



PROTOCOLE DE SUIVI DES BOISEMENTS HUMIDES RIVULAIRES EN LIBRE ÉVOLUTION



Rapport intermédiaire 2023

Pierre-Yves Payen

Table des matières

Introduction	2
I. Fonctions et dynamiques des boisements rivulaires humides	2
1. Fonctions des boisements humides rivulaires	2
2. Dynamique évolutive des forêts naturelles	3
3. Connaissances sur la dynamique des boisements rivulaires.....	4
4. Phytosociologie des boisements rivulaires humides de Normandie	5
II. Méthodes	6
1. Objectifs et hypothèses.....	6
2. Protocoles de référence	7
3. Critères de suivi	7
4. Modalités de mise en place.....	9
4.1. Fréquence du suivi.....	9
4.2. Période et durée de prospection.....	9
4.3. Connaissances préalables.....	9
III. Mise en œuvre	10
1. Matériel	10
2. Plan d'échantillonnage des placettes.....	10
3. Description des placettes	12
4. Relevé pédologique et emplacement du piézomètre	13
5. Analyses chimiques du sol.....	13
IV. Fiches critères	14
A – État des lieux	14
B – Critères liés à la formation végétale.....	19
C – Critères hydrologiques	28
D – Télédétection et cartographie.....	35
Bibliographie	39

Introduction

Le PRELE, Programme Régional d'Espaces en Libre Evolution, est coordonné par le CEN Normandie. L'un des axes de travail de ce programme cherche à améliorer la connaissance des processus dynamiques qui animent ces espaces.

La libre évolution est une modalité de gestion non-interventionniste des espaces naturels. Il s'agit de laisser des terrains indépendants de l'activité humaine afin que s'expriment les processus écologiques des espèces et des habitats. Ce mode de gestion ne répond pas un objectif de conservation d'un compartiment particulier de la biodiversité mais il favorise le potentiel adaptatif des êtres vivants. La libre évolution privilégie des enjeux de fonctionnalités à moyen et long terme.

L'objectif de ce protocole est de suivre la dynamique des boisements humides rivulaires en libre évolution. D'une manière générale, il existe de nombreux suivis de la dynamique écologique de milieux ouverts ou de peuplements forestiers âgés. Il existe un manque d'informations sur le développement des stades intermédiaires de succession écologique que sont les jeunes boisements. Or, les espaces en libre évolution normands sont des stades forestiers jeunes. Il s'agit souvent d'espaces qui ont été délaissés par les activités humaines. Ils ont donc connu une colonisation ligneuse datant de quelques dizaines d'années au maximum.

D'autre part, l'écologie des zones humides est bien étudiée du fait des services écosystémiques qu'ils rendent. S'il existe de nombreux protocoles de suivi des zones humides des milieux ouverts (mares, tourbières, marais, prairies humides...), les boisements rivulaires humides, hormis les forêts des grandes vallées alluviales, ont rarement fait l'objet d'un suivi scientifique.

Il s'agit donc d'offrir un outil qui permette de comprendre la dynamique évolutive naturelle d'un boisement humide rivulaire et d'en assurer le suivi afin de qualifier ses stades évolutifs. Il pourra ainsi servir à argumenter en faveur de la libre évolution comme moyen de favoriser le développement de la biodiversité.

I. Fonctions et dynamiques des boisements rivulaires humides

Les boisements humides rivulaires sont l'objet de ce protocole de suivi. Il s'agit de formations végétales dont les espèces structurantes sont des arbres et qui sont situées à proximité d'un cours d'eau. Ce dernier est souvent lié à une nappe d'accompagnement avec qui s'effectuent des échanges hydrauliques et qui garantit la présence d'eau pendant des périodes plus ou moins longues. Les boisements humides rivulaires dépendent donc de la dynamique du cours d'eau. Leurs dimensions s'étendent d'un simple boisement de berge composé d'un alignement d'arbres situés sur les bords immédiats du lit mineur jusqu'à une forêt alluviale qui s'étend plus largement dans le lit majeur. Ils sont en outre régulièrement soumis aux crues qui, lorsqu'elles sont intenses, sont susceptibles de régénérer, voire de détruire, les boisements (DUFOUR & PIÉGAY, 2006 ; FNE AURA, 2019).

Les boisements rivulaires étudiés par ce protocole sont pour la plupart situés en têtes de bassin versant. Ils sont donc drainés par de petits cours d'eau proches des sources. Leurs dimensions sont plutôt petites, jusqu'à 20-30 m de largeur.

1. Fonctions des boisements humides rivulaires

Selon leurs fonctionnalités, les boisements humides rivulaires sont susceptibles de rendre de nombreux services écosystémiques dans différents domaines :

- **Régulation des crues** : recharge des aquifères et soutien du niveau d'eau dans le cours d'eau à l'étiage
- **Stabilisation des berges** : les boisements rivulaires permettent de maintenir les berges du cours d'eau et de les stabiliser grâce à leurs systèmes racinaires.
- **Amélioration de la qualité de l'eau** : les boisements rivulaires jouent un rôle de filtre végétal et réduisent la diffusion des polluants. Ils permettent la filtration des matières en suspension dans le cours d'eau et la limitation des transferts de polluants agricoles (Azote et Phosphore) vers le cours d'eau. Ils contribuent au stockage temporaire de sédiments dans le cours d'eau et sont le siège du recyclage des nutriments.
- **Stockage du carbone** : comme tout milieu forestier, les boisements humides assurent un rôle de captation et de stockage de CO₂. Ils en émettent aussi par respiration et décomposition mais constituent majoritairement un puit de carbone.
- **Refuge de biodiversité** (aquatique et terrestre) : les boisements rivulaires procurent une diversité d'habitats ; notamment parce qu'ils favorisent la création d'une diversité de faciès d'écoulement du cours d'eau. De plus, ils sont favorables aux peuplements piscicoles car ils limitent la variation de la température des cours d'eau grâce à l'ombrage procuré par les houppiers des arbres. Ils procurent aussi des ressources trophiques aux espèces animales et des zones de quiétude et de reproduction. Enfin, ils forment des corridors biologiques, connectés à la trame verte et à la trame bleue, qui permettent aux espèces de se déplacer.
- **Services socioculturels** : cette interface entre le cours d'eau et le milieu terrestre constitue des îlots de fraîcheur qui sont utilisés comme lieu de détente et de loisirs. Les boisements humides rivulaires structurent et contribuent directement à la qualité des paysages et y soulignent la présence du cours d'eau.

Les ripisylves sont liées au cours d'eau et, inversement, le bon fonctionnement du cours d'eau est associé à l'état de la ripisylve. Elles forment une interface entre milieux terrestres et aquatiques. Les ripisylves sont donc un élément de la trame verte qui profite à la trame bleue et réciproquement (FNE AURA, 2019).

2. Dynamique évolutive des forêts naturelles

Une forêt non-exploitée voit se succéder dans le temps plusieurs phases qui composent le **cycle sylvigénétique**. La dynamique d'une forêt dont le choix de gestion est la libre évolution devrait suivre ce cycle (Figure 1 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Une **phase de régénération** voit l'installation de semis et de fourrés et une forte sélection des arbres par compétition. Elle est suivie par une **phase d'établissement** où s'installent les arbres de la strate arborescente qui connaissent une croissance en hauteur. Dans la **phase de croissance** qui lui fait suite, les dimensions des arbres s'accroissent en diamètre. Ensuite, les signes de vieillissement des arbres apparaissent pendant la **phase d'apogée** où la mortalité des arbres augmente. Avant de se terminer, le cycle connaît une **phase de désintégration** avec une forte mortalité et un écroulement des arbres (ROSSI & VALLAURI, 2013)

Dans un espace en libre évolution, se met en place une succession écologique indépendante des facteurs anthropiques. La succession écologique est l'ensemble des divers stades de la dynamique de la végétation suivi par le développement de l'écosystème. Le milieu herbacé initial (prairie, roselière...) va d'abord être marqué par l'apparition de fourrés. Une strate arbustive puis une strate arborescente se développent ensuite. Chacune de ces strates intègre les précédentes et les modifie par les contraintes nouvelles qu'elles apportent. Les boisements étudiés par le protocole sont le siège d'une succession secondaire récente. Ils se sont mis en place suite à la destruction directe d'origine anthropique d'un écosystème antérieur (DECOQ *et al.*, 2021).

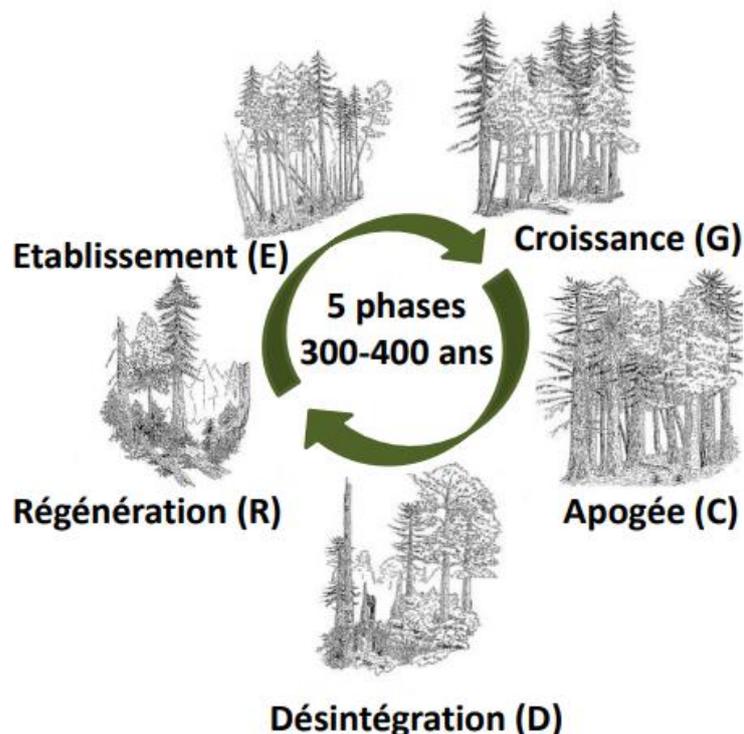


Figure 1 : Cycle sylvigénétique d'une forêt (LARRIEU & GOSSELIN, 2015 d'après Gonin, 1988)

Selon l'âge du peuplement forestier, trois stades de succession se mettent en place les uns après les autres. Ceux-ci sont caractérisés par le développement successif de différentes essences d'arbres. Le **stade pionnier** est déterminé par la présence des espèces pionnières telles que les saules, l'Aulne ou le Bouleau. Au stade **post-pionnier** se développent des espèces telles que le Frêne, l'Orme ou le Chêne. Au **stade mature** apparaissent les espèces dryades telles que le Hêtre. À tout moment dans la succession, il peut se produire des perturbations qui provoquent un retour en arrière à un stade intermédiaire.

3. Connaissances sur la dynamique des boisements rivulaires

Dans les boisements humides rivulaires, les stades matures ne sont pas caractérisés par la présence d'espèces dryades car l'engorgement du sol bloque la succession à un stade post-pionnier. En outre, ces milieux sont aussi soumis plus fréquemment à des événements qui provoquent des effondrements précoces d'arbres, par exemple lors de crues ou de tempêtes (Figure 2). Ce phénomène a deux conséquences : la quantité de bois mort dans le boisement s'en trouve accrue, et la structure du boisement se diversifie sous la forme d'une mosaïque végétale.

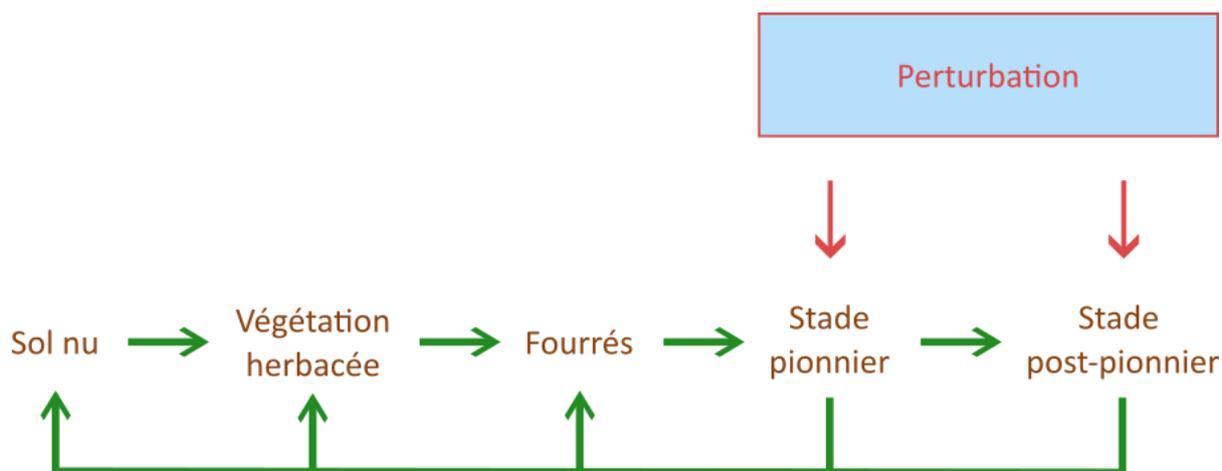


Figure 2 : Stades de succession écologique au sein d'un boisement humide rivulaire

Dans les secteurs soumis fréquemment à des événements perturbateurs, les stades pionniers ont une durée de vie courte de 5 à 10 ans. Les secteurs plus stables de stade pionnier peuvent vivre plusieurs décennies mais dépassent rarement le stade de croissance du cycle sylvigénétique. Les stades pionniers sont aussi les stades les plus favorables aux espèces exotiques envahissantes (Balsamines, Solidages et Renouées asiatiques).

En l'absence de perturbation, les espèces post-pionnières comme les chênes et les frênes vont se développer à l'ombre des essences pionnières. Certains stades post-pionniers vont pouvoir durer plus longtemps si les conditions abiotiques sont défavorables aux chênes et aux frênes. Les saules, incapables de germer à l'ombre de leurs parents, se maintiennent probablement par multiplication végétative. Les individus les plus âgés peuvent se maintenir pendant que s'accomplit l'ensemble du cycle sylvigénétique. Leur mortalité fragmente (PIÉGAY *et al.*, 2003).

4. Phytosociologie des boisements rivulaires humides de Normandie

Les différents stades de végétation de la succession écologique sont caractérisés par différents habitats, composés d'un cortège d'espèces végétales spécifiques. Une première étape de définition des habitats concernés par les boisements humides rivulaires présents en région Normandie a été réalisée. Le Tableau 1 liste les habitats potentiellement présents dans le cadre de notre protocole (LAVILLE & JUHEL, 2017 ; DARDILLAC *et al.*, 2019).

Tableau 1 : Habitats potentiellement présents dans les boisements humides rivulaires

	Type d'habitats	Alliances phytosociologiques
Boisements	Forêts riveraines et alluviales	<i>Alnion incanae</i>
	Aulnaies marécageuses	<i>Alnion glutinosae</i>
	Forêts de feuillus caducifoliés sur sols non marécageux	<i>Molinio caeruleae – Quercion roboris</i> <i>Fraxino excelsioris – Quercion roboris</i>
Fourrés	Fourrés riverains à bois tendres	<i>Salicion triandrae</i>
	Fourrés arbustifs sur sols non marécageux	<i>Salici cinereae – Rhamnion catharticae</i>

	Type d'habitats	Alliances phytosociologiques
Mégaphorbiaies et ourlets	Mégaphorbiaies eutrophiles d'eau douce	<i>Convolvulion sepium</i>
	Mégaphorbiaies mésotrophiles et neutrobasiophiles	<i>Thalictro flavi – Filipendulion ulmariae</i>
	Végétations vivaces des coupes forestières	<i>Carici piluliferae – Epilobion angustifolii</i>
	Ourlets vivaces des sols eutrophes	<i>Impatienti noli-tangere – Stachyion sylvaticae</i>
		<i>Arction lappae</i>
Roselières et grandes cariçaies hygrophiles	<i>Phragmition communis</i>	
Végétations amphibies	Friches annuelles amphibies eutrophiles des sols limoneux et argileux	<i>Bidention tripartitae</i>

Les habitats identifiés ont ensuite été classés dans le Tableau 2 selon le stade de succession écologique qu'ils représentent.

Tableau 2 : Habitats rencontrés aux différents stades de succession écologique

Milieus ouverts	Boisements pionniers	Boisements post-pionniers
<i>Bidention tripartitae</i>	<i>Humulo lupuli – Sambucion nigrae</i>	<i>Molinio caeruleae – Quercion roboris</i>
<i>Impatienti noli-tangere – Stachyion sylvaticae</i>	<i>Salici cinereae – Rhamnion catharticae</i>	<i>Fraxino excelsioris – Quercion roboris</i>
<i>Arction lappae</i>	<i>Salicion triandrae</i>	<i>Alnion incanae</i>
<i>Convolvulion sepium</i>	<i>Salicion cinereae</i>	<i>Alnion glutinosae</i>
<i>Thalictro flavi – Filipendulion ulmariae</i>		
<i>Carici piluliferae – Epilobion angustifolii</i>		
<i>Phragmition communis</i>		

II. Méthodes

1. Objectifs et hypothèses

L'objectif du protocole est de suivre la dynamique évolutive d'un boisement humide rivulaire en libre évolution. Il s'agit de proposer un protocole de suivi aux gestionnaires d'espaces naturels dont l'intérêt est de suivre des indicateurs traduisant la libre évolution de l'espace concerné.

Le protocole teste l'hypothèse qu'avec le temps la complexité du boisement et la diversité qu'il abrite vont augmenter. Cette complexité et cette diversité s'exprime par leur richesse biologique ainsi qu'en termes fonctionnels et structurels. Par la libre évolution, les processus écosystémiques du boisement suivent une dynamique spontanée. Ce protocole cherche à caractériser la complexification architecturale, l'accumulation de biomasse, qui traduisent la maturation de la communauté végétale (DECOCQ *et al.*, 2021).

2. Protocoles de référence

Il existe de nombreux protocoles qui étudient les forêts et boisements selon des objets et des objectifs différents. Le Protocole de Suivi Dendrométriques des Réserves Forestières (PSDRF) est un suivi de la dynamique des espaces forestiers protégés réalisé par Réserves Naturelles de France (RÉSERVES NATURELLES DE FRANCE, 2012). L'Indicateur de Biodiversité Potentiel (IBP) est un outil de diagnostic et de suivi de la biodiversité pour les gestionnaires forestiers proposé par le Centre National de la Propriété Forestière (LARRIEU & GONIN, 2016). L'Indice Biologique de la Connectivité des Ripisylves (IBCR) évalue la capacité d'accueil de la biodiversité et la connectivité des ripisylves. Il est réalisé par France Nature Environnement Auvergne-Rhône-Alpes (FNE AURA, 2019). Avec le guide Évaluer la naturalité, WWF propose une méthode d'évaluation de la naturalité des forêts anciennes (ROSSI & VALLAURI, 2013)

Ces protocoles partagent un certain nombre de critères d'évaluation et d'indicateurs qui ont été très utiles dans la création de ce protocole. La particularité des boisements rivulaires suivis par ce protocole a nécessité d'adapter les indicateurs existants et de rechercher des critères supplémentaires.

Des indicateurs spécifiques au suivi des zones humides ont été aussi utilisés, tels ceux de la boîte à outils Mhéo, ensemble de protocoles coordonnés par la Fédération des CEN (COLLECTIF RHOMEO, 2014).

3. Critères de suivi

Un ensemble de 29 critères d'évaluation et de suivi a été établi pour réaliser le suivi de la dynamique des boisements humides rivulaires (Tableau 3). En outre, ces critères de suivi sont regroupés par grands types de facteurs qui nous permettront de caractériser l'évolution du boisement au cours du temps. Les **facteurs contextuels** fournissent des informations générales sur le boisement. Les **facteurs socio-économiques** regroupent des critères qui renseignent sur les actions anthropiques *in situ* passées et sur l'influence des activités environnantes actuelles. Les **facteurs biotiques** étudient la formation végétale à travers les caractéristiques du peuplement forestier. Les **facteurs édaphiques et hydrologiques** permettent l'étude des fonctionnalités de la zone humide concernée. Les premiers recouvrent des critères qui analysent les grands cycles biogéochimiques et les deuxièmes les influences réciproques entre le boisement et le cours d'eau qui le traverse. Enfin, le site est aussi situé dans son contexte paysager à travers les **facteurs de connectivité et de pressions**.

Une particularité du protocole est d'explorer plusieurs échelles de suivi. De nombreux indicateurs sont étudiés sur un ensemble de **placettes** distribuées selon un plan d'échantillonnage stratifié, ou de **sous-placettes** qui y sont incluses. D'autres critères de suivi décrivent l'évolution du cours d'eau et sont donc relevés le long de son **linéaire**. Le boisement est suivi et caractérisé par différents critères à l'échelle du site étudié. Enfin, des critères effectuent le suivi à l'échelle du paysage, à l'intérieur d'une **zone tampon** dont les dimensions sont fonction de la surface du boisement étudié.

Dans un premier temps, certains critères sont utilisés afin de dresser un **état des lieux** du site en libre évolution. La majorité des critères a été choisie pour décrire et mettre en évidence les **dynamiques des boisements** par une exploration *in situ*. Enfin, différents outils de **téledétection et de cartographie** sont utilisés à l'échelle du boisement et du paysage dans lequel il s'inscrit.

Tableau 3 : Critères de suivi regroupés par facteurs d'influence.

Facteurs	Critères	Code du critère	Échelle	État des lieux ou Suivi
Facteurs contextuels	Site	A1	Site	État des lieux
	Boisement	D1	Site	Suivi
	Clairières, trouées au sein du boisement	D2	Site	Suivi
	Continuité temporelle de l'état boisé	A2	Site	État des lieux
	Milieux aquatiques complémentaires au cours d'eau	C1	Linéaire du cours d'eau	Suivi
Facteurs socio-économiques	Exploitation forestière	A3	Site	État des lieux
	Essences allochtones	B6	Placette	Suivi
	Espèces exotiques envahissantes	B7	Placette	Suivi
Facteurs biotiques	Structure verticale de la végétation	B1	Placette	Suivi
	Éclaircissement en sous-bois	B2	Placette	Suivi
	Bois mort	B3	Placette	Suivi
	Bois vivant	B4	Placette	Suivi
	Dendromicrohabitats	B5	Placette	Suivi
	Régénération	B8	Sous-placette	Suivi
Facteurs édaphiques	Indice Floristique de Fertilité du sol	B9	Placette	Suivi
	Indice Floristiques d'engorgement	C6	Placette	Suivi
	Géologie	A4	Site	État des lieux
	Pédologie	A5	1 placette	État des lieux
	Analyses chimiques de sol : Substances humiques	C7	1 placette pour 3-5 ha de strate d'échantillonnage	Suivi
Facteurs hydrologiques	Faciès d'écoulement du cours d'eau	C2	Linéaire du cours d'eau	Suivi
	Longueur du cours d'eau	A6	Site	État des lieux
	Embâcles	C3	Linéaire du cours d'eau	Suivi
	Position de la nappe	C4	1 placette	Suivi
	Connectivité longitudinale du cours d'eau	A7	Linéaire du cours d'eau	Suivi
	Connectivité transversale du cours d'eau	A8 C5	Linéaire du cours d'eau	État des lieux Suivi
Facteurs de continuité et de pression	Pression d'artificialisation	D3	Zone tampon	Suivi
	Pression de pratiques agricoles	D4	Zone tampon	Suivi

En outre, ces critères de suivi sont regroupés par grands types de facteurs qui nous permettront de caractériser l'évolution du boisement au cours du temps. Les **facteurs contextuels** fournissent des informations générales sur le boisement. Les **facteurs socio-économiques** regroupent des critères qui renseignent sur les actions anthropiques *in situ* passées et sur l'influence des activités environnantes actuelles. Les **facteurs biotiques** étudient la formation végétale à travers les caractéristiques du peuplement forestier. Les **facteurs édaphiques et hydrologiques** permettent l'étude des fonctionnalités de la zone humide concernée. Les premiers recouvrent des critères qui analysent les grands cycles biogéochimiques et les deuxièmes les influences réciproques entre le boisement et le cours d'eau qui le traverse. Enfin, le site est aussi situé dans son contexte paysager à travers les **facteurs de connectivité et de pressions**.

Une particularité du protocole est d'explorer plusieurs échelles de suivi. De nombreux indicateurs sont étudiés sur un ensemble de **placettes** distribuées selon un plan d'échantillonnage stratifié, ou de **sous-placettes** qui y sont incluses. D'autres critères de suivi décrivent l'évolution du cours d'eau et sont donc relevés le long de son **linéaire**. Le boisement est suivi et caractérisé par différents critères à l'échelle du site étudié. Enfin, des critères effectuent le suivi à l'échelle du paysage, à l'intérieur d'une **zone tampon** dont les dimensions sont fonction de la surface du boisement étudié.

4. Modalités de mise en place

4.1. Fréquence du suivi

Un pas de temps de 10 ans a été choisi. De nombreux indicateurs de suivi de zones humides préconisent un suivi tous les 5 ans. Cependant, les boisements humides rivulaires suivent une dynamique de libre évolution. Il est donc supposé que les processus en cours se font sur une durée plus longue que dans un site naturel où des interventions de gestion sont mises en place.

4.2. Période et durée de prospection

La période optimale de recueil des données du protocole est le printemps, dès que le feuillage des arbres est en place, soit vers les mois de mai et juin.

Le temps passé sur le terrain pour collecter les données des indicateurs est dépendant du nombre de placettes suivies et donc de la superficie du site. Grâce au test de la précédente version du protocole, la durée a été estimée à une heure par placette. Avec l'expérience de l'opérateur, la durée de recueil des données par placette diminue au cours du temps. Il faut ajouter à cela le temps nécessaire pour relever les informations liées au cours d'eau. La durée est là aussi estimée à une heure.

4.3. Connaissances préalables

Un certain nombre de connaissances préalable est nécessaire à la réalisation de ce protocole. Certaines sont liées à l'utilisation d'outils tels que le logiciel SIG ou le densiomètre convexe. Ce dernier nécessite en outre un calibrage régulier qui est cependant abordable sans prérequis pour l'opérateur.

Des connaissances plus techniques sont requises comme l'identification des espèces végétales et des dendromicrohabitats. Pour ces derniers, une aide est apportée par une fiche présente en annexe.

Le protocole détaille aussi les critères d'identification des traits d'hydromorphie des sols et des faciès d'écoulement du cours d'eau.

III. Mise en œuvre

1. Matériel

- Décamètre
- GPS et Boussole
- Carte du site et coordonnées GPS des placettes de suivi
- Plaquettes de soutien et Fiches de terrain à imprimer :

1 exemplaire pour la fiche « État des lieux – Cours d'eau » ;

Autant d'exemplaires que de placettes de suivi pour la fiche « Placettes ».

- Tiges métalliques (fer à béton de plus de 50 cm) ou bornes de géomètre (ex : bornes FENO) pour matérialiser le centre de placette
- 1 Masse ou marteau
- 2 Cordelettes de 20 m de long
- Pied à coulisse forestier
- Bottes et vêtements de terrain
- Compteur manuel
- Appareil photo / téléphone
- Couteau
- Typologie des dendromicrohabitats (Larrieu *et al.*, 2018 : annexe)
- Thermomètre
- Carottier ou tarière pédologique
- 3 Sachets plastiques refermables
- Glacière
- Piézomètre

2. Plan d'échantillonnage des placettes

Le suivi des facteurs liés à la formation végétale est réalisé sur un ensemble de placettes circulaires de 20 m de diamètre. La répartition des placettes dans le boisement suit un plan d'échantillonnage aléatoire stratifié. L'inventaire statistique est plus adapté qu'un inventaire en plein pour un suivi dans le temps. Ce type d'échantillonnage permet en outre de ne pas passer à côté de situations rares (TOMASINI, 2002).

Dans le cas où le boisement présente des stades de succession écologiques d'âges différents, ils devront être mis en évidence par télédétection dans le proche infra-rouge. À l'échelle d'un peuplement d'arbres, la réponse spectrale dans ce domaine de longueur d'onde est notamment influencée par l'âge. La BDORTHO en infrarouge fausses couleurs de l'IGN sera donc utilisée dans ce but dans le logiciel SIG. Cette information est corrélée par l'étude des photos aériennes qui permet, dans le contexte normand, de dater le début de la fermeture du milieu.

Dans les différentes parties du boisement, le taux d'échantillonnage sera identique afin que la surface échantillonnée soit représentative de tous les âges du boisement. Cela permet aussi d'évaluer les dynamiques propres de chaque stade de végétation identifié. Pour des raisons de coût, si le taux d'échantillonnage est supérieur à 10 %, il est préférable de réaliser un inventaire en plein plutôt qu'un inventaire statistique. Le taux d'échantillonnage du protocole qui a été choisi est donc de 10 % (TOMASINI, 2002). Par conséquent, le Tableau 4 donne le nombre de placettes à échantillonner en fonction de la surface de la strate.

Afin de faciliter la délimitation des placettes, leur forme est circulaire. Comme, la largeur moyenne d'un boisement rivulaire est d'environ 30 m, le diamètre des placettes est fixé à 20 m.

Tableau 4 : nombre de placettes nécessaires selon la superficie de la strate échantillonnée

Surface (ha)	Nombre de placettes
1	3
2	6
3	10
4	13
5	16
6	19
7	22
8	25
9	29
10	32

L'emplacement des placettes est déterminé de manière aléatoire sous logiciel SIG : après avoir créé une matrice de points équidistants de 20 m sur l'ensemble du boisement (Figure 3), un nombre de points correspondant au nombre de placettes à échantillonner est sélectionné de manière aléatoire. Chaque point représente le centre d'une placette d'échantillonnage. Il sera donc défini une zone tampon de 10 m de rayon autour du centre de chaque placette. Si le tampon est situé en partie en dehors du périmètre du site, il sera déplacé à l'intérieur de celui-ci tangentiellement à sa bordure. La même opération doit être réalisée si un tampon est situé à cheval entre deux strates d'échantillonnage ou s'il est traversé par le cours d'eau. En revanche, cette opération ne concerne pas les tampons recouvrant une partie non-boisée située à l'intérieur du périmètre. Les différents cas de figure sont présentés par la Figure 4. Le centroïde de la nouvelle placette est ensuite calculé à nouveau. Les coordonnées GPS de chaque centroïde sont alors relevées afin de les matérialiser sur le terrain.

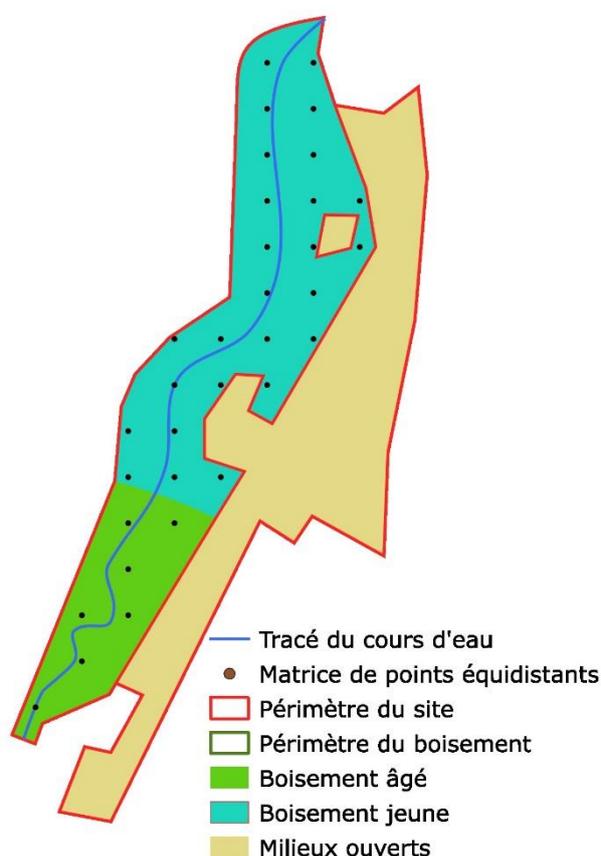
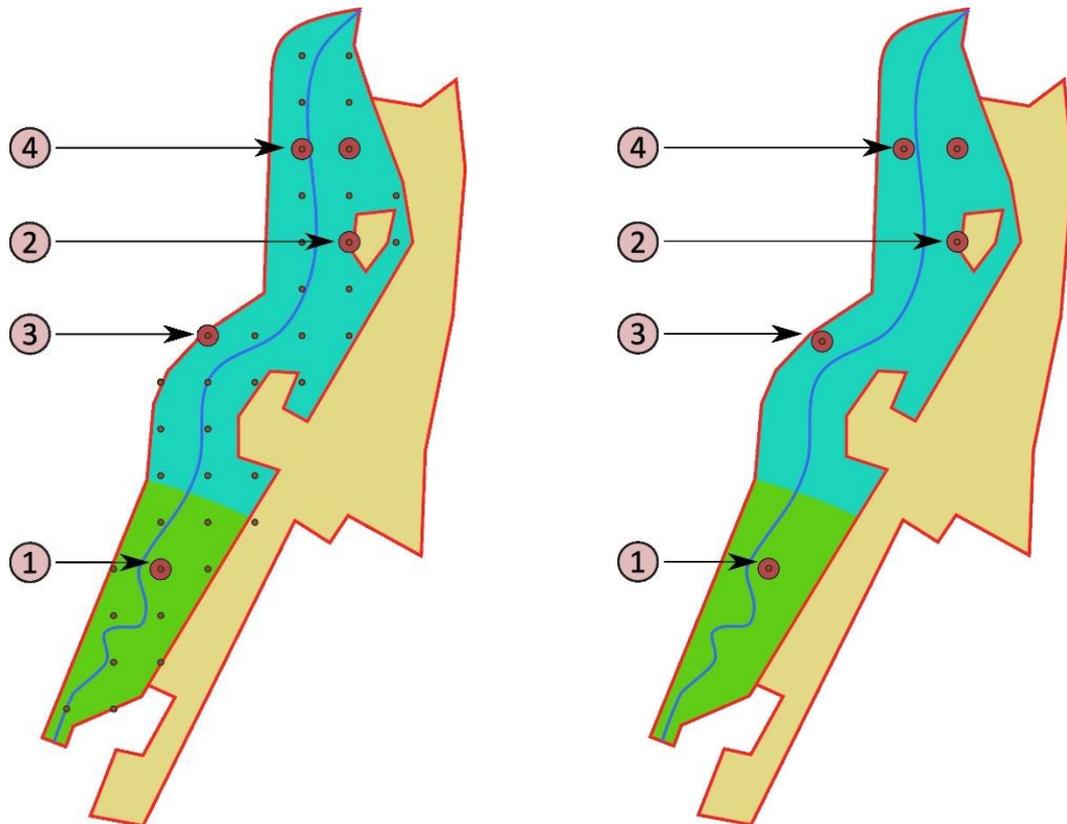


Figure 3 : création de la matrice de points équidistants



Légende :

- | | |
|----------------------------------|------------------------|
| ● Matrice de points équidistants | — Tracé du cours d'eau |
| ■ Placettes sélectionnées | ■ Boisement âgé |
| □ Périmètre du site | ■ Boisement jeune |
| □ Périmètre du boisement | ■ Milieux ouverts |

Figure 4 : Optimisation de l'emplacement des placettes

Cas n°1 : la placette est bien située au cœur d'une strate. Elle reste en place.

Cas n°2 : une placette est à cheval entre un boisement et une trouée en son sein. La trouée est prise en compte dans la placette. Celle-ci reste en place.

Cas n°3 : la placette est à cheval sur la bordure du boisement.

Cas n°4 : une placette est à cheval sur le cours d'eau.

Dans les cas n°3 et 4, la placette doit être déplacée. La deuxième partie de la figure propose un nouvel emplacement pour les placettes.

3. Description des placettes

Les placettes seront matérialisées de manière permanente par un piquet métallique (fer à béton, borne de géomètre) au centre. De plus, trois repères (arbre, rocher...) proches du centre de la placette seront marqués et photographiés afin d'aider à retrouver plus facilement le piquet métallique la fois suivante. Les coordonnées GPS (Système de coordonnées, longitude, latitude, précision au moment de la mesure) seront également relevées. Le repérage au seul GPS de navigation, s'il peut aider lors du cheminement, ne donne pas une assez bonne précision pour retrouver précisément le centre de la placette (Dufour & Pont 2006).

Ces placettes sont divisées en quatre quadrants à l'aide de cordelettes pour éviter tout oubli de comptage ou un comptage double (Figure 5). Cette délimitation permet aussi de bien situer la surface réelle à prendre en compte. Enfin, deux sous-placettes seront positionnées sur les espaces les plus ouverts de la placette dans le but de pouvoir mettre en place certains descripteurs. Ces deux sous-placettes de 2 m de diamètre doivent être également géolocalisées à partir de leur centre.

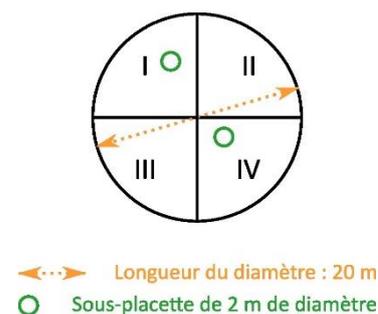


Figure 5 : Schéma descriptif d'une placette

Chaque placette doit être prise en photo. Pour chaque placette, il est important de noter :

- Le numéro de la placette
- Le nom du ou des observateurs
- La date et l'heure du relevé
- La pente en degrés
- L'exposition (si la pente est supérieure à 10 %)

4. Relevé pédologique et emplacement du piézomètre

Le protocole recommande d'effectuer un relevé pédologique dans le boisement suivi. Le point de prélèvement de sol est choisi préalablement sous SIG, de préférence dans une partie centrale du site. Ce point est aussi utilisé pour poser le piézomètre. Il doit donc être situé dans le lit majeur du cours d'eau. En s'appuyant sur l'observation de la microtopographie de surface, on évitera de positionner le piézomètre dans un creux ou sur une butte qui constituerait une situation singulière à l'échelle du site.

5. Analyses chimiques du sol

Au minimum, un prélèvement doit être réalisé par strate issue du plan d'échantillonnage. Le tableau ci-dessous indique le nombre de placette d'échantillonnage à choisir selon la superficie des strates. Pour chaque placette, il faut prélever trois carottes de sol de 20 cm d'épaisseur, retirer les végétaux et la litière en conservant le sol autour des racines et les éventuels macro-débris et cailloux. Mettre les 9 carottes dans un sac, fermer hermétiquement et les stocker dans une glacière. Bien mélanger/homogénéiser les neuf carottes. Le prélèvement de sol peut être conservé au réfrigérateur pendant quelques jours.

Tableau 5 : nombre de placette où sont effectués les prélèvements en fonction de la surface de la strate échantillonnée

Surface de la strate	Nombre de placettes
Moins de 5	1
De 5 à 10 ha	2
De 10 à 25 ha	3

La carotte extraite est stockée dans un sac plastique fermé hermétiquement à 4°C jusqu'à la réalisation des analyses.

Pour des échantillons destinés à la mesure de la masse volumique, il faut porter le plus grand soin à ne pas compacter le sol lors du prélèvement. La taille de la carotte sera mesurée précisément, afin de connaître son volume.

Une mesure de la température du sol permet de déterminer si on se trouve en condition propice à l'activité bactérienne (au-dessus de 4 °C).

IV. Fiches critères

A – État des lieux

Ces critères proposent un état des lieux du boisement humide rivulaire en libre évolution étudié par le protocole. À l'échelle du site du boisement, ils décrivent le contexte dans lequel il a évolué et celui dans lequel il se situe actuellement. Ils ne seront quantifiés et évalués qu'à la mise en place du protocole. Dans la mesure où ils font référence à un état passé du site ou à des critères dont l'évolution n'est pas impactée par la mise en libre évolution, ils ne seront pas repris lors du suivi.

Facteurs contextuels

Critère A1 Surface du site

Principes et objectifs

Ce descripteur mesure la surface du site dont le mode de gestion est la libre évolution. Il est différent du critère « Surface du boisement » dans la mesure où l'entièreté du site n'est pas boisée à l'état initial. Il est en revanche possible que la totalité du site soit colonisée par le boisement étudié. La mesure de la surface permet de caractériser le site. Ce paramètre n'évoluera pas au cours du suivi, sauf décision du propriétaire du site.

Méthode

La mesure se fait au bureau sous logiciel SIG à partir d'orthophotoplan. Dans une couche polygone est créée une entité qui recouvre les limites du site. La surface de ce polygone est ensuite calculée et donne la surface du site.

Si la couche polygones n'existe pas au préalable, il est nécessaire de la créer dans un premier temps. À partir de l'orthophotoplan du site, il faut ensuite y ajouter ensuite une entité polygonale qui recouvre l'entièreté du site. Dans la table attributaire de la couche polygone, un champ intitulé « surface » est créé afin d'y calculer la surface du polygone. Le résultat donne la surface du site.

Critère A2 Continuité temporelle de l'état boisé

Principes et objectifs

Ce critère évalue la continuité dans le temps de l'état boisé depuis le XVIII^e siècle. Il se base pour cela sur les cartes et photographies aériennes anciennes. Il apporte des facteurs explicatifs pour comprendre les autres critères définis par le protocole.

En France, les forêts ont subi jusqu'au milieu du XIX^e siècle de nombreux déboisements jusqu'à atteindre un minimum forestier où elles ont occupé une surface minimale. Le minimum forestier a été atteint au milieu du XIX^e siècle. Les forêts présentes à cette époque ont une forte probabilité de ne pas avoir été défrichées. Les boisements ont ensuite reconquis de nouvelles surfaces suite à des changements, notamment de pratiques agricoles (ROSSI & VALLAURI, 2013).

Méthode

D'une part, ce critère évalue l'ancienneté du boisement grâce à des cartes anciennes. D'autre part, il met en évidence l'exploitation du bois dans la deuxième moitié du XX^e siècle à l'aide des photographies aériennes. Deux sources sont utilisables pour déterminer la continuité temporelle du boisement avant le minimum forestier :

- La carte de Cassini, levée entre 1749 et 1790, reporte les massifs boisés, mais de manière non exhaustive, avec des limites et une localisation peu précises
- La carte de l'état-major (levée entre 1818 et 1866) disponible sur le site Géoportail de l'IGN (www.geoportail.gouv.fr) couvre toute la France métropolitaine et reporte avec précision l'utilisation du sol et la localisation des boisements (GONIN *et al.*, 2022)

Dans le cas des boisements récents, il est possible de déterminer la date de colonisation forestières à l'aide des photographies aériennes du site remonter le temps de l'IGN (remonterletemps.ign.fr/). Les campagnes de relevés photographiques ont commencé dans la première moitié du XX^e siècle et ne couvraient qu'une partie du territoire. Par la suite la couverture effectuée par les campagnes est systématique.

Les photographies aériennes peuvent être utilisées en complément de la connaissance de l'histoire de la parcelle de boisement. Dans le cas d'une parcelle anciennement soumise à une exploitation agricole ou à une autre activité, la date d'abandon de cette activité donne une indication précieuse de la mise en libre évolution de la parcelle.

Facteurs socio-économiques

Critère A3 Exploitation forestière

Principes et objectifs

L'exploitation forestière est un facteur socio-économique datant d'un usage antérieur du site. Une fois arrêtées, les pratiques sylvicoles anciennes peuvent encore expliquer une partie de la structure et du fonctionnement du boisement aujourd'hui (ROSSI & VALLAURI, 2013).

La présence de souches marque l'exploitation forestière passée du boisement. Ce marqueur disparaîtra au cours de sa dynamique en libre évolution.

Méthode

Ce critère consiste à relever les coordonnées GPS et prendre une photo des souches identifiées sur le terrain. L'observation de ces souches peut être faite lors des relevés sur les placettes ou lors du suivi le long du cours d'eau.

Facteurs édaphiques

Critère A4 Géologie

Principes et objectifs

Les caractéristiques des roches sous-jacentes ont une influence sur le sol des boisements humides rivulaires. Deux grands ensembles géologiques se partagent la Normandie. Le Massif armoricain, d'une part, est constitué de roches majoritairement siliceuses et possède de faibles ressources en eaux souterraines. Le Bassin parisien, quant à lui, est constitué de roches sédimentaires principalement calcaires et possède des gisements d'eaux souterraines (aquifères) importants et étendus. La nature du sous-sol permet de déterminer le caractère acide ou alcalin du milieu.

Méthode

La nature de la géologie du boisement est déterminée à l'aide des cartes géologiques disponibles sur le site Internet de l'IGN Géoportail (<https://www.geoportail.gouv.fr/>). La carte à l'échelle 1/50 000 est plus précise et permet de mettre en évidence le caractère acide ou alcalin du sous-sol. Son interprétation nécessite de télécharger sa notice. Elle est disponible sur le visualiseur simplifié du site Internet du BRGM (<http://infoterre.brgm.fr/viewerlite/MainTileForward.do>), en cliquant sur l'icône « Légendes » puis sur accéder à la légende dynamique et aux notices.

Critère A5 Pédologie

Principes et objectifs

L'indicateur vise à vérifier la présence de trait d'hydromorphie dans le sol du boisement. Le caractère hydromorphe du sol se traduit par une accumulation de matières organiques et/ou par des phénomènes d'oxydo-réduction du fer. Il existe deux grandes catégories de sols de zones humides. Les **sols organiques** sont caractéristiques des zones humides para-tourbeuses et des tourbières. L'hydromorphie de ces sols est totale et permanente pour l'ensemble de leur profil constitué d'**horizons histiques**. Les **sols minéraux hydromorphes** où l'eau est présente une partie de l'année forment la deuxième catégorie. Les traits d'hydromorphie de ces sols fonctionnels débutent toujours à moins de 50 cm de la surface et se prolongent ou s'intensifient en profondeur. La fréquence de saturation en eau permet de distinguer :

- Les **sols rédoxiques (g)** qui correspondent à des périodes de saturation temporaire. Ils se caractérisent par la présence de taches de couleur rouille enrichies en fer et de trainées claires appauvries en fer ;
- Les **sols réductiques (G)** où les processus de réduction du fer dominent en raison de la saturation en eau permanente ou quasi-permanente du sol. La répartition du fer est plutôt homogène, ce qui se traduit par une couleur bleuâtre à verdâtre très uniforme. Si la saturation n'est pas permanente, lors des périodes de dessèchement la réoxydation provoque l'apparition de taches de rouille qui disparaissent lorsque le sol est de nouveau saturé (COLLECTIF RHOMEO, 2014).

Méthode

Un point de relevé est réalisé sur chaque site. Les coordonnées GPS du point de prélèvement doivent être enregistrées.

L'échantillon de sol est prélevé à la tarière sur les 50 à 60 premiers centimètres du sol. Les étapes d'un relevé à la tarière par carottage sont les suivantes :

- Après avoir dégagé la surface du sol, si nécessaire, prélever l'intégralité de la première carotte dans la tête de la tarière.
- Lorsque la tête de la tarière est remplie, cela correspond à un avancement de 20 cm.
- Nettoyer la surface pour éliminer les éventuelles salissures avec un couteau.
- Déposer ces 20 premiers centimètres sur le sol.
- Les 20 premiers centimètres de sol sont prélevés
- Recommencer les trois premières étapes. À partir de là, on ne conserve que les 10 cm situés dans la partie inférieure de la tête de la tarière. Le reste correspond à du matériau qui a été remanié lors de la réalisation du sondage.
- Déposer de nouveau la carotte, au bout du précédent prélèvement (attention à prendre la profondeur de prélèvement pour bien positionner le tronçon extrait sur le profil de la carotte).
- Répéter l'opération jusqu'à environ 1,20 m, si possible. Une fois le sondage réalisé, nous disposons d'une vision d'ensemble du profil reconstitué. Positionner en parallèle une règle ou un mètre en guise d'échelle et prendre une photo du profil.

Chaque échantillon est pris en photo. L'examen du sondage pédologique vise à vérifier la présence d'horizons histiques, de traits réductiques et/ou de traits rédoxiques (Figure 6). Le critère demande de noter à quelle profondeur du sol commence et finit l'apparition des traits d'hydromorphie. La profondeur d'apparition des traits d'hydromorphie permet de classer le type de sol hydromorphes du boisement étudié.

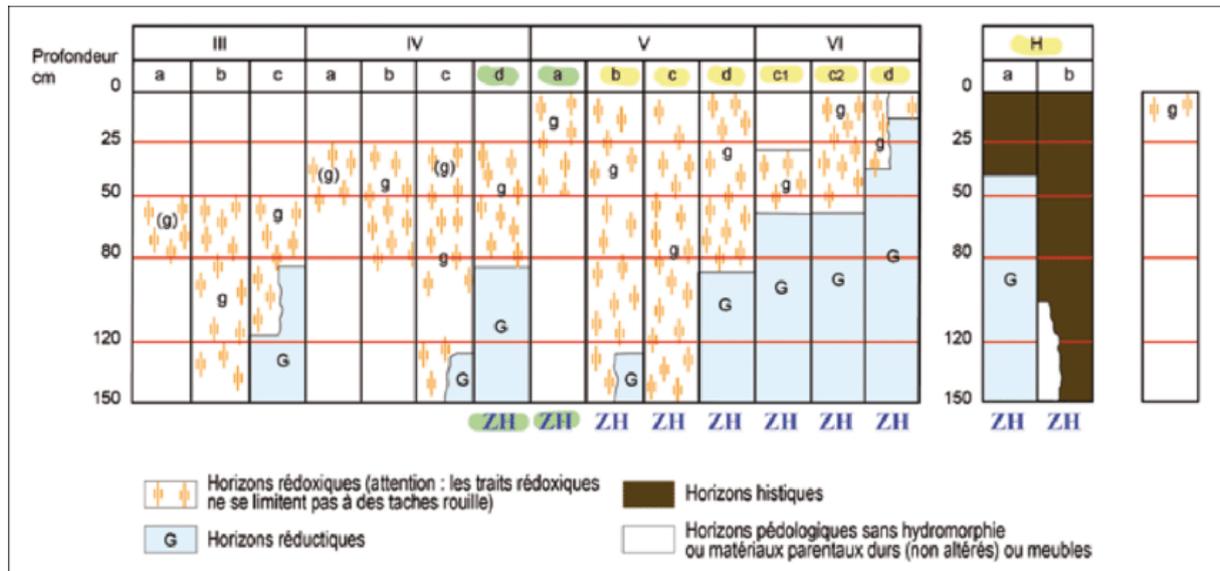


Figure 6 : Classes d'hydromorphie des sols de zones humides.

Facteurs hydrologiques

Critère A6 Caractéristiques du cours d'eau

Principes et objectifs

La longueur du tronçon du cours d'eau mesurée pour l'état des lieux est la portion du cours d'eau qui traverse le site.

La pente hydraulique est le ratio de la baisse d'élévation d'un cours d'eau par unité de distance. La pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin versant donc le temps de concentration. Cette variable influence donc le débit maximal observé. Une pente abrupte favorise et accélère l'écoulement superficiel, tandis qu'une pente douce ou nulle donne à l'eau le temps de s'infiltrer, entièrement ou en partie, dans le sol (école polytechnique de Lausanne).

L'ordination de Strahler prend en compte la structure et la densité du réseau, variables selon la situation géographique. C'est l'un des indices les plus significatifs en termes de processus hydrologiques au niveau du bassin (WASSON *et al.*, 2003).

Méthode

La longueur du cours d'eau est mesurée au bureau sous logiciel SIG à partir de la BD TOPAGE, qui est le nouveau référentiel hydrographique français. Dans la couche CoursEau-FXX, l'entité linéaire qui représente le cours d'eau traversant le boisement est extraite par localisation grâce à la couche polygone qui représente le site. L'outil de géotraitement « couper... » est utilisé pour découper la partie du cours d'eau incluse dans le site. Dans la table attributaire de l'entité linéaire, un champ intitulé « longueur » est créé afin d'y calculer la longueur de l'entité. Le résultat donne la longueur du cours d'eau, appelée **L**.

La pente hydraulique est le ratio de la baisse de l'élévation d'un cours d'eau par unité de distance horizontale (Wikipedia). La méthode la plus fréquemment utilisée pour calculer la pente longitudinale du cours d'eau consiste à diviser la différence d'altitude entre les points extrêmes du profil par la longueur totale du cours d'eau.

$$P = \frac{\Delta H_{max}}{L}$$

Où : **P** : Pente moyenne du cours d'eau [m/km] ;
ΔHmax : Dénivellation maximale de la rivière [m] (différence d'altitude entre le point le plus élevé et le plus bas) ;
L : Longueur du cours d'eau principal [km].

Dans la classification de Strahler, tout cours d'eau qui n'a pas d'affluent se voit attribuer la valeur 1. Puis, le calcul de la valeur de chaque tronçon se fait selon la méthode suivante : un tronçon d'ordre n+1 est issu de la confluence de deux cours d'eau d'ordre n.

Critère A7 Connectivité longitudinale du cours d'eau

Principes et objectifs

Les cours d'eau, accompagnés par Les boisements humides rivulaires, sont des éléments essentiels de la trame verte et bleue qui remplissent le rôle de corridors biologiques pour la biodiversité. Leur continuité est essentielle pour assurer les liens entre les réservoirs de biodiversité qui subsistent.

Ce critère cherche à recenser les ouvrages artificiels qui font obstacle à l'écoulement et à la continuité écologique du cours d'eau.

Méthode

La présence d'obstacles à l'écoulement ou d'infrastructures de transport qui franchissent le cours d'eau est dénombrée le long du cours d'eau sur le terrain. Leurs coordonnées GPS sont relevées afin de pouvoir être cartographiées. Si les ouvrages qui font obstacles à la continuité écologique du cours d'eau sont déjà répertoriés sur la carte topographique de l'IGN, il suffit de les reporter dans le SIG.

Critère A8 Connectivité transversale du cours d'eau

Principes et objectifs

Les boisements humides rivulaires sont situés dans le lit majeur du cours d'eau qui constitue un espace où l'eau du cours d'eau en crue peut se déverser. Ces crues permettent aux sédiments et au bois charrié par le cours d'eau de se déposer dans le lit majeur. Celui-ci est donc le siège d'échanges entre le cours d'eau et son boisement rivulaire. Les aménagements des cours d'eau ont souvent dégradé les fonctionnalités écologiques des berges en réduisant ou en interrompant ces échanges (DAJOUX *et al.*, 2020)

L'étude de la connectivité transversale vise à estimer la connexion latérale du cours d'eau avec ses berges et/ou les zones tampons attenantes. L'état des lieux du protocole cherche à identifier la présence de structures d'origine anthropique qui rompent cette connectivité :

- Palplanches et enrochements utilisés pour stabiliser les berges. Ils produisent une déconnexion de la berge avec le cours d'eau et empêchent l'établissement d'une végétation,
- Dignes qui empêchent le débordement du cours d'eau dans son lit majeur.

Méthode

La présence de digues et leur longueur est notée sur le terrain par relevé GPS ou directement sur la carte si possible. La longueur de celle-ci est aussi mesurée, par exemple sous logiciel SIG au bureau.

B – Critères liés à la formation végétale

Ces critères sont suivis à l'échelle d'un réseau de placettes fixes distribuées selon un plan d'échantillonnage stratifié du boisement étudié. Ils appartiennent à des facteurs biologiques mais également à des facteurs socio-économiques.

Facteurs biotiques

Les facteurs biotiques décrivent la naturalité biologique du boisement humide rivulaire en libre évolution. Les critères choisis sont des indicateurs structurels de biodiversité. Les structures qu'ils décrivent permettent de fournir des renseignements de manière indirecte sur l'état de cette dernière. Les différents critères vont renseigner l'évolution de la naturalité du boisement au fur et à mesure des périodes de prospection et d'analyse. Les critères concernés sont la structure verticale et horizontale de la végétation, la quantité de bois morts et de bois vivant, la présence de dendromicrohabitats, la régénération de la parcelle et l'abrouissement.

Critère B1 Structure verticale de la végétation

Principes et objectifs

La structure verticale de la végétation est un des facteurs qui décrit la morphologie d'un boisement. Ce critère permet de comprendre le développement des essences végétales dans un espace en libre évolution. Il étudie la complexité structurale du boisement en mettant en avant l'hétérogénéité du milieu.

Méthode

Le pourcentage de recouvrement de chaque strate est estimé visuellement par classes de 10 % sur l'ensemble de chaque placette. La Figure 7 apporte une aide pour réaliser cette estimation.

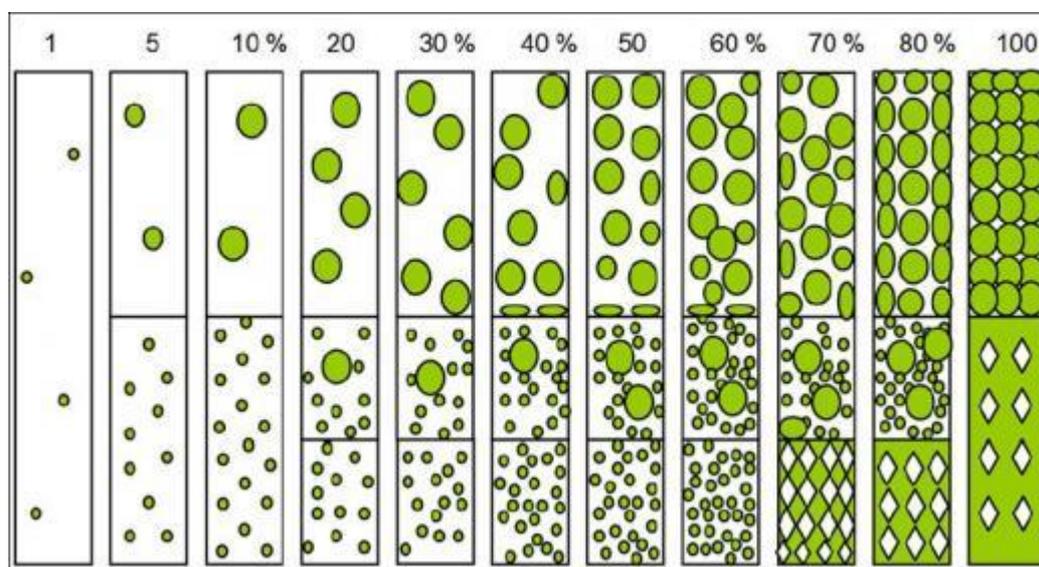


Figure 7 : Pourcentage de recouvrement selon le type de répartition des espèces. Source : N. Fromont d'après PRODON

Le Tableau 6 montre les quatre types de strates considérées selon leur hauteur et la nature de leur végétation. Les deux strates herbacées sont constituées de plantes vasculaires herbacées. Les espèces ligneuses forment la strate arbustive et la strate arborée.

Tableau 6 : critères de distinction des strates de végétation

	Strate herbacée basse	Strate herbacée haute	Strate arbustive	Strate arborescente
Hauteur de la strate	< 0,5 m	0,5 m à 1,5 m	< 7 m	> 7 m
Nature de végétation	herbacée	herbacée	ligneuse	ligneuse

De plus, un relevé floristique est effectué par strate. Il est important de noter la présence de lianes dans toutes les strates où elles sont observées.

Critère B2 Éclaircissement en sous-bois

Principes et objectifs

Ce critère mesure le degré d'ouverture du couvert végétal. Il décrit la structure horizontale du boisement par la mesure du recouvrement de la strate arborée. Il mesure l'évolution de la complexité et de l'hétérogénéité de la végétation et apporte ainsi un complément d'information à la structure verticale de la végétation quant à la morphologie du boisement.

Le taux de couvert est déterminé à la fois par des facteurs climatiques et le régime des perturbations, naturelles ou anthropiques. Ces perturbations et la chute d'arbres sénescents produisent des trouées. Ce critère donne donc une indication sur le renouvellement des peuplements.

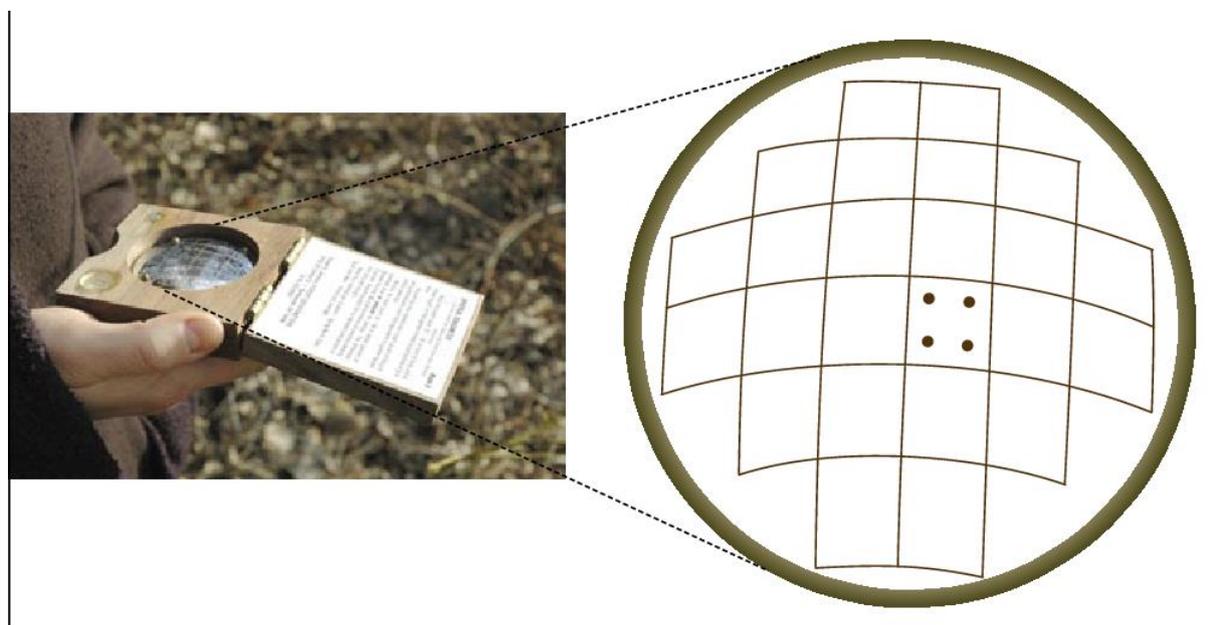


Figure 8 : Densiomètre convexe et sa grille de comptage

Méthode

L'évaluation de ce critère est effectuée grâce à l'usage d'un densiomètre convexe. Cet outil permet de mesurer un pourcentage d'ouverture du couvert végétal en différents points. L'ouverture du couvert est définie par le rapport entre les ouvertures dans la canopée et la totalité de l'hémisphère céleste, rapport pondéré en fonction de l'angle d'élévation, l'apport lumineux étant supérieur à proximité du zénith.

Le densiomètre est composé d'un miroir fixé sur un cadre en bois de 7,5 cm de côté. Le miroir est convexe et divisé en une grille gravée de 24 carrés. Une nivelle permet de positionner l'appareil par rapport au plan horizontal. Le densiomètre est tenu en main à hauteur de coude de manière à faire coïncider le reflet du front de l'opérateur avec la limite inférieure du quadrillage. L'opérateur visualise ensuite la projection de la canopée sur la grille. Pour chaque carré, l'opérateur examine l'intersection ou non du couvert par quatre points imaginaires. Il dénombre les points libres de toute canopée et multiplie ensuite son résultat par 1,04 pour obtenir l'ouverture du couvert en pourcentage.

Par point de mesure, une visée doit être réalisée dans les quatre directions cardinales pour couvrir l'hémisphère et cerner la variabilité du couvert (BAUDRY *et al.*, 2013). Un point de mesure est effectué au centre de chacune des placettes.

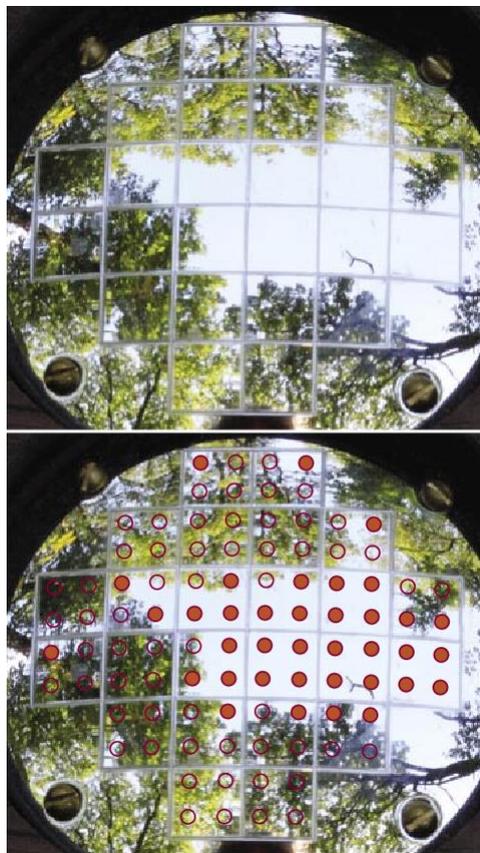


Figure 9 : Points de la grille de comptage libres de canopée (points rouges) et points couverts par la canopée.

Critère B3 Bois mort

Principes et objectifs

De grandes quantités de bois mort et une forte densité de vieux arbres porteurs de dendromicrohabitats sont des éléments caractéristiques des forêts naturelles (LARRIEU *et al.*, 2018). Le nombre et la diversité des bois morts sont des critères qui évaluent la maturité du boisement.

Les bois morts hébergent un grand nombre d'organismes, dits saproxyliques, qui participent à leur processus de décomposition. Ces espèces appartiennent à de nombreux groupes. Mais ce sont chez les insectes et les champignons qu'elles sont les plus nombreuses. Selon le stade de saproxylation, c'est-à-dire le niveau de décomposition du bois, différents cortèges d'espèces sont présents. Une grande diversité de types de bois morts est donc nécessaire à l'accueil d'une grande diversité d'espèces saproxyliques. L'action de ces organismes permet de libérer les éléments minéraux contenus dans les arbres après leur mort. Ils maintiennent ainsi le cycle des nutriments de l'écosystème en équilibre (EMBERGER *et al.*, 2013) et participent alors aux fonctions écosystémiques assurées par le boisement.

Un **bois mort au sol** est une pièce de bois (branche ou tronc) détachée de sa souche naturellement ou artificiellement, ou un arbre chablis mort, en contact ou non avec le sol, avec toutes les branches qui lui sont restées attachées, quel que soit l'âge de la mort. Un **bois mort sur pied** est un arbre ne présentant aucun signe de vie au-dessus de 1,30 m, et toujours sur pied, cassé ou non au niveau de sa tige ou de son houppier. Par convention, on considère que tout arbre mort (sans signe de vie au-dessus de 1,30 m) avec un angle d'inclinaison supérieur à 30 degrés par rapport à la surface du sol appartient à cette catégorie (IGN – INSTITUT NATIONAL DE L'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE ET FORESTIÈRE, s. d.).

Méthode

Le principe de ce descripteur est de compter le nombre de bois morts au sol et sur pied, sans prendre en compte l'essence. La valeur-seuil de dénombrement des bois morts est de 17,5 cm pour le diamètre et de 1 m pour leur longueur. La mesure du diamètre est effectuée au niveau du plus gros diamètre pour les bois morts au sol et pour les bois morts sur pied à 1,3 m de hauteur.

En revanche, le stade de décomposition de chaque élément dénombré sera aussi évalué. Chaque stade présent sur la placette est relevé, sans préciser l'abondance relative de chaque stade. Il existe cinq stades de décomposition. Le protocole utilise la même méthode que celle du protocole de l'IBP : Indice de Biodiversité Potentiel (EMBERGER *et al.*, 2013) :

Stade 1 : Bois mort dans l'année, très dur, pas ou très peu altéré. Écorce partout adhérente.



Stade 2 : Bois très dur, peu altéré : couteau s'enfonçant très difficilement (< 1cm) même dans le sens des fibres. Écorce quasiment partout présente, mais moins adhérente.



Stade 3 : Bois altéré, plus tendre en surface : couteau s'enfonçant de 1 à quelques cm dans le sens des fibres. Écorce partiellement à globalement tombée (sauf pour certaines essences comme le hêtre où l'écorce reste en place très longtemps) L'essence est encore reconnaissable et la pièce de bois n'a pas perdu de volume.



Stade 4 : Bois très altéré : couteau s'enfonçant jusqu'à la garde, au moins localement. Plus (ou vraiment très peu) d'écorce présente. Le bois a perdu du volume, mais l'essence est généralement encore reconnaissable.



Stade 5 : Bois très peu cohérent et dispersable facilement avec le pied. Mélange d'organismes saproxyliques et du sol (p.ex. vers de terre) Seul un examen approfondi permet d'identifier l'essence.



Critère B4 Bois vivant

Principes et objectifs

Les arbres de grandes dimensions sont les plus intéressants en termes écologiques car ils sont plus favorables à une biodiversité associée. Une forte densité d'arbres âgés est une des caractéristiques des forêts naturelles. Dans ces dernières, le cycle sylvigénétique s'accomplit dans son entièreté, contrairement à des forêts gérées pour la production de bois. Dans un boisement en libre évolution, les arbres accomplissent leur cycle de vie jusqu'à leur sénescence et leur mort et peuvent ainsi acquérir leurs pleines dimensions. Le diamètre des troncs est donc un indicateur de la complexité et de l'hétérogénéité structurale d'un boisement.

Méthode

La classification du diamètre à hauteur de poitrine (DHP) des arbres utilisée (Tableau 7) est issue du Protocole de Suivi Dendrométrique des Réserves Forestières (PSDRF). La mesure du DHP se fait à 1,30 m de hauteur à l'aide d'un pied à coulisse forestier. Il est également possible d'utiliser un mètre ruban pour mesurer la circonférence de l'arbre. Chacune des catégories de bois vivant est dénombré. Seuls les troncs de diamètre inférieur à 7,5 cm ne sont pas comptés. La prise en compte de ces catégories permet de prendre suffisamment en compte les petits diamètres, fréquents dans les forêts alluviales présentant souvent une structure irrégulière très marquée (DUFOUR & PONT, 2006)

Tableau 7 : classification de la grosseur des arbres

	Perches	Petits bois (PB)	Bois moyens (BM)	Gros bois (GB)	Très gros bois (TGB)
Diamètre à 1,30 m	≥ 7,5 cm < 17,5 cm	≥ 17,5 < 27,5 cm	≥ 27,5 < 47,5 cm	≥ 47,5 < 67,5 cm	≥ 67,5 cm
Circonférence à 1,30 m	23 – 55 cm	55 – 86 cm	86 – 149 cm	149 – 212 cm	Supérieure à 212 cm

Critère B5 Dendromicrohabitats

Principes et objectifs

Les dendromicrohabitats sont un des éléments caractéristiques des forêts naturelles, comme les grandes quantités de bois mort et les vieux arbres. Ces structures se développent sur le tronc ou les branches des arbres vivants et morts sur pied. Portés en général par des arbres âgés de grandes dimensions, ce sont des indicateurs de présence potentielle d'espèces spécialisées qui les utilisent comme substrat ou habitat pour au moins une partie de leur cycle de vie. Ils sont donc identifiés comme des éléments de structure pertinents pour suivre la biodiversité taxonomique à l'échelle du peuplement.

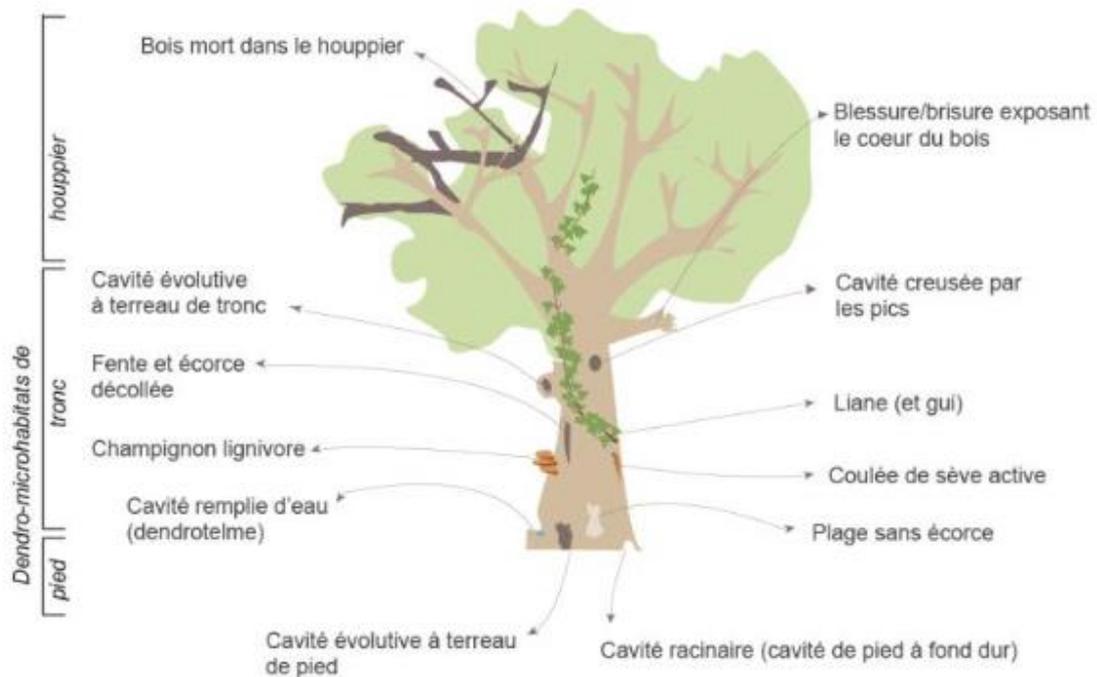


Figure 10 : Types de dendro-microhabitats et leur localisation dans l'arbre (Emberger et al., 2013)

Méthode

Pour ce critère, le protocole utilise la classification donnée par Larrieu *et al.* (2018). Elle comprend 7 formes de dendromicrohabitats, subdivisées en 15 groupes, puis en 47 types. Les 15 groupes que recense le protocole sont les suivants :

- Cavités creusées par des pics
- Cavités à terreau
- Orifices et galeries d'insectes
- Concavités
- Surfaces d'aubier apparent (partie sans écorce ou écorce décollée)
- Surfaces à bois de cœur apparent (cimes brisées et fentes profondes)
- Bois mort dans le houppier
- Agglomération de gourmands et de rameaux (balais de sorcière)
- Loupe et chancre (boursouflures et déformations du bois)
- Sporophores de champignons et myxomycètes
- Structures épiphytiques (bryophytes, lichens, fougères, lianes, gui...)
- Grands nids de vertébrés
- Micro-sols
- Coulées de sève

Chaque dendromicrohabitat est décrit en annexe 1. Les dimensions minimales à prendre en compte dans les relevés y sont également indiquées. Il est possible de trouver de l'aide dans l'application pour smartphone « Tree Microhabitats » développée par KRAUS *et al.*, 2016.

Le critère consiste pour chaque groupe de dendromicrohabitat à compter les arbres qui en sont porteurs. Chaque arbre porteur de plusieurs dendromicrohabitats est compté plusieurs fois.

Les dendromicrohabitats sont souvent de petites dimensions. Il est donc recommandé d'utiliser une paire de jumelles pour inspecter les hauteurs des arbres où ils peuvent se trouver.

Facteurs socioéconomiques

Les facteurs socio-économiques traite de l'influence anthropique sur la spontanée de la dynamique du boisement.

Critère B6 Essences allochtones

Principes et objectifs

Une essence allochtone désigne une espèce végétale ligneuse située en dehors de son aire de répartition naturelle, biogéographique ou bioclimatique (MACIEJEWSKI, 2016). Ces essences sont donc le marqueur d'une activité anthropique passée dans le boisement en libre évolution ou à proximité. L'objectif de ce critère est de connaître la proportion de ces essences dans le boisement étudié.

Méthode

Une liste des espèces allochtones de la strate ligneuse des boisements humides rivulaires a été dressée dans le Tableau 8. L'Observatoire des plantes vasculaires exotiques envahissantes de Normandie réalisées par les antennes normandes des Conservatoires botaniques nationaux de Brest et de Bailleul (DOUVILLE & WAYMEL, 2019) et les résultats du programme EUFORGEN qui met à disposition des cartes d'aire de répartition naturelle pour les essences forestières à l'échelle européenne (<https://www.euforgen.org/species/>) ont permis de dresser cette liste.

Tableau 8 : Liste des essences allochtones de Normandie

Nom scientifique	Nom vernaculaire	Caractère envahissant en Normandie
<i>Acer negundo</i> L., 1753	Érable negundo	Potentielle
<i>Acer pseudoplatanus</i> L., 1753	Érable sycomore	Potentielle
<i>Ailanthus altissima</i> (Mill.) Swingle, 1916	Ailante glanduleux	Avéré
<i>Baccharis halimifolia</i> L., 1753	Séneçon en arbre	Avéré
<i>Buddleja davidii</i> Franch., 1887	Buddleia du père David	Avéré
<i>Cornus sericea</i> L., 1771	Cornouiller soyeux	Potentielle
<i>Laburnum anagyroides</i> Medik., 1787	Cytise faux ébénier	Avéré
<i>Populus</i> spp. sauf <i>Populus tremula</i> L., 1754	Peuplier blanc	Non
<i>Prunus laurocerasus</i> L., 1753	Laurier-palme	Avéré
<i>Prunus serotina</i> Ehrh., 1788	Cerisier d'automne	Avéré
<i>Robinia pseudoacacia</i> L., 1753	Robinier faux-acacia	Avéré
<i>Staphylea pinnata</i> L., 1753	Faux pistachier	Potentielle

Ce critère consiste à estimer le pourcentage de surface de recouvrement des espèces allochtones. Cette estimation se fait par classes de 10 % sur l'ensemble de chaque placette. Comme pour le critère B1, la Figure 7 apporte une aide utile pour effectuer cette estimation.

Critère B7 Espèces exotiques envahissantes

Principes et objectifs

Une espèce exotique envahissante est une espèce allochtone dont l'introduction par l'homme (volontaire ou fortuite), l'implantation et la propagation menacent les écosystèmes, les habitats ou les espèces indigènes avec des conséquences écologiques, économiques ou sanitaires négatives (MACIEJEWSKI, 2016).

Le critère consiste à relever la présence d'espèces exotiques envahissantes au sein des placettes. Leur présence est un marqueur d'interventions humaines au sein du site ou à proximité, par le passé ou plus ou moins récemment.

Méthode

Les espèces végétales exotiques envahissantes ont été identifiées par les Conservatoires botaniques nationaux de Brest et de Bailleul (DOUVILLE & WAYMEL, 2019). D'autre part, une liste des espèces animales exotiques envahissantes peut être trouvée par le lien suivant : <http://especes-exotiques-envahissantes.fr/categorie-espece/faune/>.

Ce critère consiste à noter la présence de ces espèces exotiques envahissantes au sein des placettes. Les espèces végétales ont déjà été relevées dans l'inventaire floristique du critère B1 (Structure verticale de la végétation). Les espèces animales exotiques envahissantes ainsi que tout indice de présence de l'une d'entre elles doivent aussi être relevés.

Critère B8 Régénération

Principes et objectifs

Dans un boisement en libre évolution, la régénération des arbres se fait par semis naturel. Elle est favorisée par l'apparition de trouées dans le couvert végétal ou de taches de lumière. Elle participe ainsi à la dynamique du cycle sylvigénétique et de la succession écologique du boisement. Elle met en évidence la présence d'ouvertures dans le couvert arboré qui permettent l'installation et la croissance des semis.

Méthode

Le nombre de semis est compté selon quatre classes (Tableau 9) à l'intérieur des sous-placettes de 2 m de rayon. Seule la classe 0 est indiquée en pourcentage de recouvrement par plages de 10 %.

Tableau 9 : Classification des semis à l'intérieur des sous-placettes

	Classe 0	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Critères de classe selon la	H < 50 cm	0,5 ≥ H > 1,5 m	H > 1,5 m et Ø < 2,5 cm	2,5 ≤ Ø < 7,5 cm

	Classe 0	Classe 1	Classe 2	Classe 3
hauteur (H) et le diamètre (∅)	Notée en pourcentage de recouvrement			

Critère B9 Indice Floristique de Fertilité du sol

Principes et objectifs

Ce critère permet d’analyser les fonctions biogéochimiques assurées par le sol du boisement. Il est issu de la boîte à outils MhéO, utilisée pour le suivi de milieux humides.

La quantité des nutriments (principalement azote et phosphore) disponibles dans le sol est un facteur important auquel les espèces sont plus ou moins tolérantes ou adaptées. Il est donc possible d’évaluer de manière simplifiée, sur une échelle ordinale, l’optimum de chaque espèce en fonction de la disponibilité des nutriments : c’est sa valeur indicatrice.

Méthode

L’indice floristique de fertilité du sol H_t représente la richesse “moyenne” en nutriments d’une zone humide. Il est calculée à l’échelle de la placette comme la moyenne des valeurs indicatrices des espèces présentes de la strate herbacée, puis à l’échelle d’une zone humide comme la médiane des valeurs des placettes (COLLECTIF RHOMEQ, 2014).

Dans le cadre de notre protocole, la valeur indicatrice de l’espèce correspond à la moyenne des valeurs indicatrices des trois valeurs disponibles de Landolt (LANDOLT *et al.*, 2010), de Julve (JULVE, 1998) et d’Ellenberg (ELLENBERG *et al.*, 1992). La valeur indicatrice s’échelonne ainsi sur une gamme allant de 1 à 9 : des espèces des milieux très pauvres en nutriments vers les milieux les plus riches. Le téléchargement du fichier contenant les valeurs indicatrices est possible grâce au lien suivant : <http://www.ligero-zh.org/images/FLORE.zip>

C – Critères hydrologiques

Les forêts alluviales tissent un réseau complexe de relations avec les autres unités de la plaine alluviale comme le chenal ou la nappe phréatique, sous la forme de flux (eau, sédiments, nutriments, matériel biologique) qui créent des conditions de développement particulières pour la végétation : forte humidité de l’air et du sol, températures favorables, entrées régulières d’eau et de nutriments lors des crues...

Les boisements humides rivulaires entretiennent un réseau d’échange sous la forme de flux d’eau, de sédiments, de nutriments et de matériel biologique

Les critères étudiés mettent l’accent sur les services écosystémiques redus par les boisements humides ainsi que sur leur connectivité avec le cours d’eau.

Facteurs contextuels

Critère C1 Milieux aquatiques complémentaires au cours d'eau

Principes et objectifs

Ce critère valorise la présence de milieux aquatiques sous différentes formes, car ils constituent des habitats pour des cortèges d'espèces diversifiés (amphibiens, odonates, oiseaux d'eau, poissons, etc.). Ils constituent des zones de repos, d'alimentation ou de reproduction pour ces dernières. Ils sont présents dans le lit majeur du cours d'eau et dépendent de la connectivité transversale de ce dernier. Les milieux aquatiques retenus peuvent être d'origine naturelle ou artificielle avec une présence d'eau permanente ou temporaire (FNE AURA, 2019) :

- Source ou suintement
- Ruisselet, fossé humide non entretenu ou petit canal (largeur < 1 m)
- Présence de multiples chenaux
- Confluence avec un autre cours d'eau
- Étang, lagune ou plan d'eau peu profond
- Mare ou autre petit point d'eau
- Tourbière
- Zone marécageuse.

Comme toutes les zones humides, ces milieux accueillent et stockent une partie de l'eau des crues, limitant les dégâts des inondations, et la restituent au milieu en période sèche (FNE AURA, 2019). De plus, ces milieux constituent une trame bleue au sein de la ripisylve qui marque aussi la connectivité du boisement avec le cours d'eau.

L'objectif de ce critère est de caractériser la connectivité des habitats aquatiques du boisement humide rivulaire avec le cours d'eau. Il est à mettre en relation avec les critères C4 et C5.

Méthode

Le relevé des milieux aquatiques complémentaires se fait le long du linéaire du cours d'eau. Ils doivent être localisés directement sur la berge et dans une limite de 10 m au-delà de la zone de relevé.

Chaque type de milieu aquatique est dénombré et localisé sur une carte ou par ses coordonnées GPS le cas échéant.

Facteurs hydrologiques

Critère C2 Faciès d'écoulement du cours d'eau

Principes et objectifs

Les faciès d'écoulement sont de petites portions de cours d'eau (d'une longueur comprise entre 1 et 10 fois la largeur à pleins bords environ) présentant une homogénéité, à l'échelle de quelques m² à quelques centaines de m², sur le plan des vitesses, des profondeurs, de la granulométrie, de la pente du lit et de la ligne d'eau, des profils en travers. Les faciès, notamment les alternances de radiers et de mouilles, sont considérés comme les unités hydromorphologiques fondamentales des rivières. Elles sont également le reflet à long terme des contraintes exercées par la géologie, la morphologie terrestre, la couverture végétale et le climat (MALAVOI & BRAVARD, 2010).

Méthode

L'identification des faciès est souvent problématique. Quatre grands types de faciès ont donc été défini pour être utilisés par le suivi selon la clé de détermination proposée Figure 11.

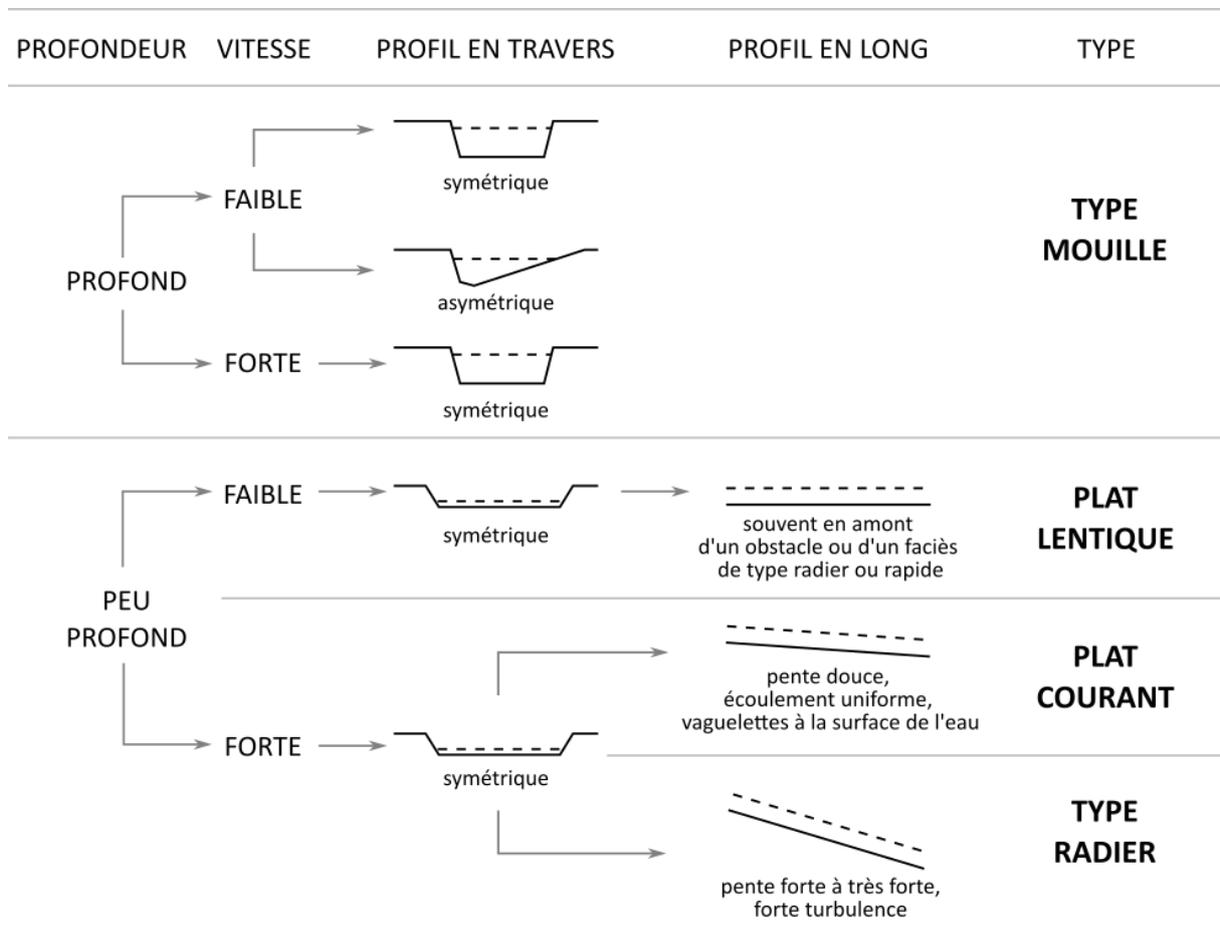


Figure 11 : Clé de détermination simplifiée des faciès d'écoulement (d'après MALAVOI & BRAVARD, 2010)

L'étendue des différents faciès est identifiée au fil de la progression le long du cours d'eau, directement notés par des points GPS.

Il faudra être vigilant de la répétition du protocole d'effectuer le suivi des faciès à des périodes hydrologiques comparables.

Critère C3 Embâcles

Principes et objectifs

Les embâcles se localisent généralement dans le lit mineur, en berge ou dans le chenal. Ils s'accumulent à la faveur d'un obstacle et provoquent un ralentissement des écoulements et une élévation de la ligne d'eau à l'amont. Si le chenal n'est pas entièrement obstrué, l'embâcle concentre l'écoulement, ce qui suscite une accélération de ce dernier au niveau de l'obstacle. Dans les petits cours d'eau, elles contribuent à créer des mouilles à leur amont et des rapides à l'aval. Les grandes pièces de bois exercent une influence sur la géométrie du chenal, notamment la largeur et la profondeur. Elles accumulent également des sédiments et de la matière organiques en amont. Outre ce rôle fonctionnel

qu'ils jouent dans le cours d'eau, les embâcles ont aussi un intérêt écologique, en créant une diversité de micro-habitats favorables à la faune. Elles jouent aussi un rôle dans les phénomènes d'érosion des berges, qui permettent de régénérer les milieux riverains (PIÉGAY *et al.*, 2003 ; LE LAY & PIÉGAY, 2007)

Ce critère consiste à réaliser un inventaire des embâcles le long du cours d'eau. Leur nombre, leur taille et le degré d'obstruction du lit mineur qu'elles provoquent sont relevés.

Méthode

La localisation des embâcles se fait en suivant à pied le linéaire du cours d'eau. La localisation de chaque embâcle est relevée au GPS et leur taille est estimée pour chaque relevé. Le protocole considère trois catégories de taille :

- Branchages
- Tronc de faible diamètre (inférieur à 37,5 cm)
- Tronc de gros diamètre (supérieur ou égal à 37,5 cm)

Le degré d'obstruction de largeur du lit mineur provoqué par chaque embâcle est également relevé. Le protocole considère également trois catégories :

- Moins de la moitié de la largeur du lit mineur
- Plus de la moitié de la largeur du lit mineur
- La totalité de la largeur du lit mineur est encombrée par l'embâcle.

Critère C4 Position de la nappe

Principes et objectifs

L'indicateur mesure l'amplitude de battement de la nappe. Les niveaux d'eau sont mesurés relativement à la surface du sol par un piézomètre équipé d'une sonde de pression. L'appareil enregistre automatiquement la variation de la profondeur de la nappe d'eau dans le sol au cours du temps.

Le fonctionnement hydrologique des zones humides peut être approché par la connaissance de la dynamique de la nappe d'eau dans le sol. C'est la résultante de la différence entre les entrées et les sorties d'eau (bilan hydrique) à l'échelle du site. Cette dynamique détermine la présence des espèces hygrophiles et des sols hydromorphes. L'indicateur caractérise la distribution des valeurs annuelles de la nappe pour un suivi à moyen et long terme de la dynamique hydrologique. (COLLECTIF RHOMEO, 2014).

Méthode

Le piézomètre est installé de préférence dans une partie centrale du site (Cf. III. Mise en œuvre).

Les tubes des piézomètres doivent être équipés de capteurs de pression qui permettent d'enregistrer les valeurs à un pas de temps défini (horaire ou quotidien). Ils sont associés à un limnimètre placé dans le cours d'eau qui permet de relever les hauteurs d'eau de celui-ci. Une station météo devra également être positionnée pour relever la barométrie et la pluviométrie du site.

La collecte de variables météorologiques, notamment la pluviométrie, est indispensable au processus d'évaluation de l'indicateur (COLLECTIF RHOMEO, 2014).

Critère C5 Connectivité transversale du cours d'eau

Principes et objectifs

Cet indicateur vise à estimer la connexion latérale du cours d'eau avec ses berges et le boisement humide, notamment avec les milieux aquatiques complémentaires au cours d'eau identifiés par le critère C1.

Le critère inclut une estimation de l'inclinaison moyenne de la pente de la berge. Il utilise aussi des éléments de classification typologique statique : la hauteur plein bord, p , et la largeur plein bord, l .

Ces deux dimensions permettent de calculer une caractéristique géométrique, le rapport largeur/profondeur. Ce critère mesure les déplacements verticaux (incision ou exhaussement) et latéraux (sédimentation et érosion) du lit mineur du cours d'eau.

Méthode

Selon le contexte de la sinuosité du cours d'eau, la mesure de la largeur et de la profondeur du cours d'eau doit être effectuée dans deux situations (MALAVOI & BRAVARD, 2010) :

- Soit au droit d'un point d'inflexion entre deux sinuosités,
- Soit dans une portion rectiligne du cours d'eau.

Les coordonnées du point de mesure sont à relever au GPS.

Pour l'estimation de l'inclinaison moyenne de la pente de la berge, le Tableau 10 définit trois classes de types de pente de berges.

Tableau 10 : Définition des trois classes de pentes de berges

Classe de pente de berges	Abruptes	Moyennes	Douces
Valeur de la pente	$\geq 100 \%$ ou $\geq 45^\circ$	$20 \% - 100 \%$ ou $11^\circ - 45^\circ$	$< 11^\circ$ ou $< 20 \%$

Facteurs édaphiques

Critère C6 Indice Floristique d'Engorgement

Principes et objectifs

L'utilisation de ce critère est inspirée de la boîte à outils de suivi des milieux humides Mhéo (COLLECTIF RHOMEO, 2014). Il permet d'évaluer les fonctions hydrologiques de la nappe d'accompagnement.

La présence d'une nappe d'eau dans le sol constitue une contrainte pour les végétaux, contrainte à laquelle les espèces sont plus ou moins tolérantes ou adaptées. Beaucoup d'espèces végétales présentent une courbe de croissance en fonction du niveau moyen (annuel ou estival) de la nappe compatible avec la définition d'une valeur optimale de développement. Cet optimum est appelé valeur

indicatrice de l'espèce pour le niveau de nappe. Les végétaux peuvent donc être utilisés pour évaluer le niveau de la nappe à travers un indice.

Méthode

La méthode d'application est la même que pour l'Indice Floristique de Fertilité du sol. Il s'agit de relever les espèces de la strate herbacée présentes dans chaque placette puis de calculer l'indice de niveau d'engorgement. Des valeurs indicatrices sont disponibles pour certains pays ou ensembles biogéographiques : Europe centrale (ELLENBERG *et al.*, 1992), Suisse (LANDOLT *et al.*, 2010), Grande-Bretagne (HILL *et al.*, 1999)

Dans le cadre de notre protocole, la valeur indicatrice de l'espèce a été adaptée du protocole LigéRO. Elle provient de deux bases de données : Baseflor (JULVE, 1998), travaux d'Ellenberg adaptés pour la France métropolitaine, et *Flora Indicativa* (LANDOLT *et al.*, 2010), valeurs établies pour la Suisse. Arrondie à l'entier. La valeur indicatrice s'échelonne ainsi sur une gamme allant de 1 à 10 (espèces des milieux les plus secs vers les milieux les plus humides) à l'échelle du bassin (Tableau 11). La base de données des valeurs indicatrices est disponible grâce au lien suivant : <http://www.ligero-zh.org/images/FLORE.zip>.

Tableau 11 : Correspondances des valeurs indicatrices pour l'humidité édaphique

Valeur transformée pour LigéRO	Valeur brute BASEFLOR	Signification BASEFLOR
1	1	hyperxérophiles (sclérophylles, ligneuses microphylles, réviscentes)
2	2	perxérophiles (caulocrassulescentes subaphylles, coussinets)
3	3	xérophiles (velues, aiguillonnées, cuticule épaisse)
4	4	mésoxérophiles
5	5	mésohydriques
6	6	mésohygrophiles
7	7	hygrophiles (courtement inondables, en semaines)
8	8	hydrophiles (longuement inondables, en mois)
9	9	amphibies saisonnières (hélrophytes exondés une partie minoritaire de l'année)
10	10	amphibies permanentes (hélrophytes semi-émergés à base toujours noyée)
10	11	aquatiques superficielles (0-50cm)
10	12	aquatiques profondes (1-3m)

Pour une placette donnée, l'indice floristique d'engorgement H_e , est calculé comme la moyenne des valeurs indicatrices des espèces inventoriées.

$$H_e = \frac{\sum(r_i \times x_i)}{r_i}$$

Où : r_i : Abondance de l'espèce i dans le relevé
 x_i : Valeur indicatrice de l'espèce i

Critère C7 Analyses chimiques du sol – Substances humiques

Principes et objectifs

Les substances humiques ont une bonne capacité à décrire le fonctionnement global des zones humides. Elles sont issues de la transformation de la matière organique du sol en composés organiques complexes formant l'humus. Les substances humiques représentent en moyenne 2/3 de la matière organique du sol. Cette composante peut se diviser en trois fractions : la fraction fulvique (AF), la fraction humique (AH) et l'humine (HU). Deux indicateurs sont basés sur les substances humiques du sol : la part de l'humine dans les substances humiques (% HU) et le ratio acides humiques sur acides fulviques (AH/AF) (COLLECTIF RHOMEO, 2014).

Méthode

La méthode de prélèvement des échantillons est expliquée dans la partie Analyses chimiques de sol du III-Mise en œuvre du protocole. L'analyse des échantillons nécessite un matériel spécifique et sont réalisées par un prestataire extérieur.

Les substances humiques subissent un fractionnement en trois étapes selon leur solubilité dans les acides et les bases. Après le fractionnement humique, la concentration en carbone est dosée dans chacune des trois fractions selon la méthode DUMAS, une méthode normalisée (COLLECTIF RHOMEO, 2014).

Analyse et interprétation

Le %HU informe sur le fonctionnement hydrologique, notamment sur les variations piézométriques. Une diminution significative du pourcentage d'humine traduit une accentuation des fluctuations piézométriques, et notamment des périodes d'exondation, en termes de durée ou d'ampleur. Ce type d'évolution entraîne généralement une minéralisation de la matière organique et donc une augmentation des nutriments disponibles. Une diminution très lente du %HU marque une déconnexion progressive de la nappe de fait de l'accumulation de matière organique. À l'inverse, une augmentation significative de cet indicateur peut s'interpréter comme une baisse des fluctuations piézométriques.

Ce ratio informe sur les conditions globales de dégradation de la matière organique (température, oxygénation, pH). Une diminution significative du ratio AH/AF traduit des conditions de dégradation de la matière organique plus favorables, ce qui risque d'augmenter la minéralisation et donc la quantité de nutriments disponibles. L'augmentation du niveau trophique ayant tendance à augmenter la dégradabilité des végétaux, le ratio AH/AF pourrait diminuer du fait d'un enrichissement du milieu. Une augmentation significative de l'indicateur AH/AF peut s'expliquer soit par une diminution importante de l'oxygénation du sol, soit par une acidification d'origine naturelle ou anthropique.

Pour analyser les variations du %HE et du ratio AH/AF du suivi, il est préconisé de considérer comme significative une variation supérieure à 10 % (COLLECTIF RHOMEO, 2014).

D – Télédétection et cartographie

Facteurs contextuels

Critère D1 Boisement

Principes et objectifs

Les milieux gérés en libre évolution évoluent vers un stade boisé qui devrait à terme recouvrir l'entièreté du site. Ce critère mesure la surface occupée par le boisement au sein du site qui fait l'objet de ce mode de gestion. Le suivi de cet indicateur met en évidence la dynamique suivie par le boisement au cours du temps.

Méthode

La mesure se fait au bureau sous logiciel SIG à partir d'une orthophotographie récente du boisement. Dans une couche polygone est créée une entité qui recouvre les limites du boisement en excluant les clairières et les trouées. La surface de ce polygone est ensuite calculée et donne la surface du boisement.

Critère D2 Clairières, trouées au sein du boisement

Principes et objectifs

Au cours du cycle sylvigénétique et de la succession écologique se produisent des effondrements d'arbres qui créent des clairières et des trouées dans le boisement. Ce critère mesure la surface occupée par ces ouvertures du couvert végétal. Son suivi met en évidence le stade de succession écologique ou la phase du cycle sylvigénétique dans lequel se trouve le boisement.

Méthode

La mesure se fait au bureau sous logiciel SIG. Dans une couche polygone est créée une ou plusieurs entités qui recouvrent les limites de chaque clairière et trouée. La surface totale de ces polygones est ensuite calculée et donne la surface des clairières et des trouées du boisement.

Facteurs de connectivité

Critère D3 Pression d'artificialisation

Principes et objectifs

L'artificialisation des sols désigne l'augmentation de la superficie des sols artificialisés (zones bâties et réseau de transport) à l'échelle d'un territoire. La pression qu'elle exerce sur l'environnement a des effets tels que :

- La modification des écoulements de l'eau dans les bassins versants,
- Des ruptures dans les continuités écologiques,
- Des pollutions accidentelles ou diffuses le long des voies de circulation,
- La perturbation de la dynamique des milieux et des espèces par la sur-fréquentation.

L'indicateur est construit sur l'évolution de la surface artificialisée par les routes et le bâti, dans l'enveloppe du site (boisement rivulaire humide et sa périphérie immédiate). À l'intérieur d'une zone tampon, il mesure la proportion de surface artificialisée.

L'objectif de cet indicateur est de suivre l'évolution de la pression d'artificialisation autour du site et dans sa périphérie immédiate. La pression d'artificialisation joue sur la connectivité du boisement étudié avec les corridors écologiques et les autres espaces naturels (COLLECTIF RHOMEO, 2014).

Méthode

Le calcul de l'indicateur se fait au bureau sous logiciel SIG à partir des données de la BD Topo®, disponible auprès de l'IGN à l'échelle départementale. Les objets « bâti », « réseau routier » et « réseau ferroviaire » de cette base de données sont utilisés. L'emprise de la pression d'artificialisation due aux bâtiments et aux voies de communication est modélisée par la création de zones tampon de dimensions variables autour de ces objets.

Dans un premier temps les objets de la couche polygones « Bâti » et les objets des couches « réseau routier » et « réseau ferroviaire » sont extraits. Une zone tampon de 50 m de large est créée pour chaque polygone de la couche « Bâti ». Les tampons des polygones sont ensuite fusionnés pour former des polygones regroupant l'influence de groupes de bâtiments proches.

Pour l'emprise des réseaux de transports, la largeur de la zone tampon est différente selon le type de voie de communication. Pour les autoroutes et routes à deux chaussées, la largeur de la zone tampon utilisée est de 3 m, pour les routes à une chaussée, elle est de 2 m. Pour les voies ferrées, les champs de la BD TOPO® « nombre_de_voies » et « largeur » de chaque tronçon sont utilisés pour définir les dimensions de la zone tampon. Il existe trois catégories de largeur des voies. Pour une voie normale, la largeur usuelle est de 1,4 m. Elle est de 0,6 m pour une voie étroite et de 1,6 m pour les voies larges. Les dimensions de la zone tampon sont calculées par la formule suivante :

$$\text{Largeur du tampon} = NB_{VOIES} \times \text{largeur des voies} \times 3.$$

L'ensemble des zones tampons des routes et des voies ferrées est fusionné pour créer la tache réseau de transport. La tache « bâti » et la tache « réseau de transport » sont ensuite fusionnées à leur tour pour former la tache « surface artificialisée » qui représente la zone sous pression d'artificialisation.

La pression d'artificialisation est calculée dans une zone périphérique du boisement qui forme l'enveloppe du site. Les dimensions de cette zone tampon sont calculées en fonction de la taille du boisement. Sa largeur en mètres est donnée par la formule suivante :

$$\text{largeur} = \sqrt{\frac{S \times 2}{\pi}} - \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad \text{Où : } S : \text{ Surface du boisement en m}^2$$

La couche de l'enveloppe du boisement est utilisée pour découper la tache « surface artificialisée » par les outils de géo-traitement vectoriel du logiciel SIG.

La surface de l'enveloppe et la surface totale la tache « surface artificialisée » sont mesurées sous logiciel SIG. L'indicateur « Pression d'artificialisation » correspond au ratio entre la surface totale sous pression d'artificialisation et la surface de l'enveloppe du site. Ce ratio est ensuite traduit en pourcentage (COLLECTIF RHOMEO, 2014).

Critère D4 Pression de pratiques agricoles

Principes et objectifs

La pression des pratiques agricoles est une des causes majeures de destruction et de dégradation des zones humides. Elle se traduit par :

- Le retournement des sols qui entraîne la destruction de la végétation “naturelle” et leur déstructuration (modification de leur fonctionnement hydrique),
- La modification des approvisionnements en eau et des écoulements (drainage, recalibrage de cours d'eau, pompage pour l'irrigation),
- La modification des paysages (arrachage de haies, remembrement),
- L'apport de produits phytosanitaires et d'engrais.

La pression des pratiques agricoles a un impact sur le fonctionnement hydrologique et biologique du boisement humide rivulaire étudié. L'objectif de cet indicateur est de suivre l'évolution des pratiques agricoles dans sa proche périphérie. Il s'agit de mettre en évidence si ces pratiques s'intensifient, auquel cas la perturbation hydrologique et biologique se renforce (COLLECTIF RHOMEO, 2014).

Méthode

Cette pression est approchée par l'évaluation de la proportion de superficie concernée par une agriculture impactante à l'échelle du boisement et de sa périphérie immédiate. L'indicateur utilise les données annuelles déclaratives des parcelles agricoles, qui figurent dans le Registre Parcellaire Graphique (RPG). Il s'agit des données graphiques des parcelles munis de leur culture principale (couche PARCELLES_GRAPHIQUES) du RPG. D'autre part, le calcul de l'indicateur utilise aussi la zone tampon de l'enveloppe du boisement calculée par le critère D3.

Dans un premier temps, les parcelles du RPG incluses dans la zone tampon du boisement sont extraites dans une couche dédiée. Le champ CODE_GROUP indique le groupe de culture pratiquée dans chaque parcelle (Tableau 12). Les prairies permanentes sont ensuite exclues de celle-ci car les pratiques agricoles ne constituent qu'une pression faible. De plus, comme la qualité des déclarations des prairies permanentes et temporaires ne permet pas d'avoir une information fiable pour différencier ces types de parcelles, les prairies temporaires en sont également exclues. Les parcelles sont donc toutes sélectionnées à l'exclusion de celles dont le CODE_GROUP est égal à 18 ou 19.

Tableau 12 : liste des groupes de cultures du RPG

Code	Groupe de cultures	Code	Groupe de cultures
1	Blé tendre	15	Légumineuses à grains
2	Maïs grain et ensilage	16	Fourrage
3	Orge	17	Estives landes
4	Autres céréales	18	Prairies permanentes
5	Colza	19	Prairies temporaires
6	Tournesol	20	Vergers
7	Autres oléagineux	21	Vignes
8	Protéagineux	22	Fruits à coque
9	Plantes à fibres	23	Oliviers

Code	Groupe de cultures	Code	Groupe de cultures
10	Semences	24	Autres cultures industrielles
11	Gel (surfaces gelées sans production)	25	Légumes-fleurs
12	Gel industriel	26	Canne à sucre
13	Autres gels	27	Arboriculture
14	Riz	28	Divers

Les objets sélectionnés sont ensuite découpés par les outils de traitement du SIG par la zone tampon de l'enveloppe du boisement. Leur surface incluse dans la zone tampon est ensuite calculée sous logiciel SIG. L'indicateur « Pression de pratiques agricoles » correspond au ratio entre la surface totale des parcelles agricoles sélectionnées et la surface de l'enveloppe du boisement. Ce ratio est ensuite traduit en pourcentage qui exprime la proportion de la surface de l'enveloppe du boisement impactée par des pratiques agricoles (COLLECTIF RHOMEO, 2014).

Bibliographie

- BAUDRY O., CHARMETANT C., COLLET C. & PONETTE Q., 2013. – MESURER L'OUVERTURE DU COUVERT ET ESTIMER LA DISPONIBILITÉ EN LUMIÈRE EN FORÊT FEUILLUE AU MOYEN DU DENSIOMÈTRE CONVEXE. *Forêt wallonne*, (126) : 17-28.
- COLLECTIF RHO.MEO., 2014. – *La boîte à outils de suivi des zones humides : RhoMeo.*, 148 p.
- DAJOUX M., GILLES C. & RUFFION J., 2020. – *Guide de préservation des ripisylves*. FNE AuRA, 64 p.
- DARDILLAC A., BUCHET J., CATTEAU E. & DUHAMEL F., 2019. – *Guide des végétations des zones humides de Normandie orientale*. Conservatoire Botanique National de Bailleul., Bailleul, 624 p.
- DECOCQ G., DUPOUEY J.-L. & BERGÈS L., 2021. – Dynamiques forestières à l'ère anthropocène : mise au point sémantique et proposition de définitions écologiques. *Revue forestière française*, **73** (1) : 21-52 doi : 10.20870/revforfr.2021.4993.
- DOUVILLE C. & WAYMEL J., 2019. – Observatoire des plantes vasculaires exotiques envahissantes de Normandie. *DREAL Normandie / Région Normandie. Conservatoire botanique national de Bailleul / Conservatoire botanique national de Brest*, : 20p + annexes.
- DUFOUR S. & PIÉGAY H., 2006. – Forêts riveraines des cours d'eau et ripisylves : spécificités, fonctions et gestion. *Revue Forestière Française*, (4) : 339-350 doi : 10.4267/2042/6704.
- DUFOUR S. & PONT B., 2006. – Protocole de suivi des forêts alluviales : l'expérience du réseau des Réserves naturelles de France. *Revue Forestière Française*, (1) doi : 10.4267/2042/5721.
- ELLENBERG H., WEBER H. E., DÜLL R., WIRTH V., WERNER W. & PAULISSEN D., 1992. – Zeigerwerte von Pflanzen Mitteleuropas. Ed 3. *Scripta Geobotanica*, **18** : 1-258.
- EMBERGER C., LARRIEU L. & GONIN P., 2013. – *Dix facteurs clés pour la diversité des espèces en forêt. Comprendre l'Indice de Biodiversité Potentielle (IBP). Document technique*. Paris : Institut pour le développement forestier, 56 p.
- FNE AURA., 2019. – *Préserver et restaurer les ripisylves : un enjeu de biodiversité*. FNE Auvergne-Rhône-Alpes, 43 p.
- GONIN P., LARRIEU L., BAIGES T., MIOZZO M. & COREZZOLA S., 2022. – *Définition de l'Indice de Biodiversité Potentielle pour les forêts françaises (IBP Fr v3.0)*. CNPF, INRAE Dynafor, 11 p.
- HILL M. O., MOUNTFORD J. O., ROY D. B. & BUNCE R. G. H., 1999. – *Ellenberg's indicator values for british plants. ECOFACT Volume 2 Technical Annex*. Huntingdon : Institute of terrestrial ecology. DETR environment transport regions. Centre for ecology and hydrology. Natural environment research council., 46 p.
- IGN – INSTITUT NATIONAL DE L'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE ET FORESTIÈRE., Définitions. <https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?rubrique166> Consulté le 29/11/2022.
- JULVE P., 1998. – Index botanique, écologique et chorologique de la Flore de France. Version 2022. *Programme Catminat*, <http://philippe.julve.pagesperso-orange.fr/catminat.htm>.
- KRAUS D., BÜTLER R., LACHAT T., LARRIEU L., MERGNER U., PAILLET Y., RYDKVIST T., SCHUCK A. & WINTER S., 2016. – *Katalog der Baummikrohabitate - Referenzliste für Feldaufnahmen*. .

LANDOLT E., BÄUMLER B., ERHARDT A., HEGG O., KLÖTZLI F., LÄMMLER W., NOBIS M., RUDMANN-MAURER K., SCHWEINGRUBER F., THEURILLAT J.-P., URMI E., VUST M. & WOHLGEMUTH T., 2010. – *Flora indicativa. Ökologische Zeigerwerte und biologische Kennzeichen zur Flora der Schweiz und der Alpen. Ecological indicators values and biological attributes of the flora of Switzerland and the Alps*. 2^e éd., Bern : Haupt, 376 p.

LARRIEU L. & GONIN P., 2016. – *Présentation de l'indice de biodiversité potentielle (IBP)*. CNPF-IDF, INRA Dynafor, 4 p.

LARRIEU L. & GOSSELIN M., 2015. – Des peuplements en libre évolution permanente pour la conservation de la bio-complexité des forêts. .

LARRIEU L., PAILLET Y., WINTER S., BÜTLER R., KRAUS D., KRUMM F., LACHAT T., MICHEL A. K., REGNERY B. & VANDEKERKHOVE K., 2018. – Tree related microhabitats in temperate and Mediterranean European forests: A hierarchical typology for inventory standardization. *Ecological Indicators*, **84** : 194-207 doi : <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.051>.

LAVILLE L. & JUHEL C., 2017. – *Identification des végétations de zones humides par bassin versant, l'Orne et la Dives*. Agence de l'eau Seine Normandie / Région Normandie., Villers-Bocage, 34 p.

LE LAY Y.-F. & PIÉGAY H., 2007. – Le bois mort dans les paysages fluviaux français : éléments pour une gestion renouvelée. *L'Espace géographique*, **Tome 36** (1) : 51-64 doi : 10.3917/eg.361.0051.

MACIEJEWSKI L., 2016. – *État de conservation des habitats forestiers d'intérêt communautaire : évaluation à l'échelle du site Natura 2000 (version 2)*. Paris, France : Muséum national d'histoire naturelle, Service du Patrimoine naturel, 49 p.

MALAVOI J.-R. & BRAVARD J.-P., 2010. – *Éléments d'hydromorphologie fluviale*. Onema, 224 p.

PIÉGAY H., PAUTOU G. & RUFFINONI C., 2003. – *Les forêts riveraines des cours d'eau : écologie, fonctions et gestion*. CNPF-IDF, 464 p.

RÉSERVES NATURELLES DE FRANCE., 2012. – Notice pour la mise en place et la saisie des données du protocole de suivi dendrométrique des réserves forestières. .

ROSSI M. & VALLAURI D., 2013. – *Évaluer la naturalité. Guide pratique version 1.2*. Marseille : WWF, 154 p.

TOMASINI J., 2002. – Introduction aux différentes techniques d'inventaires forestiers. *Prosilva France*, : 4p.

WASSON J.-G., CHANDESRIIS A., PELLA H., SAUQUET E. & MENGIN N., 2003. – *Typologie des cours d'eau*. Irstea, 48p. p.