

Projet de Fin d'Études (PFE) 2022-2023

Les blocages en action dans la restauration écologique des écosystèmes terrestres

Focus sur les effets hérités du passé

Les blocages en action dans la restauration écologique des écosystèmes terrestres

Focus sur les effets hérités du passé

Francis Isselin-Nondedeu

Laurène Dousset

Années 2022 - 2023

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'Aménagement et de l'Environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir-faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

REMERCIEMENTS

Dans un premier temps, j'aimerais remercier toute l'équipe pédagogique et administrative de Polytech'Tours pour leur bienveillance, leur encadrement et leur soutien tout au long de ces trois années.

Je souhaiterais également remercier monsieur Francis Isselin, tuteur de ce projet de fin d'études, pour avoir proposé ce sujet et avoir encadré et suivi ce travail depuis début 2022.

Merci également à Rémi D'Hérouville pour avoir débuté le travail de recherche à mes côtés en quatrième année et dont je me suis inspirée pour la rédaction de la première partie de l'introduction.

Merci enfin à ma famille, mon copain et mes amis pour le soutien sans faille.

SOMMAIRE

1. Introduction	6
1.1. La restauration écologique	6
1.2. Les effets hérités du passé	7
1.2.1. Définitions.....	7
1.2.2. Des causes naturelles et anthropiques.....	8
1.2.3. Les effets hérités du passé : changements abiotiques et biotiques de l'écosystème	9
1.2.4. Conclusion sur les effets hérités du passé	12
1.3. Problématique	12
2. Méthodologie.....	12
3. Les effets hérités du passé : impact sur la restauration écologique	13
3.1. Les débuts de la prise en compte des effets hérités du passé dans les projets de restauration	13
3.2. La restauration ne contrebalance pas tous les effets hérités du passé	13
3.2.1. L'agriculture : restaurer les anciennes terres agricoles.....	14
3.2.2. La restauration des anciennes exploitations forestières	15
3.2.3. Restaurer les exploitations minières	16
3.2.4. Restaurer les parcelles colonisées par des espèces invasives.....	17
3.2.5. Les autres utilisations des sols	17
3.2.6. Synthèse des impacts de l'utilisation des sols sur la restauration écologique.....	18
3.3. Redonner vie aux systèmes : nouvelle trajectoire et pistes d'actions pour restaurer ces écosystèmes	19
3.3.1. Réparer le vivant.....	19
3.3.2. Réparer les propriétés chimiques et physiques des sols.....	20
3.3.3. Faire le choix d'une nouvelle trajectoire	20
3.3.4. Être patient.....	23
4. Conclusion : quelles recherches pour poursuivre ?.....	24
Bibliographie.....	25

1. Introduction

Le sujet de ce projet de fin d'études s'intitule « les blocages en action dans la restauration écologique des écosystèmes terrestres ». Il est plus précisément défini dans le paragraphe qui suit :

“La restauration d'écosystèmes dégradés par les activités humaines peut s'étaler sur de nombreuses années, décennies, voire ne pas atteindre les objectifs fixés. De nombreux freins sont connus comme des conditions d'habitats qui restent défavorables, la colonisation par des espèces invasives ou l'influence des changements climatiques... Un certain nombre de leviers et solutions techniques peut être mis en place, sans toutefois lever les blocages. Parmi ces blocages, l'histoire du site à restaurer ou de son environnement proche est parfois mise en avant. En effet, les conditions écologiques qui ont prévalu sur le site ou dans son environnement pendant un temps donné, peuvent toujours impacter le fonctionnement de l'écosystème actuel, et ici en voie de restauration. L'objectif de ce travail est de faire une synthèse de ces effets de blocage hérités du passé.”

1.1. La restauration écologique

La restauration écologique est définie comme toute action intentionnelle qui initie ou accélère l'autoréparation d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit, en respectant sa santé, son intégrité et sa gestion durable (*Society for Ecological Restoration*, n.d.). Les réflexions sur la restauration arrivent dans les années 1970 avec la réalité des ressources limitées et le besoin de construire des sociétés durables. Constat est fait que de nombreux milieux sont dégradés, induisant petit à petit les questions de restauration et de recréation des écosystèmes. Il y a 20 ans déjà U.S. National Academy of Sciences (NAS) publie ainsi la définition suivante : “le retour d'un écosystème à une approximation la plus proche possible des conditions avant d'être perturbé” (NRC, 1992). Ensuite, le terme s'est rapidement transformé pour décrire le fait d'assister la nature à revenir dans cet état. Selon la revue *Ecological Engineering*, la thématique de la restauration écologique a pris une place importante dans la littérature scientifique depuis son apparition.

Restaurer un écosystème de manière efficiente implique d'en comprendre les fonctions et les rôles que joue la nature afin de ne pas les détruire et/ou de les réparer. La nature possède des capacités d'auto-organisation qui sont particulièrement complexes et très difficilement reproductibles (William J. Mitsch, 2012). Cependant, d'après certains scientifiques, plus on s'intéresse aux détails et aux interactions, plus on comprend les fonctionnements et plus il est envisageable de restaurer des écosystèmes, des sols ou des paysages (Odum et al., 1962).

La restauration d'un écosystème passe par l'élaboration d'une stratégie (Grimonprez, 2017) et notamment la définition d'un écosystème de référence comme trajectoire. Il s'agit d'une « norme », d'une « cible » vers laquelle on tente d'orienter l'écosystème à restaurer. Cette référence permet d'évaluer le succès relatif de l'opération de restauration (Floc'h & Aronson, 1995). Il est cependant illusoire de parvenir à la reproduction exacte et stable de cette référence, d'où le terme de trajectoire (Grimonprez, 2017). Les premières interventions d'un projet de restauration écologique visent à se rapprocher des conditions abiotiques de cette référence (sols, régime hydrologique...)(Cristofoli, 2010). La notion de restauration vise donc à retrouver la qualité d'un espace en tant qu'habitat pour la biodiversité. La recréation de l'écosystème peut ensuite passer par plusieurs étapes : la réintroduction d'espèces, la recréation de l'habitat naturel s'il est dégradé ou que la perturbation perdure toujours, l'amélioration de la connectivité entre les différents patchs d'habitats pour favoriser la dispersion des espèces. De nombreux indicateurs ont été élaborés pour mesurer le succès d'une restauration. On retrouve parmi eux des critères quantitatifs comme la richesse floristique et des critères qualitatifs comme l'état des sols (Cristofoli, 2010). Si certains scientifiques se focalisent sur les conditions abiotiques, d'autres chercheurs se concentrent plus sur la quantité de biomasse et d'individus présents dans un espace, ou encore sur la capacité de l'écosystème à réaliser « les fonctions essentielles » (Floc'h & Aronson, 1995). Ces réflexions tendent parfois vers le concept controversé des services

écosystémiques : des “services” que la nature “rend” aux humains (Costanza, 2012; Costanza et al., 1997). Ce concept et la diminution des ressources ont mené à une marchandisation de la nature, qui n’est pourtant pas substituable. D’un autre côté, la reconnaissance de la valeur de la nature peut servir d’argument supplémentaire pour justifier l’importance de la préserver et d’allouer des fonds aux projets (William J. Mitsch, 2012).

On parle de restauration active lorsque l’écosystème est assisté dans sa trajectoire. A l’inverse, de nombreux scientifiques se tournent aujourd’hui vers une restauration plus passive. Il semble possible d’orienter les processus naturels pour qu’ils restaurent d’eux-mêmes l’écosystème, si les forces de dégradations actuelles sont faibles ou si on les a réduits au préalable. Ainsi, le processus de restauration passive doit passer par des actions pour stopper ou réduire les dégradations avant de pouvoir laisser l’écosystème altéré retrouver ses caractéristiques initiales (Cristofoli, 2010).

La restauration semble être la clé aux problématiques de dégradation des écosystèmes et d’érosion de la biodiversité. Elle peut néanmoins connaître de nombreux freins et blocages. Un blocage est défini comme un fait empêchant le fonctionnement habituel d’un système et, ici, d’un écosystème. Parmi les blocages rencontrés dans la restauration écologique, on trouve des conditions abiotiques (Cristofoli, 2010) ou biotiques (Fattorini & Halle, 2004) défavorables ou une fragmentation des habitats trop importante, limitant la dispersion des espèces (Cristofoli, 2010). Bien souvent, ces blocages sont la conséquence d’altérations irréversibles de l’écosystème par l’activité humaine. L’idée d’un seuil d’irréversibilité, dans les modifications de l’environnement par les activités humaines, est relativement bien intégrée dans les recherches écologiques aujourd’hui (Holling, 1973; Wissel, 1984). “Même dans le cas de disparition de la cause de leur dégradation la plupart des écosystèmes ne peuvent revenir à un état antérieur, lorsqu’ils ont franchi, ne serait-ce qu’un de ces seuils, sauf en cas d’interventions volontairement réalisées pour corriger les changements qui ont conduit à ce franchissement”(Cristofoli, 2010). Parfois, la seule possibilité est de viser un nouvel usage qui s’adaptera mieux aux nouvelles conditions que celles de l’écosystème préexistant (Grimonprez, 2017). Ces altérations irréversibles sont amenées par des perturbations ayant eu lieu dans le passé et sont appelées les effets hérités du passé ou legacy effects en anglais.

1.2. Les effets hérités du passé

1.2.1. Définitions

Les effets hérités du passé sont définis de différentes manières dans la littérature scientifique. Kim Cuddington propose la définition « d’altérations physiques ou biologiques, causées par une espèce qui n’est plus présente dans le système, qui influencent l’environnement d’une autre espèce » (Figure 1). Elle inclut ces effets dans le large groupe de l’héritage écologique (Cuddington, 2011). Micheal P. Perring définit quant à lui ces effets comme « une altération dans les ressources et les conditions engendrées par l’utilisation des terres antérieure. » (Perring et al., 2016). La définition de Cuddington semble quelque peu réductrice : en effet, les effets hérités du passé ne proviennent pas uniquement d’une autre espèce.

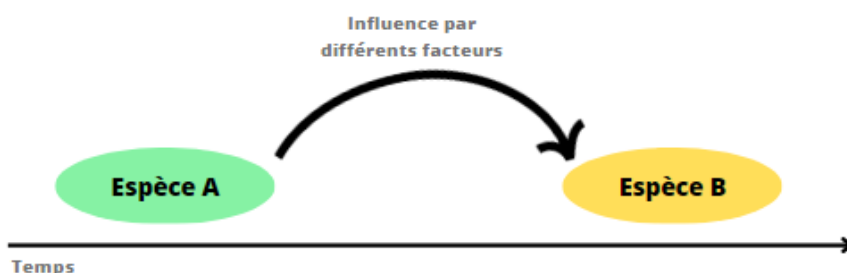


Figure 1 : les effets hérités du passé selon la définition de Kim Cuddington (2011).

Le terme “Legacy effect” a vu le jour à la fin des années 1980 ou au début des années 1990 (Cuddington, 2011). Ces effets ont commencé à être étudiés à la fin du 20^{ème} siècle, notamment avec les travaux de Foster d’une part et de Fuller d’autre part (D. R. Foster et al., 1998; Fuller et al., 1998). Ils ont servi de base scientifique pour la suite des recherches conduites au début des années 2000. Les effets hérités du passé se traduisent par les conséquences d’une perturbation sur l’écosystème, même lorsque cette perturbation est terminée. Fuller, dans son article, illustre ces effets par l’impact de l’installation des populations dans le Massachusetts. Après cet événement, les dynamiques forestières ont commencé à être modifiées par l’agriculture, le déboisement ou encore la gestion par le feu. Après l’abandonnement des terres, les espèces végétales qui se sont développées ne sont plus les mêmes que celles présentes au préalable (Fuller et al., 1998). L’étude des effets hérités du passé est cruciale et est difficilement dissociable de l’histoire écologique, c’est-à-dire de l’histoire des écosystèmes (Bürgi et al., 2017). Cette dernière permet de comprendre l’évolution des systèmes et d’interpréter leur développement au cours du temps. L’exemple des plateaux mayas peut être cité. Aujourd’hui encore, la végétation et l’écosystème complet sont encore influencés par la vie d’il y a plusieurs millénaires puisque l’érosion causée par l’agriculture ancienne a empêché la végétation de repousser. On peut encore clairement distinguer les parcelles qui étaient cultivées, même des milliers d’années après (Fuller et al., 1998).

1.2.2. Des causes naturelles et anthropiques

Les effets hérités du passé peuvent être liés à de nombreux facteurs qu’ils soient anthropiques ou naturels. La littérature scientifique s’intéresse principalement aux facteurs liés à l’activité humaine. En effet, ce sont eux qui ont les impacts les plus marqués sur les écosystèmes. Ce sont également ceux-ci que la restauration écologique tente de maîtriser et de réparer. Les facteurs entraînant ces effets peuvent être divisés en cinq sous-catégories (Figure 2).

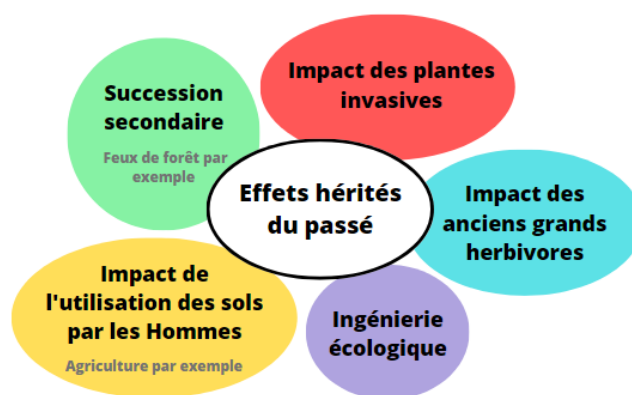


Figure 2 : schéma des cinq catégories d'effets hérités du passé
(Source : Cuddington, 2011 ; Auteur : Laurène Dousset)

De tout temps, les écosystèmes ont été modelés par des perturbations, qu’elles soient internes ou externes au système. Le principe de succession secondaire après une perturbation ou encore l’impact des anciens grands herbivores sont des effets hérités du passé qui s’imposent encore malgré l’absence de perturbation. Les facteurs naturels sont ainsi bien moins étudiés dans la littérature, notamment car ces facteurs ont toujours existé et ont constamment sculpté le paysage. Parmi eux, on peut retrouver les tempêtes, les feux de forêts ou encore les sécheresses qui sont des événements courts dans le temps mais relativement intenses. Les grands herbivores, quant à eux, ont un impact beaucoup plus longs dans le temps mais avec une faible intensité. Ils vont sculpter le paysage et la végétation et les conséquences demeurent bien après qu’ils ont quitté l’écosystème.

Succession secondaire

Si nous nous intéressons de plus près à la succession secondaire, nous pouvons nous demander pourquoi l'écosystème tend en permanence vers un même climax malgré le passage d'une tempête ou d'un feu de forêt. Les sols ont un grand rôle à jouer dans cette succession. En effet, ils possèdent des caractéristiques physico-chimiques qui leur sont propres ainsi que des microorganismes dont le développement a été influencé par l'écosystème présent auparavant. La perturbation, si elle semble importante, ne modifie pas ou peu les sols. Ainsi, l'écosystème suivra la même trajectoire pour se reconstituer tel qu'il était avant la perturbation (Cuddington, 2011).

Ingénierie écologique et espèces ingénieures

Les espèces ingénieures, tout comme les grands herbivores, entraînent des effets après leur disparition. Dans son article, Cuddington prend l'exemple du castor. Celui-ci crée des clairières pour construire des barrages. Après sa disparition, ces clairières peuvent rester pendant plus de cent ans.

Plantes invasives

Les plantes invasives, quant à elles, sont situées à la limite entre les facteurs naturels ou les facteurs anthropiques. Il s'agit généralement du résultat de l'importation par l'Homme d'une espèce qui se surdéveloppe dans l'écosystème. Il a été étudié que des écosystèmes débarrassés de plantes invasives possédaient toujours des marques de leur ancienne présence : une flore microbienne altérée et des sols modifiés plus riches en azote en sont des exemples. Ces facteurs ont été développés avec les espèces invasives et vont ainsi influencer la flore actuelle en persistant dans les sols (Cuddington, 2011).

A l'exception des espèces invasives, les facteurs naturels cités ci-dessus sont peu étudiés par rapport aux facteurs anthropiques mais ils permettent de comprendre plus en détail à quoi correspondent les effets hérités du passé et de se rendre compte qu'ils sont présents naturellement dans l'environnement qui nous entoure. Néanmoins, ce n'est pas toujours le cas. Les facteurs anthropiques sont les causes les plus étudiées dans la littérature concernant les effets hérités du passé. Ils sont regroupés sous le terme d'utilisation des sols (« human land-use » en anglais) ou d'effets d'héritage (« legacy effects »).

L'utilisation des sols fait généralement référence aux terres qui ont été converties pour l'usage de l'Homme. Cette appellation regroupe la nature de l'utilisation des sols mais également l'intensité d'utilisation, à l'inverse de l'occupation des sols qui ne possède pas la dimension d'intensité d'utilisation (Bürgi et al., 2017). Les effets hérités de l'utilisation des sols sont une sous-catégorie des effets hérités du passé. Ils sont définis comme les conditions biotiques et abiotiques engendrées par l'influence de l'histoire de l'utilisation des terres (Perring et al., 2016).

L'agriculture est l'utilisation des sols la plus étudiée dans les articles scientifiques. En effet, aujourd'hui, 38% des terres non gelées sont agricoles. Elles représentent ainsi la majeure partie des terres qui ont été abandonnées et reconverties en forêts ou en prairies aujourd'hui. On trouve également des informations sur les effets hérités de l'exploitation forestière, minière ou industrielle ; de la modification du régime naturel de perturbation (gestion par le feu par exemple) ; de la manipulation des populations animales et de l'urbanisation (Cuddington, 2011).

1.2.3. Les effets hérités du passé : changements abiotiques et biotiques de l'écosystème

Les effets hérités du passé ont pour conséquence de modifier la trajectoire de l'écosystème et parfois d'empêcher son développement optimal. Ces effets peuvent être quantifiés en comparant l'écosystème étudié à un écosystème de référence (Perring et al., 2016). La plupart des écosystèmes étudiés concernent la reconversion de terres agricoles en forêts, c'est-à-dire en leur trajectoire d'origine.

Les modifications abiotiques

L'agriculture a profondément impacté et modifié les sols au cours des siècles par l'utilisation d'engrais azotés et de pesticides mais également par les méthodes de gestion des sols (labourage) ou encore l'apparition des grandes monocultures. L'abandonnement de terres agricoles ne signifie pas que l'écosystème qui était présent auparavant va reprendre la même trajectoire. Il en va de même pour l'exploitation minière et forestière. Une étude menée sur la trajectoire des écosystèmes après l'arrêt de leur occupation montre que beaucoup mettent plus de trente ans à reprendre leur trajectoire (Jones et al., 2018) et que cela peut aller jusqu'à des siècles, voire des millénaires (Dupouey et al., 2002).

D'après une étude menée sur un ancien site gallo-romain en Lorraine, l'agriculture qui s'y est déroulée il y a deux millénaires impacte encore grandement les sols aujourd'hui. Dans les espaces qui étaient utilisés pour l'agriculture, le Ph des sols est plus élevé, tout comme la concentration en carbone, en azote, en phosphore et en $\delta^{15}\text{N}$. A l'inverse, le rapport carbone sur azote est plus faible. Dans cette étude, on constate également que les sols utilisés sont plus riches en limon et plus foncés. De même, les feuilles sont plus riches en phosphore là où se déroulait l'agriculture (Dupouey et al., 2002). Foster émet un constat similaire concernant les anciens sols agricoles. Des modifications chimiques et physiques y persistent à cause de l'agriculture, de la gestion par le feu ou du pâturage. Cependant, selon ses recherches, le fait de labourer les sols les appauvrit en carbone et en azote sur 10 à 30 centimètres, ce qui peut durer sur plusieurs centaines d'années. Les cycles de l'azote et du carbone sont modifiés. Les impacts varient selon les amendements utilisés pour les sols, le type d'agriculture et la durée d'exploitation. Plus l'exploitation est longue et intense, plus les effets vont être persistants dans le système (D. Foster et al., 2003).

Par ailleurs, ces résultats ne sont pas valables uniquement pour l'agriculture. Bien que l'exploitation forestière et l'exploitation minière soient bien moins documentées dans la littérature scientifique, plusieurs articles ont permis d'étudier l'évolution des sols après abandon des activités. On constate ainsi que ces deux types d'exploitations ont un impact important sur le sol : elles modifient les concentrations en carbone et en azote. Celles-ci mettent plus de trente ans à revenir à la normale, ce qui est un temps relativement élevé comparé à d'autres perturbations telles qu'une tempête (Moreno-Mateos et al., 2017).

Des impacts sur les facteurs biotiques

Les effets hérités du passé peuvent avoir de nombreuses conséquences sur le développement des éléments biotiques de l'écosystème.

Les facteurs qui ont été recensés sont notamment des modifications dans la faune et la flore, des modifications génétiques, des altérations dans la dynamique des populations, des variations de croissance des végétaux et des modifications dans la banque de graine des sols. Des études se penchent également sur la modification des microorganismes du sol (bactéries, champignons...) (Turley et al., 2020).

De nombreuses études se sont intéressées à la comparaison de l'écosystème avant agriculture et après abandonnement des terres. On retrouve par exemple des études comparant des forêts anciennes avec des jeunes forêts (âge inférieur à 70 ans) ayant supporté de l'agriculture. Toutes ces études obtiennent des résultats similaires : une flore modifiée avec des répartitions différentes des espèces, une baisse de la diversité spécifique et une modification des abondances. Par exemple, l'étude du site gallo-romain sur un plateau lorrain a révélé que certaines espèces n'étaient présentes que sur les espaces qui n'ont jamais été cultivés alors que d'autres ne se développaient que sur les anciennes terres agricoles. Bien que l'agriculture remonte à deux mille ans, on remarque encore des différences dans la répartition des espèces (Dupouey et al., 2002).

On arrive aux mêmes conclusions en étudiant les forêts de pins sylvestres du sud des Etats-Unis. Les sols sont profondément modifiés, ce qui entraîne des changements dans la flore, notamment en sous-bois. On observe une diminution de l'indice de Simpson dans les anciennes terres agricoles (comparées aux terres vierges) ainsi qu'une altération de la composition du sous-bois en espèces végétales. De plus, certaines espèces ne sont présentes que sur des sites vierges et d'autres que sur des sites post-agriculturels (Brudvig et al., 2021). C'est également ce qu'a montré l'étude de Flinn et Vellend en 2005. Ils se sont intéressés au développement des jeunes forêts d'Europe et du Nord-Américain qui ont au préalable été utilisées pour l'agriculture. Ils ont comparé ces jeunes forêts aux forêts anciennes et ont constaté que le sous-bois avait une diversité spécifique moins riche et une biodiversité dégradée. De plus, ils ont remarqué une faible capacité de dispersion chez les espèces présentes et ont posé l'hypothèse qu'un effet hérité des anciennes terres agricoles pourrait être la modification de la capacité de dispersion chez les espèces (augmentation ou diminution en fonction de l'espèce) (Flinn & Vellend, 2005).

Une des grandes notions à prendre en compte lors d'une perturbation dans un écosystème est la dette d'extinction et le crédit d'immigration. La dette d'extinction a lieu lorsque les conditions de vie d'une espèce ne sont plus réunies pour permettre à celle-ci de survivre sur un territoire. Cette espèce est donc vouée à s'éteindre sur ce territoire dans un certain laps de temps. La dette d'extinction correspond ainsi au nombre d'espèces qui sont amenées à s'éteindre lorsque les conditions d'un écosystème changent. A l'inverse, le crédit d'espèce ou crédit d'immigration correspond au nombre d'espèces qui vont éventuellement bénéficier d'un changement positif dans l'écosystème (la régénération d'une forêt par exemple) (Lira et al., 2012). Lorsqu'un espace anciennement utilisé par l'Homme est laissé à l'abandon, les conditions changent et celui-ci subit une dette d'extinction et un crédit d'immigration. Cependant, une étude a montré que les anciennes terres agricoles possédaient un taux de croissance négatif, c'est-à-dire que la dette d'extinction est plus forte que le crédit d'immigration dans ces espaces (Kuussaari et al., 2009). Cela peut être un indicateur que l'écosystème n'a pas repris sa forme d'origine et est toujours impacté par des effets hérités de l'ancienne utilisation des terres.

Les exploitations minières et forestières ont également un impact fort sur la biodiversité des années après l'abandonnement des terres. Une étude a montré que l'abondance et la diversité des espèces étaient diminuées lorsque les terres avaient été utilisées pour l'exploitation minière ou forestière et que les écosystèmes mettaient au moins trente ans à revenir à son état d'avant perturbation. L'étude n'allant pas au-delà de trente ans, nous ne savons pas combien de temps il faut à l'écosystème pour se remettre de cette perturbation (Moreno-Mateos et al., 2017).

Enfin, la colonisation d'un écosystème par des plantes invasives entraîne également une modification des sols. Une fois que celles-ci sont retirées, on a pu constater qu'elles avaient modifié durablement la flore microbienne et la banque de graine présente dans les sols et que les taux d'azote étaient bien supérieurs à ceux d'avant perturbation. Cela a pour impact d'influencer la flore qui va suivre. On obtient ainsi des écosystèmes qui sont plus fragiles avec une flore qui s'implante moins facilement et risque d'être remplacée par une nouvelle espèce invasive (Cuddington, 2011).

Ces modifications de l'écosystème sont également persistantes en cas de perturbation naturelle : après plusieurs épisodes de perturbations (incendies, ouragans...), les patterns sont encore définis par l'ancienne utilisation des terres et non pas par les perturbations, ce qui peut rendre les écosystèmes vulnérables. Les sols sont en cause car les modifications les impactent finalement peu et les végétaux reviennent par la germination de la banque de graine présente dans les sols (D. Foster et al., 2003).

1.2.4. Conclusion sur les effets hérités du passé

Les effets hérités du passé sont entraînés par des perturbations d'origine naturelle ou anthropique. Les perturbations naturelles ont toujours existé dans l'environnement, sculptant les écosystèmes. En revanche, les perturbations anthropiques comme l'agriculture, l'exploitation minière et l'exploitation forestière se sont accentuées au cours des derniers siècles jusqu'à complètement modifier le régime de perturbations interne à l'écosystème ainsi que ses propriétés biotiques et abiotiques. Malgré l'arrêt de ces perturbations, leurs effets sur les sols et sur la végétation restent présents plusieurs dizaines, centaines voire milliers d'années, donnant une nouvelle trajectoire à l'écosystème. Ces effets entraînent ainsi une baisse de richesse spécifique, de la diversité spécifique et de l'abondance. On obtient des écosystèmes moins riches qui seront donc, malgré l'abandon des pratiques, toujours dégradés et vulnérables aux perturbations d'origine naturelle (Figure 3).



Figure 3 : schéma récapitulatif des effets hérités de l'utilisation des sols les plus répandus

1.3. Problématique

Dans la mesure où les effets hérités du passé peuvent impacter les écosystèmes pendant des dizaines, centaines voire milliers d'années, ce projet de fin d'études aura pour objectif d'effectuer une revue des conflits existant entre les effets hérités de l'utilisation des sols et la restauration écologique et de présenter des pistes d'actions pour rendre l'écosystème viable et stable à nouveau. Les recherches seront focalisées ici sur les écosystèmes terrestres. Ces derniers peuvent être de six types différents : les forêts tropicales, tempérées ou boréales, les déserts, les prairies et les toundras.

2. Méthodologie

La première phase de ce projet de fin d'études repose sur la lecture d'articles scientifiques. Les premières recherches ont été effectuées sur google scholar et cairn, avec différents mots-clés : « *Legacy effects* », « *ecological restoration* » et « *landuse effects* » en anglais, et « *restauration écologique* » et « *effets hérités du passé* » en français. Les articles récoltés étaient rédigés en anglais majoritairement ainsi que quelques-uns en français. Cependant, la littérature rédigée en français reste très pauvre sur ce sujet d'étude. Les recherches se sont tout d'abord axées sur des articles traitant de la restauration écologique et ses freins puis sur les effets hérités du passé. La bibliographie des articles scientifiques récoltés a été étudiée afin de trouver d'autres pistes intéressantes pour ces recherches.

La seconde phase de ce projet repose également sur de la lecture scientifique mais en croisant cette fois-ci les effets hérités du passé avec la restauration écologique afin d'effectuer une synthèse des études menées sur les impacts des effets hérités du passé sur la restauration écologique et de mettre en valeur les manques ainsi que les pistes à étudier. Les mots-clés utilisés sont « *land use effects restoration* », « *legacy effects restoration* », « *land use legacies restoration* », « *legacy restoration* » et « *legacies restoration* ». La lecture des abstracts a permis de sélectionner les articles cohérents avec le sujet d'études. Ensuite, la bibliographie des articles lus a été étudiée pour enrichir la recherche. Enfin, des recherches supplémentaires ont été effectuées sur google scholar pour trouver plus d'informations sur l'exploitation minière et l'exploitation forestière avec les mots-clés suivants : « *restoring topography* »

mines », « *logging restoration* », « *mining legacies* ». Au total, 36 articles ont été analysés pour étudier les impacts des effets hérités du passé sur la restauration écologique.

3. Les effets hérités du passé : impact sur la restauration écologique

3.1. Les débuts de la prise en compte des effets hérités du passé dans les projets de restauration

Bien que le début des travaux de Foster & al. et Fuller & al. (D. R. Foster et al., 1998; Fuller et al., 1998) datent de la fin du 20^{ème} siècle, peu d'intérêt a été porté à l'impact des effets hérités du passé sur les projets de restauration écologique avant le début des années 2010. En effet, comme le souligne Lars A. Brudvig en 2011, seuls 4% des articles scientifiques en lien avec un projet de restauration écologique mentionnent les effets hérités du passé (Brudvig, 2011). Cette constatation est également mise en avant par Suding. D'après ses études, beaucoup de projets de restauration écologique échouent lorsque les sols et les caractéristiques physiques ont été changées et que la colonisation par les espèces souhaitées n'est plus possible (Suding, 2011). C'est malheureusement le cas des écosystèmes ayant connu l'agriculture, l'exploitation minière ou toute autre exploitation humaine pendant une longue période. Elle affirme également que le sujet des effets hérités du passé nécessite plus d'approfondissement et qu'à l'heure actuelle, soit en 2011, très peu de solutions sont connues pour atténuer ces effets et amener l'écosystème vers une restauration réussie.

Ces propos restent à nuancer. Dès le milieu des années 2000, de nombreuses études commencent à s'intéresser à l'impact des effets hérités du passé sur la restauration écologique (Cramer et al., 2008; Flinn & Vellend, 2005). En effet, constat est fait que certains écosystèmes, anciennement travaillés par l'Homme, ne se restaurent pas avec la trajectoire souhaitée. Ces articles s'intéressent principalement aux terres agricoles abandonnées, notamment à cause de la déprise agricole très importante depuis le 20^{ème} siècle (Figure 4). Ainsi, les effets hérités des anciennes utilisations des terres ont bel et bien un impact sur la restauration écologique. Au total, les publications scientifiques sur le sujet sont passées d'une par an en 1994 à 30 chaque année entre 2018 et 2020 (Garbarino & Weisberg, 2020), ce qui témoigne de l'importance des effets hérités de l'utilisation des sols sur la restauration des écosystèmes.

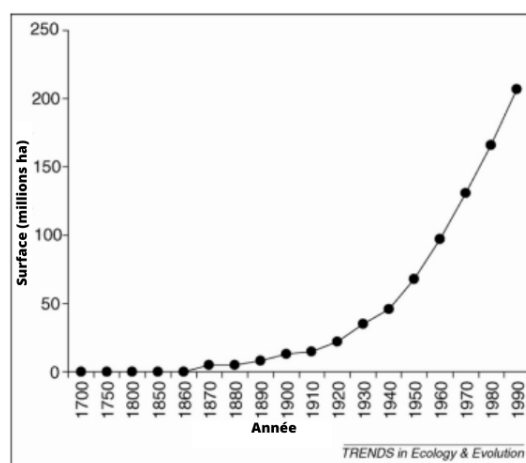


Figure 4 : Surface de terres abandonnées, en millions d'hectares, depuis 1700 (Cramer et al., 2008)

3.2. La restauration ne contrebalance pas tous les effets hérités du passé

L'utilisation des sols par les Hommes a laissé de profondes modifications dans les écosystèmes. D'après la revue de littérature de Cramer et al parue en 2008, il existe deux seuils de dégradation principaux : le seuil biotique et le seuil abiotique (Figure 5). Le seuil biotique est dépassé lorsque la banque de graine présente dans les sols n'est plus suffisante pour permettre à la végétation indigène de recoloniser l'écosystème et que la dispersion ne peut plus se faire, par manque de proximité avec d'autres écosystèmes semblables à l'écosystème d'origine. Le seuil abiotique est lui dépassé lorsque les propriétés physico-chimiques des sols et les flux hydriques vont être modifiés. Ces seuils ont notamment été étudiés dans le cadre de la restauration des anciennes terres agricoles en reconversion (Cramer et al., 2008). Une fois que l'un d'eux est franchi, la

restauration passive n'est plus possible et une intervention extérieure est requise pour permettre à l'écosystème de retrouver un état non dégradé. C'est ce que nous allons voir par la suite.

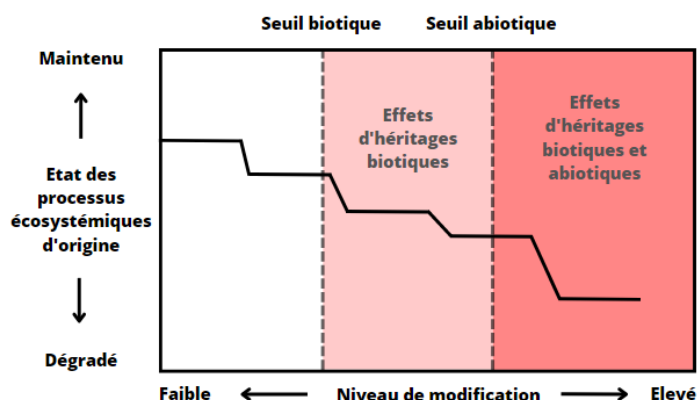


Figure 5 : Etat des processus écosystémiques en fonction du niveau de modification de l'écosystème : les seuils biotiques et abiotiques (Cramer et al., 2008), adapté et traduit par Laurène Dousset

3.2.1. L'agriculture : restaurer les anciennes terres agricoles

Effets de l'agriculture intensive sur les écosystèmes

Les effets de l'agriculture sur les sols dépendent de deux facteurs principaux : l'intensité et la durée d'exploitation. L'agriculture traditionnelle mise en place depuis des millénaires modifie les propriétés de l'écosystème et des effets hérités du passé sont visibles des siècles, voire des millénaires après abandonnement des terres (Fuller et al., 1998). Cependant, l'écosystème retrouve ses fonctions biogéochimiques. En revanche, l'agriculture intensive, la mécanisation, la monoculture et la modification profonde des sols dans un but de rentabilité ont complètement modifié les propriétés de base des écosystèmes présents auparavant. Dans la plupart des cas, le seuil biotique a été dépassé. Le remplacement de la flore indigène par des hectares de monocultures pendant plusieurs décennies a appauvri la banque de graines des sols et la dispersion ne peut plus se faire à cause d'une matrice paysagère fragmentée (Standish et al., 2007). D'autre part, les anciennes terres agricoles ont parfois dépassé le seuil abiotique : les propriétés des sols sont modifiées, ce qui ne permettra pas aux espèces indigènes de recoloniser ce milieu. A cela s'ajoutent les espèces exotiques, introduites par la main de l'Homme ou qui ont profité de la modification de l'écosystème pour s'installer. Celles-ci, mieux adaptées aux propriétés du milieu, vont se développer et entrer en compétition avec les espèces indigènes. Les écosystèmes peu propices à l'agriculture, comme les zones désertiques avec des sols très pauvres, sont les plus impactés par une agriculture intensive. En effet, ils vont devoir être profondément modifiés pour permettre cette agriculture et leur abandon va les laisser dans cet état de modification, ce qui ne permettra pas aux espèces indigènes vivant dans des milieux très contraints et limités en ressources de s'installer. (Cramer et al., 2008).

La restauration des terres agricoles abandonnées

Il est difficile de restaurer les anciennes terres agricoles de manière passive (Cramer et al., 2008; Price et al., 2021). En effet, l'arrêt de la perturbation (agriculture) ne permet pas l'arrêt des modifications du sol. Ainsi, sans restauration active, ces écosystèmes risquent de peu contribuer aux services écosystémiques ou à la biodiversité et de rester dans un état stable mais dégradé (Cramer et al., 2008).

Les résultats de la restauration des anciennes terres agricoles restent très aléatoires. La conclusion prédominante est que la restauration ne contrebalance pas, ou pas entièrement, les effets hérités du passé, notamment sur les sols. Si elle améliore parfois leur qualité (Raiesi & Salek-Gilani, 2020), il est fréquent que les sols restent profondément modifiés malgré les actions de restauration (Brudvig et al., 2021). D'après une

étude conduite en 2017 sur les effets hérités de l'agriculture, l'exploitation forestière et l'exploitation minière, les terres agricoles sont celles qui se rétablissent le moins bien. Les sols restent endommagés malgré les actions de restauration. On obtient ainsi des taux de carbone aérien et sous-terrain, d'azote et de phosphore qui restent en dessous des attentes (Figure 7). Dans cette étude, au total, les deux tiers des anciennes terres agricoles sont restaurées de manière passive, pour un tiers de manière active (Meli et al., 2017). D'autre part, les anciennes parcelles qui ont connu des amendements azotés vont être polluées pendant des dizaines d'années. L'azote qui s'est enfoncé dans les sols au fur et à mesure va petit à petit remonter à la surface et modifier les propriétés des sols. La restauration écologique ne peut pas contrebalancer ces effets et les sols modifiés vont empêcher l'écosystème de retourner vers sa trajectoire historique. Enfin, les anciennes cultures ont des sols plus riches en bactéries et moins riches en champignons, malgré les actions de restauration. Les bactéries sont des microorganismes que l'on retrouve dans les écosystèmes instables et perturbés (stratégie r) tandis que les champignons, de stratégie K, sont plus présents dans les écosystèmes stables et peu perturbés. (Turley et al., 2020). Les microorganismes participent au bon développement de la flore et, à l'inverse, la flore va favoriser les microorganismes des sols. Pour retrouver des microorganismes de stratégie K en majorité (champignons), l'écosystème doit retrouver un certain équilibre naturel et les sols ne doivent pas subir de perturbations trop fréquentes. Cela peut prendre de nombreuses années et ne pas revenir à l'état attendu.

Les anciennes terres agricoles ayant fait l'objet de projets de restauration présentent également des différences de composition végétale avec l'écosystème de référence, ainsi qu'une diversité phylogénétique et une richesse spécifique plus faible (Turley & Brudvig, 2016). Il n'est toutefois pas rare de retrouver une abondance spécifique identique à l'écosystème de référence (Meli et al., 2017). La banque de graine peut être présente dans les sols pendant des dizaines d'années. Cependant, il arrive un moment où ces graines meurent ou entrent en dormance. La dormance des graines peut être inversée en mettant en place une perturbation de manière artificielle (incendie par exemple) mais la mort de la banque de graines indigènes ne peut pas être inversée. Les sols vont être composés de graines de plantes exotiques, importées par l'Homme, et qui, malgré les opérations de restauration, vont croître et entrer en compétition avec les espèces indigènes. La réussite de la restauration va ainsi être déterminée par la compétitivité des espèces (Cramer et al., 2008). Si les espèces exotiques sont plus compétitives que les espèces indigènes, la restauration du milieu sera difficile.

La faune des écosystèmes est pour beaucoup déterminée par la végétation : elle constitue un abri et une source de nourriture pour les espèces animales. Peu d'études s'intéressent au retour de la faune sur les écosystèmes impactés par des effets hérités du passé. Cependant, une étude visant les pollinisateurs a établi que si la restauration influence la quantité de pollinisateurs présents sur les anciennes cultures, les effets hérités du passé n'impactent pas leur diversité ou la composition de leurs communautés (Brelund et al., 2018). Ces résultats soulignent clairement que les effets hérités du passé limitent la restauration écologique des agrosystèmes et que, malgré une abondance spécifique semblable aux écosystèmes cibles historiques, les compositions végétales et les sols restent impactés.

3.2.2. La restauration des anciennes exploitations forestières

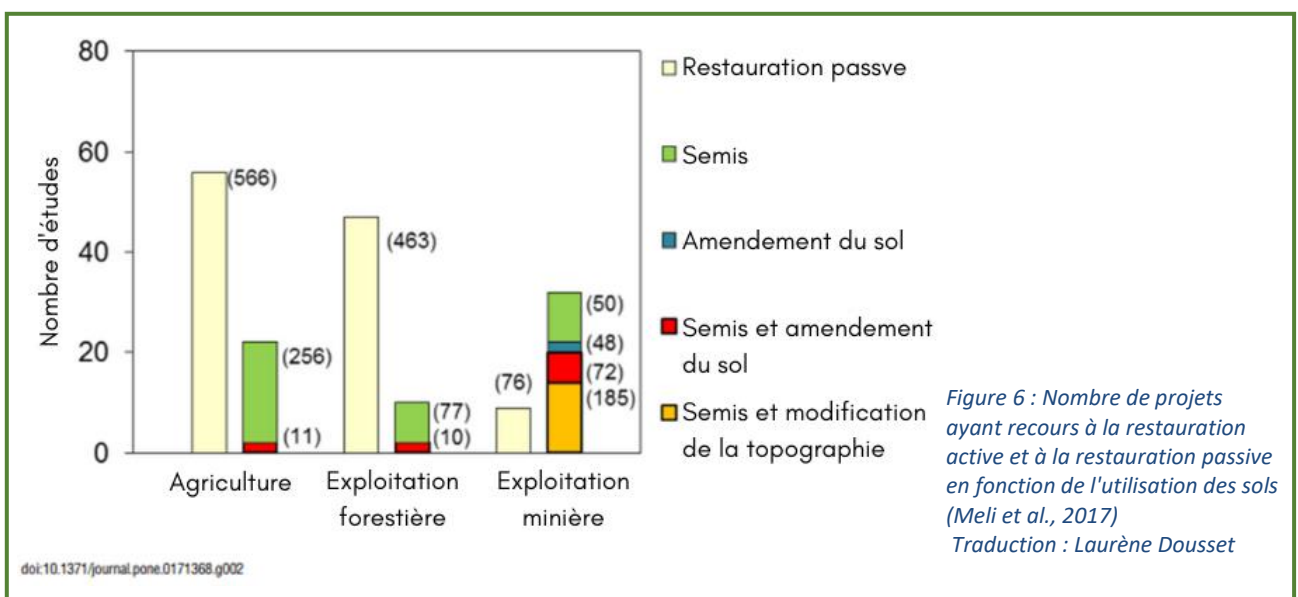
D'après l'étude de Meli et al, les sites anciennement sous exploitation forestière sont principalement restaurés de manière passive. En effet, sur 550 restaurations, 463 ont été effectuées de manière passive et seulement 87 de manière active (Figure 6). Les écosystèmes étaient tous dans le même état de dégradation au début des projets de restauration et pour l'exploitation forestière, la restauration active n'a pas donné de meilleurs résultats que la restauration passive. Globalement, les sites anciennement exploités pour leur bois ont montré un rétablissement rapide en termes d'abondance, de diversité et de fonctions biogéochimiques (Meli et al., 2017). Cependant, on peut noter que les caractéristiques des sols restent dégradées par rapport à l'écosystème de référence. Les quantités de carbone aérien et souterrain ainsi que la quantité d'azote sont plus faibles sur les sites exploités que sur les sites vierges, montrant une perturbation des cycles du carbone

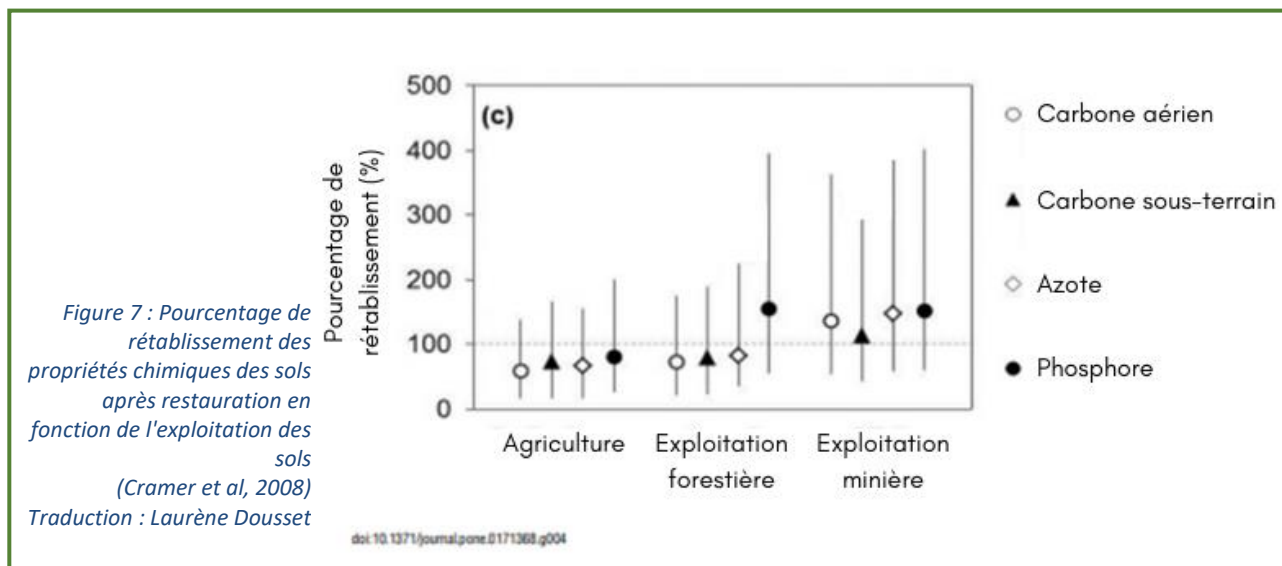
et de l'azote. Cette perturbation a été mise en évidence sur le cycle de l'azote par Foster en 2003 (D. Foster et al., 2003). Les modifications de ces cycles empêchent l'implantation des végétaux indigènes. D'autre part, une étude a montré que, bien que la diversité et la richesse spécifique étaient stables, la composition des communautés d'espèces arborées était toujours différente de celles des parcelles non exploitées, qu'il y ait eu une restauration ou non (Hayward et al., 2021). Comme pour l'agriculture, l'intensité de l'exploitation forestière joue un rôle important dans la restauration des sites : plus l'écosystème a été perturbé, plus ses caractéristiques seront différentes et plus celles-ci perdureront dans le temps (Belote et al., 2012).

3.2.3. Restaurer les exploitations minières

Les anciennes exploitations minières requièrent plus d'attention que les anciennes exploitations forestières. En effet, à l'inverse de ces dernières, plus des trois quart des anciens sites d'exploitation minière sont restaurés de manière active d'après l'étude de Meli et al. Différentes méthodes sont utilisées : le semis, l'amendement des sols, la modification de la topographie ou un combiné de plusieurs méthodes. Après une perturbation minière, contrairement à une perturbation agricole, les sols de surface sont absents et doivent être « recréés », ce qui, en temps normal, prend des milliers d'années. La recréation de la topographie et des sols présents avant l'utilisation des terres est nécessaire à l'établissement d'un écosystème viable (Macdonald et al., 2015). La restauration active est indispensable pour remodeler les sols et leur redonner des propriétés biologiques, physiques et chimiques semblables aux sols historiques.

Les méthodes de restauration semblent avoir montré leurs preuves puisque les anciens sites d'exploitation minière retrouvent généralement un état proche de l'écosystème de référence visé. Les sols retrouvent leurs caractéristiques biogéochimiques (Figure 7) et une diversité et une abondance spécifique proches de celles de l'écosystème historique (Meli et al., 2017). Cependant, même après trente-cinq ans de restauration, les communautés végétales sont encore différentes de celles présentes à l'origine et les systèmes restaurés sont plus pauvres en espèces rares, ce qui interroge sur la valeur de la restauration au regard de ces espèces (Holl, 2002). De plus, les sols qui ont été perturbés récemment sont plus riches en microorganismes de stratégie r (bactéries) tandis que les sols non perturbés sont plus riches en champignons (stratégies K) (Macdonald et al., 2015). La restauration ne permet pas de développer des espèces de stratégies K de manière rapide et plusieurs dizaines voire centaines d'années supplémentaires seront nécessaires pour développer ces espèces à nouveau.





3.2.4. Restaurer les parcelles colonisées par des espèces invasives

Les milieux ayant été envahis par des espèces invasives font également l'objet de projet de restauration. En effet, l'Homme a participé à la dégradation de ces écosystèmes en important ces espèces. Il se sent ainsi responsable de la leur restauration.

Les espèces invasives peuvent modifier les caractéristiques biologiques, chimiques et physiques des sols, freinant ainsi la restauration. Elles vont augmenter le taux d'azote dans les sols en fixant le diazote et en produisant une litière riche en azote qui va persister même lorsqu'on les retire. La décomposition de la plante et des racines lors des actions de restauration va également contribuer à conserver un taux d'azote élevé. Lorsque les espèces indigènes sont habituées à des sols pauvres en azote, se retrouver dans un sol riche peut affecter leur germination, leur croissance et favoriser les espèces envahissantes nitrophiles qui sont plus compétitives dans des milieux riches en azote. Elles vont se développer plus rapidement et limiter la croissance des espèces indigènes. Une nouvelle invasion par l'espèce envahissante est également possible à cause des graines présentes dans les sols et des racines laissées sur place à la suite du projet de restauration. Cette nouvelle invasion est d'autant plus probable que les sols sont appauvris en graines de plantes indigènes. Enfin, les plantes invasives vont altérer la composition, la diversité et la fonction des communautés microbiennes des sols en introduisant de nouveaux microorganismes ou en relâchant des composés chimiques modifiant la flore microbienne. Les mycorhizes et les symbioses vont être interrompues par l'espèce invasive, ce qui peut également empêcher la germination et la croissance des espèces indigènes (Nsikani et al., 2018). La restauration passive n'est généralement pas possible dans ces systèmes : retirer les plantes invasives et attendre l'évolution de l'écosystème peut fonctionner dans certains cas mais va souvent entraîner un échec de la restauration. La restauration active est également souvent vouée à l'échec ou à un processus de succession secondaire extrêmement lent car tous les effets hérités des espèces invasives n'ont pas été contrebalancés. Les espèces indigènes ne peuvent ainsi pas recoloniser le milieu. (Corbin & D'Antonio, 2012)

3.2.5. Les autres utilisations des sols

Les restaurations des sols ayant subi d'autres utilisations telles que l'urbanisation ou encore les friches industrielles sont très peu documentées dans la littérature (Ziter et al., 2017). Une des raisons peut être que peu de milieux urbains ont jusqu'à présent été abandonnés et restaurés. On retrouve principalement ce cas pour des villages de campagnes avec l'exode rural mais la restauration écologique de ces milieux sera principalement classée comme agricole. D'autre part, les friches industrielles sont également peu

documentées pour des projets de restauration écologique. Une des causes peut être que celles-ci sont en bordure de ville et ainsi réhabilitées pour d'autres fonctions, utiles à la ville (création de logements, de commerces...) et très peu pour réintroduire des espaces naturels. Elles sont également minoritaires par rapport aux espaces agricoles abandonnés.

3.2.6. Synthèse des impacts de l'utilisation des sols sur la restauration écologique

Grâce aux informations obtenues auparavant, on peut en conclure un tableau récapitulant les principales modifications des écosystèmes persistantes après restauration écologique (Tableau 1).

Tableau 1 : Principales modifications de l'écosystème persistant après restauration écologique. Sources : Cramer et al., 2008 ; Standish et al., 2007 ; Price et al., 2021 ; Raiesi & Salek-Gilani, 2020 ; Brudvig et al., 2021 ; Meli et al., 2017 ; Turley et al., 2020 ; Turley & Brudvig, 2016 ; Hayward et al., 2021 ; D. Foster et al., 2003 ; Belote et al., 2012 ; Macdonald et al., 2015 ; Holl, 2002 ; Nsikani et al., 2018 ; Corbin & D'Antonio, 2012

	Modification chimique des sols (C, N, P)	Modification de la banque de graine	Modification de la composition végétale	Réduction de l'abondance	Modification de la diversité végétale	Modification de la richesse spécifique	Modification des micro-organismes des sols	Modification de la diversité phylogénétique
Agriculture	Oui	Oui	Oui	Parfois	Parfois	Oui	Oui	Oui
Exploitation forestière	Parfois	Oui	Oui	Parfois	Parfois	Non relevé	Oui	Non relevé
Exploitation minière	Parfois	Oui	Oui	Parfois	Parfois	Non relevé	Oui	Non relevé
Espèces invasives	Oui	Oui	Oui	Non relevé	Non relevé	Non relevé	Oui	Non relevé

On peut également synthétiser les principaux facteurs qui empêchent la restauration. La plupart des conséquences que l'on observe sont engendrées soit par la modification des conditions chimiques et physiques des sols, soit par la modification de la banque de graine et sont amplifiées par le changement des microorganismes des sols (Figure 8).

Les blocages à la restauration écologiques	Conditions chimiques et physiques des sols modifiées	- Favorise les espèces exotiques adaptées aux conditions actuelles - Limite la germination et la croissance des espèces indigènes - Développement d'espèces plus compétitives que les espèces indigènes pour ce milieu
	Modification de la banque de graines	- Constituée de graines de plantes exotiques en majorité - Dispersion des plantes indigènes limitée
	Modification des microorganismes des sols	- Rupture des symbioses et mutualismes avec les plantes indigènes - Développement de microorganismes de milieux perturbés favorisant les espèces exotiques

Figure 8 : Principaux facteurs expliquant les échecs de projets de restauration

Aujourd'hui, il n'existe pas de moyen fiable pour prédire la trajectoire d'un écosystème ayant été fortement modelé par les Hommes. Si les projets de restauration aboutissent généralement à un écosystème viable, stable avec une biodiversité comparable à l'écosystème de référence, peu de projets témoignent d'une réussite totale lorsque des effets hérités du passé sont impliqués. Ces effets sont bien identifiés dans la communauté scientifique mais aucune solution réellement efficace n'a encore été trouvée pour les contrebalancer, que l'on parle d'exploitation minière, forestière ou agricole (Hayward et al., 2021; Price et al., 2021; Suding, 2011; Turley et al., 2020; Turley & Brudvig, 2016). Cependant, il existe aujourd'hui des méthodes qui, si elles ne sont pas fiables à 100%, permettent tout de même d'améliorer l'état de l'écosystème.

3.3. Redonner vie aux systèmes : nouvelle trajectoire et pistes d'actions pour restaurer ces écosystèmes

3.3.1. Réparer le vivant

Lorsque seul le filtre biotique est dépassé, il existe plusieurs actions qui peuvent être mises en place pour restaurer la matrice végétale et par conséquent la faune.

Réparer la banque de graine

Le semis est une des méthodes les plus utilisées pour réparer la banque de graine. Lorsque l'exploitation agricole a perduré trop longtemps, les graines présentes dans les sols ne sont plus viables et elles ne peuvent pas repousser. Le semis de graines indigènes va permettre au restaurateur de favoriser les espèces qu'il veut mettre en avant, comme les espèces de début de succession par exemple. Il convient également de favoriser les espèces phylogénétiquement différentes de celles présentes pour favoriser la diversité (Turley & Brudvig, 2016). Etablir des plantes nurses avant ou en même temps que les graines indigènes peut également aider ces dernières à croître (Nsikani et al., 2018)

Retirer les espèces exotiques

Une deuxième action régulièrement mise en place en parallèle du semis est la gestion des espèces exotiques. En effet, sans forcément parler d'espèces invasives, les espèces qui ont été favorisées pendant l'utilisation de l'Homme vont avoir tendance à repousser car le milieu leur est maintenant favorable. D'autre part, leur présence en grande quantité a tendance à maintenir des sols défavorables pour les espèces indigènes. Ainsi, réduire leur abondance va permettre aux espèces indigènes de recoloniser le milieu plus rapidement (Standish et al., 2007). Cela peut se faire par pâturage, fauchage, désherbage manuel ou utilisation d'herbicide et graminicide. La méthode est à adapter en fonction de la taille de la parcelle, des moyens et de la sensibilité de l'environnement entre autres (Nsikani et al., 2018).

Remettre en place un système de perturbations pour sortir les graines de leur dormance

Parfois, la banque de graine est encore viable mais est en dormance. La remise en place du système de perturbation présent historiquement va permettre de sortir les graines de leur dormance et de recoloniser le milieu. Le système de perturbation remis en place le plus souvent est la gestion par le feu. Il était fréquemment utilisé avant l'agriculture et a permis de développer certains écosystèmes atypiques. Il faut cependant faire attention à la période de l'année où l'on choisit de remettre cette perturbation. Des feux en été vont permettre de réduire l'abondance des espèces exotiques alors qu'ils vont l'augmenter en automne et avoir peu d'effet en hiver (Price et al., 2021). Cette méthode peut également être utilisée par brûlis successifs sur les sites colonisés par des espèces invasives. Elle va permettre de sortir les graines de leur dormance et de les retirer par la suite (Nsikani et al., 2018).

S'intéresser à la matrice paysagère : favoriser la dispersion

La matrice paysagère est l'un des principaux facteurs influençant la réussite d'une restauration. Si la matrice est complètement fragmentée, la dispersion des espèces ne se fera pas, ou mal, et la probabilité qu'elles recolonisent le milieu est faible. C'est souvent le cas par exemple dans les anciennes grandes cultures intensives : les bordures sont proches d'un autre écosystème. En revanche, dès que l'on s'en éloigne, les espèces ont beaucoup plus de mal à recoloniser le milieu. Ainsi, il faut s'intéresser à la matrice paysagère pour restaurer les écosystèmes et éventuellement mettre en place des îlots de biodiversité au sein de l'écosystème à restaurer, qui pourront par la suite être un lieu de dispersion de graine pour le reste de l'écosystème. Cette solution est proposée de manière à optimiser les fonds prévus pour le projet (Holl & Aide, 2011).

Eclaircir la couche arborée

Eclaircir la couche arborée va permettre aux espèces herbacées et arbustives de se développer. Cette méthode peut être utilisée sur les anciennes exploitations forestières pour changer les communautés végétales et favoriser une forte diversité d'herbacées puis d'arbustes. Cette méthode va créer de la diversité végétale et, avec la succession secondaire, va petit à petit orienter l'écosystème vers une autre trajectoire (Cramer et al., 2008).

Solariser ou bâcher les sols

Cette méthode va permettre de conserver la chaleur émise par le soleil, à la manière d'un effet de serre, et de se débarrasser des plantes invasives ou exotiques. Elle est particulièrement adaptée aux petites parcelles (Nsikani et al., 2018).

3.3.2. Réparer les propriétés chimiques et physiques des sols

Réparer la topographie

Dans le cas de la restauration des anciennes mines, la restauration du milieu passe par la restauration de la topographie. Les sols ayant été complètement détruits, ils doivent être rétablis pour restaurer l'écosystème. Il faut prendre en compte le type de sol, son emplacement et sa disposition, sans oublier les conditions surfaciques qui vont également impacter la recolonisation par la végétation. Les sols doivent être recréés en strates et une méso et une microtopographie doivent être remises en place pour favoriser la diversité spécifique et la rétention d'eau. Une topographie variée favorisera des habitats hétérogènes et donc une forte diversité spécifique (Macdonald et al., 2015).

Amendement du sol

Réparer les sols est une des principales problématiques des anciennes terres agricoles. Plusieurs études proposent d'amender les sols afin de les faire revenir à leur composition historique. Certains utilisent la sciure de bois pour rehausser la quantité de carbone des sols. Si cela fonctionne sur certains sols, des études montrent que cela n'a pas engendré les résultats attendus et qu'un amendement régulier était nécessaire pour être réellement efficace. Le sulfure, quant à lui, permet de réduire le pH des sols. Des débris végétaux (bois mort) peuvent également être déposés sur les sols. Ils vont favoriser les microorganismes, l'établissement des espèces végétales et l'enrichissement des sols. A l'inverse, si les sols sont trop riches à cause d'amendements azotés par exemple, retirer la couche arable permet de réduire la fertilité et de réduire les effets hérités du passé qu'ils soient biotiques ou abiotiques, favorisant ainsi l'installation d'espèces indigènes (Weiler et al., 2013).

Toutes les méthodes citées ci-dessus sont communes dans le milieu de la restauration. Si elles réussissent parfois à contrebalancer les effets hérités du passé, généralement, elles ne permettent pas l'entière restauration des conditions biotiques et abiotiques de l'écosystème. La plupart du temps, elles sont utilisées seules et très peu d'articles scientifiques se penchent sur l'impact que la combinaison de plusieurs de ces méthodes pourrait avoir sur la restauration des écosystèmes (Nsikani et al., 2018).

3.3.3. Faire le choix d'une nouvelle trajectoire

Chaque écosystème montre des capacités de régénération différentes malgré des caractéristiques similaires et il n'est pas possible de prédire comment celui-ci va évoluer (McDonald et al., 2016). Cependant, en prenant en compte que les effets hérités du passé peuvent empêcher la restauration d'un écosystème vers son écosystème de référence, il semble important de trouver des solutions pour évaluer, en amont du projet, les chances de réussite. Etudier l'écosystème, avant le début du projet, notamment son passé et sa composition biotique et abiotique permet de choisir le niveau d'investissement à allouer au programme de restauration et d'évaluer la probabilité qu'il retrouve son état d'origine. En effet, les actions à mettre en œuvre ne seront

pas les mêmes en fonction de l'état du système. Le tableau ci-dessous présente la trajectoire probable de l'écosystème en fonction des conditions biotiques et abiotiques présentes sur le site (*Tableau 2*). On constate ainsi que si le filtre biotique est dépassé, des actions mineures comme semer des graines ou mettre en œuvre des perturbations naturelles pour briser la dormance des graines vont être nécessaires. Si le filtre abiotique est dépassé et que les sols ne peuvent plus revenir à leur état d'origine sans assistance, il va falloir employer des travaux lourds comme la remise en état de la composition chimique du substrat.

Tableau 2 : trajectoire de l'écosystème en fonction de ses caractéristiques et de son état de dégradation (Cramer et al., 200), traduction : Laurène Dousset

	Trajectoire de l'écosystème		
	Largement reproductible	Nouveau ou retardé	Etat dégradé persistant
Adaptation de l'environnement initial pour l'agriculture	Elevé	Limité (biotique ou abiotique)	Les facteurs abiotiques limitent l'agriculture, nécessitant beaucoup d'irrigation ou une fertilisation par amendement des sols.
Type d'agriculture	Traditionnel avec peu de modifications des sols	Pâturage	Culture intensives et industrialisées
Altération des propriétés des sols	Faible à modéré	Modéré	Significatif
Degré de fragmentation du paysage	Faible	Modéré à élevé	Elevé
Niveau de dispersion des graines	Limité, particulièrement pour les espèces herbacées forestières	Limité mais possible	Très limité
Les espèces indigènes sont-elles adaptées aux perturbations agricoles ou capables de coloniser rapidement des terres en reconversion ?	Beaucoup d'espèces capables de coloniser	Quelques espèces capables de coloniser mais limitées par la présence d'espèces exotiques	Peu d'espèces capables de coloniser des terres en reconversion agricole et très fortement limitées par la présence de beaucoup d'espèces exotiques.
Les espèces indigènes sont-elles compétitives vis-à-vis des espèces exotiques invasives ?	Oui	Oui, mais les effets sont contrebalancés par une dispersion limitée des graines	Non, et l'héritage des cultures renforce encore la compétitivité des espèces exotiques
La facilitation est-elle importante pour le rétablissement de la végétation ?	Dans certains cas	Oui, la mise en place d'arbustes facilite la dispersion et le recrutement	Non

Les travaux nécessaires à la restauration peuvent demander un investissement financier important par rapport aux bénéfices que l'écosystème va en tirer et il n'est pas certain que ce dernier retrouve ses caractéristiques. Etudier la restauration du site sur une petite parcelle pendant un temps suffisant peut-être une solution pour évaluer le potentiel de rétablissement du système. Si les résultats ne sont pas concluants, il pourrait être envisagé d'orienter l'écosystème vers une trajectoire différente de son état d'origine. Vient alors le choix de la réhabilitation ou de la réaffectation (Lima et al., 2016). La réhabilitation consiste à « permettre à l'écosystème de retrouver ses fonctions essentielles (y compris la productivité) grâce à une intervention forte mais limitée dans le temps ». L'objectif n'est ainsi plus de retrouver les fonctions et caractéristiques de l'ancien système mais de permettre à l'écosystème de retrouver un état non dégradé, une diversité et une abondance spécifique plus importante et de restaurer certains services écosystémiques (stockage de carbone, filtration de l'eau, pollinisation...). La réaffectation, elle, s'apparente à changer l'usage de l'écosystème, sa structure et son fonctionnement (Floc'h & Aronson, 1995). Le choix de la trajectoire va essentiellement être guidé par l'investissement financier et humain nécessaire pour retrouver un écosystème stable et écologiquement fonctionnel.

La figure ci-dessous permet d'appréhender la trajectoire de l'écosystème en fonction des dégradations présentes (Figure 9).

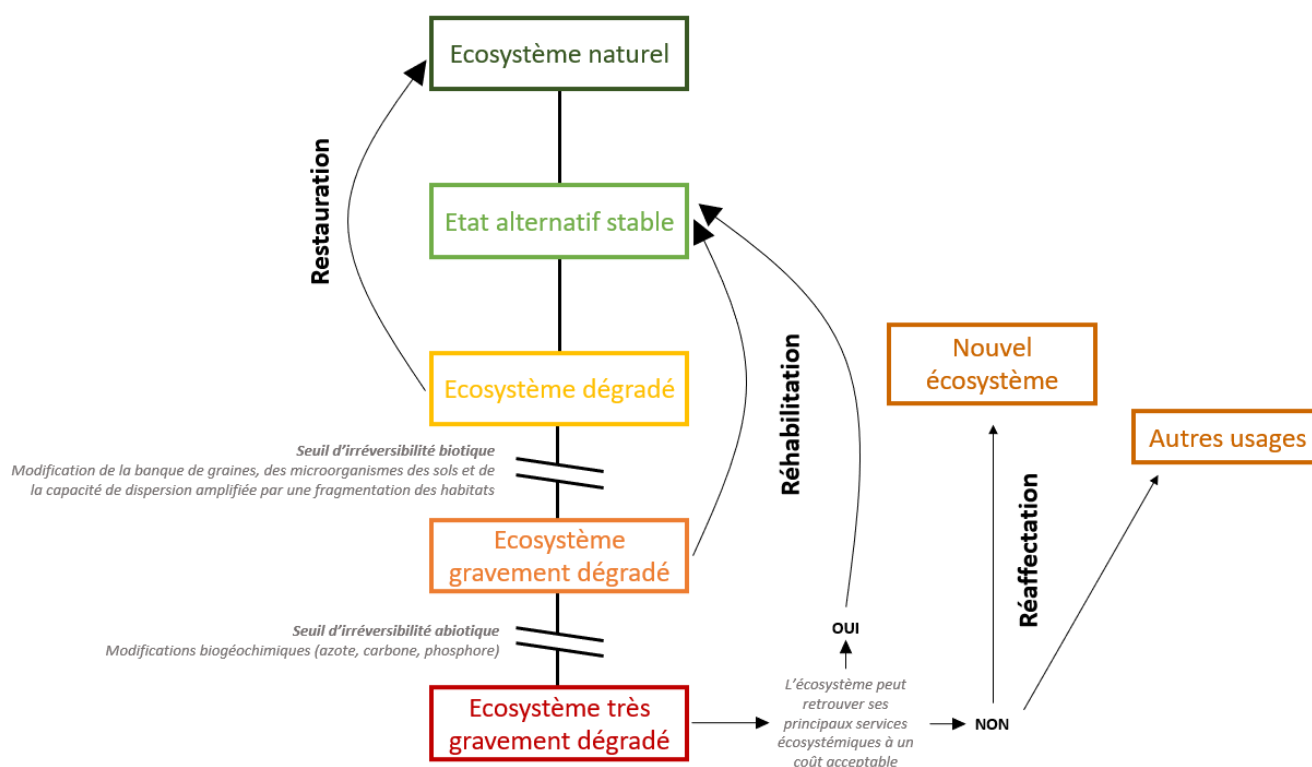


Figure 9 : trajectoire de l'écosystème en fonction de ses effets hérités du passé. Modifié à partir de Floc'h & Aronson, 1995

Lorsque l'écosystème est dégradé mais que les seuils d'irréversibilité ne sont pas dépassés, il peut faire l'objet d'un projet de restauration qui a des chances d'être réussie. La méthode passive ou active dépendra de l'état de dégradation. Lorsque le seuil biotique est atteint, rechercher la restauration complète de l'écosystème semble utopique et il est préférable de tenter d'obtenir un état alternatif stable et fonctionnel s'approchant des caractéristiques de la référence historique. Lorsque le seuil abiotique est dépassé, il faut s'intéresser au coût de la réhabilitation de l'écosystème. En effet, le frein financier est également un des principaux décideurs de la réussite d'un projet de restauration, notamment dans le cas d'effet hérités du passé qui requièrent généralement une participation active et longue (Holl & Aide, 2011). Si le projet de réhabilitation apparaît très coûteux pour peu de bénéfices environnementaux, la réaffectation de l'écosystème peut être envisagée. Cet écosystème peut alors être orienté vers un nouvel écosystème dit « naturel » en réintroduisant des plantes non indigènes. Il peut également être réaffecté à un autre usage comme l'agriculture, la sylviculture ou la création de zones urbaines lorsque le contexte s'y prête.

Holl et Aide ont proposé une trame de questions à suivre pour définir si le projet en vaut la peine et s'il pourra être suivi jusqu'au bout. Ils proposent de s'intéresser dans un premier lieu à la résilience de l'écosystème, aux effets hérités du passé, à la matrice paysagère, aux objectifs et aux ressources financières disponibles pour le projet. Il faut ensuite se poser trois questions :

- Quels résultats peut-on attendre avec une restauration passive ?
- Dans l'optique d'une restauration active, quand et comment doit-on intervenir pour obtenir les résultats attendus ?
- A l'échelle du paysage ou de la région, comment les ressources allouées à la restauration peuvent-elles être utilisées de manière plus efficiente ?

Ces axes de réflexions permettent d'appréhender le projet sous une autre forme et de réfléchir la restauration à une échelle plus grande que celle de la parcelle (Holl & Aide, 2011).

3.3.4. Être patient

Le principe de succession intervient dans tout écosystème perturbé, que la perturbation soit naturelle ou d'origine anthropique. Bien que certaines études aient prouvé que les écosystèmes ayant connu des perturbations naturelles se rétablissent bien plus rapidement que les écosystèmes exploités par l'Homme (Moreno-Mateos et al., 2017), cela ne signifie pas que les systèmes exploités ne seront jamais recolonisés et ne retrouveront pas leurs fonctions essentielles. De nombreuses études se basent sur des échelles de temps allant de 10 à 40 ans (Meli et al., 2017) mais un écosystème stable, et notamment un écosystème forestier, nécessite beaucoup plus de temps pour revenir à un état final, autrement dit climax bien que la notion soit approximative. La conclusion de nombreuses études est qu'il y a une évolution positive entre le début des relevés (souvent quelques années après le début de la restauration) et le dernier relevé (quelques dizaines d'années après le début de la restauration) mais que l'écosystème ne retourne pas à un état historique. L'évolution d'un système forestier se faisant sur des centaines d'années, il est peu probable que l'écosystème atteigne son « climax » seulement quelque quarante ans après sa restauration. Enfin, s'il ne retourne effectivement pas à l'état exact auquel il se trouvait, il peut cependant retrouver ses fonctions biogéochimiques et abriter une richesse, une diversité et une abondance spécifique comparable aux autres écosystèmes.

4. Conclusion : quelles recherches pour poursuivre ?

Les Hommes, en exploitant les sols pour leur consommation personnelle, ont complètement modifié les propriétés des écosystèmes. Une fois les barrières biotiques et abiotiques franchies, revenir à un écosystème semblable à celui présent au préalable est bien souvent compromis. Que l'on parle d'exploitation minière, forestière, agricole ou d'espèces invasives, toutes laissent des héritages qui perdurent des dizaines, centaines, voire milliers d'années et qui freinent le rétablissement des écosystèmes. Les solutions ne sont pas encore toutes trouvées et il n'existe pas de méthodes standardisées pour la gestion des effets hérités du passé. Lorsque l'écosystème est trop dégradé, on peut ainsi se poser la question de l'intérêt de revenir à un état antérieur. De nombreuses raisons invoquées sont l'aspect culturel ou encore la biodiversité. Cependant, il faut également adapter la restauration aux moyens financiers et humains et orienter l'écosystème vers un état qui ne sera pas forcément celui attendu mais qui sera stable, riche en espèces végétales et animales et qui aura retrouvé ses fonctions et services écosystémiques.

Bien que les effets hérités du passé soient connus depuis un quart de siècle maintenant, certains aspects restent encore flous et insuffisamment étudiés. Plusieurs axes de recherches sont présentés ici.

Si on sait aujourd'hui que les effets de l'utilisation des sols influencent la restauration écologique, on ne sait pas encore dans quelles mesures, ni expliquer les variations de résultats entre les différents projets de restauration (Brudvig et al., 2021). De nombreuses études soulignent l'importance des indicateurs pour évaluer ces projets (Cristofoli, 2010). Il peut être intéressant de croiser dans une étude les conditions de départ d'un écosystème, les méthodes de restauration utilisées et les résultats (obtenus grâce à des indicateurs de suivi variés) afin de définir s'il y a une corrélation entre tous ces facteurs. Un résultat positif pourrait permettre de mettre en œuvre un protocole adapté à chaque écosystème dégradé par l'Homme et d'améliorer le taux de réussite des projets de restauration. De la même manière, croiser différentes méthodes de restauration pour améliorer les conditions biotiques et abiotiques est intéressant et pourrait être évalué de manière systématique sur chaque projet pour obtenir une trame des méthodes combinées à utiliser en fonction de chaque effet et de son importance dans l'écosystème.

D'autre part, si la problématique est très bien documentée en ce qui concerne les exploitations agricoles, il n'en est pas de même pour les exploitations minières et forestières et encore moins, voire pas, pour certaines autres exploitations des sols. S'intéresser à la restauration d'anciennes zones urbaines ou aux friches industrielles peu permettre de résoudre quelques challenges du futur (Ziter et al., 2017).

Enfin, l'adaptation des écosystèmes au changement climatique reste également à réfléchir. Si aujourd'hui les effets hérités du passé influencent beaucoup plus l'écosystème que le réchauffement climatique, il se peut que celui-ci prenne de plus en plus de place dans les années à venir. Restaurer les écosystèmes empreints d'effets hérités du passé avec les essences d'il y a plusieurs décennies sans prendre en compte leur potentielle évolution dans le temps, n'est-ce pas risquer la perte de cet écosystème dans les décennies à venir ?

Bibliographie

- Belote, R. T., Jones, R. H., & Wieboldt, T. F. (2012). Compositional stability and diversity of vascular plant communities following logging disturbance in Appalachian forests. *Ecological Applications*, 22(2), 502–516.
- Breland, S., Turley, N. E., Gibbs, J., Isaacs, R., & Brudvig, L. A. (2018). Restoration increases bee abundance and richness but not pollination in remnant and post-agricultural woodlands. *Ecosphere*, 9(9), e02435. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2435>
- Brudvig, L. A. (2011). The restoration of biodiversity: Where has research been and where does it need to go? *American Journal of Botany*, 98(3), 549–558. <https://doi.org/10.3732/ajb.1000285>
- Brudvig, L. A., Turley, N. E., Bartel, S. L., Bell-Dereske, L., Breland, S., Damschen, E. I., Evans, S. E., Gibbs, J., Hahn, P. G., Isaacs, R., Ledvina, J. A., Orrock, J. L., Sorenson, Q. M., & Stuhler, J. D. (2021). Large ecosystem-scale effects of restoration fail to mitigate impacts of land-use legacies in longleaf pine savannas. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(17), e2020935118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2020935118>
- Bürgi, M., Östlund, L., & Mladenoff, D. J. (2017). Legacy Effects of Human Land Use: Ecosystems as Time-Lagged Systems. *Ecosystems*, 20(1), 94–103. <https://doi.org/10.1007/s10021-016-0051-6>
- Corbin, J. D., & D’Antonio, C. M. (2012). Gone but Not Forgotten? Invasive Plants’ Legacies on Community and Ecosystem Properties. *Invasive Plant Science and Management*, 5(1), 117–124. <https://doi.org/10.1614/IPSM-D-11-00005.1>
- Costanza, R. (2012). Ecosystem health and ecological engineering. *Ecological Engineering*, 45, 24–29. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.03.023>
- Costanza, R., Cumberland, J. H., Daly, H., Goodland, R., & Norgaard, R. B. (1997). *An Introduction to Ecological Economics*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003040842>
- Cramer, V. A., Hobbs, R. J., & Standish, R. J. (2008). What’s new about old fields? Land abandonment and ecosystem assembly. *Trends in Ecology & Evolution*, 23(2), 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.10.005>
- Cristofoli, S. (2010). *Restauration écologique: Contexte, contraintes et indicateurs de suivi*. 15.
- Cuddington, K. (2011). Legacy Effects: The Persistent Impact of Ecological Interactions. *Biological Theory*, 6(3), 203–210. <https://doi.org/10.1007/s13752-012-0027-5>
- Dupouey, J. L., Dambrine, E., Laffite, J. D., & Moares, C. (2002). Irreversible Impact of Past Land Use on Forest Soils and Biodiversity. *Ecology*, 83(11), 2978–2984. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2002\)083\[2978:IIOPLU\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2002)083[2978:IIOPLU]2.0.CO;2)
- Fattorini, M., & Halle, S. (2004). The dynamic environmental filter model: How do filtering effects change in assembling communities after disturbance. In *Assembly rules in restoration ecology -bridging the gap between theory and practice*.
- Flinn, K. M., & Vellend, M. (2005). Recovery of forest plant communities in post-agricultural landscapes. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 3(5), 243–250. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2005\)003\[0243:ROFPCI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2005)003[0243:ROFPCI]2.0.CO;2)
- Floc’h, É. L., & Aronson, J. (1995). Écologie de la restauration. Définition de quelques concepts de base. *Natures Sciences Sociétés*, 3, s29–s35. <https://doi.org/10.1051/nss/199503s029>

- Foster, D. R., Motzkin, G., & work(s);, B. S. R. (1998). Land-Use History as Long-Term Broad-Scale Disturbance: Regional Forest Dynamics in Central New England. *Ecosystems*, 1(1), 96–119.
- Foster, D., Swanson, F., Aber, J., Burke, I., Brokaw, N., Tilman, D., & Knapp, A. (2003). The Importance of Land-Use Legacies to Ecology and Conservation. *BioScience*, 53(1), 77. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0077:TIOLUL\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0077:TIOLUL]2.0.CO;2)
- Fuller, J. L., Foster, D. R., McLachlan, J. S., & Drake, N. (1998). Impact of Human Activity on Regional Forest Composition and Dynamics in Central New England. *Ecosystems*, 1(1), 76–95. <https://doi.org/10.1007/s100219900007>
- Garbarino, M., & Weisberg, P. J. (2020). Land-use legacies and forest change. *Landscape Ecology*, 35(12), 2641–2644. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01143-0>
- Grimonprez, B. (2017). Réparer le vivant: Éthique de la compensation. *Revue Juridique de l'Environnement*, 42(4), 681–691.
- Hayward, R. M., Banin, L. F., Burslem, D. F. R. P., Chapman, D. S., Philipson, C. D., Cutler, M. E. J., Reynolds, G., Nilus, R., & Dent, D. H. (2021). Three decades of post-logging tree community recovery in naturally regenerating and actively restored dipterocarp forest in Borneo. *Forest Ecology and Management*, 488, 119036. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119036>
- Holl, K. D. (2002). Long-Term Vegetation Recovery on Reclaimed Coal Surface Mines in the Eastern USA. *Journal of Applied Ecology*, 39(6), 960–970.
- Holl, K. D., & Aide, T. M. (2011). When and where to actively restore ecosystems? *Forest Ecology and Management*, 261(10), 1558–1563. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.004>
- Holling, C. S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 1–23.
- Jones, H. P., Jones, P. C., Barbier, E. B., Blackburn, R. C., Rey Benayas, J. M., Holl, K. D., McCrackin, M., Meli, P., Montoya, D., & Mateos, D. M. (2018). Restoration and repair of Earth's damaged ecosystems. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285(1873), 20172577. <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.2577>
- Kuussaari, M., Bommarco, R., Heikkinen, R. K., Helm, A., Krauss, J., Lindborg, R., Öckinger, E., Pärtel, M., Pino, J., Rodà, F., Stefanescu, C., Teder, T., Zobel, M., & Steffan-Dewenter, I. (2009). Extinction debt: A challenge for biodiversity conservation. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(10), 564–571. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.04.011>
- Lima, A. T., Mitchell, K., O'Connell, D. W., Verhoeven, J., & Van Cappellen, P. (2016). The legacy of surface mining: Remediation, restoration, reclamation and rehabilitation. *Environmental Science & Policy*, 66, 227–233. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.07.011>
- Lira, P. K., Ewers, R. M., Banks-Leite, C., Pardini, R., & Metzger, J. P. (2012). Evaluating the legacy of landscape history: Extinction debt and species credit in bird and small mammal assemblages in the Brazilian Atlantic Forest. *Journal of Applied Ecology*, 49(6), 1325–1333.
- Macdonald, S. E., Landhäusser, S. M., Skousen, J., Franklin, J., Frouz, J., Hall, S., Jacobs, D. F., & Quideau, S. (2015). Forest restoration following surface mining disturbance: Challenges and solutions. *New Forests*, 46(5), 703–732. <https://doi.org/10.1007/s11056-015-9506-4>
- McDonald, T., Gann, G. D., Jonson, J., & Dixon, K. W. (2016). *Standards internationaux pour la restauration écologique incluant les principes et les concepts clés*.

- Meli, P., Holl, K. D., Rey Benayas, J. M., Jones, H. P., Jones, P. C., Montoya, D., & Moreno Mateos, D. (2017). A global review of past land use, climate, and active vs. Passive restoration effects on forest recovery. *PLoS ONE*, 12(2), e0171368. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171368>
- Moreno-Mateos, D., Barbier, E. B., Jones, P. C., Jones, H. P., Aronson, J., López-López, J. A., McCrackin, M. L., Meli, P., Montoya, D., & Rey Benayas, J. M. (2017). Anthropogenic ecosystem disturbance and the recovery debt. *Nature Communications*, 8(1), 14163. <https://doi.org/10.1038/ncomms14163>
- Nsikani, M. M., van Wilgen, B. W., & Gaertner, M. (2018). Barriers to ecosystem restoration presented by soil legacy effects of invasive alien N2-fixing woody species: Implications for ecological restoration. *Restoration Ecology*, 26(2), 235–244. <https://doi.org/10.1111/rec.12669>
- Odum, E. P., Connell, C. E., & Davenport, L. B. (1962). Population Energy Flow of Three Primary Consumer Components of Old-Field Ecosystems. *Ecology*, 43(1), 88–96. <https://doi.org/10.2307/1932043>
- Perring, M. P., De Frenne, P., Baeten, L., Maes, S. L., Depauw, L., Blondeel, H., Carón, M. M., & Verheyen, K. (2016). Global environmental change effects on ecosystems: The importance of land-use legacies. *Global Change Biology*, 22(4), 1361–1371. <https://doi.org/10.1111/gcb.13146>
- Price, J. N., Schultz, N. L., Hodges, J. A., Cleland, M. A., & Morgan, J. W. (2021). Land-use legacies limit the effectiveness of switches in disturbance type to restore endangered grasslands. *Restoration Ecology*, 29(S1), e13271. <https://doi.org/10.1111/rec.13271>
- Raiesi, F., & Salek-Gilani, S. (2020). Development of a soil quality index for characterizing effects of land-use changes on degradation and ecological restoration of rangeland soils in a semi-arid ecosystem. *Land Degradation & Development*, 31(12), 1533–1544. <https://doi.org/10.1002/ldr.3553>
- Society for Ecological Restoration*. (n.d.). Retrieved 11 April 2022, from <https://www.ser.org/>
- Standish, R. J., Cramer, V. A., Wild, S. L., & Hobbs, R. J. (2007). Seed Dispersal and Recruitment Limitation Are Barriers to Native Recolonization of Old-Fields in Western Australia. *Journal of Applied Ecology*, 44(2), 435–445.
- Suding, K. N. (2011). Toward an Era of Restoration in Ecology: Successes, Failures, and Opportunities Ahead. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 42, 465–487.
- Turley, N. E., Bell-Dereske, L., Evans, S. E., & Brudvig, L. A. (2020). Agricultural land-use history and restoration impact soil microbial biodiversity. *Journal of Applied Ecology*, 57(5), 852–863. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13591>
- Turley, N. E., & Brudvig, L. A. (2016). Agricultural land-use history causes persistent loss of plant phylogenetic diversity. *Ecology*, 97(9), 2240–2247. <https://doi.org/10.1002/ecy.1443>
- Weiler, A., Von Holle, B., & Nickerson, D. M. (2013). *Reducing Biotic and Abiotic Land-Use Legacies to Restore Invaded, Abandoned Citrus Groves*. <https://onlinelibrary-wiley-com.proxy.scd.univ-tours.fr/doi/full/10.1111/rec.12006>
- William J. Mitsch. (2012). *What is ecological engineering?* <https://www-sciencedirect-com.proxy.scd.univ-tours.fr/science/article/pii/S0925857412001310>
- Wissel, C. (1984). A universal law of the characteristic return time near thresholds. *Oecologia*, 65(1), 101–107. <https://doi.org/10.1007/BF00384470>
- Ziter, C., Graves, R. A., & Turner, M. G. (2017). How do land-use legacies affect ecosystem services in United States cultural landscapes? *Landscape Ecology*, 21(3), Article 3. <https://doi.org/10.1007/s10980-017-0545-4>

Directeur de recherche :
Monsieur Francis ISSELIN-NONDEDEU

Laurène Dousset
PFE/DAE5
DAE ADAGE
2022-2023

Les blocages en action dans la restauration écologique des écosystèmes terrestres : les effets hérités du passé

Résumé

La restauration écologique consiste à réparer les écosystèmes qui ont été endommagés par la main de l'Homme. Si elle est indispensable pour conserver la biodiversité et les paysages entre autres, elle connaît certains freins. Les effets hérités du passé sont définis par les conséquences d'une perturbation sur l'écosystème, même lorsque cette perturbation est terminée. Ils proviennent de l'ancienne utilisation des terres par les Hommes comme les exploitations minières, forestières ou encore agricoles et peuvent avoir des impacts sur l'écosystème pendant des dizaines, des centaines voire des milliers d'années. Ainsi, il est possible de se demander si les effets hérités de l'utilisation des terres sont un blocage à la restauration écologique et comment. Les principaux résultats sont que ces effets empêchent le bon déroulement de la restauration, notamment à cause du franchissement des seuils biotiques et abiotiques. L'exploitation des sols en a complètement modifié les propriétés biogéochimiques, les microorganismes, la banque de graines et la composition végétale, entre autres. Certaines solutions ont été tentées comme semer des graines de plantes indigènes ou amender les sols, mais elles ne fonctionnent pas de manière systématique. Revenir à un écosystème historique n'est souvent plus possible. Il faut ainsi questionner la question de la trajectoire et réfléchir ses objectifs en fonction des moyens financiers et des possibilités offertes par l'écosystème. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour essayer d'établir des solutions standardisées de manière à contrebalancer les effets hérités du passé.

Mots Clés : effets hérités du passé, restauration écologique, blocage, seuil biotique, seuil abiotique