



**Guide pour la restauration des tourbières exploitées :
Contribution du programme RECIPE**

Contexte scientifique

Depuis le démarrage du programme RECIPE, un certain nombre de travaux concernant la restauration des tourbières ont été publiés. Plutôt que de produire un guide tel qu'initialement proposé dans le projet et qui ressemblerait finalement aux ouvrages récemment parus, nous jugeons préférables de nous focaliser plus spécifiquement sur les 5 tourbières « ateliers » sélectionnées pour RECIPE, constituant ainsi des études de cas. Ainsi l'idée est d'utiliser les résultats de RECIPE pour tester la validité des directives préconisées en matière de restauration des tourbières et d'identifier des questions qui nécessiteraient une recherche plus approfondie. Nous proposons d'utiliser les recommandations du programme BRIDGE, financé par l'Union européenne (Blankenburg et Tonnis, 2004), afin d'établir un diagnostic des cinq tourbières que nous avons étudiées. Leur état initial après exploitation, les catégories, les objectifs proposés selon les recommandations de BRIDGE ainsi que les conflits ou thèmes exigeant davantage de recherche sont récapitulés dans le tableau 1.

Classification des cinq tourbières de RECIPE selon les catégories de BRIDGE et les objectifs recherchés

1. Aitoneva, Finlande

Les gisements de tourbe d'Aitoneva ont été inventoriés en 1942. Cette tourbière était non boisée et la profondeur moyenne de tourbe était de 2,9 m. Au milieu de la tourbière, l'épaisseur maximale atteignait 6,6 m (Stén et Toivonen 1990). L'extraction a débuté peu après l'inventaire de 1942 et se poursuit encore de nos jours dans quelques secteurs.

Au cours des premières années d'exploitation, la tourbe était récoltée sous la forme de briques par la technique dite du « block-cutting ». Ce mode d'exploitation a généré un certain nombre de fosses de 3 à 4 m de profondeur, espacées par des bandes de tourbe non utilisées, d'environ 5 m de large. Le système de drainage n'étant pas vraiment efficace, la régénération des fosses a démarré spontanément, peu de temps après l'arrêt de l'extraction en 1948. La microrelief des fosses est relativement plat et la végétation se développe au niveau de creux et de replats. *Carex lasiocarpa*, *C. rostrata* et *Eriophorum* dominent la strate herbacée alors que *Sphagnum pulchrum* (Braithw.) Warnst. et, dans une moindre mesure, *S. lindbergii* Schimp abondent dans les creux alors que *S. papillosum* Lindb domine la strate muscinale (Yli-Petäys et coll., 2007). Les conditions initiales de régénération sont à classer dans le type D du rapport BRIDGE. Après 50 ans de succession écologique, le stade de régénération correspond à un bas-marais oligo-mésotrophe/marais de transition (BRIDGE-type 3)

Dans les années 60, une méthode de fraisage, plus efficace, a été progressivement mise en place. Aujourd'hui, la topographie générale des surfaces ayant été exploitées est relativement régulière. En raison de l'importance du complexe originel de tourbières (>1000 ha), les conditions pour la régénération des secteurs exploités sont hétérogènes mais appartiennent globalement aux types A, Bi ou D.

Les drains majeurs et la plupart des drains d'ordre secondaire sont encore en état et les mesures de restauration incluent leur obstruction afin de bloquer la circulation de l'eau. A côté des mesures de restauration, d'autres options d'utilisation après exploitation, telles que le reboisement, sont également à prendre en compte. Ceci exige la planification soigneuse des opérations de restauration de sorte qu'aucune

perte économique ne soit causée pour les autres secteurs d'activités. Les perspectives de restauration des surfaces fraisées correspondent aux types 1, 2 et 7 mais dans quelques secteurs la meilleure alternative de restauration serait de reboiser.

Objectifs : 1, 2 ou 7, à moins que l'hydrologie ne soit pas compatible.

2. Middlemuir, Ecosse

Un inventaire des gisements de tourbe d'Ecosse datant de 1961 indique que la profondeur de tourbe à Middlemuir était comprise entre 1 (en bordure de site) et 5 mètres. L'extraction mécanique de tourbe a commencé peu de temps après, l'extraction artisanale ayant été pratiquée tout au long des 2 derniers siècles. La tourbe a été récoltée sur des langues de sol et dans des fosses d'environ 100 m de large, jusqu'à ce que l'extraction cesse progressivement et s'arrête approximativement en 1994. Par conséquent, en raison de l'intensité inégale d'extraction, la topographie est plutôt hétérogène. Ainsi les conditions initiales de régénération varient de la catégorie A (couche épaisse, >100 cm, de tourbe à *Sphagnum*, ombrotrophe, très acide, à surface bombée, etc.) à la catégorie Bi (couche peu épaisse, <100 cm de tourbe à *Sphagnum*, très acide, à surface bombée, etc.) quand l'extraction a été pratiquement maximale. Dans diverses parties la tourbière, il reste des dépôts d'épaisseur supérieure à 2 m, constitués de tourbe fortement humifiée et relativement imperméable.

Les fossés de drainage d'ordre secondaire se sont déstructurés après l'arrêt de l'extraction de tourbe et une végétation certaine de tourbière a recolonisé spontanément ces emplacements. Cependant, le drain périphérique est toujours entretenu, ceci entraînant des pertes par drainage. *Eriophorum vaginatum* et *Campylopus introflexus* recolonisent majoritairement, par taches, les bandes de tourbe surélevées (site A). Dans les bandes inférieures (sites B et C), la couverture par les végétaux vasculaires est plus complète et diversifiée et des espèces de *Sphagnum* commencent à coloniser les espaces inter-plantes vasculaires. Le site D, en raison de la faible épaisseur de la couche de tourbe ombrotrophe relictuelle et de par sa localisation en bordure de tourbière, est colonisée par un cortège floristique comprenant des espèces indicatrices de landes humides comme *Deschampsia flexuosa*.

Dans toutes les situations, selon les directives BRIDGE, les objectifs de restauration correspondent soit à une « restauration de lande sèche, buissons et bois, humides par places » quand les pertes par infiltration restent inexorablement élevées en raison de la topographie et de l'hydrologie associée, et qu'il ne peut y avoir de solution technique, soit aux objectifs 1 (marais acide émergent) ou 2 (marais acide flottant) quand les pertes par infiltration sont moindres ou peuvent être réduites par une gestion appropriée. Ces dernières options auraient une plus grande valeur de conservation car les landes et les buissons sont bien représentés dans le secteur tandis que les haut-marais acides constituent une ressource en régression. Nous ne savons pas si le haut-marais acide a jamais constitué une composante majeure à Middlemuir, sauf peut-être à l'échelle de secteurs plus petits. Le « reprofilage » de la surface de tourbe, associé à une révision du régime de drainage, devraient être considérés comme des mesures potentielles de restauration car la topographie actuelle entraîne une perte hydrique latérale.

Objectifs : 1 ou 2 (?), sauf hydrologie défavorable.

3. La Chaux d' Abel, Suisse

Cette tourbière située dans les montagnes du Jura a été abandonnée après que l'extraction intensive de tourbe ait cessé en 1963, le marais intact ne couvrant plus qu'une surface restreinte. La régénération spontanée s'est traduite par l'installation de communautés végétales dominées par des espèces de *Sphagnum*, *Polytrichum strictum* et *P. commune*, *Eriophorum vaginatum* et *E. angustifolium* avec ponctuellement *Betula pubescens* et de *Picea abies* dont l'âge est variable en fonction des secteurs de la tourbière.

Trois stades de succession secondaire ont été choisis à La Chaux d' Abel : « régénération récente » (A), « régénération intermédiaire » (B), et « régénération ancienne » (C). Les analyses détaillées de la tourbe ont indiqué que les stades A et B s'étaient développés sur de la tourbe de bas-marais, et disposaient ainsi de conditions initiales de régénération comparables, alors qu'en C, la régénération s'est opérée à partir de tourbe de haut-marais. La station A est dominée par des espèces de *Sphagnum*, *Eriophorum vaginatum*, *Comarum palustre* et *Carex nigra* et plus ponctuellement *Calluna vulgaris*, *Betula nana*, *Anthoxanthum odoratum* et *Potentilla erecta*. La station B est principalement caractérisée par des espèces de *Sphagnum* et *Eriophorum vaginatum*. La station C présente également des espèces de *Sphagnum* et *E. vaginatum* ainsi que *Potentilla erecta* et *Vaccinium oxycoccus*, d'occurrence variable

Objectifs : 1, 2, 3 ou 6.

4. Le Russey, France

La tourbière du Russey ressemble à beaucoup d'égards à celle de la Chaux d'Abel. Les deux sites, distants d'environ 15 km se sont formés dans un contexte géologique similaire, le massif calcaire du Jura. L'exploitation de la tourbe s'est faite de façon aléatoire dans les 2 tourbières, sans planification réelle. Pour cette raison, la topographie et le régime hydrologique sont complexes.

La tourbière couvre environ 27 ha dont la majeure partie est aujourd'hui boisée. L'extraction de la tourbe commença en 1968 pour être stoppé en 1984, laissant un à deux mètres de tourbe. La surface décapée a été ultérieurement colonisée par la végétation et la régénération spontanée s'est traduite par un développement significatif de communautés végétales dominées par des espèces de *Sphagnum*, *Polytrichum strictum*, *Eriophorum vaginatum* et *E. angustifolium*. Trois stades de succession secondaire ont été choisis pour l'étude : le site A, tourbe décapée ; le site B, dominé par *E. angustifolium* et *P. strictum* en présence de *Calluna vulgaris*, *Sphagnum fallax* et *S. rubellum* ; le site C, dominé par *S. fallax*, *S. rubellum* et *E. vaginatum* avec quelques occurrences de *C. vulgaris*, *Carex nigra*, *Vaccinium oxycoccus* et *P. strictum*.

Objectifs : 1 ou 2, à moins que l'hydrologie ne soit défavorable.

5. Baupte, France

Baupte se distingue des 4 autres tourbières par son histoire. Ce site est un des plus importants gisements de tourbe en France et a été intensivement exploité depuis la fin de la seconde guerre mondiale. La tourbière se situe seulement à quelques mètres au-

dessus du niveau de la mer et s'est développée sur des sédiments littoraux formés au cours d'une succession de régressions et de transgressions marines. Depuis la période boréale (9000 ans BP), 4 grands types d'écosystèmes se sont succédés : (1) un marais primitif ; un milieu aquatique (2) s'est développé à la transition Boréal-Atlantique ; puis un bas-marais à *Carex* (3) ; la première occurrence de *Sphagnum* se manifeste au cours du Subboréal et indique le début de la genèse vers un système ombrotrophe et ombrogène (4). À la fin du 19^{ème} siècle, *Drosera longifolia*, *Andromeda polifolia* et *Vaccinium oxycoccus* n'étaient pas rares dans la tourbière. Cependant, *A. polifolia* a disparu en 1965 (toujours absent en 2006) tandis qu'aujourd'hui aucun tapis de *Sphagnum* ne subsiste.

L'épaisseur de tourbe varie de 1 à 8 m (12 m par endroits). Les dépôts de tourbe reposent sur des faluns et de l'argile et ont été exploités par fraisage sur de grandes surfaces. Au niveau des stations d'étude, l'épaisseur de tourbe est relativement faible et le matériau correspond à de la tourbe de bas-marais (fen-peat). Elle est très décomposée et la teneur en cellulose est très basse (14.8 ± 3.1 %). Le pH moyen est égal à 5.5 ± 0.4 et le rapport C/N est de 21 ± 2 tandis que la teneur en S atteint 0.500 ± 0.053 %, valeur la plus élevée des 5 tourbières de RECIPE. Les secteurs les plus intensivement exploités, où l'extraction a cessé en 1995, ont été artificiellement inondés. Cette inondation a créé quelques grands bassins peu profonds. Dans les secteurs les plus anciennement exploités, un bas-marais à *Phragmites* se développe et le bilan de matière organique est favorable à l'accumulation, assurant à l'écosystème une fonction de puits pour le carbone. Dans d'autres secteurs des plantes telles qu'*Eleocharis palustris*, *Agrostis stolonifera* ou *Carex spp* ont colonisé les berges des plans d'eau mais il est certain que les roseaux (*Phragmites*) risquent d'envahir ces milieux. *Eriophorum angustifolium* a colonisé localement les emplacements décapés de tourbe mais elle ne s'est jamais aussi abondamment développée que les roseaux.

La récolte de tourbe par fraisage a cessé en 2005 mais la compagnie Degussa souhaite poursuivre l'extraction par prélèvement sous eau. La compagnie a également proposé de tenir compte des problèmes écologiques engendrées par l'exploitation et, en ce sens, les secteurs abandonnés (casiers) ont été inondés afin de recréer un état hydrologique acceptable. Les objectifs du projet global (non encore validé par l'Administration) sont d'augmenter la diversité floristique, de maintenir la richesse avifaunistique exceptionnelle résultant de l'inondation artificielle (particulièrement les espèces hivernantes) et enfin de favoriser la séquestration du carbone. Dans cet état d'esprit, ils ont autorisé l'accès de la tourbière aux laboratoires de recherche scientifique (niveaux national et international). Si ce projet est accepté, un comité scientifique surveillerait le succès des options de réhabilitation.

Les conditions initiales après exploitation correspondraient à la référence Fi/Fii de BRIDGE (mais avec un pH plus faible, voir ci-dessus) et l'épaisseur de tourbe résiduelle dépend des secteurs exploités. Parfois, l'épaisseur de tourbe relictuelle est inférieure à 0,5 m et l'argile peut affleurer localement.

Les secteurs anciennement exploités par fraisage sont actuellement majoritairement inondés en raison de la gestion hydrologique du site. Dans certains cas, les roseaux (*Phragmites australis*) ont complètement envahi les casiers. *Eriophorum angustifolium* a rapidement colonisé la tourbe décapée sur de modestes surfaces (probablement en raison de la qualité méso-eutrophique du substrat). Comme il n'y a dans les casiers aucun développement significatif de radeaux de végétation, la protection des rives constituait l'une des recommandations principales du programme

« Recréer la Nature », un programme national de recherche du ministère français de l'environnement (1998-2000) dont les objectifs majeurs étaient d'effectuer des réhabilitations expérimentales d'écosystèmes perturbés à travers la France et d'en suivre l'évolution. Dans ce cadre, les effets de l'inondation artificielle des tourbières exploitées ont été examinés à Baupte. L'action des vagues semble être forte dans les casiers. Nous suggérons la création de barrages végétalisés afin de réduire la surface des plans d'eau.

L'introduction de plantes constituerait une bonne stratégie mais elle ne peut être appliquée qu'avec une bonne connaissance de la qualité de tourbe de surface afin de localiser les secteurs les plus pauvres (mésotrophes), en particulier pour les espèces d'*Eriophorum*. Nous avons observé la bonne croissance d' *E. angustifolium* et *E. vaginatum*, deux ans après leur introduction (RECIPE-WPII) mais leur taux de mortalité est demeuré élevé, probablement en raison des propriétés de la tourbe. Tous les plants de *Sphagnum* introduits ont rapidement régressé. Cette information est importante par rapport à l'objectif 3.

Dans les secteurs les plus anciens, les espèces de *Salix* se sont bien développées. Ceci semble correspondre au stade de « bois humide » (objectif 8), ou à un stade âgée de succession succédant à un « marais à hautes herbes » (objectif 6). Le maintien des deux situations est possible mais exige la prévention de la propagation des saules (entretien par coupe ?).

La tourbière de Baupte et ses vastes étendues de tourbe exploitée présentent un grand intérêt pour tester différentes trajectoires de réhabilitation et la restauration à long terme d'une véritable tourbière. Il ne serait pas compliqué de favoriser le développement de différents types de végétation mais la possibilité de manipulations expérimentales dépend maintenant de la réponse de l'Administration au projet d'extraction sous eau. Il semble que les chances soient partagées (extraction= gestion du régime de l'eau ; aucune autorisation= rien ne sera fait !).

Objectifs : 3, 4, (5), 6 ou (8).

Contribution de RECIPE à l'amélioration des directives de gestion et des connaissances sur la restauration des tourbières

Utilisation des tourbières, biodiversité et séquestration du carbone

Les tourbières ont été utilisées dans le cadre d'un grand nombre d'activités anthropiques et, de ce fait, les potentialités de régénération sont très largement site-dépendantes. Certaines activités ont fortement perturbé la structure et le fonctionnement de l'écosystème, notamment en termes de biodiversité et de séquestration du carbone dans la tourbe alors que d'autres ont plutôt eu une influence bénéfique, dans la mesure où elles ont conduit à une relance de l'activité tourbigène. A partir d'études socio-économiques effectuées en Europe, et notamment au sein de RECIPE, il est possible de synthétiser les grands types d'effets anthropiques sur la dynamique des tourbières (figure 1).

Evolution de la fonction de puits au cours de la régénération

On suppose généralement que la restauration d'une couverture végétale à *Sphagnum* suffit pour reconstituer la fonction de séquestration de carbone. En effet, nous avons vu le rétablissement de la fonction de puits pour le C dans des sites en régénération dominés par une végétation à *Sphagnum* et *Eriophorum*, 20 ans après l'arrêt de l'exploitation (Bortoluzzi *et al.*, 2006). Cependant ceci n'est pas toujours observé. Les tourbières secondaires peuvent à terme séquestrer significativement le carbone, mais le retour à cette fonction n'est pas immédiat. En outre, cette fonction de séquestration peut atteindre un maximum à moyen terme puis s'atténuer par la suite (Kivimäki *et al.*, 2007). Ainsi les taux élevés de séquestration de C qui sont observés dans quelques sites secondaires peuvent n'être que passagers. De même, des activités microbiennes potentielles plus élevées (par incubation de tourbe) ont été mesurées dans des stades de régénération intermédiaires, à 20-30 ans (Francez *et al.*, 2007).

On affirme souvent que les émissions de méthane pourraient être réduites en maintenant le niveau de nappe suffisamment bas pour que la majeure partie du CH₄ soit oxydée en CO₂ avant d'être émise dans l'atmosphère. En revanche, la séquestration de carbone par les plantes est optimale à des niveaux plus élevés de nappe d'eau. Ainsi, ces deux variables agissent en balance, mais l'effet du niveau d'eau sur l'ensemble des variables intervenant dans le bilan de carbone de la tourbière n'a pas été étudié en détail. Les résultats obtenus grâce à RECIPE (Yli-Petäys et Vasander, non publié) montrent que des niveaux d'eau atteignant -20 centimètres au-dessous de la surface sont suffisants pour maintenir la fonction de puits de carbone dans le cas des trois espèces de laïches étudiées (*C. rostrata*, *E. vaginatum*, *E. angustifolium*). Dans la même expérience, *Sphagnum fallax* et les surfaces décapées de tourbe ont fonctionné comme de faibles sources (figure 2). Comme le méthane est 21 fois plus efficace que le dioxyde de carbone en tant que gaz à effet de serre, il serait nécessaire de maintenir des niveaux de nappe compris entre -10 et -6 cm pour un effet net de refroidissement. Sur la base de nos résultats, le maintien de niveaux de nappe stables, près de la surface, est essentiel pour une accumulation nette de carbone.

Ces considérations suggèrent que les gestionnaires de sites devraient assurer une surveillance continue de l'état du processus de séquestration de C dans les tourbières restaurées (ceci devant être une directive de restauration). La seule présence de *Sphagnum*, ou même l'accumulation d'une nouvelle couche de tourbe, n'est pas nécessairement indicatrice de la séquestration de C à l'échelle de l'écosystème, car la quantité de C fixé peut être équilibrée ou dépassée par la minéralisation de C d'horizons plus profonds. Cependant, une fois que le nouvel acrotelme atteint 20-30 cm, nous pouvons être raisonnablement confiants quant à l'accumulation nette de C.

Bioindication

Les résultats de RECIPE prouvent que la matière organique, la composition botanique et les indicateurs microbiens de la tourbe valident l'évolution déduite de la végétation et de la microtopographie de surface (Laggoun-Défarge *et al.*, 2007).

Les changements de communautés microbiennes au cours des séquences de régénération sont liés aux différences de propriétés de la matière organique telles que le rapport C/N, la teneur totale en C organique, l'azote soluble et total et la présence de certaines espèces végétales. Ces résultats confirment le rôle important du carbone labile comme variable de forçage de la composition et de l'activité des communautés microbiennes (Artz *et al.*, 2007 ; Francez *et al.*, 2007).

La dynamique de la biomasse microbienne au cours de la chronoséquence de 55 ans étudiée dans RECIPE (tous sites confondus, figure 3) reflète les piètres conditions de recolonisation offertes par la tourbe décapée, en dépit de la ré-humectation des sites abandonnés. Nous avons observé un temps de latence d'environ 10 ans avant que les stocks de C et d'N microbiens n'évoluent. Les valeurs de biomasse microbienne enregistrées dans ces stades suivant l'abandon de l'exploitation sont parmi les plus faibles de ceux enregistrés en tourbière. La diversité des plantes colonisatrices et leur accroissement ont des effets positifs sur le développement des stocks microbiens qui augmentent de manière significative de 10 à environ 40 ans après abandon. Dans les tourbières abandonnées puis artificiellement revégétalisées comme c'est le cas à Bois-des-Bel (Québec, Canada), le rétablissement de la biomasse microbienne C débute très rapidement avec le développement des plantes, notamment les *Sphagnum* (Andersen *et al.*, 2006). Ainsi, seulement 5 ans suivant la réintroduction des propagules, le stock de carbone dans la biomasse microbienne atteignait $2310 \pm 220 \mu\text{g C g DP}^{-1}$, une valeur que nous avons observée dans les sites RECIPE aux environs de 20 ans après abandon (figure 3).

Ces résultats suggèrent que les micro-organismes et les propriétés de la matière organique puissent être employés comme bioindicateurs de la régénération et des fonctions de l'écosystème (recyclage du C et concentrations en méthane de l'eau interstitielle, Siegenthaler *et al.*, 2007).

Impact des changements globaux sur la régénération des tourbières

Dans le site du Jura suisse, après moins de 50 ans, la succession secondaire spontanée a conduit à un marais oligotrophe, fortement dominé par *Sphagnum fallax*. Il semble très probable que ce processus débouche sur la reconstitution d'un véritable haut-marais. Cependant, la succession, et donc l'évolution possible du bas- vers le haut-marais, peut dépendre du climat. Le potentiel de séquestration du C aux stades intermédiaires de la succession pourrait être compromis par le réchauffement global ; en revanche, les sites de régénération plus anciens (années >50) pourraient montrer par des capacités de résilience plus importantes (Samaritani et autres., 2007).

Influence du contexte socio-économique sur la régénération des tourbières

Le projet RECIPE a montré la très grande diversité des modalités d'exploitation, de conservation et des choix de restauration des tourbières. Dans beaucoup de lieux, l'exploitation constitue toujours une source de revenus significative pour les communautés rurales. Cependant, la tendance à la conservation et à la ré-habilitation plutôt qu'à l'exploitation varie inversement avec la surface absolue des tourbières propre à chaque région. Cependant, d'autres valeurs culturelles jouent également un rôle. Il existe dans beaucoup de régions une pression croissante en faveur de la conservation des tourbières (Schwarz et autres., 2007).

Résumé

1. Chaque situation est quasiment unique de par ses propriétés et chacune doit être traitée selon ses propres caractéristiques.

2. A l'intérieur d'une même tourbière, la variabilité est telle qu'elle nécessite plusieurs approches.
3. L'état hydrologique constitue la principale variable de forçage, mais pas la seule, en matière de régénération des tourbières décapées après exploitation.
4. La colonisation par les *Sphagna* n'est pas nécessairement un indicateur de la restauration de la fonction de puits de carbone, typique des tourbières.
5. Les espèces de *Carex* peuvent être plus efficaces que les *Sphagna* en terme de piégeage du carbone.
6. La fonction de puits de C peut être la plus élevée au cours de stades intermédiaires de succession.
7. Le niveau optimum de la nappe d'eau, dans l'optique de minimiser le réchauffement global, se situe probablement juste au-dessous de la surface (-6 à -10 cm).
8. Le rétablissement de l'activité microbienne montre un décalage avec la reconstitution de la couverture végétale mais, comme les changements de propriétés de la matière organique, elle peut constituer un indicateur du rétablissement des fonctions de l'écosystème, en particulier le recycle du C.
9. Le réchauffement climatique pourrait avoir une influence sur le succès de la réhabilitation, en particulier aux étapes intermédiaires de la succession.
10. Les options de réutilisation devraient également être guidées par le contexte socio-économique de la tourbière en question.

Tableau 1. Caractéristiques des cinq tourbières étudiées dans RECIPE et liens avec les directives du programme BRIDGE.

Localisation	Latitude, longitude, altitude	Code site	Plantes dominantes	Temps depuis abandon	Conditions initiales selon nomenclature BRIDGE	Notes sur les conditions initiales de restauration	Objectif de restauration selon nomenclature BRIDGE	Notes sur la succession, d'après BRIDGE	Remarques additionnelles Contribution RECIPE
		A	<i>Eriophorum vaginatum</i> (mouillé)	10	Fii		1, 2 or 7 sauf si hydrologie défavorable		
Aitoneva, Finlande	62°12'N, 23°18'E, 156m	B	<i>Eriophorum vaginatum</i> (sec)	10	A		ditto		La fonction de séquestration du carbone diminue avec le temps
		C	<i>Carex rostrata</i>	10	Fii		ditto		
		D	<i>Sphagnum. fallax</i>	10	Fii		ditto		
		E	Pas de végétation	10	Fii (or Bii?)		ditto		
		A	Mostly bare, isolated <i>vaginatum</i> , <i>introflexus</i>	<5	A		1 or 2(?), sauf si hydrologie défavorable		La colonisation spontanée a suivi l'abandon mais les <i>Sphagnum</i> ont seulement poussé dans les biotopes les plus humides et grâce à la présence d'espèces 'nurse', essentiellement <i>Eriophorum</i> . Une nouvelle couche de tourbe apparaît après 50 ans mais la question de la séquestration du carbone reste posée.
Middlemuir Moss, Ecosse, Royaume Uni	57°36'N, 2°9'W, 110m	B	<i>S. cuspidatum</i> , <i>S. auriculatum</i> , <i>E. vaginatum</i>	5-10	A		ditto		
		C	<i>angustifolium</i> , <i>S. auriculatum</i> , <i>S. cuspidatum</i>	5-10	A		ditto		
		D	<i>Sphagnum spp</i> , <i>C. vulgaris</i> , <i>Deschampsia flexuosa</i>	>50	Bi		ditto		
Chaux d' Abel, Monts du Jura, Suisse	47°10'N, 6°57'E, 1040m	A	<i>S. fallax</i> , <i>P. strictum</i> , <i>P. commune</i> , <i>Eriophorum spp</i>	29+	C ou Fii	(ou Bii si restes de tourbe haut-marais)	3 ou 6 (1 ou 2 si conditions originelles = Bii)	A partir de 3 (bas-marais pauvre) lente évolution vers faciès ombrotrophe possible si pas d'opposition	Après moins de 50 ans, la revégétalisation spontanée a conduit à un marais oligotrophe, dominé par <i>Sphagnum fallax</i> . Il semble probable que le processus enclenché conduise à un véritable haut-marais. Cependant la succession, et
		B	Mêmes espèces, faciès intermédiaire entre A et C	42-43					

de ce fait, une évolution potentielle de la catégorie 3 (marais pauvre) vers la 1 ou la 2 (véritable haut-marais) pourrait dépendre du climat. Les indicateurs (MO, composition botanique, biomasse microbienne) valident la dynamique déduite des données de surface (végétation et topographie).

Les analyses microscopiques montrent que l'ancienne tourbe, en site C était de la tourbe de haut-marais

S. fallax, P. strictum, E. 52-58
vaginatum, Bii (or Bi)
Vaccinium spp.

1 or 2

1 ou 2, sauf si hydrologie pas favorable

A

4

Tourbe nue

Sphagnum fallax,
S. rubellum, E. 22
angustifolium
and *C. vulgaris*
(variable)

Le Russey, 47°10'N,
Monts du Jura, 6°47'E,
France 867m

B

22

S. fallax, S. *rubellum*, E. 28-40
vaginatum,
Calluna vulgaris

C

28-40

ditto

Baupte, France	49°17'N, 1°21'E, 20m	A	Pas de végétation	5-10	Fii	Conditions initiales, plutôt Fii	3, 4, (5), 6, (8)	Dépendant de la qualité de tourbe et du degré de perturbation (drainage, tassement) et de la position par rapport à la morphologie du plan d'eau	La tourbière de Baupte a été exploitée de façon intensive par fraissage. L'exploitation a cessé en 2005. De larges secteurs de tourbe décapée sont envoyés et l'hydrologie contrôlée. <i>Eriophorum angustifolium</i> a sporadiquement colonisé la tourbe décapée, après l'arrêt de l'extraction mais les roseaux (<i>Phragmites</i>) envahissent rapidement les berges des casiers.
B	5-10	Fii	<i>E. angustifolium</i> , <i>Hypnaceae</i>	ditto	surtout 3 et 5	ditto	surtout 3 et 5		

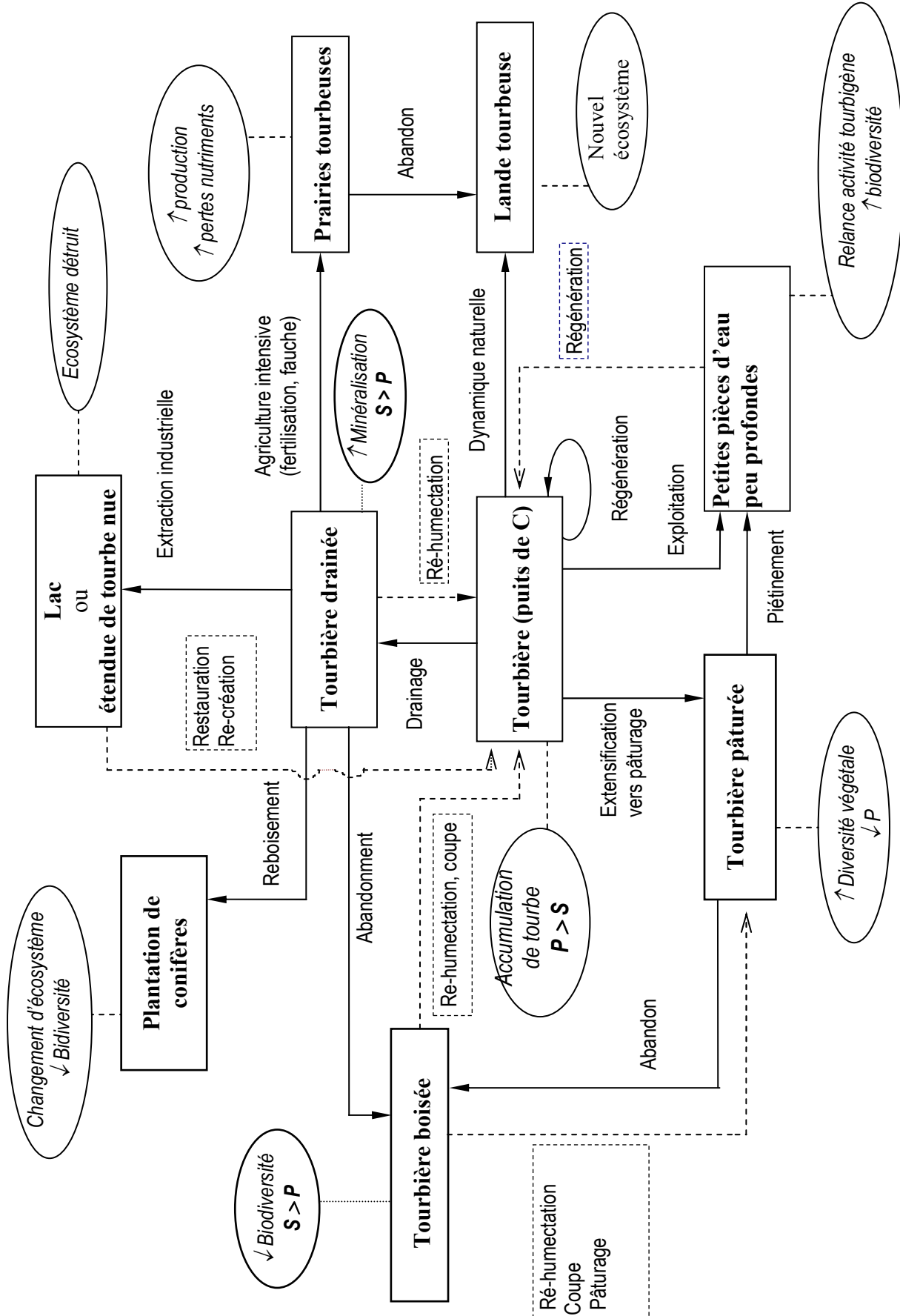


Figure 1. Principales conséquences de l'utilisation des tourbières sur le fonctionnement « puits-source pour le carbone » des tourbières européennes (↓ = diminution et ↑ = augmentation ; S = source, P = puits - d'après Francez, 2000 modifié ; Schwarz *et al.*, 2007).

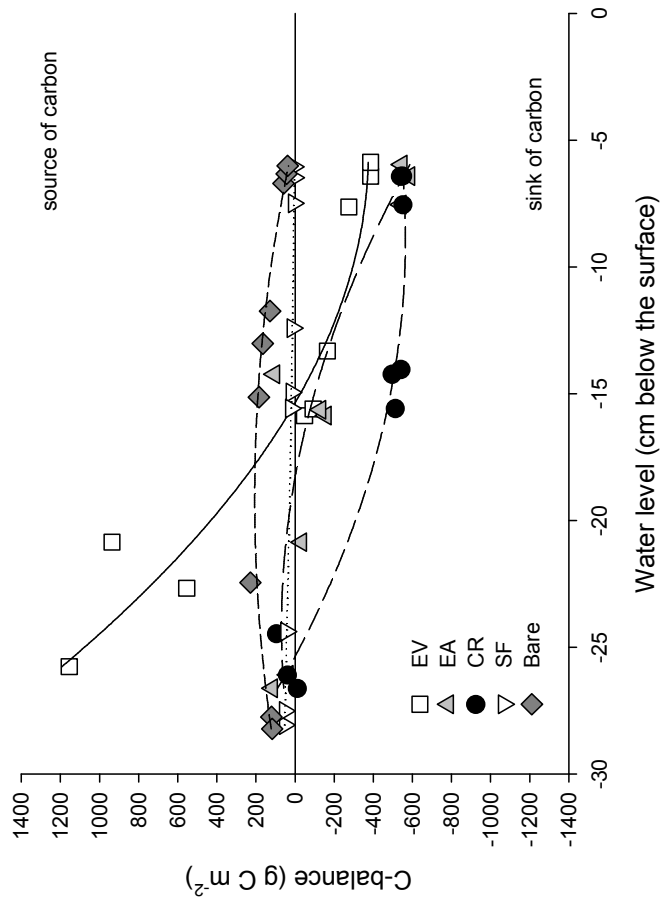


Figure 2. Bilan saisonnier de carbone (Juin-Septembre) de trois Cypéracées, de *Sphagnum* et de surfaces décapées de tourbe à différents niveaux de nappe. EV= *Eriophorum vaginatum*, EA= *Eriophorum angustifolium* ; CR= *Carex rostrata*; SF= *Sphagnum fallax*; Bare= tourbe décapée.

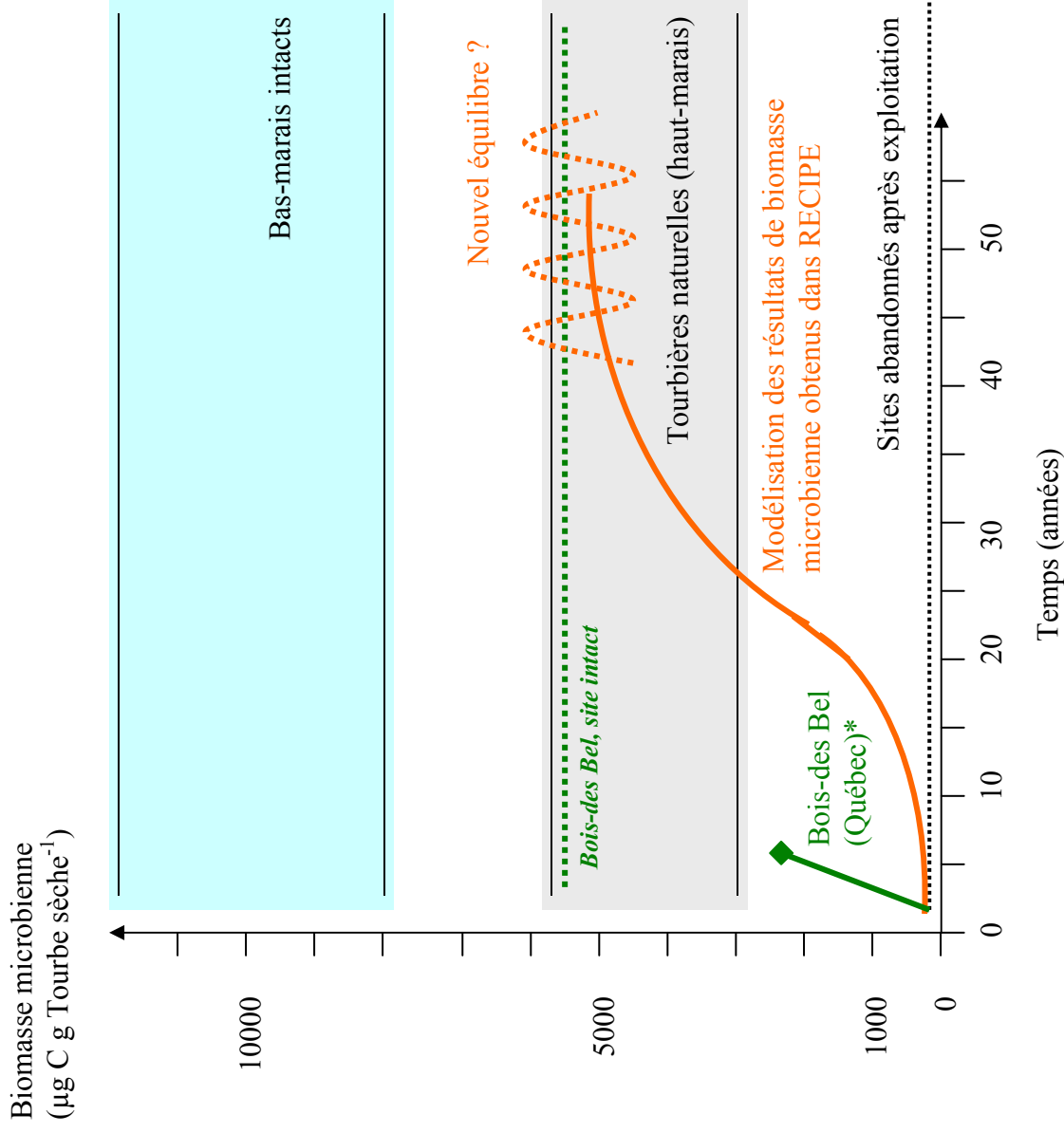


Figure 3. Dynamique de la biomasse microbienne C le long d'une chronoséquence de 55 ans de régénération (en orange). Les gammes de biomasse microbienne en tourbières naturelles intacts sont extraites des données de littérature (bas- et haut-marais),, sont représentées par les surfaces colorées (bleu et gris). Elles pourraient servir de références pour le suivi de la restauration, avec ou sans manipulation.

* A Bois-des-Bel, le stock moyen de carbone microbien de la tourbière intacte (site de référence) est de $5780 \pm 260 \mu\text{g C g DP}^{-1}$ en surface; il a atteint $2310 \mu\text{g C g DP}^{-1}$ quelques années seulement après la réintroduction de propagules sur les surfaces abandonnées après extraction.

Références

- Andersen, R., Francez, A.J., Rochefort, L., 2006. The physicochemical and microbiological status of a restored bog in Quebec: Identification of relevant criteria to monitor success. *Soil Biology & Biochemistry* 38, 1375-1387.
- Artz, R.R.E., Chapman, S.J., Siegenthaler, A., Bortoluzzi, E., Yli-Petäys, M., Francez, A.-J., 2007. Functional microbial diversity in cutover peatlands responds to restoration and is directed by labile carbon. *Journal of Applied Ecology* (submitted).
- Blankenburg, J., Tonnis, W.J., 2004. Guidelines for wetland restoration of peat cutting areas. Results of the BRIDGE-PROJECT. Bremen.
- Bortoluzzi, E., Epron, D., Siegenthaler, A., Gilbert, D., Buttler, A., 2006. Carbon balance of a European mountain bog at contrasting stages of regeneration. *New Phytologist* 172, 708-718.
- Francez, A.-J., 2000. La dynamique du carbone dans les tourbières à Sphaignes, de la sphaigne à l'effet de serre. *L'Année biologique* 39, 205-270.
- Francez, A.-J., Josselin, N., Chapman, S.J., Artz, R.R.E., Laggoun-Défarge, F., Buttler, A., Gattinger, A., Gilbert, B., Siegenthaler, A., Yli-Petäys, M., Vasander, H., 2007. Microbial carbon and nitrogen in abandoned peatlands after peat extraction: patterns of response to regeneration age and plant community at a European scale. *Journal of Applied Ecology* (submitted).
- Kivimäki, S.K., Yli-Petäys, M., Tuittila, E.S., 2007. Carbon sink function of sedge and *Sphagnum* patches in a restored cut-away peatland: increased functional diversity leads to higher production? *Journal of Applied Ecology* (submitted).
- Laggoun-Défarge, F., Mitchell, E.A.D., Gilbert, D., Disnar, J.R., Comont, L., Warner, B.G., Buttler, A., 2007. Assessing cutover bog regeneration by combined analyses of organic matter properties, bacteria, and testate amoebae (Protista). *Journal of Applied Ecology* (submitted).
- Samaritani, E., Siegenthaler, A., Yli-Petäys, M., Buttler, A., Christin, P.-A., Mitchell, E.A.D., 2007. Are Sphagnum-dominated regenerating cutover bogs carbon sinks or not? A study in the Swiss Jura Mountains with predictions of climate change impacts on the C balance. *Journal of Applied Ecology* (submitted).
- Schwarz, G., Froidevaux, V., Grosvernier, P., Rosselli, W., Tako, A., Vasander, H., Gattinger, A., Gilbert, D., Pheulpin, V.. Towards sustainable re-use options of rehabilitated peatlands in Europe - a comparative analysis of socio-economic implications and the impacts on the C balance. 2007.
- Siegenthaler, A., Gilbert, D., Mitchell, E.A.D., Gauthier, E., Steinmann, P., Artz, R.R.E., Yli-Petäys, M., Francez, A.-J., Comont, L., Laggoun-Défarge, F., Buttler, A., 2007. Surface microbial community structure along regenerating peatlands across Europe. *Journal of Applied Ecology* (in preparation).

Stén,C.-G., Toivonen,T.. Kihniössä tutkitut suot ja niiden turvevarat, English summary: The peat resources and their potential use in Kihniö, Western Finland. 16. 1990. Espoo, Finland, Geological Survey of Finland. Turvetutkimus, turveraportti 236.

Yli-Petäys, M., Laine, J., Vasander, H., Tuittila, E.S., 2007. CO₂-exchange of re-vegetated cut-away peatland five decades after abandonment. Boreal Environment Research (in press).