
Analyse de l'évolution spatiale et temporelle de la succession spontanée sur les sols marginaux des carrières de Kaolin (Belgique) en vue de la restauration de la carrière de Transinne

Auteur : Meeûs, Sophie

Promoteur(s) : Mahy, Grégory; Cornelis, Jean-Thomas

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : gestion des forêts et des espaces naturels, à finalité spécialisée

Année académique : 2017-2018

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/5139>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

**Analyse de l'évolution spatiale et temporelle de la
succession spontanée sur les sols marginaux des
carrières de Kaolin (Belgique) en vue de la restauration
de la carrière de Transinne.**

MEEÛS SOPHIE

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET DES ESPACES NATURELS**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2017-2018

(CO)-PROMOTEUR(S): MAHY G. , CORNELIS J-T.

*©Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.
Le présent document n'engage que son auteur.*

**Analyse de l'évolution spatiale et temporelle de la
succession spontanée sur les sols marginaux des
carrières de Kaolin (Belgique) en vue de la restauration
de la carrière de Transinne.**

MEEÛS SOPHIE

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET DES ESPACES NATURELS**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2017-2018

(CO)-PROMOTEUR(S): MAHY G. , CORNELIS J-T.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier les professeurs, assistants et techniciens de l'université de Gembloux qui m'ont aidée et conseillée tout au long de ce travail de fin d'étude.

Je tiens à remercier plus particulièrement :

Pr.Grégory Mahy et Pr.Jean-Thomas Cornelis, promoteurs de l'université de Gembloux, pour leur encadrement, leur disponibilité et leur enthousiasme tout au long de ce travail.

Pr. Yohan Yans, de l'université de Namur, pour ses conseils et remarques concernant la géologie du site et pour m'avoir accordé de consulter les archives de Namur sans lesquelles je n'aurais pu trouver les sites d'anciennes carrières de kaolins de l'Ardennes.

Merci à Lagrange Béatrice et Tarantino Raphaël pour m'avoir appris toutes les manipulations nécessaires pour les analyses en laboratoire.

Merci à Becquevort Stéphane pour ses explications concernant le perméamètre et pour sa patience et son implication lors de mes problèmes de mesures.

Merci également à Nicolas Alain, ouvrier responsable de la carrière de Transinne, d'avoir été si disponible dès que j'allais sur le site. Egalement un immense merci à Mme Noël, propriétaire de l'ancienne carrière de kaolin de Haut- Fays qui m'a autorisée à réaliser des relevés de sols et de végétation sur sa propriété. Sans ce site, mon étude n'aurait pas pu être réalisable.

Ensuite, je souhaite remercier du fond du cœur les personnes de mon entourage qui m'ont aidée, soutenue et encouragée tout au long de mes études et tout au long de ce travail de fin d'étude :

Merci à mes parents d'avoir toujours été aussi disponibles, ouverts et encourageants.

Merci à Yann pour sa relecture finale du mémoire, pour être venu m'aider sur le terrain, m'avoir rassuré et encouragé quand la fatigue se faisait ressentir.

Merci à tous mes amis TFistes, « colocataires » du bureau au GP : Luca Covone, Gauthier Deschamps, Pauline Quoitin, Dylan Delvaux, Elise Glaude, Julie Reniers et Tom Baudoux sans qui ce quadri m'aurait semblé bien long.

Merci enfin à Marie-Pierre Tasseroul, qui m'a accompagnée sur le terrain de nombreuses fois et à Clémence de Sart pour sa relecture totale!

Résumé

L'étude de la succession spontanée est souvent utilisée comme outil de restauration des sites dégradés telles que les carrières. Cette succession spontanée permet d'une part de restaurer la biodiversité du site mais également de restaurer un sol biologique, nécessaire pour supporter une flore diversifiée. Cette restauration écologique est une obligation légale et la carrière de Transinne, dernière en Wallonie à exploiter le Kaolin, doit penser à sa restauration future. Le kaolin est un substrat fortement altéré et présente des contraintes chimiques et physiques pour l'établissement et la croissance de la végétation. Très peu d'études se sont penchées sur la question de la recolonisation d'un tel substrat.

Ce travail a donc pour objectif d'étudier d'une part l'évolution temporelle des caractéristiques physico-chimiques des sols de kaolins ainsi que l'évolution des associations végétales et de leur stratégie sur ce substrat. D'autre part, cette étude a pour objectif d'identifier les espèces et associations végétales capables de recoloniser naturellement un site et d'identifier les facteurs environnementaux qui contraignent la distribution spatiale de ces espèces. Les résultats ont montrés une augmentation significative du COT et des nutriments ainsi qu'une évolution des stratégies CSR d'une stratégie compétitive vers une stress-tolérante et non l'inverse comme le prédit le modèle théorique. Enfin, en termes de restauration, deux types de biotopes ont été identifiés sur les sols de kaolins : les landes sèches à callune et les landes humides et leur distribution dépend de la pente, l'humidité totale et le pH du sol.

Abstract

The study of spontaneous succession is often used as a restoration tool of degraded landscape like quarries. This natural succession allows to restore biodiversity and restore biological soil which is useful to support a varied flora. Ecological restoration is a legal obligation and the Transinne quarry, the last quarry to exploit kaolin in Wallonie, has to think about its future restoration. Kaolin is a highly weathered soil and presents adverse chemical and physical constraints for vegetation establishment and growth. Few study adressed the issue of vegetation recolonization on kaolin soil.

This paper has two main goal: on the one hand, we studied temporal evolution of soil physico-chemical characteristics and temporal evolution of vegetation communities. On the other hand, we identified vegetation species and communities which are able to come naturally back on kaolin soil and we identified environmental factors which are restrictive for species geographical distribution. Our results show both a significant increase of COT and soil nutrients. Moreover, we observed a change in CSR strategy from competitive to stress-tolerator. This results run contrary to Grime's theory. Finally, about Transinne restoration, two biotope were identified: dry heaths with Calluna and wet heathlands. Their spatial constraints are slope, moisture and soil pH.

Table des matières

A.	INTRODUCTION	1
B.	SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	3
1.	LA SUCCESSION SPONTANEE COMME OUTIL DE RESTAURATION DES CARRIERES	3
1.1.	<i>La restauration : une obligation légale</i>	3
1.2.	<i>La succession spontanée : une méthode peu coûteuse</i>	4
1.3.	<i>La restauration des sols via la végétation</i>	4
1.4.	<i>Les stades de succession : modification des conditions abiotiques</i>	6
2.	LE KAOLIN : UNE ARGILE FORTEMENT ALTEREE	6
2.1.	<i>Historique de l'exploitation</i>	6
2.2.	<i>Genèse du Kaolin</i>	7
2.3.	<i>Composition et propriétés du Kaolin</i>	8
3.	UNE APPROCHE FONCTIONNELLE DE LA STRUCTURE DES COMMUNAUTES VEGETALES	9
3.1.	<i>Variation des communautés selon les gradients environnementaux</i>	9
3.2.	<i>L'approche par les traits fonctionnels mesurés au niveau de la communauté</i>	10
3.3.	<i>Variation des stratégies CSR des communautés selon les facteurs environnementaux</i>	10
C.	OBJECTIFS DU TFE	13
D.	MATERIEL ET METHODE	15
1.	DESCRIPTION DES SITES D'ETUDE	15
1.1.	<i>Les trois stades de chronoséquence</i>	15
1.2.	<i>Climat de la région</i>	17
1.3.	<i>Géologie du site de Transinne</i>	18
1.4.	<i>Pédologie des sites d'étude</i>	19
1.5.	<i>La végétation</i>	20
2.	ECHANTILLONNAGES	20
2.1.	<i>Partie 1 : Analyse de l'évolution temporelle du sol et des associations végétales</i>	20
2.2.	<i>Partie 2 : Variation des traits fonctionnels et des stratégies CSR des communautés selon les gradients environnementaux</i>	20
3.	ANALYSES PEDOLOGIQUES	21
3.1.	<i>Préparation des échantillons de sol</i>	22
3.2.	<i>Analyses chimiques des sols</i>	22
3.3.	<i>Analyses physiques des échantillons de sols</i>	24
4.	ANALYSES DE LA VEGETATION	24
4.1.	<i>Analyses des traits fonctionnels</i>	24
4.2.	<i>Analyses de la stratégie des communautés</i>	24
5.	ANALYSES STATISTIQUES	25
5.1.	<i>Partie 1 : Analyse de l'évolution temporelle du sol et des associations végétales</i>	25
5.2.	<i>Partie 2 : Variation des traits fonctionnels et de la stratégie CSR des communautés selon les gradients environnementaux</i>	25
E.	RÉSULTATS	26
1.	PARTIE 1 : ANALYSE DE L'EVOLUTION TEMPORELLE DES PROPRIETES DU SOL, DES ASSOCIATIONS VEGETALES ET DE LEUR STRATEGIE	26
1.1	<i>Partie 1: Evolution des propriétés physico-chimiques des sols de kaolins</i>	26
1.2	<i>Partie 1: Evolution des associations végétales et des stratégies des communautés</i>	29
2.	PARTIE 2 : VARIATION DES TRAITS FONCTIONNELS ET DE LA STRATEGIE CSR DES COMMUNAUTES SELON LES GRADIENTS ENVIRONNEMENTAUX.	30
2.1	<i>Partie 2 : identification des associations végétales et de leur contrainte environnementale</i>	30
2.2	<i>Partie 2 : Variation des stratégies CSR des communautés en fonction des gradients environnementaux</i>	35
2.3	<i>Partie 2 : Variation des traits fonctionnels en fonction des gradients environnementaux</i>	36
F.	DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES	37
1.	LES LIMITES DE L'ETUDE	37
2.	ANALYSE DE L'EVOLUTION TEMPORELLE DES PROPRIETES DU SOL, DES ASSOCIATIONS VEGETALES ET DE LEUR STRATEGIE	37
3.	ANALYSE DE LA VARIATION DES TRAITS FONCTIONNELLES ET DE LA STRATEGIE CSR DES COMMUNAUTES SELON LES GRADIENTS ENVIRONNEMENTAUX.	39

3.1.	<i>Répartitions des communautés végétales en fonction des gradients environnementaux</i>	39
3.2.	<i>Variation des stratégies CSR en fonction des gradients environnementaux</i>	41
3.3.	<i>Variation des traits fonctionnels en fonction des gradients environnementaux</i>	41
G.	CONCLUSION	42
H.	BIBLIOGRAPHIE	43
I.	WEBOGRAPHIE	45
J.	ANNEXES	46

Table des tableaux

TABLEAU 1: ANALYSES CHIMIQUES DE LA SAPROLITE DE TRANSINNE. SOURCE : (YANS, 2003)	8
TABLEAU 2: DONNEES IRM POUR LES COMMUNES DE LIBIN ET DAVERDISSE	17
TABLEAU 3: ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES RELATIVES A CHACUNE DES DEUX PARTIES DU TRAVAIL	21
TABLEAU 4: MOYENNES (GRAS ITALIQUE) ET ECART-TYPES (ENTRE PARENTHESE) DES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES RELATIVES A CHAQUE STADE DE CHRONOSEQUENCE : STADE INITIAL (TRANSINNE), STADE INTERMEDIAIRE (ARFAYE) ET STADE AVANCE (HAUT-FAYS) ABANDONNES DEPUIS RESPECTIVEMENT 2 ANS, 10 ANS ET 57 ANS.. SIGNIFICATIVITE DE LA P-VALEUR (TEST-F) DE L'ANOVA : *P<0,05 ; **P<0,01 ; ***P<0,001..	26
TABLEAU 5: MATRICE DE CORRELATIONS ENTRE LES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES MESUREES AU NIVEAU DU QUADRAT (N=9) AU SEIN DES TROIS SITES D'ETUDE : STADE INITIAL (TRANSINNE,) INTERMEDIAIRE (ARFAYE) ET AVANCE (HAUT-FAYS), ABANDONNES DEPUIS RESPECTIVEMENT 2 ANS, 10 ANS ET 57 ANS. LES COEFFICIENTS DE CORRELATIONS DE PEARSON SIGNIFICATIFS SONT INDICUES EN GRAS ET LE NIVEAU DE SIGNIFICATIVITE EST LE SUIVANT : *P<0,05 ; **P<0,01 ; ***P<0,001	28
TABLEAU 6: A) LISTE DES ESPECES PRESENTES DANS LES RELEVES DE VEGETATION DES TROIS CARRIERES DE KAOLINS ABANDONNEES A DES PERIODES DIFFERENTES : TRANSINNE, STADE INITIAL (2 ANS), ARFAYE, STADE INTERMEDIAIRE (~10 ANS) ; HAUT-FAYS, STADE AVANCE (57 ANS). B) NOMBRE D'ESPECES IDENTIFIEES PAR M ² DE VEGETATION DANS CHACUNE DES TROIS CARRIERES DE KAOLINS.	29
TABLEAU 7: MOYENNE, MINIMUM, MAXIMUM ET ECART-TYPE DES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES MESUREES POUR TOUS LES RELEVES DE SOL (N=30) AU SEIN DE LA CARRIERE DE L'ARFAYE (STADE INTERMEDIAIRE) ABANDONNEE DEPUIS 2008. LES CONCENTRATIONS DES ELEMENTS CHIMIQUES SONT EXPRIMEE EN MG/100G, LA PENTE EN DEGRE ET L'HUMIDITE TOTALE ET RESIDUELLE EN %.	30
TABLEAU 8: MATRICE DE CORRELATIONS ENTRE LES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES, MESUREES AU NIVEAU DU QUADRAT (N=30) AU SEIN DE LA CARRIERE DE L'ARFAYE (STADE INTERMEDIAIRE DE LA SUCCESSION SPONTANEE) ABANDONNEE DEPUIS 10 ANS. LES COEFFICIENTS DE CORRELATIONS DE PEARSON SIGNIFICATIFS SONT INDICUES EN GRAS ET LE NIVEAU DE SIGNIFICATIVITE EST LE SUIVANT : *P<0,05 ; **P<0,01 ; ***P<0,001	31
TABLEAU 9: LISTE DES ESPECES INDICATRICES DANS LE CAS OU LE NOMBRE DE GROUPE EST DE DEUX (K=2) ET OU LE NOMBRE DE GROUPE EST DE QUATRE (K=4). GROUPE= NUMERO DU GROUPE PRESENTANT L'INDVAL MAXIMUM POUR L'ESPECE X. C'EST DONC LE GROUPE DONT L'ESPECE X EST INDICATRICE. INDVAL= VALEUR LA PLUS ELEVEE DE LA VALEUR INDICATRICE (IV= FIDELITE*SPECIFICITE). PVALEUR= NIVEAU DE SIGNIFICATIVITE DE LA VALEUR DE L'INDVAL. *P<0,05 ; **P<0,01 ; ***P<0,001	32
TABLEAU 10: COEFFICIENTS DE CORRELATION ENTRE LES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES ET LES AXES DE LA PCOA. L'AXE 1 EXPLIQUE 23,45% DE LA VARIABILITE ET L'AXE 2 EXPLIQUE 10,88% DE LA VARIABILITE.	34
TABLEAU 11: P-VALEUR (TEST F) DE L'ANOVA TESTANT L'EGALITE DES MOYENNES DES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES ENTRE LES DEUX GROUPES DE RELEVES FLORISTIQUEMENT SIMILAIRES SUR LE STADE INTERMEDIAIRE DE LA SUCCESSION (ARFAYE).	34
TABLEAU 12: POURCENTAGE DE RELEVES PAR STRATEGIE ET PAR GROUPE	35
TABLEAU 13: P-VALEUR DE L'ANOVA (TEST F) TESTANT L'EGALITE DES MOYENNES DES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES ENTRE LES DIFFERENTES STRATEGIES CSR IDENTIFIEES SUR LE STADE INTERMEDIAIRE DE LA SUCCESSION (ARFAYE).	36
TABLEAU 14: COEFFICIENT DE CORRELATION DE PEARSON ENTRE LES VALEURS DE SLA MESUREES AU NIVEAU DU QUADRAT ET LES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES. AUCUNE CORRELATION N'EST SIGNIFICATIVE : P>0,05	36

Table des figures

FIGURE 1: PROCESSUS DE RESTAURATION ECOLOGIQUE ET DE REHABILITATION. LA RESTAURATION ECOLOGIQUE PERMET D'ASSISTER LE RETABLISSEMENT D'UN ECOSYSTEME DEGRADE ET DE LE RELANCER SUR SA TRAJECTOIRE ECOLOGIQUE AFIN D'ATTEINDRE L'ECOSYSTEME DE REFERENCE (ETAT INITIAL AVANT PERTURBATION). LA REHABILITATION CONSISTE A RETROUVER DES FONCTIONS ESSENTIELLES DE L'ECOSYSTEME DE REFERENCE, NON A RESTAURER L'ETAT INITIAL. _____	3
FIGURE 2: ETAPES DE LA FORMATION D'UN SOL (SOURCE: HTTP://SVT.AC-DIJON.FR). (1) ALTERATION DE LA ROCHE-MERE INITIALE SOUS L'EFFET DES PLUIES, CHALEUR, VENT, GEL... (2) INSTALLATION DES ESPECES PIONNIERES (LICHENS, MOUSSES) QUI ALTERENT CHIMIQUEMENT ET PHYSIQUEMENT LA ROCHE ET APPORTE DE LA MATIERE ORGANIQUE (3) INSTALLATION DE VEGETAUX HERBACES ET FORMATION D'UN SOL PEU EPAIS. (4) FORMATION ET DIFFERENCIATION D'HORIZONS DU SOL. _____	5
FIGURE 3: RESTAURATION DE LA STRUCTURE ET DES FONCTIONS D'UN SOL DEGRADE. LA RESTAURATION D'UN SOL SE FAIT VIA LA RESTAURATION DE SES FONCTIONS ET DE SA STRUCTURE A L'AIDE DE L'APPORT DE MATIERE ORGANIQUE, ISSUE DE LA VEGETATION. SOURCE: (BRADSHAW, 1997). ____	5
FIGURE 4: GISEMENTS DE KAOLINS BELGES LOCALISES LE LONG DU SYNCLINAL ET DE L'ANTICLINAL DE REDU. _____	7
FIGURE 5: LES DIFFERENTS FILTRES A L'ETABLISSEMENT D'UNE COMMUNAUTE VEGETALE. LE FILTRE A LA DISPERSION DETERMINE QUELLES ESPECES VEGETALES ATTEIGNENT OU NON UN SITE DONNE (FRAGMENTATION D'HABITAT, BANQUE DE GRAINE PRESENTES...). LES ESPECES AYANT ATTEINT CE SITE SONT ENSUITE SOUMISES AU FILTRE ABIOTIQUE : SEULES LES ESPECES ADAPTEES AUX CONDITIONS ABIOTIQUES DU SITE (PH, HUMIDITE,...) SURVIVENT. ENFIN, LES ESPECES ETANT ADAPTEES AUX CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES SONT SOUMISES AU DERNIER FILTRE : LE FILTRE BIOTIQUE. ELLES SONT SOUMISES A LA COMPETITION, A L'HERBIVORIE ET AUTRES INTERACTIONS DIRECTES OU INDIRECTES AVEC LES AUTRES ORGANISMES VIVANTS. LES ESPECES AYANT PASSE LES TROIS FILTRES FORMENT UNE COMMUNAUTE VEGETALE. _____	9
FIGURE 6: STRATEGIES CSR PLACEES DANS LE TRIANGLE DE GRIME. SOURCE: WIKIPEDIA. UNE ESPECE PEUT ADOPTER UNE STRATEGIE PRIMAIRE (C, S OU R), UNE STRATEGIE SECONDAIRE (CS, CR, SR) OU ENCORE UNE STRATEGIE INTERMEDIAIRE (CSR). _____	11
FIGURE 7: OBJECTIFS SCHEMATIQUES DU TRAVAIL. LE PREMIER OBJECTIF CONSISTE EN L'ANALYSE DE L'EVOLUTION TEMPORELLE DES ASSOCIATIONS VEGETALES ET DES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU SOL. LE SECOND OBJECTIF CONSISTE EN L'ANALYSE DE LA VARIATION DE LE SLA ET DE LA STRATEGIE CSR DES COMMUNAUTES SELON LES GRADIENTS ENVIRONNEMENTAUX. _____	13
FIGURE 8: LOCALISATION DES TROIS SITES D'ETUDES. LE SITE DE TRANSINNE (STADE INITIAL) ET LE SITE DE L'ARFAYE (STADE INTERMEDIAIRE) SE SITUENT DANS LA COMMUNE DE LIBIN. LE SITE D'HAUT-FAYS (STADE AVANCE) SE SITUE DANS LA COMMUNE DE DAVERDISSE. _____	15
FIGURE 9: VUE AERIENNE DE LA CARRIERE DE TRANSINNE. LA ZONE OUEST (PLUS GRANDE SUPERFICIE) EST LA PARTIE LA PLUS ANCIENNE DE LA CARRIERE. LA ZONE EST (SUPERFICIE MOINDRE) EST LA ZONE LA PLUS RECENTE. LE SITE EXPERIMENTAL SE SITUE DANS LA ZONE EST. SOURCE: WALONMAP. _____	16
FIGURE 10: VUE AERIENNE DE LA CARRIERE DE L'ARFAYE. LA ZONE OUEST EST UNE ZONE DE DEPOT. LA ZONE AU SUD DES DEUX ETENDUES D'EAU EST EXPLOITABLE POUR L'ETUDE. SOURCE: WALONMAPFIGURE. _____	16
FIGURE 11: VUE AERIENNE DE LA CARRIERE DE HAUT-FAYS, STADE AVANCE DE LA SUCCESSION. SOURCE: WALONMAPFIGURE _____	17
FIGURE 12: GENESE DES LOESS PROVENANT DE L'EROSION EOLIENNE DES SEDIMENTS FLUVIOGLACIAIRES. SOURCES : HTTP://WWW.GEOLSED.ULG.AC.BE/GEOLW/WAL/GEOLW/WAL.HTM#LE_DEVONIEN_INFRIEUR _____	18
FIGURE 13: REPARTITION MONDIALE DES LOESS (1) AINSI QUE DES SEDIMENTS EOLIENS APPARENTES. SOURCE: (PECSI, 1990; ANTOINE, 2002) ____	19
FIGURE 14: PEDOLOGIE DU STADE INITIAL, INTERMEDIAIRE, AVANCE DE LA SUCCESSION SPONTANEE (DE GAUCHE A DROITE). LES CONTOURS (EN NOIR) REPRESENTENT LES LIMITES DE CHACUNE DES CARRIERES. IL EST A NOTER QUE LES SOLS REPRESENTES SUR CES CARTES SONT LES SOLS D'AVANT EXPLOITATION. _____	19
FIGURE 15: SCHEMA D'ECHANTILLONAGE. QUADRAT DE VEGETATION AU CENTRE DE TROIS ECHANTILLONS DE SOLS (ANALYSES CHIMIQUES DU SOL). ECHANTILLON DE SOL A STRUCTURE CONSERVEE AU CENTRE DU QUADRAT POUR LES ANALYSES PHYSIQUES DU SOL. _____	20
FIGURE 16: TRANSECTS (LIGNES) PERPENDICULAIRE A LA PENTE ET QUADRATS (POINTS) DE LA CARRIERE DE L'ARFAYE, STADE INTERMEDIAIRE DE LA SUCCESSION ABANDONNE DEPUIS 2008. _____	21
FIGURE 17: MOYENNE (N=3) DE CHACUNE DES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES PAR STADE DE CHRONOSEQUENCE : LE STADE INITIAL (TRANSINNE), ABANDONNE DEPUIS 2 ANS, LE STADE INTERMEDIAIRE (ARFAYE), ABANDONNE DEPUIS 10 ANS ET LE STADE AVANCE (HAUT-FAYS) ABANDONNE DEPUIS 57 ANS. _____	27
FIGURE 18: MATRICE DE CORRELATIONS ENTRE LES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES. UNE CORRELATION POSITIVE EST REPRESENTEE EN BLEUE ET UNE CORRELATION NEGATIVE EST REPRESENTEE EN ROUGE. PLUS LA CORRELATION ENTRE DEUX VARIABLES EST FORTE, PLUS L'INTENSITE DE LA COULEUR EST IMPORTANTE (VOIR ECHELLE A DROITE) ET PLUS LE RAYON DU CERCLE EST GRAND. AINSI, UNE CORRELATION POSITIVE DE 1 SERA REPRESENTEE PAR UN LARGE CERCLE DE COULEUR BLEUE FONCEE ET UNE CORRELATION NEGATIVE DE 1 SERA REPRESENTEE PAR UN LARGE CERCLE DE COULEUR ROUGE FONCEE. _____	28
FIGURE 19: STRATEGIES CSR DE CHACUNE DES COMMUNAUTES VEGETALES IDENTIFIEES DANS LES RELEVES DE VEGETATION AU SEIN DES TROIS CARRIERES DE KAOLINS ABANDONNEES A DES PERIODES DIFFERENTES : TRANSINNE, STADE INITIAL (2 ANS), ARFAYE, STADE INTERMEDIAIRE (~10 ANS), HAUT-FAYS, STADE AVANCE (57 ANS). _____	29
FIGURE 20: DENDROGRAMME (METHODE « WARD.D ») _____	31
FIGURE 21: PCoA CONTRAINT A POSTERIORI PAR LES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES (23,45% DE LA VARIABILITE EST EXPLIQUEE PAR L'AXE 1 ET 10,88% PAR L'AXE 2).. LE PREMIER GROUPE DE RELEVES FLORISTIQUEMENT SIMILAIRES EST REPRESENTE PAR DES CARRES ET LE SECOND PAR DES	

CERCLES. LES ESPECES VEGETALES SONT REPRESENTEES PAR DES LOSANGES PLEINS. LES DEUX GROUPES ISSUS DE L'ANALYSE DE GROUPEMENTS SONT NETTEMENT SEPARES ET SE REPARTISSENT LE LONG DE L'AXE 1.	33
FIGURE 22: STRATEGIES DES COMMUNAUTES SUR LE SITE DE L'ARFAYE PLACEES DANS LE TRIANGLE DE GRIME. LE PREMIER GROUPE DE RELEVES FLORISTIQUEMENT SIMILAIRE EST INDIQUE PAR DES POINTS NOIRS ET LE SECOND GROUPE DE RELEVES PAR DES POINTS VIDES.	35
FIGURE 23: ANALYSE CHIMIQUE DE LA SAPROLITE DE TRANSINNE. SOURCE: YANS(2003)	38

A. Introduction

La dégradation des habitats naturels suite à leur conversion agricole et industrielle représente un des impacts majeurs de l'Homme sur l'environnement et menace grandement la biodiversité (Dobson et al., 1997). La restauration écologique¹ des habitats dégradés représente par conséquent un défi pour la préservation des écosystèmes (Hobbs et al., 2001).

Parmi ces nombreux écosystèmes dégradés par les activités humaines, les sites miniers et les carrières, surfaces converties pour l'activité industrielle d'extraction, présentent de nombreux impacts négatifs sur l'environnement (Bétard, 2013). Les activités extractives persistent généralement jusqu'à ce que les ressources minérales soient épuisées (Dobson, 1997), dégradant de ce fait de manière irréversible l'environnement initial et sa biodiversité. Actuellement, le réaménagement de ces sites est devenue obligatoire (loi incluse dans le CoDT) et les compagnies d'extraction sont responsables de la restauration de ces sites (Bétard, 2013). Il est à noter qu'il est plutôt question de réhabiliter que de restaurer les carrières, la différence résidant dans l'écosystème de référence : la restauration vise à revenir à l'écosystème initial avant perturbation tandis que la réhabilitation vise à retrouver des fonctions essentielles mais ne vise pas à retourner à l'état initial. Le sol des carrières étant exporté, le nouvel écosystème ainsi généré est radicalement différent de celui qui prévalait avant l'exploitation (Frochot et al., 1995). Il s'agit donc plutôt de réhabilitation que de restauration sens stricto.

Paradoxalement, il est reconnu que ces sites, une fois abandonnés, présentent un grand intérêt biologique et un potentiel écologique important suite à la re-végétalisation naturelle du site (Frochot, 1995; Bétard, 2013) et ce grâce aux nombreuses niches distinctes générées par l'hétérogénéité du substrat, les gradients topographiques, hydrologiques et géologiques. Ces niches sont colonisées par une faune et une flore variée, parfois d'intérêt conservatoire (Prach et al., 2013; Bétard, 2013; Mahy et al., 2014).

Parmi les nombreuses carrières en Belgique (calcaire, grès, quartz...), les carrières de kaolin sont très peu connues scientifiquement d'une part parce qu'elles sont peu nombreuses (une petite dizaine seulement) et d'autre part parce qu'elles ont presque toutes fermé dans les années 60, date à laquelle la loi obligeant la société d'extraction à réhabiliter le site n'était pas encore entrée en vigueur. Par conséquent, aucune étude scientifique relative à la restauration de ces sites et à la succession écologique de ces carrières n'a été réalisée en Belgique. Actuellement, il ne reste qu'une seule carrière de Kaolin en activité en Wallonie, celle de la barrière de Transinne, exploitée par la société CBR-HeidelbergCement. Selon Alain Nicolas, employé dans cette carrière, tout le kaolin du site aura été exploité d'ici une trentaine d'années, au rythme actuel d'exploitation. Cette société se voit donc dans l'obligation de penser à la réhabilitation future de la carrière. Pour ce faire, une zone expérimentale a été ouverte à Transinne en 2016 en vue d'étudier les méthodes de restauration.

La succession spontanée² étant un outil de restauration écologique peu coûteux et présentant un grand intérêt écologique et biologique, l'étude des différents stades de succession spontanée sur des sols marginaux comme le kaolin serait intéressante à la fois dans un but de restauration et à la fois d'un point de vue scientifique. En effet, ce substrat est issu d'une forte altération datant de l'époque du Crétacé et Miocène (Dancer et al., 1977) où les conditions climatiques étaient radicalement différentes de celles d'aujourd'hui. Ce substrat, formé habituellement sous des conditions tropicales, se retrouve ici mis à nu sous un climat tempéré. Ses propriétés physico-chimiques marginales en font un sol à forte contrainte chimique, physique et biologique pour la reprise de la végétation. L'interaction sol-plante étant primordiale pour la régénération du sol, il est indispensable d'analyser quelles espèces végétales sont capables de s'y développer dans les premiers stades de la succession et comment la distribution de celles-ci varient spatialement et évoluent au cours du temps.

¹ *Restauration écologique* : procédé qui permet d'assister le rétablissement d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit. Elle désigne la remise dans un état initial défini, considéré comme "naturel", d'un système perturbé par l'activité humaine.

² *Succession spontanée* : tendance des communautés à se remettre naturellement d'une perturbation naturelle ou anthropique. La restauration écologique consiste souvent à assister ou accélérer ce processus.

D'autre part, les substrats créés par l'activité d'extraction en carrières présentent une grande hétérogénéité d'un point de vue de la capacité de rétention en eau et concentration en oxyde de fer. On s'attend donc à ce que les communautés végétales présentent des différences dans leur stratégie et dans certains traits fonctionnels. L'analyse de la variation de ces traits et de la stratégie des communautés en fonction des facteurs environnementaux est d'une grande importance en écologie afin de comprendre comment s'assemblent ces communautés végétales.

Cette étude a donc pour but :

- D'identifier les associations végétales s'installant naturellement sur les sols marginaux créés par l'activité d'extraction en carrière de kaolin.

- D'identifier les stades de la succession végétale sur les sols marginaux créés par l'activité d'extraction en carrière de kaolin et identifier comment ces stades de succession modifient les propriétés du sol au cours du temps

- D'analyser la variation d'un trait fonctionnel, la SLA, et la stratégie CSR³ des communautés végétales en fonction de la variation des facteurs environnementaux sur les sols marginaux créés par l'activité d'extraction en carrière de kaolin.

³ *Stratégie CSR* : théorie selon laquelle il existe trois stratégies principales (compétitive, stress-tolérante et rudérale) auxquelles appartiennent les espèces végétales, une espèce pouvant adopter une stratégie intermédiaire (CS,CR,CSR...). Ces stratégies sont définies en réponse à différents facteurs environnementaux : le stress, la compétition et la perturbation.

B. Synthèse bibliographique

1. La succession spontanée comme outil de restauration des carrières

1.1. La restauration : une obligation légale

L'obligation de réhabiliter les carrières existe depuis 1911 avec la Loi sur la conservation de la beauté des paysages (12 août 1911)⁴. Toutefois, malgré cette dernière, beaucoup de carrières sont restées à l'abandon à la fin de l'exploitation. Actuellement, cette obligation de réaménager les sites d'extraction en les dédiant à l'agriculture, la sylviculture ou à la conservation de la nature est incluse dans la CoDT. Par réaménagement de site, cette loi entend « y réaliser des actes et travaux de réhabilitation, de rénovation, d'assainissement du terrain au sens de l'article 2, 10°, du décret du 5 décembre 2008[...] ».

Comme déjà mentionné précédemment, on parle ici plutôt de réhabiliter et non de restaurer les carrières. La restauration consiste à aider au rétablissement d'un écosystème qui a été dégradé suite à des activités humaines telles que des activités d'extraction (Figure 1). L'objectif de la restauration est de revenir à l'état initial de l'écosystème avant perturbation. Pour ce faire, il est nécessaire de définir « un écosystème de référence qui sert de modèle pour la planification d'un projet de restauration » (Clewell et al., 2004). Cet écosystème est un écosystème existant qui représente l'état dans lequel se trouvait l'écosystème à restaurer avant sa dégradation. La restauration consiste donc à aider au rétablissement de l'écosystème de référence en lançant l'écosystème dégradé sur sa trajectoire écologique. Celle-ci est définie comme le chemin évolutif de l'écosystème au cours du temps qui commence avec l'écosystème dégradé dans le cas d'un projet de restauration et qui progresse vers l'écosystème de référence (Clewell, 2004). Toutefois, cet état de référence est souvent difficile à atteindre. C'est le cas des carrières où le sol a été exporté. Dans ce cas, on parle alors de réhabilitation. Celle-ci se sert également des écosystèmes de référence mais ne vise pas à retrouver son intégrité biotique. Elle consiste à retrouver certaines fonctions essentielles de l'écosystème initial (cycle biogéochimique par exemple).

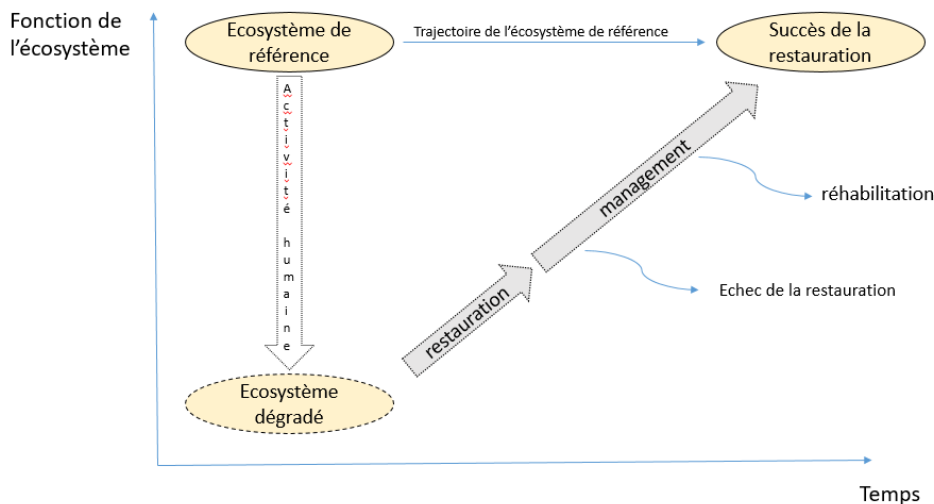


Figure 1: processus de restauration écologique et de réhabilitation. La restauration écologique permet d'assister le rétablissement d'un écosystème dégradé et de le relancer sur sa trajectoire écologique afin d'atteindre l'écosystème de référence (état initial avant perturbation). La réhabilitation consiste à retrouver des fonctions essentielles de l'écosystème de référence, non à restaurer l'état initial.

⁴ Loi de 1911 sur la conservation de la beauté des paysages, LB 1911, art 1.

1.2. La succession spontanée : une méthode peu coûteuse

Il existe trois voies de restauration/réhabilitation d'un site (Prach et al., 2008). La première se base entièrement sur la succession écologique végétale, la deuxième consiste à faire appel à des mesures techniques (comme par exemple le transfert de sol ou l'étrépage⁵). La dernière consiste à manipuler la succession spontanée vers une cible en adoptant ces mesures techniques, c'est ce qu'on appelle la succession assistée.

La succession écologique est définie comme le processus naturel de l'évolution et du développement d'un écosystème depuis son stade initial jusqu'à son stade climacique. On distingue la succession primaire et la succession secondaire. On parle de succession primaire lorsque celle-ci débute sur un habitat dépourvu de sol. Les premières espèces végétales à s'y installer sont dites pionnières. La succession secondaire, quant à elle, débute sur un habitat qui a subi une perturbation naturelle ou anthropique.

L'étude des successions écologiques permet d'identifier la trajectoire écologique d'un écosystème donné. En effet, une succession écologique est composée de plusieurs stades de succession, appelée séries. Chacune d'elle est caractérisée par une biocénose particulière. L'étude de la succession écologique permet d'identifier ces différents stades de la succession et d'identifier le pool d'espèce végétale associé à chacun d'eux ainsi que les contraintes environnementales (biotiques et abiotiques) qui régissent l'établissement des espèces sur un site donné. Dans un projet de restauration/réhabilitation, connaître le pool d'espèce ainsi que les contraintes d'un site permet d'assister la succession écologique en semant les espèces adaptées aux conditions environnementales et/ou en réhabilitant les conditions abiotiques du site à l'aide de différentes mesures techniques. Cette succession assistée permet d'accélérer le processus de la succession spontanée en remettant l'écosystème sur sa trajectoire écologique.

Ainsi, afin de réhabiliter un site dégradé par des activités extractives, il est nécessaire d'identifier les espèces adaptées aux conditions de ce site (Khater et al., 2003). Pour ce faire, l'analyse de la régénération naturelle par approche synchronique (Frochot, 1995) est indispensable pour identifier le pool d'espèces qui y sont adaptées. Une fois ce pool identifié, il est alors possible de guider la succession assistée en semant ces espèces sur le site à réhabiliter afin d'accélérer le processus de la succession écologique végétale.

1.3. La restauration des sols via la végétation

Quand on parle de restauration de site, il faut également entendre restauration du sol. En effet, les activités d'extraction ont pour conséquence de mettre à nu des sols marginaux, présentant des conditions stressantes pour la croissance de la végétation. Par sols marginaux, il faut entendre ici des sols fortement dégradés et altérés.

Les sols dégradés sont des sols ayant subi une « *perte ou une réduction de leur capacité actuelle et/ou future à produire en quantité et en qualité de la matière végétale ainsi que des services* » (Jie et al., 2002; Oldeman, 1992). Cette dégradation des sols provient soit d'une érosion soit d'une dégradation chimique ou physique (contamination par des métaux lourds, compaction, excavation...) (Oldeman, 1992). Les carrières en général, dont celle de Transinne, sont issues de sols qui ont été dégradés physiquement suite à l'excavation des premiers horizons. Les activités d'extraction mettent alors à nu un biotope purement minéral « *dépourvu de son passé biologique* » (Frochot, 1995). Dans le cas de Transinne, c'est un paléosol qui est mis à nu : le kaolin, créé lors du Crétacé et Cénozoïque, suite à l'altération des feldspaths contenus dans la formation d'Oignies (voir Genèse du Kaolin dans la section suivante).

A cause de cette excavation, la structure et les fonctions du sol ont été détruites. Or, sans structure et sans fonction, la végétation s'y développera difficilement (Bradshaw, 1997; Blanco et al., 2010). Il est donc nécessaire de restaurer ces sols dégradés afin qu'ils puissent supporter une végétation diversifiée. La

⁵ Etrépage : enlèvement de la couche superficielle du sol

restauration de ces sols marginaux se fait à l'aide du rétablissement d'une couverture végétale. Celle-ci participe en effet au développement biologique du sol (Oldeman, 1992), qui améliore sa structure et ses fonctions. Le développement biologique inclut le développement de la matière organique, le cycle des nutriments et le développement du capital d'éléments biodisponibles (nitrogène, potassium...). Ce type de développement de sol est de l'ordre de la décennie (Bradshaw, 1997) contrairement au développement pédologique qui est bien plus long et qui comprend la dégradation du matériel parental et la différenciation d'horizons (Figure 2).

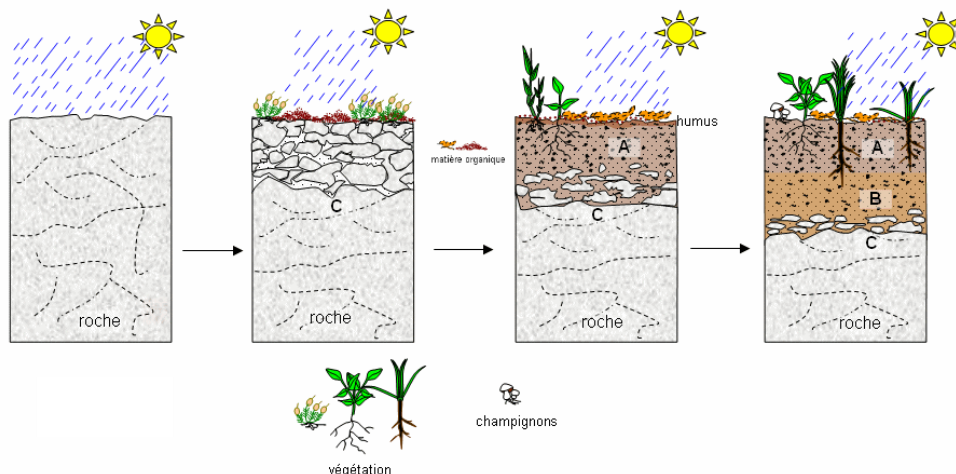


Figure 2: Etapes de la formation d'un sol (source: <http://svt.ac-dijon.fr>). (1) Altération de la roche-mère initiale sous l'effet des pluies, chaleur, vent, gel... (2) Installation des espèces pionnières (lichens, mousses) qui altèrent chimiquement et physiquement la roche et apportent de la matière organique (3) Installation de végétaux herbacés et formation d'un sol peu épais. (4) formation et différenciation d'horizons du sol.

La restauration des sols marginaux des carrières se fait donc via la restauration d'une couverture végétale (Figure 3). Sur le substrat mis à nu par les activités d'extraction se développe une succession écologique primaire, où les espèces végétales, à travers l'apport de matière organique et à travers l'action des racines, permettront de restaurer la structure et la fonction des sols. Cette succession écologique primaire participe au développement biologique du sol comme défini plus haut et permet à terme de restaurer les sols dégradés (Figure 3).

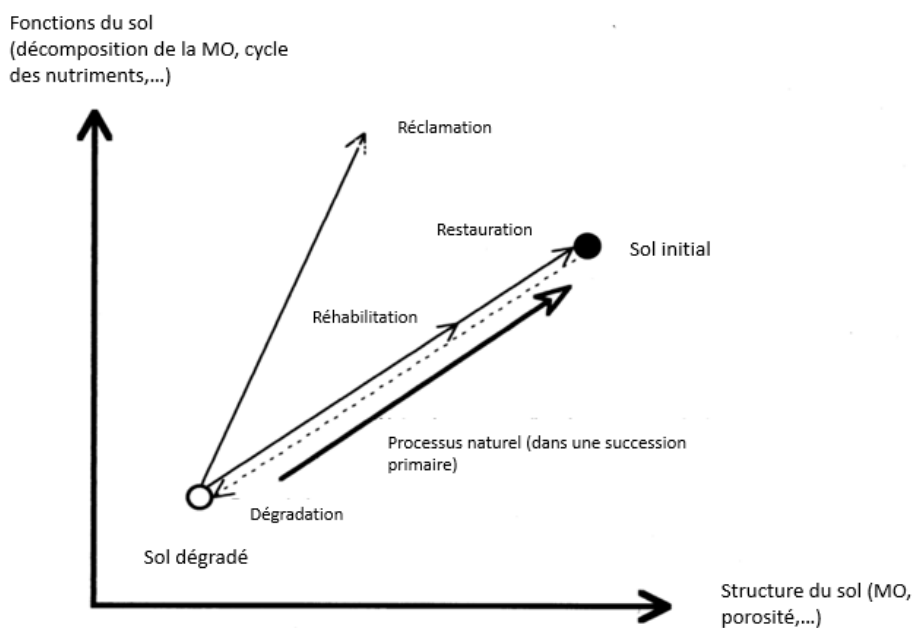


Figure 3: Restauration de la structure et des fonctions d'un sol dégradé. La restauration d'un sol se fait via la restauration de ses fonctions et de sa structure à l'aide de l'apport de matière organique, issue de la végétation. Source: (Bradshaw, 1997).

1.4. Les stades de succession : modification des conditions abiotiques

Le substrat nu, le kaolin dans le cas présent, est généralement rapidement colonisé par des espèces pionnières (Frochot, 1995) mais toutes les espèces ne sont pas capables de s'installer et se développer dans les premiers stades de la succession (Prach, 2013). Les espèces des stades plus mûrs ont besoin de meilleures conditions abiotiques. Cela se fait via l'enrichissement du sol en matière organique provenant de la végétation des premiers stades. En effet, la matière organique est caractérisée par une grande capacité d'échange cationique, une bonne capacité de rétention en eau et une réserve importante en nutriments nécessaires pour la croissance des végétaux. De plus, la matière organique est capable de former et stabiliser des agrégats du sol, améliorant ainsi sa structure. Par conséquent, les conditions abiotiques du site deviennent de plus en plus propices à la végétation de stades plus mûrs. Au cours du temps, différents facteurs pédologiques comme le carbone organique, le pH, la densité apparente (proxy de la porosité) et la concentration totale en azote évoluent très rapidement (Schafer et al., 1979) sous l'influence de la végétation.

Ces nouveaux écosystèmes⁶ que sont les carrières se modifient donc au cours du temps tant au niveau de la biocénose que du biotope et les espèces végétales pionnières disparaissent au profit d'espèces de stades de succession plus mûrs (Frochot, 1995). Les conditions abiotiques du site étant plus propices à un certain nombre d'espèces végétales au cours de la succession, le nombre d'espèce tend à augmenter au fur et à mesure du temps (Prach et al., 2013). Il faut généralement 10 à 20 ans pour retrouver une couverture végétale continue (Prach et al., 2011; Prach, 2013) dans un site dégradé et la succession spontanée tend généralement vers un stade forestier.

En conclusion, l'approche synchronique⁷ permet à la fois d'identifier les espèces végétales des premiers stades mais permet également de « *dégager les grandes tendances d'évolution de ces écosystèmes* » (Frochot, 1995) qui sont encore mal connues. L'analyse de ces différents stades de la succession permet de comprendre comment la végétation modifie les conditions abiotiques qui en retour influencent la végétation qui s'y développe. Les communautés végétales sont donc le résultat de filtres biotiques et abiotiques qui contraignent la présence ou l'absence des espèces sur un site donné (Lavorel et al., 2002). Comprendre l'assemblage des communautés végétales passe donc par l'analyse du substrat en place afin d'identifier les contraintes abiotiques qui régissent l'établissement des espèces végétales. Le paragraphe suivant a donc trait au kaolin, substrat mis à nu par la carrière à Transinne afin de comprendre quelles en sont les contraintes.

2. Le kaolin : une argile fortement altérée

2.1. Historique de l'exploitation

La première découverte de Kaolin en Ardenne Belge remonte à 1907 avec le gisement de Contranhez (Jerôme, 1907). Les débuts furent compliqués pour les exploitants mais un regain d'intérêt apparaît après la seconde guerre mondiale (Albert, 1961) suite à quoi plusieurs carrières ont ouvert dans la région de Malvoisin, Gembes, Haut-Fays et Libin (Remacle, 2003).

⁶ *Nouvel écosystème* : écosystèmes présentant des combinaisons d'espèces (végétales et animales) et des abondances relatives d'espèces qui n'ont encore jamais été rencontré auparavant dans des écosystèmes existant. Ces écosystèmes sont donc nouveaux car présentent des nouvelles combinaisons d'espèces et proviennent des actions volontaires ou non des humains sur l'écosystème.

⁷ *Approche synchronique d'un écosystème* : étude, par la comparaison de plusieurs sites d'âge différents, les tendances d'évolution d'un écosystème donné (Frochot, 1995)

On remarque que la structure générale de la région présente un synclinal au sud et un anticlinal au nord (Figure 4), orientée Est-Ouest avec la faille de Vencimont comme séparation (Lefin et al., n.d.). Les gisements de kaolins se trouvent le long de ce synclinal et anticlinal.

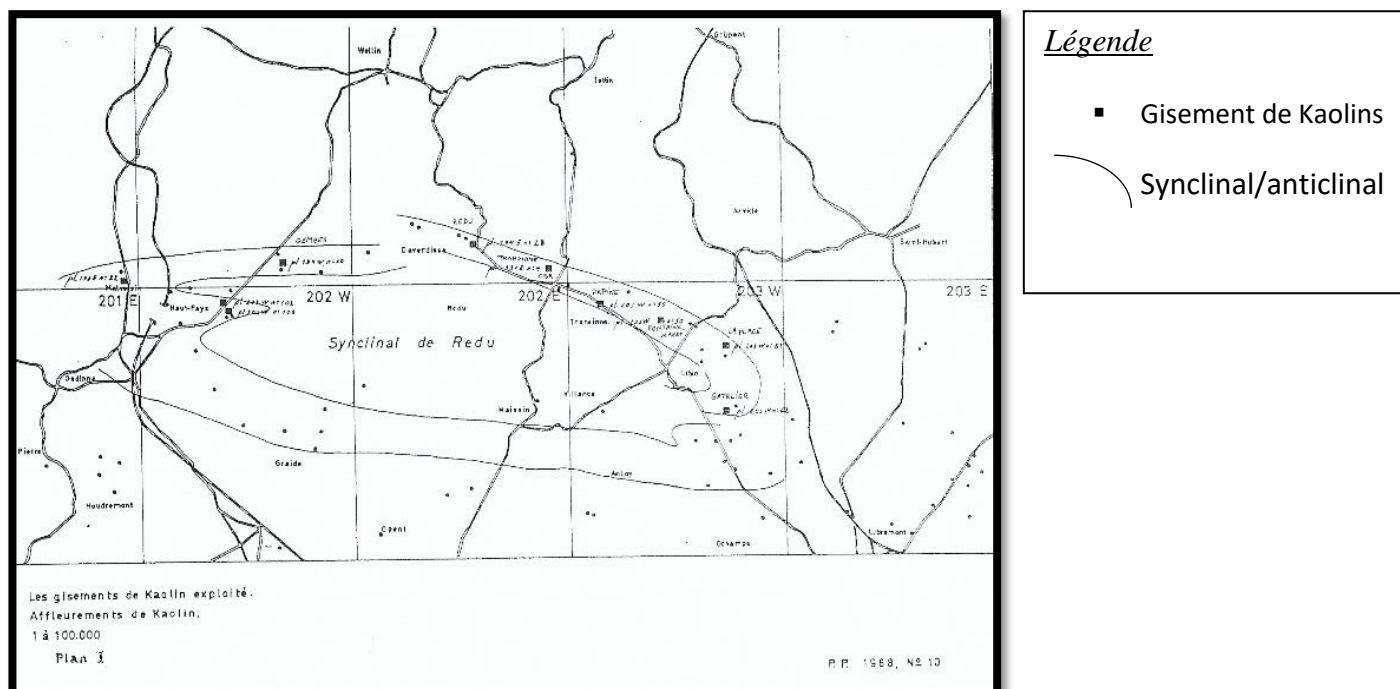


Figure 4: Gisements de kaolins belges localisés le long du synclinal et de l'anticlinal de Redu.

Le kaolin belge étant de médiocre qualité, ses débouchés sont peu diversifiés : ciment principalement, céramique et revêtement de mur (Remacle, 2003; Albert, 1961). Toutes les carrières ferment peu à peu dans les années 60 à cause de la concurrence étrangère. Seule persiste encore actuellement celle de Transinne. La carrière dite « Gatelier » à Libin a maintenu une activité très sporadique jusqu'au début des années 2000, avant d'être classée alors en zone Natura 2000.

2.2. Genèse du Kaolin

Les gisements de kaolins d'Ardenne sont situés dans la roche de la Formation d'Oignies d'âge Lochkovien (Dévonien inférieur), sur des plateaux de 450 m d'altitude, supposant de ce fait que la kaolinisation aurait eu lieu avant la formation des vallées (Yans, 2008; Lefin, n.d.). Ce kaolin est issu de l'altération de schistes et arkoses durant le Crétacé et le Miocène par le lessivage d'éléments (surtout Fe, Mg) par les eaux météoriques qui s'infiltrèrent dans la roche jusqu'à environ 65 mètres de profondeur (Asselberghs, 1920). Comme toute roche fortement altérée, les minéraux de type 1:1 (kaolinite) et les oxydes de fer remplacent progressivement les minéraux de type 2:1, générant un substrat de plus en plus pauvre. Cette genèse est favorisée par un climat chaud, une pluviosité régulière et une stabilité tectonique (Velde et al., 2009; S.A, n.d.).

2.3. Composition et propriétés du Kaolin

Le kaolin est donc une roche argileuse, silico-alumineuse dont le minéral caractéristique est la kaolinite. D'autres minéraux secondaires l'accompagnent comme le quartz, les micas, les feldspaths, les oxydes de titane, les oxydes et hydroxydes de fer et de manganèse (Pouliquen, 2014). Au sens strict, le kaolin est composé principalement de kaolinite. Cependant, le kaolin d'Ardenne est composé d'autant d'illite et muscovite (environ 30%), que de quartz (environ 30%) et de kaolinite. Toutefois, par souci de facilité, le terme kaolin sera conservé dans le cadre de ce travail. Deux types d'altérite sont observables à Transinne et dans les autres carrières belges : le kaolin « rouge », plus riche en oxyde de fer et le kaolin « blanc », plus pauvre en oxyde de fer (Lefebure, 2016). La saprolite de Transinne a été analysées chimiquement (Yans, 2003) (Tableau 1).

	Saprolite [%]
SiO ₂	49,2
Al ₂ O ₃	33,14
Fe ₂ O ₃	0,65
MnO	< L.D
MgO	0,29
CaO	< L.D
Na ₂ O	0,76
K ₂ O	6,01
TiO ₂	1,47
P ₂ O ₅	0,07

Tableau 1: Analyses chimiques de la saprolite de Transinne. Source : (Yans, 2003)

La faible réserve minéralogique, caractéristique des sols fortement altérés, le faible pH et l'imperméabilité de la couche superficielle fait du kaolin un substrat contraignant pour l'établissement et la croissance d'une végétation naturelle. Ces différents éléments sont définis ci-dessous.

- La kaolinite : une très faible CEC et un faible contenu en nutriment

La *kaolinite* (Al₄[Si₄O₁₀(OH)₈) est un phyllosilicate d'aluminium hydraté de type 1 :1, formé d'une couche de tétraèdre de silice et une couche d'octaèdre d'alumine empilées en feuillet élémentaire (Velde, 2009). Comme mentionné précédemment dans la section « Genèse du kaolin », ce substrat, fortement altéré, possède une faible réserve minéralogique et par conséquent, un faible contenu en nutriment. Il est de plus caractérisé par une faible surface spécifique comparé à d'autres argiles (8 à 15 m²/g) et présente de surcroît une faible CEC (entre 3 et 6 milli-equivalent charge pour 100g d'argile), soit 10 fois plus faible que la smectite (Velde et al., 2010). L'échange d'ions tel que Ca²⁺, K⁺ et Mg²⁺ étant primordial pour la croissance des végétaux, cette propriété en fait un élément contraignant pour la croissance des végétaux. Toutefois, il a été démontré (Lefebure, 2016) que la CEC et par conséquent la concentration en éléments biodisponibles (en l'occurrence Ca²⁺ et Mg²⁺) est presque deux fois plus élevée dans le kaolin rouge que le kaolin blanc, tout comme le carbone organique total (COT). On peut donc s'attendre à ce que la croissance des végétaux sur kaolin rouge soit supérieure à celle sur kaolin blanc. De plus, étant un substrat fortement altéré, les sols de kaolins possèdent une très faible réserve minéralogique, menant à un très faible contenu en nutriments.

- L'acidité du substrat : source de toxicité par l'aluminium

Le kaolin est un sol particulièrement acide (pH inférieur à 5) (Lefebure, 2016). A pH trop bas, l'aluminium, présent sous forme oxydée ou d'aluminosilicate, est solubilisé sous forme d'Al³⁺ absorbable par les racines et peut alors devenir une source de toxicité pour les plantes. Toutefois, certaines espèces tolèrent ces sols acides et résistent à la toxicité de l'aluminium soit par chélation de ce dernier soit par accumulation et détoxification interne dans les feuilles (Ma et al., 2001).

- L'imperméabilité de la couche superficielle : une contrainte physique

On remarque qu'en surface du kaolin, une couche imperméable et dure se forme, difficilement pénétrable par les racines.

Le substrat de type kaolin à Transinne présente donc de nombreuses contraintes abiotiques (imperméabilité du sol, faible disponibilité en ressources, forte acidité). Celles-ci agissent comme des filtres qui contraignent la présence/absence d'espèces, issues du pool régional, capables de s'installer et de se développer sur le site. Outre ces filtres, on remarque une hétérogénéité de certains facteurs environnementaux comme l'humidité, les tâches d'oxyde de fer et la pente. Or, il existe une relation entre les facteurs environnementaux et certains traits fonctionnels des communautés végétales. On peut donc s'attendre à rencontrer des communautés caractérisées par des compositions en espèces et des valeurs de traits fonctionnels différentes.

3. Une approche fonctionnelle de la structure des communautés végétales

3.1. Variation des communautés selon les gradients environnementaux

La composition en espèce d'une communauté végétale est le résultat de trois filtres (Lortie et al., 2004) (Figure 5) :

- 1) Le **filtre de dispersion** qui détermine quelles espèces parmi le pool régional d'espèce sont susceptibles de coloniser un site.
- 2) Les **filtres abiotiques**, c'est-à-dire les conditions environnementales telles que la disponibilité en ressources, l'acidité du sol, l'humidité, les perturbations comme le feu... Ces filtres abiotiques déterminent quelles espèces végétales, parmi le pool d'espèces susceptibles de coloniser un site, sont capables de s'y développer.
- 3) Les **filtres biotiques** : relations directes et indirectes entre les espèces végétales et interactions directes avec les autres organismes (herbivores...)

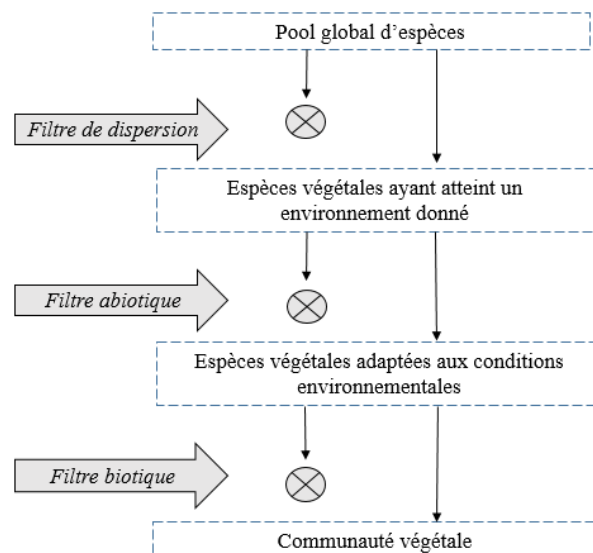


Figure 5: Les différents filtres à l'établissement d'une communauté végétale. Le filtre à la dispersion détermine quelles espèces végétales atteignent ou non un site donné (fragmentation d'habitat, banque de graine présentes...). Les espèces ayant atteint ce site sont ensuite soumises au filtre abiotique : seules les espèces adaptées aux conditions abiotiques du site (pH, humidité,...) survivent. Enfin, les espèces étant adaptées aux conditions environnementales sont soumises au dernier filtre : le filtre biotique. Elles sont soumises à la compétition, à l'herbivorie et autres interactions directes ou indirectes avec les autres organismes vivants. Les espèces ayant passé les trois filtres forment une communauté végétale.

Ainsi, une fois le filtre de dispersion passé, les conditions environnementales définissent la présence/absence des espèces végétales au sein de la communauté. Toutefois, la composition en espèce d'une communauté n'est pas homogène sur tout le site : elle varie le long des gradients environnementaux (Whittaker, 1956).

Un des challenge de la restauration écologique est de pouvoir prédire au mieux le succès des projets de restauration, qui consistent souvent à réimplanter un ensemble d'espèces sur le site à restaurer (Zirbel, Bassett, Grman, & Brudvig, 2017). Pour ce faire, il est indispensable de comprendre les mécanismes par lesquels s'assemblent les communautés sur un site donné. Comme la composition de ces dernières varie selon les gradients environnementaux, il est donc nécessaire, dans un but de restauration, d'analyser comment ces compositions varient en fonction des différents facteurs abiotiques. Ainsi, si les gradients environnementaux d'un site à restaurer sont connus, comme c'est le cas de la barrière de Transinne, il est possible de déterminer quelle composition végétale est la plus adaptée à un set de facteurs environnementaux. L'approche par les traits fonctionnels mesurés au niveau de la communauté est utile pour comprendre la réponse des communautés aux variations environnementales (Cingolani, 2007).

3.2. L'approche par les traits fonctionnels mesurés au niveau de la communauté

Les traits fonctionnels sont définis (Violle et al., 2007) comme étant : « *les caractéristiques morphologiques, physiologiques ou phénologiques mesurables au niveau de l'individu, de la cellule à l'organisme tout entier, sans aucune référence à l'environnement ou tout autre niveau d'organisation* ». Certains traits, appelés traits de réponse, sont des traits fonctionnels répondant à une variation d'un facteur environnemental. Par exemple, La SLA est un trait fonctionnel qui répond aux changements de disponibilité en ressource et à la compétition (Lavorel et al., 2007). Le sol de kaolin étant un sol très pauvre (faible réserve minéralogique et CEC), fort perturbé et potentiellement toxique à cause de son acidité, ce trait est pertinent à prendre en compte pour cette étude.

Ces traits peuvent varier au niveau de l'individu et au niveau de la communauté. En effet, au sein d'une communauté, les espèces sont présentes dans des abondances diverses : on distingue les espèces dominantes et les espèces minoritaires (Cingolani, 2007). Plus une espèce est abondante dans une communauté, plus elle est en adéquation avec les conditions environnementales du site (Cingolani, 2007). Ces espèces mieux adaptées présenteront alors des valeurs de traits fonctionnels différentes des espèces minoritaires. En pondérant les valeurs des traits de chaque espèce par leur abondance relative, on donne ainsi plus d'importance à la valeur du trait de l'espèce la plus adaptée aux conditions environnementales. On obtient le trait moyen CWM (community weight mean) de la communauté qu'on peut alors mettre en relation avec les facteurs environnementaux pour essayer d'en dégager une relation. L'approche par les traits fonctionnels permet par conséquent de comprendre comment varie la composition des communautés en fonction des gradients environnementaux.

3.3. Variation des stratégies CSR des communautés selon les facteurs environnementaux

Selon la théorie de Grime, il existe trois stratégies végétales principales : la compétitive (C), la stress-tolérante (S) et la rudérale (R). Chacune de ces stratégies résulte d'une combinaison particulière de trois facteurs environnementaux auxquelles sont soumises les espèces végétales à savoir le stress, la compétition et la perturbation.

Une espèce peut donc être caractérisée par une des trois stratégie primaire : C (compétitive), S (stress-tolérante), R (rudérale), ou par une stratégie secondaire (CS, CR, CSR...) ou encore une stratégie intermédiaire (CR/SC, SC/CSR...) (Figure 6). Les espèces de stratégie C (compétitive) sont des espèces qu'on retrouve dans des habitats stables et productifs tandis que les espèces de stratégie S (stress-tolérantes) sont retrouvées majoritairement dans des habitats pauvres en ressources. Les rudérales, quant à elles, sont associées à des habitats fréquemment perturbés (par le feu, l'herbivorie...). L'investissement en ressource diffère selon les trois stratégies : les espèces compétitrices sont caractérisées par une croissance végétative continue et

atteignent rapidement des individus et des organes de grandes tailles, leur permettant de maximiser le prélèvement de ressource. Les espèces stress-tolérantes, quant à elles, investissent principalement dans la capacité à retenir le peu de ressources présentes dans leur environnement. Ces espèces sont de petites tailles et sont caractérisées par une durée de vie plus longue. Enfin, les espèces rudérales, soumises à de fréquentes perturbations, investissent majoritairement leurs ressources dans la production rapide de propagule, permettant à la population de se régénérer (Pierce et al., 2017).

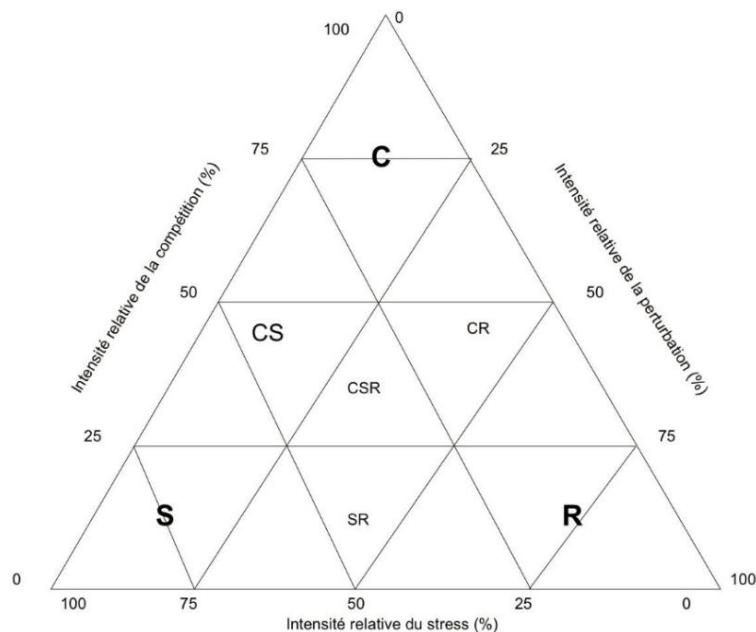


Figure 6: Stratégies CSR placées dans le triangle de Grime. Source: wikipedia. Une espèce peut adopter une stratégie primaire (C, S ou R), une stratégie secondaire (CS, CR, SR) ou encore une stratégie intermédiaire (CSR).

A travers ce modèle de stratégie, (Grime et al., 2001) a tenté d'expliquer les mécanismes principaux qui expliquent les successions de végétation au cours du temps. En effet, l'environnement abiotique et biotique évolue au cours du temps comme cela a été mentionné plus haut. Les espèces végétales sont donc soumises à des conditions de stress, de perturbations et de compétitions qui évoluent progressivement (Ecke et al., 2000). Chaque stratégie étant caractérisée par des combinaisons particulières de ces facteurs, les différents stades de succession seraient caractérisés par différentes stratégies. Au cours de la succession primaire, ce serait les stress-tolérantes qui domineraient, avec une augmentation des compétiteurs au cours du temps tandis que les premiers stades de la succession secondaire seraient dominés par des rudérales et par des stress-tolérantes comme végétation finale (Ecke, 2000).

Beaucoup d'études ayant trait à la relation entre les traits fonctionnels et les gradients environnementaux ont été réalisées tant à l'échelle de l'individu qu'à celle de la communauté. Toutefois, très peu d'études se sont intéressées à la relation entre les facteurs environnementaux et la stratégie CSR caractérisant une communauté alors qu'une espèce végétale se voit attribuer une des stratégies de Grime sur base des valeurs de 7 traits fonctionnels choisis par (Hodgson J.G et al., 1999).

- La SLA
- Le poids sec des feuilles
- La période de floraison
- Le contenu en matière sèche
- La hauteur de la plante
- L'étalement latéral

Comme mentionné dans la section précédente, ces traits fonctionnels peuvent présenter des variations en fonction des gradients environnementaux. Il en est donc de même pour les stratégies CSR, définies selon ces traits fonctionnels. Il serait donc particulièrement intéressant de comprendre comment ces stratégies CSR

mesurées au niveau de la communauté varient selon ces gradients environnementaux. En outre, ceci est particulièrement utile en termes de restauration. En effet, identifier les valeurs des traits fonctionnels et les stratégies des communautés végétales présentes naturellement sur un site permet de sélectionner des espèces présentant les mêmes valeurs de traits et les mêmes stratégies lors de la réhabilitation d'un site. De plus, s'il existe une relation entre la variation des gradients environnementaux et les valeurs de SLA et des stratégies des communautés végétale, il est alors nécessaire d'en tenir compte lors du semis au cours de la réhabilitation.

C. Objectifs du TFE

Suite à la synthèse bibliographique présentée ci-dessus, plusieurs objectifs sont visés dans ce présent travail. Celui-ci se divise en deux grandes thématiques (Figure 7). La première a trait à l'évolution au cours du temps de la végétation et du sol. Les différentes données seront donc prises dans 3 stades de chronoséquence. Ces trois sites correspondent à des carrières de kaolin abandonnées à différents moments. La seconde partie est relative à la variation de certains traits pertinents et de la stratégie des communautés en fonction des caractéristiques du sol. Cette partie se concentrera sur un seul des trois sites d'étude.

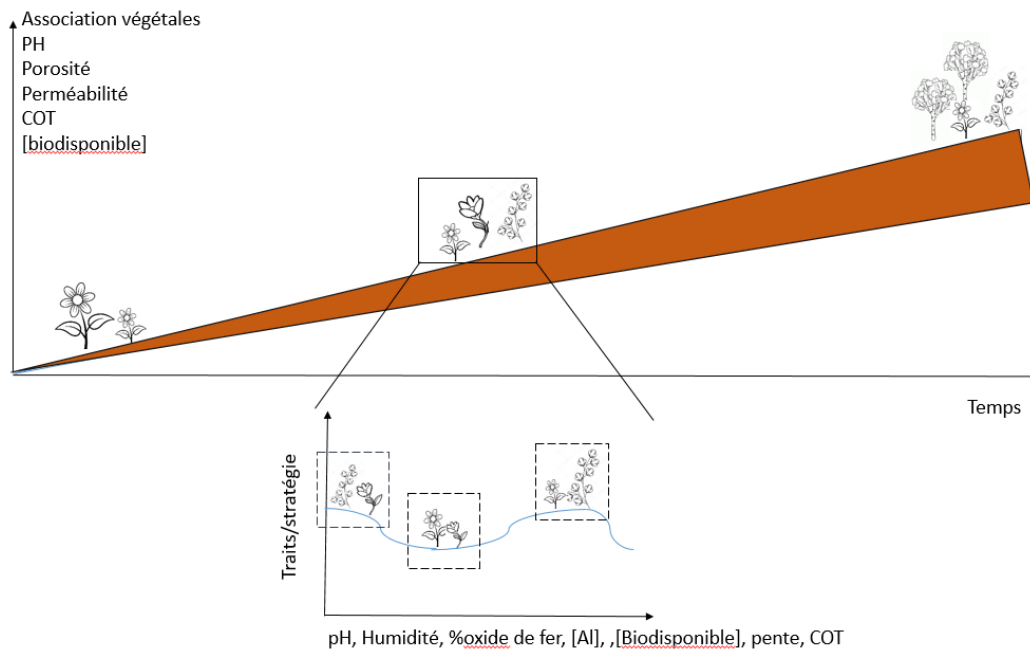


Figure 7: Objectifs schématiques du travail. Le premier objectif consiste en l'analyse de l'évolution temporelle des associations végétales et des caractéristiques physico-chimiques du sol. Le second objectif consiste en l'analyse de la variation de la SLA et de la stratégie CSR des communautés selon les gradients environnementaux.

Voici ci-dessous, pour chacune de ces deux thématiques, les objectifs et questions posées :

1. Première partie

- a. Quelles sont les différentes associations végétales qui caractérisent les différents stades de la succession spontanée dans les carrières de kaolins ?
- b. Comment cette succession spontanée et l'apport de matière organique qui en découle fait évoluer les propriétés du sol au cours du temps, améliorant de ce fait les conditions abiotiques suivantes :
 - pH
 - COT
 - Porosité
 - Perméabilité
 - [biodisponibilité des éléments]
 - $[Al^{3+}]$
- c. Quelles stratégies CSR caractérisent chacun des trois stades de la succession ?

2. Seconde partie

- a. Au sein d'un site présentant des hétérogénéités hydriques, pédologiques et topographiques, comment varie la SLA mesurée à l'échelle de la communauté en lien aux gradients environnementaux suivants :
- Humidité
 - Pente
 - oxyde de fer
 - pH
 - COT
 - $[Al^{3+}]$
 - [biodisponibilité des éléments]
- b. Quelles stratégies CSR adoptent les différentes communautés présentes sur le site de l'Arfaye ? Existe-t-il une relation entre ces mêmes facteurs environnementaux et la stratégie CSR de la communauté ?

D. Matériel et méthode

1. Description des sites d'étude

1.1. Les trois stades de chronoséquence

Toutes les carrières de kaolin ayant fermé dans les années 60, aucune chronoséquence régulière n'a pu être identifiée. La dernière carrière de kaolin encore en exploitation est celle de Transinne, située à Libin. Il y a deux ans, un site expérimental a été ouvert dans la partie Est de cette carrière afin d'y étudier la succession spontanée. Ce site expérimental est donc représentatif du stade initial de la succession. L'ancienne carrière «Ancien chemin de Wellin», située à Haut-Fays (*Figure 8*) représente un stade avancé de la succession. Il a en effet été laissé à l'abandon depuis la fermeture de l'exploitation en 1961 et représente donc un stade avancé de la succession naturelle. Enfin, la carrière de l'Arfaye (*Figure 8*), située à Libin, est difficilement datable à cause du manque d'information, mais est représentative du stade intermédiaire de la succession. Cette carrière a été fermée pour la première fois dans les années 60 mais a été à nouveau ré-exploitée en partie de 1998 à 2008. Le stade initial et intermédiaire se situent dans la commune de Libin tandis que le stade avancé se trouve dans la commune de Daverdisse.

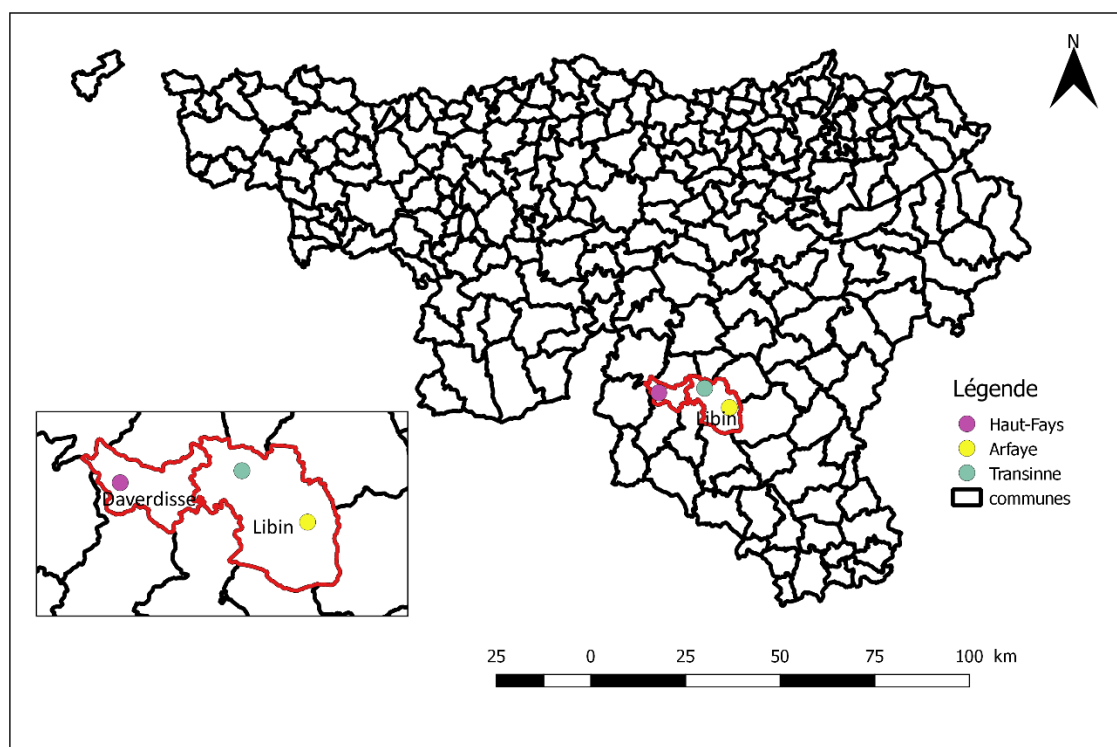


Figure 8: Localisation des trois sites d'études. Le site de Transinne (stade initial) et le site de l'Arfaye (stade intermédiaire) se situent dans la commune de Libin. Le site d'Haut-Fays (stade avancé) se situe dans la commune de Daverdisse.

a. La carrière de Transinne (Libin), encore exploitée par la société CBR, est divisée en deux zones d'exploitation (Figure 9). La zone Ouest est la plus ancienne tandis que la plus récente se situe à l'Est. Le site expérimental, représentatif du stade initial de la succession se situe au Nord-Est de la partie la plus récente de la carrière. Il a été ouvert il y a deux ans.



Figure 9: vue aérienne de la carrière de Transinne. La zone Ouest (plus grande superficie) est la partie la plus ancienne de la carrière. La zone Est (superficie moindre) est la zone la plus récente. Le site expérimental se situe dans la zone Est. Source: WalOnMap.

b. La carrière de l'Arfaye (Libin), aussi appelée Carrière Gatelier, d'une dizaine d'hectare, est actuellement inactive mais a été exploitée jusqu'en 2008 et est de ce fait représentative d'un stade intermédiaire de la succession (Figure 10). Le site est classé en SGIB⁸ (SGIB 1600) au niveau herpétologique, entomologique et botanique (présence de *Lycopodiella inundata* (L.)HOLUB, *Lycopodium clavatum* L., *Drosera rotundifolia* L.). La zone Ouest ayant fait l'objet de dépôt (Remacle, 2003), seul le flanc Sud est exploitable pour l'étude.

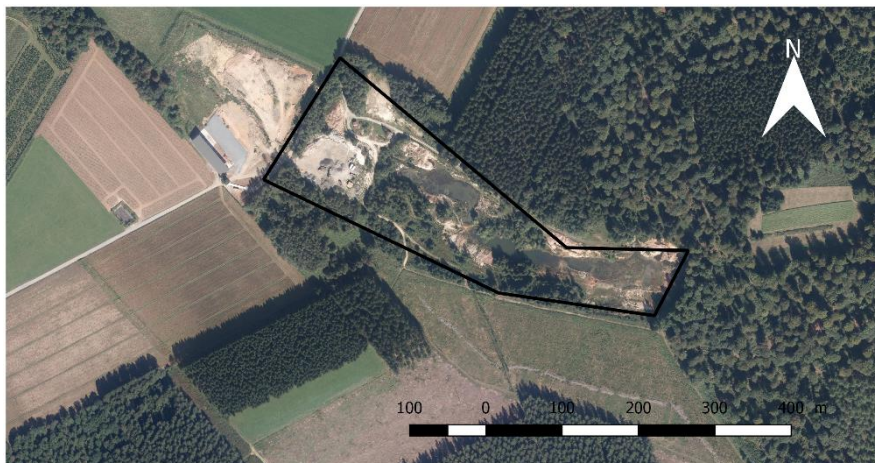


Figure 10: vue aérienne de la carrière de l'Arfaye. La zone Ouest est une zone de dépôt. La zone au sud des deux étendues d'eau est exploitable pour l'étude. Source: WalOnMapFigure.

⁸ <http://biodiversite.wallonie.be/fr/1600-carriere-de-l-arfaye.html?IDD=251660759&IDC=1881>

c. ***La carrière de Haut-Fays (Daverdisse)***, située le long de l'ancien chemin de Wellin a été exploitée de 1950 à 1961 (*Figure 11*). Recolonisée naturellement par la végétation depuis lors, elle est actuellement une zone boisée : ce site est représentatif d'un stade avancé de la succession spontanée.



Figure 11: vue aérienne de la carrière de Haut-Fays, stade avancé de la succession.
Source: WalOnMapFigure

1.2. Climat de la région

Le climat dans la région de Libin et de Daverdisse est de type Cfb selon Köppen-Geiger, soit un climat tempéré océanique (Chen et al., 2013). Le climat de cette région appartient donc au groupe C, soit un climat tempéré. Ce dernier est caractérisé par des températures moyennes des mois les plus froids comprises entre - 3°C et 18°C et des températures des mois les plus chauds supérieures à 10°C. La deuxième lettre de cette classification, f, relative au régime des pluies, renseigne un climat humide. La dernière lettre décrit un été tempéré où la température moyenne du mois le plus chaud est inférieure à 22°C et les températures moyennes des 4 mois les plus chauds sont supérieures à 10°C. (Belda et al., 2014).

Plus précisément, sur la commune de Libin et Daverdisse, la température moyenne du mois le plus chaud est comprise entre 16,5 et 16,8 °C et celle du mois le plus froid entre 0,8 et 1,1°C (*Tableau 2*). Les précipitations annuelles sont, quant à elle, comprises entre 1172,5 et 1136,4 mm/an.

Tableau 2: Données IRM pour les communes de Libin et Daverdisse

	Libin	Daverdisse
Température moyenne annuelle (°C)	8,5	8,8
Température moyenne du mois le plus chaud (°C)	16,5	16,8
Température moyenne du mois le plus froid (°C)	0,8	1,1
Précipitation moyenne annuelle (mm)	1136,4	1172,5

1.3. Géologie du site de Transinne

Au Dévonien inférieur (-416 Ma), les reliefs calédoniens s'érodent fortement, donnant naissance à une pénéplaine au sud du massif du Brabant⁹(Boulvain et al., 2018). Suite aux variations du niveau de la mer qui transgresse du NW vers le SE (Steevens, 1989), ce massif s'est érodé et a par conséquent alimenté le bassin Ardennais en sédiments, formant des dépôts terrigènes¹⁰. C'est à cette époque que les formations de Fépin, de Mondrepuis, d'Oignies et de Saint-Hubert apparaissent. Au cours de la sédimentation, les matériaux argileux sont transformés en illite et chlorite ferrifère (Yans, 2003). Suite à l'orogène varisque du carbonifère inférieur, la formation d'Oignies est plissée et riche en illite et chlorite (Yans, 2003). L'altération kaolinique a lieu au cours du Crétacé et au Cénozoïque. Celle-ci se fait dans un milieu oxydant et acide et a donné les paragenèses d'altération suivantes présentes dans la saprolite¹¹ de Transinne (Lefebure, 2016) :

- Kaolinite
- (hdr) oxyde de fer
- Oxyde de manganèse
- Oxyde de titane
- Quartz secondaires

La saprolite de Transinne comprend également des minéraux présents dans la roche mère qui n'ont pas réagi (Lefebure, 2016) :

- Quartz
- Mica
- Chlorite
- Minéraux secondaires : tourmaline, chromite, zircon.

Au cours du quaternaire (-2,6Ma), l'Europe subit plusieurs périodes de glaciations séparées par des périodes chaudes au cours desquelles les températures moyennes annuelles sont proches des températures actuelles¹²(Boulvain, 2018). Durant les périodes de glaciations, le niveau des mers baisse de façon importante. Ces mouvements d'eau importants usent les roches sous-jacentes, produisant les lœss (Lefebure, 2016). Ces lœss, sédiments éoliens, sont issus de la déflation éolienne¹³ qui a emporté les sédiments fluvioglaciaires (Figure 12). Les éléments les plus grossiers se sont rapidement déposés pour former les dunes tandis que les éléments plus fins (argiles, limons) se sont déposés plus loin pour former la zone de loess (Figure 12). On les rencontre majoritairement dans l'Hémisphère Nord (Figure 13) et très fréquemment en Région Wallonne.

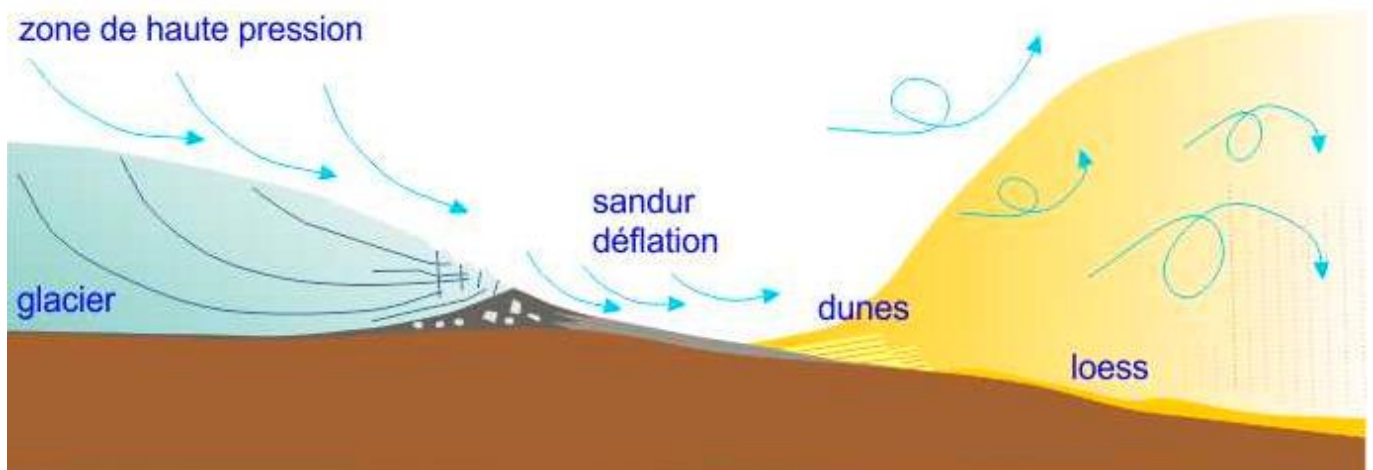


Figure 12: Genèse des loess provenant de l'érosion éolienne des sédiments fluvioglaciaires. Sources : [http://www.geolsed.ulg.ac.be/geolwal/geolwal.htm#LE DEVONIEN INFERIEUR](http://www.geolsed.ulg.ac.be/geolwal/geolwal.htm#LE%20DEVONIEN%20INFERIEUR)

⁹ [http://www.geolsed.ulg.ac.be/geolwal/geolwal.htm#LE DEVONIEN INFERIEUR](http://www.geolsed.ulg.ac.be/geolwal/geolwal.htm#LE%20DEVONIEN%20INFERIEUR)

¹⁰ *Dépôts terrigènes* : qui proviennent de l'érosion des terres émergées

¹¹ *Saprolite* : roche altérée chimiquement

¹² [http://www.geolsed.ulg.ac.be/geolwal/geolwal.htm#LE DEVONIEN INFERIEUR](http://www.geolsed.ulg.ac.be/geolwal/geolwal.htm#LE%20DEVONIEN%20INFERIEUR)

¹³ *Déflation éolienne* : érosion éolienne qui enlève des sols les matériaux légers et meubles, tels que les limons et les sables.

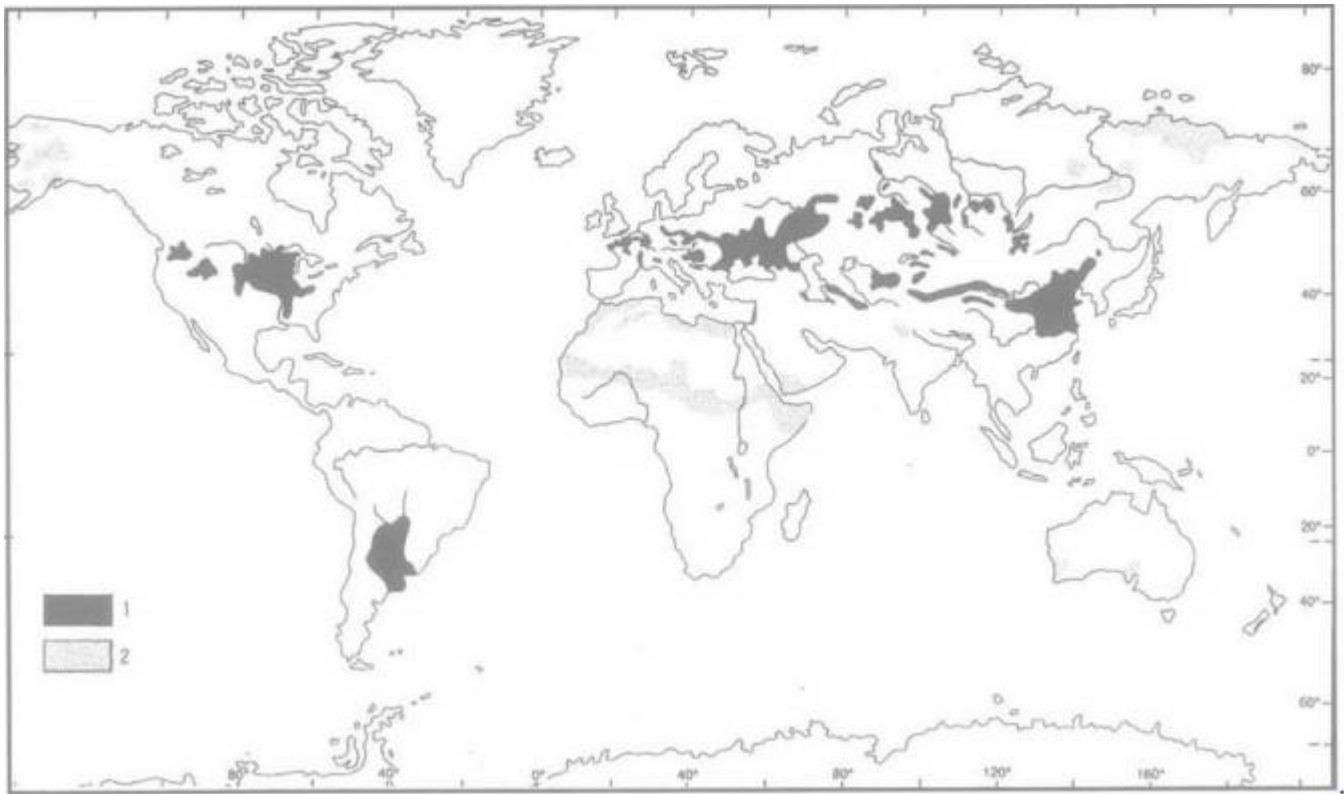


Figure 13: répartition mondiale des loess (1) ainsi que des sédiments éoliens apparentés. Source:(Pécsi, 1990; Antoine, 2002)

1.4. Pédologie des sites d'étude

La carte des principaux types de sols de Wallonie disponible sur WalOnMap indique des sols limoneux peu caillouteux aux alentours de Transinne, stade initial de la succession et autour d'Haut-Fays, stade avancé de la succession. Les sols aux alentours du stade intermédiaire sont de type limono-caillouteux à charge schisto-gréseuse ou gréseuse (Figure 14). On distingue dans ces carrières deux types de paléosols : le Kaolin blanc et le kaolin rouge caractérisés par des teneurs en oxyde de fer différentes.

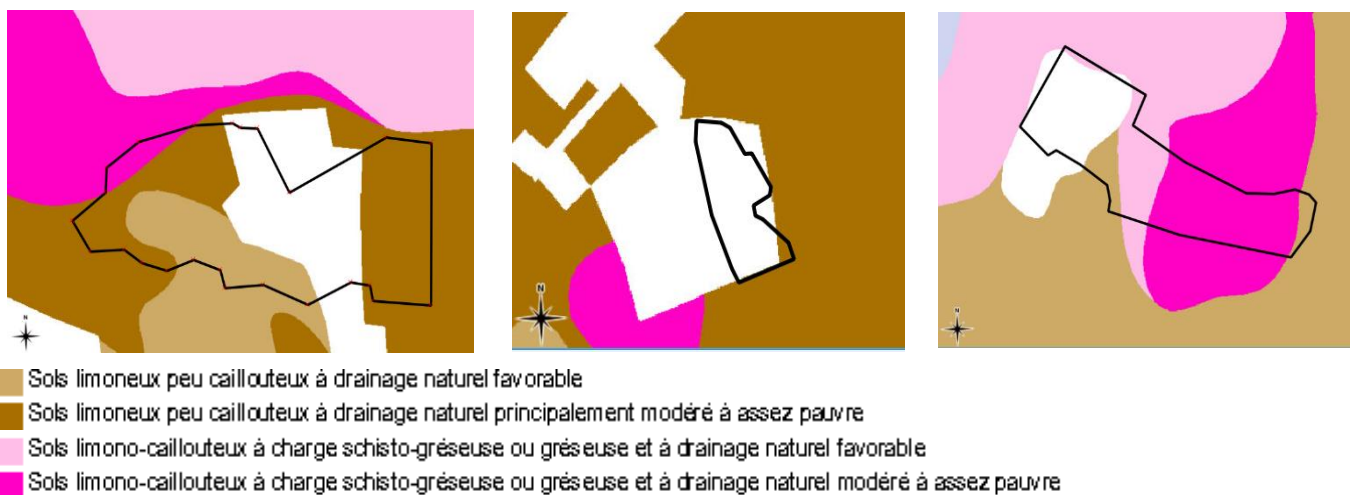


Figure 14: Pédologie du stade initial, intermédiaire, avancé de la succession spontanée (de gauche à droite). Les contours (en noir) représentent les limites de chacune des carrières. Il est à noter que les sols représentés sur ces cartes sont les sols d'avant exploitation.

1.5. La végétation

Les forêts environnant le site de Transinne, développées sur sol brun, sont des chênaies et hêtraies acidophiles médio-européenne (code G1.8 et G1.61). La hêtraie acidophile médio-européenne est un habitat Natura 2000 «Hêtraie à Luzule » (code 9110). Afin de pouvoir exploiter le kaolin sous-jacent, ces forêts ont été mises à blanc et le sol a été excavé. La végétation recolonisant naturellement ces paléosols est issue du pool régional d'espèces. La végétation de la carrière d'Haut-Fays a été recolonisée naturellement par des feuillus tels que le Hêtre, le Bouleau et le Chêne.

2. Echantillonnages

2.1. Partie 1 : Analyse de l'évolution temporelle du sol et des associations végétales

Au sein de chaque site d'étude, 3 échantillons de sols composites ont été prélevés de manière pseudo-aléatoire au sein des tâches de Kaolin blanc et ce afin d'isoler les facteurs du milieu. Chaque échantillon est le résultat d'un mélange de trois échantillons de sols inclus dans un triangle (*Figure 15*). Ce triangle entoure le quadrat de végétation. On émet donc l'hypothèse que les caractéristiques pédologiques du quadrat sont une moyenne des trois relevés qui l'entoure. Seuls les 10 premiers centimètres de sols sont prélevés.

Ce mélange sera utilisé pour analyser les **caractéristiques chimiques** du sol. Pour les **caractéristiques physiques**, un échantillon à structure conservée sera prélevé au milieu du quadrat de 1m².

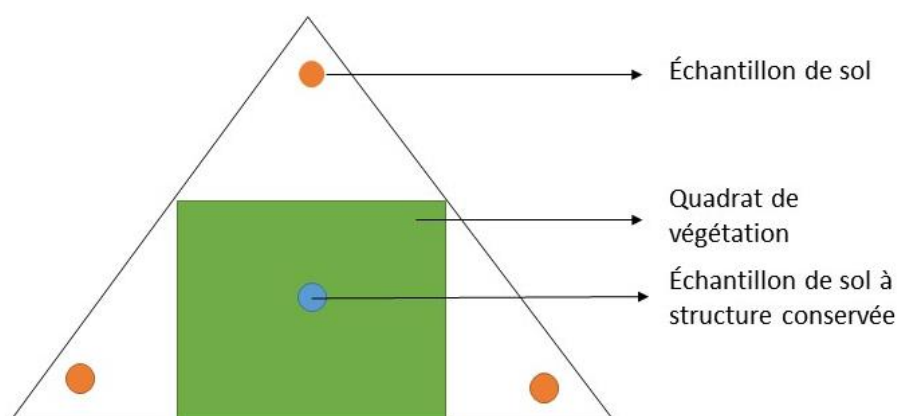


Figure 15: schéma d'échantillonnage. Quadrat de végétation au centre de trois échantillons de sols (analyses chimiques du sol). Échantillon de sol à structure conservée au centre du quadrat pour les analyses physiques du sol.

En mai et en juin, la liste des espèces végétales a été établie (la taxonomie suit Lambinon et al., 2012) et leur abondance a été exprimée en pourcentage de couverture du sol. Pour le stade intermédiaire (Arfaye), la liste des espèces présente sur le portail wallonie.biodiversité a aidé à la détermination des espèces. En laboratoire, diverses analyses relatives aux propriétés physiques et chimiques ont été réalisées sur chaque échantillon de sol. Ces analyses sont décrites dans la section « Analyses pédologiques ».

2.2. Partie 2 : Variation des traits fonctionnels et des stratégies CSR des communautés selon les gradients environnementaux

Les autres zones du stade intermédiaire (Arfaye) ayant fait l'objet de dépôts, seule la partie Sud de la carrière a été échantillonnée. Cela permet d'autre part d'avoir des conditions homogènes d'exposition.

Au sein de cette zone, 7 transects perpendiculaires à la pente ont été choisis (*Figure 16*) de manière à capter un maximum d'hétérogénéité tant d'un point de vue de la pente, de l'humidité et de la composition du substrat (présence d'oxyde de fer ou non). Sur ces transects, 30 quadrats de 1m², chacun séparé par une distance de 5m ont été échantillonnés. Au sein de chaque quadrat, la liste des espèces végétales a été établie (la taxonomie suit Lambinon et al.,2012) et leur abondance a été exprimée en pourcentage de couverture du sol.



Figure 16: transects (lignes) perpendiculaire à la pente et quadrats (points) de la carrière de l'Arfaye, stade intermédiaire de la succession abandonné depuis 2008.

Enfin, pour chacun de ces quadrats, un relevé pédologique a été réalisé de façon identique à la partie chronoséquence, si ce n'est qu'aucun échantillon à structure conservée n'a été prélevé. Seules les analyses chimiques ont été menées pour cette partie.

3. Analyses pédologiques

Pour chacune des deux parties, différentes analyses chimiques et/ou physiques des échantillons de sols ont été réalisées (*Tableau 3*).

Tableau 3: Analyses physico-chimiques relatives à chacune des deux parties du travail

Analyses	Partie 1 : Chronoséquence	Partie 2 : Variation sol-traits/stratégie
Chimique		
	pH	pH
	COT	[Ca ²⁺]
	[Ca ²⁺]	[K ⁺]
	[K ⁺]	[Mg ²⁺]
	[Mg ²⁺]	[P ⁺]
	[P ⁺]	[Al ³⁺]
	[Al ³⁺]	[Fe ³⁺]
Physique		
	Densité apparente	Humidité
	Perméabilité	

Chacune de ces analyses est décrite ci-après.

3.1. Préparation des échantillons de sol

Avant toute analyse, les échantillons de sols ont été mis à sécher à 40°C pendant une semaine. Par après, ils ont été tamisés à 2mm. Un sous-échantillon de chaque échantillon de sols relatif à la partie chrono-séquence a été broyé à 200 micron.

Les analyses physiques ont été réalisées sur les échantillons à structure conservée. Il est nécessaire de mesurer en premier lieu la perméabilité suivie de la densité apparente, celle-ci étant destructrice.

3.2. Analyses chimiques des sols

3.2.1 Mesure de l'humidité totale et résiduelle

L'humidité totale se mesure sur des échantillons frais. Pour chacun des 30 échantillons de la carrière de l'Arfaye(stade intermédiaire), un sous-échantillon de sol frais a été pesé à l'aide d'une balance de précision (trois décimales). Après mise à l'étuve pendant 24°C à 105°C, chacun des échantillons a été à nouveau pesé. L'humidité totale se calcule comme suit :

$$H_{tot} \text{ ou } H_r = 100 * \frac{(P_h - T) - (P_s - T)}{(P_h - T)}$$

Avec :

H_{tot}= Humidité totale(%)

H_r= Humidité résiduelle(%)

P_h= Poids humide brut (g)

P_s= Poids sec brut (g)

T= Poids du récipient et du couvercle (g)

La mesure de l'humidité résiduelle se fait de la même manière mais sur base d'un sous-échantillon de sol sec et tamisé à 2mm à l'aide d'une balance de précision (quatre décimales).

3.2.2 Mesure du pH

Le pH H₂O et pH KCl ont été mesurés sur tous les échantillons (stade initial, intermédiaire et final). Pour ce faire, 20 g de terre séchée et tamisée à 2 mm ont été prélevés pour chacune des deux analyses. Ces 20 g sont mis en solution avec 50 ml d'eau distillée pour la mesure du pH H₂O et 50 ml de KCl 1N pour la mesure du pH KCl. Après une agitation rotative de 2h, les solutions sont mises à la centrifugeuse pendant 10 min à 3000 tours/min. La mesure s'effectue ensuite dans un bécher en verre, à l'aide d'une électrode.

3.2.3 Mesure des éléments biodisponibles

Le dosage des éléments biodisponibles (Mg²⁺, Ca²⁺, K⁺, P⁺ et Al³⁺) se fait par la méthode de l'extraction à l'EDTA. Ces différents éléments disponibles sont extraits à l'aide d'une solution d'acétate d'ammonium 0,5 N contenant de l'EDTA 0,02 M à pH 4,65. Pour ce faire, 10 g de sol séché et tamisé à 2 mm sont mis en solution avec 50 ml de cette solution d'extraction après quoi le filtrat est récupéré (facteur de dilution 0,5X). Ensuite, pour chaque élément à doser, la droite d'étalonnage est préparée ainsi que l'extrait de solution de sol. Pour chaque élément, la méthode est présentée ci-après.

- Mg

La droite d'étalonnage se prépare par dilution de différents volumes de la solution mère de Mg 100 ppm dans des fioles de 25 ml contenant du SrCl₂.6H₂O à 10000 ppm ainsi que de la solution d'extraction. Les différents échantillons sont également dilués en présence de SrCl₂.6H₂O à 10000 ppm. La mise au trait se fait avec de l'eau distillée.

- K

La droite d'étalonnage se prépare par dilution de différents volumes de la solution mère de K 1000 ppm dans des fioles de 25 ml contenant de la solution d'extraction. Les différents échantillons sont analysés sans dilution. Pour les échantillons dont la valeur indiquée au spectromètre se situe en dessous de la droite d'échantillonnage, une dilution 5X avec de l'eau distillée est appliquée. Une nouvelle droite d'échantillonnage est alors réalisée à l'aide de la solution mère K 100 ppm dans des fioles jaugées de 25 ml.

- Ca

La droite d'étalonnage est préparée en diluant la solution mère de Ca 1000 ppm dans des fioles jaugées de 25 ml dans lesquelles sont ajoutées du KCl 10000 ppm ainsi que de la solution d'extraction. Les échantillons sont également dilués en présence de KCl 10000 ppm et la mise au trait se fait à l'aide de l'eau distillée. Certains échantillons ont été dilués 5X, d'autres 10X.

- P

La droite d'étalonnage est préparée en diluant la solution mère de P 100 ppm dans des fioles jaugées de 25 ml dans lesquelles sont ajoutées de la solution d'extraction et de la solution de coloration jaune. Les échantillons sont également dilués à l'aide de la solution d'extraction et de la solution de coloration. Le facteur de dilution est de 5X.

- Al

La droite d'étalonnage est préparée en diluant de la solution mère Al 1000 ppm dans des fioles jaugées de 25ml dans lesquelles du KCl 10000 ppm est ajouté. Les échantillons sont analysés sans dilution.

Ces différents éléments sont ensuite dosés par spectrométrie d'absorption atomique ou de spectrophotométrie pour le phosphore. Pour chaque dosage d'élément, un blanco et un témoin ont été analysés. La valeur du blanco est retirée de la valeur de chaque échantillon. La concentration des différents éléments biodisponibles est calculée sur base des différents facteurs de dilution appliqués et est exprimée en mg/100g de sol sec.

3.2.4 Mesure du COT

La mesure du COT se fait par titrage d'un excès d'oxydant ($K_2Cr_2O_7$ 0,1N) par du sel de Mohr. Pour ce faire, 1.000 g de terre séchée et tamisée à 200 microns est mis en réaction avec 2.000 g de $K_2Cr_2O_7$ et 40 ml d' H_2SO_4 56%. La solution est mise en ébullition pendant dix minutes sous hotte aspirante après quoi le tout est transvasé dans une fiole jaugée de 250 ml et mis au trait avec de l'eau distillée. Après 24h, la solution est titrée à l'aide d'une solution de sel de Mohr 0,1 N avec NaF comme complexant et de la diphénylamine comme indicateur. Le calcul du pourcentage de carbone se calcule comme suit :

$$\%C = \frac{(x - x') * 0,0003 * 250 * 100 * T}{v * P * T'} * coef\ hum$$

Avec :

X=Volume de sel de Mohr utilisée pour le titrage du blanco d'attaque

X' =Volume de sel de Mohr utilisé pour le titrage de l'échantillon

V=Volume de solution titrée (25ml)

P=Poids exact de terre séchée

T=Titre réel du sel de Mohr.

T'=Titre présumé du sel de Mohr (0,1 N)

Coef hum =1

3.2.5 Mesure de la teneur en oxyde de fer

La concentration en fer est mesurée par extraction au DCB. Pour ce faire, 1 g de sol est broyé à 200 microns et placé dans un tube en polypropylène dans lequel 40ml d'une solution de bicarbonate de sodium et de citrate de sodium est ajouté. Cette solution est ensuite chauffée au bain marie à 75°C. Une fois chauffée, 1 g de diosulfite de sodium y est ajouté à trois reprises. Après refroidissement, les tubes sont centrifugés à 2000 tour/min durant 10 minutes. Le surnageant est alors récupéré à l'aide d'une fiole de 250 ml et le culot est lavé trois fois à l'aide de 25 ml d'une solution de chlorure de sodium 1 M. Après chaque lavage, le surnageant est récupéré après centrifugation à 2000 tour/min pendant dix minutes et ajouté à la fiole de 250 ml. Le fer est dosé par spectrométrie d'absorption atomique.

3.3. Analyses physiques des échantillons de sols

3.3.1 Mesure de la perméabilité

La mesure de la perméabilité se fait à l'aide d'un perméamètre.

3.3.2 Mesure de la densité apparente

Après mesure de la perméabilité, les échantillons sont pesés puis mis à l'étuve à 105°C pendant 24 heures. Par après, les échantillons ont été à nouveau pesés à l'aide d'une balance de précision (3 décimales). La différence entre ces deux mesures de poids donne la densité apparente, proxy de la porosité.

4. Analyses de la végétation

4.1. Analyses des traits fonctionnels

Afin d'analyser la relation entre les facteurs environnementaux et la SLA, la méthode CWM (Community weight mean) est utilisée : la SLA théorique de chacune des espèces présentes dans chaque quadrat est pondérée par son abondance relative qui, comme mentionné dans la synthèse bibliographique, reflète l'adéquation de l'espèce aux facteurs environnementaux. La valeur théorique de la SLA de chaque espèce est issue de la base de données LEDA BASE (Kleyer et al., 2008).

$$CWM = \sum_{i=1}^n (\text{abondance } i * \text{traits } i)$$

4.2. Analyses de la stratégie des communautés

La stratégie CSR de chacune des espèces est issue de la base de données Excel (Hodgson J.G, 1999) sur : <http://people.exeter.ac.uk/rh203/plant-scientist-recent-science-functional-types-allocating-csr.html>. Une espèce peut adopter une stratégie primaire, secondaire ou intermédiaire. La stratégie moyenne de chaque quadrat a été calculé à l'aide du fichier Excel de Hunt et al (2004) sur base des abondances relatives de chaque espèce. Pour ce faire, la stratégie CSR de chacune des espèces est exprimée par une valeur tri-dimensionnelle comprise entre ces trois extrêmes :

- la stratégie C (1,0,0)
- la stratégie S (0,1,0)
- La stratégie R (0,0,1).

Au sein d'un même quadrat, la valeur tri-dimensionnelle de chaque espèce est pondérée par son abondance relative, exprimée en %. La moyenne des valeurs tri-dimensionnelle de chaque quadrat est alors

calculée. Cette valeur tri-dimensionnelle moyenne représente en réalité les coordonnées de la stratégie CSR du quadrat, qu'il est ensuite possible de placer dans le triangle de Grime.

5. Analyses statistiques

5.1. Partie 1 : Analyse de l'évolution temporelle du sol et des associations végétales

Les analyses statistiques sont réalisées avec le programme RStudio 3.3.2. Pour répondre au premier objectif, à savoir l'évolution des caractéristiques du sol, les valeurs moyennes des variables pédologiques par quadrat ont été comparées entre site à l'aide d'une Anova de type GLM. En parallèle, une matrice de corrélation a été calculée afin d'identifier les relations potentielles existant entre les différents variables pédologiques, l'unité de base étant le quadrat.

Concernant la végétation, la stratégie de chacune des communautés végétales (quadrat) a été calculée à l'aide de la feuille Excel de Hunt et al (2004) et placée dans le triangle de Grime à l'aide du package «composition».

5.2. Partie 2 : Variation des traits fonctionnels et de la stratégie CSR des communautés selon les gradients environnementaux

Tout d'abord, la matrice de corrélation des différentes variables pédologiques a été réalisée afin d'identifier les relations existant entre ces dernières.

Une PCoA a été réalisée sur le jeu de données biologiques (matrice espèce-abondance) afin d'identifier les patrons de variations floristiques. Afin de distinguer les différentes communautés végétales, la méthode de groupement de ward D sur une matrice de dissimilarité de Bray-Curtis a été utilisée. Cette PCoA a été contrainte a posteriori par les variables environnementales.

Afin d'identifier si les communautés végétales identifiées sont caractérisées par des valeurs de variables environnementales significativement différentes, les valeurs moyennes des variables pédologiques par quadrat ont été comparées entre groupe à l'aide d'une Anova de type GLM.

Les stratégies des différentes associations végétales ont été placées dans le triangle de Grime à l'aide du package « composition » afin d'analyser si ces groupes de relevés sont caractérisés par des stratégies différentes. Pour ce faire, les stratégies des communautés de chaque quadrat ont été calculées à l'aide du fichier Excel de Hunt et al (2004). Les valeurs moyennes des variables pédologiques par quadrat ont ensuite été comparées entre les différentes stratégies identifiées à l'aide d'une Anova de type GLM

Enfin, les corrélations entre les variables environnementales et les valeurs de CWM relatives à la SLA ont été calculées afin d'identifier si les SLA des communautés varient selon les gradients environnementaux.

E. Résultats

1. Partie 1 : Analyse de l'évolution temporelle des propriétés du sol, des associations végétales et de leur stratégie

1.1 Partie 1: Evolution des propriétés physico-chimiques des sols de kaolins

Les propriétés chimiques des sols de kaolins belges montrent une évolution significative (*Tableau 4*) des différents éléments biodisponibles ainsi que de la concentration en carbone du sol. L'acidité du substrat tend à augmenter mais les moyennes ne sont pas significativement différentes (*Tableau 4 ; Figure 17*). A l'exception de la concentration en Mg^{2+} qui décroît, tous les autres éléments biodisponibles (Ca^{2+} , P^+ et K^+) augmentent de manière significative au cours du temps (*Tableau 4 ; Figure 17*). Nous observons aussi l'augmentation au cours du temps de la concentration en Al^{3+} dosé dans l'extrait acétate-EDTA. Il est à noter que le phosphore est en deça de la limite de déteçtabilité pour les deux premiers sites d'étude, d'où la mention « <sd » (*Tableau 4*).

La densité apparente du sol diminue significativement tandis que sa perméabilité croît au cours du temps (*Tableau 4 ; Figure 17*). Toutefois cet accroissement n'est pas statistiquement significatif.

*Tableau 4: Moyennes (gras italique) et écart-types (entre parenthèse) des variables environnementales relatives à chaque stade de chronoséquence : stade initial (Transinne), stade intermédiaire (Arfaye) et stade avancé (Haut-Fays) abandonnés depuis respectivement 2 ans, 10 ans et 57 ans.. significativité de la p-valeur (test-F) de l'ANOVA : * $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; *** $P < 0,001$..*

	stade initial	stade intermédiaire	stade avancé	p-valeur
a) Analyses chimiques (n=3)				
pH H ₂ O	<i>5,46</i> (0,11)	<i>5,51</i> (0,37)	<i>4,95</i> (0,54)	0,22
pH KCl	<i>4,20</i> (0,06)	<i>4,69</i> (0,67)	<i>3,93</i> (0,47)	0,22
K^+ (mg/100g)	<i>1,80</i> (0,92)	<i>2,12</i> (0,27)	<i>6,64</i> (2,15)	**
Ca^{2+} (mg/100g)	<i>9,45</i> (1,37)	<i>3,30</i> (1,15)	<i>28,33</i> (14,28)	*
Mg^{2+} (mg/100g)	<i>6,56</i> (0,21)	<i>1,08</i> (0,90)	<i>3,80</i> (0,67)	***
P^+ (mg/100g)	<sd (0)	<sd (0)	<i>1,4674</i> (0,3)	***
Al^{3+} (mg/100g)	<i>0,85</i> (0,09)	<i>2,65</i> (2,04)	<i>16,59</i> (2,56)	***
%C	<i>0,03</i> (0,03)	<i>0,25</i> (0,18)	<i>1,88</i> (0,20)	***
b) Analyses physiques (n=3)				
Perméabilité (cm/sec)	<i>0,00</i> (0,00)	<i>0,17</i> (0,25)	<i>0,25</i> (0,06)	0,19
Densité (g/cm ³)	<i>1,611</i> (0,06)	<i>1,6639</i> (0,09)	<i>0,9472</i> (0,22)	**

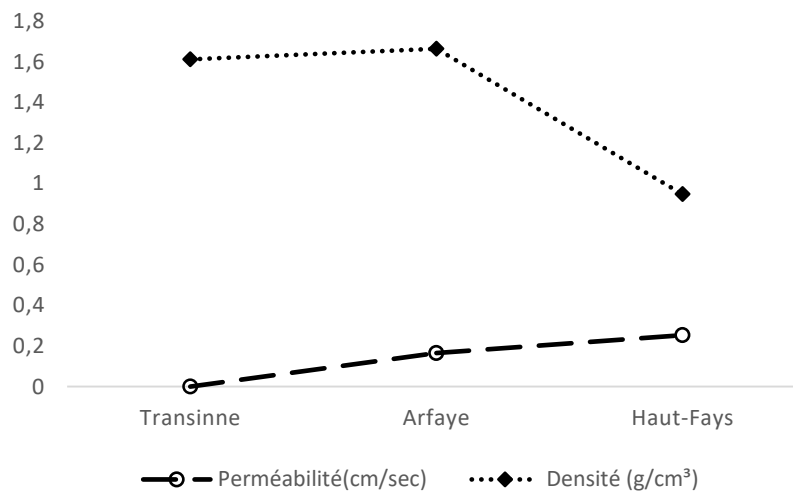
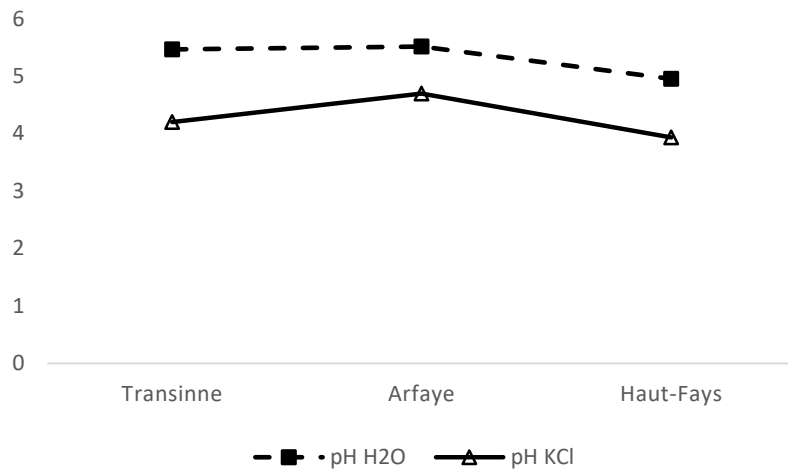
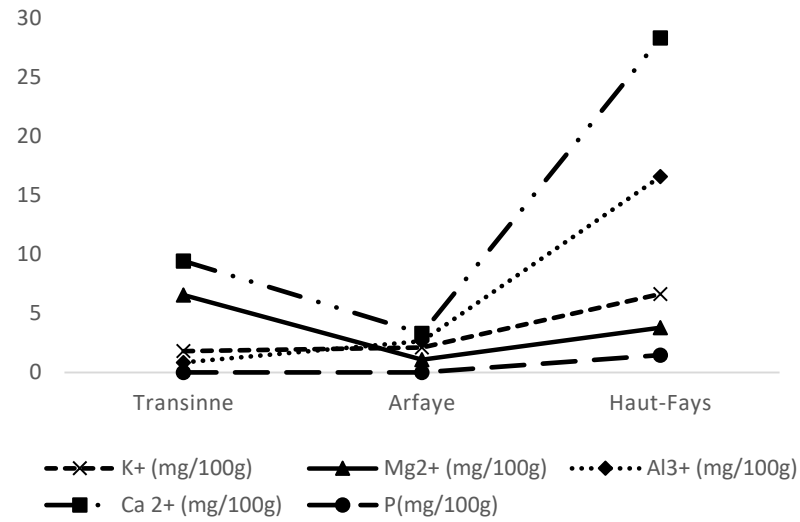


Figure 17: Moyenne (n=3) de chacune des caractéristiques physico-chimiques par stade de chronoséquence : le stade initial (Transinne), abandonné depuis 2 ans, le stade intermédiaire (Arfaye), abandonné depuis 10 ans et le stade avancé (Haut-Fays) abandonné depuis 57 ans.

Afin de comprendre les influences réciproques qui existent entre les différentes propriétés physico-chimiques, une matrice de corrélation a été réalisée (Tableau 5 ; Figure 18). Les corrélations significatives sont indiquées en gras italiques (Tableau 5). Il apparaît que la densité est négativement corrélée à la plupart des propriétés physico-chimiques (Figure 18). Toutefois, elle ne montre une corrélation significative qu'avec le COT et les éléments biodisponibles (Ca^{2+} , K^+ , Al^{3+} , P^+), à l'exception du magnésium (Tableau 5). Ce dernier ne semble corrélé à aucune des propriétés physico-chimiques (Tableau 5). A contrario, le COT et tous les autres éléments biodisponibles sont positivement et significativement corrélés entre eux (Tableau 5).

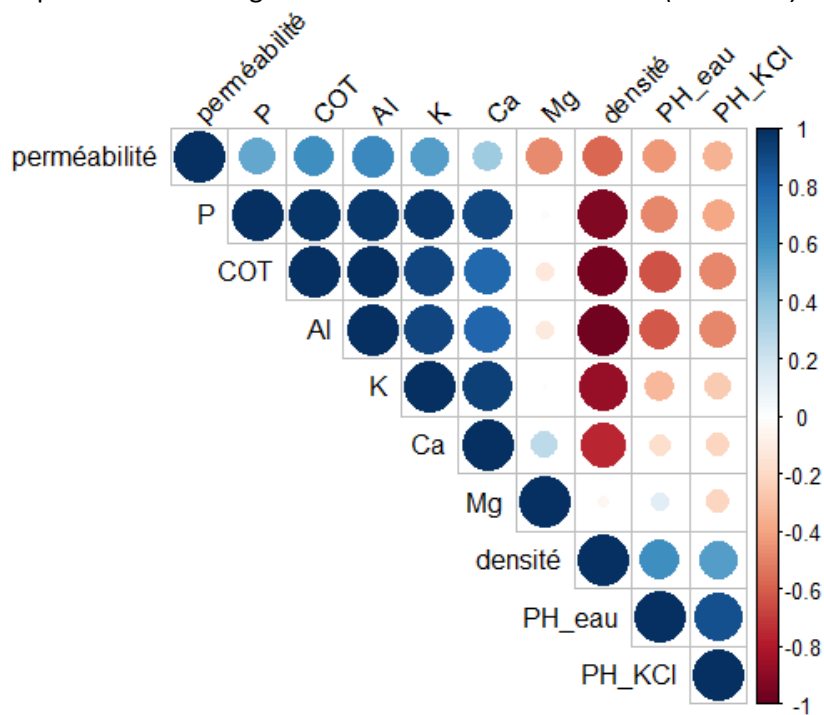


Figure 18: matrice de corrélations entre les variables environnementales. Une corrélation positive est représentée en bleu et une corrélation négative est représentée en rouge. Plus la corrélation entre deux variables est forte, plus l'intensité de la couleur est importante (voir échelle à droite) et plus le rayon du cercle est grand. Ainsi, une corrélation positive de 1 sera représentée par un large cercle de couleur bleu foncée et une corrélation négative de 1 sera représentée par un large cercle de couleur rouge foncée.

Tableau 5: Matrice de corrélations entre les variables environnementales mesurées au niveau du quadrat (n=9) au sein des trois sites d'étude : Stade initial (Transinne,) intermédiaire (Arfaye) et avancé (Haut-fays), abandonnés depuis respectivement 2 ans, 10 ans et 57 ans. Les coefficients de corrélations de Pearson significatifs sont indiqués en gras et le niveau de significativité est le suivant : *P<0,05 ; **P<0,01 ; ***P<0,001

	Perm.	Densité	COT	K	Mg	Al	Ca	P	pH_eau	pH_KCl
Perméabilité	1									
Densité	-0,58	1								
COT	0,61	-0,96 ***	1							
K	0,56	-0,86 **	0,91 ***	1						
Mg	-0,48	-0,04	-0,12	-0,01	1					
Al	0,64	-0,97 ***	1 ***	0,92 ***	-0,12	1				
Ca	0,35	-0,75 *	0,79 *	0,93 ***	0,27	0,79 *	1			
P	0,51	-0,93 ***	0,97 ***	0,96 ***	0,02	0,97 ***	0,91 ***	1		
pH_eau	-0,43	0,62	-0,63	-0,33	0,12	-0,62	-0,18	-0,49	1	
pH_KCl	-0,34	0,55	-0,49	-0,25	-0,21	-0,49	-0,21	-0,39	0,88 **	1

1.2 Partie 1: Evolution des associations végétales et des stratégies des communautés

L'analyse sur les communautés végétales met en évidence une augmentation du nombre d'espèce au cours du temps (*Tableau 6*). On ne retrouve en effet que deux espèces végétales sur le stade initial. Le nombre d'espèce du stade intermédiaire augmente ensuite à 7 espèces pour enfin atteindre 8 espèces au stade avancé.

Ces communautés végétales sont caractérisées par des stratégies différentes (*Figure 19*). Celles du stade initial adoptent une stratégie compétitive tandis que celles du stade intermédiaire sont caractérisées par une stratégie plutôt stress-tolérante. Enfin, la stratégie des communautés végétales du stade avancé est moins évidente mais tend plutôt vers une stratégie CSR.

Tableau 6: a) Liste des espèces présentes dans les relevés de végétation des trois carrières de kaolins abandonnées à des périodes différentes : Transinne, stade initial (2 ans), Arfaye, stade intermédiaire (~10 ans) ; Haut-Fays, stade avancé (57 ans). b) Nombre d'espèces identifiées par m² de végétation dans chacune des trois carrières de kaolins.

Stade initial	Stade intermédiaire	Stade avancé
a) Liste d'espèces présentes par stade		
<i>Juncus conglomeratus</i> L.	<i>Carex viridula</i> MICHAUX.	<i>Juncus conglomeratus</i> L.
<i>Juncus tenuis</i> WILLD.	<i>Juncus bulbosus</i> L.	<i>Juncus articulatus</i> L.
	<i>Molinia caerulea</i> (L.) MOENCH	<i>Ranunculus flammula</i> L.
	<i>Drosera rotundifolia</i> L.	<i>Ranunculus repens</i> L.
	<i>Carex echinata</i> MURRAY.	<i>Agrostis capillaris</i> L.
	<i>Calluna vulgaris</i> (L.) HULL	<i>Cardamine hirsuta</i> L.
	<i>Pedicularis sylvatica</i> L.	<i>Rubus caesius</i> L.
		<i>Acer pseudoplatanus</i> L.
b) nombre d'espèce par m²		
0,67	2,33	2,67

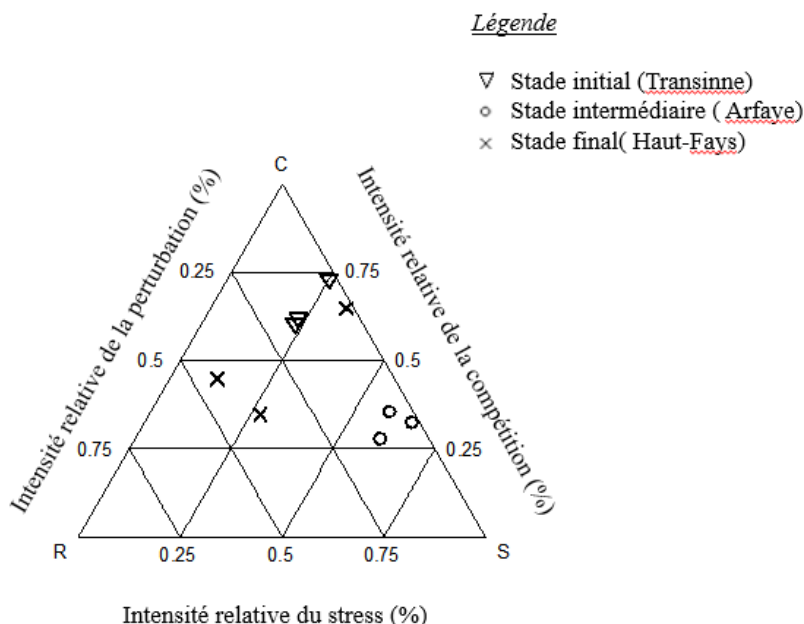


Figure 19: Stratégies CSR de chacune des communautés végétales identifiées dans les relevés de végétation au sein des trois carrières de kaolins abandonnées à des périodes différentes : Transinne, stade initial (2 ans), Arfaye, stade intermédiaire (~10 ans), Haut-Fays, stade avancé (57 ans).

2. Partie 2 : Variation des traits fonctionnels et de la stratégie CSR des communautés selon les gradients environnementaux.

2.1 Partie 2 : identification des associations végétales et de leur contrainte environnementale

A l'exception de la pente qui n'est significativement corrélée à aucune autre variable environnementale, toutes les autres sont corrélées significativement à minimum une autre variable environnementale. Les corrélations significatives sont indiquées en gras (*Tableau 8*). Le phosphore se trouvant en deçà de la limite de détectabilité pour tous les quadrats, cet élément biodisponible n'apparaît pas dans les résultats.

Le pH_eau et pH_KCl étant fortement corrélés entre eux ($r^2=0,73$), ces variables sont redondantes. C'est pourquoi seule la variable « pH_eau », plus intéressante pour la végétation, sera utilisée dans la suite du travail. Ce dernier varie entre 5,02 et 5,87 (*Tableau 7*). Il est corrélé de manière significative (*Tableau 8*) au Mg^{2+} ($r^2=0,43$), au K^+ ($r^2=-0,48$) et à l' Al^{3+} ($r^2=-0,74$).

L'humidité totale est corrélées significativement (*Tableau 8*) à l'humidité résiduelle ($r^2= 0,46$) et au Mg^{2+} ($r^2=0,61$). Cette humidité totale varie entre 13,76 % et 28,39 % (*Tableau 7*). L'humidité résiduelle, quant à elle, est corrélées significativement à tous les éléments chimiques à l'exception du Mg^{2+} (*Tableau 8*) et varie de 0,11% à 0,38% (*Tableau 7*).

Le Ca^{2+} et le Mg^{2+} sont corrélés significativement entre eux ($r^2= 0,44$) et sont respectivement compris entre [1,19-9,87] (mg/100g) et [0,49-4,28] (mg/100g). Enfin, l' Al^{3+} et le K^+ sont également corrélés entre eux ($r^2= 0,55$) et varient respectivement de [0,99-8,84] (ppm) et [1,14-3,94] (mg/100g).

Tableau 7: Moyenne, minimum, maximum et écart-type des variables environnementales mesurées pour tous les relevés de sol (n=30) au sein de la carrière de l'Arfaye (stade intermédiaire) abandonnée depuis 2008. Les concentrations des éléments chimiques sont exprimées en mg/100g, la pente en degré et l'humidité totale et résiduelle en %.

	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type
Htot	19,25	13,76	28,39	3,69
Hres	0,23	0,11	0,38	0,07
pH_eau	5,5	5,02	5,87	0,22
pH_KCl	4,65	4,09	5,64	0,32
[Mg^{2+}]	1,63	0,49	4,28	1,07
[Al^{3+}]	3,04	0,99	8,84	1,88
[K^+]	2,24	1,14	3,94	0,71
[Ca^{2+}]	4,17	1,19	9,87	1,82
Pente	7,27	0	24,48	8,41
[Fe^{3+}]	0,48	0,04	1,66	0,39

Tableau 8: Matrice de corrélations entre les variables environnementales, mesurées au niveau du quadrat (n=30) au sein de la carrière de l'Arfaye (stade intermédiaire de la succession spontanée) abandonnée depuis 10 ans. Les coefficients de corrélations de Pearson significatifs sont indiqués en gras et le niveau de significativité est le suivant : *P<0,05 ; **P<0,01 ; ***P<0,001

	Htot	Hres	pH_eau	pH_KCl	Mg	Al	K	Ca	Fer	Pente
Htot	1									
Hres	0,46 *	1								
pH_eau	0,26	-0,18	1							
pH_KCl	0,11	-0,14	0,73 ***	1						
Mg	0,61 ***	0,3	0,43 *	0,43 *	1					
Al	0,01	0,62 ***	-0,74 ***	-0,55 **	-0,17	1				
K	-0,01	0,41 *	-0,48 **	-0,41 *	-0,14	0,55 **	1			
Ca	0,13	0,4 *	0,02	0,04	0,44 *	0,18	0,3	1		
Fer	0,05	0,59 ***	-0,24	-0,11	-0,16	0,35	0,19	0,09	1	
Pente	-0,14	-0,26	-0,13	0,05	-0,21	-0,21	-0,11	-0,11	0,2	1

L'analyse en groupement a permis de déterminer le nombre de groupe de relevés floristiquement similaires (Figure 20). Deux possibilités existent, à savoir 2 ou 4 groupes, respectivement en rouge (k=2) et vert (k=4).

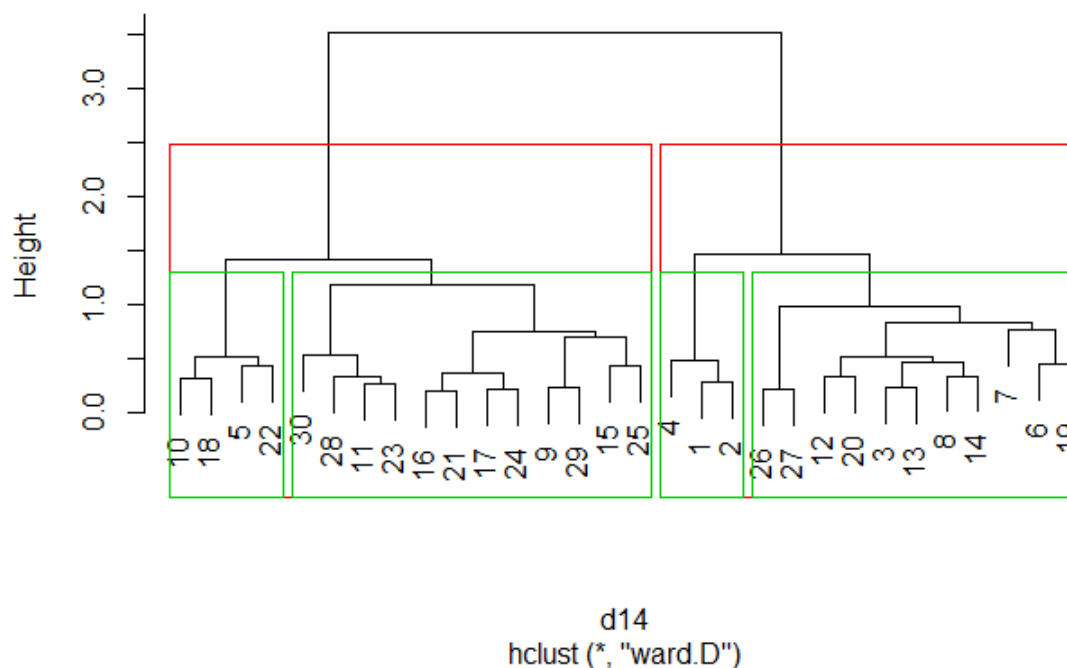


Figure 20: dendrogramme (méthode « Ward.D »)

Afin de déterminer le nombre de groupe pertinent biologiquement, les espèces indicatrices de chacun des groupes ont été identifiées dans le cas où k=2 et k=4 (Tableau 9). Pour ce faire, la valeur d'Indval de chaque espèce a été calculée pour chaque groupe et la valeur la plus élevée de l'Indval identifie le groupe dont l'espèce est indicatrice. Le calcul de l'Indval tient compte à la fois de la spécificité et de la fidélité de l'espèce (IV=

spécificité¹⁴*fidélité¹⁵). Ainsi, aucune espèce n'est indicatrice du groupe 4 dans le cas où k=4. C'est pourquoi seuls 2 groupes seront retenus (k=2) pour être projetés à postériori sur la PCoA. Ces deux groupes sont en effet tous les deux caractérisés par des espèces indicatrices.

Tableau 9: Liste des espèces indicatrices dans le cas où le nombre de groupe est de deux (k=2) et où le nombre de groupe est de quatre (k=4). Groupe= numéro du groupe présentant l'indval maximum pour l'espèce X. C'est donc le groupe dont l'espèce X est indicatrice. Indval= valeur la plus élevée de la valeur indicatrice (IV= fidélité*spécificité). Pvalue= niveau de significativité de la valeur de l'Indval. *P<0,05 ; **P<0,01 ; ***P<0,001

Espèces	Groupe	Indval	pvalue
<u>k=2</u>			
<i>Carex viridula</i> MICHAUX	1	0,854	***
<i>Juncus bulbosus</i> L.	1	0,797	***
<i>Juncus squarrosus</i> L.	1	0,557	**
<i>sphagnum auriculatum</i> SCHIMP	1	0,5	**
<i>Carex echinata</i> MURRAY	1	0,357	*
<i>Calluna vulgaris</i> (L.) HULL	2	0,902	***
<i>Nardus stricta</i> L.	2	0,75	***
<i>picea abies</i> (L.) KARST	2	0,438	**
<u>k=4</u>			
<i>Juncus squarrosus</i> L.	1	0,764	**
<i>Juncus bulbosus</i> L.	2	0,86	***
<i>Carex viridula</i> MICHAUX	2	0,8	***
<i>Nardus stricta</i> L.	3	0,779	**
<i>potentille erecta</i> (L.) RÄUSCHEL	3	0,75	**
<i>Genista pilosa</i> L.	3	0,72	**
<i>Calluna vulgar</i> (L.) HULL	3	0,705	***

Les espèces indicatrices du groupe 1 sont (Tableau 9) *Carex viridula*, *Juncus bulbosus*, *Juncus squarrosus*, *Sphagnum auriculatum*, et *Carex echinata*. Les espèces indicatrices du groupe 2 sont *Calluna vulgaris*, *Nardus stricta* et *Picea abies*.

Parmi les huit axes ayant une valeur propre supérieure à la moyenne des valeurs propres, seuls les deux premiers axes ont été retenus pour la PCoA (Figure 21) car ils expliquent le plus la variabilité. Le premier axe explique en effet 23,45% de la variabilité et le deuxième en explique 10,88%. On remarque que les quadrats de végétation se répartissent le long de l'axe 1. Les deux groupes identifiés à l'aide de l'analyse en groupement ont été projetés à postériori sur la PCoA (Figure 21). On remarque que ces deux groupes sont nettement séparés l'un de l'autre et se répartissent le long de l'axe 1, soit celui expliquant le plus la variabilité. Il existe, au sein du premier groupe, représenté par des symboles carrés, une grande variabilité le long de l'axe 2. Cela est probablement dû à la présence d'espèces rares qui ne se retrouvent que dans un quadrat, comme c'est le cas de *Lycopus europaeus* L. et *Juncus tenuis* WILLD. La disposition à postériori des espèces indique que certaines espèces sont ubiquistes et se retrouvent par conséquent dans la plupart des relevés. C'est le cas de *Lycopodiella inundata*, *Drosera rotundifolia*, *Molinia caerulea*, *Salix caprea* qui se retrouvent au centre de la PCoA.

¹⁴ Spécificité d'une espèce= nombre d'individu de l'espèce dans un groupe donné/ l'ensemble des individus de ce groupe. Pour être spécifique d'un groupe, l'espèce doit dominer dans ce groupe.

¹⁵ Fidélité d'une espèce= % de sites (quadrats) appartenant à un groupe donné occupé par une espèce. Pour être fidèle à un groupe donné, l'espèce doit occuper tous les sites (quadrats) de ce groupe.

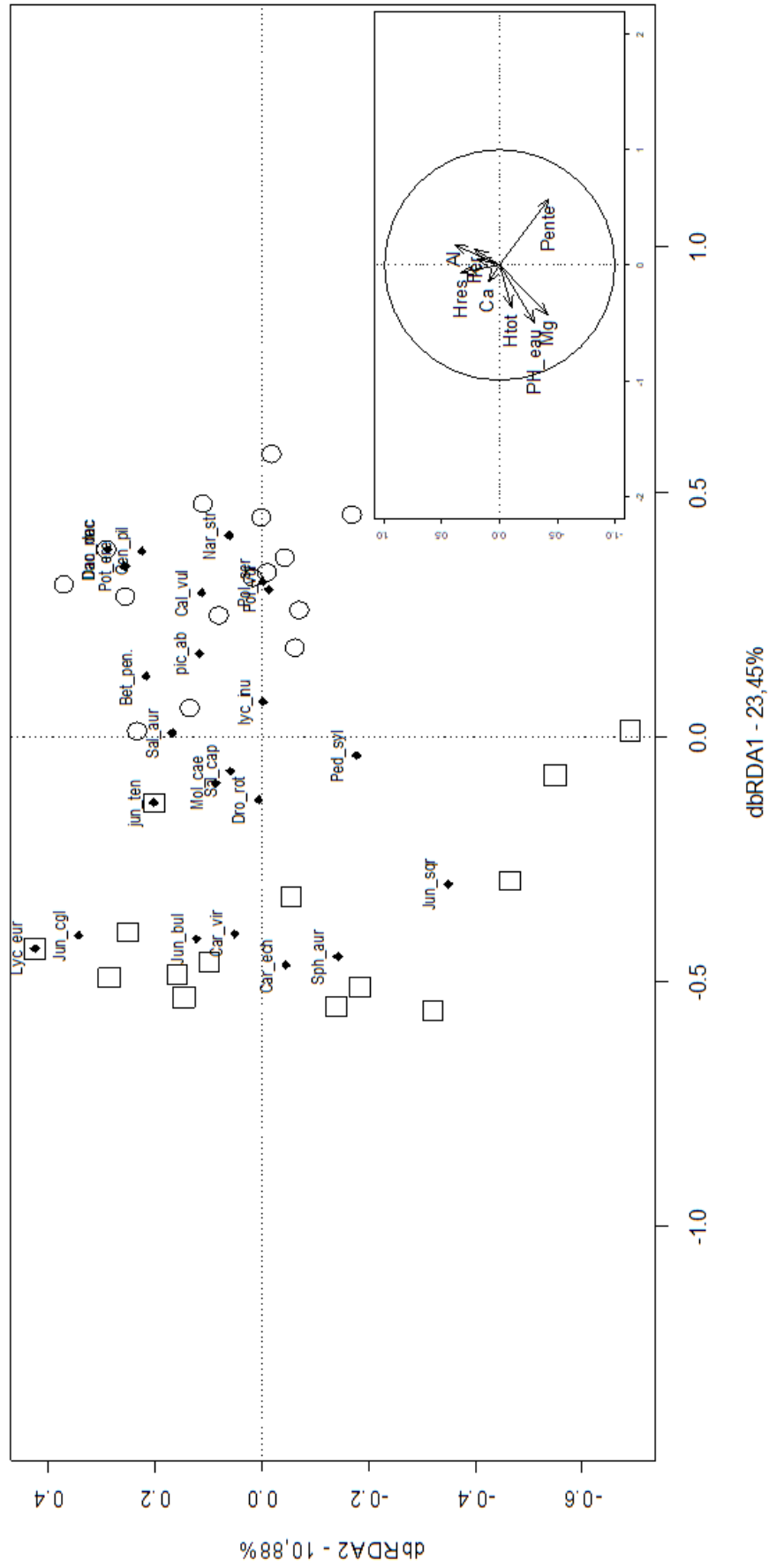


Figure 21: PCoA contrainte à postériori par les variables environnementales (23,45% de la variabilité est expliquée par l'axe 1 et 10,88% par l'axe 2). Le premier groupe de relevés floristiquement similaires est représenté par des carrés et le second par des cercles. Les espèces végétales sont représentées par des losanges pleins. Les deux groupes issus de l'analyse de groupements sont nettement séparés et se répartissent le long de l'axe 1.

Les corrélations avec les variables environnementales ont été analysées à posteriori (*Tableau 10*). L'axe expliquant le plus la variabilité étant l'axe 1 (23,45 % de la variabilité expliquée), seules les corrélations avec cet axe sont les plus pertinentes pour expliquer la distribution des espèces. Ainsi, la pente, l'humidité totale, le pH_eau et la concentration en Mg²⁺ expliquent le plus la variabilité sur l'axe 1 (*Figure 21*). Ces trois variables sont en effet caractérisées par des valeurs de corrélations élevées par rapport aux autres variables environnementales, soit respectivement 0.574, -0.369, -0,501 et -0,428 sur Dim1 (axe1) (*Tableau 10*).

Tableau 10: coefficients de corrélation entre les variables environnementales et les axes de la PCoA. L'axe 1 explique 23,45% de la variabilité et l'axe 2 explique 10,88% de la variabilité.

Variables environnementales	corrélation avec l'axe 1	corrélation avec l'axe 2
Htot	-0,369	-0,106
Hres	-0,063	0,335
pH_eau	-0,501	-0,305
Mg	-0,428	-0,419
Al	0,177	0,389
K	0,054	0,195
Ca	-0,149	0,098
Pente	0,574	-0,426
Fer	0,135	0,216

Les deux groupes de relevés floristiquement similaires sont caractérisés par des valeurs de pente, de pH_eau et de concentration en magnésium significativement différentes (*Tableau 11*). Ces résultats sont cohérents avec les analyses précédentes. En effet, ces trois variables environnementales sont les trois variables les plus corrélées avec l'axe 1 de la PCoA (*Tableau 10*).

Tableau 11: p-valeur (test F) de l'Anova testant l'égalité des moyennes des variables environnementales entre les deux groupes de relevés floristiquement similaires sur le stade intermédiaire de la succession (Arfaye).

Variables environnementales	p-valeur
Htot	0.1012
Hres	0.7588
Fer	0.2943
Al	0.3882
Ca	0.7799
K	0.875
Mg	*
PH_eau	*
PH_KCl	0.0588
Pente	*

2.2 Partie 2 : Variation des stratégies CSR des communautés en fonction des gradients environnementaux

Toutes les communautés présentes sur le stade intermédiaire de la succession (site de l'Arfaye) adoptent une stratégie orientée stress-tolérante (Figure 22). On remarque toutefois quatre variantes : S/CSR, S/SC, SC et SC/CSR (Tableau 12). Etant donné que les communautés végétales de ce stade ne semblent pas être caractérisées par des stratégies radicalement différentes les unes des autres, les corrélations avec les variables environnementales ne semblent pas pertinentes à analyser. Toutefois, une Anova (Tableau 13) pour chaque variable environnementale a été réalisée afin d'identifier s'il existait une différence significative de ces variables entre les quatre stratégies relevées.

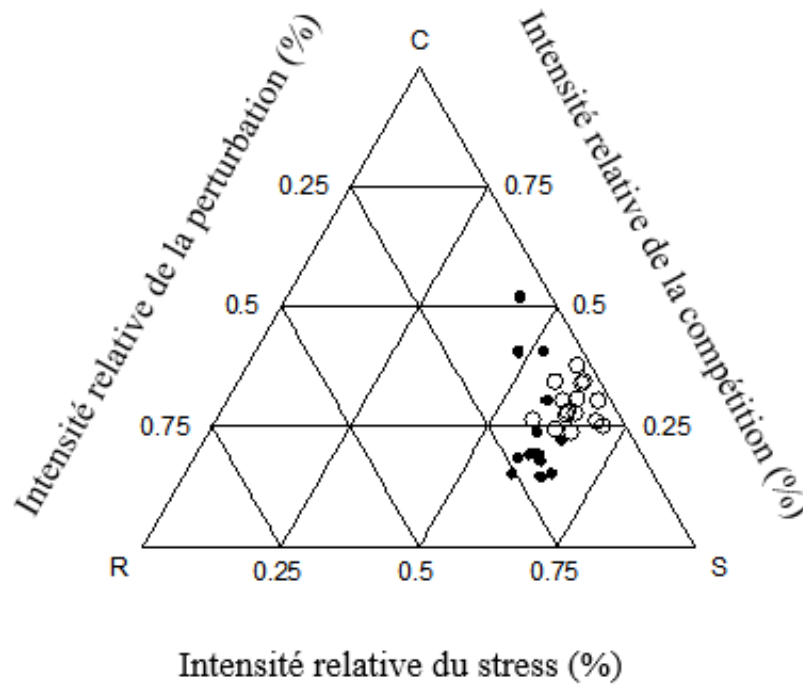


Figure 22: Stratégies des communautés sur le site de l'Arfaye placées dans le triangle de Grime. Le premier groupe de relevés floristiquement similaire est indiqué par des points noirs et le second groupe de relevés par des points vides.

Tableau 12: pourcentage de relevés par stratégie et par groupe

Stratégie	groupe 1	groupe 2
S/CSR	78,57	37,5
S/SC	0	50
SC	14,29	6,25
SC/CSR	7,14	6,25

Etant donné qu'il n'existe aucune différence significative des variables environnementales entre les quatre stratégies identifiées (Tableau 13), il a semblé intéressant d'analyser si les deux groupes issus de l'analyse des groupements sont caractérisés par des stratégies différentes. On remarque en effet une distinction dans les stratégies adoptées par les deux groupes de relevés. Le premier groupe, représenté par des points noirs (Figure 22) se distingue en effet du second groupe, représenté par des cercles (Figure 22) bien que certaines stratégies semblent communes aux deux groupes (Tableau 12)

Tableau 13: p-valeur de l'Anova (test F) testant l'égalité des moyennes des variables environnementales entre les différentes stratégies CSR identifiées sur le stade intermédiaire de la succession (Arfaye).

Anova	Htot	Hres	PH_eau	PH_KCl	Mg	Al	K	Ca	Pente	fer
p-valeur	0.11	0.57	0.09	0.69	0.09	0.16	0.86	0.44	0.97	0.59

2.3 Partie 2 : Variation des traits fonctionnels en fonction des gradients environnementaux

La pondération des valeurs théoriques de SLA par l'abondance relative de chacune des espèces a permis de calculer le CWM de chaque communauté. Ces valeurs de CWM varient de 1183,11 à 3066,33 mm²/mg avec une moyenne de 1949,47 mm²/mg (surface foliaire/poids sec de la feuille). Selon l'analyse des corrélations, il n'existe aucune corrélation significative entre les valeurs de CWM_SLA et les variables environnementales (Tableau 14).

Tableau 14: Coefficient de corrélation de Pearson entre les valeurs de SLA mesurées au niveau du quadrat et les variables environnementales. Aucune corrélation n'est significative : $P > 0,05$

/	CWM_SLA	p-valeur
PH_eau	-0,14	0,47
Mg	-0,01	0,94
Al	0,05	0,79
K	0,29	0,12
Ca	0,24	0,2
Pente	0,08	0,67
hauteur	0,02	0,9
Fer	0,22	0,24
Htot	0,1	0,59
Hres	0,25	0,19

F. Discussions et perspectives

1. Les limites de l'étude

Il est à noter que tous les résultats relatifs à la partie chronoséquence (Partie 1) doivent être abordés de manière critique. En effet, les résultats présentés précédemment sont basés sur l'analyse de seulement trois échantillons par site/stade de chronoséquence. De plus, un seul site par stade de chronoséquence a été inventorié étant donné que toutes les autres carrières de kaolins ont été abandonnées en même temps, dans les années soixante et ont été soit reconvertie en CET, soit ont été rebouchées ou encore reboisées. Ces résultats ne sont donc pas généralisables. Il en va de même pour la deuxième partie de ce travail où un seul site a été inventorié.

2. Analyse de l'évolution temporelle des propriétés du sol, des associations végétales et de leur stratégie

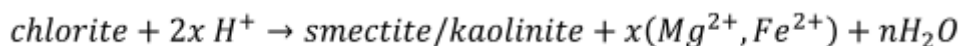
Bien que non significatif, l'évolution temporelle du pH des sols de Kaolins montre une tendance à l'acidification. Cette dernière est un processus naturel des écosystèmes (Robson, 1989) résultant de l'accumulation progressive de matière organique et des exsudats racinaires provenant de la végétation. Les résultats montrent en effet une augmentation très hautement significative ($p < 0,001$) du COT, liée à la reprise de la végétation sur les sols marginaux de kaolins belge.

Le tableau des corrélations met en évidence des corrélations positives entre cet accroissement de COT et la concentration en éléments biodisponibles (Ca^{2+} , P^+ , K^+) ainsi que la concentration en Al^{3+} . Il est à noter que la concentration en Al^{3+} a été mesurée à l'aide d'une extraction à l'EDTA. Cet élément précipitant à des $\text{pH} > 5$ (Balintova et al., 2011), il aurait été judicieux de mesurer l'acidité d'échange. Toutefois, le pH des sols de kaolins étant relativement proche de cette valeur charnière, la mesure à l'EDTA reste représentative de la concentration biodisponible réelle d' Al^{3+} .

Ces corrélations entre COT et éléments biodisponibles vont dans le sens des découvertes scientifiques antérieures. En effet, le carbone organique du sol influence le cycle des nutriments (N,P,K,Ca,Mg) et est une source importante d'éléments pour la croissance de la végétation (Chaudhari et al., 2013). Ce carbone, à travers le turnover des nutriments, influence la structure du sol, notamment en diminuant la densité apparente du sol (Chaudhari et al., 2013). On retrouve en effet dans la présente étude une corrélation négative ($p < 0,05$) entre la densité et d'une part le COT et d'autre part les éléments biodisponibles (Ca^{2+} , P^+ , K^+).

Toutefois, contrairement à ce qui était attendu, il n'existe aucune corrélation significative entre le Mg^{2+} et le COT et/ou la densité du sol. A l'inverse des autres nutriments, le Mg^{2+} présente des concentrations plus faibles dans les stades plus avancés de la succession que dans le stade initial de la succession. Cela serait dû au lessivage de cet élément vers des horizons plus profonds (Bose et al., 2011). Le magnésium possède en effet un rayon ionique plus petit que les autres éléments, menant à des liaisons plus faibles et une mobilité plus importante. La quantité de magnésium lessivé dépend fortement de l'acidité du sol et de la CEC, elle-même affectée par les argiles et la matière organique (Granssee et al., 2013; Bose, 2011). L'acidité importante des sols de kaolins et la faible quantité de COT initial expliqueraient le lessivage du magnésium entre le stade initial et intermédiaire de la succession (Transinne et Arfaye). L'apport ultérieur de matière organique via le cycle biogéochimique sur le site de Haut-Fays expliquerait cette légère augmentation de magnésium, bien qu'aucune corrélation significative n'ait pu être démontrée dans la présente étude.

Enfin, il est intéressant de souligner les concentrations initiales élevées en Mg^{2+} et Ca^{2+} . La concentration importante en magnésium proviendrait de la chlorite, encore présente dans la saprolite de Transinne (Yans, 2003). L'acidité du milieu altère la chlorite suivant cette réaction (Lefebure, 2016) :



L'origine de la concentration relativement élevée en calcium au cours du temps est quant à elle inconnue. En effet, sa concentration dans la saprolite de Transinne est négligeable comparativement aux autres éléments biodisponibles (Figure 23). Le phosphore est présent initialement dans la saprolite sous la forme P_2O_5 , le potassium sous la forme de K_2O et le magnésium sous forme de MgO (Figure 23).

Figure 23: Analyse chimique de la saprolite de Transinne. Source: Yans(2003)

SiO₂	49,2
Al₂O₃	33,14
Fe₂O₃	0,65
MnO	< L.D
MgO	0,29
CaO	< L.D
Na₂O	0,76
K₂O	6,01
TiO₂	1,47
P₂O₅	0,07

En terme de végétation, on remarque une augmentation du nombre d'espèces au cours du temps comme attendu dans la littérature (Prach, 2013). Le stade initial est dominé par des joncs et évolue ensuite vers des landes à callune et des landes humides. Ceci sera développé dans la section suivante (« *variation des communautés végétales en fonction des gradients environnementaux* »). Le dernier stade voit une augmentation moindre du nombre d'espèce et évolue vers une zone boisée (présence de bouleau, d'érable, de peuplier tremble). Il faut en effet 10 à 20 ans pour obtenir un stade de succession majoritairement dominé par les ligneux (Prach, 2013).

Cette fluctuation du nombre d'espèces au cours du temps peut s'expliquer par l'évolution des conditions abiotiques. En effet, comme discuté précédemment, la densité apparente du sol présente des valeurs plus faibles dans les stades plus avancés de la succession spontanée, à l'instar de la matière organique et des concentrations en éléments biodisponibles. Ces conditions abiotiques sont par conséquent plus favorables à un nombre d'espèces plus important. (Schafer, 1979; Prach, 2013; Frochot, 1995).

D'autre part, cette fluctuation du nombre d'espèces végétales est corrélée à la stratégie des communautés végétales. En effet, selon la littérature (Prach, 2013), le nombre d'espèce végétale est minime quand des espèces compétitrices dominent le stade et est maximale lorsque ces compétiteurs disparaissent. Les communautés végétales sur le stade initial sont en effet dominées par des espèces compétitrices et par un nombre d'espèce minimal. A contrario, le stade intermédiaire (Arfaye) est dominé par des espèces stress-tolérantes et caractérisé par un plus grand nombre d'espèces végétales.

Toutefois, l'évolution des stratégies des communautés ne répond pas au modèle de Grime. En effet, selon ce même modèle, les communautés végétales initiales d'une succession primaire sont dominées par des espèces et communautés stress-tolérantes. Ces espèces prévalent dans des habitats peu productifs, avec une disponibilité en nutriments très faible, à contrario des espèces compétitrices. Progressivement, ces espèces stress-tolérantes sont remplacées par des communautés compétitives pour enfin évoluer vers une stratégie rudérale (Ecke, 2000), caractérisant les habitats fortement perturbés.

Les résultats de la présente étude montrent une tendance inverse. On est en effet en présence d'espèces compétitrices sur le stade initial et en présence d'espèces stress-tolérantes sur le stade intermédiaire. Le stade avancé, quant à lui, est caractérisé par une stratégie plutôt centrale (CSR). Le nombre de quadrats par site

(n=3) et le nombre de sites par stade de chronoséquence (n=1) étant insuffisant pour des analyses statistiques, aucune corrélation significative ne peut être tirée avec les variables environnementales. Toutefois, ces résultats ne sont pas incompatibles avec les conditions abiotiques caractérisant les stades de chronoséquence.

En effet, le stade initial, plus riche en Ca^{2+} , Mg^{2+} et plus pauvre en Al^{3+} est par conséquent un habitat plus productif et moins stressant que le stade intermédiaire, caractérisé par une concentration plus élevée en Al^{3+} ainsi qu'une concentration en nutriments plus faible. Selon la théorie de Grime, il est donc logique que le stade initial soit colonisé par des espèces compétitrices et le second stade par des stress-tolérantes. Concernant le stade avancé, il est à noter qu'un des quadrats se trouvait en zone boisée et comprend uniquement de la régénération d'érable et de ronce. Ce quadrat est caractérisé par une stratégie compétitrice. Les deux autres quadrats sont caractérisés par des stratégies moyennes et centrales (CR et CSR). La concentration bien plus importante en nutriment et en Al^{3+} ainsi que le pâturage au cours d'une période de l'année explique cette stratégie moyenne : ce stade est par conséquent caractérisé par des conditions intermédiaires de stress (concentration importante en Al^{3+}), de perturbation (pâturage par des ânes) et de compétition (concentration élevée en nutriments) (Grime et al., 1988), expliquant de ce fait cette stratégie intermédiaire. Il est important de souligner qu'à cause de ce pâturage, ce site n'est donc plus représentatif de la succession naturelle de la végétation sur des sols de kaolins.

Cette première partie relative à la chronoséquence a donc permis d'analyser les tendances d'évolution des conditions abiotiques des sols de kaolins ainsi que les tendances d'évolution des associations végétales et de leurs stratégies. Il est évident que ces résultats ne sont pas généralisables et doivent être abordés de manière critique. Cette première partie a en effet été réalisée sur base de trois échantillons composites par site et sur base d'un site par stade de chronoséquence.

3. Analyse de la variation des traits fonctionnelles et de la stratégie CSR des communautés selon les gradients environnementaux.

3.1. Répartitions des communautés végétales en fonction des gradients environnementaux

L'analyse des groupements réalisée sur le jeu de données biologiques met en avant 2 groupes de relevés floristiquement similaires, chacun caractérisé par des espèces indicatrices.

Selon la classification WalEuNis, le premier groupe correspond au biotope F4.11 « landes humides à [*Erica tetralix*] »¹⁶. On retrouve en effet dans ce premier groupe plusieurs espèces indicatrices de ce biotope, à savoir :

- *Juncus squarrosus*, espèce indicatrice du premier groupe;
- *Drosera rotundifolia* ;
- *Pedicularis sylvatica* ;
- *Lycopodiella inundata* ;
- *Molinia caerulea* ;

Juncus squarrosus est une espèce indicatrice du premier groupe. Les 3 autres espèces végétales n'en sont pas indicatrices mais se retrouvent dans la plupart des relevés du premier groupe. Elles occupent en effet une position centrale sur la PCoA. Toutefois, *Drosera rotundifolia*, *Pedicularis sylvatica* et *Molinia caerulea* se retrouvent plus proche du premier groupe, signifiant qu'elles se retrouvent dans des abondances plus importantes dans les relevés du premier groupe que dans ceux du second.

¹⁶ <http://biodiversite.wallonie.be/fr/f4-11-landes-humides-a-erica-tetralix.html?IDC=1006>

Selon la même classification, le second groupe correspond au biotope F4.22 « Landes sèches à Callune et Genista 17 ». On y retrouve en effet de nombreuses espèces végétales caractéristiques de ce biotope à savoir :

- *Calluna vulgaris*, espèce indicatrice du second groupe;
- *Nardus stricta*, espèce indicatrice du second groupe ;
- *Danthonia decumbens* ;
- *Genista pilosa* ;
- *Polygalla serpyllifolia* ;
- *Potentille erecta* ;

Il est à noter que ce biotope est également caractérisé par la présence de *Lycopodium clavatum* L., *Carex pilulifera* L., *Galium saxatile* L. et *Rumex acetosella* L.. Ces 4 espèces végétales n'ont pas été identifiées lors des relevés relatifs à ce travail mais l'ont été lors d'un précédent inventaire réalisé par A.Remacle en 2003 (Remacle, 2003).

Ces deux habitats font l'objet d'une directive européenne Habitat (code 4010 et 4030). Ils sont classés comme habitats à conservation défavorable médiocre (U2) tant pour les régions biogéographiques atlantiques que continentales. Une des menaces potentielles est la recolonisation par des ligneux, notamment l'épicéa, fortement présent aux alentours de la carrière de l'Arfaye (stade intermédiaire). En effet, *Picea abies* se retrouve être une espèce indicatrice du second groupe, signifiant de ce fait que ce dernier est fortement menacé par l'enrésinement.

Le maintien de ces landes sèches et humides se fait à l'aide d'un pâturage régulier et/ou du fauchage. Des travaux de désenrésinement seraient également intéressants afin de maintenir le milieu ouvert et maintenir les populations d'espèces végétales protégées comme *Dactylorhiza maculata*, *Drosera rotundifolia* (en danger), *Lycopodiella inundata* (menacé d'extinction) et *Carex viridula* (menacé d'extinction), toutes protégées par l'annexe 6b de la loi sur la conservation de la nature¹⁸.

En ce qui concerne la restauration de la carrière de Transinne (stade initial), il est nécessaire de comprendre les facteurs environnementaux contraignant la distribution des espèces. La contrainte a posteriori indique que la pente, le pH, l'humidité totale et la concentration en magnésium sont les facteurs environnementaux les plus fortement corrélés à la distribution des espèces. Toutefois, l'humidité totale n'est pas significativement différente entre les deux groupes. Contrairement à ce qu'il était attendu, les zones rouges et blanches (présence d'oxyde de fer) ne sont pas discriminantes pour la distribution des espèces.

Ainsi, le premier groupe, soit la lande humide à *Erica tetralix*, est caractérisée par une humidité, une concentration en magnésium et des valeurs de pH plus élevées et des valeurs de pente plus faibles que le second groupe de relevés, soit la lande sèche à Callune. Le magnésium étant significativement corrélé au pH et à l'humidité, il peut ne pas être pris en compte pour des projets de restauration pour des raisons pratiques. Il est en effet plus facile de déterminer l'humidité totale et le pH sur le terrain que la concentration en Magnésium, qui nécessite des analyses chimiques en laboratoire. Par conséquent, seules trois variables environnementales sont réellement à prendre en considération pour le projet de restauration : la pente, le pH et l'humidité totale.

Il est à noter que les relevés appartenant au premier groupe (landes humides) se trouvent en fond de fosse, caractérisé par conséquent par une humidité plus importante. A contrario, les relevés appartenant au second groupe (landes sèches à callune) se situent sur les replats, en hauteur par rapport au plan d'eau.

¹⁷ <http://biodiversite.wallonie.be/fr/f4-22-landes-seches-a-calluna-et-genista.html?IDC=1385>

¹⁸ Loi de 1973 sur la conservation de la nature, LB 1973, annexe 6b.

Ainsi, les carrières de Kaolins peuvent être recolonisées naturellement par deux associations végétales :

- Les landes sèches à Callune et Genista, situées sur de forte pente, sur des sols plus acides et moins humides. Ces biotopes se retrouvent généralement sur les replats, en hauteur par rapport au niveau d'eau.
- Les landes humides à *Erica tetralix*, situées sur de faibles pentes, sur des sols moins acides et plus humides. Cette association végétale se retrouve majoritairement en fond de fosse.

Pour une restauration réussie, il sera donc nécessaire d'aller chercher des espèces végétales issues du pool d'espèce de ces deux biotopes. Lors du semis, les trois variables environnementales devront être prises en considération : Les espèces des landes sèches à Callune sont à semer au sein des zones plus acides, plus sèches et sur les pentes tandis que les espèces des landes humides sont à semer au sein des zones moins acides, plus humides et en bas de pente. Les zones plus humides se trouvent en fond de fosse et les zones plus sèches sur les replats. Contrairement à ce qu'il était attendu, les zones « rouges » (présence d'oxyde de fer) et les zones « blanches » ne doivent pas à être pris en considération lors de la restauration de la carrière de Transinne.

3.2. Variation des stratégies CSR en fonction des gradients environnementaux

Bien que les communautés végétales présentes sur le stade intermédiaire (Arfaye) adoptent une stratégie globalement stress-tolérante, on distingue 4 variantes, représentées dans des proportions différentes par les communautés végétales « lande humides » et « landes sèches ».

La communauté végétale « lande humide » adopte trois types de stratégies : S/CSR, SC et SC/CSR. Toutefois, la stratégie majoritaire semble être S/CSR, caractérisant 78,57% des relevés de cette communauté végétale. Le second groupe, soit les « landes sèches » adopte quant à elle quatre stratégies : celles déjà mentionnées ainsi que S/SC. Les deux stratégies majoritaires de ce groupe de relevés semblent être S/SC, caractérisant 50% des relevés de la lande sèche suivie de la stratégie S/CSR, caractérisant 37,50% des relevés.

Ces résultats sont utiles en termes de restauration. En effet, lors du semis, il sera nécessaire d'aller puiser des espèces caractérisées par une stratégie S/CSR au sein du pool d'espèce des landes humides. Au sein des espèces des landes sèches à Callune, seules celles caractérisées par les stratégies S/CSR et SC seront à sélectionner pour maximiser la réussite de la restauration.

3.3. Variation des traits fonctionnels en fonction des gradients environnementaux

Contrairement à ce qu'il était attendu, il n'existe aucune corrélation entre les valeurs de SLA des communautés et les variables environnementales. Aucune conclusion ne peut être tirée de cette analyse en termes de restauration. Il aurait été intéressant de mesurer le CWM relatif à la hauteur de la végétation mais aucune valeur n'a pas été trouvée dans les bases de données pour les espèces présentes sur la carrière.

Toutefois, il est à noter que les valeurs de SLA sont des valeurs théoriques trouvées dans la littérature. Pour plus de précision, il aurait été plus pertinent de mesurer la SLA d'un individu de chaque espèce par quadrat et de pondérer cette valeur par son recouvrement afin d'avoir une valeur plus précise de SLA de la communauté.

G. Conclusion

En conclusion, les résultats relatifs à l'évolution des conditions abiotiques sont encourageants pour la restauration. En effet, l'apport de matière organique est relativement important au cours du temps et impacte le cycle des nutriments ainsi que la densité apparente, rendant les conditions abiotiques plus favorables à l'établissement d'une flore riche et diversifiée.

En termes de restauration de la carrière de Transinne, deux postulats sont à prendre en considération. D'une part, deux habitats sont identifiables, à savoir les landes humides à *Erica tetralix* et les landes sèches à *Calluna vulgaris*. D'autre part, ces deux associations d'espèces semblent être caractérisées par des stratégies CSR différentes. Les landes sèches à Callune sont majoritairement caractérisées par les stratégies S/CSR et S/SC tandis que les landes humides à *Erica tetralix* sont caractérisées par la stratégie S/CSR.

Il sera donc nécessaire lors de la restauration de semer des espèces végétales de type S/CSR et S/SC parmi le pool d'espèces des landes sèches et des espèces végétales de type S/CSR parmi le pool d'espèces des landes humides.

Enfin, la contrainte à posteriori de la PCoA illustre le fait que seule la pente, l'humidité totale et le pH du sol sont à prendre en considération pour le succès de la restauration. Ainsi, les espèces appartenant au biotope « Landes humides à *Erica tetralix* » seront à semer en bas de pente, au sein des zones plus humides et moins acides de la carrière tandis que les espèces appartenant au biotope « Landes sèches à Callune » seront à semer sur de fortes pentes, au sein des zones plus sèches et plus acides de la carrière. Ces zones se trouvent sur les replats, en hauteur par rapport au plan d'eau. Les zones rouges et blanches n'entrent pas en considération pour la restauration.

H. Bibliographie

- Albert J., 1961. Le Kaolin de l'Ardenne. Extraction-Débouchés. *Ann. des Sci. économiques appliquées*, **19**(5), 532–563.
- Asselberghs E., 1920. Le kaolin en Belgique. *Ann. des mines Belgique*, 1064–1067.
- Balintova M. & Petrilakova A., 2011. Study of pH Influence on Selective Precipitation of Heavy Metals from Acid Mine Drainage. *Chem. Eng. Trans.*, **25**, 345–350.
<https://www.researchgate.net/publication/278062531>, (12/7/2018).
- Belda M. et al., 2014. Climate classification revisited: from Köppen to Trewartha. *Clim. Res.*, **59**(1), 1–13. http://www.int-res.com/articles/cr_oa/c059p001.pdf, (26/3/2018).
- Bétard F., 2013. Patch-Scale Relationships Between Geodiversity and Biodiversity in Hard Rock Quarries: Case Study from a Disused Quartzite Quarry in NW France. *Geoheritage*, **5**(2), 59–71.
<https://vpn.gw.ulg.ac.be/content/pdf/,DanaInfo=link.springer.com,SSL+10.1007%2Fs12371-013-0078-4.pdf>, (9/2/2018).
- Blanco H. & Lal R., 2010. *Principles of Soil Conservation and Management* Springer., Dordrecht: Springer Netherlands. www.springer.com, (14/7/2018).
- Bose J., Babourina O. & Rengel Z., 2011. Role of magnesium in alleviation of aluminium toxicity in plants. *J. Exp. Bot.*, **62**(7), 2251–2264. <https://academic.oup.com/jxb/article-lookup/doi/10.1093/jxb/erq456>, (4/7/2018).
- Boulvain F. & Pingot J.-L., 2018. Une introduction à la géologie de la Wallonie.
http://www.geosed.ulg.ac.be/geolwal/geolwal.htm#LE_DEVONIEN_INFERIEUR.
- Bradshaw A., 1997. Restoration of mined lands—using natural processes. *Ecol. Eng.*, **8**, 255–269.
https://vpn.gw.ulg.ac.be/S0925857497000220/,DanaInfo=ac.els-cdn.com,SSL+1-s2.0-S0925857497000220-main.pdf?_tid=c797b3ae-4687-4e10-823e-2f931d30d41e&acdnat=1522221664_eae95ea0bad99adba3ea67d69d761f0a, (28/3/2018).
- Chaudhari P.R. et al., 2013. Soil Bulk Density as related to Soil Texture, Organic Matter Content and available total Nutrients of Coimbatore Soil. *Int. J. Sci. Res. Publ.*, **3**(2), 2250–3153. www.ijsrp.org, (4/7/2018).
- Chen D. & Chen H.W., 2013. Using the Köppen classification to quantify climate variation and change: An example for 1901–2010. *Environ. Dev.*, **6**, 69–79.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211464513000328>, (26/3/2018).
- Cingolani A.M. et al., 2007. Filtering processes in the assembly of plant communities: Are species presence and abundance driven by the same traits? *J. Veg. Sci.*, **18**, 911–920.
<https://vpn.gw.ulg.ac.be/doi/pdf/10.1111/,DanaInfo=onlinelibrary.wiley.com,SSL+j.1654-1103.2007.tb02607.x>, (2/4/2018).
- Clewell A., Aronson J. & Winterhalder K., 2004. *L'ABCDIAIRE SUR L'ECOLOGIE DE LA RESTAURATION DE LA SER INTERNATIONALE*, www.ser.org, (8/8/2018).
- Dancer W.S., Handley J.F. & Bradshaw A.D., 1977. Nitrogen accumulation in Kaolin mining wastes in Cornwall. *Plant Soil*, **48**(2), 153–167.
- Dobson A.P., Bradshaw A.D. & Baker A.J., 1997. Hopes for the Future : Restoration Ecology and Conservation Biology. *Science (80-.)*, **277**, 515–522.
- Ecke F. & Rydin H., 2000. Succession on a land uplift coast in relation to plant strategy theory. *Ann. Bot. Fenn.*, **37**, 163–171. <http://www.annbot.net/PDF/anbf37/anbf37-163p.pdf>.
- Frochot B. & Godreau V., 1995. Intérêt écologique des carrières, terrils et mines. *Natures-Sciences-Sociétés*, **3**, 66–76. <https://vpn.gw.ulg.ac.be/articles/nss/pdf/1995/05/,DanaInfo=www.nss-journal.org,SSL+nss199503sp66.pdf>, (9/2/2018).
- Gransee A. & Führs H., 2013. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. *Plant Soil*, **368**(1–2), 5–21. <http://link.springer.com/10.1007/s11104-012-1567-y>, (4/7/2018).
- Grime J.P. (John P. et al., 1988. *Comparative plant ecology : a functional approach to common British species*, Springer.

- <https://books.google.be/books?hl=fr&lr=&id=cXDuCAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=plant+strategy+theories+&ots=-bHTRPpLOY&sig=wucnEwJO24TTinVfcSxFZCYg3Zg#v=onepage&q=plant+strategy+theories&f=false>, (8/7/2018).
- Grime J.P. (John P. & Grime J.P. (John P., 2001. *Plant strategies, vegetation processes, and ecosystem properties*, Wiley.
- Hobbs R.J. & Harris J. a, 2001. Restoration Ecology : Repairing the Earth ' s Ecosystems in the New Millennium. *Restor. Ecol.*, **9**(2), 239–246.
- Hodgson J.G et al., 1999. Allocating C-S-R plant functional types: a soft approach to a hard problem. *Oikos*, **85**, 282–294. <http://people.exeter.ac.uk/rh203/plant-scientist-recent-science-functional-types-oikos.pdf>, (30/3/2018).
- Jérôme A., 1907. De la découverte d'un gisement notable de kaolin en Ardenne. *Bull la soc belg Géol*, **21**, 217–222.
- Jie C. et al., 2002. Soil degradation : a global problem endangering sustainable development. *J. Geogr. Sci.*, **12**(2), 243–252.
- Khater C., Martin A. & Maillet J., 2003. Spontaneous vegetation dynamics and restoration prospects for limestone quarries in Lebanon. *Appl. Veg. Sci.*, **6**(2), 199–204.
- Kleyer M. et al., 2008. The LEDA Traitbase: a database of life-history traits of the Northwest European flora. *J. Ecol.*, **96**, 1266–1274. https://www.ufz.de/export/data/2/92396_Kleyer_et_al_LEDA_J_Ecol_2008.pdf, (8/2/2018).
- Lambinon J. & Verloove F., 2012. *Nouvelle flore de la Belgique, du G.-D. De Luxembourg, du nord de la France et des régions voisines (Ptéridophytes et spermatophytes sixième éd.*,
- Lavorel S. et al., 2007. *Plant Functional Types: Are We Getting Any Closer to the Holy Grail?*, Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-540-32730-1_13.pdf, (9/3/2018).
- Lavorel S. & Garnier E., 2002. Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail. *Funct. Ecol.*, **16**(Essay Review), 545–556.
- Lefebure K., 2016. *Etude des formes d'oxydes de fer et de leurs effets sur la dynamique des matières organiques dans les sols polygenetiques de la carrière de Transinne (Belgique)*. Gembloux Agro-Bio Tech.
- Lefin J.P., Lecomte P. & Martin H., Géochimie de surface des traces métalliques du kaolin de Transinne. Application à la prospection géochimique des kaolins.
- Lortie C.J. et al., 2004. Rethinking plant community theory. *Oikos*, **107**(2), 433–438. <https://vpn.gw.ulg.ac.be/doi/pdf/10.1111/,DanaInfo=onlinelibrary.wiley.com,SSL+j.0030-1299.2004.13250.x>, (3/4/2018).
- Ma J.F., Ryan P.R. & Delhaize E., 2001. Aluminium tolerance in plants and the complexing role of organic acids. *Trends Plant Sci.*, **6**(6), 273–278. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1360138501019616>, (28/2/2018).
- Mahy G. et al., 2014. *Etude de la flore spontanée de la carrière de Loën pour de futures restaurations*, http://www.quarrylifeaward.com/sites/default/files/media/carline_pitz_qla_2014_0.pdf, (12/2/2018).
- Oldeman L.R., 1992. Global Extent of Soil Degradation. *Bi-Annual Rep. 1991-1992/ISRIC*, 19–36. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/299739>, (14/7/2018).
- Pierce S. et al., 2017. A global method for calculating plant CSR ecological strategies applied across biomes world-wide. *Funct. Ecol.*, **31**, 444–457. <https://vpn.gw.ulg.ac.be/doi/pdf/10.1111/,DanaInfo=besjournals.onlinelibrary.wiley.com,SSL+1365-2435.12722>, (23/3/2018).
- Pouliquen M., 2014. Les kaolins. *mines & carrières*, **218**, 51–60.
- Prach K. et al., 2011. Ecological Restoration of Central European Mining Sites: A Summary of a Multi-site Analysis. *Landsc. Res.*, **36**(2), 263–268. <https://vpn.gw.ulg.ac.be/doi/pdf/10.1080/,DanaInfo=www.tandfonline.com,SSL+01426397.2010.547571?needAccess=true>, (3/4/2018).
- Prach K. et al., 2013. Spontaneous vegetation succession at different central European mining sites: A comparison across seres. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **20**(11), 7680–7685.

- Prach K. & Hobbs R.J., 2008. Spontaneous succession versus technical reclamation in the restoration of disturbed sites. *Restor. Ecol.*, **16**(3), 363–366.
- Remacle A., 2003. Un site de grand intérêt biologique: La carrière de kaolin de l'Arfaye à Libin (Province du Luxembourg, Belgique). *Nat. Mosana*, **56**(1), 1–5.
- Robson A., 1989. *Soil Acidity and Plant Growth*. 1st Edition., Elsevier Science.
- S.A L., *Projet de valorisation des argiles blanches d'Ardenne (rapport interne)*,
- Schafer W. et al., 1979. Soil genesis, hydrological properties, root characteristics and microbial activity of 1-to 50-year old stripmine spoils /. In: Cincinnati, Ohio :, 12.
<http://hdl.handle.net/2027/umn.31951002852920v>, (9/3/2018).
- Stemans P., 1989. Paleogeographie de l'Eodevonien ardennais et des régions limitrophes. *Ann. la société Géologique Belgique*, **112**(1), 103–119. <https://popups.uliege.be/0037-9395/index.php?id=1191&file=1&pid=991>, (9/7/2018).
- Velde B. & Barré P., 2010. *Soils, plants and clay minerals : mineral and biologic interactions*, Springer. <https://vpn.gw.ulg.ac.be/content/pdf/,DanaInfo=link.springer.com,SSL+10.1007%2F978-3-642-03499-2.pdf>, (12/2/2018).
- Velde P., Barré P. & Velde B., 2009. Clay Minerals in Soils: The Interface Between Plants and the Mineral World. In: *Soils, Plants and Clay Minerals*. Springer, Berlin, Heidelberg, 129–170. https://vpn.gw.ulg.ac.be/content/pdf/,DanaInfo=link.springer.com,SSL+10.1007%2F978-3-642-03499-2_4.pdf, (12/2/2018).
- Violle C. et al., 2007. Let the concept of trait be functional! *Oikos*, **116**(5), 882–892.
- Whittaker R.H., 1956. Vegetation of the Great Smoky Mountains. *Ecol. Monogr.*, **26**(1), 1–80.
<http://doi.wiley.com/10.2307/1943577>, (16/7/2018).
- Yans J., 2003. *Chronologie des sédiments kaoliniques à faciès wealdien (Barrémien moyen à Albien supérieur ; Bassin de Mons) et de la saprolite polyphasée (Crétacé inférieur et Miocène inférieur) de la Haute-Lesse (Belgique) : implications géodynamiques et paléoclimatiques*. Paris 11.
<https://www.theses.fr/2003PA112202>, (9/7/2018).
- Yans J., 2008. *Investir dans le kaolin: une matière première à haute valeur ajoutée disponible en Ardenne*, http://www.rnd.be/wp-content/uploads/2013/02/Etude_kaolin.pdf, (9/2/2018).
- Zirbel C.R. et al., 2017. Plant functional traits and environmental conditions shape community assembly and ecosystem functioning during restoration. *J. Appl. Ecol.*, **54**(4), 1070–1079.

I. Webographie

- Boulvain, F., & Pingot, J.-L. (2018, Mai 30). *Une introduction à la géologie de la Wallonie*. Consulté le Juin 2018, sur geolwal: http://www.geolwal.ulg.ac.be/geolwal/geolwal.htm#LE_DEVONIEN_INFERIEUR
- DGARNE. (2010, Juin 08). *1600 - Carrière de l'Arfaye*. Consulté le Juin 2018, sur La biodiversité en Wallonie: <http://biodiversite.wallonie.be/fr/1600-carriere-de-l-arfaye.html?IDD=251660759&IDC=1881>
- DGARNE. (2010, Juin 08). *F4.11 - Landes humides à [Erica tetralix]*. Consulté le Juin 2018, sur La biodiversité en Wallonie: <http://biodiversite.wallonie.be/fr/f4-11-landes-humides-a-erica-tetralix.html?IDC=1006>
- DGARNE. (2010, Juin 08). *F4.22-Landes sèches à [Calluna] et [Genista]*. Consulté le Juin 2018, sur La biodiversité en Wallonie: <http://biodiversite.wallonie.be/fr/f4-22-landes-seches-a-calluna-et-genista.html?IDC=1385>

J. Annexes

Annexe 1 : Jeu de données relatif aux données environnementales des trois stades de Chronoséquence

Carrière	quadrats	perméabilité	densité	COT	K	Mg	Al	PH_eau	PH_KCl	Ca	P
Transinne	T-1	0,00	1,68	0,05	2,23	6,33	0,84	5,33	4,22	10,64	0,00
Transinne	T-2	0,00	1,56	0,00	0,75	6,74	0,94	5,51	4,13	7,95	0,00
Transinne	T-3	0,00	1,59	0,05	2,43	6,63	0,76	5,55	4,25	9,75	0,00
Arfaye	A-1	0,00	1,73	0,05	1,92	2,11	0,53	5,95	5,47	4,63	0,00
Arfaye	A-2	0,04	1,71	0,30	2,00	0,60	2,83	5,33	4,37	2,60	0,00
Arfaye	A-3	0,45	1,56	0,40	2,43	0,52	4,59	5,27	4,24	2,67	0,00
Haut-Fays	HF-1	0,30	0,70	2,10	7,02	3,72	19,21	4,90	3,83	24,56	1,47
Haut-Fays	HF-2	0,19	1,09	1,70	4,33	3,18	14,09	4,44	3,52	16,31	1,16
Haut-Fays	HF-3	0,27	1,05	1,85	8,58	4,51	16,46	5,51	4,44	44,12	1,77

Annexe 2 : Abondance **relative** des espèces pour chaque quadrat de chaque stade de chronoséquence

carrière	transinne	transinne	transinne	Arfaye	Arfaye	Arfaye	Haut-Fays	Haut-Fays	Haut-Fays
Quadrat	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Junc_Cong	100,00	75,00	75,00	0,00	0,00	0,00	1,52	0,00	0,00
Junc_Ten	0,00	25,00	25,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Junc_Art	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	22,73	0,00	0,00
Car_Vir	0,00	0,00	0,00	40,82	25,00	1,03	0,00	0,00	0,00
Jun_Bul	0,00	0,00	0,00	10,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mol_Cae	0,00	0,00	0,00	40,82	53,57	30,93	0,00	0,00	0,00
Cal_Vul	0,00	0,00	0,00	0,00	17,86	67,01	0,00	0,00	0,00
Drs_rot	0,00	0,00	0,00	4,08	3,57	0,00	0,00	0,00	0,00
Ped_syl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,03	0,00	0,00	0,00
Car_ech	0,00	0,00	0,00	4,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ran_flam	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	30,30	0,00	0,00
Ace_pse	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	66,67	0,00
Rub_Cae	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	33,33	0,00
Ran_rep	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	37,88	0,00	21,43
Agr_Del	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,58	0,00	71,43
Car_hir	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,14

Annexe 3: jeu de données relative aux données environnementales sur le site de l'Arfaye

Quadrats	Htot	Hres	PH_eau	PH_KCl	Mg	Al	K	Ca	Pente	hauteur	Fer
1	20,14	0,20	5,87	5,64	4,19	9,87	1,45	5,89	15,45	1	0,04
2	19,66	0,19	5,68	4,73	2,48	22,08	2,07	3,62	6,03	2	0,26
3	25,66	0,25	5,73	4,81	2,42	23,50	2,51	3,39	4,65	2	0,54
4	18,05	0,11	5,54	4,64	0,96	21,58	1,98	2,47	15,45	3	0,65
5	15,51	0,20	5,15	4,26	0,64	54,31	1,51	3,27	0,00	4	0,24
6	16,94	0,18	5,39	4,38	1,40	27,70	3,75	4,82	0,00	2	0,08
7	20,13	0,20	5,63	5,42	2,65	22,90	2,14	3,15	0,00	2	0,10
8	20,42	0,21	5,80	4,67	1,38	16,81	2,42	3,92	0,00	2	0,17
9	18,47	0,13	5,41	4,47	0,55	29,38	1,95	2,38	19,68	3	0,11
10	15,06	0,33	5,02	4,09	0,84	88,37	2,97	4,02	0,00	4	0,46
11	17,46	0,26	5,56	4,69	1,96	23,48	2,81	5,61	0,00	2	0,54
12	19,94	0,20	5,57	4,54	2,57	24,33	1,43	3,01	0,00	1	0,34
13	25,01	0,23	5,64	4,61	3,74	19,63	1,39	2,37	0,00	1	0,14
14	27,46	0,37	5,57	4,52	4,29	45,54	2,70	9,87	0,00	1	0,40
15	17,96	0,17	5,73	4,67	2,33	15,74	1,41	6,84	0,00	1	0,13
16	19,72	0,21	5,48	4,54	1,42	21,53	2,58	3,31	3,54	2	0,45
17	17,34	0,35	5,49	4,80	2,22	31,83	2,35	6,64	17,17	2	1,66
18	16,39	0,20	5,24	4,54	0,90	35,09	2,79	4,44	0,00	3	0,41
19	17,76	0,35	5,17	4,41	1,22	84,81	3,94	6,44	0,00	0	1,29
20	19,45	0,21	5,34	4,48	0,85	26,90	1,54	3,65	5,11	0	1,02
21	28,39	0,33	5,22	4,29	1,74	52,02	3,26	5,04	18,01	3	0,57
22	25,73	0,38	5,57	4,87	1,61	44,77	1,85	1,52	5,11	4	1,37
23	16,60	0,20	5,50	4,70	1,13	15,05	2,36	4,62	20,10	4	0,66
24	15,82	0,19	5,37	4,45	0,86	20,83	2,37	1,19	17,59	3	0,56
25	18,25	0,20	5,68	4,84	1,35	13,80	1,16	5,66	15,02	1	0,63
26	18,56	0,18	5,88	5,02	0,57	12,43	1,14	2,37	0,00	0	0,29
27	16,87	0,22	5,72	4,89	0,53	21,87	2,58	4,89	0,00	0	0,38
28	16,19	0,24	5,60	4,40	0,49	29,05	2,43	2,56	12,38	1	0,46
29	18,78	0,15	5,21	4,35	0,90	27,58	2,23	4,35	18,43	2	0,27
30	13,76	0,15	5,36	4,82	0,65	28,09	2,07	3,92	24,48	3	0,32

Annexe 4 : Abondance de chaque espèce au sein des quadrat (site de l'Arfaye)

Quadrats	Bet_pen.	CaI_vul	Car_ech	Car_vir	Gen_pil	Dro_rot	Mol_cae	Jun_cgl	Jun_bul	Jun_sqr	Nar_str	Dac_mac	Lyc_eur	Ped_syl	lyc_inu	Pol_ser	Pol_vul	Pot_ere	Sal_aur	Sal_cap	Sph_aur	pic_ab	jun_ten	Dan_dec
1	0	10	0	1	0	5	0	0	0	20	0	0	0	5	1	0	0	0	0	0	5	0	0	0
2	0	1	0	5	0	10	10	0	0	20	0	0	0	5	3	0	0	0	0	0	5	0	0	0
3	0	0	10	20	0	10	10	0	5	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0
4	0	5	5	0	0	1	8	0	2	25	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
5	0	40	0	0	3	2	5	0	0	0	35	0	0	5	1	2	0	1	0	0	0	0	0	0
6	1	2	0	5	0	1	20	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0
7	0	0	0	15	0	1	0	0	1	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	10	15	0	20	10	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	20	0	0	0	3	5	0	0	0	5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
10	0	60	0	0	0	0	20	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	5	0	5	0	1	10	0	1	0	5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
12	0	10	0	10	0	15	25	0	15	15	0	0	0	10	1	0	0	0	5	0	5	0	0	0
13	0	1	0	15	0	10	20	0	2	20	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	15	0	0	0
14	0	0	15	15	0	10	15	1	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	20	0	0	0
15	0	15	0	8	0	10	15	0	2	1	5	0	0	1	10	0	0	0	5	0	0	0	0	0
16	0	15	0	1	0	5	10	0	0	0	1	0	0	1	10	0	1	0	0	0	0	5	0	0
17	0	10	0	0	0	1	10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0
18	5	50	0	1	3	10	10	0	0	0	1	0	0	1	1	0	2	5	10	0	0	0	0	0
19	0	0	0	30	0	5	30	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	0	0	0	0
20	0	1	0	15	0	10	20	0	20	5	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	15	0	1	0	5	10	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
22	5	25	0	1	10	1	15	0	0	0	15	1	0	0	0	1	0	5	5	0	0	1	0	1
23	1	5	0	0	0	10	10	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
24	1	10	0	0	1	5	15	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
25	20	15	0	0	0	15	15	10	5	3	0	0	0	1	0	0	0	0	10	0	0	10	0	0
26	1	0	0	10	0	1	20	40	10	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
27	0	0	3	15	0	7	10	35	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	1	5	0	0	0	3	5	0	0	0	7	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
29	1	20	0	0	1	10	5	0	0	0	10	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0