

Colonisation par la végétation des passages sous les infrastructures

Étude de 10 ouvrages présentant des sections
d'ouverture de 16 à 120 m²



Octobre 2018

Rapport

Colonisation par la végétation des passages sous les infrastructures

Étude de 10 ouvrages présentant des sections
d'ouverture de 16 à 120 m²

Rédacteur

Pierre MAZUER- Cerema Est
téléphone : 33 (0)3 87 20 46 34
mél : pierre.mazuer@cerema.fr

Relecteur(s)

Marc GIGLEUX - Cerema Est
téléphone : 33 (0)3 87 20 46 05
mél : marc.gigleux@cerema.fr

Luc CHRETIEN - Cerema Est
téléphone : 33 (0)3 87 20 46 12
mél : luc.chretien@cerema.fr

Elvire HENRY - DGITM/DIT/GRN/ARN4
téléphone : 33 (0)1 40 81 14 11
mél : elvire.henry@developpement-durable.gouv.fr

Sommaire

Contexte et objet de l'étude.....	3
Fiche synthétique de rapport.....	5
Partie I.....	7
Définition de la méthodologie pour l'étude de terrain.....	7
Préambule.....	7
1 - Caractérisation des passages inférieurs.....	7
1.1 - <i>Morphologie des passages inférieurs.....</i>	7
1.2 - <i>Paramètres mésologiques* ayant un impact direct sur la végétation.....</i>	9
1.3 - <i>Autres paramètres : température de l'air, physico-chimie naturelle et artificielle du sol.....</i>	12
1.4 - <i>Synthèse des paramètres retenus pour cette étude.....</i>	13
2 - Type d'ouvrages à étudier.....	13
3 - Caractérisation de la végétation.....	13
4 - Méthode d'étude : plan de relevés.....	14
<i>Préambule.....</i>	14
4.1 - <i>Matériel.....</i>	14
4.2 - <i>Conditions préalables au terrain.....</i>	15
4.3 - <i>Relevé des informations sur le passage inférieur et sur l'opération de terrain.....</i>	15
4.4 - <i>Délimitation de la station d'étude, des secteurs et zones.....</i>	15
4.5 - <i>Relevé des informations sur la végétation.....</i>	17
4.6 - <i>Relevé des mesures physiques.....</i>	18
Partie II Collecte des données et exploitation.....	19
1 - Collecte des données.....	19
1.1 - <i>Reconnaissance et choix des passages inférieurs.....</i>	19
1.2 - <i>Conditions de réalisation.....</i>	20
2 - Exploitation des données.....	20
2.1 - <i>Introduction.....</i>	20
2.2 - <i>Colonisation par la végétation terrestre.....</i>	21
2.3 - <i>Colonisation par la végétation aquatique.....</i>	33
2.4 - <i>Synthèse des conclusions techniques - amélioration de la méthode.....</i>	34
Partie III Propositions d'aménagement des passages inférieurs pour améliorer la végétalisation. 35	35
1 - Conception d'un passage inférieur.....	35
2 - Implantation de la végétation dans un PI*.....	37
Glossaire.....	40
Bibliographie.....	41
Annexes.....	43
Annexe 1 : Fiches de terrain vierges.....	43
Annexe 2 : Fiches de terrain renseignées.....	48

Remerciements

Je tiens particulièrement à remercier Philippe Usseglio-Polatera, de l'Université de Lorraine, pour sa contribution à la recherche bibliographique, sur ce sujet faisant l'objet de peu de publications.

Mes remerciements vont aussi à Marc Gigleux et Luc Chrétien, du Cerema Est, pour la relecture de ce rapport, ainsi qu'à Gérald Tekielak et Alain Morand pour leur participation à la phase terrain.

Contexte et objet de l'étude

Les passages sous les infrastructures (appelés passages inférieurs ou PI* dans la suite du texte) offrent à la végétation des conditions mésologiques* ¹ modifiées et peu favorables (éclairage réduit, présence d'eau moindre pour la végétation terrestre, nature du sol parfois modifiée, etc.). Il est couramment observé que la végétation terrestre et aquatique se réduit fortement, voire disparaît, dès les premiers mètres sous les passages les plus sombres (voir figure 1 ci-dessous).



RN4 sur ruisseau de la baraque



RN4 sur le ruisseau de l'étang d'Albe



RN4 sur passage à faune

Figure 1 : Exemples de couverture croissante du sol par la végétation dans des PI* de sections d'ouverture croissante
(Source : P. Mazuer - Cerema Est)

Cette situation entraîne de nombreux dysfonctionnements :

- la rupture des conditions d'habitat propres à la présence de la végétation, avec un impact sur la continuité écologique, autant pour la faune terrestre que pour la faune aquatique (par exemple : augmentation de la distance à franchir pour les animaux, impact de la prédation dans les zones découvertes, etc) ;
- pour les ouvrages hydrauliques : l'absence de protection de berges par la végétation, obligeant par exemple les aménagés à avoir recours à des enrochements.

Une recherche bibliographique préalable (voir bibliographie) a mis en évidence l'absence de publications sur ce sujet spécifique.

L'objet de la présente étude est de :

- 1) caractériser la végétation (notamment sa régression) dans les PI* en fonction des caractéristiques de ces derniers et des paramètres mésologiques* ;
- 2) définir les caractéristiques des PI* permettant d'avoir une meilleure végétalisation et définir des pistes d'amélioration pour les ouvrages existants.

¹ Les mots suivis de « * » sont définis dans le glossaire.

Nota : Les notions de longueur et largeur d'un ouvrage prises en compte dans cette étude sont définies par la position de l'observateur. Ainsi, nous avons appelé **longueur**, la distance entre les deux ouvertures du passage inférieur (longueur de couverture - qui correspond à la largeur de l'infrastructure) et la **largeur**, l'ouverture horizontale du passage inférieur (voir figure 2). Pour mettre en garde le lecteur sur la définition retenue pour ces deux mots, ils sont suivis par un « * » dans le présent rapport.

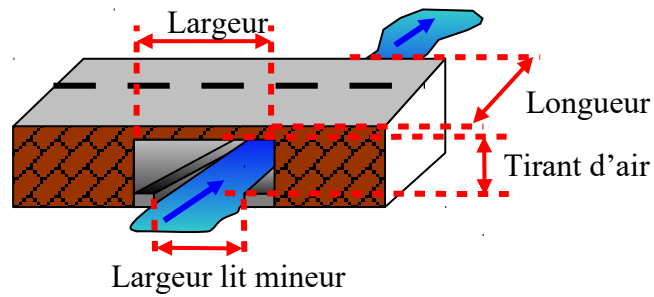


Figure 2 : Schéma de définition de la longueur* et largeur* d'un passage inférieur. Le tirant d'air est aussi appelé hauteur libre (Source : M. Gigleux - Cerema Est)

Fiche synthétique de rapport

Colonisation par la végétation des passages sous les infrastructures

- Étude de 10 ouvrages présentant des sections d'ouverture de 16 à 120 m² -

Paramètres à collecter sur les passages inférieurs (PI*) (recommandés) :

a) Morphologie des passages inférieurs :

TIRANT D'AIR, LARGEUR*, LONGUEUR*, PUITS DE LUMIÈRE. Facultatif : OCCULTATION (de l'ouverture), ORIENTATION (des ouvertures)

b) Paramètres mésologiques* ayant un impact direct sur le végétation :

Indication de l'HUMIDITÉ APPARENTE DU SOL, estimation de l'ÉPAISSEUR du sol (en cm) et de sa GRANULOMÉTRIE.

Paramètres à collecter sur la végétation :

CLASSES DE POURCENTAGE DE RECOUVREMENT du sol (vue du zénith) par la végétation.

PRÉSENCE DE LIGNEUX, relevée par espèce avec leur distance maximale dans l'ouvrage et leur hauteur.

Méthode d'étude :

Pour chaque station d'étude, délimitation de secteurs (couvert et de référence) et, en présence d'un cours d'eau, des zones suivantes :

- a) zone de pied sec : des appuis de l'ouvrage jusqu'au sommet de berge ;
- b) zone de berge sur la végétation terrestre : du sommet de berge à la limite de l'eau, hors héliophytes ;
- c) zone aquatique incluant les rives avec héliophytes, les surfaces avec hydrophytes et celles sans végétation.

Relevé des informations :

Les relevés de végétation sont effectués sur un transect longitudinal*, positionné sur l'axe où la végétation s'enfonce le plus sous l'ouvrage (et en général présentant la plus forte densité de végétation) quelle que soit la forme du recouvrement de la végétation (en flèche, en bande, décalé ou central ... en fonction de l'orientation vis-à-vis des points cardinaux).

Il est placé autant de transects que nécessaire (pieds sec, zones de berges, zone aquatique).

La classe de recouvrement de la végétation sur le sol (vu du zénith) est estimée visuellement sur des placettes d'environ un m².

Les mesures physiques (Eclairement (lux), Hygrométrie de surface (%), Granulométrie dominante du sol, Épaisseur du sol) sont effectuées le long de l'axe défini pour les relevés de végétation. Un seul relevé physique est effectué à environ 30 cm de la limite « intérieure à l'ouvrage » de chaque classe de recouvrement.

Principaux résultats :

Les PI* étudiés sont sous des routes à 2 x 2 voies. Ils ont plus de 5 ans d'existence (le plus récent a 9 ans). Le tirant d'air varie de 2,9 à 8 m, la largeur* de 5 à 15 m et la longueur* de 23,5 à 29 m.

Pour ces passages inférieurs :

- a) la section des ouvertures est le paramètre le plus discriminant pour expliquer la colonisation de la végétation dans le PI*. Les caractéristiques minimum des PI* pour avoir un recouvrement par la végétation de plus de 25 % (sur au moins une placette de 1 m²) de la totalité de la longueur* de l'ouvrage sont les suivantes :
- une section de 60 m² ,
 - un rapport section /longueur* d'environ 2,7,
 - un tirant d'air de 5 m,
 - un rapport de tirant d'air /longueur* d'environ 0,2.

Le recouvrement par la végétation diminue rapidement sous ces valeurs.

- b) la distance entre l'ouverture et la limite maximum de végétalisation de plus de 25 %, pour les sections les plus faibles (moins de 25 m²), est de l'ordre de 4 m de l'entrée du PI*.

Cette distance est réduite pour une végétalisation de plus de 50 %. Elle peut atteindre 1 m à 4 m de l'entrée, selon les ouvrages.

- c) le type de végétation herbacée correspond à celle des sous-bois (à confirmer).

- e) le tirant d'air de 5 m est le paramètre le plus discriminant pour expliquer la présence de ligneux de plus de 0,5 m de haut jusqu'au centre du PI*. Les espèces concernées sont les frênes, saules marsault et cendrés.

- f) la régression et la disparition de la végétation aquatique sous un PI* est beaucoup plus rapide que pour la végétation terrestre (à confirmer).

Proposition pour la conception de PI* :

- a) réduire au maximum la longueur* couverte, notamment par la réduction de la largeur des remblais (construction de murs en ailes ou de murs de soutènement de remblais verticaux, pose de butons, etc.).

- b) prévoir une section d'ouverture et un tirant d'air suffisant, en se basant sur les valeurs proposées dans la présente étude.

- c) aménager le PI* pour la végétation du pied sec (apport d'eau par installation d'arrivée de drains au pied des culées, sur toute la longueur*, épaisseur du sol suffisante (> 30 cm), granulométrie favorable : mélange de petites pierres, graviers, sables, limons ou terre selon les PI*).

Il peut être recommandé de mettre une terre provenant des sous-bois les plus proches, qui potentiellement contiennent des graines d'espèces relativement adaptées.

- d) aménager le PI* pour la végétation des berges. Les PI* étudiés ont des berges fortement dégradées par des aménagements lourds (enrochements serrés ou lâches). Ces aménagements nuisent fortement à la végétalisation des berges. Nous recommandons de favoriser la plantation de ligneux dans les zones suffisamment proches des ouvertures.

- e) aménager le PI* pour la végétation aquatique. Les cours d'eau présent dans les PI* étudiés présentent une végétation aquatique réduite, beaucoup plus impactée que la végétation terrestre. Le jeu de données étant insuffisant pour définir des critères de conception d'ouvrage, il est néanmoins possible de recommander d'éviter des aménagements lourds du lit (blocs, redimensionnement favorisant le dépôt de limons, etc.). Le lit, pour permettre une colonisation, doit comporter un lit mineur adapté au débit médian et présentant un chenal d'étiage. La granulométrie doit être variée, avec une dominance de petites pierres (par exemple d'un diamètre de 10 à 20 cm).

- f) implanter une végétation dans les PI*. Pour la végétation terrestre, les recommandations suivantes peuvent être faites :

- la terre peut êtreensemencée par des graines d'espèces de sous-bois adaptées à la région,
- les ligneux peuvent être plantés, particulièrement en berge des cours d'eau, si la section de l'ouverture et le tirant d'air sont suffisants.

Partie I

Définition de la méthodologie pour l'étude de terrain

Préambule

Le Cerema a une expérience ancienne concernant les franchissements des infrastructures par la grande et petite faune terrestre et aquatique (Sétra 1993, 2005 et 2012). Néanmoins, la caractérisation et les raisons de l'absence de colonisation par les végétaux des PI*, n'ont pas fait l'objet d'études spécifiques à ce jour par le Cerema. De plus, la recherche bibliographique préalable a mis en évidence l'absence de publication. Des publications sur des sujets approchant (ouvrages sur des marais estuariens) ont été utilisées ci-après (Broome 2004, CTE/NC DOT 2005, Logan 2017).

L'objectif de cette étude est de réaliser des relevés de terrain, pour caractériser la colonisation par la végétation des PI* et identifier les facteurs limitant son apparition et son développement.

Nous avons donc défini dans cette première partie les paramètres :

- 1) de caractérisation des PI* (tirant d'air, largeur*, présence de puits de lumières, etc.) et des données mésologiques* (éclairage, etc.) ;
- 2) de choix des types d'ouvrages retenus pour cette étude ;
- 3) de caractérisation de la végétation (évaluation du pourcentage de recouvrement de la végétation, etc.) ;
- 4) de la méthode d'étude (« plan de relevés des informations de terrain »).

1 - Caractérisation des passages inférieurs

Ce chapitre résume le travail bibliographique effectué.

Attention : les paramètres finalement retenus pour être relevés sur le terrain, pour la présente étude, sont signalés en PETITES MAJUSCULES SOULIGNÉES.

1.1 - Morphologie des passages inférieurs

Voir la fiche de terrain « description de la station » (annexe 1).

1.1.1 - Éléments de bibliographie

L'étude du CETU (2000) sur l'éclairage des tunnels nous indique que « la lumière naturelle ne pénètre que sur une distance de l'ordre d'une à trois fois leur plus grande dimension transversale, en fonction de l'orientation et du site ».

Les études de Broome (2004), CTE/NCDOT (2005) et Logan (2017) sur des ponts routiers ou pontons situés au-dessus de marais salés nous confirment que la lumière baisse rapidement sous ces ouvrages et que cela a un impact majeur sur la végétation. Notons (en comparaison avec notre étude) que les milieux sous ces ouvrages ne manquent pas d'eau et que le substrat n'est pas modifié. Ces auteurs utilisent le rapport tirant d'air de l'ouvrage / longueur* de l'ouvrage pour évaluer l'impact de l'ouvrage. Si ce rapport passe en dessous de 0,7 (par exemple un ouvrage de 7 m de haut pour 10 m de longueur*), il est constaté une baisse importante de la lumière (atténuée de plus 85-90 %), de la densité en macrophytes et de la richesse en macro-invertébrés. Ce seuil limite est celui recommandé par les auteurs pour la conception d'un ouvrage.

1.1.2 - Paramètres retenus

L'accès à la lumière dans le PI* est donc dépendant de ses caractéristiques morphologiques. Nous retenons les paramètres suivants : TIRANT D'AIR (au-dessus du pied sec et le cas échéant, au-dessus de la ligne d'eau), LARGEUR*, LONGUEUR*.

L'OCCULTATION éventuelle de l'ouverture (présence de végétation, d'une construction, etc.), estimée visuellement, est notée en pourcentage. Les pourcentages d'occultation ont été transformés en classe, afin d'apporter de la lisibilité aux résultats, sur la base du tableau 1 ci-dessous :

% d'occultation (estimée) aux ouvertures	Classe d'occultation	Description
0 à <25 %	1	Occultation nulle ou faible
25 à <50 %	2	Occultation modérée
50 à <75 %	3	Occultation forte
75 à 100 %	4	Occultation très forte à totale

Tableau 1 : Conversion des pourcentages d'occultation en classe d'occultation des ouvertures

La présence éventuelle de PUITS DE LUMIÈRE est simplement notée pour information dans la fiche de « description de la station ». L'effet de ces puits est mesuré dans la fiche de « relevés élémentaires » (luminosité, etc.).

Nota : aucun puits de lumière n'était présent dans les ouvrages retenus. Nous pensons néanmoins que ce paramètre doit être conservé sur la fiche de terrain.

L'orientation des ouvertures du PI* par rapport au soleil est aussi retenue, le soleil se levant plein Est en France, légèrement décalé de quelques degrés sud. Le paramètre choisi est L'ORIENTATION des ouvertures, selon 4 modalités : nord-sud, est-ouest, NE-SO, NO-SE, figurant sur une boussole (voir figure 3 ci-dessous).

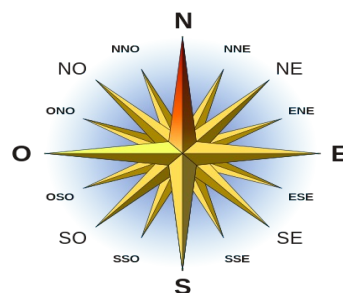


Figure 3 : Rose des vents (Source : Wikipédia, 2017)

1.2 - Paramètres mésologiques* ayant un impact direct sur la végétation

Voir la fiche « Relevés élémentaires » en annexe 1.

Nous avons estimé au préalable que certains facteurs écologiques (facteurs climatiques : température de l'air, vent, neige, etc. Facteurs biotiques : interaction intra et interspécifique), définis par Ramade (1984) ont peu ou pas d'impact sur la végétalisation sous le PI*, en comparaison avec la végétation à l'extérieur du PI*. Ils ne sont pas traités dans ce rapport.

1.2.1 - L'éclairement

1. Éléments de bibliographie

D'après F. Ramade (1984), « *la lumière constitue pour les végétaux un facteur limitant [...] pour les faibles éclaircissements, situés à la limite du seuil de compensation photosynthétique (valeur du flux pour lequel photosynthèse et respiration s'équilibrent) ...* ». Il ajoute : « *L'intensité moyenne d'un éclaircissement et sa durée au cours du cycle annuel constituent un des principaux paramètres qui conditionnent l'activité photosynthétique* ».

La présence d'une espèce va dépendre de deux valeurs d'éclairement, propres à chaque espèce : la limite du seuil de compensation photosynthétique et celle de l'activité photosynthétique optimale.

En fonction de l'intensité lumineuse pour laquelle l'activité photosynthétique des plantes est maximale, il est distingué des espèces de lumière (héliophiles) et d'ombre (sciaphiles). Citons parmi les espèces sciaphiles les espèces de sous-bois et les jeunes stades de la plupart des espèces d'arbres des forêts de feuillus tempérées.

F. Ramade (1984) précise : « *l'activité photosynthétique [des sciaphiles] est optimale sous quelques centaines de lux, parfois seulement une cinquantaine de lux pour les plus sciaphiles d'entre-eux* ». « *[Dans les forêts pluvieuses tropicales] règne une pénombre permanente au niveau du sol... l'éclairement au niveau du sol est... à peine d'une dizaine de lux* ».

A titre de comparaison, des ordres de grandeurs de valeurs d'éclairement (en lux) sont cités sur Wikipedia : 0,5 Lux : nuit de pleine lune, 10 Lux : pénombre ou éclairage bougie, 100 Lux : luminosité minimale pour lire un texte, 5.000 Lux : extérieur par temps couvert, 20.000 Lux : éclairage artificiel intense (à proximité directe d'une lampe halogène 50W), 50.000 à 100.000 Lux : extérieur par temps ensoleillé.

En conclusion :

La connaissance des conditions d'éclairement en un lieu donné nécessite une étude sur une année complète. Le résultat que peut apporter une seule campagne de mesures est donc informatif.

2. Mesure de l'éclairement

La mesure de la lumière et de l'éclairement d'un récepteur est aussi complexe que la nature de la lumière. La norme NF C 42-710 définit différentes grandeurs photométriques.

Il est possible de raisonner en :

- **flux d'énergie reçue** (en Watt (W) ou Joule/seconde (J/s)). Cette mesure est complexe, notamment dans les conditions de terrain, car elle doit porter à la fois :
 - * sur toutes les longueurs d'onde du spectre électromagnétique (de 10^{-5} nm (rayons gamma), à plusieurs km (ondes radio) incluant donc le spectre solaire, de 10 nm à 2 800 nm),
 - * sur toute sa distribution angulaire ;
- **flux énergétique lumineux** (en lumen (lm)). C'est le flux énergétique dans le domaine visible, entre 380 et 780 nm, (voir figure 4 ci-dessous) d'après son action sur l'observateur humain de référence. Par exemple pour 555 nm (sensibilité maximum de l'œil), 1 W vaut 673 lumen. Ce paramètre est donc adapté à l'œil humain et non aux plantes ;
- **flux de photons photosynthétiques** (PPF en anglais, en $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$). C'est un flux photonique (quantité de photons par unité de temps) dans la bande spectrale comprises entre 400 et 700 nm. Cette bande correspond à celle utilisée par les plantes pour leur activité photosynthétique. Les pigments chlorophylliens ont leur maximum d'absorbance dans le bleu (450 nm) et le rouge (650 nm) (voir figure 4 ci-dessous).

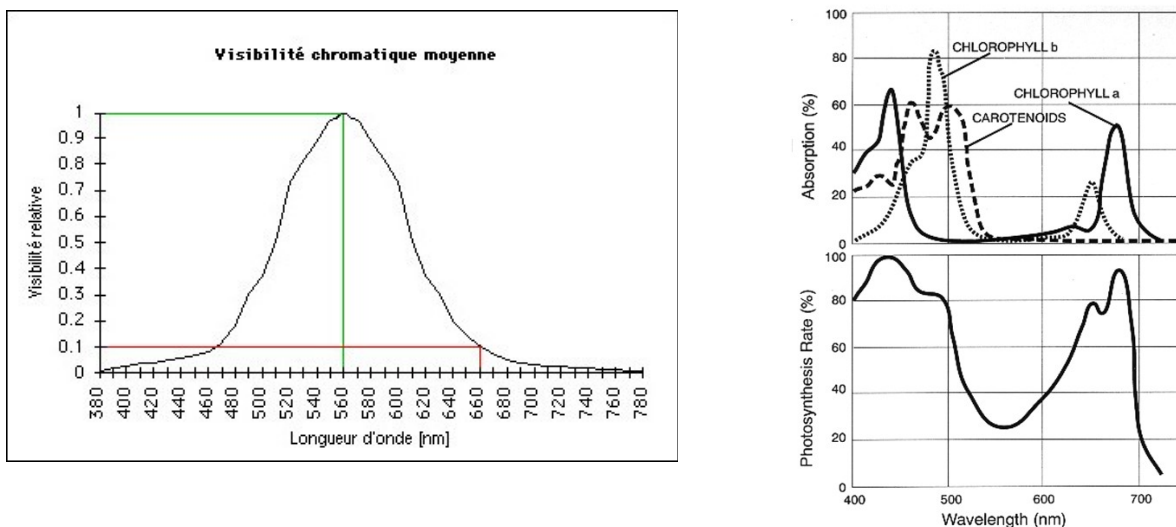


Figure 4 : Courbe de sensibilité à la lumière de l'œil humain de référence (à gauche) d'après le site internet de l'école nationale supérieure de Caen. Lumière photosynthétique active et absorption des pigments chlorophylliens (à droite) d'après John Whitmarsh and Govindjee (non daté, sur Internet 2017)

La bande 400-700 nm est appelée 'rayonnement photosynthétique actif' (RPA) (PAR, en anglais : Photosynthetically Active Radiations). La production de biomasse d'une culture est une fonction linéaire du PAR (d'après INRA, non daté). Néanmoins, il existe aussi une influence hormonale des infrarouges et des ultraviolets, qui produisent des effets sur la pigmentation des plantes (Led-horticole, site internet). Si la PAR impacte la biomasse, les besoins des plantes peuvent être plus larges que cette PAR.

La mesure est habituellement réalisée par unité de surface (densité de flux de photons photosynthétiques (PPFD en anglais) reçue d'une source lumineuse, en $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).

- **éclairage lumineux d'un récepteur** (lm.m^{-2} ou lux) : c'est, en un point, le rapport entre le flux d'énergie dans le visible (ou flux lumineux) reçu pour un œil humain de référence et l'aire de cet élément. Cette mesure dépend donc du lumen (voir le flux lumineux ci-dessus) et n'est donc pas directement adaptée à la végétation ;
- **couvert angulaire** : La mesure de l'éclairage peut être estimée en mesurant le couvert angulaire (portion de la voûte céleste occultée), par exemple par photographie hémisphérique (Becker, 1971).

Discussion et paramètre retenu :

La mesure de l'éclairage par PPFd semble être la plus adaptée à la végétation. Néanmoins, les études réalisées (Long et al. 2012, Medeiros et al. 2013, in Logan et al. 2017) montrent qu'une mesure en « lux total » est corrélée de manière significative avec les radiations PAR. Nous avons donc retenu L'ÉCLAIREMENT LUMINEUX en lux. Notons que la mesure du couvert angulaire est plus lourde qu'une mesure de luxmètre pour une précision qui n'est pas recherchée dans la présente étude.

Comme le précise F. Devillez (2005), « *la très grande variabilité de l'éclairage en fonction des heures de la journée, des saisons, de la météorologie exige un échantillonnage très important pour avoir une bonne estimation de l'éclairage relatif* ». Il convient donc d'optimiser la prise de mesures par les meilleures conditions possibles (météorologie et heures de la journée, voir chap. 4.2).

Adaptation après les premiers essais de terrain : La forte sensibilité du luxmètre utilisé (photomètre TROTEC BF06) nous a conduit à standardiser la procédure afin d'obtenir des valeurs reproductibles. Le luxmètre a été placé au niveau du sol, le photocapteur en position haute (à environ 10 à 15 cm au-dessus du sol), orienté au mieux vers la source de lumière (c'est-à-dire présentant la plus forte valeur possible en lux). Le luxmètre a été placé, dans la mesure du possible, à l'ombre. Quand cela était impossible aux ouvertures, la valeur indiquée était « > 40 000 lux ».

1.2.2 - L'hygrométrie du sol

1. Éléments de bibliographie

L'hygrométrie (taux d'humidité) du sol est un facteur écologique fondamental. Il est classiquement distingué les espèces xérophiles (milieux secs), mésophiles (milieux tempérés), hygrophiles (milieux rarement inondés mais avec une hygrométrie forte, proche de la saturation), amphibies et aquatiques.

La disponibilité de l'eau pour les plantes dépend de nombreux paramètres du sol : la texture (argileux, limoneux ou sableux), la structure (sols de type agrégats ou particuliers), la porosité, la capacité de rétention en eau du sol, l'humidité du sol au point de flétrissement, etc. (Ramade, 1984).

2. Mesure de l'hygrométrie

L'absence d'eau peut être un des paramètres expliquant la difficulté qu'a la végétation à coloniser les PI*. L'hygrométrie est donc un paramètre pouvant être mesuré dans chaque zone (voir chap. 4.5).

Adaptation après les premiers essais de terrain : pour tous les ouvrages étudiés, l'humidité apparente était forte lors des visites de terrain. Nous n'avons donc pas utilisé un hygromètre mais noté seulement : « humide ». Nous avons aussi noté les sources possibles d'apport en eau (en plus de celles dues aux ouvertures, c'est-à-dire par apport direct de la pluie).

Nota : l'apport direct de la pluie au niveau des ouvertures est au maximum sur un angle de 30° par rapport au zénith. Ce qui correspond environ, par exemple, à 4,5 m pour un ouvrage de 6 m de haut ou à 2,2 m pour un ouvrage de 3 m de haut.

1.2.3 - La nature et l'épaisseur du sol

1. *Eléments de bibliographie*

Les sols (issus de la transformation de la roche-mère) ont un impact important pour expliquer la présence des espèces.

Les classes de granulométrie, le compactage du sol, ainsi que son épaisseur peuvent devenir limitants, même si certaines plantes n'ont pas besoin de sol pour se développer (espèces lithophiles comme, par exemple, des lichens ou des bryophytes).

Le sol a des caractéristiques variables en fonction de sa profondeur. En général, il est distingué 4 « horizons », de A à D (A : riche en matière organique ; B : zone d'accumulation du lessivage de l'horizon A ; C : fragmentation de la roche-mère et D : roche-mère).

L'intérêt du sol pour la végétation va aussi dépendre de l'horizon A et notamment de la présence de litière et du type d'humus : Mull (riche, bien drainé, à lombric, épais et foncé), Moder (pauvre, litière se décomposant mal, poudre brune, décomposition par les arthropodes), Mor (très pauvre, sur sol granitique ou conditions acidifiantes ou des conditions climatiques froides et humides, faible activité biologique, dégradation par les champignons, litière se décomposant mal).

L'épaisseur est un critère à prendre en compte. C. Kosmas (2000) a démontré par exemple que des épaisseurs de sols inférieures à 25-30 cm sont critiques pour le maintien d'une végétation naturelle pérenne à arbustes.

2. *Mesure de la nature et de l'épaisseur des sols*

Les paramètres suivants sont retenus pour la présente étude (voir colonne 'commentaire' de la fiche 2 en annexe 1) :

- L'ÉPAISSEUR du sol (en cm), donc au-dessus du substrat dur ;
- la GRANULOMÉTRIE du sol, estimée à vue.

Au besoin, il est indiqué si l'épaisseur ou la granulométrie du sol sont estimées limitantes.

Adaptation après les premiers essais de terrain : dans tous les PI* étudiés dans la présente étude, l'épaisseur du sol et sa granulométrie étaient homogènes sur les pieds secs * et n'étaient visiblement pas un facteur limitant le développement de la végétation. Nous avons simplement estimé l'épaisseur du sol et sa granulométrie en retournant la terre à l'aide d'une pelle de jardinier.

1.3 - Autres paramètres : température de l'air, physico-chimie naturelle et artificielle du sol

La température de l'air, le potentiel acido-basique (pH), la salinité, la teneur en éléments minéraux (phosphore, azote, potassium, calcium, etc.) ou organiques (matières humiques. etc.) sont des facteurs importants définissant la présence des espèces. Notamment, la chimie du sol peut être modifiée et rendue toxique pour les plantes du fait des activités humaines (présence de métaux lourds, de biocides, etc.).

Ces facteurs n'ont pas été retenus pour cette étude :

- la température de l'air nous semble déjà intégrée dans les paramètres : profondeur de l'ouvrage et orientation ;
- le sol utilisé sous les PI* étudiés (en général des passages à faune) est en règle générale un sol reconstitué sur une épaisseur d'au moins 30 cm (sauf un seul ouvrage, voir plus bas).

1.4 - Synthèse des paramètres retenus pour cette étude

Les paramètres retenus sont les suivants :

a) Morphologie des passages inférieurs :

TIRANT D'AIR, LARGEUR*, LONGUEUR*, OCCULTATION (de l'ouverture), PUITS DE LUMIÈRE, ORIENTATION (des ouvertures).

b) Paramètres mésologiques ayant un impact direct sur la végétation :

L'ÉCLAIREMENT LUMINEUX en lux, indication de L'HUMIDITÉ APPARENTE DU SOL, estimation de L'ÉPAISSEUR du sol (en cm) et de sa GRANULOMÉTRIE.

2 - Type d'ouvrages à étudier

Les critères de sélections des ouvrages sont les suivants :

- **ouvrages en place depuis plusieurs années.** Ce critère permet de s'affranchir du temps de recolonisation après travaux. Des ouvrages dont les travaux sont achevés depuis au moins 5 ans sont à privilégier ;
- **ouvrages présentant différentes situations de tirant d'air, de largeur* et de longueur*** (afin d'avoir une variation de colonisation des PI*);
- **présence d'un cours d'eau** pour prendre en compte, dans la même étude, la situation de la flore terrestre, de berge et aquatique sous les PI* ;
- en présence d'un cours d'eau, **présence de pieds secs d'une largeur significative** (au moins 2 m).

3 - Caractérisation de la végétation

La présence de végétation et ses caractéristiques peuvent être analysées à différentes échelles de précision : strate (herbacées, arbustives, etc.), liste d'espèces ou de taxons, pourcentage de recouvrement du sol, épaisseur ou hauteur de la végétation, densité ou nombre de pied, masse, état physiologique ou état de santé, etc.

Nota : il est intéressant de définir les espèces adaptées à nos régions qui peuvent accepter les conditions d'habitat présentes dans les PI* (espèces sciaphiles, peu exigeantes en eau, supportant des sols peu épais, etc.) :

- soit par une bibliographie. Cette approche est difficile, notre recherche bibliographique et les prises de contacts sur le sujet n'ont pas donnés de résultat ;
- soit par l'observation de PI* existants. Le recensement est à effectuer par un botaniste, si possible en période de floraison. Ces conditions n'étaient pas réunies dans le cadre de cette étude.

Nous avons retenu, vu l'objectif de notre étude, un relevé de CLASSES DE POURCENTAGE DE RECOUVREMENT du sol (vue du zénith, voir figure 5) par la végétation, sur des placettes d'environ 1 m².

Les classes retenues sont les suivantes (tableau 2 et figure 5) :

% de recouvrement par la végétation	N° de classe de recouvrement par la végétation	Description
50 à 100 %	V4	Végétation suffisamment développée : recouvrement dense et continu
25 à < 50 %	V3	Végétation significativement réduite : recouvrement moyennement dense et discontinu
5 à < 25 %	V2	Végétation fortement réduite : recouvrement peu dense et discontinu
0,1 à < 5 %	V1	Végétation résiduelle : recouvrement clairsemé
< 0,1 %	V0	Végétation inexistante (parfois quelques plantules isolées)

Tableau 2 : Classes de recouvrement du sol par la végétation sur des placettes d'environ 1 m².



Figure 5 : Exemple de classes de recouvrement décroissantes de gauche à droite : V2 et V1 (Source : P. Mazuer - Cerema Est)

Pour la végétation terrestre, ces classes de recouvrement sont relevées pour la végétation dressée (c'est-à-dire hors végétaux formant une couche de moins de un cm de haut, par exemple certaines bryophytes ou les lichens).

Pour la végétation aquatique, tous les types de végétaux sont pris en compte.

La NATURE DE LA VÉGÉTATION (herbacées < 10 cm, etc.) est indiquée, ainsi que de façon facultative les taxons dominants. La PRÉSENCE DE LIGNEUX est relevée par espèce avec leur distance maximale dans l'ouvrage et leur hauteur, pour chaque espèce.

4 - Méthode d'étude : plan de relevés

Préambule

La méthode ci-dessous a pour objectif d'élaborer un plan de relevé des informations de terrain. Elle est présentée de la manière suivante : Matériel, Conditions préalables aux relevés, Règles de réalisation des relevés, Présentation des résultats.

4.1 - Matériel

Le matériel nécessaire est le suivant : fiches de terrain vierges (voir annexe 1), schéma d'aide pour l'évaluation des recouvrements de macrophytes (IRSTEA, 2015), appareil photo, GPS, boussole,

télémètre, décamètre 50 m ou corde graduée, mire, mètre enrouleur de poche, lampe, pelle de jardinier, sécateur, pantalon de pêche et botte.

4.2 - Conditions préalables au terrain

Les conditions de relevés recommandées sont les suivantes :

1) pendant la période de végétation (de mai à septembre environ, mais de préférence en période de floraison) ;

En cas de mesure d'éclairement :

2) entre 8 et 17 h ;

3) dans des conditions météorologiques correspondant aux modalités "plein soleil" et "faiblement nuageux".

Les relevés lors des périodes "moyennement nuageux ou pluie fine", "très nuageux ou forte pluie" sont à éviter.

En cas de présence d'un cours d'eau sur la zone d'étude :

4) hors influence d'un événement hydrologique antérieur (crue, assec, etc.) dommageable pour les plantes aquatiques ;

5) hydrologie au plus en 'moyenne eau' (eau atteignant au plus la végétation terrestre du bas de berge, sans trop l'envoyer).

4.3 - Relevé des informations sur le passage inférieur et sur l'opération de terrain

Sur le terrain, les paramètres descriptifs du passage sont relevés après délimitation de la station d'étude, des secteurs et des zones. (Information sur l'ouvrage, localisation du passage inférieur, information sur l'opération de terrain, description du passage inférieur – voir fiches 1 et 2 en annexe 1).

4.4 - Délimitation de la station d'étude, des secteurs et zones

Les relevés sont réalisés sur une station d'étude, divisée en secteurs (voir figure 6) :

A) secteurs de référence (extérieurs au PI*) aux deux ouvertures (donc hors influence de l'ombrage de l'ouvrage ou de situations non représentatives comme la présence d'un piétinement). Cette analyse permet de connaître le contexte physique et végétal amont et aval de la station. Pour le milieu terrestre, il est noté uniquement la classe de recouvrement par la végétation (qui devrait être normalement : « 50 à 100 % ») et le type de végétation (ligneux < 1m, etc). Pour le milieu aquatique, il est recherché des endroits présentant les mêmes habitats (vitesse du courant, granulométrie du fond, profondeur, etc.) que ceux à l'intérieur de l'ouvrage.

Nota : dans nos essais, nous avons déterminé nos secteurs de référence à une distance d'environ 3 mètres des ouvertures. Lors de l'exploitation des résultats de terrain, nous nous sommes rendu compte que cette distance était trop faible. Nous avons donc modifié notre méthode après la campagne de terrain (voir la rédaction de l'alinéa précédent et de la fiche 2) pour indiquer que la référence doit être, si possible, au minimum à 20 m environ de l'ouvrage.

B) secteur couvert. Il correspond au secteur particulièrement étudié, couvert par l’ouvrage et limité par les deux ouvertures du PI*.

Zonation du secteur couvert en cas de présence d’un cours d’eau.

Chacun des secteurs est divisé en zones limitées transversalement :

- a) **zone de pied sec** : des appuis de l’ouvrage jusqu’au sommet de berge ;
- b) **zone de berge (végétation terrestre)** : du sommet de berge à la limite de l’eau, hors hélrophytes ;
- c) **zone aquatique** incluant les rives avec hélrophytes, les surfaces avec hydrophytes et celles sans végétation.

Le nombre de ces zones par station d’étude dépend de la position du cours d’eau sous l’ouvrage (pied sec sur une ou deux berges).

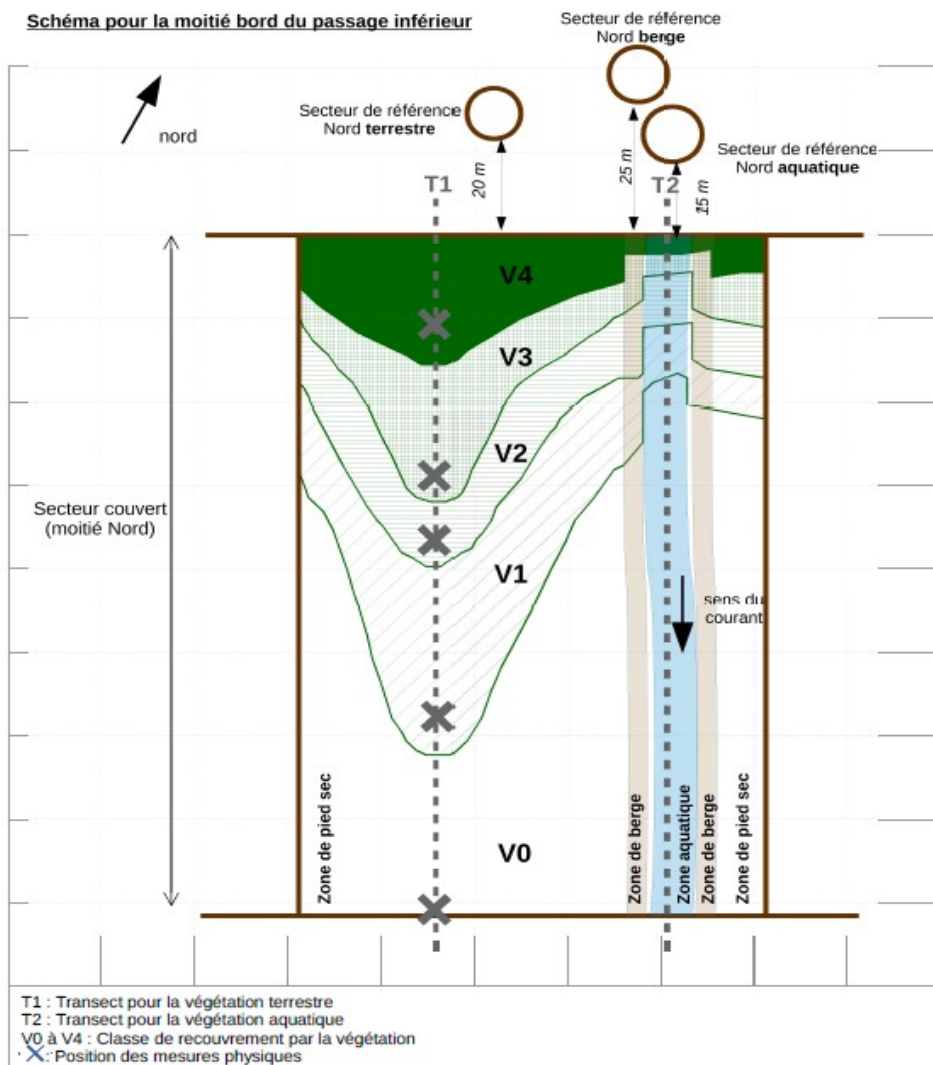


Figure 6 : Exemple de schéma d’une station d’étude (moitié nord) avec les 3 secteurs de référence, le secteur couvert et ses zones de pied sec, de berges et aquatiques. Les classes de recouvrement de V4 à V0 sont représentées. Si besoin, d’autres transects peuvent être réalisés, par exemple pour la végétation de berge (Source : P. Mazuer et G. Tekielak pour le dessin - Cerema Est)

4.5 - Relevé des informations sur la végétation

Voir fiche 2 en annexe 1.

Préalable : Les portions de terrain non représentatives des différents secteurs, à l'extérieur ou sous l'ouvrage, ne font pas l'objet de relevés (secteur piétiné, présence d'aménagement, zone bétonnée, etc.).

4.5.1 - Positionnement du transect

Les relevés de végétation sont effectués sur un transect longitudinal* (voir figure 7), positionné sur l'axe où la végétation s'enfonce le plus sous l'ouvrage (et en général présentant la plus forte densité de végétation) quelle que soit la forme du recouvrement de la végétation (en flèche, en bande, décalé ou central, etc. en fonction de l'orientation vis-à-vis des points cardinaux).

Il est placé autant de transects que nécessaire (pieds secs, zones de berges, zone aquatique).

Adaptation suite aux relevés de terrain : compte tenu de l'état des berges et du lit des cours d'eau étudiés, la méthode n'a pas pu être développée pour les zones de berges et aquatiques (enrochement important, berges recouvertes de ronces provenant du pied sec, rareté de la végétation aquatique, etc.).



Figure 7 : Exemple de mise en œuvre de la méthode de relevés de terrain (décamètre placé dans l'axe, un bâton permet de relever où chaque classe de recouvrement « s'enfonce » au maximum sous le PI*
(Cerema : A. Morand - Cerema Est)

4.5.2 - Estimation du pourcentage de recouvrement

La classe de recouvrement de la végétation sur le sol (vu du zénith) est estimée visuellement (voir figures 5, 6 et 7) sur des placettes d'environ un m².

Il peut être utilisé le Schéma d'aide à l'évaluation de recouvrement des macrophytes (IRSTEA, 2015, voir figure 7 bis). L'estimation ne prend pas en compte l'épaisseur de la végétation.

Il est conseillé, pour chaque zone, de marquer les limites des classes de recouvrement le long d'un décamètre à l'aide de piquets ou de systèmes équivalents, afin de faire les relevés (distance à l'ouverture, luminosité, etc.).

4.5.3 - Autres paramètres sur la végétation

Ils sont relevés selon les indications de la fiche 2 annexe 1 (" herbacées<10 cm ", etc).

En cas de mélange de différentes classes de végétation, le végétal dominant en recouvrement est retenu.

4.6 - Relevé des mesures physiques

Voir fiche 2 en annexe 1.

Les mesures sont effectuées le long de l'axe défini pour les relevés de végétation. Un seul relevé physique est effectué à environ 30 cm de la limite « intérieure à l'ouvrage » de chaque classe de recouvrement (voir figure 6).

Les mesures physiques sont les suivantes :

Eclairage (lux), Hygrométrie de surface (%), Granulométrie dominante du sol, Épaisseur du sol.

Dans les cas où la végétation est continue sous l'ouvrage (recouvrement entièrement dans la classe 50 à 100 %), des relevés ont tout de même été effectués pour information à différents endroits, par exemple en 3 points équidistants du PI*.

Partie II

Collecte des données et exploitation

1 - Collecte des données

1.1 - Reconnaissance et choix des passages inférieurs

Le calage de la méthode a nécessité une reconnaissance des ouvrages et un test d'application.

Pour la présente étude, constituant une première approche du sujet, les ouvrages ont été recherchés et choisis selon les critères listés au 2 du chap. I ci-dessus et à une relative proximité de Metz (siège du Cerema-est). Il a été retenu après visites de terrain 10 PI* (voir tableau 3) : 8 en Meurthe-et-Moselle, dont 5 sur la RN4 entre Nancy (Lunéville) et Sarrebourg et 3 sur la RN59 entre Nancy (Lunéville) et Baccarat ; et 2 dans le département des Vosges, sur la RN66 entre Épinal (Remiremont) et Mulhouse, et sur la RN57 entre Épinal (Remiremont) et Vesoul (Luxeuil-les-Bains).

Nom complet PI*	RN4 sur le ruisseau de l'étang d'Albe	RN59 sur passage à faune	RN4 sur le ruisseau de l'étang	RN4 sur le ruisseau de la baraque	RN59 sur le ruisseau de Lanchey	RN57 sur ruisseau d'Humont	RN59 sur route communale	RN66 sur passage à faune	RN4 sur passage à faune	RN4 sur le ruisseau de Fréménil
Commune	Chazelles-sur-Albe	Laronxe	Blemerey	Domjevin	Azerailles	Le Val d'Ajol	Flin	Rupt-sur-Moselle	Domjevin	Domjevin
Date de création de l'ouvrage	2002	2004	2003	2002	2007	1999	2008	2006	2002	2002
Cours d'eau	oui	néant	oui	oui	oui	oui (1)	néant	Présence d'un lit à sec au statut juridique inconnu	néant	oui (1)
Tirant d'air (2)	2,9	3,2	3,8	3,5	4,2	3,8 (nord)/ 5 (sud)	5	5,2	6,5	8
Largeur*	12	5	10	7	12	11,8	8	12	15	14,9
Longueur* (3)	25	28,5	25	28,5	26,5	26	29	23,5	26	25
Orientation	N-S	N-S	N-S	N-S	NE-SO	N-S	NE-SO	NE-SO	N-S	N-S
Identifiant DIR	N4 509 - OH 18	N59 033 - OH 4	N4 507 - OH 13	N4 502 - OH 10	N59 047 - OH 16	8857204	N59 046 - PI5	Non identifié (voir coordonnées GPS)	Non identifié (voir coordonnées GPS)	Non identifié (voir coordonnées GPS)

Légende : (1) ruisseaux bien caractérisés mais non nommés sur la carte IGN. Un nom a été choisi pour la présente étude d'après les lieux proches sur la carte IGN. (2) plus fort tirant d'air des deux ouvertures, sauf si l'écart est important. (3) : valeurs arrondies

Tableau 3 : Caractéristiques des PI* étudiés

Les PI* retenus sont sous des routes à 2 x 2 voies. Ils ont plus de 5 ans d'existence (le plus récent a 9 ans). Le tirant d'air varie de 2,9 à 8 m, la largeur* de 5 à 15 m et la longueur* de 23,5 à 29 m. Cette gamme est satisfaisante même s'il a été difficile de trouver toute la gamme souhaitée de PI*, notamment pour des tirants d'air de 5 à 6,5 m. Ces hauteurs sont vite apparues, lors des reconnaissances, comme un seuil limite au bon développement de la végétation, pour notre gamme d'ouvrage.

Tous les PI* retenus ne présentent pas les critères souhaités :

- 4 PI* ne présentaient pas un cours d'eau ou un lit en eau lors de nos relevés de terrain ;
- par manque de PI* avec des hauteurs entre 5 et 6,5 m, un ouvrage ("RN59 sur route communale") a été retenu, malgré l'absence de sol (seule la sous-couche de l'enrobé est colonisée par la végétation) (voir photographie en annexe 2).

1.2 - Conditions de réalisation

Les relevés de terrain ont été effectués les 25, 26 septembre et 5 octobre.

La mesure de l'éclairement a été effectuée avec un photomètre TROTEC BF06. La plage de mesure est limitée à 40 000 lux.

Dans tous les cas étudiés, l'humidité, l'épaisseur du sol et sa granulométrie ne nous a pas paru pénalisants pour la végétation, excepté pour le cas de l'ouvrage de la 'RN59 sur route communale'. Ces paramètres n'ont donc pas fait l'objet dans le chapitre suivant d'une étude particulière.

2 - Exploitation des données

2.1 - Introduction

- 1) La majorité des exploitations ci-dessous est effectuée pour une situation de végétalisation dépassant 25 % de recouvrement du sol, sur des placettes d'environ 1 m² (voir figure 7bis). Nous avons estimé, à priori, que ce recouvrement était suffisant pour permettre la circulation des espèces animales et une continuité écologique. L'espace sans végétation (à franchir par une espèce animale) est de l'ordre de 20 cm, ce qui nous a semblé acceptable. Une étude spécifique pourrait être faite pour justifier ce choix (des 25 % de recouvrement).

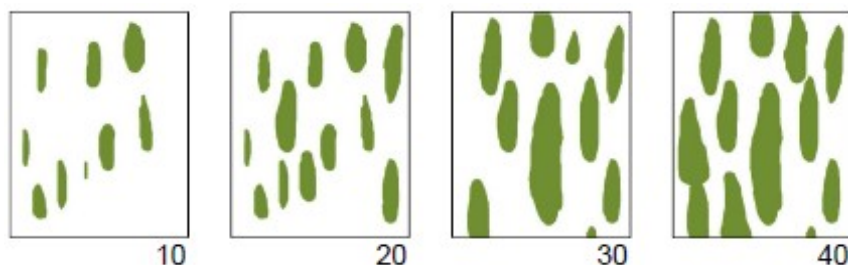


Figure 7bis : Exemple de recouvrement de placettes par des pourcentages croissants de végétation (de 10 à 40 %)
(Source : Irstea - 2015)

Cette situation « $\geq 25\%$ » correspond à la somme des classes de recouvrement du sol V3 et V4, que nous avons appelé ci-dessous « $\geq V3$ ». Pour cette situation « $\geq V3$ », des analyses sont effectuées, par exemple sur la relation entre la longueur (en %) colonisée par la végétation du PI* et la hauteur du PI*, etc.

2) Il est rappelé pour tous les graphiques ci-dessous, que :

a) quelques PI* de notre jeu de données présentent des caractéristiques particulières :

- trois sont orientés nord-est/sud-ouest (RN66 et les deux PI* sur la RN59), alors que les 7 autres sont orientés nord/sud ;
- deux ont une occultation (par la végétation extérieure) des abords qui a été estimée significative : 'RN4 sur le ruisseau de l'étang' et 'RN57 sur le ruisseau d'Humont' ;
- un PI* ne présente pas de sol mais un enrobé colonisé par endroit par la végétation (voir préambule du la partie II) : 'RN59 sur route communale'

b) les classes de recouvrement (par placette de 1 m²) par la végétation ont été définies sur l'axe le plus favorable à la végétation dans le PI* (voir Partie I, chap. 4.5.1).

2.2 - Colonisation par la végétation terrestre

2.2.1 - Influence du tirant d'air sur la végétation

Pour la situation « $\geq V3$ », la relation entre le tirant d'air et la proportion du PI* colonisée par la végétation (en % de la longueur*) est analysée.

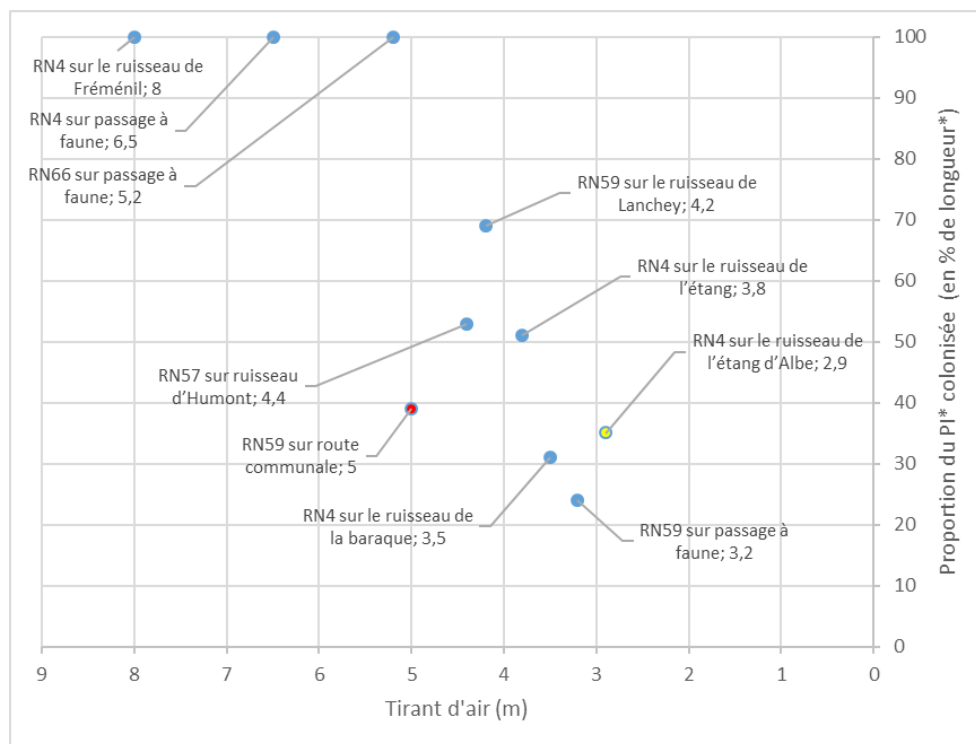


Figure 8 : Pour une végétalisation $\geq V3$ (25-100 % de recouvrement des placettes) : relation entre tirant d'air (m) et la proportion du PI* colonisée par la végétation (en % de la longueur*)

La figure 8 ci-dessus montre que, pour des PI* de 23,5 m à 29 m de longueur*, correspondant à notre échantillon :

- a) un tirant d'air de 5 m est suffisant pour avoir un recouvrement par la végétation '≥ V3' de la totalité de la longueur* de l'ouvrage. Ce qui donne un rapport tirant d'air /longueur* d'environ $0,2^2$ (5/26) ;
- b) le recouvrement par la végétation diminue ensuite rapidement : pour un tirant d'air de 4 m, il passe à 50-70 % de linéaire ;
- c) le recouvrement est limité à 25-35 % de la longueur du PI* pour un tirant d'air de 3 m environ.

Deux PI* sont atypiques : celui de la 'RN59 sur route communale' a un tirant d'air de 5 m (point rouge) mais présente une végétalisation nettement moins importante que des ouvrages de même tirant d'air. Inversement, le PI* de la "RN4 sur le ruisseau de l'étang d'Albe" (point jaune) présente un meilleur recouvrement malgré son faible tirant d'air (H= 2,9 m), par rapport à des ouvrages comme ceux de la 'RN4 sur le ruisseau de la baraque' (H= 3,5 m) ou de la "RN59 sur passage à faune" (H= 3,2 m). Ces situations singulières sont expliquées dans les chapitres suivants.

Notons aussi que le PI* 'RN57 sur le ruisseau d'Humont' (H = 4,4) est nettement moins hospitalier que celui de la 'RN59 sur le ruisseau de Lanchey' (H= 4,2).

Analyse des cas particuliers évoqués au chap. 2.1 (c'est-à-dire les trois ouvrages orientés nord-est/sud-ouest (RN66 et deux ouvrages sur la RN59) et deux ouvrages ayant une occultation des abords : 'RN4 sur le ruisseau de l'étang' et 'RN57 sur le ruisseau d'Humont') : seul l'ouvrage de la RN57 sur le ruisseau d'Humont semble présenter un recouvrement inférieur aux autres ouvrages.

2.2.2 - Influence de la largeur* de l'ouverture sur la végétation

Pour la situation « ≥ V3 », la proportion du PI* colonisée par la végétation (en % de la longueur*) est analysée en fonction de la largeur* du PI*, dans la figure 9 ci-dessous.

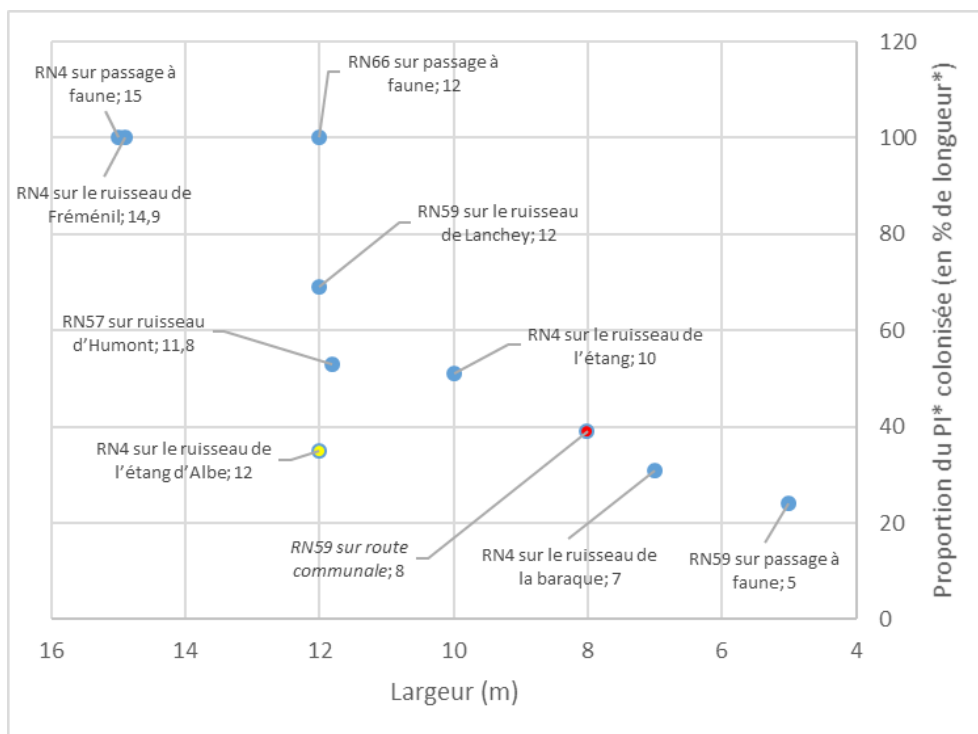


Figure 9 : Pour une végétalisation '≥ V3' (25-100 % de recouvrement des placettes) : relation entre la largeur* de l'ouverture du PI* et la proportion du PI* colonisée par la végétation (en % de la longueur*)

² Cette valeur est nettement inférieure à celle (0,7) proposée par les travaux cités au chap. 1.1.1. Cette différence tient au fait que dans la présente étude, la situation étudiée est une végétalisation pouvant être réduite jusqu'à atteindre 25 % de recouvrement du sol.

Dans notre échantillon d'ouvrages, la largeur* n'est pas toujours un critère discriminant car les PI* de plus de 12 m de large présentent une forte variabilité de recouvrement (environ 35 à 100 %).

Les points rouge et jaune distinguent les mêmes ouvrages que ceux de la figure 8. Le PI* en jaune ne présente pas un meilleur recouvrement que les PI* de même largeur* : sa forte largeur* peut donc expliquer son bon classement constaté dans la figure 8. Le PI* en rouge présente une position homogène par rapport aux autres ouvrages.

Les 2 ouvrages les moins larges ('RN4 sur le ruisseau de la baraque' et 'RN59 sur passage à faune') présentent les plus faibles recouvrements par la végétation. Ce sont aussi les ouvrages les moins hauts.

2.2.3 - Influence de la section de l'ouverture sur la végétation

La section (m²) de l'ouverture est un critère combinant les deux critères précédents (tirant d'air et largeur*). Le résultat est présenté dans la figure 10 ci-dessous.

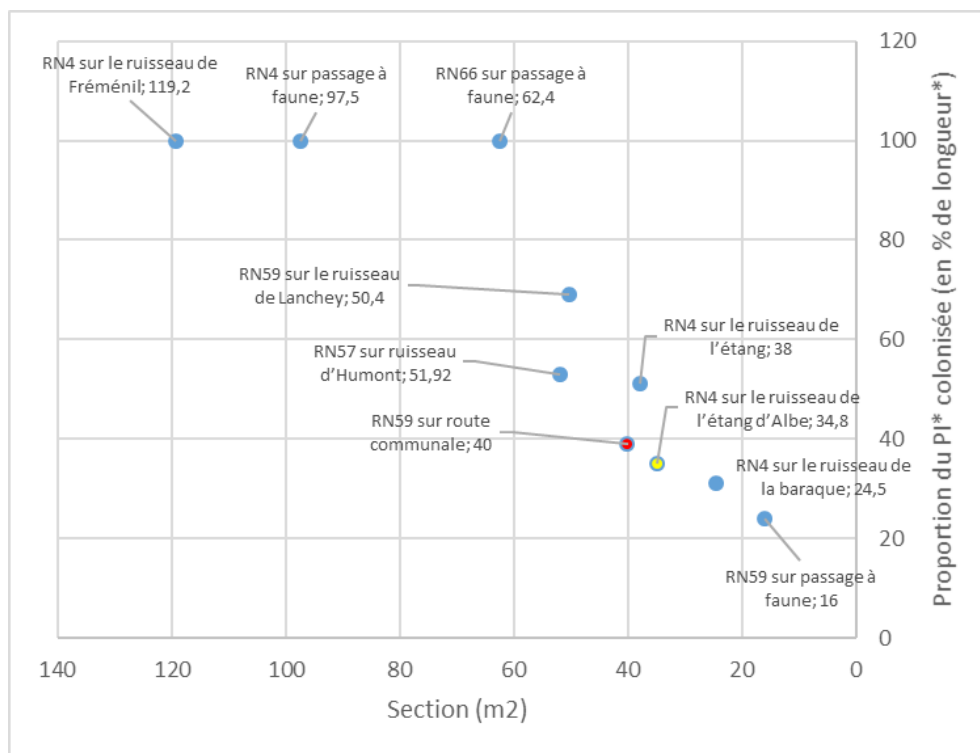


Figure 10 : Pour une végétalisation '≥ V3' (25-100 % de recouvrement des placettes) : relation entre la section (en m²) de l'ouverture des PI* et la proportion des PI* colonisée par la végétation (en % de la longueur*)

La figure 10 ci-dessus montre que :

- une section d'environ 60 m² (pour nos PI* de 23,5 m à 29 m de profondeur) est suffisante pour avoir un recouvrement par la végétation '≥ V3' de la totalité de la longueur* de l'ouvrage. Ce qui donne un rapport section /longueur* de 2,7 à 4,8 pour les 3 PI* concernés. Le rapport minimum à retenir est donc 2,7 ;
- le recouvrement par la végétation diminue ensuite rapidement : pour une section de 50 m² environ, il passe à 50-70 % de linéaire.

La section, pour notre échantillon, est un meilleur critère que les précédents pour caractériser la végétalisation du sol : les deux PI* signalés en rouge et jaune aux chapitres précédents ne sont plus atypiques et ont bien un recouvrement du sol proportionnel à leur section.

Notons que le PI* 'RN57 sur le "ruisseau d'Humont" (section 52 m²) est toujours nettement moins hospitalier que celui de la 'RN59 sur le ruisseau de Lanchey' (50 m²).

Analyse des cas particuliers évoqués au 2.1 : les trois ouvrages orientés NE-SO (RN66 et deux ouvrages sur la RN59) ne présentent pas une plus mauvaise végétalisation que les 7 ouvrages orientés N-S. Il en est de même pour les ouvrages ayant une occultation (par la végétation extérieure) des abords des ouvrages : 'RN4 sur le ruisseau de l'étang' et 'RN57 sur le ruisseau d'Humont'.

2.2.4 - Influence de la longueur* du PI* sur la végétation

Pour la situation « ≥ V3 », la proportion du PI* colonisée par la végétation (en % de la longueur*) est analysée en fonction de la longueur* (en m) du PI* (figure 11 ci-dessous).

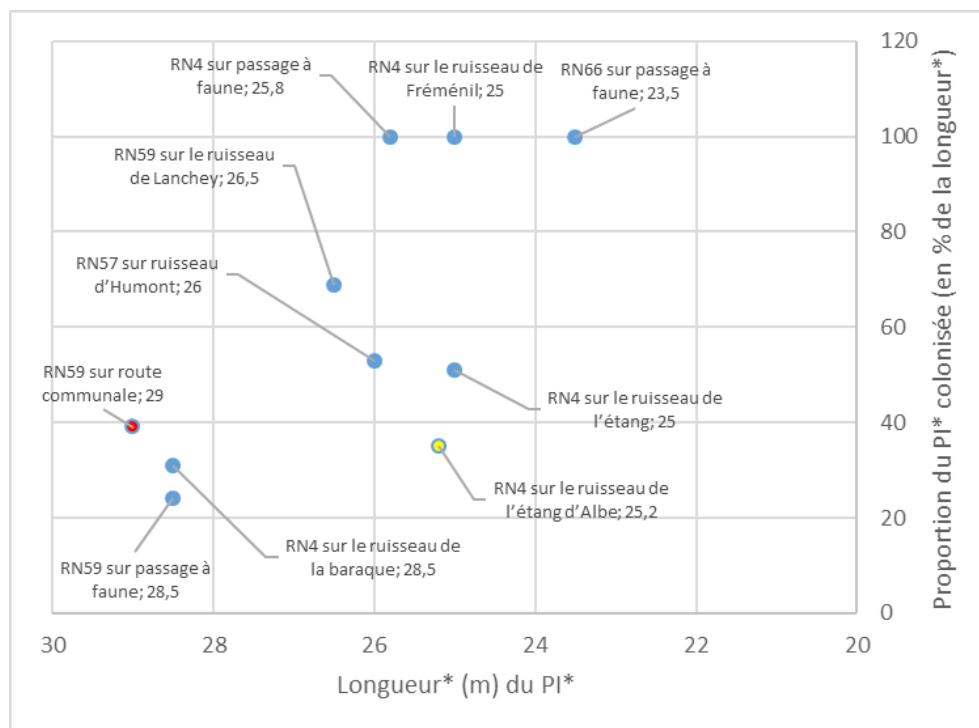


Figure 11 : Pour une végétalisation « ≥ V3 » (25-100 % de recouvrement des placettes) : relation entre longueur* (en m) des PI* et la proportion des PI* colonisée par la végétation (en % de la longueur*)

L'échantillon de PI* étudiés présente une relative faible variation de longueur*, de 23,5 m à 29 m.

Les 3 PI* les plus longs (supérieur à 28,5 m), ainsi que celui de la 'RN4 sur le ruisseau de « l'étang d'Albe » ont la plus mauvaise végétalisation. Néanmoins, ces ouvrages sont aussi ceux présentant la plus faible section (voir figure 10).

Notons que le PI* 'RN4 sur passage à faune', de 25,8 m, présente une végétalisation « ≥ V3 » sur toute la profondeur de l'ouvrage. Cette limite pourrait être un seuil à ne pas dépasser pour les sections d'ouvertures étudiées.

La longueur n'est pas le critère expliquant la différence de végétalisation entre les deux ouvrages : 'RN59 sur le ruisseau de Lanchey' et 'RN57 sur le ruisseau d'Humont'.

En conclusion, au vu de notre jeu de données (et notamment les sections des ouvrages), la longueur* n'est pas un paramètre discriminant pour expliquer les écarts de végétalisation entre les PI*.

2.2.5 - Relation entre la longueur* des PI* et leur section pour les situations 'V4', '≥ V3' et '≥ V2'), pour les PI* les moins perturbés

La figure 12 ci-dessous met en relation, pour les PI* les moins perturbés, la longueur* des PI* et leur section.

Il n'y a que 2 ouvrages dont 100 % de la profondeur est végétalisée pour la situation 'V4' et 3 ouvrages dont 100 % de la profondeur est végétalisée pour les situations '≥ V3' et 'V2'.

Pour la situation '≥ V2' (soit au moins 5 % de végétalisation par placette), 3 ouvrages supplémentaires peuvent être ajoutés dont au moins 75 % de la profondeur est végétalisée.

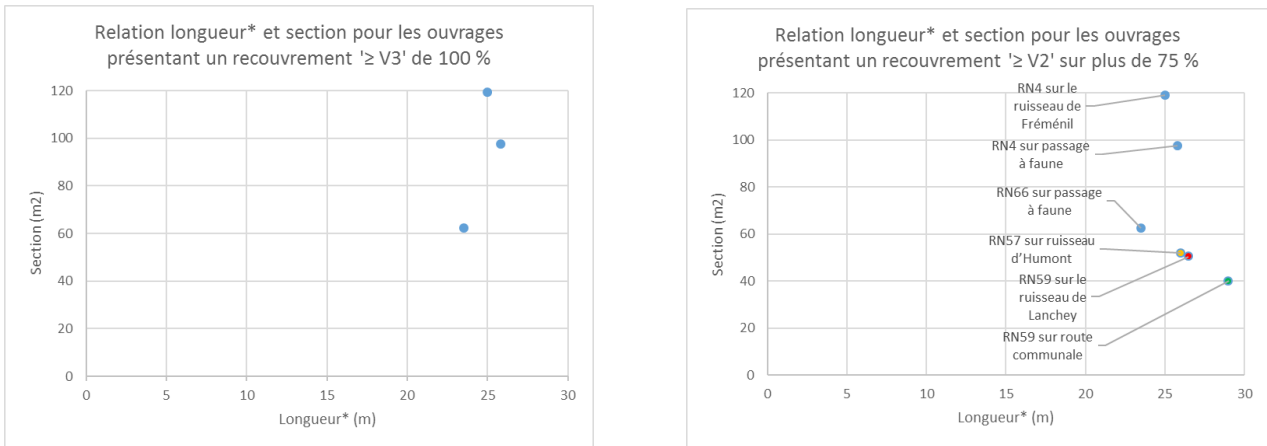


Figure 12 : Relation longueur* des PI* et leur section des ouvrages pour a) à gauche : des ouvrages présentant un recouvrement '≥ V3' sur 100 % de la longueur b) à droite : des ouvrages présentant un recouvrement '≥ V2' sur 75 % de la longueur.

Point rouge : 75 % de végétalisation, orange : 80 % et vert : 94 %, bleu : 100 %

La figure 12 montre que le jeu de données (PI* peu perturbés) est trop faible pour en tirer des conclusions définitives (les 3 points bleus étant les plus significatifs).

Pour la situation V4, la figure est presque identique à celle de '≥ V3', seul un ouvrage (« RN66 sur passage à faune ») présente seulement une profondeur végétalisée de 88 % au lieu de 100 %.

La figure 12 montre que la section d'ouverture 60 m² est significative d'une végétalisation peu perturbée quelle que soit la classe de recouvrement des placettes.

2.2.6 - Répartition des classes de végétation dans les PI*

La figure 13 ci-dessous montre le pourcentage de la longueur* du PI* recouvert par la végétation, pour les différentes classes de végétation (voir Partie I, chap. 3). La figure prend en compte 4 situations de recouvrement : pour la classe V4, pour les situations '≥ V3', '≥ V2' et '≥ V1'.

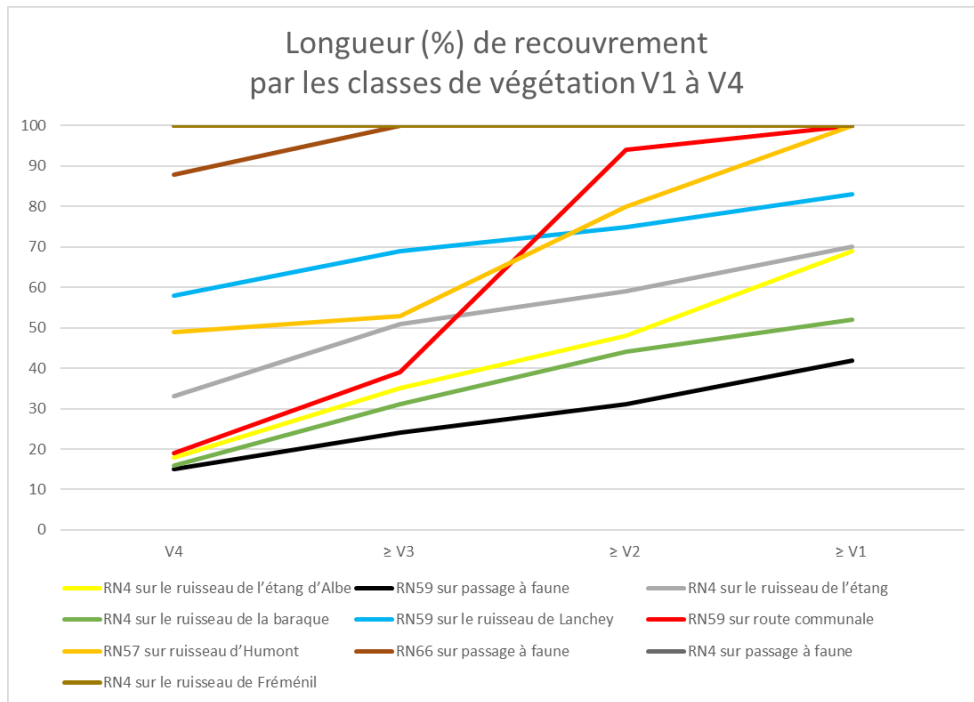


Figure 13 : Pourcentage de la longueur* du PI* recouvert par la végétation pour 4 situations : V4, '≥ V3', '≥ V2' et '≥ V1'. Les points sont reliés par ouvrage pour mieux visualiser les types d'évolution.

La gamme de PI* étudiée est large, avec des PI* entièrement végétalisés (classe de végétation V4 partout sous l'ouvrage) : 'RN4 sur ruisseau de Fréménil' ; en marron gris et 'RN4 sur passage à faune' (ligne non visible sous la précédente), jusqu'à des ouvrages avec une végétation V4 uniquement sur les premiers mètres proches des ouvertures, de l'ordre de 20 % de la longueur de l'ouvrage (ouvrages noir, vert, jaune et rouge).

La longueur* couverte par la végétation augmente régulièrement si l'on intègre progressivement les classes de recouvrement les plus faibles. La dernière situation '≥ V1', qui intègre la classe '0,1 à < 5 %' de végétalisation, ne permet même pas d'atteindre 50 % de longueur* de végétalisation sur certains ouvrages ('RN4 sur ruisseau de la baraque' et 'RN59 sur passage à faune'). Ces ouvrages ont des sections de moins de 25 m² et les plus fortes longueurs (28,5 m).

Deux PI* montrent un net décrochement vers le bas de la situation '≥ V2' vers '≥ V3' : 'RN57 sur ruisseau d'Humont' (en orange) et 'RN59 sur route communale' (en rouge). Ces décrochements peuvent traduire une situation particulière (par exemple l'absence de sol dans le deuxième cas) ou un artefact (notamment difficulté à estimer une classe de recouvrement sous certains ouvrages). Ce décrochement pourrait expliquer la situation de végétalisation plus défavorable dans ces deux PI* constatée dans les figures 8 et 10.

Inversement, la forme de la courbe bombée pour la classe '≥ V3' peut expliquer en partie la situation de végétalisation plus favorable pour les ouvrages 'RN59 sur ruisseau de Lanchey' et 'RN4 sur le ruisseau de l'étang' dans les figures 6 et 8.

En conclusion, la réduction du recouvrement par la végétation est bien observée avec la méthode de terrain utilisée. Il est possible que la difficulté à estimer les classes de recouvrement explique certaines situations constatées dans les figures 8 et 10.

La figure 14 ci-dessous montre la distance (en mètre) entre l'ouverture et la limite maximum de végétalisation dans les PI* pour la situation '≥ V3', en fonction de la section de l'ouverture. Le graphe comporte 20 points, car les situations aux ouvertures nord et sud ont été distinguées.

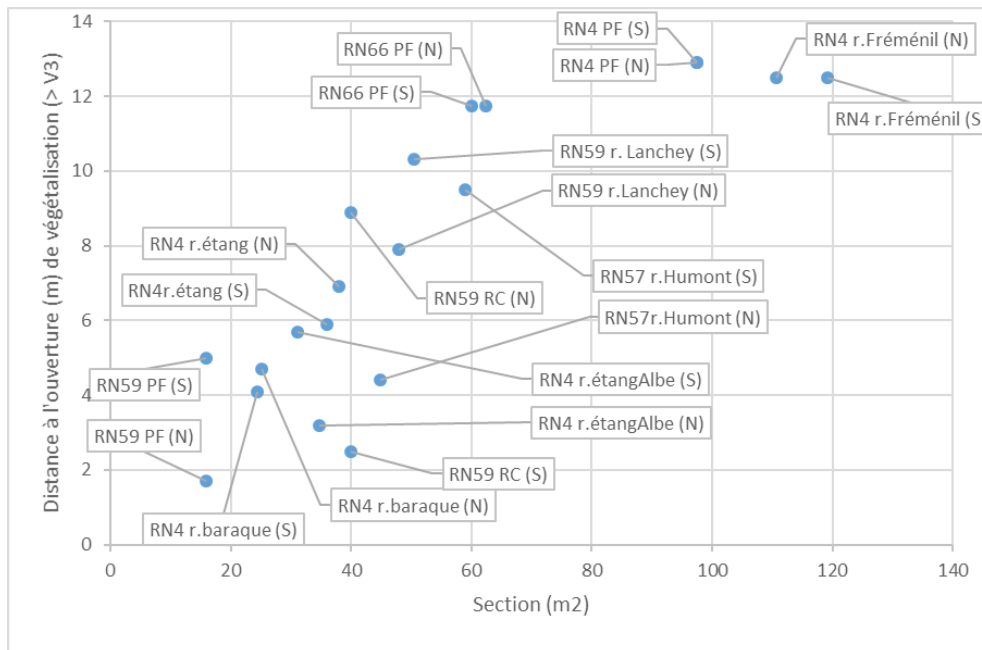


Figure 14 : Pour une végétalisation $\geq V3$ (25-100 % de recouvrement des placettes) : distance (m) entre l'ouverture et la limite maximum de végétalisation dans les PI*
(Légende : r. : ruisseau, N et S : nord et sud, PF : passage à faune, RC : route communale)

La proportionnalité entre la section et la distance à l'ouverture de la situation '≥ V3' est bien mise en évidence (cette distance est plafonnée à environ 12,5 m, distance correspondant au centre des PI* de notre jeu de données). La distance de végétalisation pour la situation '≥ V3', pour les sections les plus faibles (moins de 25 m²), est de l'ordre de 4 m de l'entrée du PI*. A partir de 60 m², le centre du PI* est atteint.

Pour pratiquement tous les PI*, l'avancée de la végétation dans le PI* est nettement plus importante (d'au moins 2 m) du côté de l'ouverture sud que de l'ouverture nord ;

La figure 15 présente cette distance à l'ouverture pour la classe 'V4', considérée comme la moins perturbée.

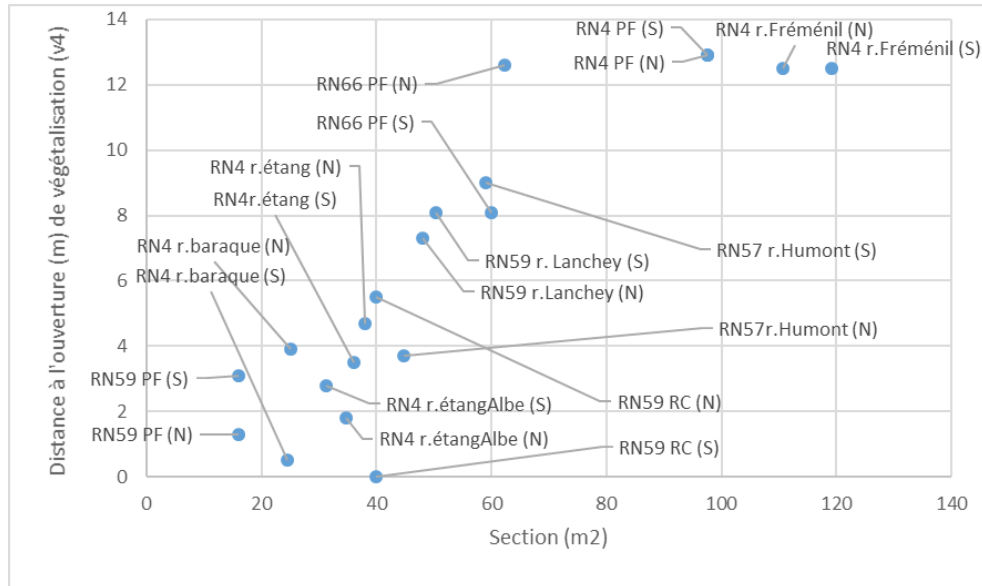


Figure 15 : Pour une végétalisation V4 (50-100 % de recouvrement des placettes) : distance (m) entre l'ouverture et la limite maximum de végétalisation dans les PI*
(Légende : r. : ruisseau, N et S : nord et sud, PF : passage à faune, RC : route communale)

Les tendances sont les mêmes que pour la situation '≥ V3'. La classe 'V4' disparaît plus rapidement, dès 1 à 4 m pour les sections les plus faibles. Le recouvrement par la classe V4 semble devoir être atteint au centre des PI* pour une section d'environ 60 - 70 m².

2.2.7 - Influence de la lumière

L'éclairement a été mesuré (voir annexe 2) mais est difficile à interpréter. La mesure de l'éclairement est délicate (voir Partie I, chap.1.2.1) en raison de la forte sensibilité du luxmètre. Nous avons choisi d'appliquer toujours la même méthode : luxmètre placé au niveau du sol, toujours orienté vers la valeur la plus favorable. Néanmoins, les valeurs obtenues le long des transects ne sont pas toujours cohérentes pour un même ouvrage (influence possible de reflets contre les culées de l'ouvrage ou de passages de nuages) ou en comparaison de plusieurs ouvrages (influence possible des heures de la journée, de l'orientation de l'ouverture). Nous avons choisi d'étudier uniquement la relation entre la section de l'ouverture (m²) et l'éclairement au centre du PI* (figure 16 ci-dessous).

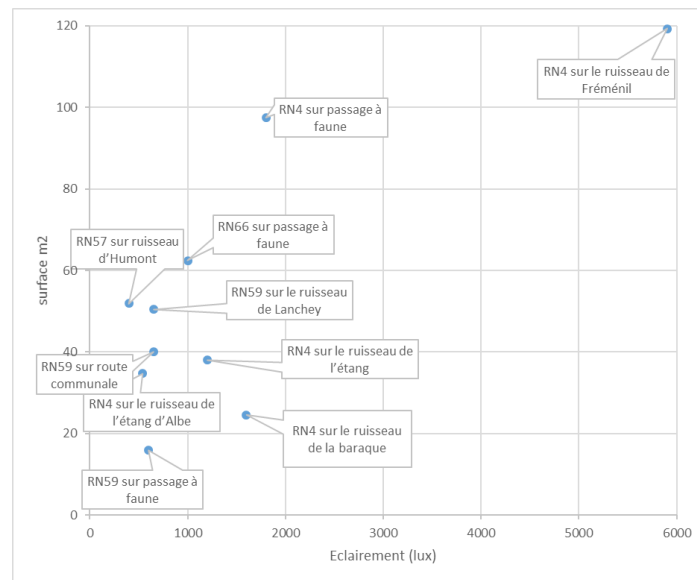


Figure 16 : Relation entre section de l'ouverture (m²) et éclairage (lux) au centre du PI*

Nous constatons une relation entre l'augmentation de la section et l'éclairage, mais peu marquée pour les surfaces inférieures à 60 m².

Nous ne constatons pas de décalage particulier pour les trois ouvrages orientés nord-est (RN66 et les deux ouvrages sur la RN59) et les deux ouvrages présentant une occultation significative (par la végétation extérieure) des abords : 'RN4 sur le ruisseau de l'étang' et 'RN57 sur le ruisseau d'Humont'.

2.2.8 - Influence des autres paramètres

Les informations sur la nature dominante de la végétation (herbacées <10 cm, herbacées de 10 à 50 cm, etc.) apportent peu d'informations supplémentaires notamment du fait de la faiblesse de nombre d'échantillons. La taille de la végétation diminue (proportionnellement aux classes de recouvrement du sol) vers le centre des ouvrages. Les ouvertures sud apportent en moyenne une végétation légèrement plus haute.

La nature des taxons dominants n'a pas été relevée systématiquement, notamment en raison de notre manque de connaissance en taxonomie, de la période du relevé (fin d'été et absence de fleurs) et parfois de la faible taille des individus. Nous avons néanmoins noté la présence, dans les plus faibles classes de recouvrement au centre des ouvrages de plus faibles sections, des espèces ubiquistes de type liseron, ortie, lierre terrestre, épilobe à feuilles étroites.

Nous pouvons néanmoins remarquer que ces espèces sont celles correspondant à l'habitat « sol neutre et sec en sous-bois », cité dans Fitter *et col*, p310 (1986). Ces conditions d'habitats seraient donc proches de celles des PI* étudiés.

Ce point pourrait être complété dans une étude ultérieure.

2.2.9 - Cas de la végétation terrestre des berges

La méthodologie prévoit un relevé de la végétation terrestre de berges. L'analyse n'a pas été effectuée pour les raisons suivantes :

- a) le nombre d'ouvrages traversés par un ruisseau bien marqué est seulement de 6 ;
- b) parmi ces 6 ouvrages, 3 ont les berges dégradées par des enrochements denses ('RN4 sur le ruisseau de l'étang', 'RN57 sur le ruisseau d'Humont', 'RN4 sur le ruisseau de l'étang de Fréménil' - voir figure 17) et 2 ont des enrochements disjoints ('RN4 sur le ruisseau de l'étang d'Albe', 'RN4 sur le ruisseau de la baraque'). Souvent, la végétation provenait du pied sec (liseron, lierre terrestre, etc.) ;
- c) dans le dernier cas 'RN59 sur le ruisseau de Lanchey', la végétation ne présentait pas de différence avec la végétation terrestre du pied sec, analysé du 2.2.1 au 2.2.6 ci-dessus.

Le cas particulier de la végétalisation des berges reste encore à étudier. La recherche de ruisseaux non artificialisés dans les PI* est difficile dans cette gamme de taille, vu les pratiques d'aménagements constatées.



Figure 17 : Exemple de berges avec enrochement dense ('RN4 sur le r. de l'étang de Fréménil')
(Source : P. Mazuer - Cerema Est)

2.2.10 - Cas de la végétation ligneuse

Nous avons relevé la distance maximale sous l'ouvrage de la végétation ligneuse (voir figure 18), quelle que soit sa position sous l'ouvrage (pied sec ou berge).



Figure 18 : Exemple de végétaux ligneux dans un PI* (Source : P. Mazuer - Cerema Est)

La figure 19 ci-dessous montre la distance maximale à l'ouverture des ligneux d'au moins 0,5 m de haut, par rapport aux ouvertures nord ($d_{max/N}$) et sud ($d_{max/S}$).

Deux ouvrages ont été retirés de l'analyse en raison de l'absence de cette végétation, malgré une section d'ouverture manifestement suffisante : 'RN59 sur route communale' et 'RN4 sur passage à faune'. L'arrachage des ligneux lors de l'entretien des PI* explique sans doute leur absence.

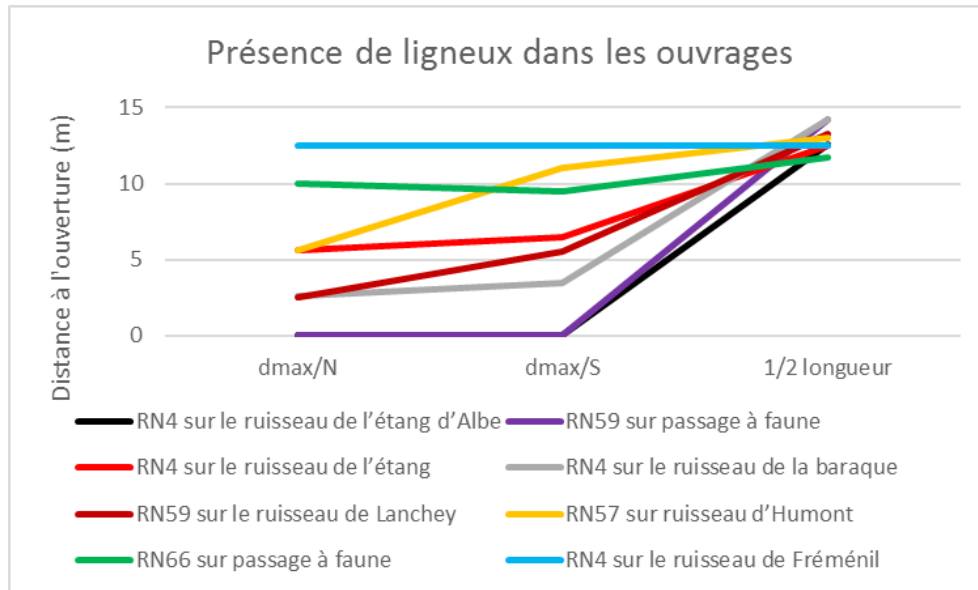


Figure 19 : Distance maximale par rapport à l'ouverture nord ($d_{max/N}$) et l'ouverture sud ($d_{max/S}$) des ligneux d'au moins 50 cm de haut. La $1/2$ longueur représente le centre des PI*, à titre de comparaison pour chaque PI*. Les points se chevauchant à plusieurs endroits, ils sont reliés par ouvrage pour mieux les visualiser.

Trois PI* présentent des ligneux d'au moins 0,5 m de haut jusqu'au centre de l'ouvrage, ou s'en rapprochent fortement (figure 19) : « RN4 sur ruisseau de Fréménil » (en bleu), « RN57 sur le ruisseau d'Humont » (en jaune, surtout pour l'ouverture sud, ayant un plus fort tirant d'air que l'ouverture nord), « RN66 sur passage à faune » (en vert). La figure 20 ci-dessous montre que ces 3 PI* disposent des plus fortes hauteurs de tirant d'air.

Inversement, deux PI* ne disposent pas de ligneux d'au moins 0,5 m (« RN4 sur le ruisseau de l'étang d'Albe » et « RN59 sur passage à faune », voir figure 19). Ces deux PI* ont les plus faibles tirants d'air (figure 20).

Enfin, les ouvertures sud sont un peu plus favorables à la croissance des ligneux.

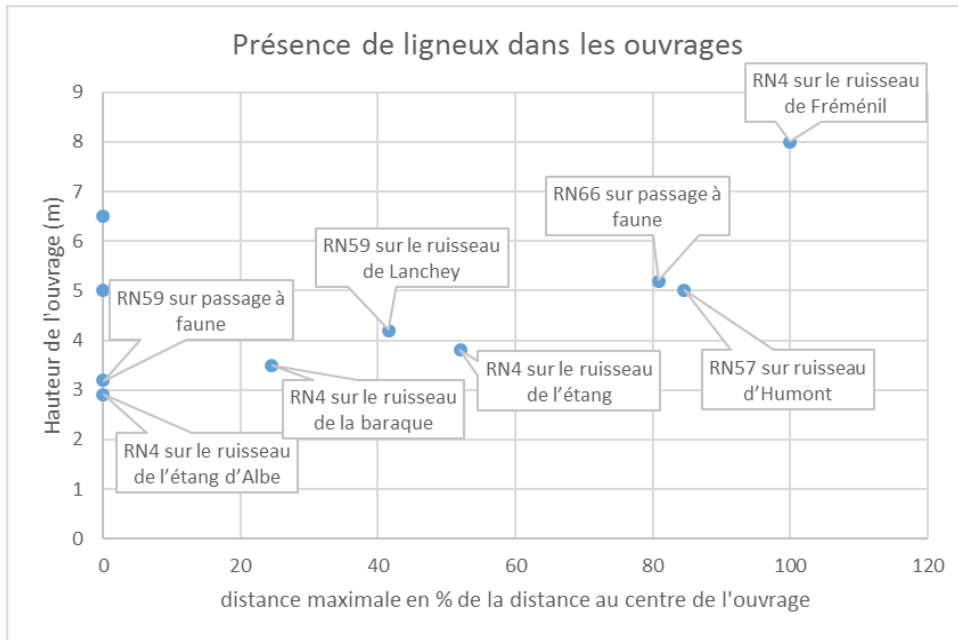


Figure 20 : Présence des ligneux d'au moins 50 cm de haut : relation entre la distance maximale à l'ouverture sud (en % de la distance au centre de l'ouvrage) et le tirant d'air.

L'effet bénéfique du tirant d'air sur la présence de ligneux est assez nette sur la figure 20. Dans notre gamme de longueur de PI*, les ligneux de plus de 50 cm de haut dépassent 80 % de la distance menant au centre du PI* pour les tirants d'air de plus de 5 m.

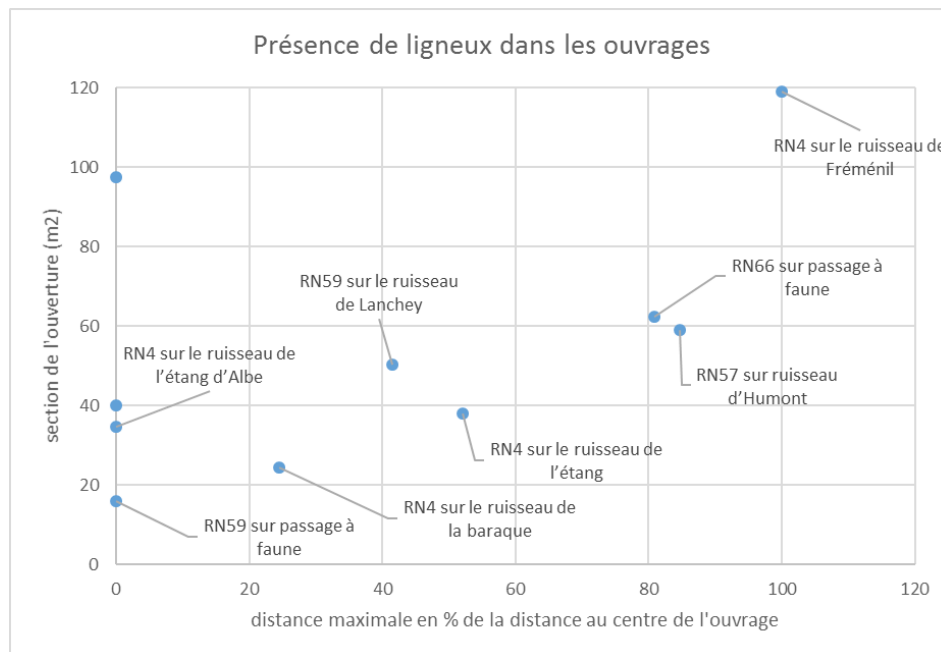


Figure 21 : Présence des ligneux d'au moins 50 cm de haut : relation entre la distance maximale à l'ouverture sud (en % de la distance au centre du PI*) et la section de l'ouverture.

La figure 21 compare la distance maximale des ligneux (en % de la distance au centre du PI*) avec la section (m²) de l'ouverture. Le classement des ouvrages est le même que pour la figure 20 mais avec une dispersion un peu supérieure.

Le tirant d'air semble être un meilleur paramètre pour caractériser la présence de ligneux, que la section de l'ouverture. La valeur de 60 m² est toujours la limite inférieure à ne pas dépasser.

Notons que les espèces de ligneux concernées sont les frênes, saules marsault et cendrés, ainsi que pour les deux PI* les plus hauts, le noisetier, l'aulne glutineux et l'érable.

2.3 - Colonisation par la végétation aquatique

Peu de données sont exploitables dans notre étude car :

- a) seuls 6 ouvrages sont traversés par un ruisseau bien marqué ;
- b) parmi ces 6 ouvrages, 4 ne présentent aucune végétation dont deux en raison d'un lit fortement artificialisé avec des blocs serrés ('RN4 sur le ruisseau de l'étang' et 'RN57 sur le ruisseau d'Humont' - voir figure 22). Pour les deux autres ouvrages ('RN4 sur le ruisseau de la baraque' et 'RN59 sur le ruisseau de Lanchey'), l'explication de l'absence de végétation aquatique n'est pas évidente, si ce n'est que le fond est limoneux et le débit très faible. Le cinquième ouvrage présente un cours d'eau à sec sur la moitié de la partie couverte par l'ouvrage ('RN57 sur le ruisseau de Fréménil').



Figure 22 : Exemple de lit mineur avec fond et berges enrochés ('RN57 sur le ruisseau d'Humont')
(Source : P. Mazuer, Cerema Est)

Nous avons donc des données exploitables sur un seul ouvrage : « RN4 sur le ruisseau de l'étang d'Albe ». Ce cas (ainsi qu'en partie celui du ruisseau de Fréménil) nous permet de voir que la régression et la disparition de la végétation aquatique sous un ouvrage est beaucoup plus rapide que pour la végétation terrestre.

2.4 - Synthèse des conclusions techniques - amélioration de la méthode

2.4.1 - Amélioration de la méthode de relevé de terrain

Cette étude a demandé la mise au point d'une méthode de relevé de terrain. Cette méthode a été améliorée au fur et à mesure de sa mise en œuvre. Les principales modifications ont déjà été listées dans la partie I.

Si une étude de ce type devait être poursuivie, nous recommandons les améliorations suivantes supplémentaires :

- le paramètre de la fiche 2 'nature dominante de la végétation' semble n'apporter que peu d'information pour décrire l'affaiblissement de la végétation. Il est bien corrélé avec les classes de recouvrement de la végétation ;
- le paramètre 'taxon dominant' pourrait être renseigné systématiquement afin de mieux connaître les taxons pouvant être présents. Un relevé au printemps serait à privilégier, en présence d'un botaniste ;
- « l'éclaircissement » est un paramètre difficile à mesurer et il ne semble pas apporter d'information supplémentaire à celle apportée par la morphologie du PI*. Ce paramètre pourrait être supprimé ;
- une réflexion supplémentaire est à faire sur la caractérisation de la végétation des berges : est-il judicieux de l'étudier sous les ouvrages, cette végétation n'étant pas nettement différenciée de celle du pied sec ? ;
- la méthode n'a pratiquement pas été testée pour le milieu aquatique, vu le peu d'ouvrages étudiés présentant une végétation aquatique ;
- le relevé des classes de pourcentage de recouvrement de la végétation pourrait être facilité par une méthode ou des outils à définir, pour éviter une dispersion des valeurs (voir figure 13).

2.4.2 - Synthèse des conclusions techniques

Nous avons étudié des PI* de 23,5 m à 29 m de longueur*. Pour ces valeurs :

a) la section des ouvertures est le paramètre le plus discriminant pour expliquer la colonisation de la végétation dans le PI*. Les caractéristiques minimum des PI* pour avoir un recouvrement par la végétation de plus de 25 % de la totalité de la longueur* de l'ouvrage sont les suivantes :

- une section de 60 m² ;
- un rapport section /longueur* d'environ 2,7.
- un tirant d'air de 5 m ;
- un rapport de tirant d'air /longueur* d'environ 0,2.

Le recouvrement par la végétation diminue rapidement sous ces valeurs.

b) la distance entre l'ouverture et la limite maximum de végétalisation de plus de 25 %, pour les sections les plus faibles (moins de 25 m²), est de l'ordre de 4 m de l'entrée du PI*.

Cette distance est réduite pour une végétalisation de plus de 50 %. Elle peut atteindre 1 m à 4 m de l'entrée, selon les ouvrages.

c) le type de végétation herbacée correspond à celle des sous-bois (à confirmer)

e) le tirant d'air de 5 m est le paramètre le plus discriminant pour expliquer la présence de ligneux de plus de 0,5 m de haut jusqu'au centre du PI*. Les espèces concernées sont les frênes, saules marsault et cendrés.

f) la régression et la disparition de la végétation aquatique sous un PI* est beaucoup plus rapide que pour la végétation terrestre (à confirmer).

Partie III

Propositions d'aménagement des passages inférieurs pour améliorer la végétalisation

Dans la partie II ci-dessus, nous avons défini les conditions de colonisation par la végétation de 10 PI* de section d'ouverture de 15 à 120 m². Les conclusions qui peuvent en être tirées, concernant l'aménagement des PI*, figure dans cette partie III.

La présentation est faite pour des ouvrages neufs. Le cas d'aménagement des PI* existants est traité en fin de chaque point évoqué. Il est supposé dans ce cas que les caractéristiques morphologiques du PI* (tirant d'air, section de l'ouverture, longueur*) ne peuvent être modifiées. Les PI* existants devant être réaménagés doivent faire l'objet d'un diagnostic préalable.

1 - Conception d'un passage inférieur

Nous avons démontré dans la partie II qu'un PI*, en fonction de ses caractéristiques, pouvait engendrer une régression rapide de la végétation.

La conception d'un ouvrage pour favoriser la végétation peut prendre les principes suivants :

1) Réduire au maximum la longueur* couverte.

Les techniques de réduction de la couverture ont été exposées dans la note d'information du Sétra (2012) citée en bibliographie. Nous pouvons citer la réduction de la largeur des remblais, par la construction de murs en ailes ou de murs de soutènement de remblais verticaux.

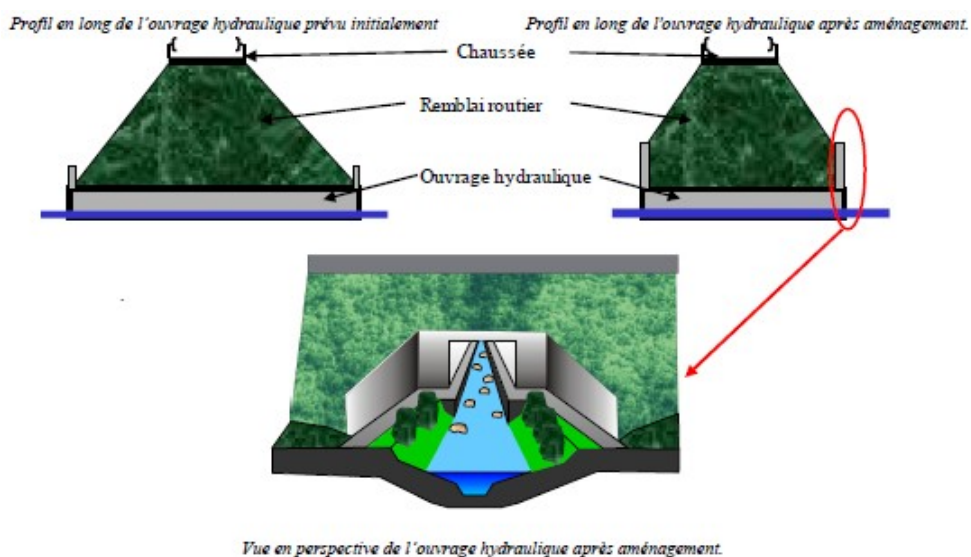


Figure 23 : Principe de réduction des longueurs* d'ouvrage et d'aménagement de leurs débouchés (Source : Sétra - 2012)

Cette technique peut être améliorée par la pose de butons soutenant les murs (voir figure 24). Par exemple, cette technique a été employée pour le franchissement du ruisseau d'Olzey (RN59 à Azerailles). La partie couverte a été réduite à 65 m (au lieu des 95 m définis par le remblai prévu initialement).



Figure 24 : Exemple de butons permettant de réduire la longueur d'un PI* (Source : P. Mazuer - Cerema Est)

2) Prévoir une section d'ouverture et un tirant d'air suffisants

A partir de notre faible nombre de PI*, nous n'avons pas pu établir, pour des PI* présentant une végétalisation acceptable, une relation entre la longueur* du PI* et la section de l'ouverture (voir figure 12).

Nous pouvons néanmoins dire (voir 2.4.2 ci-dessus) que pour des PI* de 23,5 m à 29 m de longueur* :

- une section minimum de 60 m² est nécessaire pour avoir un recouvrement par la végétation de plus de 25 % de la totalité de la longueur* de l'ouvrage. Ce qui donne un rapport section /longueur* d'environ 2,7. Les mêmes conclusions peuvent être tirées pour un tirant d'air de 5 m et un rapport tirant d'air /longueur* d'environ 0,2. Cette dernière valeur est à favoriser pour permettre l'installation de ligneux de plus de 0,5 m de haut.

Cas des PI* existants : l'éclaircissement peut être favorisé en veillant à ce que les ouvertures soient bien dégagées (absence de murets ou de végétation dense extérieure au PI* ...).

3) Aménager le PI* pour la végétation du pied sec

Nous pouvons recommander les aménagements observés sur les PI* étudiés. Ceux-ci ne présentent pas de problèmes d'humidité, d'épaisseur ou de granulométrie du sol (sauf le cas particulier de la 'RN59 sur route communale').

Ces aménagements sont :

- présence d'arrivée de drains au pied des culées, sur toute la longueur* ;
- épaisseur du sol suffisante (> 30 cm) ;
- granulométrie favorable (mélange de petites pierres, graviers, sables, limons ou terre selon les PI*).

Il peut être recommandé de mettre une terre provenant des sous-bois les plus proches, qui potentiellement contient des graines d'espèces relativement adaptées.

Nota : concernant la circulation des petites espèces terrestres dans la végétation : si la végétation ne peut pas s'installer à un endroit précis (par exemple la zone de berges) pour des raisons physiques (par exemple, une arrivée de lumière insuffisante à cet endroit), il est rappelé que la végétation peut être remplacée par un andain*.

Cas des PI* existants :

- hygrométrie : l'eau peut être amenée par des gouttières en encorbellement, la répartissant le long des culées, jusqu'au centre de l'ouvrage ;
- épaisseur et granulométrie du sol : il est possible de modifier le sol en reprenant les éléments de conception ci-dessus ;
- ajout d'une terre d'un sous-bois voisin.

4) Aménager le PI* pour la végétation des berges

Les PI* étudiés ont des berges fortement dégradées par des aménagements lourds (enrochements serrés ou lâches). Ces aménagements nuisent fortement à la végétalisation des berges.

Nous recommandons de favoriser la plantation de ligneux dans les zones suffisamment proches des ouvertures. Les figures 13 à 15 montrent que les ligneux peuvent être plantés pour tenir les berges jusqu'au centre de l'ouvrage d'environ 25 m de longueur* pour un tirant d'air dépassant 5 m ou une section dépassant 60 m².

Cas des PI* existants :

Il est recommandé d'enlever les enrochements existants, et de les remplacer par de la végétation ligneuse, si la section de l'ouverture et le tirant d'air sont suffisants (voir 2.4.2).

5) Aménager le PI* pour la végétation aquatique

Les cours d'eau présents dans les PI* étudiés présentent une végétation aquatique réduite, beaucoup plus impactée que la végétation terrestre.

Le jeu de données étant insuffisant pour définir des critères de conception d'ouvrage, il est néanmoins possible de recommander d'éviter des aménagements lourds du lit (blocs, redimensionnement favorisant le dépôt de limons, etc.). Le lit, pour permettre une colonisation, doit comporter un lit mineur adapté au débit médian et présentant un chenal d'étiage. La granulométrie doit être variée, avec une dominance de petites pierres (par exemple d'un diamètre de 10 à 20 cm).

Cas des PI* existants :

Le cas échéant, enlever les blocs au fond du lit et /ou réaménager un lit mineur.

2 - Implantation de la végétation dans un PI*

Si les conditions sont favorables, la végétation peut s'installer d'elle-même dans les PI* neufs, surtout à proximité de sous-bois. Néanmoins, il peut être utile de l'installer plus rapidement, notamment si cette végétation doit assurer un rôle particulier (protection de berges, circulation d'espèces dans le cadre des trames vertes et bleues).

Dans la présente étude d'approche, nous n'avons pas fait un recensement des espèces supportant le mieux les conditions sous les PI* (voir raisons au chap. 2.2.8).

Pour la végétation terrestre, les recommandations suivantes peuvent être faites :

- la terre peut être ensemencée par des graines d'espèces de sous-bois adaptées à la région.
- les ligneux peuvent être plantés, particulièrement en berge des cours d'eau, si la section de l'ouverture et le tirant d'air sont suffisants (voir chap. 2.4.2).

Même si le développement de ces ligneux reste significativement plus modeste qu'à l'extérieur du PI*, un entretien doit être prévu, comme pour toute végétation de berge de cours d'eau.

Nota : il ne doit pas être oublié qu'il ne doit pas être installé des espèces exotiques. Les espèces invasives envahissantes (EEE) constituent une des premières causes de la régression de la biodiversité au niveau mondial (UICN, 2014 in ONEMA, 2015), qu'elles ont un coût économique important et que la France est déjà sévèrement touchée (ONEMA, 2015).

Conclusion

Nous avons pour objectif de caractériser la végétation dans les passages sous les infrastructures (appelés passages inférieurs ou PI* dans le texte), en fonction des caractéristiques de ces derniers.

Ce sujet n'a pas été traité antérieurement : nous n'avons eu aucune information, malgré le nombre d'organismes contactés.

Cette étude étant une première approche du sujet, nous avons réalisé une étude de terrain sur 10 PI* ayant les caractéristiques suivantes :

- longueur* entre les deux ouvertures du PI* (appelée longueur* dans le texte) : 23,5 m à 29 m (correspondant tous à des ouvrages de route à 4 voies) ;
- section de l'ouverture : 16 à 120 m² ;
- largeur* de 5 à 14,9 m ; et, si présence d'un cours d'eau, largeur du pied sec le plus large : 4,3 à 9,5 m,
- tirant d'air de 2,9 à 8 m ;
- largeur du pied sec (si présence d'un cours d'eau) le plus large (étudié pour sa végétation) de 4,3 à 9,5 m.

Pour cette gamme de PI* :

- a) la section des ouvertures est le paramètre le plus discriminant pour expliquer la colonisation de la végétation dans le PI*. Une section de 60 m² est suffisante pour avoir un recouvrement par la végétation de plus de 25 % (sur au moins une placette de 1 m²) de la totalité de la longueur* de l'ouvrage (donc y compris dans la partie la plus sombre au centre du PI*). Ce qui donne un rapport section /longueur* d'environ 2,7. Les mêmes conclusions peuvent être tirées pour un tirant d'air de 5 m et un rapport tirant d'air /longueur* d'environ 0,2. Le recouvrement par la végétation diminue rapidement sous ces valeurs.
- b) la distance entre l'ouverture et la limite maximum de végétalisation de plus de 25 %, pour les sections les plus faibles (moins de 25 m²), est de l'ordre de 4 m de l'entrée du PI*. Cette distance est réduite pour une végétalisation de plus de 50 %. Elle peut atteindre 1 m à 4 m de l'entrée, selon les ouvrages.
- c) le type de végétation herbacée correspond à celle des sous-bois (à confirmer).
- d) le tirant d'air de 5 m est le paramètre le plus discriminant pour expliquer la présence de ligneux de plus de 0,5 m de haut jusqu'au centre du PI*. Les espèces concernées sont les frênes, saules marsault et cendrés.



Figure 25 : Exemple de situation existante à éviter à l'avenir, autant pour la végétation terrestre (réduite aux premiers mètres des ouvertures), que pour celle des berges ou aquatique (inexistante pour ces deux dernières) : 'RN4 sur ruisseau de l'étang' (Source : P. Mazuer - Cerema Est)

Les végétalisations des berges et des milieux aquatiques n'ont pu être caractérisées, faute de données exploitables suffisantes. Néanmoins, pour deux PI*, la régression et la disparition de la végétation aquatique sous un ouvrage est beaucoup plus rapide que pour la végétation terrestre.

Ces résultats pourraient être complétés par l'étude d'une gamme de PI* plus importante. Une étude botanique pourrait être aussi réalisée. Dans tous les cas, la méthodologie d'étude, créée dans le cadre du présent rapport, a montré son efficacité et pourra être réutilisée.

Glossaire

Andain : structure linéaire basse, composée de terre, de blocs, de pierres et de souches, traversant un PI* et se prolongeant à l'extérieur de l'ouvrage, améliorant l'attractivité des passages pour la faune (voir en bibliographie : Sétra, 2005).

Largeur : dans le présent rapport, ouverture horizontale du passage inférieur de l'ouvrage, perpendiculaire à l'axe longitudinal du passage inférieur.

Longueur : dans le présent rapport, profondeur sous l'ouvrage, entre les deux ouvertures du passage inférieur.

Mésologie : relatif aux caractéristiques du milieu de vie des espèces. Les paramètres mésologiques d'une plante sont : l'éclairement, l'humidité, etc.

Ouverture d'un passage inférieur : dans le présent rapport, extrémité ouverte d'un passage inférieur. (dans certaines publications sur les ouvrages d'art, l'ouverture désigne la grandeur appelée largeur* ci-dessus). L'ouverture est caractérisée par sa section (en m²) : largeur X tirant d'air.

Passage inférieur (PI) : passage sous une infrastructure, caractérisé par son tirant d'air, la largeur et sa longueur (profondeur). Le passage peut avoir pour raison d'être un rétablissement hydraulique (ruissellement, cours d'eau), le passage d'une route, d'un chemin agricole ou forestier, etc.

Pied sec : dans le présent rapport, ce terme désigne toutes les formes de zones terrestres dans le passage inférieur, longeant un cours d'eau. Dans la bibliographie, le terme de banquettes peut être utilisé pour certains pieds secs.

Tirant d'air : hauteur libre entre le pied sec (ou le miroir d'une surface en eau) et la surface intérieure du tablier de l'ouvrage. Afin d'homogénéiser le texte dans ce rapport d'étude, « tirant d'air » est utilisé de préférence à « hauteur du passage inférieur ».

Bibliographie

- Becker (M), 1971 – une technique nouvelle d'utilisation des photographies hémisphériques pour la mesure du climat lumineux en forêt – *Ann.sci.forest*, 1971, 28(4), 425-442.
- Broome (S.W.), 2004 – Effects of bridge shading on estuarine marsh benthic invertebrate community structure and fonction – *Environmental management*, 2004. Vol. 34 n°1, pp 99-111
- CETU (centre d'étude des tunnels), 2000 – Dossier pilote des tunnels – 4.2 éclairage - 66p
- CTE / NCDOT, 2005 – Effects of shading from bridges on estuarine wetland – by Broome (S. W.), Craft (C.B.), Struck (S.D.), SanClements (M) – 61 p
- Devillez (F), 2005 - Composition des groupements phytosociologiques et exigences écologiques des espèces qui les constituent
- Fitter (R), Fitter (A) et Blamey (M), 1986 – guide des fleurs sauvages – Paris : Delachaux et Niestlé, 1986 - 335p
- INRA, non daté – Environnement des plantes cultivées – le rayonnement solaire et le fonctionnement du couvert végétal – réalisé par Raymond Bonhomme – INRA, Unité de recherches en bioclimatologie, Thiverval-Grignon, France
- IRSTEA, 2015 – Aide à l'évaluation des recouvrements de macrophytes (protocole « IBMR ») - v1.1
- Kosmas (C), 2000 – The effect of land use change on soils and vegetation over various lithological formations on Lesvos (Greece) – *Catena* 40 (2000) 5t-68
- LED-HORTICOLE <https://www.led-horticoles.eu/outils/guides/les-unites-de-mesure/>
- Logan (J. M.), Voss (S), Davis (A), Ford (K.H.), 2017 - An experimental evaluation of dock shading impacts on salt marsh vegetation in New England Estuary -
- NF C42-710:1988 – Luxmètres – détermination des caractéristiques métrologiques, classification selon ces dernières, étalonnages, contrôle des caractéristiques principales susceptibles d'évoluer dans le temps – Ed : AFNOR, 45p
- ONEMA, 2015 – les espèces exotiques envahissantes dans les milieux aquatiques – vol. 1 : connaissances pratiques – vol. 2 : expérience de gestion – Col. : Comprendre pour agir.
- Ramade (F), 1984 – Éléments d'écologie – Écologie fondamentale – Ed : McGraw-Hill, Paris (1984) – 397p
- Rodney Van Der Ree, Daniel J. Smith, Clara Grilo 2015– Handbook of road ecology – ed WILEY Blackwell – 522 p – 2015
- Sétra, 1993 – Passage pour la grande faune – guide technique (pour le franchissement d'ouvrage) – 121p – réf SETRA : B9350
- Sétra, 2005 – Aménagements et mesures pour la petite faune – guide technique (pour le franchissement d'ouvrage) – réalisé par Jean Carsignol et col. - 264 p (nn)

Sétra, 2012 – Petits ouvrages hydrauliques et continuités écologiques – cas de la faune piscicole - réalisé par Marc Gigleux (CETE) et Véronique de Billy (ONEMA) – 25p

Sciencedirect.com : recherche avec les mots clés : plant, vegetable, vegetation, light, shadow (shade), darkness, obscurity, cave, pioneer species

Varlet-Grancher (1982) dans INRA (non daté, ci-dessus)

Whitmarsh (John) and Govindjee (non daté) - <http://www.life.uiuc.edu/govindjee/paper/gov.html>, from "Concepts in Photobiology: Photosynthesis and Photomorphogenesis", Edited by GS Singhal, G Renger, SK Sopory, K-D Irrgang and Govindjee, Narosa Publishers/New Delhi; and Kluwer Academic/Dordrecht, pp. 11-51. From unpublished data., CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6958887>

Wikipedia, 2017 - Originally by [User:Serg!o](#); translation and additional compass directions by [User:Andrew_pmk](#)

Wikipedia, 2017 – article : Lux (unité)

Annexes

Annexe 1 : Fiches de terrain vierges

Fiche 1 : Information sur le passage inférieur et l'opération de terrain (page 1/2)

Cerema-est

Fiche 1 : Information sur le passage inférieur et l'opération de terrain		
Nom de l'étude :	Colonisation des PI* des infrastructures par la végétation	insérer photos principales
Année :	2017	
Maître d'ouvrage :	Ministère/DGITM/DIT	
Prestation :	Relevé de végétation et mesures	
Information générale sur l'ouvrage :	remplissage bureau	note de remplissage ou occurrences possibles
Nom de l'ouvrage		'voie portée' sur 'voie franchie' à 'commune'
Type d'infrastructure		Route 2 voies, route 4 voies, chemin de fer, ...
Commune		
Code INSEE commune		
Nom du cours d'eau franchi (éventuel) & sens du courant		
Localisation du passage inférieur	remplissage terrain	note de remplissage ou occurrences possibles
Route d'accès		
X (entrée nord ou sud, préciser)		
Y (entrée nord ou sud, préciser)		
Information sur l'opération de terrain :	remplissage terrain	note de remplissage ou occurrences possibles
Date		
Prestataire	Cerema-Est	
Agent		
Méthode de relevé	voir partie I/chapitre 4 de la présente étude	
conditions météorologiques (éclairage)		Plein soleil, faiblement nuageux, moyennement nuageux ou pluie fine, très nuageux ou forte pluie
Commentaire sur l'opération de relevé, y compris écart à la méthode		au choix de l'opérateur
Description du passage inférieur	remplissage terrain	note de remplissage ou occurrences possibles
type d'ouvrage		buse, cadre, portique, pont-dalle, pont maçonné, pont à poutres, pont suspendu ...
Objectif du PI*		Agricole / forestier / cours d'eau / ruissellement ...
Tirant d'air à partir du plein pied (m)	Nord : Sud :	indiquer autant de valeurs que nécessaire : aux deux ouvertures, sur RG et RD si les pieds secs ne sont pas au même niveau ...
Tirant d'air à partir de la ligne d'eau (si cours d'eau) (m)	Nord : Sud :	
Largeur* du PI* (m)		
Largeur moyenne du cours d'eau plein bord (m)		

Fiche 1 : Information sur le passage inférieur et l'opération de terrain (page 2/2)

Largeur moyenne au miroir du cours d'eau (m)		
Largeur moyenne de la berge (m)	RG :	RD :
Largeur moyenne du pied sec (m)	RG :	RD :
Longueur* de couverture (m)		prendre la longueur maximum, en prenant en compte d'éventuelles gouttières ...
Orientation (préciser : nord, sud, amont ...)		
Occultation ouverture ci-dessus (%) et justification		indiquer les écrans éventuels à la pénétration de la lumière dans l'ouvrage (arbres, autres ouvrages ...)
Orientation (précisez : nord, sud, amont ...)		
Occultation ouverture ci-dessus (%) et justification		indiquer les écrans éventuels à la pénétration de la lumière dans l'ouvrage (arbres, autres ouvrages ...)
Présence de puits de lumière		
Traces d'utilisation anthropique du pied sec		information à prendre pour exclure des relevés d'éventuelles zones piétinées : passage de véhicule à moteur, vélos, piétons ...
Commentaire : pieds secs (morphologie, nature du sol ...)		indiquer ce qui semble important (positif ou négatif) pour la végétation. Décrire séparément RG et RD si la différence est significative
Commentaire : berges (morphologie, pente ...)		indiquer ce qui semble important (positif ou négatif) pour la végétation. Décrire séparément RG et RD si la différence est significative
Commentaire : lit mouillé (morphologie, qualité eau, colmatage ...)		indiquer ce qui semble important (positif ou négatif) pour la végétation
Cours d'eau : situation hydrologique apparente		SANDRE n°1726 : pas d'eau, flaques, basse eaux, moyenne eaux, lit plein ou presque, débordement
Commentaire		au choix de l'opérateur

page :

Situation des abords extérieurs	remplissage terrain	note de remplissage ou occurrences possibles
contexte nord		forêt, prairie, zone péri-urbaine ...
contexte sud		idem
Commentaire sur les abords		au choix de l'opérateur

Fiche 2 : Relevés de végétation et mesures dans le passage inférieur et aux abords amont et aval (page 1/3)

Cerema-est

Fiche 2 : Relevés de végétation et mesures dans le passage inférieur et aux abords amont et aval											
Nom de l'étude :		0	Prestataire :		Cerema-Est	Date de relevé et heure (luxmètre) :		2017	Nom de l'ouvrage :		0
1) pour la végétation terrestre : absence de cours d'eau ou zone de pied sec											
		Classe % de recouvrement de végétation	distance de l'origine (m)	distance de l'ouverture la plus proche (recalculée) (m)	Nature dominante de la végétation	tavons dominants et autres (facultatif)	Ligneux par espèce : distance max dans l'ouvrage et hauteur.	Eclaircissement (lux)	Commentaire (humidité et origine de l'eau, épaisseur et granulométrie du sol)		
secteur de ref nord	20 m de l'ouvrage	50 à 100 %									
	limite		0 ou longueur totale								
secteur ouvert	nord	50 à 100 %									
		25 à 50 %									
		5 à 25 %									
		0.1 à 5 %									
	sud	< 0,1 %									
		0,1 à 5 %									
		5 à 25 %									
		25 à 50 %									
		50 à 100 %									
	limite		0 ou longueur totale								
secteur de ref sud	20 m de l'ouvrage	50 à 100 %									

Fiche 2 : Relevés de végétation et mesures dans le passage inférieur et aux abords amont et aval (page 2/3)

Cerema-est

2) pour la végétation terrestre : zone de berge										
		Classe % de recouvrement de végétation	distance de l'origine (m)	distance de l'ouverture la plus proche (recalculée) (m)	Nature dominante de la végétation	taxons dominants et autres (facultatif)	Ligneux par espèce : distance max dans l'ouvrage et hauteur.	Eclairement (lux)	Commentaire (humidité et origine de l'eau, épaisseur et granulométrie du sol)	
secteur de ref nord	20 m de l'ouvrage	50 à 100 %								
	limite		0 ou longueur totale							
secteur de berge	nord	50 à 100 %								
		25 à 50 %								
		5 à 25 %								
		0,1 à 5 %								
	centre	< 0,1 %								
	sud	0,1 à 5 %								
		5 à 25 %								
		25 à 50 %								
		50 à 100 %								
	limite		0 ou longueur totale							
secteur de ref sud	20 m de l'ouvrage	50 à 100 %								

Note de remplissage

	4 classe de %	en mètre	en mètre	<=> distance ou l'écart entre deux taxons inf. à 1 cm	nom des taxons	nom des taxons et distance de l'ouverture
				1-herbacées <10cm		
				2-herbacées 10x50cm		
				3-herbacées >50cm		
				4-ligneux <1m		
				5-ligneux >1m		

Fiche 2 : Relevés de végétation et mesures dans le passage inférieur et aux abords amont et aval (page 3/3)

Cerema-est

3) pour la végétation aquatique (hélrophytes et hydrophytes)									
		% de recouvrement de végétation	distance de l'origine (m)	distance de l'ouverture la plus proche (recalculée) (m)	Nature dominante de la végétation	taxons dominants et autres (facultatif)	Ligneux par espèce : distance max dans l'ouvrage et hauteur,	Eclairement (lux)	Commentaire (turbidité, type de substrat, profondeur ...)
secteur de ref. nord	20 m de l'ouverture								
	limite		0 ou longueur totale						
secteur observé aquatique	nord	50 à 100 %							
		25 à 50 %							
		5 à 25 %							
		0,1 à 5 %							
	sud	< 0,1 %							
		0,1 à 5 %							
		5 à 25 %							
		25 à 50 %							
secteur de ref. sud	20 m de l'ouverture								
	limite		0 ou longueur totale						
Note de remplissage									
		% (voir précision dans méthode)	en mètre	en mètre	0-absente	noms de taxons			
					1-algues-bryophytes				
					2-hydrophytes				
					3-hélrophytes				

Annexe 2 : Fiches de terrain renseignées

Fiches de terrain renseignées des 10 passages inférieurs

(voir fichiers associés, disponibles sur demande)

© 2018 - Cerema

Le Cerema, l'expertise publique pour le développement durable des territoires.

Le Cerema est un établissement public, créé en 2014 pour apporter un appui scientifique et technique renforcé dans l'élaboration, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques de l'aménagement et du développement durables. Centre d'études et d'expertise, il a pour vocation de diffuser des connaissances et savoirs scientifiques et techniques ainsi que des solutions innovantes au cœur des projets territoriaux pour améliorer le cadre de vie des citoyens. Alliant à la fois expertise et transversalité, il met à disposition des méthodologies, outils et retours d'expérience auprès de tous les acteurs des territoires : collectivités territoriales, organismes de l'État et partenaires scientifiques, associations et particuliers, bureaux d'études et entreprises.

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Cerema est illicite (loi du 11 mars 1957). Cette reproduction par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

Coordination et suivi d'édition › Cerema Infrastructures de transport et matériaux, Département de la valorisation technique, Pôle édition multimédia : Pascale Varache – Karine Massouf

Mise en page › Cerema Infrastructures de transport et matériaux

Illustration couverture › © Cerema

Dépôt légal : Octobre 2018

ISRN : CEREMA-DTecITM-2018-013-1-FR

ISSN : 2552-884X

Éditions du Cerema

Cité des mobilités
25 avenue François Mitterrand
CS 92803
69674 Bron Cedex

Pour toute correspondance › Cerema - Bureau de vente - 2 rue Antoine Charial - CS 33927 - 69426 Lyon Cedex
ou par mail › bventes@cerema.fr

www.cerema.fr › Nos publications

La collection « Connaissances » du Cerema

Cette collection présente l'état des connaissances à un moment donné et délivre de l'information sur un sujet, sans pour autant prétendre à l'exhaustivité. Elle offre une mise à jour des savoirs et pratiques professionnelles incluant de nouvelles approches techniques ou méthodologiques. Elle s'adresse à des professionnels souhaitant maintenir et approfondir leurs connaissances sur des domaines techniques en évolution constante. Les éléments présentés peuvent être considérés comme des préconisations, sans avoir le statut de références validées.

Colonisation par la végétation des passages sous les infrastructures

Étude de 10 ouvrages présentant des sections d'ouverture de 16 à 120 m²

La colonisation par la végétation des passages sous les infrastructures n'est pas actuellement décrite et caractérisée par des publications. Or la végétalisation sous les ouvrages peut avoir des impacts sur la circulation des espèces ou la protection des berges dans le cas de rétablissements hydrauliques.

La présente étude est une première approche de la question. Elle a consisté à définir une méthode de collecte d'informations sur les passages inférieurs et la végétation, à réaliser des relevés sur 10 ouvrages et à en exploiter les données. Les cas étudiés sont des passages inférieurs sous des routes à 2 x 2 voies, de longueur 23 à 29 m et de section d'ouverture 16 à 120 m².

Les résultats, sur la gamme d'ouvrages étudiés, montrent que la section à l'ouverture est le paramètre qui permet le mieux d'expliquer le développement de la végétation dans les passages inférieurs. Le tirant d'air est mieux corrélé à la végétation ligneuse. Des valeurs guides sont listées dans la conclusion de l'étude.

Des conseils sont donnés pour la conception des nouveaux ouvrages et leur restauration.

Cette étude pourrait être renforcée par une collecte d'informations sur un plus grand nombre d'ouvrages, notamment pour des gabarits différents de passages inférieurs.

Establishment of vegetation in passages under infrastructures is not at this time described and characterized by publications. Yet, the revegetation under structures can have impacts on species circulation or bank protections in case of hydraulic restoring. This study is a first approach of the question. This study had to define a data collection method on structures and vegetation, to realise measurements on 10 structures and to exploit data. The underpass studied are 2 x 2 lanes road trafic, with length 23 - 29 m and section 16 -120 m². The results, on the range of studies structures, show that section is the parameter that explains the best the vegetation developpemnt under structures. Vertical clearance is better correlated at ligneous vegetation. Guide values are listed in conclusion. Advices are given for conception of new structures and for restoration. This study could be strengthened by collecting data from a largest number of structures, in particular for different sizes of underpasses.