épaisseur d'altération	320
4.4.1.5.1.3	Coupe.....	321
4.4.1.5.1.4	Carte des affleurements.....	321
4.4.1.5.2	Notice explicative	321
4.4.1.5.2.1	Introduction	321
4.4.1.5.2.2	Altérites de la carte Vivy-Paliseul.....	323
4.4.1.5.2.3	Propriétés physiques et hydrogéologiques des roches altérées.....	323
4.4.1.5.2.4	Utilisations.....	323
4.4.1.5.3	Validation de la carte.....	324

Table des matières

5	Conclusions.....	325
	Conclusions générales et perspectives.....	329
	Bibliographie.....	335
	Liste des figures	361
	Liste des photos	369
	Liste des tableaux	371
	Annexes	375
1	Analyses Minéralogies	377
1.1	Méthodologie expérimentale et caractérisation de la fraction < 2µm	377
1.2	Protocole expérimental des analyses en diffraction X sur roches totales et de la fraction < 2 µm	378
1.3	Exemples de Diffractogrammes	378
2	Analyses Géochimiques.....	386
2.1	Anticlinorium de l'Ardenne	387
2.2	Massif du Brabant	391
2.3	Synclinorium de Dinant	398
3	Essais de Sol	402
4	Correction des valeurs en Th et K en fonction de l'occupation du sol.....	435
5	Carte des altérites : Vivy – Paliseul 65/5-6	437

**Introduction générale : les roches altérées en Région
Wallonne**

1 Introduction

Les roches altérées silicoclastiques, dont il est question dans ce travail, sont le résultat de l'altération météorique ("weathering" des auteurs anglo-saxons) sur des roches saines, sédimentaires, ignées ou métamorphiques. Les roches altérées par les processus hydrothermaux ne sont pas concernées par cette étude.

Bien que relativement peu étudiées dans le monde, les roches altérées sont omniprésentes. A ce jour, de nouvelles recherches concernant les roches altérées ont principalement été menées sur des socles ignés ou métamorphiques car elles constituent notamment de nombreux gisements métalliques exploités dans le monde (ex. Nickel en Nouvelle Calédonie, Aluminium en Guinée, Cu-Co en R.D.C., Manganèse dans l'Ouest africain, ...).

En Région Wallonne, l'altération météorique s'est développée sur un socle sédimentaire plus ou moins métamorphisé. Les roches altérées Wallonnes ont fait l'objet d'études ponctuelles et ce, dès le début du 19^{ème} siècle. Dans un premier temps, c'est l'étude minéralogique qui prévaut. Par exemple, l'halloysite, découverte par d'Omalus d'Halloy dans la région de Liège, est définie par Berthier (1826). En 1907, La présence de kaolin en Ardenne centrale est reconnue par Jérôme (1907). L'augmentation de l'activité extractive au cours du milieu du 20^{ème} siècle pousse la prospection et la caractérisation de nouveaux gisements. Citons, par exemple, les études de Calembert (1945) ; Dosogne (1950) ; Claude (1968) ; Fourmarier & Michot (1962) qui relèvent dans la Région de la Haute-Lesse *"une altération complète jusqu'à 10-20 mètres sous la surface du sol. Le schiste est changé en une argile blanche, plastique, compacte..."*. Dans le même sens, Millot (1964) constate que la kaolinite est *"caractéristique des altérations continentales où les solutions percolent et s'épurent"*. Les études réalisées durant cette période montrent que l'on passe d'une étude minéralogique et de prospection à un essai de compréhension du processus d'altération. Des années 1990 jusqu'à nos jours, les progrès analytiques ont permis de préciser la minéralogie, la géochimie et l'âge des roches altérées, afin de mieux comprendre le processus d'altération. Au cœur de ces trois dernières décennies, les principales recherches ont été menées par Voisin (1995) ; Dupuis *et al.* (1997a) ; Yans (2003) qui mettent en évidence le polyphasage du processus d'altération en Ardenne. Les études de Nicaise (1998) ; Bruyère (2004) ; Abrouk (2010) ; Demoulin *et al.* (2010) datent et décrivent des processus d'altération météorique au sein de cryptokarsts du Condroz et de la vallée de la Vesdre.

D'un point de vue cartographique, plusieurs études ont recensé et/ou localisé les roches altérées ou les gisements de kaolin sur l'Ardenne (Claude, 1968 ; Yans, 2003 ; ...), sur le Condroz (Calembert, 1945) et sur le Massif du Brabant (Mees & Stoops, 1996 ; Mees *et al.*, 1999). En Région Wallonne, les zones karstiques ont été cartographiées (Atlas du karst Wallon : De Broyer *et al.*, 1999 ; ...) mais l'altération des roches carbonatées ne fait pas partie de ce travail. Il n'existe donc, à l'heure actuelle, aucune cartographie des roches altérées silicoclastiques en Région Wallonne.

L'intérêt de cette étude est de poursuivre la caractérisation et de contribuer à la cartographie des roches altérées développées sur des roches sédimentaires en Région Wallonne.

2 Intérêts et buts de ce travail

Ce travail est articulé en deux parties, la première étant consacrée à la caractérisation de roches altérées en Région Wallonne. Pour ce faire, trois régions ont été sélectionnées où l'altération est clairement identifiée et situées dans des contextes lithologiques différents. Les résultats obtenus permettront une synthèse de l'altération météorique en Région Wallonne. Cette partie s'inscrit dans le prolongement des études des roches altérées en Région Wallonne (ex. Voisin, 1995 ; Dupuis *et al.*, 1997a; Yans, 2003; ...). L'accent sera mis sur l'élaboration d'une classification du degré d'altération qui sera utilisée tout au long de ce travail. Il sera constaté que l'altération en Région Wallonne est variée en intensité et en épaisseur. Dans une certaine mesure, il est donc question d'interprétation et de sensibilité... C'est pourquoi une classification, la plus objective possible, sera d'abord proposée. Elle sera basée sur les observations macroscopiques. Nous comparerons ensuite les résultats minéralogiques (lames minces, diffraction des rayons X (DRX) sur roche totale et sur la fraction < 2 µm (DRX)) et géochimiques (analyses des éléments majeurs, en traces et les Terres rares (TR)) en fonction de cette classification.

Une attention particulière sera également apportée sur la datation des saprolites (radiométrique (Ar-Ar ; K-Ar) ; paléomagnétique et stratigraphique) et une intégration des âges obtenus sur différents sites sera réalisée à l'échelle de la Région Wallonne.

Après avoir caractérisé de la manière la plus complète possible les roches altérées, nous nous attarderons, dans la deuxième partie, à la question "comment détecter et cartographier ces roches altérées ?". Offrant de nombreux avantages pour une première étude de cartographie des roches altérées, la région de la Haute-Lesse a retenu notre attention. Sur cette région, une connaissance approfondie des mécanismes d'altération et de la géométrie des gisements de kaolin a été acquise, suite aux études de Dupuis *et al.* (1997a), de Yans (2003), ... Afin de proposer une méthode cartographique facilement utilisable et rentable, un grand nombre de méthodes directes et indirectes ont été testées. Il se peut que notre approche naturaliste des différentes méthodes développées dans ce travail interpelle certains lecteurs. Toutefois, toutes les méthodes ont été éprouvées et calibrées entre elles. Chacune d'elles sera utilisée dans un but précis et la correspondance entre les résultats et la réalité du terrain sera vérifiée.

3 Définition et Processus d'altération

3.1 Définition

Les roches altérées résultent généralement de la transformation chimique et physique *in situ* de la roche saine. Ce processus est communément appelé **altération météorique, supergène ou encore "weathering"** en anglais. La principale caractéristique de l'altération météorique est que ce processus se produit au contact lithosphère-atmosphère : il est engendré par des fluides météoriques qui percolent dans la roche (processus ***per descensum***), engendrant des profils d'altération. Les roches seront donc davantage altérées au sommet du profil et moins altérées à sa base.

Les profils d'altération sont généralement subdivisés en fonction du degré d'altération de la roche. Les limites sont définies par des paramètres qui diffèrent selon l'utilisation prévue, de la roche mère et du point de vue des auteurs (un profil d'altération sera décrit différemment par un géologue, un géomorphologue, un ingénieur... (Ehlen, 2005). Ces classifications sont généralement **réalisées pour des roches saines homogènes** comme des roches ignées, métamorphiques... Les paramètres utilisés pour définir le degré d'altération peuvent être macroscopiques, volumiques, hydrogéologiques, géophysiques, pédologiques....

La Figure 1 montre le schéma d'un profil d'altération type observé dans l'étude des roches altérées dans la région de la Haute-Lesse. Les différentes catégories, définissant le profil d'altération, présentes dans la littérature et celles proposées dans ce travail, propres aux altérites en Région Wallonne, se trouvent en regard de ce profil.

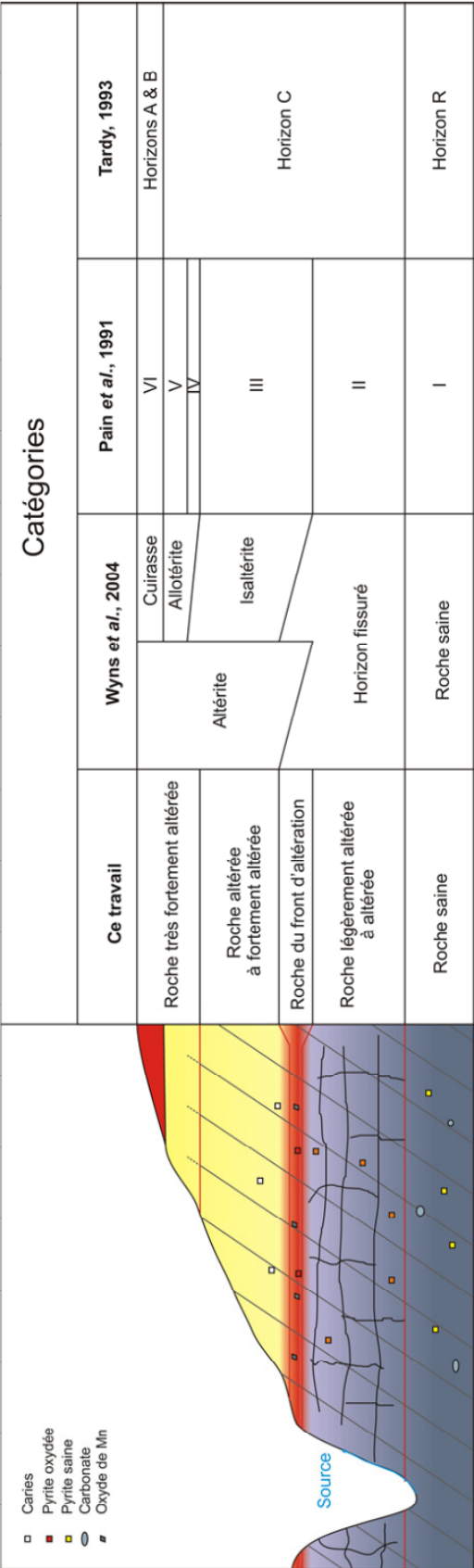


Figure 1 : schéma d'un profil d'altération en vis-à-vis des catégories définies par Wyns et al. (2004), Pain et al. (1991), Tardy (1993) et ce travail.

3.1.1 La classification de Pain *et al.* (1991)

La classification de Pain *et al.* (1991) découle des classifications de Ruxton & Berry (1957) et de la Geological Society (1990). Elle comprend 6 catégories basées essentiellement sur les roches ignées. Ces catégories sont plus ou moins similaires dans chacune des trois classifications. Pain *et al.* (1991) décrivent de manière plus approfondie les différences entre chaque catégorie qui sont : les roches non-altérées, légèrement altérées, modérément altérées, fortement altérées, très fortement altérées, complètement altérées (Figure 2).

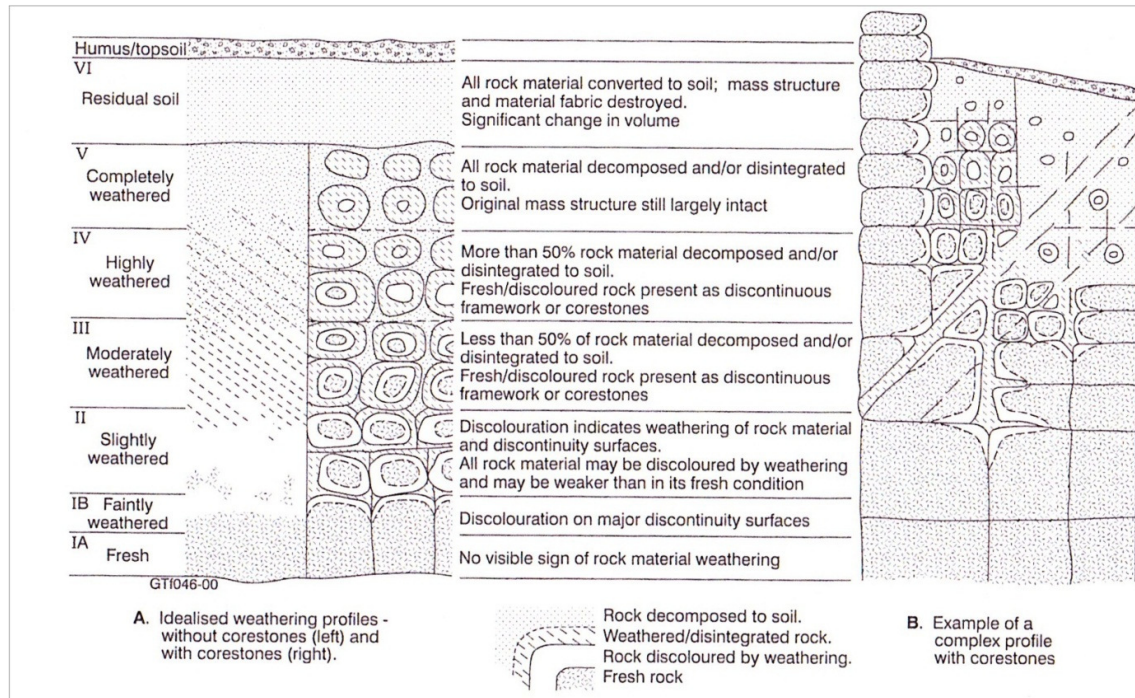


Figure 2 : classification du degré d'altération suivant Pain *et al.* (1991).

Cette classification est destinée aux ingénieurs. Les catégories sont basées sur l'état de désagrégation de la roche ainsi que sur le degré d'altération des feldspaths.

3.1.2 La classification de Tardy (1993)

Cette classification française est basée sur un profil latéritique cuirassé. Tardy (1993) distingue quatre catégories appelées Horizons (Figure 3) :

- Horizon A ou Horizon de démantèlement ;
- Horizon B : contenant la cuirasse ferrugineuse, la carapace et l'Horizon tacheté ;
- Horizon C : contenant la lithomarge ou saprolite fine et l'arène ou saprolite grossière ;
- Horizon R : correspondant à la roche saine.

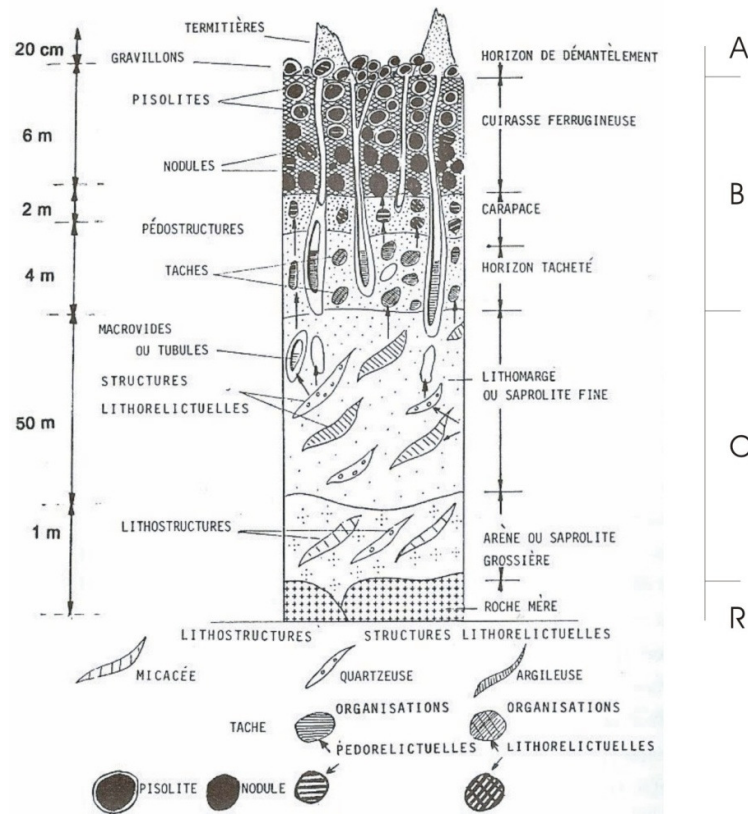


Figure 3 : représentation schématique d'un profil latéritique cuirassé (Tardy, 1993).

La classification de Tardy (1993) est davantage orientée sur l'aspect pédologique et les processus physicochimiques de transformation des roches mères, étudiés sur les plans pétrographiques, minéralogiques et géochimiques. La partie sommitale du profil d'altération est donc très détaillée.

3.1.3 Classification de Wyns *et al.* (2004)

La classification proposée par Wyns *et al.*, (2004) est une modification d'une première classification réalisée par Wyns (2002). Elle est basée sur les propriétés volumiques et de réservoir hydrogéologique de la roche (Figure 4). Elle est reprise dans de nombreux ouvrages consacrés à l'hydrogéologie des roches altérées (Wyns *et al.*, 2002 ; Cho *et al.*, 2003 ; Dewandel *et al.*, 2004 ; Dewandel *et al.*, 2006 ; Lachassagne *et al.*, 2011). Les principales nappes aquifères dans les roches ignées et métamorphiques dans le monde sont généralement situées dans l'Horizon fissuré du profil d'altération (Lachassagne *et al.*, 2009). C'est également le cas pour certains petits aquifères développés dans les roches silicoclastiques du Dévonien en Ardenne, exploités par les agriculteurs.

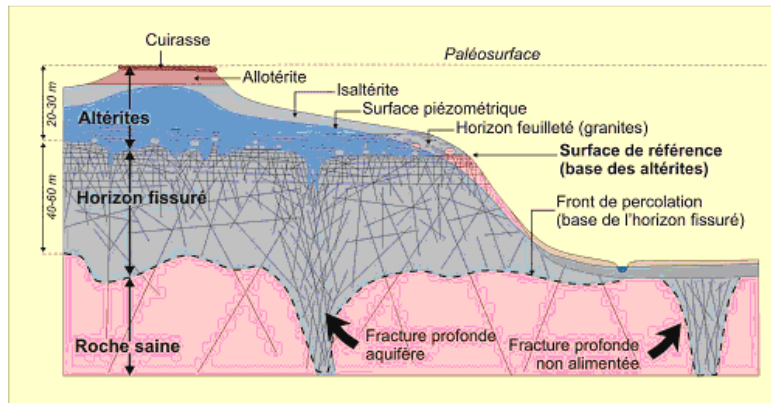


Figure 4 : classification des roches altérées (Wyns et al., 2004).

Cette classification est constituée de quatre ensembles et décrite par Wyns et al., 2004 et Lachassagne et al. (2009) :

- Latérite (cuirasse) : éventuellement absente, due à l'érosion ;
- Altérite (saprolite ou régolithe) : riche en matériaux argileux; formée par une décomposition prolongée *in situ* du bedrock ; peut atteindre plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. Il existe deux subdivisions pour la saprolite :
 - Allotérite : horizon très argileux : en raison de la réduction de volume liée au processus d'altération minéralogique, la texture et la structure de la roche mère sont perdues ;
 - Isaltérite : le processus d'altération induit un faible ou pas de changement du volume, la texture et la structure originelle de la roche mère sont conservées ;
- Horizon fissuré (saprock) : caractérisé par des roches très légèrement altérées affectées par un réseau dense de fissures horizontales et dont la densité diminue avec la profondeur (Cho et al., 2003 ; Maréchal et al., 2004 ; Wyns et al., 2004). Ces fissures résultent du processus d'altération (Cho et al., 2003 ; Wyns, 2003 ; Wyns et al., 2004 ; Dewandel et al., 2006) ;
- Roche saine : roche n'ayant pas subi l'altération.

3.1.4 Front d'altération

Dans ces différentes classifications une zone du profil d'altération est généralement oubliée : la zone entre la roche altérée et la roche « saine ». Le front d'altération est décrit par Migoñ & Lidmar-Bergström (2002) comme une surface séparant la roche altérée de la roche saine et dont l'épaisseur varie de quelques centimètres à plusieurs m. Lors du processus d'altération, les éléments lessivés comme le Fer et le Manganèse migrent vers le front d'altération et y cristallisent.

Résumé

L'évolution des profils d'altération, décrite d'une catégorie à l'autre, résulte essentiellement de l'état d'oxydation du Fer, la dissolution des feldspaths, le pourcentage de débris et la dureté de la roche. Dans le cadre de ce travail, il est difficile d'utiliser telles quelles ces classifications exclusivement réalisées pour les roches ignées. De plus, aux cours de ce travail, il sera montré que les feldspaths ne sont pas les principaux pourvoyeurs en kaolinite alors que ce postulat est communément admis dans la littérature.

Pour la classification des roches altérées en Région Wallonne, nous nous inspirons néanmoins de certains de ces paramètres (état d'oxydation du Fer, dureté de la roche,...).

3.1.5 La classification utilisée dans ce travail

Les travaux que nous avons menés en Région Wallonne conduisent à distinguer cinq catégories : les roches saines ; les roches légèrement altérées à altérées ; les roches altérées à fortement altérées ; les roches très fortement altérées et une dernière qui inclut toutes les roches se situant exclusivement au niveau du front d'altération.

3.1.5.1 Roches saines

Pour déterminer si une roche est altérée ou non, le plus aisé est de la comparer avec son équivalente saine. Les critères suivants caractérisent une roche saine, dans la région étudiée :

- présence de pyrite non-oxydée, de carbonates et de feldspaths (en fonction de la composition de la roche mère) ;
- cohérence mécanique élevée ;
- texture et structure bien nettes ;
- couleurs vives.

3.1.5.2 Roches légèrement altérées à altérées

Elles peuvent se caractériser par les critères suivants :

- pyrite oxydée ou légèrement oxydée, pouvant donner un effet moucheté à la roche (Photo 1) ;
- présence de caries remplies de kaolinite autour de la pyrite ;
- absence de carbonates ;
- placage d'oxydes dans les plans de fracture et dans la schistosité ;
- couleurs généralement délavées (par rapport à la roche saine) ;
- cohérence légèrement inférieure aux roches saines ;
- texture "plus douce", due à la présence d'argile ;
- porosité légèrement modifiée ;
- texture et structure de la roche mère très nettes.

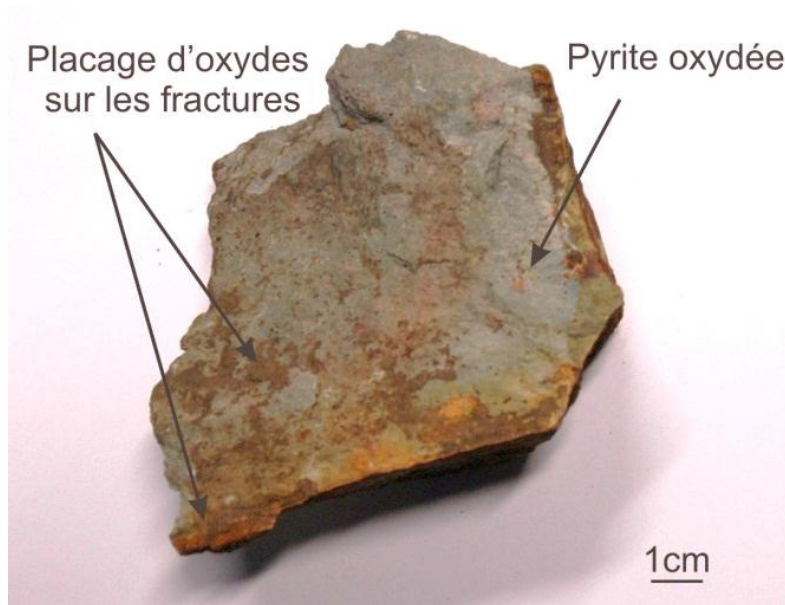


Photo 1 : pyrite légèrement oxydée et placage d'oxydes sur les fractures (roche légèrement altérée à altérée de la Formation d'Oignies)

3.1.5.3 Roches altérées à fortement altérées

Ces roches peuvent se caractériser par les critères suivants :

- pyrite, et carbonates complètement lessivés ;
- feldspaths légèrement altérés ;
- placage d'oxydes sur les plans de fracture ainsi que dans la schistosité (Photo 2 - Photo 3) ;
- présence d'auréoles d'oxydation (Photo 4) ;
- présence de macules, d'yeux de kaolin (Photo 5) et de caries (Photo 6) ;
- présence de lentilles rouges métriques à plurimétriques (Photo 7) ;
- couleurs fortement délavées à blanchâtres avec des niveaux bariolés ; ocre, jaune, rouge, orange, rose (Photo 8) ;
- faible cohérence de la roche (possibilité de casser manuellement) ;
- porosité de la roche nettement différente de la roche mère ;
- texture et structure de la roche mère préservées (Photo 9).

3.1.5.4 Les roches très fortement altérées

Ces roches peuvent se caractériser par les critères suivants :

- caractéristiques relativement similaires aux roches altérées à fortement altérées ;
- texture et structure des roches ont complètement disparu ; altération intense (comme par exemple des quartzites altérés en sables d'altération et des schistes en argile) ;
- dans certains cas, elles correspondent aux roches mères pédologiques.



Photo 2 : placage d'oxyde de Manganèse sous forme de dendrite (Carrière "Les Baraques" à Transinne).



Photo 3 : placage d'oxydes de Manganèse dans les plans de diagenèse surmonté par une auréole d'oxydation ferrugineuse (Carrière "Les Baraques" à Transinne).



Photo 4 : auréole d'oxydation ferrugineuse (Carrière "Les Baraques" à Transinne).



Photo 5 : yeux de kaolin (Carrière "Les Baraques" à Transinne).



Photo 6 : présence de caries et de pyrites oxydées dans un banc de kaolin (Carrière "Les Baraques" à Transinne).

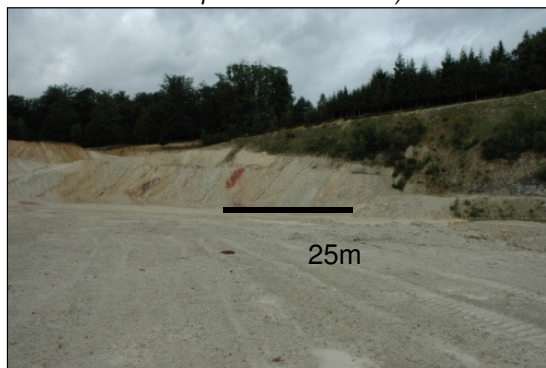


Photo 7 : présence d'une lentille rouge dans le gisement de kaolin la carrière "Les Baraques" à Transinne.



Photo 8 : ensemble d'échantillons montrant la diversité des couleurs présentes dans le gisement de la carrière "Les Baraques" à Transinne.

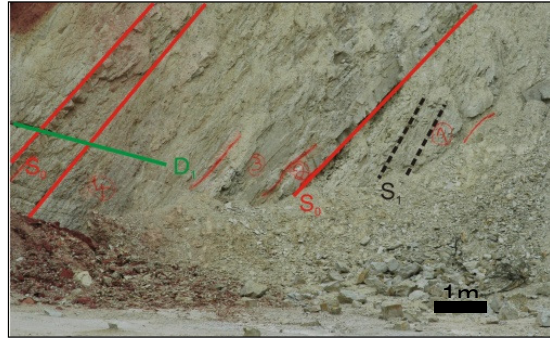


Photo 9 : conservation de la texture originelle. S_1 : schistosité; S_0 : stratification; D , plan de diagenèse.

3.1.5.5 Roches du front d'altération

Le front d'altération se situe entre la roche altérée à fortement altérée et la roche légèrement altérée à altérée. Ces roches sont généralement de couleur rouge, parfois avec des reflets bleuté-verdâtres en fonction de la roche mère, et se confondent facilement avec les lentilles rouges des roches fortement altérées (Photo 10). Des minéralisations d'oxydes de Fer et de Manganèse sont présentes. Ces minéralisations (connues sous le terme minier "Fer fort") ont été exploitées en Ardenne, au siècle dernier et on en retrouve les traces d'exploitation sous forme de puits – galeries et de tranchées (Voisin, 1994).

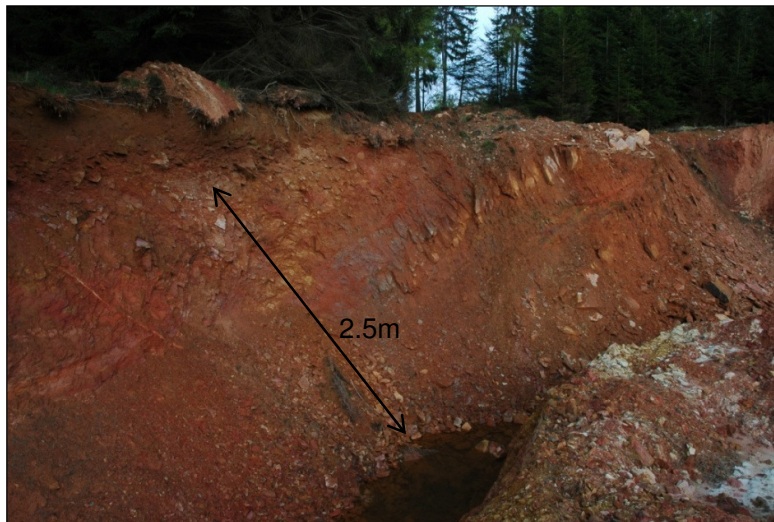


Photo 10 : front d'altération visible dans la Carrière Gatelier à Libin.

Il est entendu que ces catégories demeurent théoriques. L'altération étant graduelle, il existe toujours des échantillons dont le classement reste difficile, présentant les caractéristiques de deux ou plusieurs catégories. C'est ici qu'entre en jeu la sensibilité de chaque géologue, cartographe, pédologue, agronome, géographe, chimiste, ...

Résumé

Sur base des précédents travaux et de nos observations sur le terrain nous proposons une classification des roches altérées comprenant cinq catégories correspondant à une localisation dans le profil d'altération :

- roches saines ;
- roches légèrement altérées ;
- roches du front d'altération ;
- roches altérées à fortement altérées ;
- roches très fortement altérées.

Ces catégories seront utilisées tout au long de ce travail.

3.2 Processus d'altération généraux

L'altération météorique engendre des profils d'altération, dont nous venons de décrire les principales caractéristiques. Pour que les profils d'altération **kaoliniques** puissent se développer, plusieurs conditions environnementales sont nécessaires. D'autres profils d'altération météorique sont reconnus (silcrète, karst,...) mais n'entrent pas dans le cadre de ce travail.

Dans ce paragraphe, les conditions nécessaires pour l'altération météorique seront décrites en tenant compte de la nature et des propriétés de la roche mère, des conditions de drainage, des contextes géomorphologique et climatique (Schmitt, 1999).

Quesnel (1997) propose un schéma (Figure 5) reprenant, sous d'autres termes, l'ensemble des facteurs présentés ci-dessous. Ce schéma est réalisé dans le but de regrouper les différents facteurs qui conduisent à des profils d'altération météorique (kaolinique, silcrète, karstique, ...)

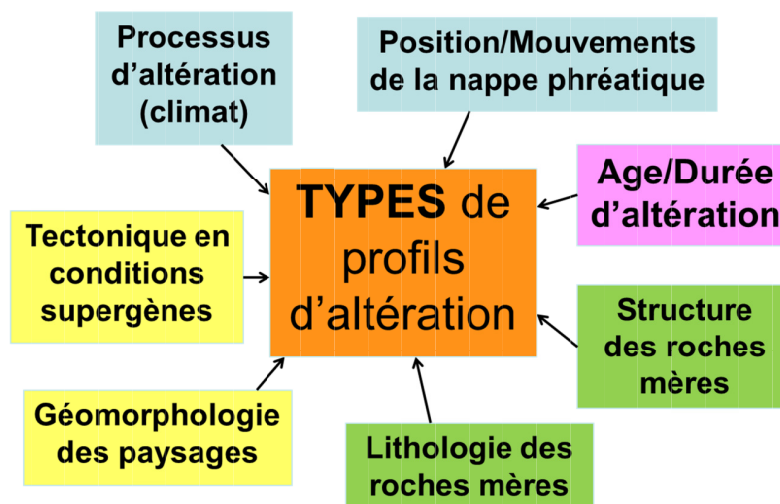


Figure 5 : paramètres intervenant dans la genèse et l'évolution des différents types de profils d'altération (modifié d'après Quesnel, 1997).

Contact atmosphère-lithosphère

Pour permettre aux fluides météoriques d'altérer la roche mère, celle-ci doit se trouver à l'affleurement (Figure 5: Tectonique en condition supergènes) et s'y maintenir suffisamment longtemps pour permettre le processus d'altération (Figure 5 : Durée d'altération).

Présence d'éléments chimiques requis

Les éléments chimiques nécessaires à la formation d'un profil kaolinique sont le Silicium, l'Aluminium, l'Hydrogène et l'Oxygène. La roche mère doit donc être silico-alumineuse (présence d'argile, de feldspaths et de quartz dans le cas de roches matures*) (Figure 5 : Lithologie des roches mères).

Présence et mobilité des fluides d'altération

Le processus d'altération étant *per descensum*, une quantité suffisante d'eau météorique est nécessaire pour lessiver la roche mère.

L'épaisseur de la zone vadose (zone non-saturée) doit être suffisante pour permettre la percolation des fluides d'altération et le lessivage de la roche mère sur l'ensemble du profil d'altération (Wyns, 2002) (Figure 5 : Position/mouvements de la nappe phréatique).

Le relief (Figure 5 : géomorphologie des paysages) joue notamment un rôle dans l'infiltration ou le ruissellement des eaux de pluies. Celles-ci vont majoritairement ruisseler sur les pentes abruptes, l'érosion est également plus intense. Ces deux facteurs engendrent des profils d'altération de faibles épaisseurs, sur les pentes douces, l'infiltration est importante et l'érosion faible, ce qui permet d'obtenir un profil d'altération d'une épaisseur assez conséquente (Johnsson, 1992 ; Campy & Marcaire, 2003 ; Dixon & Thorn, 2005) (Figure 6).

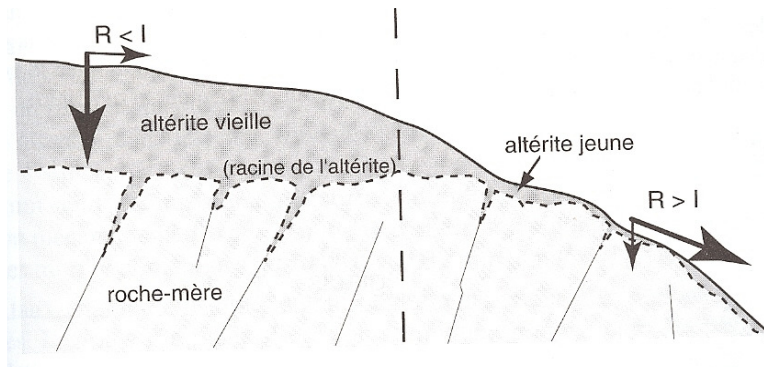


Figure 6 : schéma d'altération différentielle en fonction de la topographie (Campy & Macaire, 2003). R = ruissellement; I = infiltration.

Une perméabilité importante de la roche mère facilitera la percolation et le lessivage. La stratification, les diaclasses, la schistosité ... constituent des drains préférentiels (Figure 5 : structure des roches mères).

* Dans ce travail le terme "roche mature" est défini pour des "roches silicoclastiques ayant une disponibilité en cations relativement faible (autrement dit pauvre en minéraux géochimiquement variés)".

Environnement acide

Pour permettre la formation de kaolinite, le pH doit être compris entre 5 et 6 (Murray, 1988). Il faut donc que le milieu soit temporairement et localement légèrement acide.

Conservation ultérieure du profil

Le contexte géodynamique doit être relativement faible et stable pour permettre au profil de se développer. Le contexte eustatique qui suit la formation de la saprolite doit être globalement transgressif de façon à conserver le profil d'altération.

A ces facteurs nous ajouterons le facteur climatique et l'activité biologique.

Des facteurs climatiques tels que l'augmentation de la température et de la pression en CO₂ jouent un rôle positif, mais mineur, sur la cinétique de la formation de la kaolinite (De putter *et al.*, 2003 ; Wyns, 2002 ; Yans, 2003).

Facteur climatique

Par contre, un climat **humide** chaud ou froid, permettant à une végétation importante (forêt tropicale humide ou forêt tempérée) de se mettre en place, favorise le processus d'altération météorique (Figure 5 : Climat).

Activité biologique

L'activité biologique produit des ions H⁺ qui influencent la saprolitisation par l'acidification des sols (Berthelin, 1988 ; Berner et Berner, 1987 ; Robert, 1996). Le réseau racinaire, par son action mécanique, favorise la mise en place de fissures et fractures contribuant elle-même à la percolation des fluides. La végétation limite également l'érosion et influence positivement le processus d'altération.

L'activité bactérienne et microbienne, par ses réactions d'oxydo-réduction, libère également des ions H⁺, acidifiant le voisinage immédiat des cellules bactériennes (microsystème) et l'ensemble du sol (macrosystème) (Kolo, 2009 ; Robert, 1996). Cette acidité favorise le processus de dissolution et d'hydrolyse, en particulier des silicates (Campy & Macaire, 2003).

3.3 Fluides météoriques

Les fluides météoriques sont les principaux acteurs du processus d'altération. Yans (2003) a étudié la nature de ces fluides pour la région de la Haute-Lesse. Deux types de fluides sont à l'origine de l'altération météorique dans cette région et de façon générale pour les roches silicoclastiques en Région Wallonne :

- des fluides riches en acide sulfurique issus de l'oxydation de la pyrite qui sont rapidement neutralisés par la chlorite et par les carbonates ;
- des fluides riches en acide carbonique provenant de la dissolution des carbonates et surtout du CO₂ atmosphérique.

Ce dernier engendre l'essentiel de la kaolinite néoformée. Ces fluides météoriques vont entraîner la transformation et/ou la néoformation de minéraux. De manière générale, les réactions de transformation et de néoformation des silicates sont celles reprises sur la Figure 7.

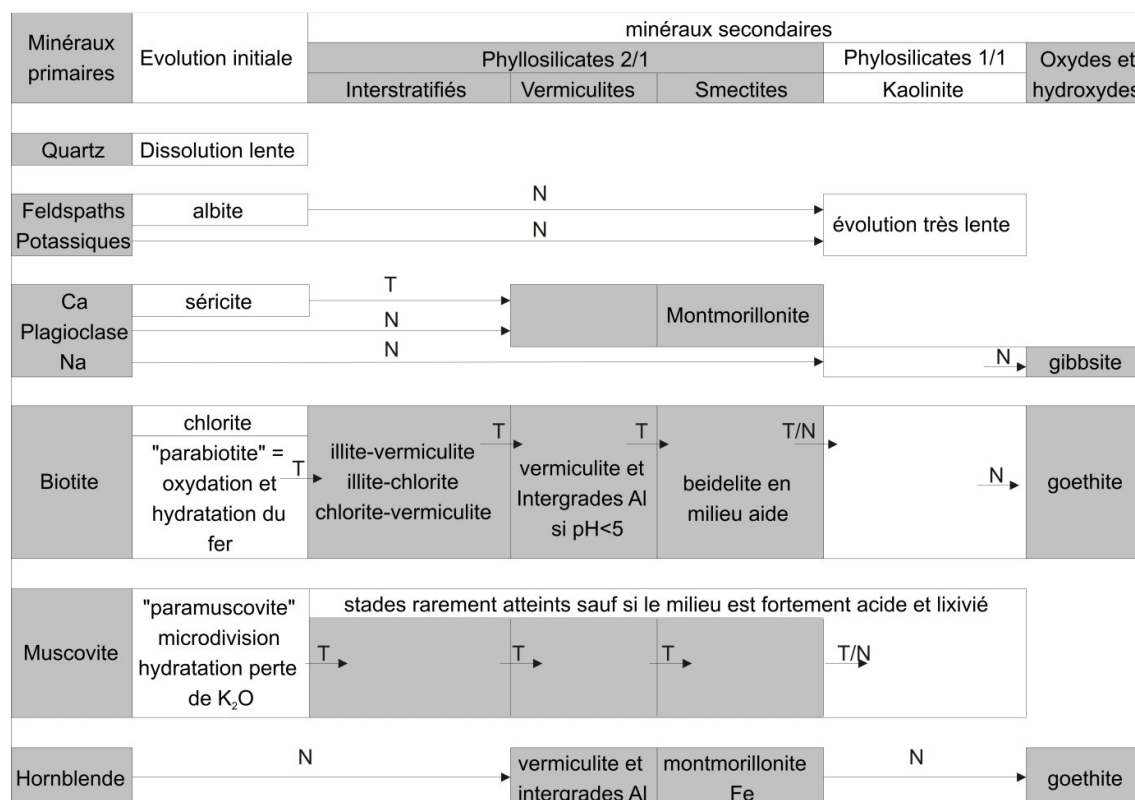


Figure 7 : évolution par altération météorique des principaux minéraux silicatés en climat tempéré humide (N : néoformation ; T : transformation) (Campy & Macaire, 2003).

4 Implication dans la vie économique

Les roches altérées interviennent dans de nombreux domaines tels que l'extraction, l'environnement, l'hydrogéologie, l'agriculture et le domaine forestier ou encore le secteur de la construction.... Ce qui constitue une partie non négligeable du tissu économique de la Région Wallonne (environ 14% des entreprises wallonne en 2008 (IWEPS, 2010)).

4.1 *Domaine de l'extraction*

Les roches altérées ont un intérêt économique important dans le domaine de l'extraction minière (Samama, 1973 ; Routhier 1980). En effet, la couverture latéritique est généralement le siège de concentrations de substances utiles, normalement disséminées dans la roche mère sous-jacente (Tardy, 1993). Les principaux éléments recherchés dans les roches altérées sont : le Fer, le Manganèse, le Nickel, le Cobalt, le Cuivre, le Plomb, le Zinc, l'Or, les terres rares, la silice, les argiles d'altération, ...

En Région Wallonne, c'est essentiellement pour les argiles d'altération qu'un intérêt économique s'est développé. Plusieurs industries situées en Wallonie s'en approvisionnent : les cimenteries, pour la fabrication du ciment blanc, les tuileries, les briqueteries,.... Grâce à leur faible perméabilité, elles servent également pour le colmatage de bassin, d'étang ou encore comme barrière argileuse dans les Centres d'Enfouissement Technique (CET)....

Dans les matériaux exploités ou l'ayant été, citons le kaolin de l'Ardenne dans la Région de la Haute-Lesse, le sable altéré du Condroz connus sous le nom de "sable blanc de Mettet", les gisements de Fer et de Manganèse de l'Ardenne (désormais inexploités), les gisements de Plomb-Zinc de la Calamine, issus de l'altération météorique de sulfures primaires.

4.2 *Secteur de la construction*

Bâtir sur une zone altérée demande des précautions particulières. Si elles n'ont pas été prises en compte dès le début du projet, elles peuvent occasionner un surcoût important lors de la construction. Certains chantiers d'envergure en ont fait les frais. Prenons comme exemple celui de la ligne de RER à Ottignies et celui de l'Esplanade à Louvain-la-Neuve qui se trouvent sur le Massif du Brabant. Dans les projets initiaux il était prévu de fonder ces ouvrages sur une série de pieux dimensionnés pour atteindre le socle du Massif du Brabant et ainsi permettre un enracinement stable de la structure. Le choix des pieux pour soutenir l'ouvrage étant dicté par la présence de l'épaisse couche de sable et argile présente sur le socle. Lors des forages pour placer les pieux, **des roches fortement altérées** ont été traversées sur plusieurs mètres. Afin d'atteindre une résistance suffisante sous l'assise des pieux, il s'est avéré nécessaire d'augmenter leur longueur et ainsi descendre jusqu'aux roches **saines** du socle. Il semble que les problèmes de stabilité dus aux roches altérées se posent essentiellement pour les structures supportées par des pieux : éoliennes, caténaires,

4.3 Domaine environnemental

Les argiles d'altération sont généralement d'une qualité suffisante pour permettre l'installation de Centres d'Enfouissement Technique (C.E.T.) ou pour réhabiliter des sites pollués. Plusieurs C.E.T. en Région Wallonne ont été créés sur des roches altérées comme par exemple les C.E.T. de Mont-Saint-Guibert (altération des roches du Massif du Brabant), de Malvoisin (altération des roches du Dévonien inférieur de l'Ardenne), de Morialmé (altération des roches du Famennien du Condroz). Les altérites sur roches schisteuses sont généralement retenues pour l'implantation des CET, essentiellement pour deux raisons : d'une part, lors de l'altération, les roches schisteuses se transforment en argile dont la perméabilité devient plus importante, et d'autre part, les fluides d'altération lessivent un certain nombre d'éléments chimiques qui auraient pu entrer en réaction avec les fluides engendrés par les déchets stockés.

4.4 Domaine hydrogéologique

De nombreux ouvrages sont consacrés à l'hydrogéologie des roches altérées (Cho *et al.*, 2003 ; Wyns *et al.*, 2004 ; Dewandel *et al.*, 2004 ; Dewandel *et al.*, 2006). L'horizon fissuré est caractérisé par la présence d'un réseau dense de fissures subhorizontales dans les dix premiers mètres supérieurs, résultat du processus d'altération (Cho *et al.*, 2003; Wyns *et al.*, 2004; Dewandel *et al.*, 2006 ; Lachassagne *et al.*, 2011). C'est donc au sein de l'horizon fissuré que se trouvent préférentiellement les nappes aquifères. Les propriétés hydrodynamiques de la couche fissurée sont donc contrôlées par la distribution, la conductivité hydraulique, l'anisotropie, de la conductivité hydraulique et la connectivité des fissures (Maréchal *et al.*, 2004). En Bretagne, 80 à 90% des réserves en eaux souterraines se trouvent dans l'horizon fissuré des granites altérés (Wyns *et al.*, 2004).

4.5 Domaine agricole et forestier

Les sols développés sur des roches altérées sont moins productifs car la majorité des cations ont été lessivés. Les forêts implantées sur des zones altérées sont également moins productives et les déracinements sont fréquents lors de tempêtes.