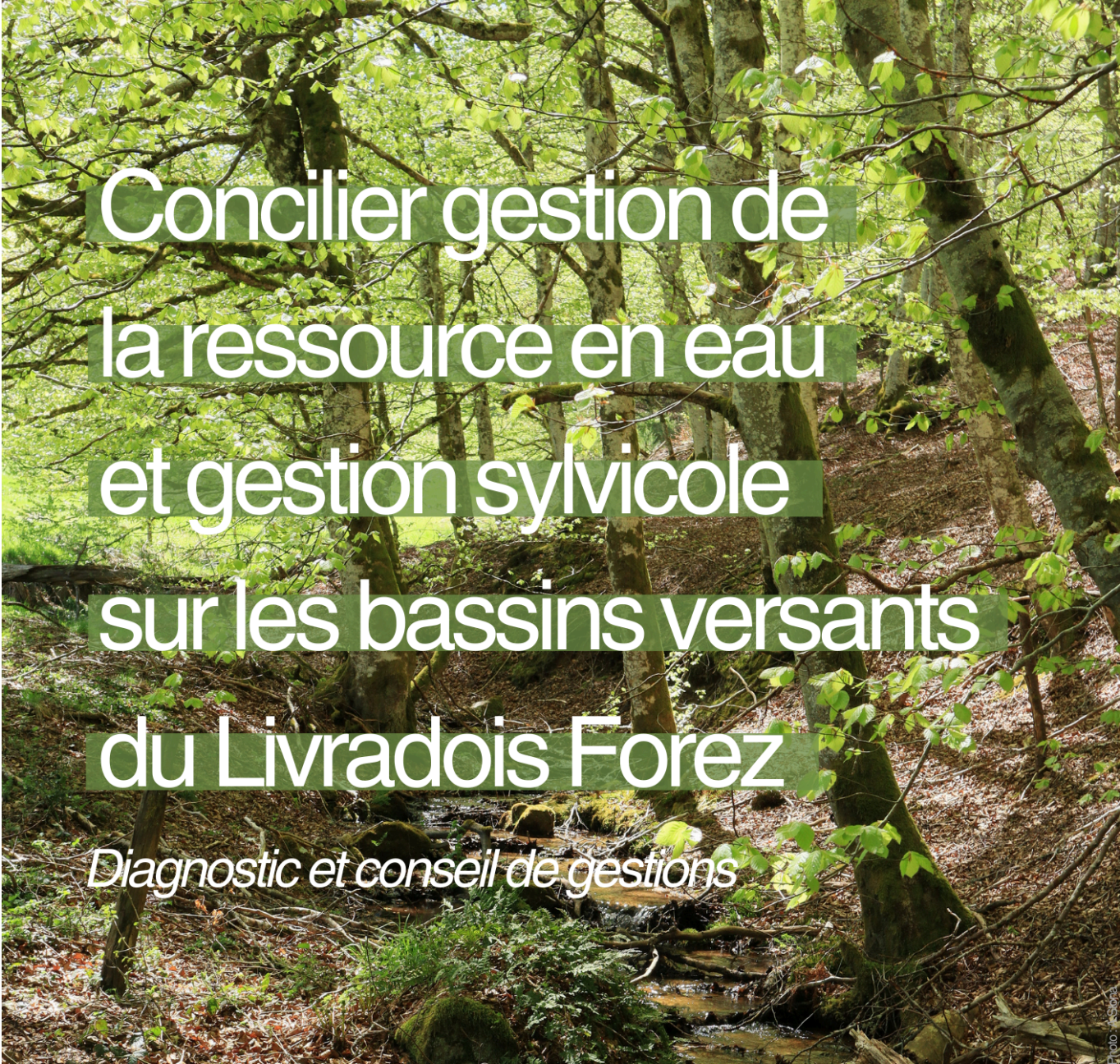


A photograph of a forest landscape with a small stream flowing through it. The trees have green leaves, and the ground is covered with fallen leaves and moss. The text is overlaid on the image.

Concilier gestion de la ressource en eau et gestion sylvicole sur les bassins versants du Livradois Forez

Diagnostic et conseil de gestions

Projet Forêt - Eau
Mai 2025



AMBERT
LIVRADOIS
FOREZ

AgroParisTech

Nancy



Auteurs : Amarande BELIARD, Daphnée DUMESGE,
Margot HORVAT, Coline LALANNE, Mélanie LAU, Noan LE GUELLEC,
Enrique LIBREROS CORONEL, Paul ROGER, Jan ROUSSEAU,
Alexandre STONA, Amédéo TAISNE, Aline TISSERAND

Encadré par : Philippe DURAND et Eric LACOMBE

I. Contexte de la zone d'étude

- a) Contexte géographique
- b) Contexte climatique
- c) Evolution climatique future
- d) Contexte géologique et pédologique
- e) Evolution de l'occupation des sols

II. Quantité d'eau disponible pour les captages

- a) Contexte et état de l'art
- b) Méthode de travail : caractérisation des peuplements des PPR
- c) Résultats

III. Circulation de l'eau dans le Bassin Versant depuis le captage

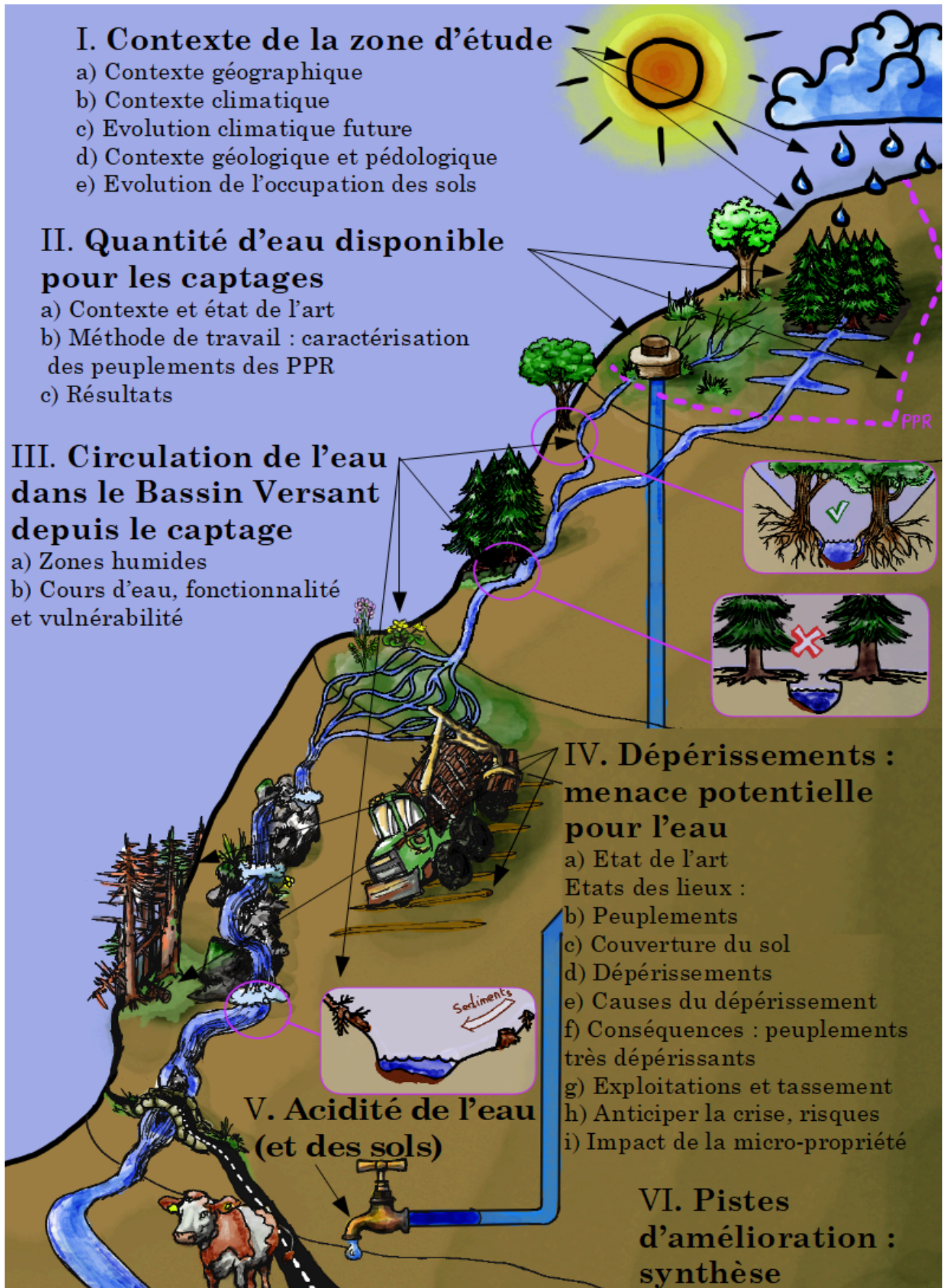
- a) Zones humides
- b) Cours d'eau, fonctionnalité et vulnérabilité

IV. Dépérissements : menace potentielle pour l'eau

- a) Etat de l'art
- Etats des lieux :
- b) Peuplements
- c) Couverture du sol
- d) Dépérissements
- e) Causes du dépérissement
- f) Conséquences : peuplements très dépérissants
- g) Exploitations et tassement
- h) Anticiper la crise, risques
- i) Impact de la micro-propriété

V. Acidité de l'eau (et des sols)

VI. Pistes d'amélioration : synthèse



Sommaire

Sommaire.....	3
Remerciements.....	5
Tableau des abréviations.....	6
Correspondance noms vernaculaires et noms latin.....	6
Glossaire:.....	7
Table des figures.....	8
Table des tableaux.....	9
Introduction.....	10
Démarche :.....	11
I - Contexte de la zone d'étude.....	11
A - Contexte géographique.....	11
B - Contexte climatique.....	13
C - Evolution climatique future de la zone d'étude.....	15
D - Contexte géologique et pédologique.....	16
II - Quantité d'eau disponible pour les captages.....	18
A - Contexte et État de l'art.....	18
1 - L'approvisionnement en eau potable de la communauté de communes Ambert Livradois Forez : caractérisation des zones de captage.....	18
2 - Rôle de la forêt dans le cycle de l'eau.....	19
B – Méthode de travail : Caractérisation des peuplements au sein des périmètres de protection des captages.....	22
C – Résultats.....	23
1 - Des peuplements consommateurs d'eau.....	23
2 - Des actions anthropiques influençant le bon fonctionnement des captages.....	27
III - Circulation de l'eau dans le Bassin Versant depuis le captage.....	27
A - Stockage d'eau dans les zones humides.....	28
B - Cours d'eau.....	31
1 - Fonctionnalité des cours d'eau étudiés.....	32
2 - Vulnérabilité des cours d'eau.....	37
IV - Le dépérissement, une menace potentielle pour la ressource en eau et comment les limiter.....	43
A - Etat de l'art : éléments de réflexion sur le sujet des dépérissements, particulièrement dans le cas des sapinières.....	43
A- Analyse des données bibliographiques.....	43
B- Analyse des données de terrain appuyant la bibliographie.....	45
B - Etat des lieux des peuplements.....	47
C - Etat des lieux de la couverture du sol.....	48
D - Etude des dépérissements.....	50
1. Etat des lieux des dépérissements.....	50
2. Causes du dépérissement.....	52
E - Focus sur les peuplements très dépérissants.....	54
F - Exploitation - tassement.....	57
3. Anticipation, gestion de crise et risque.....	60
4. Impact de la micro propriété, levier d'action.....	60
5. Analyse économique.....	60
V - Acidité de l'eau (et des sols forestiers).....	61
VI - Pistes d'amélioration du territoire : synthèse.....	63
Conclusion.....	64

Remerciements

Nous tenons à remercier l'ensemble des personnes ayant permis la réalisation de ce projet.

Nos plus sincères remerciements à Adrien CHIQUET, sans qui ce projet n'aurait probablement jamais abouti et à Nicolas FAYET pour avoir été à l'initiative de ce projet.

Un grand merci à Sebastien BRET, Benjamin FAYE, Nicolas FAYET, Nicolas HELARY, Gaëtan MONNET, Max MOULIN, Gilbert PORTAIL, Julien SARRY ayant accepté de prendre de leur temps pour échanger avec nous.

Nous remercions la communauté de communes d'Ambert Livradois Forez pour l'accueil qui nous a été réservé.

Une attention particulière à nos deux enseignants Philippe DURAND et Eric LACOMBE qui ont contribué, grâce à leurs conseils et recommandations, à l'élaboration et au bon déroulé de ce projet.

Documents liés à cette étude :

- Ce rapport
- Base de données de l'étude ("dossier_partage")
- Synthèse : concilier gestion de la ressource en eau et gestion sylvicole sur les bassins versants du Livradois-Forez
- Fiches techniques d'aide à la décision : conseils pour une gestion durable des forêts et de l'eau sur le massif de Forez
- Diaporama : F-eau-rez, Présentation de la démarche et des résultats du projet Forêt-Eau, mardi 20 mai 2025
- Diaporama : Présentation du Projet Forêt - Eau, présentation aux experts forestiers de France à l'occasion de leur assemblée générale le vendredi 16 mai 2025

Tableau des abréviations

Abréviation	Signification
CE	Cours d'eau
ComCom	Communauté de communes
BV	Bassin versant
ZH	Zone humide
PB	Petit Bois ($17,5\text{ cm} \leq \varnothing < 27,5\text{ cm}$)
BM	Bois Moyen ($27,5\text{ cm} \leq \varnothing < 47,5\text{ cm}$)
GB	Gros Bois ($47,5\text{ cm} \leq \varnothing$)
$\varnothing$	Diamètre à 1,3 m de hauteur
AEP	Alimentation en eau potable

Correspondance noms vernaculaires et noms latin

Nom vernaculaire	Nom latin
Epicéa commun	<i>Picea abies</i>
Sapin pectiné	<i>Abies alba</i>
Douglas	<i>Pseudotsuga menziesii</i>
Pin sylvestre	<i>Pinus sylvestris</i>
Hêtre	<i>Fagus sylvatica</i>
Merisier	<i>Prunus avium</i>
Sorbier des oiseleurs	<i>Sorbus aucuparia</i>
Frêne	<i>Fraxinus excelsior</i>

Glossaire:

Bassin versant : correspond à l'ensemble de la surface recevant les eaux qui circulent naturellement vers un cours d'eau ou vers une nappe d'eau souterraine (OFB).

Coupe rase (=coupe à blanc = coupe totale) : action de couper tous les arbres d'une parcelle en une seule fois.

Déficit hydrique : lorsque l'évapotranspiration est supérieure aux précipitations.

Élancement : correspond au rapport hauteur sur diamètre (H/D), qui traduit la stabilité du peuplement.

Evapotranspiration : flux d'eau repartant vers l'atmosphère, essentiellement due à la transpiration des végétaux.

Hydrosystème : se compose des éléments du réseau hydrographique tel que le cours d'eau lui-même et les zones humides.

L.A.I. (Leaf Area Index) : permet de quantifier la quantité de feuilles d'un couvert végétal. Il s'agit du rapport de la surface foliaire par unité de surface du sol.

PPI (Périmètre de Protection Immédiate) : est un périmètre réglementé modélisant la surface de prospection des drains. Il doit être déboisé et clôturé. L'obligation légale est justifiée en France par le risque de racines dans les drains, le danger de chute sur les ouvrages y compris la clôture, et l'apport supposé de matière organique.

PPR (Périmètre de Protection Rapproché) : est un périmètre réglementé et variable selon l'appréciation de l'hydrogéologue. Plus étendu que le PPR, il permet de réduire les risques de pollution au niveau des captages.

Rugosité : présence de végétation, bois, blocs, racines, roches ou de tout autre obstacle pouvant entraver l'écoulement des sédiments ou de l'eau. La prise en compte de ces "irrégularités" correspond à la rugosité.

RUM. (Réserve Utile Maximale) : est la quantité maximale d'eau, exprimée en mm, que le sol peut absorber.

Texture : composition en sable, limon et argile du sol.

Tronçon : section de cours d'eau de longueur variable, dont les conditions de fonctionnalité et de vulnérabilité sont homogènes.

Zone humide : zone caractérisée par la présence d'eau (en surface ou souterraine) qui permet de stocker de l'eau et de remplir entre autres 3 grandes fonctions (hydrologique, épuratoire et écologique).

Colmatage : dépôt de particules fines limitant l'écoulement de l'eau (réduction de la hauteur d'eau claire).

Corridor rivulaire : Zone présente immédiatement de part et d'autre du cours d'eau, où on est susceptible de trouver une ripisylve.

Erosion d'un cours d'eau : processus par lequel le sol va se dégrader et se déplacer au niveau du lit ou des berges. L'érosion est susceptible de provoquer un creusement du lit.

Incision : enfoncement généralisé du fond d'un cours d'eau, résultat d'une érosion.

Lit de plein bord : limite au-delà de laquelle l'eau se répand dans la plaine d'inondation. Il définit la largeur et la profondeur plein bord.

Largeur plein bord : en première approximation, cette largeur peut être estimée rapidement sur le terrain à partir de la zone non végétalisée du lit.

Profondeur plein bord : Profondeur mesurée entre la limite du lit de plein bord et le fond du cours d'eau.

Largeur de la lame d'eau : largeur de la surface d'eau (variable au cours de l'année).

Profondeur de la lame d'eau : Profondeur mesurée entre la lame d'eau et le fond du cours d'eau.

Paysage : Occupation du sol observée au-delà du corridor rivulaire.

Ripisylve : peuplement présent à proximité d'un cours d'eau, et dont les essences sont inféodées au cours d'eau (Aulnes glutineux, ormes, frênes, érables sycomores, saules, bouleaux...)

Rugosité : Présence de végétation, bois, blocs, racines, roches ou de tout autre obstacle pouvant entraver l'écoulement des sédiments ou de l'eau. La prise en compte de ces "irrégularités" correspond à la rugosité.

Table des figures

Figure 1 : Déroulé du projet Forêt-Eau.

Figure 2 : Carte des bassins versants et des captages concernés par l'étude sur la communauté de communes d'Ambert Livradois Forez.

Figure 3 : Ombrogramme de la station météorologique d'Ambert. Les moyennes sont celles de 1991 à 2020. La température moyenne annuelle est de 10,1°C et la pluviométrie moyenne annuelle est de 860,2 mm.

Figure 4 : Précipitation - ETP Penman sur la zone d'étude de la communauté de communes Ambert Livradois-Forez en période estivale (juin-juillet-août).

Figure 5 : Estimation des précipitations, de la température et du déficit hydrique à Ambert, avec un scénario intermédiaire, en 2050.

Figure 6 : Répartition des textures en fonction de l'épaisseur de la couche selon les sondages tarières réalisés.

Figure 7 : Position des captages dans les bassins versants et dans les différentes communes.

Figure 8 : Bilan des flux d'eau arrivant sur le bassin versant.

Figure 9 : Carte récapitulative des différentes unités de peuplements du PPR des captages 25 et 26.

Figure 10 : Répartition en surface terrière des types de peuplement présents au niveau des PPR des captages.

Figure 11 : Répartition en surface terrière des types de peuplement présents au niveau des PPR des captages.

Figure 12 : Répartition des différents types de peuplement au niveau des PPR des captages.

Figure 13 : Nombre de peuplement en fonction de la proportion de recouvrement de la régénération (10 cm - 2 m).

Figure 14 : Proportion des différentes essences présentes en régénération (10 cm - 2 m) en fonction du type de peuplement.

Figure 15 : Carte comparative entre deux cartes prédictionnelles des ZH : Cas du captage 10, carte prédictive pessimiste de l'INPN.

Figure 16 : Cartes comparatives entre deux cartes prédictionnelles des ZH : zone humide au niveau d'un transect réalisé sur le ruisseau du Cros en accord avec les 2 cartes.

Figure 17 : Illustration de l'impact de l'incision d'un cours d'eau.

Figure 18 : Carte de fonctionnalité des cours d'eau.

Figure 19 : a) proportion des classes de fonctionnalité sur l'ensemble des ruisseaux. b) proportions des classes de fonctionnalité par ruisseau.

Figure 20 : Rapport l/p du profil en long des ruisseaux RTONV et RCROS en fonction de l'altitude

Figure 21 : Carte de vulnérabilité topographique

Figure 22 : Parts des différentes classes de sensibilité topographiques pour l'ensemble des cours d'eau étudiés

Figure 23 : Parts des différentes classes de sensibilité selon les cours d'eau étudiés

Figure 24 : Diagramme de distribution des niveaux de rugosité du corridor rivulaire (à gauche) et du paysage (à droite) sur les tronçons à forte vulnérabilité topographique (classes 1-10)

Figure 25 : Catégorie de vulnérabilité long terme (DA : Danger Amoindri ; DP : Danger Potentiel, DI : Danger Immédiat) pour les tronçons les plus vulnérables topographiquement (classes 1-10)

Figure 26 : Part des essences en surface terrière dans les peuplements.

Figure 27 : Structure des peuplements fermés ("F...") et éclaircis ("E...").

Figure 28 : Nombre de perches par hectare des différents peuplements fermés par essence.

Figure 29 : Nombre de perches par hectare des différents peuplements éclaircis par essence.

Figure 30 : Pourcentage de recouvrement du sol par la régénération de 10cm à 2m de haut.

Figure 31 : Pourcentage de recouvrement moyen du sol par la régénération comprise entre 10cm à 2m de haut.

Figure 32 : Pourcentage de recouvrement de la régénération naturelle >2m des peuplements fermés.

Figure 33 : Pourcentage de recouvrement de la régénération naturelle >2m des peuplements éclaircis.

Figure 34 : Pourcentage de recouvrement de la régénération naturelle <2m des peuplements fermés.

Figure 35 : Pourcentage de recouvrement de la régénération naturelle <2m des peuplements éclaircis.

Figure 36 : Recouvrement par les différentes espèces végétales compétitrices (en % de la surface).

Figure 37 : Recouvrement de la régénération >2m en fonction du recouvrement par la concurrence herbacée.

Figure 38 : Nombre d'arbres morts par essence dans les peuplements fermés.

Figure 39 : Nombre d'arbres morts par essence dans les peuplements éclaircis.

Figure 40 : Nombre d'arbres très dépérissants par essence dans les peuplements fermés.

Figure 41 : Nombre d'arbres très dépérissants par essence dans les peuplements éclaircis.

Figure 42 : Nombre d'arbres très dépérissants ou morts par hectare dans les peuplements fermés.

Figure 43 : Nombre d'arbres très dépérissants ou morts par hectare dans les peuplements éclaircis.

Figure 44 : Matrice des corrélations des paramètres pouvant expliquer les dépérissements.

Figure 45 : Cercle de corrélation réalisée sur les paramètres pouvant expliquer les dépérissements.

Figure 46 : Nombre de sapins morts ou dépérissants par hectare en fonction de l'altitude et du versant ("chaud" ou "frais").

Figure 47 : Nombre de sapins morts ou dépérissants par hectare en fonction de la surface terrière "G" et du versant ("chaud" ou "frais").

Figure 48 : Degré de mortalité du sapin en fonction de la catégorie de diamètre (en surface terrière).

Figure 49 : Degré de mortalité du sapin en fonction de la catégorie de diamètre (en % de chaque degré de mortalité pour chaque catégorie de diamètre).

Figure 50 : Pourcentage de recouvrement de la régénération de moins de 2m dans les peuplements très dépérissants.

Figure 51 : Pourcentage de recouvrement de la régénération de plus de 2m dans les peuplements très dépérissants.

Figure 52 : Nombre de perches par hectare dans les peuplements très dépérissants.

Figure 53 : Matrice des corrélations des paramètres pouvant expliquer la régénération.

Figure 54 : Sensibilité du sol au tassement en fonction de la texture du sol.

Figure 55 : Le processus d'acidification dans les plantations de résineux sur des sols acides.

Table des tableaux

Tableau 1 : Seuils de sur-capitalisation en surface terrière en fonction de l'essence et de la catégorie de grosseur des bois dans le cadre d'une gestion en futaie régulière.

Tableau 2 : Identification des facteurs de non fonctionnalités d'une ZH.

Tableau 3 : Paramètres susceptibles d'expliquer le rapport l/p des tronçons de fonctionnalité considérée anormale (inf PB : inférieure à la hauteur Plein Bord).

Tableau 4 : Paysages associés aux différents niveaux de rugosité.

Tableau 5 : Type de couvert retrouvé selon la catégorie de pérennité du couvert.

Tableau 6 : répartition des paramètres des parcelles échantillonnées

Tableau 7 : Temps moyen d'infiltration d'un litre d'eau dans le cadre d'un test Beerkan.

Introduction

Dans un contexte de changement climatique marqué par une augmentation des aléas (vagues de chaleur, précipitations extrêmes, sécheresses), une des questions posées concerne le changement prédit du régime des précipitations. En effet, la pluie risque d'être plus importante en hiver et faible en été (*Changements climatiques 2014*, 2015). Ainsi, la vulnérabilité des écosystèmes et des populations humaines face aux aléas s'accroît (IPCC et al., 2024). De plus, en terme de gestion forestière, il est question de trouver différentes solutions et pratiques pour faire face à au changement climatique et limiter le risque de perte de multifonctionnalité des forêts, comme diminuer les densités, effectuer de la migration assistée des essences, favoriser les mélanges d'essences, ... (Laurent et al., 2023). Aucune région n'est épargnée par ces dynamiques, comme l'illustre le cas du territoire d'étude, la communauté de communes (ComCom) d'Ambert Livradois Forez.

Les conséquences du changement climatique se sont récemment manifestées de manière inédite sur le territoire de la ComCom d'Ambert Livradois Forez : pour la première fois de mémoire des habitants, en 2023, plusieurs communes ont vu leur alimentation en eau potable (AEP) se tarir. Cet événement a profondément marqué la population et a conduit le Syndicat Intercommunal d'Approvisionnement en Eau Potable (SIAEP) de Beurières Chaumont à engager un ensemble de mesures d'urgence, telles que la mise aux normes des captages et la réalisation de travaux importants pour limiter les pertes sur le réseau. En parallèle, des actions de sensibilisation ont été menées auprès des habitants afin d'encourager une réduction de la consommation d'eau. En plus du manque d'eau potable pour la population, ce déficit hydrique s'est accompagné du dépérissement des sapinières ainsi que d'une perte de la vitalité des autres essences, comme le douglas. Plus récemment, en 2023-2024, la commune de Chaumont-le-bourg a subi un épisode d'inondation, ce qui dénote un problème de quantité d'eau sur ce territoire. Mais les interrogations de la ComCom ne s'arrêtent pas aux changements de consommation en eau et à l'entretien des infrastructures : elle porte également son regard sur la gestion de la forêt, que ce soit en amont des captages pour l'AEP mais aussi sur les pratiques sylvicoles sur les monts de Forez et leurs implications sur l'hydrosystème. L'avenir de cette jeune forêt, issue de plantations sur d'anciennes terres agricoles, déjà touchée par un dépérissement pose question. Morcelée entre de nombreux propriétaires, elle présente des peuplements majoritairement résineux, peu diversifiés et rarement gérés de manière active. Ces peuplements plantés à la même période atteignent simultanément des dimensions minimales acceptables pour une commercialisation auprès des scieurs. Les dépérissements accrus du sapin pectiné à basse altitude poussent alors les propriétaires à exploiter leurs peuplements, le plus souvent par coupes rases. Ce phénomène, combiné au tarissement des sources, suscite des inquiétudes sur le lien entre sylviculture et ressource en eau. En somme, la ComCom cherche à avoir une meilleure compréhension de la sylviculture et à contribuer à favoriser des scénarios de gestion forestière qui soient plus économes en eau, qui continuent de répondre à des attentes multifonctionnelles (notamment la fonction sociale) et qui soient le plus résilients possible face au changement climatique.

Dans ce contexte, la ComCom a confié une étude aux étudiants ingénieurs de deuxième année d'AgroParisTech campus de Nancy, afin d'explorer les interactions forêt-eau et les leviers d'action possibles pour tenter d'améliorer la situation.

L'étude vise à traiter trois problématiques majeures qui affectent le territoire et qui auraient des impacts sur la vie quotidienne des habitants et l'économie des communes: un déséquilibre quantitatif de la ressource en eau (excès ou manque), une qualité de l'eau dégradée (liée à son acidité) et des dépérissements des sapins. En parallèle, de nombreuses interrogations ont été soulevées par les agents du territoire, dont l'une des plus importantes concerne le lien entre les pratiques sylvicoles et la disponibilité en eau, un sujet particulièrement préoccupant.

Suite aux échanges avec différents acteurs du territoire, la question technique retenue est : comment établir des diagnostics et le cas échéant faire évoluer les pratiques dans le territoire en terme de sylviculture et de gestion

de l'hydrosystème, notamment vis-à-vis du changement climatique et de la raréfaction de l'eau, pour continuer de répondre aux besoins de la société ?

La ressource en eau semble donc être l'une des problématiques majeures du territoire et son lien avec la sylviculture et les pratiques sylvicoles est important à éclaircir : est-ce que les hydrosystèmes sont modifiés par la gestion sylvicole et les peuplements ? Est-ce que les peuplements en place consomment beaucoup d'eau ? Si oui, est-il possible d'atténuer cela, comment et avec quelle plus-value pour l'hydrosystème ? Quel lien pourrait avoir le dépérissement des peuplements de sapin avec la ressource en eau du territoire ?

Démarche :

L'étude a été menée par 12 élèves ingénieurs de deuxième année du campus de Nancy d'AgroParisTech, encadrés par deux enseignants-chercheurs. Le projet a eu lieu du mardi 22 avril 2025 au vendredi 23 mai 2025, soit 5 semaines. Le déroulé du projet est présenté sur la Figure 1.

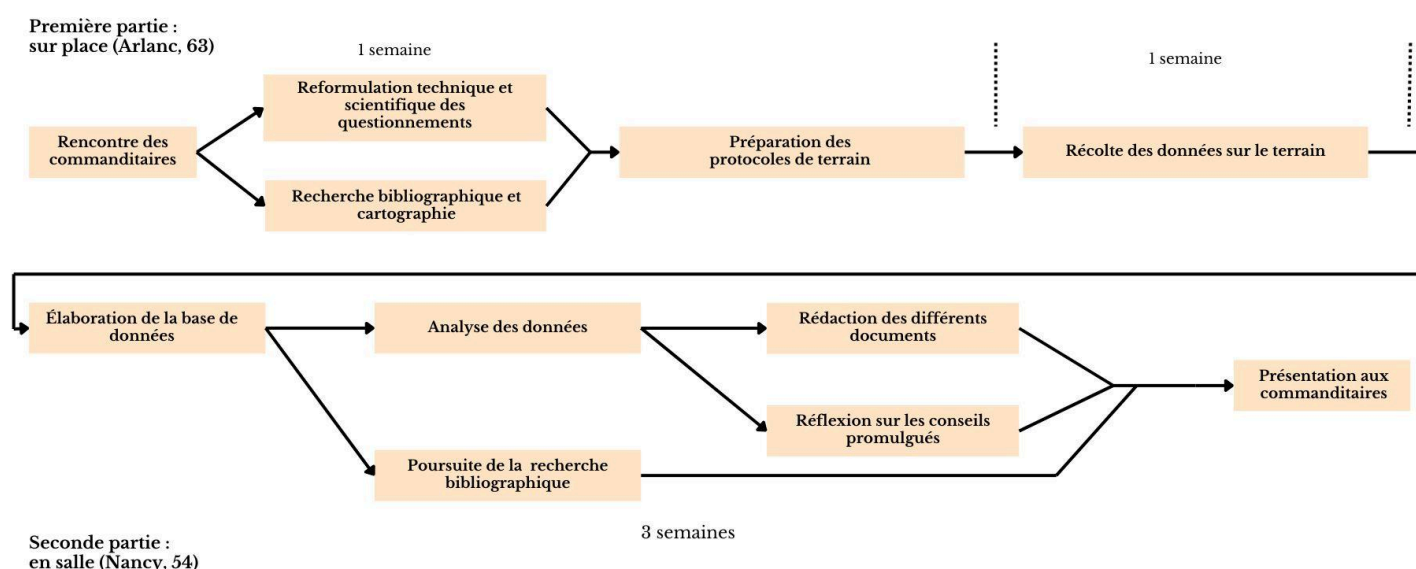


Figure 1 : Déroulé du projet Forêt-Eau

Étant donné les interrogations de la ComCom et la question technique qui a été posée, l'étude s'est portée sur l'analyse de l'état sylvicole des zones de captages, la circulation de l'eau dans le bassin versant et son implication dans les dépérissements du sapin.

I - Contexte de la zone d'étude

A - Contexte géographique

La ComCom d'Ambert Livradois Forez se situe dans le département du Puy-de-Dôme (63) en région Auvergne-Rhône-Alpes. Elle comprend 58 communes soit une superficie de 1 230 km² et s'étend sur les Monts de Forez, la plaine d'Ambert et les Monts du Livradois. Avec une densité moyenne de 22 habitants par km² (la densité en France est de 106,5 habitants/km² en 2021 (INSEE, 2025), ce territoire peut être considéré comme un territoire de faible densité (Ambert Livradois Forez, 2019). Il se situe dans le Parc Naturel Régional (PNR) du Livradois-Forez dont l'objectif est de préserver et de gérer durablement ces territoires présentant des patrimoines d'intérêt (Olei, 2025).

Les parcelles forestières sont majoritairement privées puisqu'elles représentent 94 % des forêts sur notre zone d'étude. Les parcelles de propriété forestière sont très fragmentées sur ce territoire avec "en moyenne 2,4 ha/propriétaire en 4 parcelles, souvent non contiguës" (2,8 ha en France métropolitaine) sur l'ensemble du PNR Livradois-Forez (PNR Livradois-Forez, 2024a). Il s'agit d'un micro parcellaire.

L'étude se limitera aux bassins versants des piémonts du Forez autour des communes d'Arlanc, Chaumont-le-Bourg, Beurrières, Medeyrolles, Dore l'Eglise, etc. (figure 2), mais surtout sur l'approvisionnement en eau de l'hydrosystème, c'est-à-dire non seulement l'AEP mais aussi l'eau non potable (cours d'eau, zone humide, ...). En effet, les prélèvements en eau potable sur la ComCom se font exclusivement sur ces pentes du Forez (SIAEP Beurrières Chaumont, 2018). De plus, la limite en aval du bassin versant a été fixée à la limite topographique entre plaine et piémont du fait de l'absence de boisement sur la partie plaine. Enfin, l'étude qui a été faite ne porte pas sur l'état des infrastructures du réseau d'AEP, ni sur la consommation en eau des acteurs du territoire (agriculteurs, entreprises, habitants, ...).

Au sein de la zone d'étude, différentes activités sont pratiquées. La sylviculture et l'agriculture sont les principales, avec respectivement 6190 ha et 5054 ha sur 12 289 ha de surface, soit 50 % et 41%. Les superficies comptées étant celles à l'Est de la D906, dans la zone d'étude (Lunel Agglo, 2012). Il a été mesuré 1 235 ha de forêts anciennes, selon la définition de l'IGN, soit seulement 20 % des forêts actuelles. Les bases de données : Cartographie des formations végétales (IGN, 2018) et Forêts-anciennes (IGN, 2025) ont été utilisées pour effectuer les calculs.

Ainsi, la sylviculture est une activité importante de la zone d'étude, mais n'est pas l'unique activité qui y est pratiquée. En effet, il y a tout de même 41 % des surfaces dédiées à l'agriculture. Vis-à-vis du changement d'usage, la forêt actuellement présente est "jeune" puisque seules 20 % des forêts sont considérées comme anciennes. En effet, de nombreuses plantations sur terres agricoles ont été effectuées après la seconde guerre mondiale du fait de la politique du fond forestier national. Ainsi la majorité des plantations ont entre 50 et 80 ans. La forêt s'est également étendue depuis cette période.

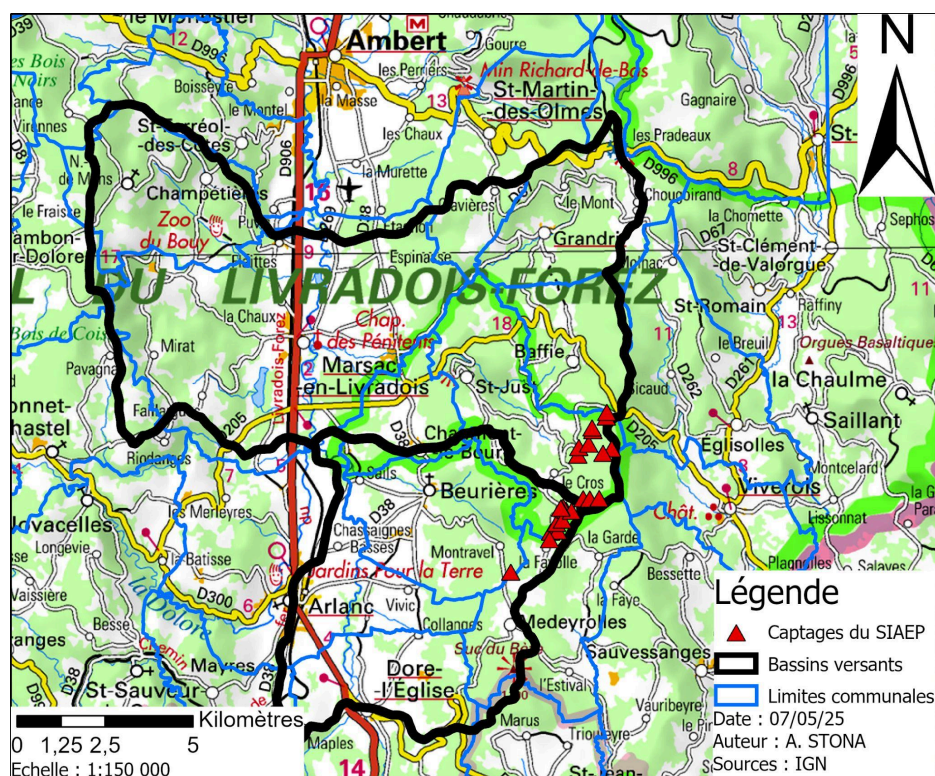


Figure 2 : Carte des bassins versants et des captages concernés par l'étude sur la communauté de communes d'Ambert Livradois Forez.

Seule la partie Forez (l'est des bassins versants) a été étudiée. Le Syndicat intercommunal de l'Approvisionnement en Eau Potable est celui de Beurières Chaumont.

B - Contexte climatique

La zone d'étude prend place dans les sylvoécorégions (SER) G90 "Plaines alluviales et piémonts du Massif central" et G22 "Plateaux granitiques du centre du Massif central" (IGN, 2012). La SER G90 ne concerne que la vallée entre le Livradois et le Forez. Cette sylvoécorégion est soumise à l'effet de Foehn avec les vents provenant de l'Ouest. Le climat est continental, avec des hivers froids et secs et des étés caniculaires (IGN, 2013a).

La SER G22 est caractérisée par un climat atlantique avec des influences montagnardes et continentales. Il est à noter que des sécheresses estivales peuvent se produire. De plus, des jours d'enneigement et de gel conséquents, avec un printemps tardif peuvent avoir lieu (IGN, 2013b).

La zone d'étude n'est pas marquée par des sécheresses systématiques au sens de Gaussen (figure 3) : la courbe noire de température ne dépasse que très rarement les barres des précipitations pour la période 1991-2023. Seules les années 2021 et 2023 présentent une petite période avec un déficit hydrique. Lors de ces années, les précipitations ont été en moyenne plus faibles sur l'année par rapport à la normale et les températures supérieures.

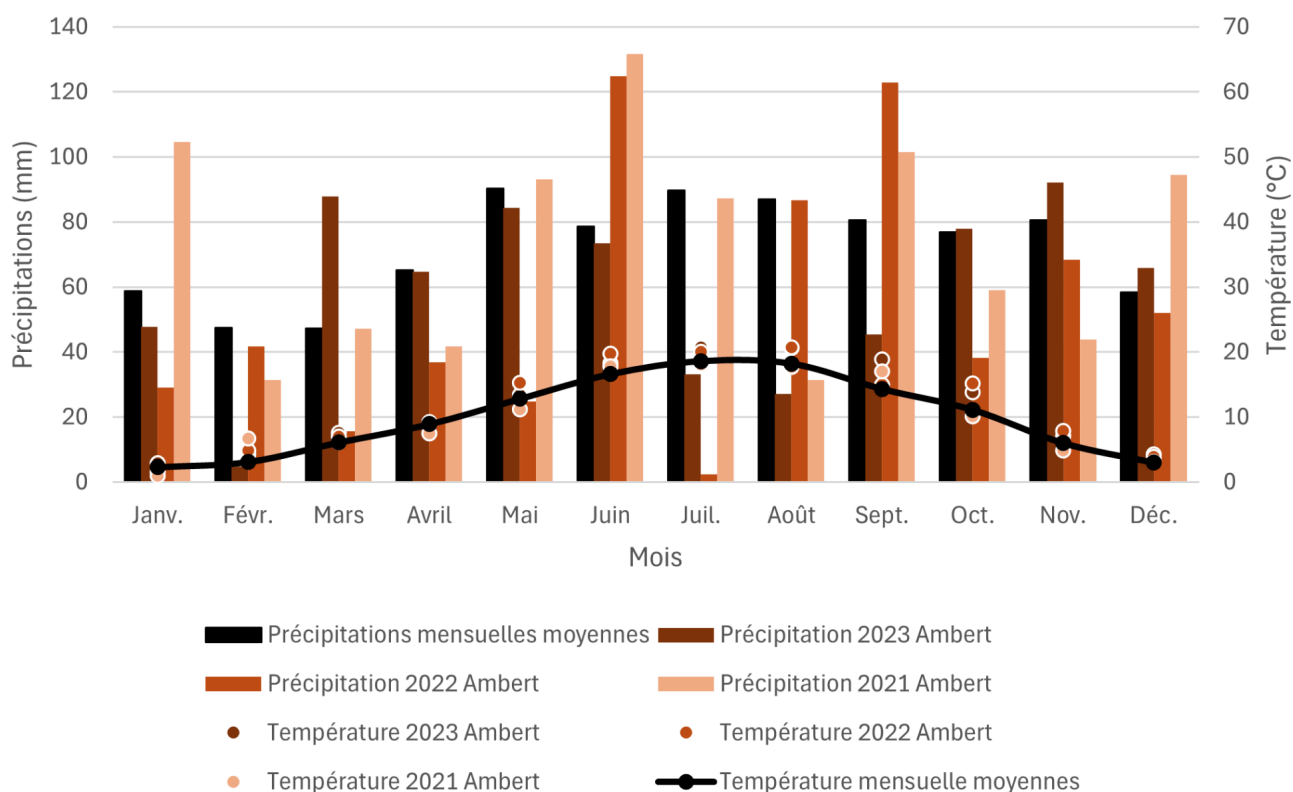


Figure 3 : Ombrogramme de la station météorologique d'Ambert. Les moyennes sont celles de 1991 à 2020. La température moyenne annuelle est de 10,1°C et la pluviométrie moyenne annuelle est de 860,2 mm. Les autres données sont celles des années 2021, 2022 et 2023. La moyenne annuelle sur les trois années est de 11,2°C et 738 mm. Source : MétéoFrance.

Les données d'évaporation potentielles (ETP) ne sont pas disponibles pour la station d'Ambert. Cependant, le modèle DIGITALIS permet d'estimer cette évaporation (figure 4). Le modèle DIGITALIS permet d'estimer à la résolution de 50 m les précipitations et l'ETP Penman. Il a été réalisé à partir des données obtenues sur des stations météorologiques de 1999 à 2020, puis par extrapolation à une précision de 50 m.

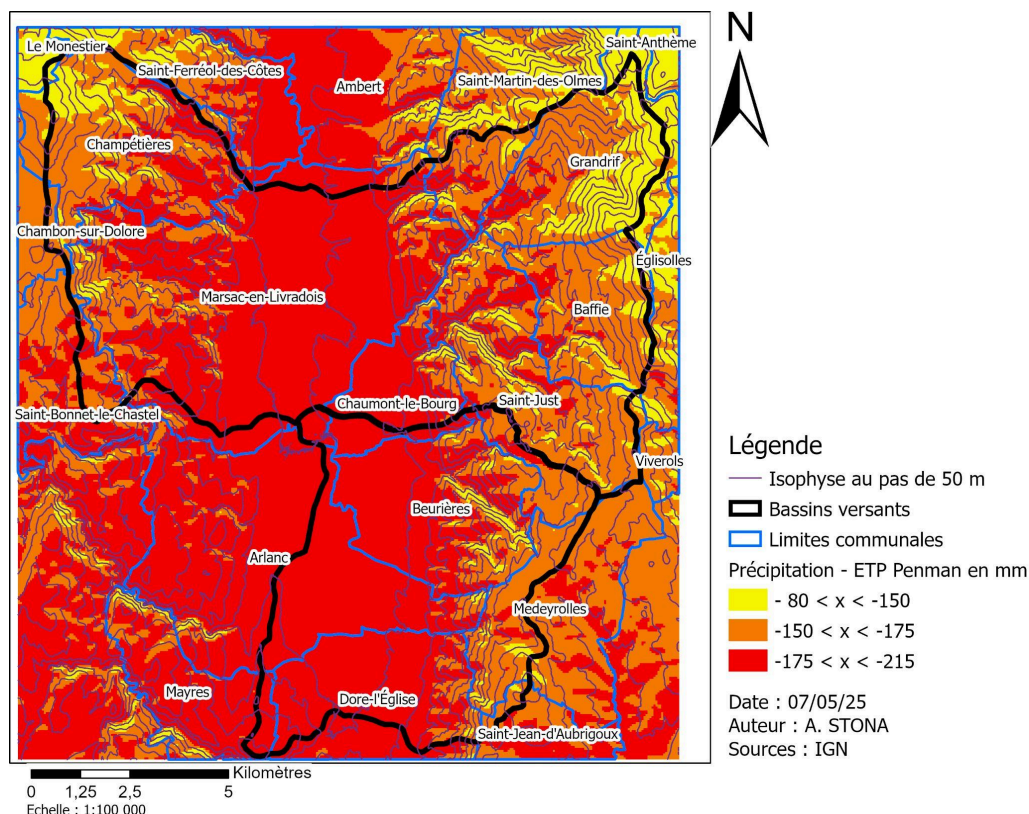


Figure 4 : Précipitation - ETP Penman sur la zone d'étude de la communauté de communes Ambert Livradois Forez en période estivale (juin-juillet-août). Les précipitations comme l'ETP Penman ont été établies par le modèle Digitalis V3, à partir des années 1999-2020 (Université de Lorraine, AgroParisTech, INRA : laboratoire SILVA, 2014).

Selon ce modèle, il est constaté qu'il existe une légère période de sécheresse estivale durant trois mois (figure 4), c'est-à-dire que les précipitations ne sont pas assez importantes pour compenser l'ETP. Ce modèle semble plus pessimiste que l'analyse par ombrogramme. Cela indique que ce territoire est à la limite d'un déficit hydrique estival. Mais à la vue des dernières années (2020-2023), et d'une manière générale, du fait du changement climatique, il est attendu que ces périodes de sécheresses s'intensifient dans le futur. Seuls les versants exposés au Nord ont des déficits hydriques bien inférieurs aux autres endroits. L'altitude permet de limiter le déficit mais le fait d'être en versant Nord reste plus "efficace" que l'effet de l'altitude.

Il s'agit d'un bilan climatique, il ne prend pas en compte les réserves dans le sols. Ainsi, les éléments apportés sont à nuancer en fonction des caractéristiques du sol.

C - Evolution climatique future de la zone d'étude

Le secteur d'Ambert a été confronté à des sécheresses (La montagne, Thiers-Ambert, 2023) qui ont pu sembler exceptionnelles. Cependant les projections climatiques suggèrent que des événements météorologiques extrêmes tels que les sécheresses pourraient être plus fréquents à l'horizon 2050 (Puget et al., 2024) du fait d'un déficit hydrique (Déficit hydrique : Situation où la quantité d'eau disponible pour les plantes est insuffisante par rapport à leurs besoins, ce qui peut entraîner un stress hydrique) (Blanchet, 2023) plus important (figure 5). Les années chaudes et sèches ne seront plus si exceptionnelles et la distribution des précipitations sera également modifiée avec des précipitations plus violentes. Une baisse du niveau des aquifères du bassin versant de la Dore de

20 % est jugée comme possible pour cet horizon (Puget et al., 2024). Les phénomènes d’ETP devraient augmenter avec pour conséquence une moindre quantité d’eau ruisselant et s’infiltrant.

Scénario intermédiaire, 2050

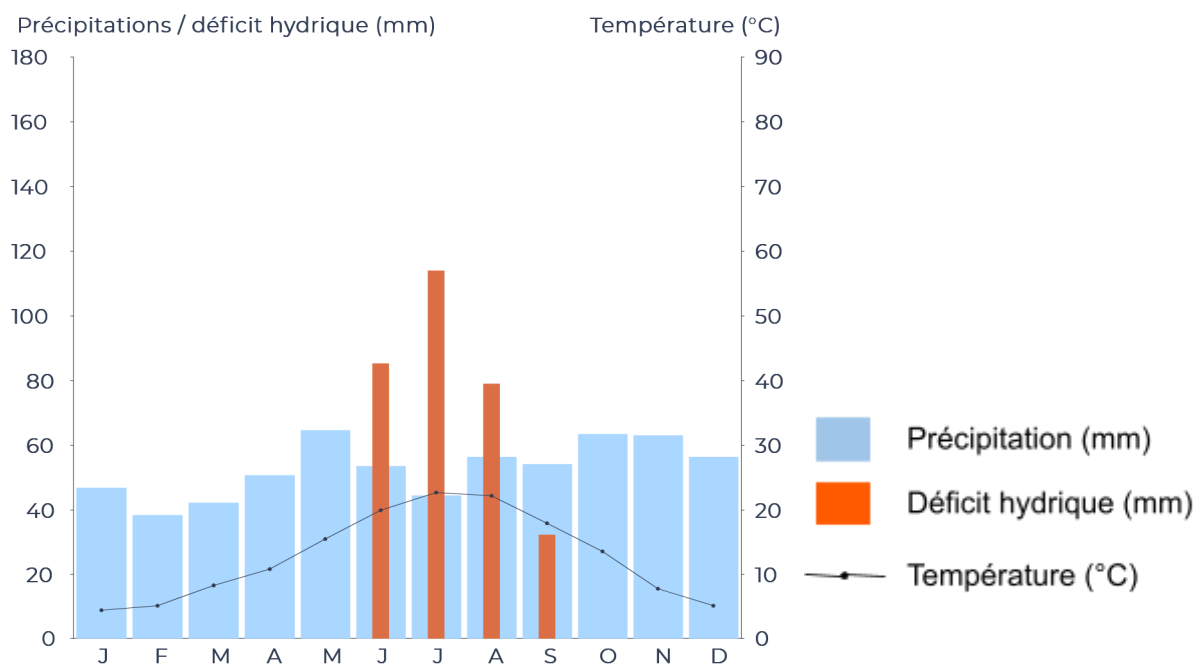


Figure 5 : Estimation des précipitations, de la température et du déficit hydrique à Ambert, avec un scénario intermédiaire, en 2050. Source : ClimEssences.

Concernant les débits du bassin versant de la Dore, les étiages “sévères” devraient être plus fréquents et la période de basses eaux allongée quel que soit le scénario climatique envisagé. Ces prévisions soulignent l’importance de s’intéresser à la ressource en eau afin de continuer à assurer un accès à la ressource aux différents usagers du bassin versant de la Dore (PNR Livradois-Forez, 2024b)

En termes de peuplements forestiers, un réchauffement global de 4 à 5°C à l’échéance de ce siècle pourrait entraîner une remontée des étages de végétation de l’ordre de 700 mètres d’altitude (Sardat et al., 2011). De nombreuses essences pourraient donc se retrouver hors-station, entraînant des dépérissements forestiers.

D - Contexte géologique et pédologique

Le Forez est un massif montagneux cristallin, avec une majorité de granite et de gneiss. Suite à la pédogenèse, il y a eu formation de sols brunifiés, qui sont pour la plupart des brunisols. Étant donné l’altitude du massif et sa roche mère acide, les humus majoritaires (88% de la SER G22) sont des mor ou dysmoder, moder et dysmull. Ce qui a pour conséquence un sol chimiquement assez pauvre dû à sa pauvreté en bases. La texture des sols, pour cette SER, semble être majoritairement limoneuse (66%) et limono-sableuse (15%). Ces sols ne semblent pas être concernés par l’hydromorphie (IGN, 2012) sauf les zones humides repérées par les cartes prédictives étudiées. Il est à noter que les sondages pédologiques réalisés, ont mis en évidence des sols avec une dominance sablo-limoneuse (56 %) puis sableuse (20%) (figure 6).

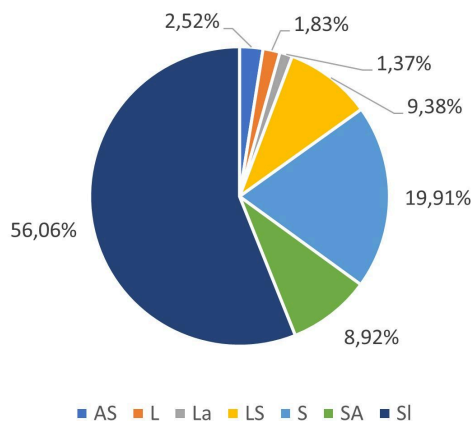


Figure 6 : Répartition des textures du sol selon les sondages tarières réalisés.

Description du sondage tarière en annexe 1, 2, 3, 4 et 5. Les proportions sont calculées par rapport aux sommes des épaisseurs de couches de sol et non pas en fonction de la présence ou l'absence de la texture dans le sol. *A* : argile ; *L* : limon ; *S* : sable. *SL* signifie qu'il s'agit d'une texture sablo-limoneuse. *SL* signifie qu'il s'agit d'une texture sablo-limoneuse, à dominance de sable. *LS* signifie qu'il s'agit d'une texture limono-sableuse.

La texture sablo-limoneuse présente différents atouts et contraintes pour un peuplement forestier autant d'un point de vue gestion sylvicole que de gestion de l'eau.

Caractéristiques physiques :

Le matériau parental sur lequel repose le peuplement est composé en majorité de granite avec la présence d'alluvions aux abords des cours d'eau. L'altération du matériau parental conduit à la formation de sable dans les horizons les plus profonds du sol. Ces horizons à structure sableuse permettent un enracinement plus facile pour les arbres et sont faciles à travailler dans le cadre de travaux sylvicoles.

Au niveau des 10-20 premiers centimètres, il a été observé une texture sablo-limoneuse à dominante sableuse. Ce type de sol est réputé être peu sensible au tassement. Néanmoins, il conviendra tout de même de travailler de sorte à limiter ce tassement. Ce sol a également l'atout d'être un sol profond à très faible teneur en éléments grossiers. Il ne présente donc pas de contraintes à l'enracinement, mais renforce l'importance de prendre en compte les risques de tassement.

Caractéristiques chimiques :

Avec un matériau parental granitique et une texture majoritairement sableuse, ce sol présente a priori une assez pauvre richesse chimique. Cependant, les humus relevés sur le terrain appartiennent tous à la famille des mull et des moder. Les mull témoignent d'une minéralisation moyenne de la matière organique et par conséquent d'une bonne disponibilité en éléments minéraux dans les premiers centimètres. En revanche, les moder ne reflètent pas une bonne incorporation de la matière organique et témoignent donc d'une accessibilité plus faible en minéraux. Il est à noter que pour les deux types d'humus, cette disponibilité diminue avec la profondeur.

Caractéristiques hydriques :

Cette texture sableuse confère au sol une grande perméabilité à l'eau et à l'air. Il s'agit donc d'un sol qui est naturellement drainé grâce à sa texture poreuse, l'engorgement n'est donc pas une contrainte majeure. Il n'y a donc pas de période d'anoxie printanière à craindre. Avec le changement climatique, si le régime des pluies diminue et varie au profit de sécheresses plus conséquentes accentuées par le caractère drainant du sol, la conservation de peuplements monospécifiques tels que les hêtraies peut poser question (AFORCE, 2023).

A partir des textures et des épaisseurs des horizons, la Réserve Utile Maximale (RUM) peut être estimée. La RUM, exprimée en mm d'eau, est la quantité maximale d'eau que le sol peut absorber. L'eau est maintenue dans le sol grâce à des interactions avec les différents éléments de celui-ci (argile, limon, sable et matière organique). Cette eau est alors accessible aux végétaux. Cette RUM est à mettre au regard des précipitations. En effet, une RUM faible avec des précipitations tout au long de l'année et importantes n'est pas forcément problématique, mais

un désert avec une RUM de 200 mm n'est pas un sol intéressant pour de la sylviculture car malgré l'importante RUM, l'absence d'eau ne permet pas de la remplir.

Lors des relevés de terrains, un sondage pédologique a été réalisé à la tarière. La texture et l'épaisseur des différents horizons ont été relevés (annexe 1, 2, 3, 4, 5 et 6). La RUM moyenne des sols, estimée à partir de tous les sondages tarières qui ont été réalisés (34 sondages), est d'environ 69 mm sur 62 cm de profondeur. L'estimation de la RUM est cependant à nuancer car il est probable que celle-ci ait été sous-estimée. Il s'agirait cependant d'une RUM qui se situerait dans la moyenne des sols forestiers (Université de Lorraine, AgroParisTech, INRA et laboratoire SILVA, 2014).

En somme, la zone d'étude est sur socle granitique, ce qui donne un sol sablo-limoneux. Les précipitations sont correctes vis-à-vis de la RUM, mais le bilan hydrique estival est à la frontière du déficit, même si le déficit tend à augmenter avec le changement climatique. De plus, ce territoire possède de nombreuses plantations de résineux datant de l'après-guerre qui arrivent à maturité. Les parcelles restent cependant très fragmentées, avec de nombreux propriétaires.

II - Quantité d'eau disponible pour les captages

Une des problématiques de l'étude concerne le manque d'eau potable. Pour tenter d'identifier les éléments en cause, les zones à proximité des captages ont dans un premier temps fait l'objet d'analyses et de mesures. En effet, ces zones permettent la collecte de l'eau utilisable pour le réseau d'eau potable. La quantité d'eau arrivant sur ces zones et son devenir est donc important dans le cadre du problème étudié.

Le rôle des forêts dans le cycle de l'eau est complexe et multifactoriel. Elles exercent une influence sur les quantités d'eau arrivant au sol et disponibles pour les captages gravitaires. En dehors des grandes étendues d'eau et des zones humides, la forêt constitue le type d'occupation du sol qui restitue le plus d'eau à l'atmosphère, principalement par évapotranspiration [Annexe 7]. Or, à une échelle plus large, les forêts peuvent également augmenter la disponibilité en eau, notamment par amélioration de l'infiltration, contribution à l'humidité atmosphérique par évapotranspiration, et interception du brouillard (Carvalho-Santos et al., 2014). Étudier le rôle des forêts est donc primordial. Cependant, tous les peuplements forestiers n'ont pas le même impact sur le cycle de l'eau. Leurs caractéristiques, comme la densité du couvert, la consommation en eau ou la vitesse de croissance, varient selon les espèces et influencent le bilan hydrique. Disposer d'informations précises sur les peuplements présents autour des captages est essentiel pour évaluer les impacts sur la ressource en eau potable (Carvalho-Santos et al., 2014).

A - Contexte et État de l'art

1 - L'approvisionnement en eau potable de la communauté de communes Ambert Livradois Forez : caractérisation des zones de captage



Figure 7 : Position des captages dans les bassins versants et dans les différentes communes.

Le Syndicat Beurrières - Chaumont le Bourg - Marsac en Livradois - Saint Just - Baffie - Arlanc (SIAEP) compte un total de 29 captages, répartis sur 4 communes (figure 7). Les ouvrages sont essentiellement répertoriés sur la commune de Saint-Just entre 1000 et 1150 mètres d'altitude. Avec un débit moyen de 24,81 m³/h en 2017, ils permettent l'approvisionnement de plus de 1 600 habitants répartis sur 65 km². Parmi les 29 captages, 28 sont des captages gravitaires. Ces captages sont peu profonds (maximum 5 m), comprenant une tranchée drainante et un regard en béton. Les drains et collecteurs sont constitués de galeries en pierre, de fibro-ciment, de fonte ou de PVC. Le dernier captage est un forage exploité davantage en situation d'étiage sévère lorsque les captages gravitaires, en service toute l'année, ne couvrent pas les besoins en eau potable.

L'état des captages du SIAEP est très variable. Il est dans l'ensemble satisfaisant mais certains captages sont en très mauvais état alors que d'autres sont en bon état que ce soit d'un point de vue du génie civil, d'un point de vue du risque de pollution ou bien encore de la sécurité de l'ouvrage. De plus, l'intégralité des captages est protégé par l'arrêté préfectoral de la déclaration d'utilité publique du 11 mars 2003. Cependant aucun des périmètres de protection immédiat (PPI) de ces captages n'est actuellement clôturés, à l'exception du PPI du forage. Il est toutefois possible de souligner la volonté du syndicat quant à la mise aux normes de ces captages (acquisition et déboisement des PPI notamment) toujours en cours en avril 2025 (SIAEP Beurrieres Chaumont, 2021).

2 - Rôle de la forêt dans le cycle de l'eau

Les peuplements forestiers jouent un rôle dans le cycle de l'eau. Néanmoins, ce rôle est complexe et difficile à estimer quelle que soit l'échelle considérée. L'intérêt de s'intéresser aux dynamiques de l'eau au sein des

peuplements forestiers provient du fait que le couvert forestier représente plus de 56% de notre zone d'étude et que la totalité des PPR des captages sont en milieu forestier.

A l'échelle d'un bassin versant, les forêts ne modifient pas la quantité d'eau précipitée (Cosandey, 2006). Elles jouent néanmoins un rôle important dans le cycle de l'eau du fait de l'évapotranspiration (ET). L'évapotranspiration est un flux d'eau dirigé vers l'atmosphère provenant de deux réactions différentes : d'une part du phénomène physique d'évaporation, de l'autre de la transpiration des végétaux (Fermond et al., 2013). L'interception de l'eau par le couvert forestier contribue aussi à l'évapotranspiration. Ainsi, la pluie efficace (Peff) peut être définie comme la différence entre les précipitations (P) et l'ET (figure 8). Cette eau sert soit à un écoulement vertical : recharge des nappes phréatiques (Re), ou à un écoulement horizontal : ruissellement (Ru). Dans le cas de notre étude, la quantité d'eau servant réellement à alimenter les captages est une partie de l'eau provenant de la pluie effective. Parmi cette eau arrivant au sol, seul l'eau s'infiltrant à moins de 5 mètres de profondeur est intéressante pour notre sujet.

La réserve utile (R dans le schéma) permet de stocker l'eau, et prend pleinement part dans le bilan hydrique. En somme, le bilan hydrique s'écrit sous la forme :

$$\Delta R = P - (Ru + Re) - ET$$

Avec ΔR la variation d'eau retenue dans le sol.

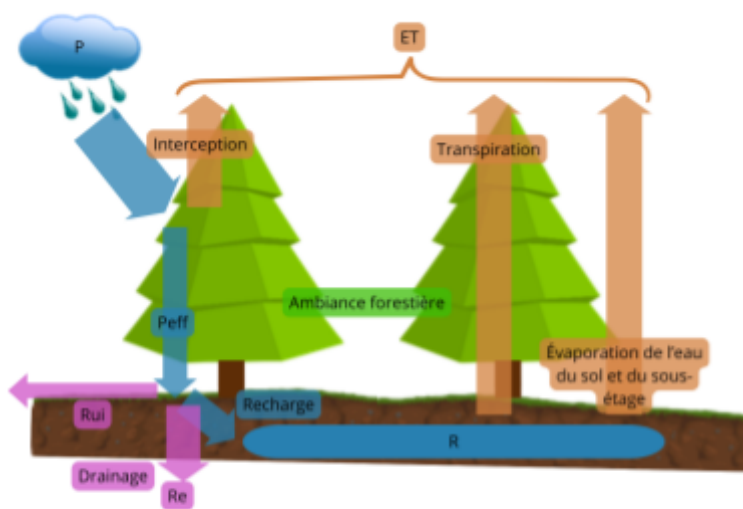


Figure 8 : Bilan des flux d'eau arrivant sur le bassin versant

- Evapotranspiration et interception de l'eau des couverts forestiers

L'évapotranspiration est plus élevée en milieu forestier que pour d'autres types de milieu (Serrano-Muela et al., 2008). En effet, plus le couvert forestier est dense, moins la quantité de pluie effective est importante. Pour cause, une plus grande quantité de précipitation est interceptée par le feuillage et n'atteint jamais le sol et est alors directement restituée à l'atmosphère par évaporation. En ne se limitant pas uniquement au feuillage, l'interception des précipitations correspond à l'évaporation de l'eau, liquide ou solide, par les houppiers des arbres, aussi bien par les feuilles que par les organes ligneux. Celle-ci est plus conséquente dans un peuplement dense que dans un peuplement clair (Granier, 2012).

Dans le cadre de notre étude, la plus forte interception d'un couvert forestier, en comparaison avec un milieu ouvert, a pour conséquence une diminution de la quantité d'eau disponible pour les captages (Granier, 2012).

- Influence de la nature du couvert forestier

La nature du couvert forestier ainsi que les conditions climatiques locales (vitesse du vent, intensité et variation des précipitations) modulent la quantité d'eau interceptée et *in fine* la quantité d'eau disponible (Fermond et al., 2013 ; Andréassian, 2004). Un paramètre utilisé pour quantifier cela est l'indice foliaire, le Leaf Area Index (LAI). De manière générale, de par leur couvert foliaire moindre et absent l'hiver, les feuillus ont un LAI plus faible que les résineux et évapotranspirent donc moins d'eau (Breda (Nathalie), 1999; Waring and Schlesinger, 1985) Cela se traduit par une interception de 15 à 25% moins importante chez un peuplement feuillu en comparaison avec un peuplement résineux (Aussenac, 1968). Ainsi, du point de vue de l'alimentation en eau pour les captages, un peuplement résineux, en interceptant plus, diminue la quantité d'eau disponible par rapport à un peuplement de feuillus .

- Ruissellement et infiltration de l'eau dans les couverts forestiers

Bien que la forêt intercepte et évapotranspire une partie de l'eau précipitée, elle permet de maintenir l'eau en milieu forestier. En effet, la présence de végétation arborée et de litière limite le ruissellement. Cela permet de réduire l'érosion des sols et d'atténuer l'intensité des crues. Dans le cas de peuplements caducifoliés en situation de fort ruissellement comme dans notre zone d'étude, la diminution du ruissellement pourrait, à elle seule, compenser les pertes (interception et évapotranspiration) d'eau (Fermond et al., 2013). En général, les pertes par ruissellement restent faibles en milieu forestier, ce qui contribue globalement à une meilleure régulation du cycle de l'eau (Carvalho-Santos et al., 2014). En favorisant l'infiltration de l'eau dans le sol, les forêts participent également à la recharge des nappes phréatiques.

Par ailleurs, les bénéfices d'un peuplement forestier ne se limitent pas à la diminution du ruissellement. En effet, les caractéristiques physiques, biologiques et chimiques des sols forestiers facilitent aussi la filtration de l'eau, l'élimination des contaminants et le recyclage des nutriments (Neary et al., 2009).

Ainsi, d'une part, les peuplements forestiers consomment de l'eau et interceptent une partie des précipitations mais de l'autre, ils limitent le ruissellement, favorisent l'infiltration de l'eau et la recharge des nappes phréatiques. En comparaison avec une forêt, l'évapotranspiration est moindre en prairie pâturée, à surface équivalente [Annexe 7] et la quantité d'eau servant à l'alimentation des captages est plus importante. Cependant, la qualité de l'eau peut être dégradée par des pollutions d'origine organique (lisier de bétails, bactéries, etc). Dans le cas d'une installation d'une prairie de fauche, sans utilisation d'amendements, la qualité de l'eau serait préservée. Néanmoins, l'absence de différentes strates de hauteurs de végétation ne permet pas une conservation de l'eau dans le milieu aussi optimal qu'en milieu forestier. En définitive, c'est aussi parce que les autres usages ont aussi leurs inconvénients que la forêt est peut-être une bonne solution au niveau des PPR des captages gravitaires pour prévenir de futures pénuries d'eau. L'intérêt est donc de travailler la forêt pour qu'elle soit moins consommatrice et interceptrice d'eau, surtout au printemps et en été.

- Impact et gestion d'un peuplement très dense sur la ressource en eau

Le capital d'un peuplement est ici représenté par sa surface terrière totale (G en m²/ha). Il renseigne le gestionnaire sur la quantité de bois sur pied, mais aussi sur le degré de fermeture du peuplement et sur l'intensité de la compétition à laquelle se livrent les tiges (ONF, 2002). Lorsque les peuplements dépassent les seuils décrits dans le tableau 1, les peuplements sont dits par commodité de langage sur-capitalisés.

Tableau 1 : Seuils de sur-capitalisation en surface terrière en fonction de l'essence et de la catégorie de grosseur des bois dans le cadre d'une gestion en futaie régulière

PB : Petit Bois (17,5 cm ≤ Ø < 27,5 cm) ; BM : Bois Moyen (27,5 cm ≤ Ø < 47,5 cm) ; GB : Gros Bois (47,5 cm ≤ Ø)

	Sapin (<i>Abies alba</i>)	Epicéa (<i>Picea abies</i>)	Douglas (<i>Pseudotsuga menziesii</i>)	Pin sylvestre (<i>Pinus sylvestris</i>)	Hêtre (<i>Fagus sylvatica</i>)
PB	25 m ² /ha	20- 25 m ² /ha			
BM	30-35 m ² /ha	25 - 30 m ² /ha	30 - 35 m ² /ha	30 m ² /ha	20 m ² /ha
GB	35 - 40 m ² /ha	30-35 m ² /ha			25 m ² /ha

En ce qui concerne les peuplements mélangés, les seuils utilisés sont ceux de l'essence représentant plus de 50 % du peuplement.

Pour étudier le lien entre présence d'un peuplement forestier et quantité/qualité d'eau disponible, la capitalisation du peuplement semble être une variable à étudier. Néanmoins, aucune étude scientifique n'a démontré à ce jour l'existence d'un lien entre le LAI et la densité du peuplement. Il a cependant été observé des

tendances sur des cas extrêmes comme pour des peuplements à canopée très fermée où l'interception va être plus élevée. Le raccourci ne doit pas être fait au sujet des mélanges, en effet le LAI de ces types de peuplements n'est pas nécessairement moins élevé que celui de peuplements monospécifiques.

Un peuplement sur-capitalisé est un peuplement très dense, où le LAI et l'interception sont certainement plus élevés et où la lumière ne parvient pas jusqu'au sol en quantité suffisante.

La compétition interspécifique et intraspécifique est très élevée et les arbres ont tendance à favoriser une croissance en hauteur au détriment d'une croissance en diamètre. Cette réponse biologique a pour conséquence de fragiliser le peuplement en le rendant plus sensible aux aléas climatiques. La monospécificité d'un peuplement est un facteur aggravant quant au risque d'attaque de pathogènes. Dans le cas d'un peuplement trop fortement décapitalisé, le risque de développement d'espèces très compétitives héliophiles (ronce, fougère aigle, noisetier, etc) est élevé. Du point de vue de la production, cela peut compromettre la bonne régénération des essences ligneuses pour les révolutions futures.

Pour préserver la ressource en eau, limiter le ruissellement et favoriser l'infiltration peuvent être des leviers d'actions efficaces. Pour limiter le ruissellement, il est préconisé d'assurer une pérennité du couvert forestier et donc de limiter les coupes rases (Fermond et al., 2013). Pour favoriser l'infiltration des eaux dans le sol, il est conseillé d'appliquer au peuplement une gestion orientée vers la diminution du LAI. Il peut cependant être intéressant de chercher à diminuer ce LAI par des moyens plus grossiers. En effet, un couvert herbacé et du sous-étage a tendance à augmenter le LAI (Aussenac, 2002) il pourrait être intéressant de gérer ces strates pour limiter leur développement. Cependant elles contribuent à limiter le ruissellement, ce qui est bénéfique pour la ressource en eau. Les peuplements feuillus seraient à favoriser du fait de leur LAI plus faible. Effectuer des éclaircies pourrait être une piste, notamment pour les résineux afin de diminuer l'importance du couvert. Les décisions prises en gestion forestière doivent donc prendre en compte une bonne gestion de la ressource en eau et l'optimisation de la gestion sylvicole.

De plus, d'après la réglementation des boisements du département du Puy de Dôme, l'intégralité des PRR n'est pas soumise à restriction quant au maintien d'un état boisé. Néanmoins, la gestion forestière, par sa planification sur le long terme, porte une attention particulière à la préservation du couvert et contribue à protéger la ressource en eau (Fermond et al., 2013).

B – Méthode de travail : Caractérisation des peuplements au sein des périmètres de protection des captages

Dans la perspective d'étudier le lien entre l'eau et la forêt au niveau des captages, une description relativement précise des peuplements composant le périmètre de protection rapproché (PPR) a été réalisée (annexe 5). L'objectif étant de caractériser ces peuplements des mesures de surface terrière par essence, de dépérissements, régénération et bois mort ont été effectuées. En effet, la consommation d'eau dépend des caractéristiques du peuplement forestier : composition en essences, structure, capital, régénération.

Plus étendu en amont qu'en aval du captage, l'objectif du PPR est de prévenir la migration des polluants vers l'ouvrage. De ce fait, il n'est pas autorisé, dans le PPR, l'établissement de toutes constructions nouvelles, l'ouverture de zones de carrière, le rejet d'eau potable ou d'hydrocarbures, etc. définies dans le cadre de l'arrêté préfectoral. Cependant ce dernier ne mentionne aucune mesure de gestion forestière particulière. Une évolution de ce dernier pourrait être envisagée afin de réduire les risques de pollutions et d'actions sylvicoles qui pourraient porter atteintes à l'intégrité des captages.

L'étude s'intéressera uniquement aux captages gravitaires. En effet, le forage présent sur le secteur du SIAEP puise son eau à plus de 67 mètres de profondeur dans une nappe phréatique. Les racines des arbres au niveau des PPI et PPR n'atteignant pas une telle profondeur, il a donc paru cohérent d'exclure le forage de nos recherches.

De plus, les caractéristiques relevant du génie civil ainsi que de l'état général des captages ont d'ores et déjà fait l'objet d'une étude technique (SIAEP Beurrieres Chaumont, 2021). Cette étude a permis de mettre en lumière différentes problématiques propres au réseau (fuites, vétusté des infrastructures, etc). Ainsi, bien que les problématiques de manque d'eau peuvent être liées à la présence de peuplements denses et fermés au voisinage des captages, il ne faut pas exclure l'importance des pertes liées à la dégradation de l'état intrinsèque du réseau. Améliorer le fonctionnement de l'ensemble du réseau semble être un des meilleurs leviers d'actions pour prévenir les pénuries d'eau potable. Cette étude se consacre donc plus à l'étude des peuplements aux alentours des captages et à l'influence qu'ils ont sur la quantité d'eau récupérée par les captages plutôt qu'aux captages eux-mêmes.

Lors de l'étude, des unités de peuplement présentes ont été définies à partir d'un pré repérage cartographique, afin de caractériser leurs influences éventuelles sur la ressource en eau, au sein du Périmètre de Protection Rapproché (PPR) de chacun des 28 captages gravitaires du SIAEP. Les unités de peuplement sont définies comme des espaces dont la composition du peuplement en essence et/ou en structure est homogène et diffère distinctement de l'unité voisine (par exemple : Pessière avec une majorité de bois moyen / Hêtraie avec une majorité de gros bois). L'objectif de ces unités est de pouvoir proposer des conseils sylvicoles applicables à l'échelle du bassin versant en fonction du type de peuplement. Pour chaque PPR, dont la surface moyenne est 4,6 ha, entre 1 et 4 unités différentes de peuplement ont été relevées. Une des limites de cette distinction a été de pouvoir discriminer les types de peuplements entre eux. En effet, il est arrivé que sur le terrain des unités qui semblaient proches ont pu être regroupées alors qu'elles avaient été séparées lors de la phase préparatoire. De même, si la réalité des peuplements sur le terrain ne correspondait pas à la réalité cartographique (peuplements passés en coupe rase, éclaircies, etc), une unité de peuplement pouvait être divisée en deux sur le terrain. Il est à noter qu'une seule placette a été réalisée par unité de peuplement étant donné la taille restreinte de ceux-ci et l'échantillonnage choisi. Ainsi, les résultats sont à nuancer dans la mesure où une seule placette par unité a été effectuée.

C – Résultats

1 - Des peuplements consommateurs d'eau

→ Etat des lieux des peuplements sur la zone des PPR des captages

Dans la majorité des cas, les PPR sont constitués de types de peuplements différents. Cela est une conséquence d'un parcellaire très morcelé et de l'absence de concertation entre ces petits propriétaires. Les PPR des captages 25 et 26 illustrent parfaitement cette diversité de peuplements (figure 9). En effet, le PPR est composé de quatre unités de peuplements, avec une hétérogénéité en capital et en structure, même au sein des peuplements de résineux.

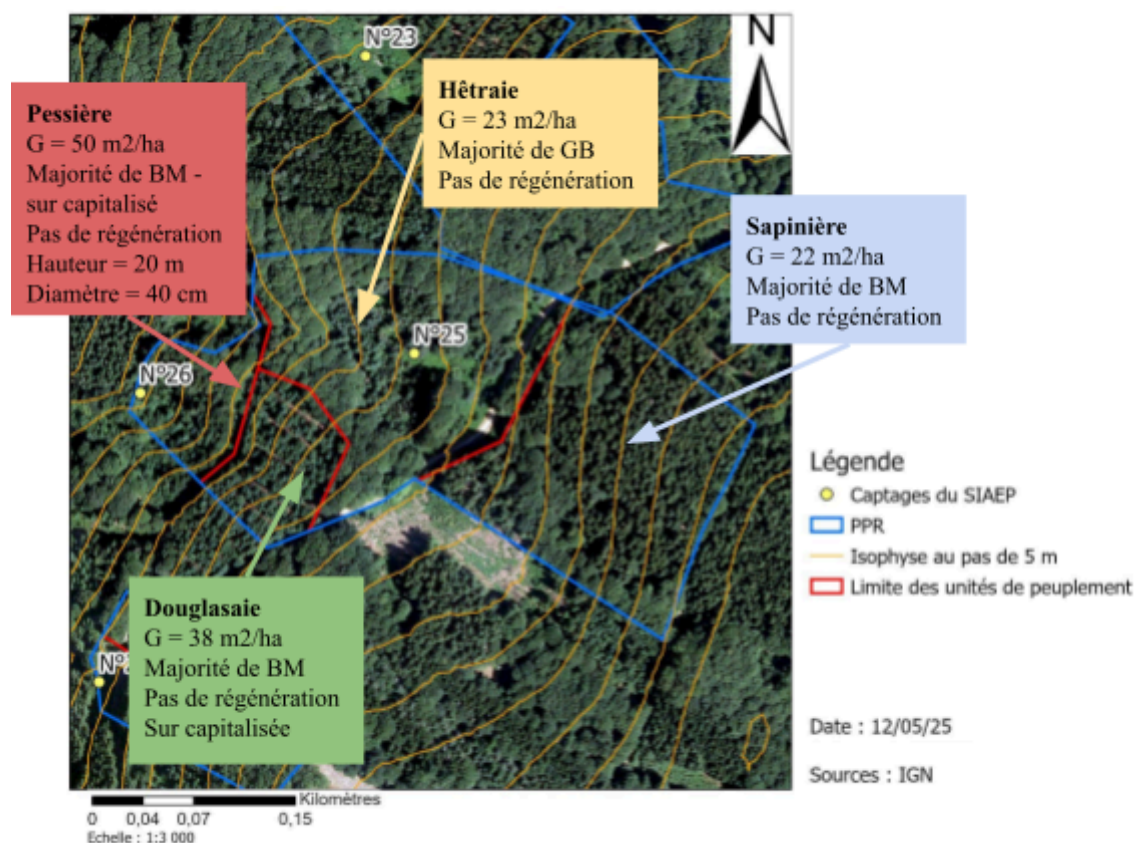


Figure 9 : Carte récapitulative des différentes unités de peuplements du PPR des captages 25 et 26

- Composition et structure des peuplements

L'essence majoritaire (80% de la surface terrière) de l'unité de peuplement donne son nom à l'unité (une unité composée à 96% de sapin est alors une sapinière). Dans le cas contraire, le peuplement est considéré comme mélangé.

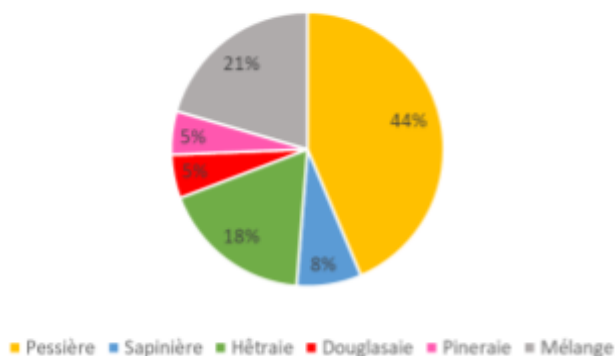


Figure 10 : Répartition en surface terrière des types de peuplement présents au niveau des PPR des captages

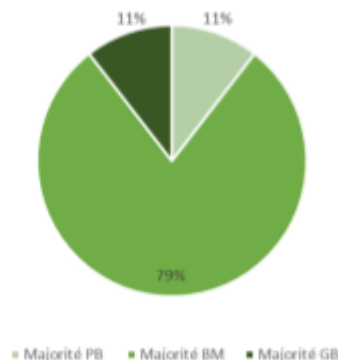


Figure 11 : Répartition en surface terrière des types de peuplement présents au niveau des PPR des captages

A l'échelle des 39 unités de peuplement, les peuplements purs représentent plus de 80% des peuplements présents dans les PPR (figure 10). Dans ces peuplements monospécifiques, l'essence dominante est l'épicéa commun. En général, les peuplements résineux sont largement majoritaires sur l'ensemble des PPR.

Les peuplements sont constitués d'une majorité de bois moyen (figure 11). Le diamètre d'exploitabilité de l'épicéa est annoncé supérieur à 45 cm selon la qualité des arbres et la fertilité de la station (Monnet, 2025). Cependant, bien que ces bois n'aient pas encore atteint leur diamètre d'exploitabilité optimal, leur exploitation est déjà rentable et peut être déjà réalisée. En effet, les recettes de vente couvriraient largement les coûts d'exploitations, même dans la cas d'une petite surface. Or, une exploitation par une coupe totale réalisée dans de mauvaises conditions peut occasionner un passage important d'engins sur la parcelle conduisant au tassement du sol. Cela à pour conséquence non seulement une perte de fertilité de la parcelle, mais aussi une augmentation du ruissellement. Ce ruissellement de surface diminue la quantité d'eau disponible pour le captage et présente un risque de pollution important pour le captage par rapport de sédiments.

A partir des données dendrométriques relevées sur le terrain, la surface terrière des peuplements a été caractérisée puis comparée aux seuils communément admis dans le cadre de futaie régulière.

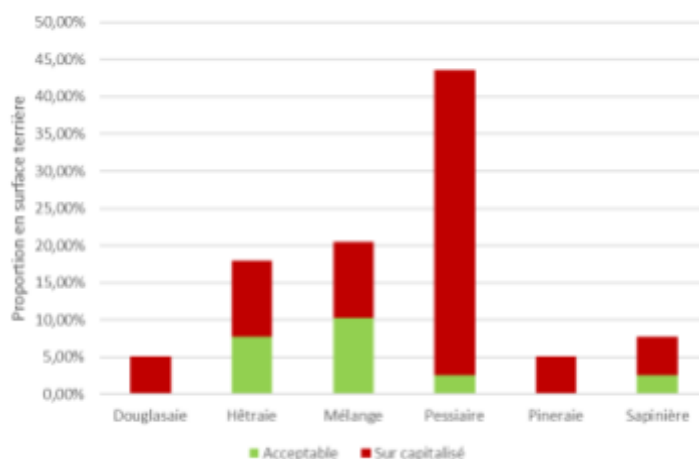


Figure 12 : Répartition des différents types de peuplement au niveau des PPR des captages

La sur-capitalisation concerne 77% des peuplements autour des captages. Pour le type de peuplement majoritaire, les pessières, la sur-capitalisation a conduit à un élanement de 55. Or le seuil de fragilité pour un peuplement d'épicéas est de 80 [CNPF]. Dans le cas où le seuil serait dépassé, il y a alors dans ces pessières un effet bloc qui peut vite amener à une déstabilisation du peuplement en cas d'événement impactant le peuplement (tempête, coupe). Avec cette sensibilité au vent, le risque de perte financière est accru.

Parmi les peuplements des PPR, 30 sur 39 sont des peuplements sur-capitalisés (figure 12). Cette sur-capitalisation concerne tous les types de peuplement particulièrement les peuplements résineux. Pour exemple, la surface terrière moyenne des pessières sur-capitalisés est de 39 m²/ha (écart-relatif avec 5 % de risque d'erreur : 12 %).

- Régénération au sol des peuplements

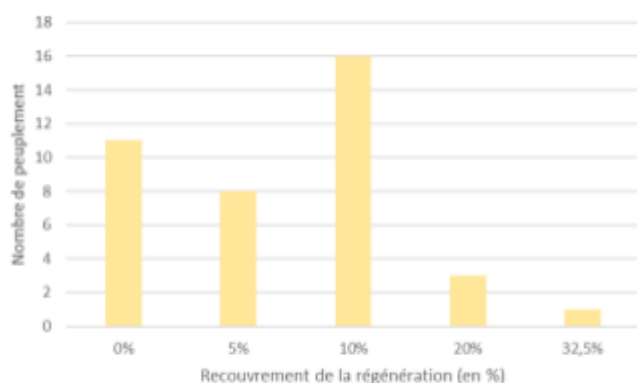


Figure 13 : Nombre de peuplement en fonction de la proportion de recouvrement de la régénération (10 cm - 2 m)

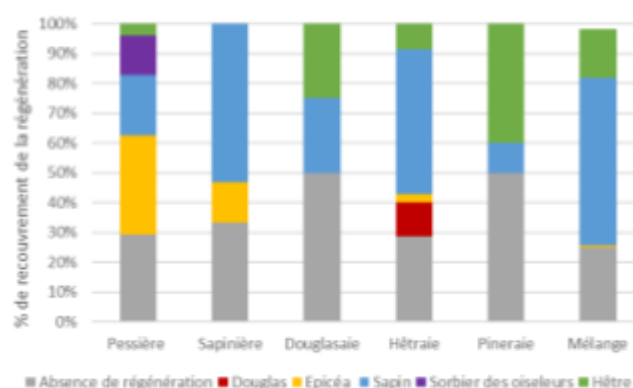


Figure 14 : Proportion des différentes essences présentes en régénération (10 cm - 2 m) en fonction du type de peuplement

La surface recouverte par la régénération de taille entre 10 cm et 2 m est en moyenne de 7,5% (figure 13). De plus, la diversité des essences présentes est modeste, avec au minimum 2 essences différentes et 4 au maximum (figure 14). Les pessières et les hêtraies semblent être les plus diversifiées. L'absence d'essence dans la régénération actuelle n'est pas forcément synonyme d'absence totale de possibilité d'implantation, l'arrivée d'une essence pouvant prendre un certain temps.

Ce recouvrement étant assez faible (moins de 10% de la surface), le couvert ne permet pas une protection satisfaisante au regard de l'érosion. De plus, en cas de déclin du peuplement ou de fin de cycle de production, la régénération semble trop peu importante pour assurer son renouvellement. Il sera donc nécessaire d'intervenir pour compenser la perte du couvert : soit par enrichissement d'essences exotiques ou par plantation d'essences déjà présentes sur le territoire. Ces travaux peuvent être des investissements coûteux pour les propriétaires, mais ils sont nécessaires pour relancer une dynamique forestière. De plus, le manque de diversité peut poser question vis-à-vis du risque au vu du changement climatique. En effet, le sapin et l'épicéa sont des essences sensibles du point de vue de l'évolution des températures et de la pluviométrie. Or, ces deux essences sont présentes, souvent en majorité, en régénération quel que soit le type de peuplement, représentant même l'intégralité de la régénération dans certaines sapinières.

→ Conseils

Les peuplements qui ont été observés sont majoritairement monospécifiques. Il pourrait être intéressant d'enrichir le peuplement en feuillus pour diversifier ces peuplements. Il existe entre autres deux avantages à cette diversification. Le premier est de diminuer la vulnérabilité tout en augmentant la résilience du peuplement vis-à-vis du changement climatique. Pour faire face aux incertitudes concernant l'évolution du climat et le comportement des essences vis-à-vis de ce changement, diversifier permettrait en partie d'y répondre. Cette diversification nécessiterait la création d'une filière feuillue sur le territoire. Le mélange permet aussi de prévenir les attaques de pathogènes et de ravageurs. Le deuxième avantage est d'avoir un peuplement plus économe en eau, dans le sens où l'interception est réduite et que la consommation en eau l'est potentiellement aussi.

L'enrichissement peut se faire quelque soit la gestion dans le cas où la régénération n'est pas naturellement assez diverse. Il peut se faire par placeaux dans des trouées lorsqu'il s'agit d'un peuplement géré en irrégulier, soit à l'étape de régénération/plantation en futaie régulière. En effet, même si la régénération est acquise en futaie régulière, elle n'est pas forcément diversifiée. L'enrichissement est un investissement, il nécessite un suivi de la part du propriétaire et d'un gestionnaire.

Cependant dans notre cas, la régénération reste faible malgré la possibilité de récolte du peuplement. Il est alors important d'ouvrir d'ores et déjà les peuplements qui peuvent l'être. Non seulement cela permettrait d'avoir de la régénération au sol, et donc d'avoir un couvert dans le cas où le peuplement viendrait à dépérir, mais cela permet aussi d'augmenter la rugosité du sol et donc de limiter le ruissellement. Et enfin, cela permettrait de limiter l'interception et la consommation d'eau par le peuplement, sous couvert qu'un lien entre la densité et la surface foliaire des arbres n'a pas encore été démontrée.

En fonction des volontés du propriétaire, il peut être envisageable de convertir le peuplement en futaie régulière vers une futaie irrégulière par bouquets. Cette gestion sylvicole visant à l'ouverture de trouées importantes, diminuerait l'interception des précipitations.

Dans l'hypothèse où le peuplement ne peut pas être suffisamment décapitalisé par des éclaircies successives, et nécessite une coupe totale, il est important que lors de l'exploitation, un maximum de régénération soit conservé. Les cloisonnements doivent également être respectés et dans la mesure du possible ne pas recourir aux andains. Si les andains sont nécessaires, il est conseillé d'établir une rangée perpendiculaire à la pente à l'aval de la parcelle pour ralentir les ruissellements en direction du captage.

La micro propriété peut complexifier la gestion des peuplements en amont des captages, et ne permet actuellement pas d'avoir une action concertée et homogène. Afin de pouvoir réaliser des actions coordonnées, il semble important de regrouper les différents propriétaires au sein d'une association syndicale libre (ASL). En effet, le nombre de propriétaires au sein des PPR est assez faible, ainsi les efforts à fournir pour les regrouper seraient assez limités. L'importance de leur gestion forestière sur l'AEP peut être un moyen de les mobiliser efficacement, d'autant plus que cela ne concerne pas souvent l'entièreté de la propriété de chaque propriétaire.

2 - Des actions anthropiques influençant le bon fonctionnement des captages

→ Infrastructures de circulation

Les infrastructures routières en amont des captages ont fait l'objet d'une attention particulière car elles peuvent constituer une menace pour ces derniers (pertes d'hydrocarbures...). La majorité des routes et pistes forestières suivent les courbes de niveau. Elles ne présentent donc pas de danger car le ruissellement ne s'effectue pas selon la pente, ce qui limite les risques de pollution et de déversement de sédiments dans le captage. Cependant certaines pistes et routes sont orientées selon la pente en direction des captages. Ces infrastructures représentent un danger vis-à-vis du captage, du fait d'un apport possible de sédiments. La même attention doit être portée sur le réseau de cloisonnement quand celui-ci existe, et ce quel que soit le type de forêt et de propriétaire...

→ Conseils

Pour limiter les risques évoqués précédemment, un collecteur perpendiculaire au PPI à une distance de 10 m de celui-ci et le long des courbes de niveau pourra être implanté avant ce dernier. Le respect de la circulation des véhicules sur la voirie forestière constitue également un moyen de prévention. Autrement dit, les engins forestiers ne doivent pas sortir des cloisonnements afin de limiter le tassement des sols dans la parcelle. Pour la desserte déjà existante, il est conseillé de ne pas réaliser de saignées ou de pose de revers d'eau en direction du captage.

III - Circulation de l'eau dans le Bassin Versant depuis le captage

L'étude des cours d'eau et des zones humides a été effectuée afin d'évaluer si ceux-ci permettent d'assurer une rétention optimale de l'eau au sein du bassin versant et ainsi approvisionner la vallée en eau et limiter les crues et inondations. En effet, le bon état des zones humides et des cours d'eau permet de limiter les excès en eau, soit de diminuer les risques d'inondations comme les épisodes connus lors de l'année 2023. De plus, si l'usage d'eau non potable peut être assuré en aval, pour l'agriculture par exemple, la pression sur la ressource en eau potable sera moindre.

A - Stockage d'eau dans les zones humides

❖ *Etat de l'art*

Les zones humides permettent de remplir des fonctions essentielles à la société (OFB, 2025) parmi lesquelles :

- fonction hydrologique : stockage de l'eau et l'infiltration de l'eau vers les nappes souterraines ;
- fonction épuratoire : filtration de l'eau grâce aux dégradations et transformations biochimiques des éléments organiques et minéraux
- fonction écologique : écosystème pour une diversité d'organismes.

Dans le contexte de cette étude, il semble bon de rappeler que ces zones humides participent également à l'atténuation des effets du changement climatique en stockant du carbone et en maintenant une température fraîche en période estivale.

De ce fait, un échantillon de zones humides intra forestières a été étudié afin de les localiser sur le territoire d'étude et d'identifier leur fonctionnalité hydrologique ou non.

❖ *Méthode*

L'identification des zones humides a été permise à l'aide du critère pédologique ou/et botanique. Il a été prédéfinie au préalable que le critère pédologique était à réaliser en premier car s'il était concluant, le critère botanique n'était pas à effectuer (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie and Groupement d'Intérêt Scientifique Sol, 2013). La localisation des zones humides s'est portée surtout au niveau des cours d'eau choisis pour cette étude (se référer à la partie cours d'eau) et des captages. Ensuite, une fois la zone humide localisée, sa fonctionnalité a été examinée. En effet, l'étude s'est basée sur ce critère de non fonctionnalité :

Tableau 2 : Identification des facteurs de non fonctionnalités d'une ZH

	Critères communs à toutes situations		
Éléments indicateurs de mauvaise fonctionnalité	présence de drain +/- bouchés (DRA)	modification visible du tracé du cours d'eau (TRA)	ouvrage modifiant l'arrivée d'eau ; vanne... (OUV)

A la vue de l'un de ses éléments sur le terrain, la zone humide est directement notée comme "non fonctionnelle". [voir la fiche démarche et le protocole ZH en annexe 1 pour plus de détail]

Le territoire ne disposant pas de cartographie des zones humides avérées, des cartes prédictionnelles sur le territoire sont néanmoins disponibles. La première carte prédictionnelle (probabilité de présence d'une zone humide) a été fournie par le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) Dore et la deuxième par l'Inventaire National du Patrimoine Naturel (INPN) (INPN, 2023). Peu d'informations sont disponibles sur la construction du modèle de la carte prédictionnelle par le SAGE Dore. C'est pourquoi, sans en être le véritable objectif de l'étude, il a semblé intéressant de confronter ces deux cartes à l'aide de quelques observations de terrain.

Il a été réalisé des transects, au nombre de 9, au niveau des zones humides afin d'observer leur étendue et de comparer les 2 cartes à disposition. Cela représente en tout 39 sondages tarières réalisés et qui ont permis l'identification de 28 zones humides.

❖ Résultats

Les quelques points de comparaison effectués, n'ont pas la prétention d'être rigoureux scientifiquement, tentent de démontrer que la carte fournie par le SAGE Dore est optimiste quant à la superficie et le nombre de zones humides sur le territoire (probabilité de présence élevée des zones humides très étendue sur le territoire). La carte prédictionnelle de l'INPN semble plus réaliste malgré quelques divergences notables, comme par exemple au niveau du captage 10 (figures 15 et 16).

De plus, il a été constaté sur le terrain, pour la carte de l'INPN, que les zones humides concordent avec la topographie du terrain et les zones de prairie à proximité de cours d'eau en forêt.

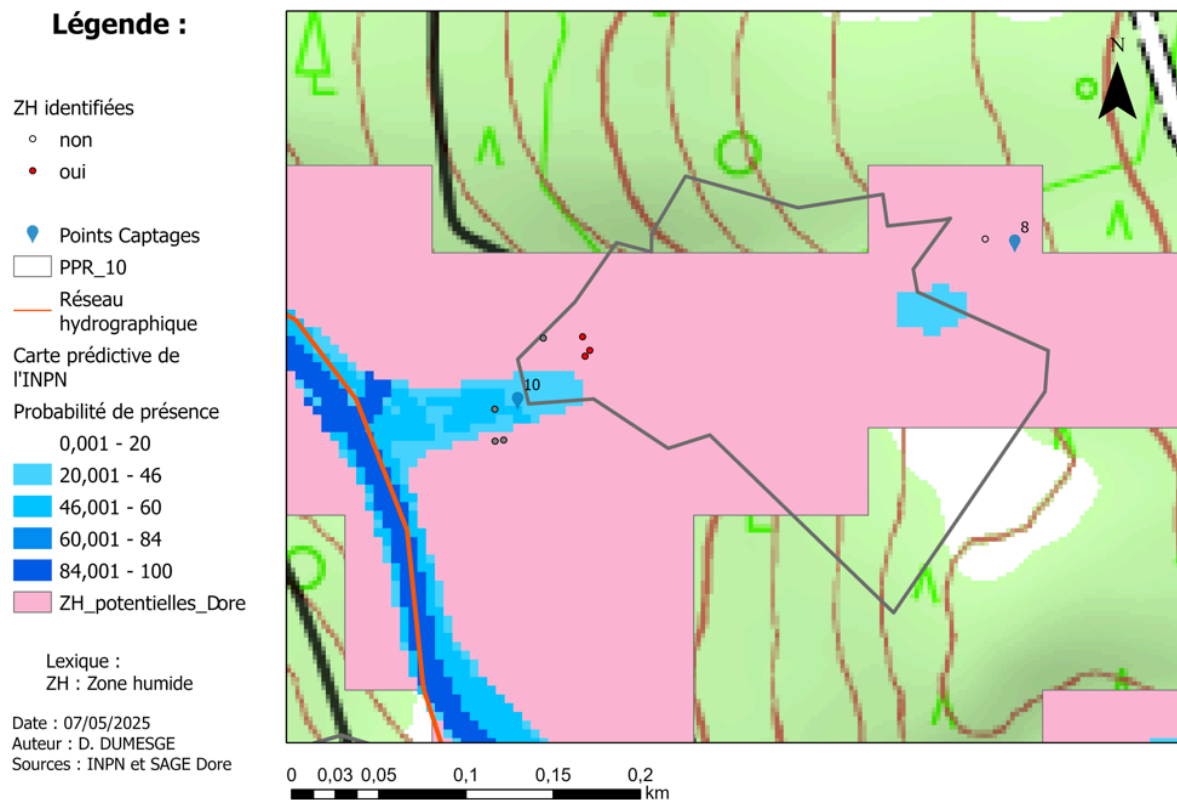


Figure 15 : Carte comparative entre deux cartes prédictionnelles des ZH : Cas du captage 10, carte prédictive pessimiste de l'INPN.

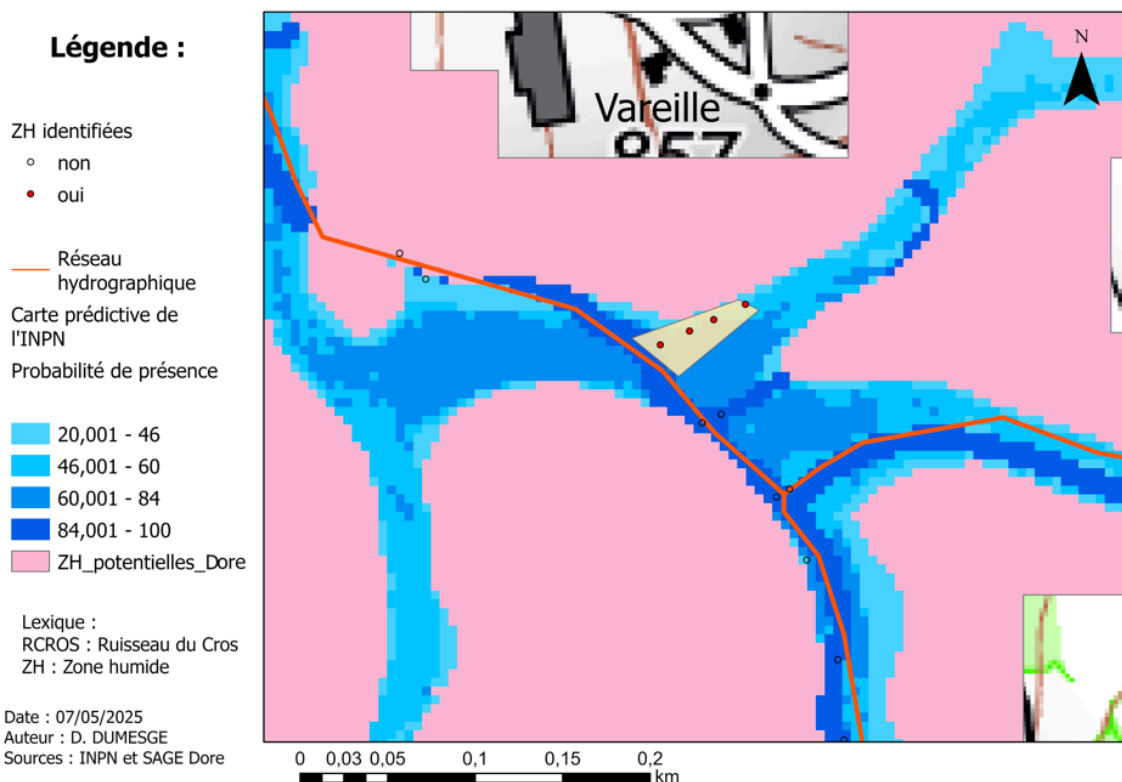


Figure 16 : Carte comparative entre deux cartes prédictionnelles des ZH : zone humide au niveau d'un transect réalisé sur le ruisseau du Cros en accord avec les 2 cartes.

Il est donc conseillé d'émettre des réserves quant à la carte prédictive du SAGE Dore. Il pourrait être pertinent de réaliser des points ou transects supplémentaires afin de vérifier la fiabilité de l'analyse, celle-ci n'ayant pas pu être exhaustive en raison du temps imparti et de l'orientation principale du sujet d'étude. Il est impossible à ce stade d'avoir une estimation de l'abondance des ces zones et de leur répartition à l'échelle du BV étant donné l'incertitude qui pèse sur ces cartes prédictives.

Par la suite, il a semblé pertinent d'étudier la fonctionnalité des 28 zones humides identifiées le long des cours d'eau (ruisseau de Tonvic, ruisseau du Cros et ruisseau des Vernades). Parmi celles-ci, seules 5 sont considérées comme non fonctionnelles d'un point de vue hydrologique. Cette non fonctionnalité peut être expliquée par l'incision du cours d'eau et la présence de drains à proximité.

En effet, l'incision du cours d'eau impacte l'infiltration de l'eau dans le sol. L'incision provoque un abaissement de la nappe phréatique, un assèchement de la zone humide et une baisse de la qualité de l'eau. En effet, l'eau va éroder le fond du cours d'eau, ce qui va

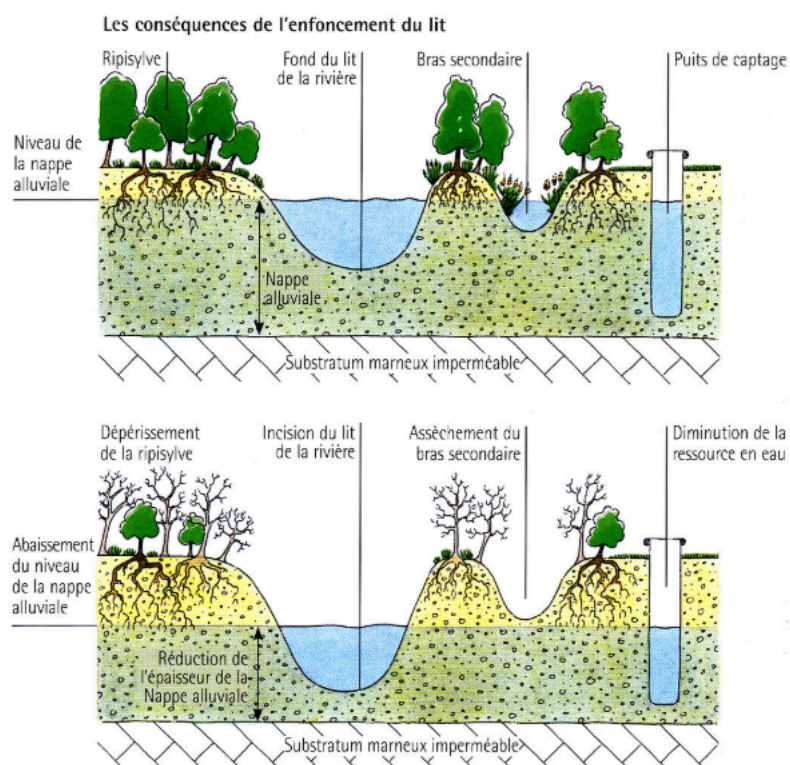


Figure 17 : Illustration de l'impact de l'incision d'un cours d'eau (Frane, 2013)

augmenter le nombre de particules dans l'eau (Eaufrance, 2025). De plus, il a été remarqué sur place que des pessières se situaient au bord des cours d'eau, elles représentent 14% des tronçons étudiés pour le cours d'eau. Or ces derniers ont un système racinaire traçant donc peu profond. Ils n'auront donc plus accès à la ressource en eau.

Par ailleurs, la présence de drain dans certains peuplements conduit à la disparition des zones humides, qui jouent un rôle très favorable pour la qualité de l'eau, le maintien de la biodiversité et la gestion des inondations (OFB, 2025). Sur ces 3 zones humides drainées, 2 sont localisées sur des prairies et 1 est localisée au sein d'un peuplement forestier (mélange de sapin et de hêtre).

Il serait donc intéressant de se pencher sur les 2 zones humides concernées par une incision du cours d'eau et pour la zone humide dont l'intérêt sylvicole est fort avec la présence de drain. Ainsi, un remaniement du tracé du cours d'eau est à prévoir afin de lui redonner un tracé hydrographique naturel. Ainsi que de trouver des solutions avec le propriétaire de la parcelle sylvicole car non seulement il y a la présence de drain sur une zone humide mais en plus cette zone se situe au niveau du PPR des captages 12 à 15 (annexe 8). Il est à noter que le cas des zones humides agricoles n'est pas traité ici mais il n'est cependant pas à négliger.

B - Cours d'eau

Dans le cadre de l'étude de la problématique de gestion de l'eau dans le PNR du Livradois-Forez, une étude a été menée concernant le fonctionnement des cours d'eau. En effet, partant du postulat qu'un fonctionnement naturel des cours d'eau et zones humides adjacentes permet une rétention optimale de l'eau au sein du bassin versant et donc limiter les phénomènes de crues, d'inondations et dans une certaine mesure d'assèchement des cours d'eau, un état des lieux et une analyse de l'état de fonctionnalité et de vulnérabilité d'une partie des cours d'eau du bassin versant a été réalisée.

Les activités menées au sein d'un bassin versant peuvent avoir une influence majeure sur les systèmes hydrographiques. Ainsi, cette étude, par l'observation d'un échantillon de cours d'eau, a permis d'avoir une vision globale du bassin versant et de rechercher des zones forestières à investiguer : coupes rases, peuplements déperissants, impact de l'infrastructure routière, diversité des modes de gestion sylvicole... Cette prospection a aussi permis de mettre en lumière les interactions positives et négatives entre cours d'eau et pratiques sylvicoles et d'évaluer le niveau de vulnérabilité des différentes composantes de la fonctionnalité des cours d'eau par rapport à la gestion forestière.

Dans le cadre de cette étude, quatre cours d'eau ont été prospectés [annexe 9] : le ruisseau de Tonvic (RTONV), le ruisseau des Vernades (RVER), le ruisseau du Cros (RCROS) et un ruisseau plus au nord appelé Ruisseau 1 (R1). Leur prospection a été menée selon le protocole suivant [annexe 2].

Ces ruisseaux ont été choisis de sorte à rester dans la zone d'étude en paysage forestier, étant donné les limites posées à notre problématique d'étude (sylviculture et hydrosystème). Ils sont jugés assez représentatifs de la zone d'étude et assez divers pour couvrir tous les cas de la zone (stations de captage à l'aval, passage de coupes rases, de paysages agricoles, de zones humides...). Ainsi les résultats obtenus sur ces ruisseaux pourraient être extrapolés sur les autres cours d'eau de la zone d'étude. Chaque ruisseau a été parcouru dès son entrée dans un paysage majoritairement forestier et jusqu'à ce que son lit mineur mesure moins de 20 cm. Une portion du cours d'eau du Cros n'a pas été diagnostiquée de par la nature à dominante agricole et proche de villages de cette dernière.

Le glossaire présente la typologie utilisée dans cette étude.

La fonctionnalité des cours d'eau a été diagnostiquée selon des critères morphologiques et dimensionnels et selon le niveau de perturbations anthropiques. Concrètement, les observateurs ont relevé la largeur plein bord ainsi que la profondeur plein bord pour établir par la suite le quotient "largeur/profondeur", valeur permettant de mettre en avant les tronçons aux fonctionnements anormaux. Dans le cas de la présence d'essences proches des cours

d'eau, des relevés ont été effectués afin de valider ou invalider la présence d'une ripisylve, caractéristique essentielle d'un cours d'eau fonctionnel. Enfin, des mesures globales de granulométrie ("à l'œil") ainsi qu'un relevé sur la nature du tracé d'écoulement du cours d'eau (naturel ou artificiel) ont aussi participé à mettre en évidence les zones de cours d'eau où la fonctionnalité a été atteinte. La vulnérabilité a quant à elle été évaluée en prenant également en compte l'environnement plus ou moins rapproché (le paysage environnant) des cours d'eau : appréciation de la pente du corridor rivulaire et du paysage, type d'occupation du sol.

Malgré la rigueur exigée au moment de la prise de mesure, la possibilité de biais observateurs est à garder en mémoire, compte tenu du nombre de personnes différentes ayant participées à la prise de données. Grâce aux différentes mesures récoltées, une classe de fonctionnalité et de vulnérabilité a été déterminée, et ce pour chaque tronçon de cours d'eau [Annexe 2].

1 - Fonctionnalité des cours d'eau étudiés

Etat de l'art

Le terme de fonctionnalité pour un cours d'eau se réfère au fonctionnement naturel de celui-ci. Un cours d'eau fonctionnel peut accomplir ses fonctions naturelles : transporter un débit liquide et un débit solide. Il adopte alors un équilibre dynamique en déposant des débits solides et en modifiant la profondeur d'eau ou en érodant pour s'ajuster autour de fluctuations de débits solides et liquides. Le cours d'eau fonctionnel peut alors réaliser ses grandes fonctions (qualité de l'eau, quantité de l'eau et préservation de la biodiversité) en permettant des échanges transversaux avec les paysages adjacents. Un cours d'eau non fonctionnel est en déséquilibre : son état a été modifié par des activités anthropiques ou naturelles (climatiques ou géologiques) et ne peut plus remplir sa fonction (Degoutte, 2012) en totalité ou partie.

Pour déterminer le niveau de fonctionnalité d'un cours d'eau, quatre éléments peuvent être diagnostiqués : le corridor rivulaire, la granulométrie, l'origine du tracé et les dimensions du lit.

Le **corridor rivulaire** est la zone de formation végétale naturelle située sur la rive impactée par le fonctionnement du cours d'eau. Des essences sont inféodées à ce corridor. Elles peuvent être absentes, limitées à un cordon arboré ou être une véritable forêt alluviale.

Ce corridor joue des rôles essentiels dans la fonctionnalité du cours d'eau : stabilité des berges, limitation de l'incision, barrière physique aux déversements de particules dans le cours d'eau, apport de matière organique, diversifications des niches écologiques, ... Mais la présence d'essences inféodées à ce corridor peut également causer des inconvénients : consommation d'espace à forte valeur économique probable, possibilité de basculement d'arbres dans le lit, apport de matière organique, ... Les essences qui composent naturellement le corridor sont organisées selon un gradient d'humidité. Les abords directs des cours d'eau sont constitués de saules et d'aulnes. Ensuite apparaissent les bois durs : frênes, érables, hêtres, ormes, tilleuls... (Degoutte, 2012). Dans certains cas, et dans un souci de rentabilité économique, cette végétation inféodée aux cours d'eau a été remplacée par des essences plus productives pour le forestier (par exemple des épicéas de Sitka).

La **granulométrie** étudiée donne une appréciation de la taille des sédiments du cours d'eau. Il s'agit d'une variable de réponse, soit un degré de liberté dont dispose le cours d'eau pour accomplir sa fonction.

Un cours d'eau (de type montagne ici) est en bon état s'il a une tendance granulométrique équilibrée (autant de sable, de blocs ou de gravillons) ou a une tendance blocs/gravillons. Pour les cours d'eau de la région (type montagne), un ensablement ou colmatage montrent un déséquilibre de la fonctionnalité, notamment sur le débit solide (Degoutte, 2012).

Les **dimensions** adoptées par le cours d'eau (appréciées ici par le rapport largeur/profondeur) ont été façonnées au fil des ans par les débits liquides, et c'est grâce aux modifications de largeur/profondeur (variable de réponse) que le cours d'eau évacue ces débits (Degoutte, 2012).

Le rapport largeur/profondeur (l/p) plein-bord d'un cours d'eau fonctionnel est documenté par rapport à un modèle. Il donne une valeur de référence pour le rapport l/p dans la région Massif Central Sud selon la surface S du bassin versant (TAMISIER et al., 2017). Le modèle est le suivant :

$$l/p_{ref} = 4,28 \times S + 0,15$$

Les bassins versants pour chaque ruisseau ont une surface moyenne de 10 km². Avec le modèle, l/p vaut 6 avec une marge d'erreur de [-2;-2]. Ainsi en comparant le rapport l/p de chaque tronçon, celui-ci doit être situé entre 4 et 8 pour être considéré comme adéquat. Certains facteurs comme l'absence de végétation fixant les berges peuvent entraîner un rapport l/p anormal par incision et élargissement du cours d'eau (OFB, 2000). Le système racinaire superficiel des résineux et notamment des épicéas en bord de cours d'eau provoque par exemple une modification du rapport l/p (PNR Livradois-Forez, 2023). Il faut toutefois noter que d'autres facteurs comme la texture des berges peuvent induire des rapports naturellement plus faibles ou plus élevés que la moyenne (OFB, 2000).

Le **tracé** du lit est une réponse liée au débit solide et liquide. Si celui-ci est artificiel, cela perturbe le fonctionnement du cours d'eau qui devient déséquilibré.

- Etude cartographiée de la fonctionnalité

Méthode

La fonctionnalité des cours d'eau est évaluée selon les quatre facteurs au travers d'une grille située en annexe 10 (Tableau de classification fonctionnelle).

- la présence/absence de corridor rivulaire fonctionnel sur chaque rive
- la granulométrie : lit équilibré ou lit colmaté/érodé
- le rapport largeur/profondeur (l/p) plein-bord par rapport à un modèle de référence
- le tracé : naturel ou artificiel

Il est également noté la présence de points d'intérêts jouant sur la fonctionnalité (de même pour la vulnérabilité). Ces points sont également à prendre en compte pour avoir une vue globale de la fonctionnalité du cours d'eau en plus de la classe de fonctionnalité. Ces points provoquent une rupture de la continuité écologique (cascades, ponts, buses), modifient le tracé (embâcle, zones de passage) ou détériorent la qualité par des apports latéraux (abreuvement de bétails, apports latéraux de sédiments...).

Une fiche de vulgarisation a été réalisée en parallèle de cette étude afin de caractériser rapidement la fonctionnalité des cours d'eau étudiés (se reporter à la fiche "mon cours d'eau est-il fonctionnel").

Résultats :

Sur le terrain, 13 km de cours d'eau ont été prospectés (dont 14 % du linéaire est concerné par des coupes rases) ce qui a donné lieu à 87 tronçons d'analyse. Sur ces tronçons, différents types de fonctionnalité (et vulnérabilité) ont été relevés (Annexe 11).



Figure 18 : Carte de fonctionnalité des cours d'eau

Un cours d'eau de classe A est très fonctionnel (la ripisylve est fonctionnelle, le lit est équilibré, le rapport l/p est adapté et le tracé est naturel). Si le cours d'eau est de classe B, C, D ou E (resp. un, deux, trois ou quatre) un ou plusieurs facteurs est/sont non fonctionnel(s). Étant donné que chaque cours d'eau comporte deux rives, la rive avec les facteurs les moins fonctionnels est prise en compte.

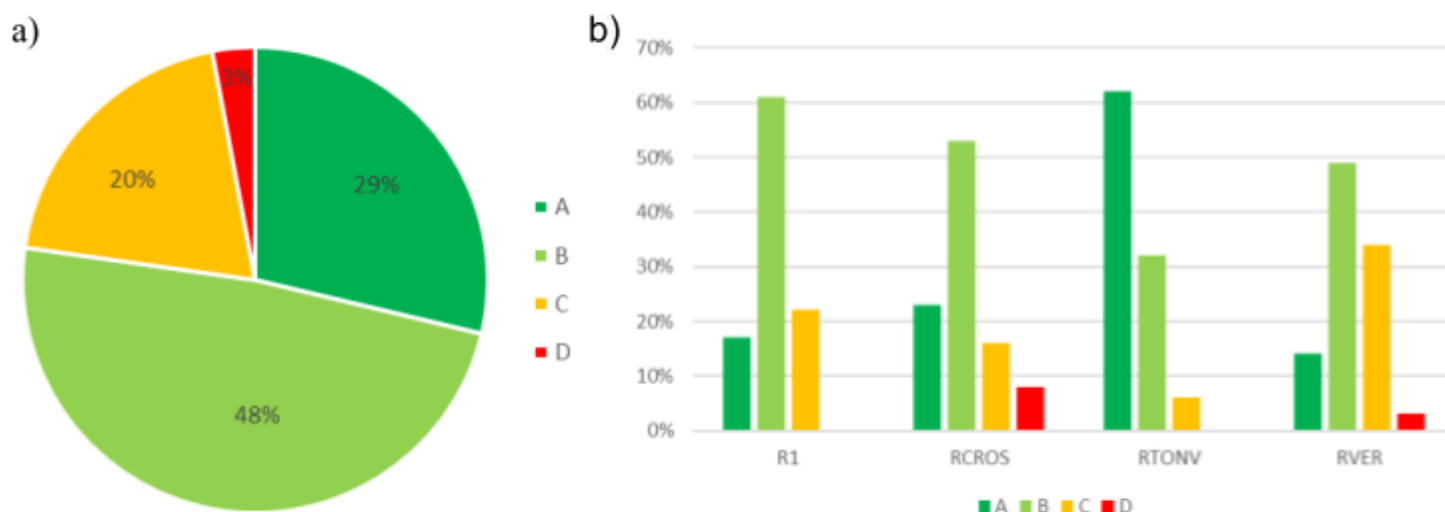


Figure 19 : a) proportion des classes de fonctionnalité sur l'ensemble des ruisseaux. b) proportions des classes de fonctionnalité par ruisseau

En général, **environ $\frac{3}{4}$ des tronçons des ruisseaux sont fonctionnels** (classes A et B). Le reste est majoritairement de classe C. Une proportion négligeable est de classe D (peu fonctionnel). Aucun tronçon est totalement non fonctionnel (classe E).

En regardant plus en détail,

- RTONV est le ruisseau avec le plus de tronçons fonctionnels (plus de 90% A/B)
- RCROS et R1 ont environ 75% de tronçons fonctionnels
- RVER (ruisseau géographiquement indépendant des 3 autres) est un ruisseau moins fonctionnel, avec $\frac{1}{3}$ de C.

- Analyse statistique de la fonctionnalité au travers du rapport l/p :

Méthode

Pour étudier plus en profondeur la fonctionnalité du réseau de cours d'eau étudié, il a été jugé pertinent de se focaliser sur leur rapport l/p, gage d'une circulation normale de l'eau dans le bassin versant, et ce au travers d'une analyse statistique. Dans un cours d'eau fonctionnel, le rapport l/p devrait décroître à mesure que l'altitude augmente, en lien avec l'évolution altimétrique du fond du lit (OFB, 2000), tout en étant compris dans l'intervalle attendu pour les bassins versants étudiés (TAMISIER et al., 2017). Dans un premier temps, une représentation du rapport l/p des tronçons en fonction de l'altitude est menée, puis une analyse des données cherchera à expliquer les écarts à la normale. Enfin, une analyse statistique sur le rapport l/p, avec le logiciel R (voir script R fourni dans la

base de données), permettra de savoir si ce rapport est lié à d'autres facteurs que l'altitude sur le réseau de cours d'eau étudié.

Résultat

La figure suivante présente le rapport l/p en fonction de l'altitude pour le ruisseau RTONV et son affluent RCROS, sur une section de plusieurs kilomètres. Cette section a été choisie à titre d'illustration, et les graphiques associés à chaque ruisseau ou ensemble de ruisseaux sont disponibles dans l'annexe 12.

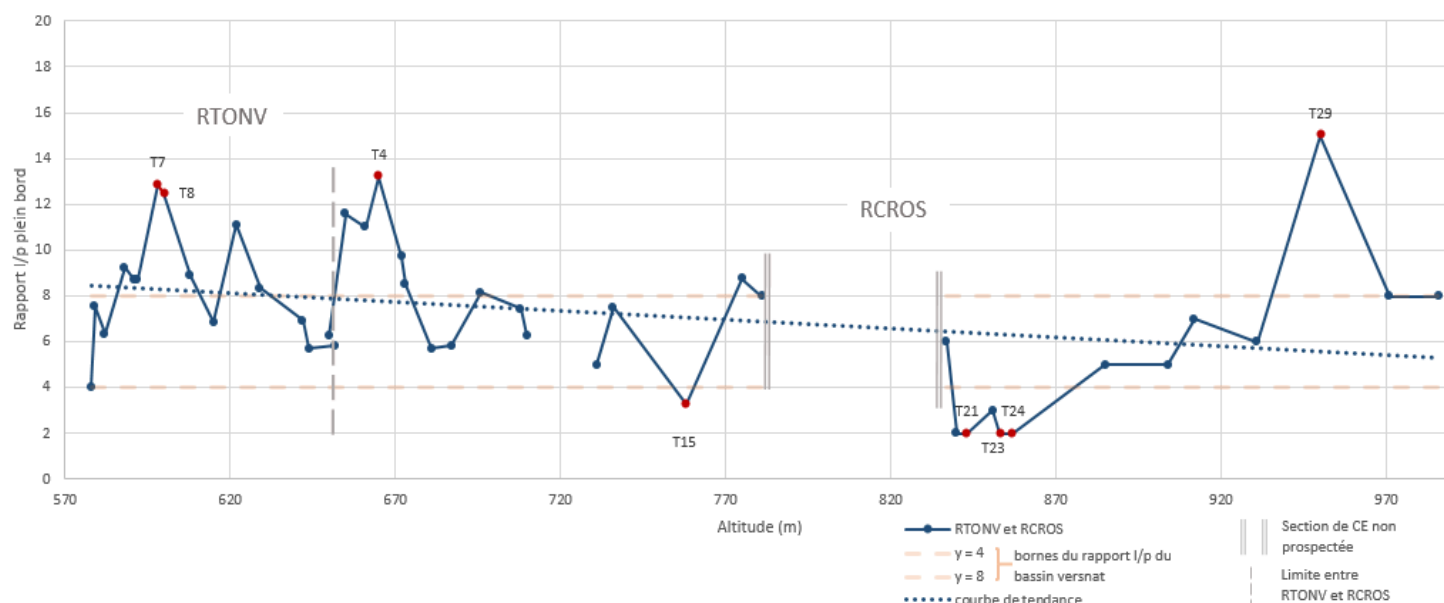


Figure 20 : Rapport l/p du profil en long des ruisseaux RTONV et RCROS en fonction de l'altitude

La figure 20 confirme une fonctionnalité globalement bonne des cours d'eau étudiés. Effectivement, il est intéressant de noter une décroissance du rapport l/p avec l'altitude, et la courbe de tendance se trouve dans la gamme de valeurs indiquée pour notre bassin versant. Toutefois, des tronçons anormaux ont été relevés, dont les principaux sont représentés par des points rouges sur le graphique (figure 20). Le tableau 3 explicite les paramètres étant susceptible induire une mauvaise fonctionnalité de ces tronçons.

Tableau 3 : Paramètres susceptibles d'expliquer le rapport l/p des tronçons de fonctionnalité considérée anormale (inf PB : inférieure à la largeur Plein Bord)

Nom du tronçon	Paramètres susceptibles de diminuer la fonctionnalité du tronçon
T7_RTONV	incision, tendance sableuse, absence de ripisylve, paysage résineux et agricole
T8_RTONV	ripisylve peu présente (inf PB), paysage agricole et résineux (épicéas)
T4/21/24_RCROS	incision, absence de ripisylve, paysage résineux (épicéas)
T15_RCROS	absence de ripisylve, paysage résineux (épicéas) et agricole
T24_RCROS	incision, tendance sableuse, paysage résineux (épicéas)
T29_RCROS	tendance sableuse, absence de ripisylve, paysage résineux (épicéas)

Une absence de ripisylve et la présence de résineux, surtout d'épicéas, semblent être les paramètres les plus associés à un rapport l/p anormal, et donc à une mauvaise fonctionnalité du tronçon.

L'étude a alors été axée sur les facteurs pouvant statistiquement expliquer une anomalie du rapport l/p de tronçons comme ceux du tableau 3. L'altitude est alors effectivement le principal facteur qui explique le rapport l/p des tronçons (décroissance du rapport avec l'altitude). Dans un second temps, le traitement statistique montre qu'une diminution du rapport l/p est significativement liée à la présence d'épicéas, ce qui signifie que le cours d'eau est plus profond que la normale sur les tronçons bordés d'épicéas, et pourrait suggérer une incision des cours d'eau dans un paysage de pessière (PNR Livradois-Forez, 2023). Il faut toutefois noter que d'autres facteurs comme la texture des berges peuvent induire des rapports naturellement plus faibles ou plus élevés que la moyenne (OFB, 2000). Le détail des résultats statistiques est disponible dans l'annexe 13.

En l'état actuel des choses, les cours d'eau prospectés sont relativement fonctionnels et assez proches d'un fonctionnement naturel. Les quelques tronçons présentant une fonctionnalité dégradée le sont souvent vis-à-vis des mêmes paramètres (absence de ripisylve, présence d'épicéas en bordure de cours d'eau...). La suite de l'étude vise à établir le niveau de vulnérabilité des cours d'eau en regard de différentes menaces susceptibles d'entraver leur bon fonctionnement.

2 - Vulnérabilité des cours d'eau

Etat de l'art

La vulnérabilité d'un cours d'eau est ici perçue par le prisme de sa fonctionnalité : un cours d'eau dont la fonctionnalité est menacée est donc vulnérable.

Cette vulnérabilité peut être approchée au travers de la topographie de son aire d'implantation, caractéristique intrinsèque au milieu, mais aussi au travers de l'occupation des sols, liée aux activités anthropiques.

L'occupation des sols peut être appréciée par la rugosité. Une rugosité faible du milieu engendre un risque plus important de déversement latéral d'éléments dans le cours d'eau qu'une rugosité élevée. En effet, la végétation (ou son absence) sur une surface influence grandement ce paramètre de deux façons différentes : "d'une part, elle peut empêcher l'ablation du substrat, d'autre part, elle peut favoriser la sédimentation, en retenant les sédiments érodés plus à l'amont" (Rey Freddy et al., 2004). Les observations effectuées sur le terrain, regroupées dans le tableau 4, viennent étoffer cette notion :

Tableau 4 : Paysages associés aux différents niveaux de rugosité

Niveau de rugosité	Paysages associés
Absente	Coupe rase
Faible	Peuplements réguliers (pas étagés avec peu ou pas de régénération)
Moyenne	Peuplements étagés, espaces prairiaux
Elevée	Peuplements très étagés (type sylviculture mélangée à couvert continu)

- Vulnérabilité des cours d'eau liée à la topographie

Méthode

Les premiers éléments modulant la vulnérabilité des cours d'eau sont des critères topographiques et sont indépendants des activités anthropiques. Ce premier critère de vulnérabilité a été évalué selon l'établissement d'une vulnérabilité topographique (clé de décision en annexe 16 et dans la fiche "mon cours d'eau est-il vulnérable ?") reposant sur les critères suivants :

- la présence ou absence de corridor rivulaire
- la taille relative du corridor rivulaire par rapport à la largeur plein bord du cours d'eau
- la pente du corridor rivulaire et du paysage à la vue de l'observateur (depuis le cours d'eau)

La note de vulnérabilité topographique attribuée à chaque tronçon du cours d'eau varie sur une échelle allant de 1 (très forte vulnérabilité topographique) à 27 (très faible vulnérabilité topographique). Cette note permet de mettre en avant les zones sur lesquelles les activités anthropiques sont susceptibles d'avoir des effets majeurs, que ce soit en termes de détérioration des cours d'eau ou de leur préservation. Pour chaque critère, la rive où la situation est la plus problématique est retenue.

Résultats

Figure 21 : Carte de vulnérabilité topographique



Pour près d'un tiers des zones prospectées, la vulnérabilité topographique est faible à modérée (classe 16-20 et 21-27). **Plus de la moitié des zones étudiées ont cependant une vulnérabilité élevée à très élevée** (classe, 6-10, 1-5). Au sein de ces zones, les choix de gestion sylvicole dans les peuplements adjacents au cours d'eau ont alors un effet d'autant plus important sur la fonctionnalité de ces derniers.

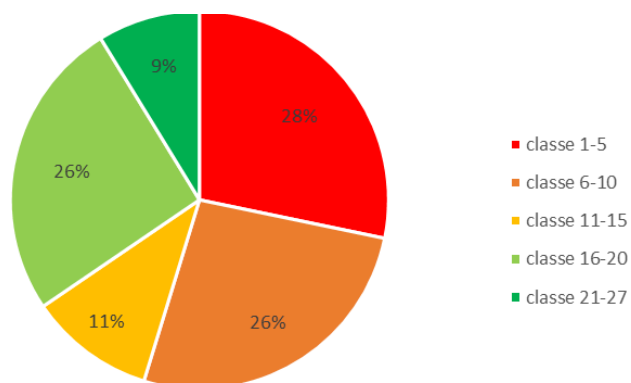


Figure 22 : Parts des différentes classes de sensibilité topographiques pour l'ensemble des tronçons étudiés

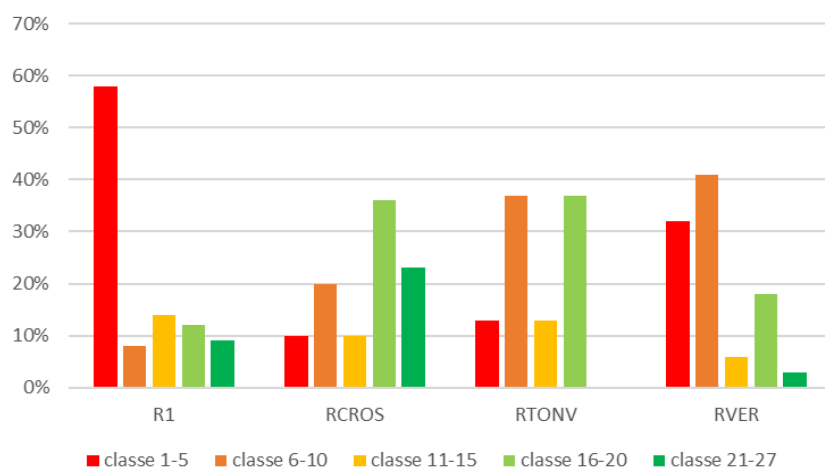


Figure 23 : Parts des différentes classes de sensibilité selon les cours d'eau étudiés

Par ailleurs, tous les cours d'eau prospectés ne sont pas égaux face aux risques topographiques. Le cours d'eau R1 possède par exemple une forte à très forte vulnérabilité topographique (classe 1-5 et 6-10) pour $\frac{2}{3}$ de son linéaire, tandis que pour le cours d'eau du CROS, seul 30% de son linéaire est concerné.

- Vulnérabilité des cours d'eau liée à l'occupation des sols

Méthode

La vulnérabilité topographique en tant que telle n'est pas un élément sur lequel il est possible d'agir. Cependant, les choix de gestion sylvicoles qui influencent la nature, la densité et la continuité spatiale et temporelle du couvert forestier sont primordiaux en ce qui concerne la modulation de la vulnérabilité des cours d'eau. Le paramètre retenu afin de caractériser cette occupation du sol est la rugosité du milieu adjacent au cours d'eau. Il s'agit d'une caractérisation de l'état de surface des sols, mettant en avant la capacité plus ou moins importante de celui-ci à retenir les sédiments et éléments grossiers en amont du cours d'eau.

Résultats

La carte annexe 14 présente la rugosité obtenue pour chaque tronçon, **et montre que la grande majorité des tronçons ont une faible rugosité.**

Toutefois, les zones d'attention concernant la rugosité du milieu concernent avant tout les espaces où la vulnérabilité topographique y est déjà importante. En effet, couplée à une faible voire absence de rugosité, ces zones constituent des couloirs d'écoulement d'éléments vers les cours d'eau, pouvant ainsi porter atteinte à leur fonctionnalité.

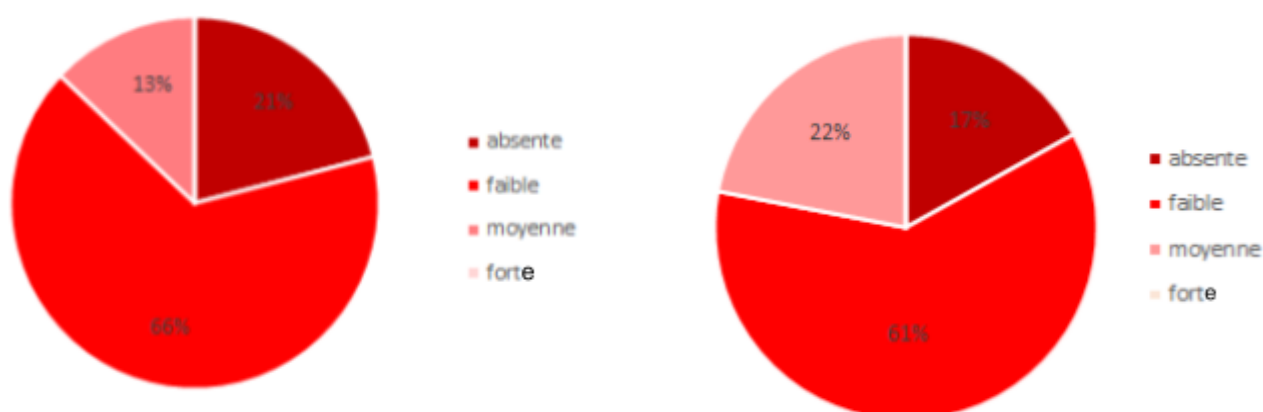


Figure 24: Diagramme de distribution des niveaux de rugosité du corridor rivulaire (à gauche) et du paysage (à droite) sur les tronçons à forte vulnérabilité topographique (classes 1-10)

Pour les zones à forte vulnérabilité topographique (classe 1-10), plus des $\frac{3}{4}$ des tronçons étudiés présentent une rugosité absente à faible : la vulnérabilité effective de ces zones y est alors extrêmement importante et nécessiterait en priorité une adaptation des pratiques sylvicoles. (figure 24)

- Vulnérabilité long terme

Méthode

En s'intéressant à la pérennité de l'occupation du sol à proximité des cours d'eau, il est possible d'apprécier la vulnérabilité à plus long terme. Trois catégories sont utilisées selon le type de couvert présent lors des mesures : danger amoindri (DA), danger potentiel (DP) et danger imminent (DI). Ces catégories, explicitées ci-dessous (tableau 5), se réfèrent à la pérennité probable du type de paysage. Cette projection future de l'occupation des sols permet de mettre en lumière le risque de diminution de la rugosité.

Tableau 5 : Type de couvert retrouvé selon la catégorie de pérennité du couvert

Catégorie	Type de couvert
DA	Zone humide, zone agricole, paysage forestier feuillus
DP	Paysage forestier résineux petits bois, coupe rase
DI	Paysage forestier résineux bois moyens et gros bois

Résultats

La carte de vulnérabilité de rugosité future (annexe 15) représente la vulnérabilité long terme sur les cours d'eau étudiés. **63% des tronçons seront en danger immédiat** [annexe 15], ce qui laisse penser que la vulnérabilité dans les années à venir sera supérieure à la vulnérabilité actuelle sur l'ensemble des cours d'eau. Ceci s'explique notamment par la forte présence de peuplements résineux approchant la maturité économique, avec les plantations du Fond Forestier National.

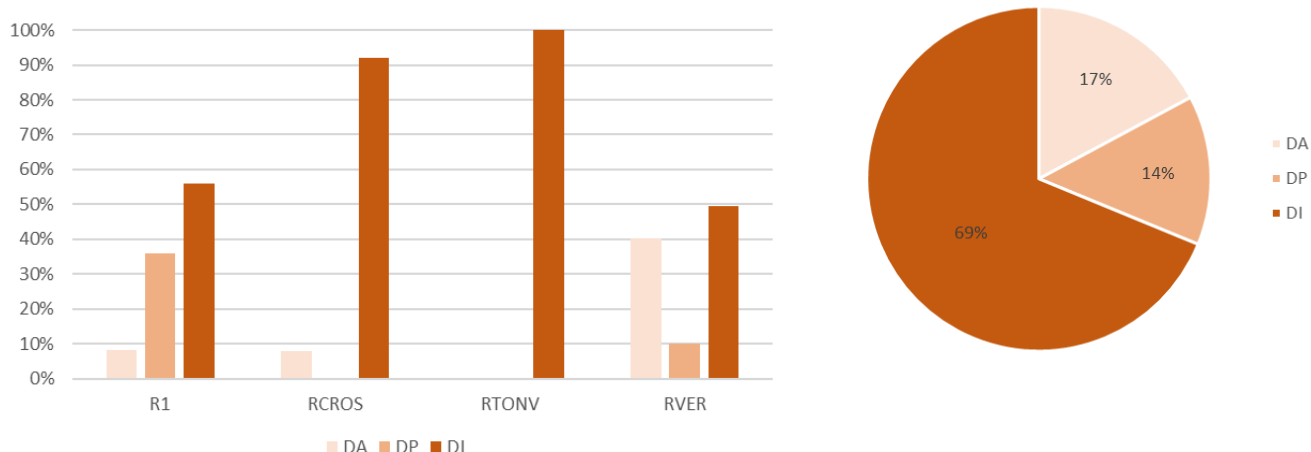


Figure 25 : Catégorie de vulnérabilité long terme (DA : Danger Amoindri ; DP : Danger Potentiel, DI : Danger Immédiat) pour les tronçons les plus vulnérables topographiquement (classes 1-10)

En regardant plus en détails, **les tronçons à forte vulnérabilité topographique sont en majorité en DI (69%)**. Deux cours d'eau sont quasi exclusivement en danger immédiat et les deux autres ont une majorité de danger immédiat.

Pour les tronçons les plus vulnérables topographiquement (classes 1-10), ces résultats mettent en lumière, en plus d'une vulnérabilité actuelle, une vulnérabilité future importante. De la même manière que pour la vulnérabilité liée à l'occupation actuelle des sols, la gestion et les actions mises en place par le propriétaire peuvent jouer sur la vulnérabilité de long terme et limiter la vulnérabilité globale du cours d'eau.

Les prédictions utilisées pour l'estimation de la vulnérabilité future ont pu être sous-estimées ou surestimées. De nombreux peuplements dans la région sont peu voire pas gérés. Ces peuplements pourront être moins touchés par les coupes rases que prévu si les propriétaires ne sont pas démarchés ou démarchables ou sensibles à cela. De plus, certains propriétaires pratiquent une sylviculture limitant les coupes rases et ont pu être sous-estimés. Ainsi la projection de la vulnérabilité sera probablement moins forte que prévu.

Néanmoins, les prédictions ont aussi pu sous-estimer l'importance des coupes rases. En effet, lorsque les bois seront prêts à être exploités, un "effet boule de neige" des exploitations pourrait arriver. Des propriétaires de la même zone pourraient être démarchés pour les mêmes prestations (souvent une coupe rase) conduisant à des coupes rases importantes.

❖ Récapitulatif et conseils

Les cours d'eau prospectés dans le cadre de l'étude sont en grande partie fonctionnels, mais certaines zones présentent une forte vulnérabilité topographique. Ajouté à cela, l'occupation actuelle des sols dans ces zones sensibles présente souvent une rugosité faible. En effet, l'occupation des sols constitue un élément crucial, notamment dans les zones critiques où une déclivité moyenne à importante constitue un facteur déclenchant majeur dans les glissements de terrain, d'autant plus lorsque le sol est saturé en eau et sur des formations géologiques instables (ONF, 1999). La sylviculture préconisée dans ces situations est de type irrégulière, ce qui renforce l'ancrage des couches superficielles du sol. Il convient toutefois de limiter la valeur de la relation hauteur/diamètre en deçà de 65, et de ne pas dépasser un diamètre d'exploitabilité de 40 cm. En effet, les peuplements aux tiges trop imposantes engendrent des effets contradictoires sur la stabilité des terrains : risque de déstabilisation du terrain liée aux mouvements des parties aériennes lors de vents forts (ONF, 1999).

Si le contexte d'évolution des peuplements existants continue sur un modèle prédominant de coupes rases, la vulnérabilité déjà existante risque d'augmenter en intensité (danger imminent). Dans l'idéal, le développement d'une sylviculture basée sur un modèle d'éclaircies et de récoltes régulières des bois serait une des alternatives permettant de pallier la mise en danger des cours d'eau et donc de la ressource en eau. Chaque situation étant unique, formuler des conseils généraux n'est pas suffisant et l'appui d'un spécialiste de gestion des milieux aquatiques est vivement recommandé.

IV - Le dépérissement, une menace potentielle pour la ressource en eau et comment les limiter

La ressource forestière du territoire d'études est composée pour beaucoup de sapin pectiné, souvent en futaies sur-capitalisées. Le couvert fermé empêche la mise en place d'un sous-bois fourni et augmente l'interception puis l'évapotranspiration de l'eau, ce qui amoindrit les quantités d'eau disponibles. Or, en contexte de dérèglement climatique, le peuplement et les captages en ont plus besoin que jamais. Le sapin pectiné est une essence qui a besoin de fraîcheur et d'humidité et qui aujourd'hui inquiète les acteurs par son dépérissement croissant. Ces inquiétudes entraînent des coupes dites "sanitaires" souvent sous la forme de coupes rases qui peuvent avoir des conséquences sur la ressource en eau (détaillées en partie II-C-2 et IV-F).

L'étude du lien entre forêt et eau accentue encore l'intérêt d'une gestion durable, d'une vision à plus long terme face à ces dépérissements et d'anticiper les mortalités à venir en améliorant les peuplements.

Pour comprendre plus précisément les problématiques liées aux dépérissements des peuplements et surtout des sapinières de la zone étudiée, il est important de tout d'abord détailler les vulnérabilités des sapinières du Forez.

En premier lieu les arbres adultes, par leur interception des précipitations et leur consommation en eau, conditionnent la disponibilité en eau pour le peuplement. Il est aussi important de comprendre l'impact de la structure du peuplement adulte sur le sous-bois qui détermine la rugosité et la capacité de régénération de la parcelle. Ensuite il convient d'analyser le dénombrement des arbres morts et très dépérissants pour compléter l'étude bibliographique sur les causes du dépérissement du sapin pectiné. En effet, la compréhension des principales causes est importante pour réaliser une projection et anticiper les futurs cas de mortalité dont l'impact a été démontré plus tôt. Enfin, l'étude de peuplements très dépérissants (>50% d'arbres morts ou très dépérissants) vient faire la démonstration de l'influence de la sylviculture passée sur la résilience de la parcelle pour appuyer les conseils sylvicoles dispensés dans un catalogue de fiches explicatives à destination des propriétaires et gestionnaires.

A - Etat de l'art : éléments de réflexion sur le sujet des dépérissements, particulièrement dans le cas des sapinières

A- Analyse des données bibliographiques

En France, l'aire du sapin pectiné est entièrement comprise entre les isothermes annuelles de 0°C et +8°C . Il nécessite une **pluviométrie annuelle d'au moins 800 mm**, et trouve son optimum avec des précipitations de 1000- 1200 mm/an (Legrand, 2016). Par ailleurs, le sapin est déconseillé pour une **RUM inférieure à 100 mm** (Legrand, 2016). **Le déficit hydrique du sol** est le facteur le plus important pour expliquer les variations de croissance des sapinières. Le sapin nécessite une hygrométrie élevée de l'air et un bilan hydrique estival favorable.

En accord avec ces résultats, il existe une étude réalisée sur les facteurs prédisposants de la mortalité du sapin pectiné sur le Mont Ventoux. Celle-ci révèle qu'à l'échelle du massif, **l'altitude** et de **l'exposition sud** sont des facteurs significatifs en termes de vulnérabilité aux dépérissements (Cailleret et al., 2010). Le sapin pectiné trouve sa place normalement dans les forêts de l'étage montagnard (de 850 à 1350 m dans le Massif Central), avec un développement optimal entre 1000 et 1200 m d'altitude (limite entre l'étage montagnard et collinéen) (Legrand, 2016). En dessous de ces altitudes, le risque est considéré comme important pour le sapin pectiné qui sera classé comme hors-station (Legrand, 2016). Néanmoins, ce dernier se régénère très bien en dehors de son optimum, c'est-à-dire au niveau de l'étage collinéen qui est une station plus sèche. Le sylviculteur a alors pu être tenté de le favoriser au dépend des essences collinéennes sous lesquelles il s'est installé (Legrand, 2016). Ceci explique la présence de sapinières à basse altitude, prédisposant ainsi ces peuplements à des dépérissements avant même que le changement climatique ne les touche. Ce choix n'est donc pas adapté à cette altitude.

En termes de facteurs affaiblissants et contribuant au dépérissement, les **densités d'arbres excessives** entraînant une compétition exacerbée pour l'eau et les minéraux (Becker and Lévy, 1988) et les **peuplements monospécifiques, mono-étagés** peu résilients, peuvent être cités (Landmann and Bonneau, 1994 ; Legrand, 2016). Or, dans le Massif Central, là où la dynamique naturelle à l'étage montagnard aurait conduit à la hêtraie-sapinière, soit le hêtre (*Fagus sylvatica* L.), soit le sapin ont pu être privilégiés, ce qui a pu aboutir à des peuplements monospécifiques (Legrand, 2016). La présence de ces derniers et l'absence d'actes sylvicoles correspondent à des facteurs de vulnérabilité des sapinières du Forez.

Il a également été démontré qu'une **bonne fertilité sur les trois premiers mètres de sol** induit davantage de mortalité à l'échelle de la parcelle (Cailleret et al., 2010). Cette bonne fertilité dite "de surface", liée historiquement à une meilleure croissance des arbres, génère chez les sapins une sensibilité accrue aux variations climatiques inter-annuelles (Cailleret et al., 2010). Il serait possible que la résistance des arbres aux dépérissements soit davantage liée aux conditions en profondeur, au-delà de 3 mètres (Cailleret et al., 2010). Les diagnostics de station réalisés pourraient donc, en indiquant une relative bonne fertilité de surface, mettre en évidence une partie de la vulnérabilité des peuplements.

Avec le dérèglement climatique et la remontée de l'étage montagnard démontrée par le CEMAGREF en 2011, différents scénarios peuvent être envisagés ; du plus au moins pessimiste. Dans un scénario "catastrophe" où le réchauffement serait de l'ordre de +4 ou 5°C à la fin du siècle, les étages de végétation pourraient remonter de 700 m (Sardat et al., 2011), amenant l'étage montagnard au-dessus de 1550m. La comparaison de cette remontée à l'altitude maximale du massif (1631 m pour le Forez) fait craindre, à terme, la quasi-disparition de l'étage montagnard et des essences qui lui sont associées comme le sapin pectiné (Legrand, 2016 ; (Piedallu et al., 2009). Ces études mettent en évidence une forte régression de la probabilité de présence du sapin pectiné sur une grande partie de son aire de distribution. Le réchauffement du climat et la diminution corrélative des précipitations en période de végétation devraient induire des stress climatiques et hydriques plus fréquents. Cela accentuerait les dépérissements sur des essences comme le sapin qui sont vulnérables aux variations inter-annuelles de précipitations (Legrand, 2016).

“Le sapin pectiné ne se maintiendrait que dans des stations relictuelles favorables, isolées dans des zones devenues globalement défavorables (Legrand, 2016)”

La bibliographie réalisée semble plutôt pessimiste quant à l’avenir du sapin pectiné en France et dans le Massif Central. Cependant, il est important de ne pas condamner pour autant tous les peuplements et de considérer également les scénarios climatiques plus optimistes, et ce pour plusieurs raisons. En effet, ne considérer que les scénarios les plus pessimistes pousserait à une absence d’interventions, qui auraient pu être intéressantes (économiquement, mais aussi d’un point de vue paysager et environnemental) dans le cas où un scénario moins pessimiste se réaliserait. De plus, les modèles climatiques comprennent de nombreuses incertitudes qu’il faut prendre en compte dans les analyses. (Langevin et al., 2008 ; Legay, 2010) recommandent d’anticiper et d’accompagner le dérèglement climatique. (Legrand, 2016) évoque l’existence de certains individus de sapin pectiné qui présenteraient une adaptation aux conditions plus sèches en marge de son aire de répartition. Conserver ce patrimoine génétique pourrait donc constituer un argument à la régénération naturelle en opposition à la plantation, notamment la plantation de sapins méditerranéens plus résistants aux conditions sèches et chaudes mais qui pourraient s’hybrider avec le sapin pectiné (Legrand, 2016). Conserver du sapin pectiné dans la régénération, même dans un scénario pessimiste sur le long-terme, permet à court-terme de baisser les coûts de renouvellement tout en réduisant l’érosion.

B- Analyse des données de terrain appuyant la bibliographie

Les données collectées sur le terrain ont permis d’appuyer certaines conclusions lues dans la bibliographie.

Le dépérissement est une thématique compliquée à aborder pleinement en une semaine de terrain, tant il est multifactoriel, et tant la surface de la zone d’étude est étendue. Un premier échantillonnage a donc été déterminé afin de ne cibler qu’une essence - celle de notre commande - le sapin pectiné, en fonction de différentes altitudes et topoclimats (versant, confinement) et en fonction de la présence ou non de traces d’éclaircies. Un deuxième échantillonnage ciblant toujours les sapinières mais cette-fois-ci très dépérissantes (>50% d’arbres morts ou très dépérissants) a été réalisé afin de comprendre les dynamiques post-dépérissement. 8 coupes rases ont été aussi visitées afin de cette fois-ci qualifier les pratiques courantes d’exploitation, dans un protocole tout à fait différent centré sur la thématique du tassement et de l’érosion et la plantation qui déterminera le futur peuplement (détaillé en IV - F).

Pour les peuplements, il a été choisi de regarder à la fois les arbres adultes et la couverture du sol, pour établir des liens entre sylviculture et vulnérabilité vis-à-vis des dépérissements et de la ressource en eau. Le protocole a été simplifié pour permettre des répétitions suffisantes par parcelle, et avoir ainsi une idée assez fidèle de chaque peuplement. Cela a rendu possible l’écriture de fiches “étude de cas” illustratives d’une situation particulière. Il a été choisi de ne pas quantifier précisément le dépérissement sur chaque arbre par des méthodes comme DEPERIS ou ARCHI, peu adaptées à une prise de données de cette ampleur compte tenu du temps restreint alloué à la partie terrain de l’étude. De plus, les peuplements très denses s’adaptent mal à ces évaluations de l’état des houppiers, souvent peu visibles.

NB : Dans la suite de l’exposé, le terme “sapin” sous-entend “sapin pectiné (*abies alba*), le sapin de Vancouver (*abies grandis*), bien que présent en plantation, n’a pas été considéré dans cette étude.

Le tableau 6 donne un aperçu des données qu’il a été possible de collecter lors de cette semaine de mesures (l’objectif initial d’échantillonnage étant de 6 à 8 placettes réparties sur 2 sites de 3 à 4 placettes chacun = 48 à 64 placettes sur 16 sites, **sur sapinières uniquement**)

Tableau 6 : répartition des paramètres des parcelles échantillonnées. **47 placettes sur 15 sites**

Altitude	Topoclimat	Densité /G	Nombre de placettes et index des parcelles
>800 m	Frais	Fermé	3 (1 site) - FN1
		Éclairci	3 (1 site) - E9
	Chaud	Fermé	4 (2 sites) - FN2 - FN3 => /!\ 2 placettes/site
		Éclairci	9 (3 sites) - E1 - E2 - E4
< 800 m	Frais	Fermé	10 (3 sites) - F6 - F7 - FN_ vendredi
		Éclairci	8 (2 sites) - E6 - E6_bis
	Chaud	Fermé	7 (2 sites) - F1 - FN6
		Éclairci	3 (1 site) - EN1

=> Placettes espacées de minimum 40 m, à minimum 20 m de la bordure, 3 ou 4 placettes par parcelle minimum **sauf FN2 et FN3**. Sur fond **rouge** les cas sous-représentés, en **vert** les cas justement représentés et en **bleu** les cas sur-représentés. Les peuplements dont l'index de parcelle a été mis en **rouge et en gras** sont des peuplements composés en majorité d'une autre essence que le sapin. Ils ont donc été retirés des analyses qui suivent et réduisent encore l'effectif des placettes, retirant complètement les altitudes >800 m chez les peuplements fermés.

Pour chaque peuplement, 2 à 4 placettes ont donc été réalisées pour diagnostiquer le peuplement et la régénération : un tour d'horizon relascopique au facteur 2 a permis d'obtenir surface terrière, essence et catégorie de diamètre des arbres. Cette méthode dite "à rayon fixe" a l'avantage de mieux inventorier les gros bois tout en étant plus rapide. Dans un rayon de 15m les arbres morts et très dépérissants, signifiant respectivement >30% d'aiguilles jaune-oranges pour le sapin et >50% du houppier mort pour les autres essences, ont été comptés. Ce rayon élargi permet de noter même les phénomènes diffus mais la cause de la mort de l'arbre n'a pas été notée : il est donc difficile de discriminer dans nos données les arbres morts pour cause climatique des arbres morts pour cause d'auto-éclaircies dans des peuplements trop denses. Les perches ont été comptées par essence dans un rayon de 10m. De la même manière, la régénération a ensuite été caractérisée sur cette surface fixe dans un rayon de 10m. Des taux de recouvrement ont été relevés, ainsi que la part de chaque essence ligneuse d'intérêt dans cette régénération. Deux strates ont été définies : hauteur inférieure puis supérieure à 2m. Cela permet de différencier la régénération "acquise", hors d'atteinte des ongulés et ayant manifestement bénéficié de conditions suffisantes pour leur développement, de semis potentiellement "en sursis" ayant très peu de chance d'atteindre le stade précomptable (diamètre de 17,5 cm). La végétation compétitrice (ronce, genêt à balais, fougère aigle...etc) est notée de la même manière pour pouvoir éventuellement la prendre en compte dans les facteurs explicatifs d'un

manque de régénération. Est indiqué également la place de cette végétation vis-à-vis de nos semis (au-dessus ou en-dessous), pour observer la gêne qu'occasionne cette dernière aux semis. Il est important de noter que cette mesure est à prendre en relatif et non en valeur absolue : en avril, la saison de végétation n'en est qu'à son commencement. Le recouvrement effectif de cette végétation sera bien plus important au cours de l'été.

A chaque peuplement, un diagnostic du sol à la tarière (ou par le biais d'une fosse en cas de blocage avant 30cm), de l'humus, et de la station à l'aide du guide des stations du Livradois-Forez (PNRLF, 2006) ont été effectués. Des Réserves Utiles (RU) ont été calculées à partir de ces données mais sont fortement sous-estimées : en effet la tarière ne permet pas d'apprécier la charge en éléments grossiers et un blocage précoce par ces éléments empêchait bien souvent d'atteindre la totalité de la profondeur prospectable. Le temps nécessaire pour creuser des fosses étant trop important, la tarière a été choisie malgré ces défauts en particulier concernant la RU.

Comme évoqué plus tôt, un repérage par photographies aériennes de 10 parcelles très dépérissantes a été réalisé et le protocole de caractérisation de la couverture du sol et des perches a été répété à l'identique des peuplements "sains", sur 3 à 4 placettes par peuplement. Un taux de recouvrement du bois mort au sol a été ajouté pour appréhender la pénibilité de pénétration pour d'éventuels ouvriers en travaux. Une fois dans chaque peuplement, un tour d'horizon relascopique a été réalisé pour dénombrer les arbres par essence, état sanitaire et catégorie de diamètre. L'altitude moyenne de ces peuplements est de 742 m, avec une seule parcelle au-dessus de 800m trouvée. Les parcelles sont toutes orientées à l'ouest, versant plutôt considéré comme "neutre" dans le guide des stations Livradois-Forez (PNRLF, 2006).

Enfin, sur le sujet du déficit hydrique, à l'aide de l'outil de simulation Biljou (Granier, 2012), qui modélise le bilan hydrique forestier, la vulnérabilité des peuplements de résineux "types" de la zone d'étude (incluant nos données de sol) face au changement climatique a été évaluée [Annexe 17]. Les résultats mettent en évidence un dépassement systématique du seuil de déficit hydrique en été, avec une réserve en eau très faible entre mai et août et d'autant plus forte pour des altitudes en dessous de 800m (+13% de jours de stress). Un effet atténuateur de l'altitude est néanmoins observé dans le cas des peuplements situés davantage en altitude. Un L.A.I. plus faible est également atténuateur. Un effet de la densité du peuplement est observé, mais ce dernier est un facteur aggravant parmi d'autres.

B - Etat des lieux des peuplements

Une analyse rapide de la structure des peuplements à dominance de sapin a été menée afin de caractériser ces derniers selon 3 modalités : des peuplements éclaircis et fermés, la proportion de sapin, et la topographie. 15 sites ont été étudiés avec 8 peuplements fermés et 7 peuplements éclaircis, dont 10 sapinières (>50% de sapin en surface terrière). Les données sont issues majoritairement de l'application du protocole "sylviculture" et peuvent être complétées par celles du protocole "captage" comprenant 3 autres sapinières. Le tableau visible en annexe 18 montre les caractéristiques de ces peuplements.

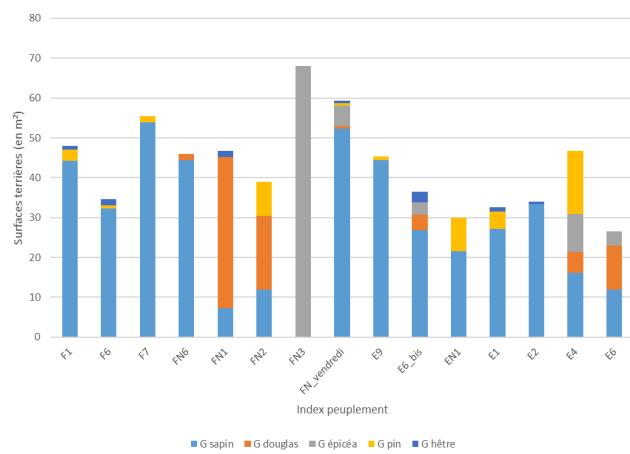


Figure 26 : Part des essences en surface terrière dans les peuplements

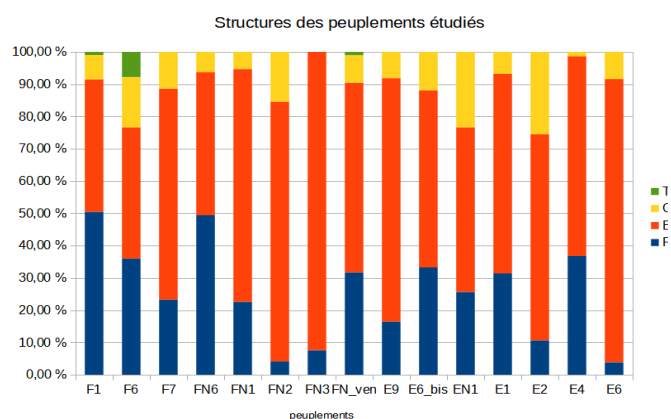


Figure 27 : Structure des peuplements fermés ("F...") et éclaircis ("E...")

En moyenne, le sapin pectiné représente 70% de la surface terrière des peuplements étudiés, au côté d'autres résineux (douglas, épicéa et pin sylvestre). Dans ces peuplements à dominance de sapin, le hêtre est très peu présent. Les surfaces terrière atteignent des valeurs très élevées toujours supérieures à 25m²/ha, et dont 60% sont au-dessus de 35 m², seuil considéré comme référence de sur-capitalisation pour les sapinières à bois moyen dans la partie II de ce rapport [Annexe 18]. Les sapinières étudiées sont donc en majorité très denses, particulièrement celles n'ayant pas subi d'éclaircies, puisque 89% des sapinières fermées sont sur-capitalisées, contre 29% pour les peuplements montrant des traces d'éclaircies.

La structure d'un peuplement est caractérisée à l'aide des catégories de diamètre :

- Petits Bois ("PB", dont le diamètre est compris entre 17,5 et 27,5 cm),
- Bois Moyen ("BM", entre 27,5 et 47,5 cm),
- Gros Bois ("GB", entre 47,5 et 67,5 cm),
- Très Gros Bois ("TGB", supérieur à 67,5 cm).

Ici le peuplement est majoritairement composé de Bois Moyens, dans une structure plutôt régulière et avec très peu de Gros-Bois et Très Gros Bois. Aucune différence notable n'est observable entre les peuplements éclaircis et fermés sur ce graphique, ce qui est dû à l'origine similaire des peuplements.

Cette structure est importante car elle révèle la "maturité économique" des peuplements du point de vue de la filière : en effet, les bois arrivés dans la catégorie "Bois Moyen" sont vus comme bons pour le sciage et sont donc susceptibles de coupes rases en cas de signes de dépérissement. Néanmoins, cela ne signifie pas que les arbres ont atteint leur valeur financière maximale pour le propriétaire.

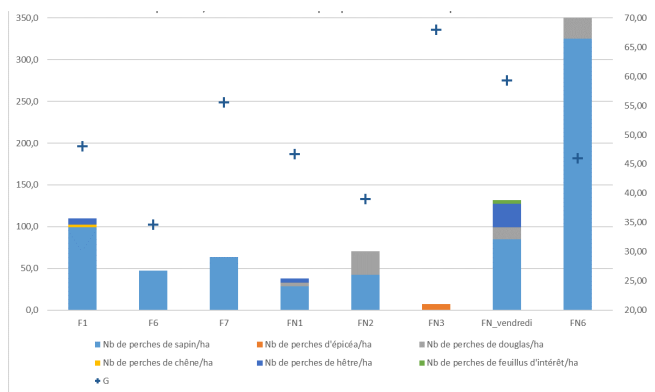


Figure 28 : nombre de perches par hectare des différents peuplements fermés par essence

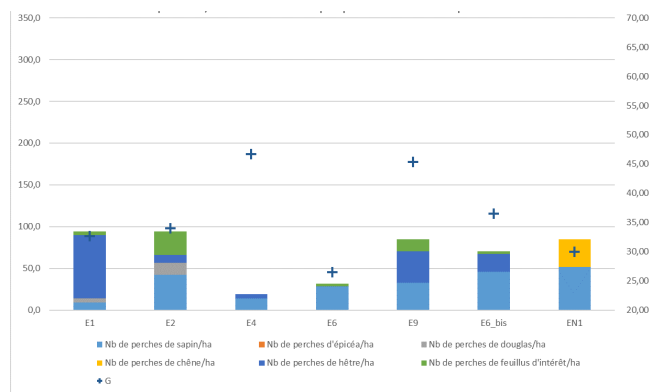


Figure 29 : nombre de perches par hectare des différents peuplements éclaircis par essence

Les perches (dont le diamètre est compris entre 7,5cm et 17,5 cm) sont considérées comme l'avenir du peuplement, dans le cadre d'un traitement irrégulier. Cependant, dans les peuplements étudiés, en régulier, les perches de sapin sont des arbres qui ont "perdu la compétition" et ne se sont pas développés dans un peuplement adulte très dense. Leur croissance très contrainte ne leur permet donc pas de participer à l'avenir du peuplement. Leur abondance néanmoins reflète la compétition existante dans les peuplements (figures 28 et 29). Il semble dans ce sens y avoir légèrement plus de diversité de perches dans les peuplements éclaircis, où la compétition est moins forte.

C - Etat des lieux de la couverture du sol

L'étude de la couverture du sol permet de connaître le risque qu'encourt une parcelle, en termes d'érosion, en cas de dépérissement, par exemple lors d'une coupe rase ou d'un effondrement du peuplement. La couverture herbacée et ligneuse couvre le sol et empêche les départs de sédiments. D'autre part, la régénération ligneuse permet de reconstituer les peuplements après un dépérissement.

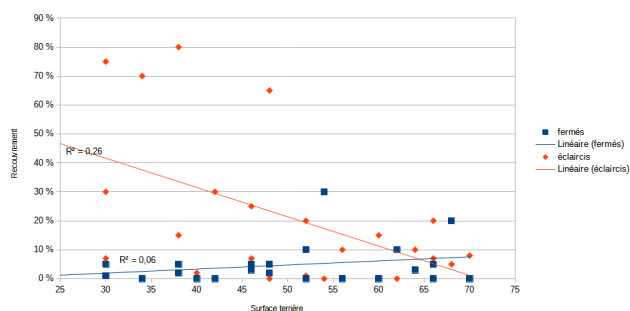


Figure 30 : Pourcentage de recouvrement du sol par la régénération de 10 cm à 2 m de haut

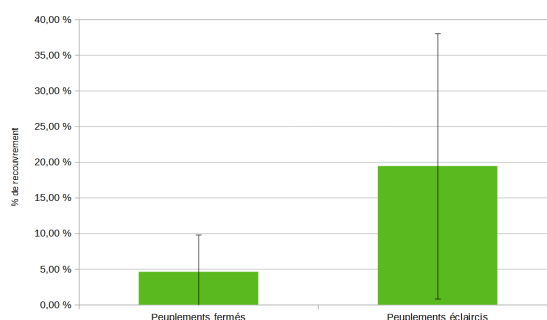


Figure 31 : Pourcentage de recouvrement moyen du sol par la régénération comprise entre 10 cm à 2 m de haut

Les peuplements ayant eu une intervention sylvicole (éclaircies) ont un recouvrement du sol par la régénération ligneuse significativement supérieur à ceux n'ayant pas connu d'intervention. La surface terrière a un

effet négatif sur la présence de régénération. La plus grande hétérogénéité de répartition des points dans les peuplements ayant connu des interventions sylvicoles peut être associée à une irrégularité des peuplements.

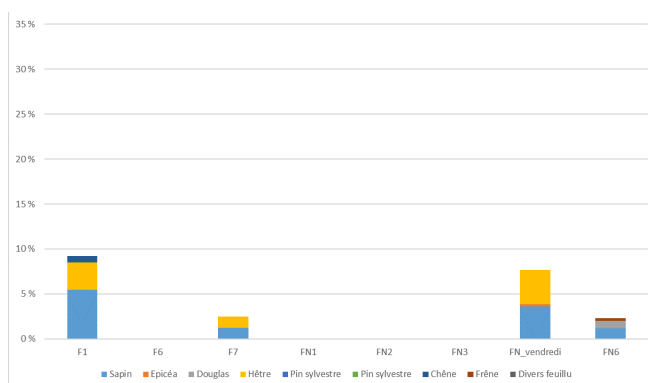


Figure 32 : Pourcentage de recouvrement de la régénération naturelle > 2 m des peuplements fermés

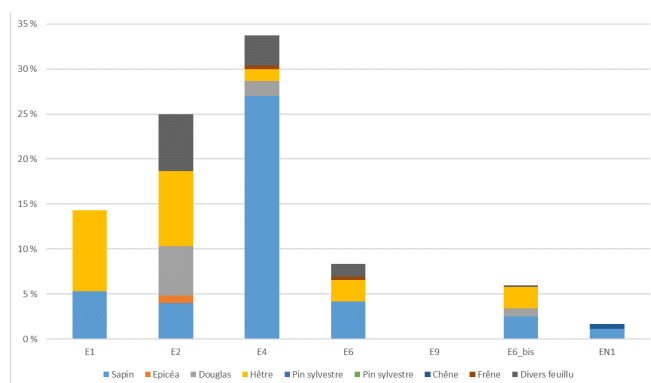


Figure 33 : Pourcentage de recouvrement de la régénération naturelle > 2 m des peuplements éclaircis

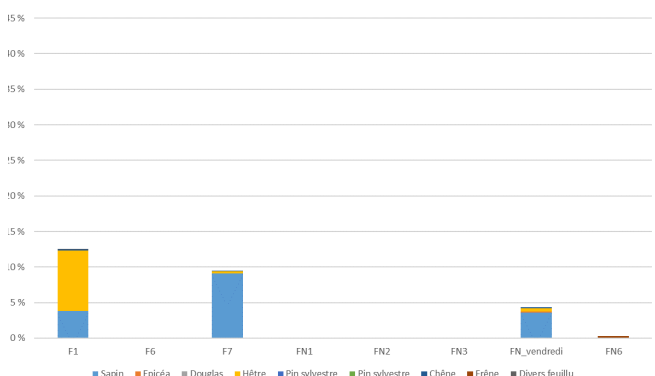


Figure 34 : Pourcentage de recouvrement de la régénération naturelle < 2 m des peuplements fermés

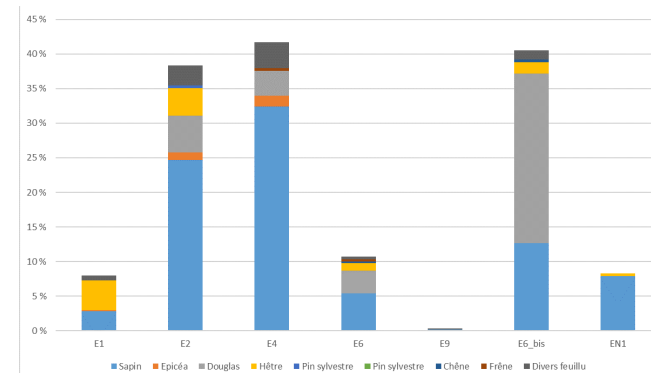


Figure 35 : Pourcentage de recouvrement de la régénération naturelle < 2 m des peuplements éclaircis

Dans les différents peuplements étudiés, les peuplements éclaircis présentent une meilleure régénération ligneuse à la fois quantitativement et qualitativement. En effet, outre une régénération plus abondante dans les peuplements éclaircis (jusqu'à plus de 40% de recouvrement contre 12% maximum), il y a une plus grande diversité d'essences, susceptible d'assurer une plus grande résilience d'un peuplement futur. Il y a notamment plus de diversité de feuillus (hors hêtre et frêne) et de douglas.

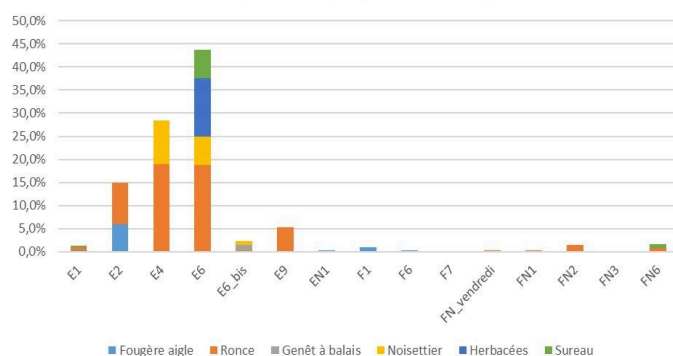


Figure 36 : Recouvrement par les différentes espèces végétales compétitrices (en % de la surface)

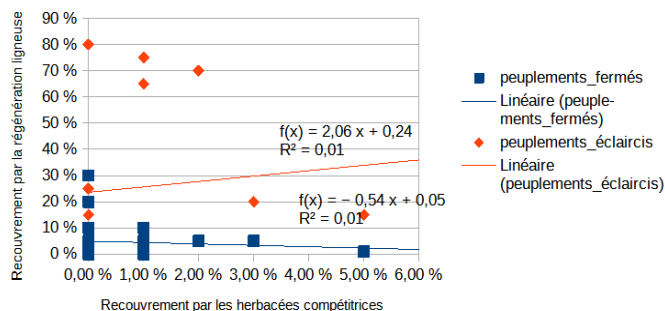


Figure 37 : Recouvrement de la régénération > 2 m en fonction du recouvrement par la concurrence herbacée

Les peuplements éclaircis présentent plus de recouvrement du sol par la concurrence herbacée (majoritairement de ronces), les peuplements éclaircis ont donc une plus forte rugosité. Il n'y a pas de fort effet de la concurrence herbacée sur la présence régénération dans les peuplements fermés ou éclaircis.

D - Etude des dépérissements

1. Etat des lieux des dépérissements

L'état des lieux du dépérissement permet de connaître l'état sanitaire des peuplements, leurs évolutions actuelles et futures et de connaître le risque de passage en coupe de ceux-ci. Il est à noter que les peuplements étudiés sont majoritairement des sapinières.

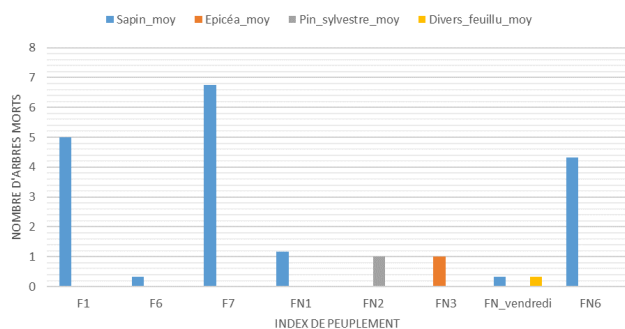


Figure 38 : Nombre d'arbres morts par essence dans les peuplements fermés

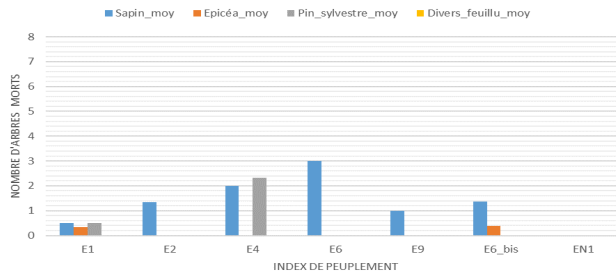


Figure 39 : Nombre d'arbres morts par essence dans les peuplements éclaircis

Le dépérissement est un phénomène difficile à quantifier en raison de son caractère très hétérogène, notamment sur le sapin. La présence de dépérissement dans un peuplement est donc une information plus fiable lors d'un inventaire, tel que celui qui a été réalisé, que la proportion d'arbres dépérissants. Le nombre d'arbres morts relevé dans les peuplements fermés est supérieur à celui dans les peuplements ouverts, ce qui peut être lié à différents facteurs : la densité du peuplement, entraînant plus de tiges comptées ou une mortalité naturelle liée à une sur-densité des peuplements.

Le résultat reste que les dépérissements touchent l'ensemble des peuplements où des mesures ont été réalisées (sauf la placette EN1), et concernent les sapins, puis les épicéas, pins sylvestres et divers feuillus.

Cependant, il ne faut pas oublier que les peuplements étant majoritairement composés de sapins, il n'est pas étonnant que cette essence soit aussi très représentée dans les dépérissements.

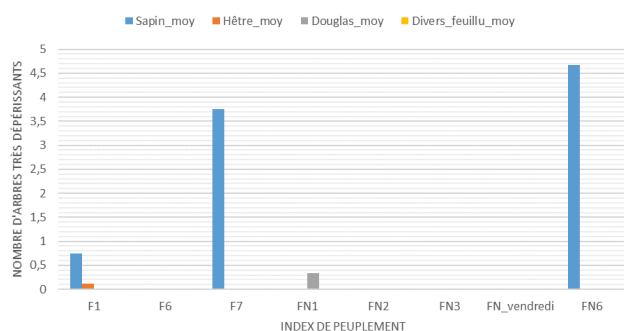


Figure 40 : Nombre d'arbres très dépérissants par essence dans les peuplements fermés

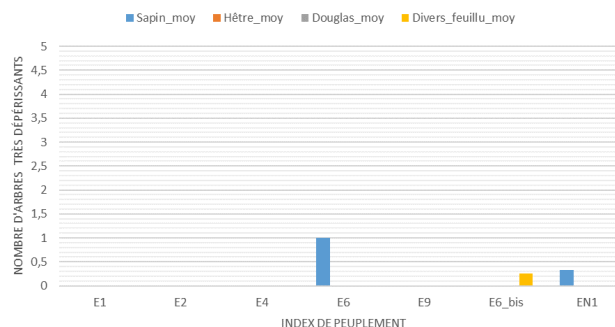


Figure 41 : Nombre d'arbres très dépérissants par essence dans les peuplements éclaircis

En ce qui concerne le relevés des arbres très dépérissants, les mêmes problèmes se posent dans l'évaluation de leur nombre que précédemment.

Tous les peuplements ne sont pas touchés par le fort dépérissement et la principale essence concernée est une fois encore le sapin.

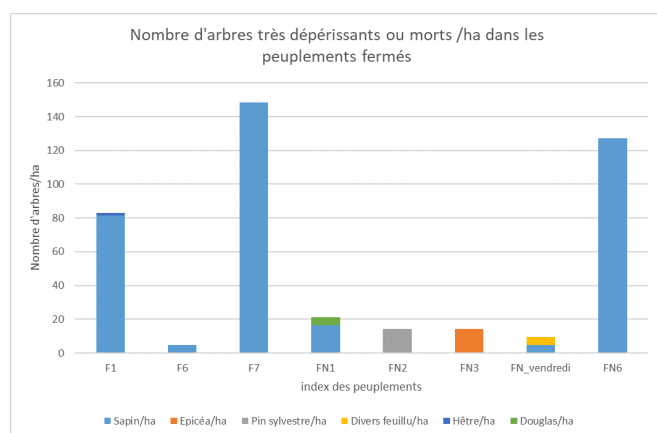


Figure 42 : Nombre d'arbres très dépérissants ou morts par hectare dans les peuplements fermés

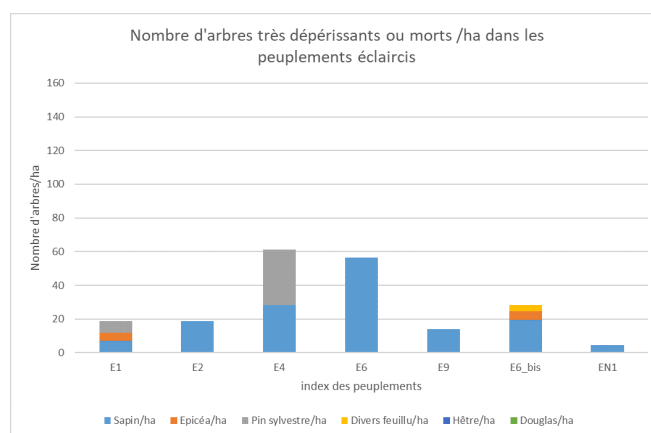


Figure 43 : Nombre d'arbres très dépérissants ou morts par hectare dans les peuplements éclaircis

Les mortalités et dépérissements touchent donc tous les peuplements, sans effet particulier de la sylviculture.

2. Causes du dépérissement

Concernant les causes possibles de ces dépérissements dans les sapinières, des comptages dans un rayon de 15m des arbres morts et des arbres dépérissants avec leur essence ont été réalisés. La surface terrière (traduisant de la compétition entre les arbres et la densité du couvert), la structure et la composition du peuplement ont été également relevés et un sondage tarière du sol a permis de calculer la réserve en eau du sol et de déterminer la

station forestière. Grâce aux logiciels d'analyse cartographiques, les altitudes et topoclimats ont été trouvés. Toutes ces données ont pu être analysées sur R, logiciel d'analyse statistique.

Une analyse des dépérissements a donc été tentée avec comme hypothèse initiale : l'altitude en interaction avec le topoclimat devaient être corrélés aux dépérissements du sapin. Cela est bel et bien observé si l'on retire les points de "captage" qui montraient des arbres morts à haute altitude mais ceux-ci étaient dûs à l'absence de sylviculture et aux auto-éclaircies : en effet les arbres touchés étaient systématiquement les plus petits bois de la parcelle, avec aucun arbre mort chez les plus gros bois. En retirant ces points sur cette matrice et ce cercle des corrélations, on observe une légère corrélation entre l'altitude et le nombre de sapins morts ou très dépérissants :

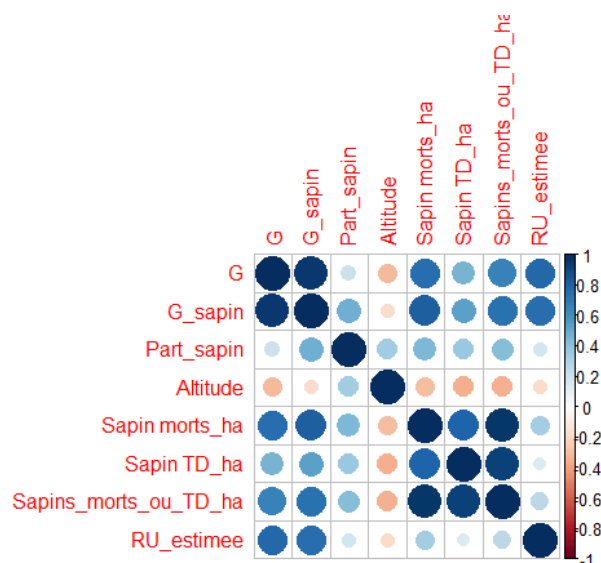


Figure 44 : matrice des corrélations des paramètres pouvant expliquer les dépérissements

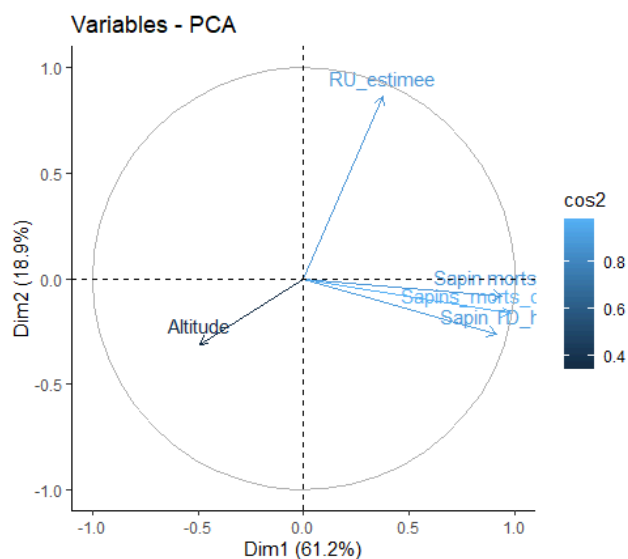


Figure 45 : Cercle de corrélation réalisée sur les paramètres pouvant expliquer les dépérissements

De plus, d'après la matrice et le cercle des corrélations, la surface terrière (G) semble corrélée au nombre de sapins morts et dépérissants. Pour vérifier ces deux premières impressions concernant l'altitude et le capital, des graphiques ont été réalisés. Ces graphiques mettent bien en évidence le manque de données dont l'analyse dispose. Les données des captages 12, 22 et 25, notés "C..." ont été ajoutées à l'analyse concernant la surface terrière.

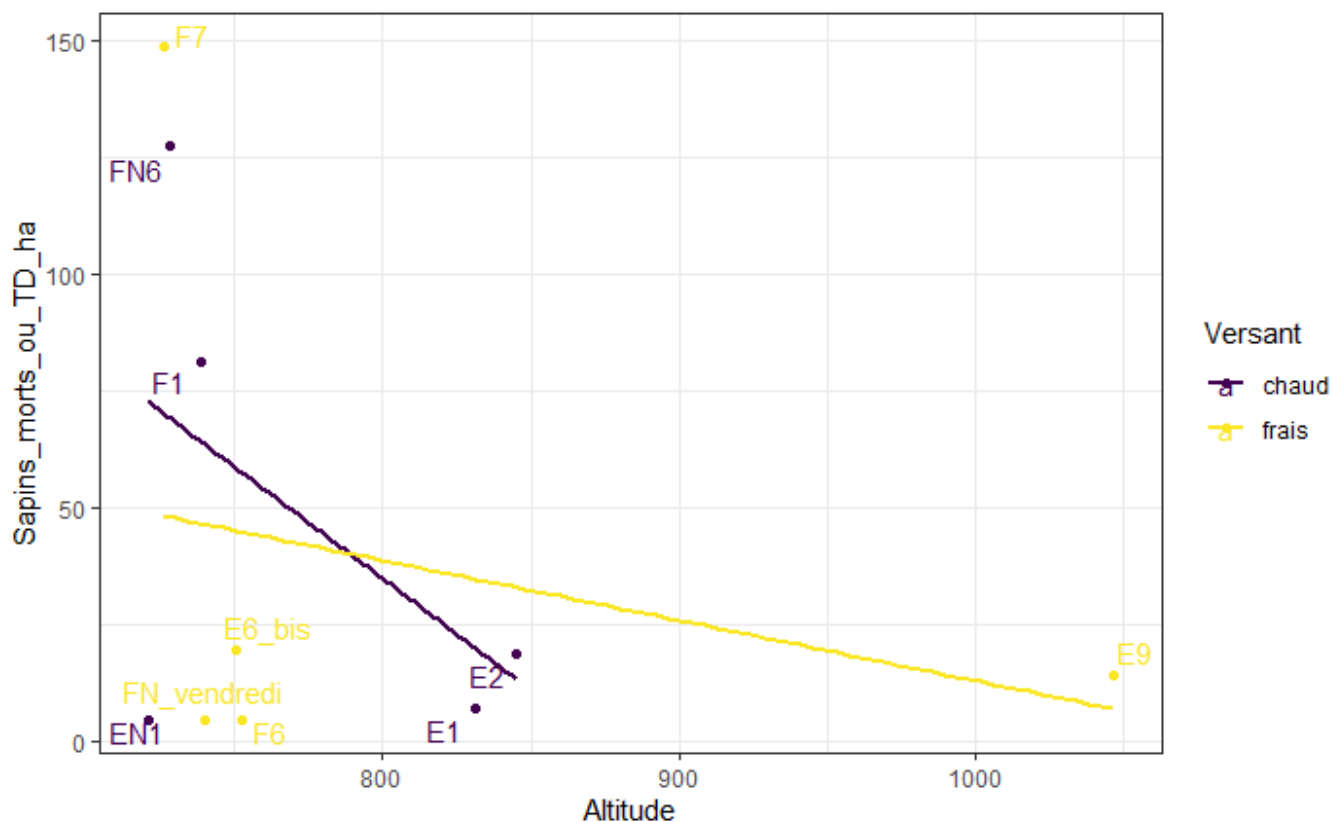


Figure 46 : Nombre de sapins morts ou dépérissants par hectare en fonction de l'altitude et du versant ("chaud" ou "frais"). Les points sont étiquetés par leur index de parcelle.

Sur ce graphique l'effet du versant est tronqué par le fait que l'échantillonnage n'ait pas été réalisé dans des tranches altitudinales plus précises, ce qui occasionne un manque de données de sapinières de versant chaud supérieur à 850 m. Néanmoins, il est possible de constater que les parcelles les plus dépérissantes sont également les parcelles les plus basses en altitude (< 750m).

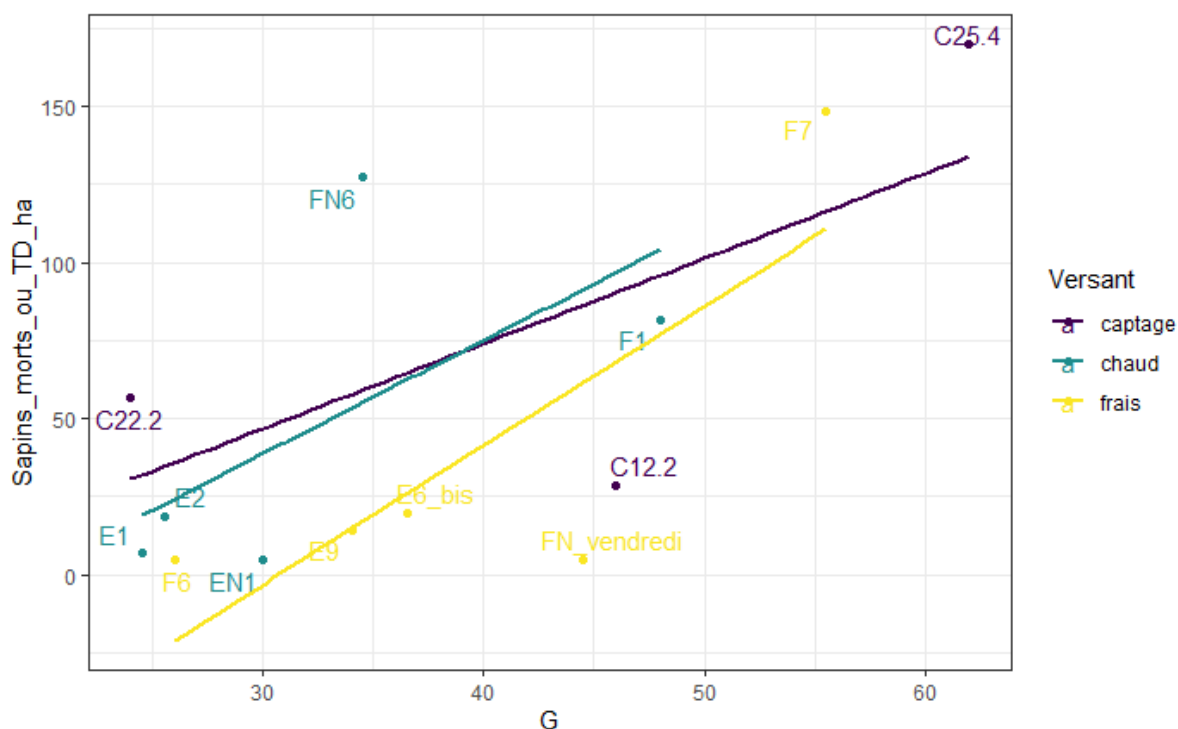


Figure 47 : Nombre de sapins morts ou dépérissants par hectare en fonction de la surface terrière “G” et du versant (“chaud” ou “frais”). Les points sont étiquetés par leur index de parcelle.

Il est notable sur ce graphique que l’effet de la surface terrière semble corrélée au dépérissement et que l’effet du versant est net, avec une hausse du nombre d’arbres comptés comme morts ou dépérissants sur les versants chauds. La sur-capitalisation due à l’absence d’éclaircies dans les sapinières est selon cette analyse le principal facteur des dépérissements du sapin pectiné. Il faut pourtant faire attention à cette conclusion, car les dépérissements sont comptés en nombre de tiges/ha et que la surface terrière reflète entre autres la densité du peuplement en tiges. Il est difficile de décorrélérer ces deux variables puisqu’il est impossible de déterminer le nombre de tiges/ha à partir de la surface terrière obtenue par tout d’horizon relascopique.

Cependant, avant de conclure quant au résultat de ces analyses, il est important de rappeler un point important soulevé plusieurs fois au cours de l’étude : les données collectées sont manifestement trop lacunaires et peu équitables pour répondre avec précision à la question des causes du dépérissement, seules des tendances pourront donc être obtenues.

Les conclusions de cette analyse sont mitigées : si un effet de la surface terrière semble se dessiner, ces conclusions s'appuient sur trop peu de cas et sur un échantillonnage qui n’est pas parvenu à ses objectifs de représentativité. Le test statistique réalisé entre surface terrière et nombre de sapins morts ou très dépérissants est significatif et respecte assez bien les hypothèses du modèle (Annexe 19). Malgré cela, en toute rigueur vis-à-vis du faible échantillonnage, aucune cause des dépérissements n’a pu être scientifiquement démontrée sur ce territoire.

E - Focus sur les peuplements très dépérissants

Dans un second temps, l’étude se focalise sur les peuplements très dépérissants, pour lesquels plus de 50% des arbres sont dépérissants ou morts (certains des peuplements étudiés dans cette partie n’atteignent cependant pas ce seuil, le peuplement le moins dépérissant avait 30% de dépérissement). En effet, étudier ces cas extrêmes de dépérissement permet de mieux s’y préparer. Les peuplements étudiés ici sont des sapinières.

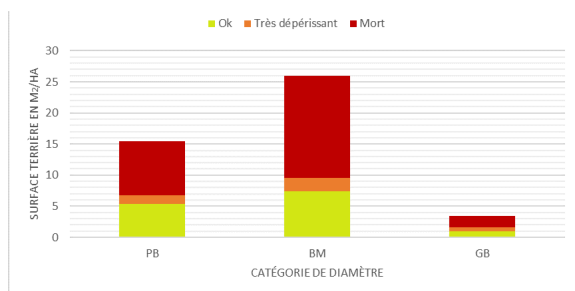


Figure 48 : Degré de mortalité du sapin en fonction de la catégorie de diamètre (en surface terrière)

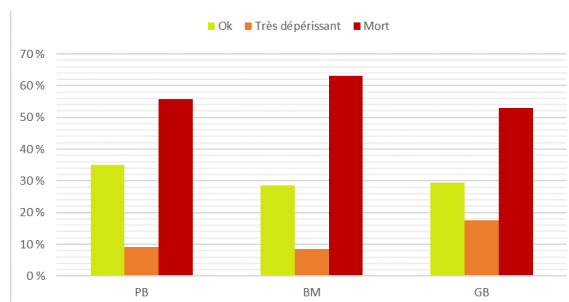


Figure 49 : Degré de mortalité du sapin en fonction de la catégorie de diamètre (en % de chaque degré de mortalité pour chaque catégorie de diamètre)

La répartition des arbres pour ces parcelles est donnée par les graphiques ci-dessus. La surface terrière moyenne de ces peuplements est de 45m²/ha en comptant les arbres morts, ce qui montre que ces peuplements sont, ou ont été, très denses. Les proportions d'arbres "ok" (pas ou peu dépérissants), très dépérissants, ou morts, restent les mêmes entre les différentes catégories de diamètres dans les peuplements très dépérissants. Il n'y a donc pas a priori de catégorie de diamètre plus "épargnée" qu'une autre.

Ces peuplements très dépérissants sont à étudier avec un regard particulier. En effet, ce sont probablement les peuplements qui passeront en coupe le plus rapidement, et pour lesquels les questions de renouvellement sont les plus importantes. La régénération a été découpée en trois classes : les semis compris entre 10 cm et 2 m de haut, la régénération de plus de 2 m de haut et de diamètre inférieur à 7,5 cm, et les perches.

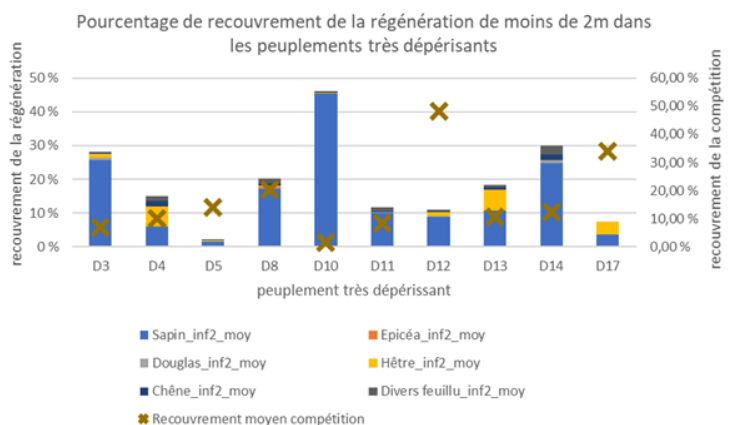


Figure 50 : Pourcentage de recouvrement de la régénération de moins de 2m dans les peuplements très dépérissants

Les peuplements très dépérissants sont plus ouverts que les autres, ce qui pourrait permettre d'atteindre un nombre de semis plus important de part une moindre compétition pour l'accès à la lumière. Pour ces parcelles, le taux de recouvrement moyen des semis de moins de 2 m est de 22 %. Ce nombre est supérieur au taux de recouvrement de la régénération dans les peuplements fermés (3%), mais reste inférieur au taux de recouvrement moyen dans les peuplements éclaircis (27%). Il y a donc bien un développement de semis dans les peuplements étudiés, notamment

du sapin (71 % de la catégorie) et du hêtre (9%). Avec moins de 30-40% de recouvrement sur les peuplements étudiés, cette régénération n'est pas suffisante pour assurer seule le renouvellement forestier, mais peut être utilisée comme bourrage dans le cadre de régénération assistée. L'étude montre que la régénération de moins de 2 m dépend fortement de la compétition (ronce, noisetier), comme le confirme la relation linéaire obtenue par analyse statistique R : recouvrement de la régénération de moins de 2m $\sim 31.498 - 60.111 * \text{recouvrement de la végétation compétitrice}$ ($r^2 = 0,3336$). Plus il y a de compétition, moins il y a de régénération.

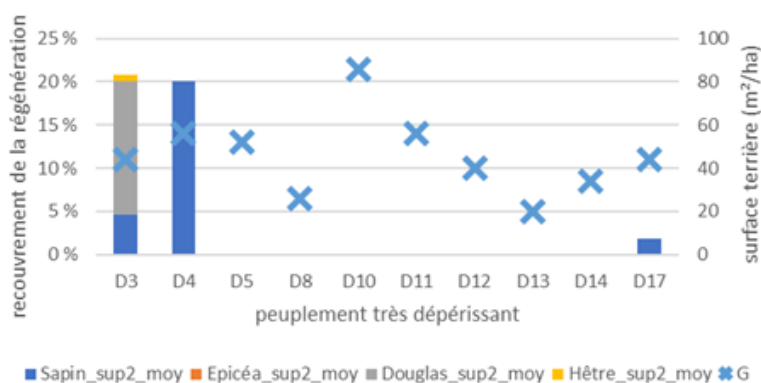


Figure 51 : Pourcentage de recouvrement de la régénération de plus de 2 m dans les peuplements très dépérissants

La régénération de plus de 2 m peut être considérée comme plus ou moins acquise. Cette catégorie est peu présente dans nos relevés (6% de recouvrement en moyenne). En effet, même si la lumière dans les peuplements dépérissants est suffisante pour la régénération, il faut plusieurs années pour dépasser les deux mètres de hauteur. Or, les surface terrière relevées sont très élevées (46 en moyenne), ce qui signifie que les peuplements étaient très fermés. L'analyse sur R montre que ce paramètre explique effectivement bien la présence de régénération de plus de 2 m, comme le montre la relation obtenue : recouvrement de la régénération supérieure à 2m $\sim 23,53 - 0,37 * G$ ($r^2 = 0,2526$).

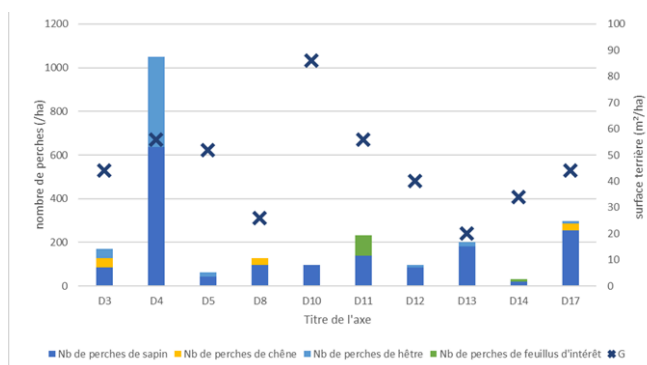


Figure 52 : nombre de perches par hectare dans les peuplements très dépérissants

Enfin, le nombre moyen de perches à l'hectare sur les peuplements dépérissants est de 237 (toutes qualités confondues), ce qui est faible, d'autant plus que certaines de ces perches sont des arbres issus de la plantation initiale des parcelles qui n'ont pas poussé du fait de la compétition. Le nombre de perches reste tout de même plus faible lorsque la surface terrière augmente, comme le montre la relation obtenue sur R : nombre de perches $\sim$

$275,67 - 3,72 \cdot G$ ($r^2 = 0,2732$). Si le peuplement devait être régénéré en futaie régulière de sapin, il faudrait au moins 1500 tiges au stade perche (CNPf, 2020).

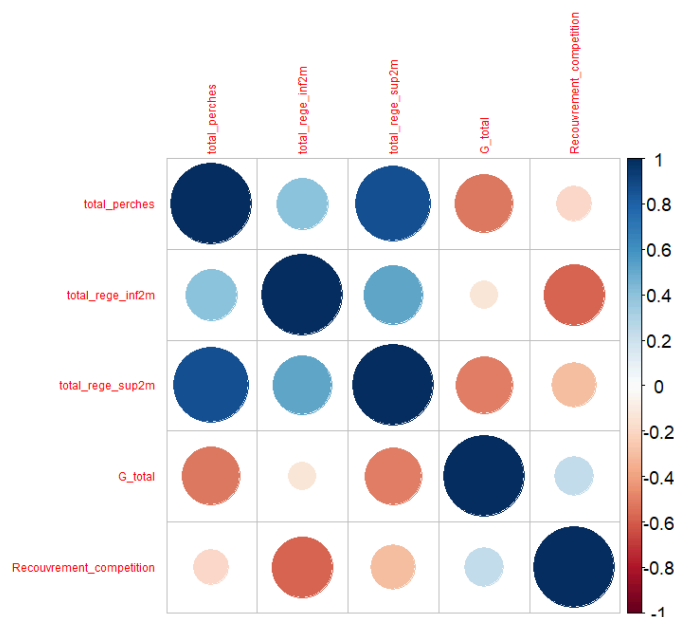


Figure 53 : matrice des corrélations des paramètres pouvant expliquer la régénération:

En conclusion, la forte compétition due à une surface terrière très élevée sur les peuplements étudiés a des conséquences sur la régénération, qui reste faible dans la plupart des cas. Il est également important de noter une grande variabilité entre les peuplements. La matrice des corrélations ci-dessus montre bien que des surfaces terrières G et des recouvrements de compétition élevés sont liés à un nombre de perches et à un recouvrement de la régénération faible.

Néanmoins, cette régénération est présente, et il serait donc intéressant de la prendre en compte et de la favoriser lors des travaux, car elle participe à l'avenir du peuplement. Il est de plus possible d'attendre quelques années après une coupe dans l'espoir d'obtenir plus de régénération ligneuse d'intérêt, ce qui pourra ensuite permettre d'opter pour un enrichissement par placeaux, moins coûteux. Il faudra toutefois surveiller le développement de la végétation compétitrice, qui semble déjà présente dans les peuplements très dépérissants, avant la coupe. La régénération permet également de limiter les ruissellements et l'érosion sur les parcelles. L'absence de couvert forestier après les coupes a aussi des conséquences sur la régénération, de par la disparition de l'ambiance forestière, et un ensoleillement favorable à la végétation compétitrice, notamment le genêt. Éviter les coupes rases lorsque cela est possible, et réaliser des éclaircies régulières, serait donc favorable à cette régénération.

F - Exploitation - tassement

Les forêts du Livradois Forez, sont donc touchées par de forts dépérissements. Or, ces dépérissements peuvent souvent déboucher sur une coupe rase sanitaire, suivie ou non de plantation. Outre leurs conséquences sur les paysages, ces coupes peuvent avoir des conséquences sur les sols, l'eau, et l'avenir du peuplement. Le tassement des sols est une problématique centrale lors de l'exploitation, car il peut modifier le cheminement de

l'eau dans le bassin versant. En limitant son infiltration dans le sol, le tassement conduit à augmenter le ruissellement de l'eau vers l'aval.

→ Qu'est ce qu'un tassement et quels sont les facteurs aggravants

Le tassement est une pression exercée par des engins d'exploitation ou de broyage qui conduit à réduction de la porosité du sol et à sa déstructuration (Pischedda, 2009). La dégradation des sols par tassement entraîne une diminution, voire une perte des fonctions qu'ils assurent (Venetier, et al., 2023). Le tassement diminue la macroporosité du sol (Pischedda, 2009) avec pour conséquences une circulation de l'eau amoindrie dans le sol, des engorgements et asphyxies possibles, un développement des racines plus compliqué. Entre 80 et 90% du tassement s'effectue dès les premiers passages (Pischedda, 2009). Le tassement est donc un enjeu majeur de la préservation des sols et de ses fonctions.

Les conséquences du tassement des sols forestiers sont plus ou moins durables selon le type de dégât engendré (Rotaru, 1985) mais un sol déstructuré le reste longtemps. Des perturbations peuvent être observables jusqu'à 50 ans après exploitation (ONF, 1999). De plus, un travail du sol ne permet pas de compenser totalement les dégâts causés (Pousse et al., 2023).

La sensibilité des sols au tassement dépend de différents facteurs : charge en cailloux, texture, humidité. Un sol est d'autant moins sensible au tassement que la teneur en éléments grossiers est importante (charge en cailloux). La texture dominante permet également de rendre compte de la sensibilité au tassement (figure 54). Par ailleurs, plus un sol est humide, plus il sera sensible au tassement et ce dernier sera irréversible (Cacot, 2001). Les sols de notre zone d'étude sont des sols avec une dominance sablo-limoneuse (56 %) puis sableuse (20%). Ce type de sol est donc réputé être peu sensible au tassement.

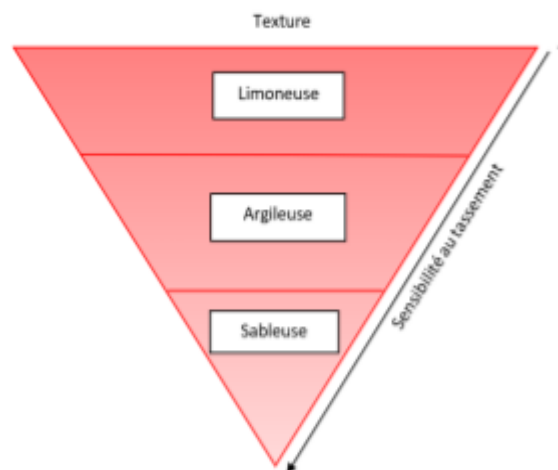


Figure 54 : Sensibilité du sol au tassement en fonction de la texture du sol

Le tassement a également des conséquences sur la croissance des arbres puisqu'il est responsable d'une diminution de la croissance en diamètre et en hauteur (Pousse et al., 2023).

→ Importance du tassements dans les coupes rases parcourues

Afin d'évaluer le tassement des parcelles en coupes rases, des transects de maximum 10 points ont été effectués, espacés de 10 m chacun. L'appréciation du tassement a été laissée à la liberté de l'opérateur (sol "tassé" ou "non tassé") dans un rayon de 1 mètre. Bien que cela puisse sembler subjectif, en cas de tassement, ce dernier est bien visible. Ainsi l'appréciation peut être jugée comme correcte. En plus de ce transect, une description de la coupe a pu être prise en note afin de juger les pratiques d'exploitation et la vulnérabilité des sols qui en résulte.

Les 8 coupes rases visitées, dont une plantée en pin laricios de Corse et douglas, ont livré des informations quant aux pratiques d'exploitation les plus courantes sur le territoire. En premier lieu, les coupes rases présente un sol tassé sur en moyenne 49% de leur surface, ce qui est important. En effet, 5 coupes sur les 8 ne présentaient pas de cloisonnements, les engins circulant sur l'entièreté de la parcelle et engendrant en moyenne 63% de tassement, contre 31% pour les parcelles cloisonnées.

Les coupes rases observées présentaient presque toutes des andains (7 sur les 8), dans le sens de la pente pour 6 d'entre eux, avec pour la moitié d'entre elles de la terre visible à l'intérieur. Cela signifie que l'horizon supérieur du sol a été décapé à l'aide d'une pelle, exportant dans les andains l'humus et avec lui ses nutriments essentiels et une partie des capacités de stockage de l'eau disponible pour les plantes. Le sol est également fortement perturbé par cette opération, entraînant une mauvaise régénération des ligneux (sauf pins) et un risque d'érosion accru. Dans le cas de la coupe rase reboisée, un travail du sol avait décompacté le sol en surface en creusant de profonds sillons dans lesquels l'eau stagnait, montrant les limites du travail du sol sur le tassement : tassé en profondeur, la capacité d'enracinement n'en est que partiellement restaurée et le sol est fortement perturbé. Un "effet bassine" est généré, avec un ennoiment-anoxie des racines potentiellement délétère. Le mieux est donc de ne pas tasser initialement le sol, la solution curative observée étant peu performante.

→ Conséquences du tassement des sols forestier sur la ressource en eau : le test Beerkan

Pour un sol donné, le tassement augmente la masse volumique du sol et diminue la capacité de rétention de l'eau dans le sol (Bouthier et al., 2022). Des tests d'infiltrométrie Beerkan ont été effectués afin d'illustrer les conséquences du tassement sur l'infiltration de l'eau. Ce test vise à comparer le temps d'infiltration d'un litre d'eau entre une zone tassée et non tassée. Le test consiste à verser plusieurs fois un litre d'eau dans un tube en PVC enfoncé dans un sol préalablement aplani et débarrassé de sa litière. On mesure ensuite la durée nécessaire à l'infiltration après plusieurs litres versés.

Tableau 7 : Temps moyen d'infiltration d'un litre d'eau dans le cadre d'un test Beerkan
(moyennes sur 3 parcelles différentes)

	Sol non tassé	Sol tassé dans une coupe rase
1ère répétition	21,69 secondes	2 minutes 7,29 secondes
2e répétition	33,49 secondes	23 minutes 26,9 secondes

Les résultats du tableau 7 permettent de mettre en évidence que le tassement réduit fortement l'infiltration de l'eau dans le sol. Dans le cas de fortes pentes comme sur les pentes du Forez, le tassement contribue à augmenter le ruissellement, à réduire l'infiltration de l'eau dans le sol, et favorise l'érosion des sols (ONF, 1999). Cela aggrave des inondations en aval en cas de fortes intempéries mais aussi une dégradation de la qualité des cours d'eau par un apport trop important de sédiments (colmatage). Ces conséquences sont d'autant plus importantes en l'absence de végétation pour ralentir les écoulements.

→ Comment limiter le tassement pour préserver les sols forestiers

La prise de conscience de l'importance de limiter le tassement des sols forestiers semble être admise sur le territoire, et les conseils suggérés par le CNPF semblent trouver leur place auprès des propriétaires (Monnet, 2025). Pour limiter les impacts du tassement des sols forestiers, les précautions suivantes sont à prendre (ONF, 1999) :

- travailler autant que possible en conditions sèches ou par temps de gel
- éviter la circulation des engins au sein de la parcelle, d'où la nécessité d'utiliser des cloisonnements
- débarder après dépôt des rémanents sur les cloisonnements
- utiliser du matériel limitant le tassement (voir guide : ("Pratic'sols - Guide sur la praticabilité des parcelles forestières," 2021)

Lors de la création du réseau de desserte, une attention particulière devra être portée à l'orientation des pistes et chemins afin que ceux-ci ne soient pas dans le sens de la plus grande pente pour limiter le ruissellement et

l'érosion. Sur les pistes forestières en pente, des ouvrages (merlons, revers d'eau...) sont préconisés afin de limiter le ruissellement et les phénomènes d'érosion, ce qui limitera les dégâts sur les infrastructures et la dégradation des cours d'eau. Une recommandation qui pourrait être faite serait de tracer et respecter des cloisonnements d'exploitation afin de préserver au mieux les sols forestiers.

Le principal enjeu semble donc concerner les coupes rases. En effet, même si des cloisonnements sont marqués lors de leur exploitation, leur localisation après coupe ne semble pas être réalisée (Helary, 2025) et leur respect ne semble pas être systématique.

Des pistes d'amélioration pourraient consister à des contrôles lors des exploitations ou post-exploitations en relevant le passage des engins et en s'assurant que la surface circulée n'excède pas celle des cloisonnements (10 à 15% de la surface). Le maintien des cloisonnements après coupe rase peut être facilité par marquage GPS de ceux-ci ou visuel avec des piquets.

3. Anticipation, gestion de crise et risque

La bibliographie ainsi que l'analyse des données collectées sur la zone d'étude indiquent un dépérissement du sapin qui tend à se généraliser à des altitudes de plus en plus élevées. Du fait de la grande vulnérabilité des peuplements décrits, une anticipation par le biais d'actes sylvicoles respectueux de la régénération en place et des sols est conseillée. Le renouvellement diversifié avec des essences plus résistantes au stress hydrique doit s'amorcer. Il est recommandé de favoriser la régénération naturelle dès maintenant en amorçant une plus grande mise en gestion des parcelles privées. Il est possible de s'appuyer sur le guide rédigé dans le cadre de l'observatoire des peuplements post-tempête de 1999 (Laurent and Lacombe, 2021).

4. Impact de la micro propriété, levier d'action

D'après la communauté de commune d'Ambert Livradois Forez (Ambert-Livradois-Forez, 2019), le territoire compte 34 000 propriétaires forestiers, avec une propriété de surface moyenne de 0,4 ha, issue des partages lors des successions.

Les exploitations et la gestion courante ayant toujours des coûts fixes (déplacement des engins par exemple), les coûts à l'hectare sont proportionnellement plus élevés pour les petits propriétaires. Cette situation résulte en une gestion minimale, qui se résume souvent en une série de coupe rase-plantation, sans éclaircies ni autres travaux. Les peuplements sont plus sensibles car trop denses et monospécifiques. Les propriétaires ne peuvent profiter de l'intérêt de l'étalement des revenus permis par les éclaircies, et l'impact paysager et environnemental de cette gestion par coupes rases peut s'avérer problématique. La multiplicité des propriétaires, avec des objectifs parfois différents, peut poser des difficultés au niveau des actions collectives, telles que la protection du milieu et de l'eau par exemple.

Afin de réduire ces inconvénients, des opérations de regroupement du foncier forestier peuvent être envisagées dans la continuité de celles initiées par le CNPF il y a quelques années. Plusieurs propriétaires peuvent par exemple se rassembler pour avoir accès à un gestionnaire, puis pour pouvoir réaliser des interventions sylvicoles pour un coût moindre. Un propriétaire forestier pourrait aussi racheter des propriétés à proximité afin d'avoir une plus grande surface à passer en travaux. L'association présente sur la ComCom n'est pas tournée vers la mise en commun des moyens de gestion. Cela pourrait être une piste à développer. Le conseil départemental du Puy-de-Dôme propose aussi une aide au regroupement du foncier forestier qui peut être un avantage pour une telle démarche.

5. Analyse économique

A savoir:

- **taux d'actualisation** : donnée permettant de convertir la valeur future en une valeur actuelle.
Le taux d'actualisation rend compte de "l'impatience de l'investisseur" à toucher son argent ainsi que l'aversion au risque de l'agent économique.
Le taux d'actualisation n'est pas à confondre avec l'inflation. L'inflation est la perte de valeur de la monnaie. Ainsi le taux d'actualisation et d'inflation ne sont pas la même chose.
Le taux d'actualisation est unique à chaque agent économique, une personne qui effectue de l'achat revende sur les marchés financiers n'aura pas le même taux d'actualisation que le forestier. Il est propre à chaque individu. Un propriétaire plus "patrimoniale" (c.-à-d. moins intéressé par la rentabilité) pourrait utiliser un taux d'actualisation de 1 ou 2%. Un propriétaire plus impatient qui cherche de la rentabilité immédiate pourrait avoir un taux de 3, 4, voire même 5%.
- **investisseur rationnel**: l'investisseur rationnel base ses choix d'investissement sur une maximisation de son utilité et sous contrainte budgétaire. Dans le cas de l'étude, l'hypothèse est que le profit est égal à l'utilité de l'agent économique. Ainsi, l'investisseur cherchera à maximiser son profit financier.

Des analyses économiques ont été réalisées. Différents scénarii ont été simulés : la première simulation fait l'hypothèse d'une coupe rase/plantation dès l'instant 0, la deuxième hypothèse est une coupe rase après un certain temps et plantation, et la dernière consiste à essayer de récupérer le peuplement avec des éclaircies et avoir de la régénération naturelle. La méthode de calcul, les hypothèses et les résultats précis sont en annexe [Annexe 20]. L'analyse est faite dans un état du monde sans risque, et suppose que le peuplement suivant est de l'épicéa, ce qui est à nuancer au vu du changement climatique. Néanmoins, cette analyse permet tout de même d'éclairer la question du rythme des éclaircies et des régénérations, et ce à partir de données déjà existantes issues d'un autre projet réalisés par les étudiants d'AgroParisTech campus Nancy.

Suite à l'analyse, il en est conclu que d'un aspect purement financier, il est plus intéressant d'effectuer des éclaircies avec de la régénération naturelle, plutôt que de réaliser une coupe rase/plantation (de coût 3000euros/ha) à l'instant 0, et plutôt que d'attendre avant de réaliser coupe rase/plantation lorsque le taux d'actualisation est faible. Cependant, dès 3 % de taux d'actualisation, il est plus rentable de passer en coupe rase dès maintenant. Cette analyse permet d'expliquer ce qui est actuellement observé, en supposant que les personnes soient d'un point de vue financier, entièrement rationnelles : les propriétaires ayant un "taux d'impatience" élevé font couper leurs arbres et replantent.

Cependant, la différence entre le bénéfice actualisé en séquence infinie pour le scénario avec éclaircie, et celui sans, est faible, même pour un taux d'actualisation à 4 %. En prenant en compte les aménités liées au couvert forestier, il est possible que le réel bénéfice du point de vue bien-être social pour le scénario soit supérieur à la coupe rase maintenant/plantation. Il faudrait tout de même comptabiliser les coûts que le micro parcellaire occasionne, mais aussi le risque pour les peuplements lorsque l'on réalise les éclaircies.

Il pourrait être intéressant de poursuivre l'analyse économique avec des hypothèses plus robustes, de manière à estimer quel serait le montant idéal de subvention lors des exploitations pour favoriser la gestion des peuplements plutôt que de réaliser une coupe rase immédiatement.

V - Acidité de l'eau (et des sols forestiers)

L'acidification est un processus qui peut se produire naturellement dans les sols forestiers. Néanmoins, ce problème a été soulevé dans plusieurs communes du PNR Livradois-Forez, comme dans la commune de Beurrières. Les eaux souterraines captées à faible profondeur en milieu granitique dans le BV d'étude, présentent toutes le même faciès physico-chimique. En considérant l'ensemble des paramètres physico-chimiques, les eaux brutes ne

présentent pas de valeurs inférieures aux limites et références de qualité pour la consommation humaine, hormis pour la conductivité et le pH (SIAEP Beurrières Chaumont, 2018).

Les causes de cette acidification sont liées à deux facteurs : les pluies acides et la nature acide du sol et sous-sol de la région, étant donné que cette acidité naturelle ne permet pas de tamponner les polluants atmosphériques tels que les acides forts, nitriques et sulfuriques dissous (Ranger et al., 2009).

D'une part, il est possible d'affirmer que l'origine des pollutions atmosphériques est due à des dépôts d'origine des émissions industriels, même si des réductions de 50 % et de 90 % des émissions de dioxyde de soufre, par exemple, ont été signalées au niveau international et national, respectivement depuis la fin du XXe siècle (Pierret et al., 2019). Mais ce n'est pas le cas pour tous les composés pouvant contribuer aux précipitations acides étant donné que les émissions anthropiques d'oxydes d'azote sont en augmentation depuis 1970 (Pierret et al., 2019; United Nations Environment Programme and Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2024). Cependant, le problème réside dans le fait que, comme le SO_2 , les NO_x peuvent se déplacer dans l'atmosphère et se déposent finalement loin de leur lieu d'émission, comme les forêts nationales (Dambrine Etienne et al., 1999; Fermond et al., 2013; Pierret et al., 2019; United Nations Environment Programme and Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2024).

D'autre part, certaines pratiques forestières (export des rémanents...) accentueraient le problème d'acidification. En effet, elles contribueraient à la détérioration de l'état nutritionnel des sols forestiers en amoindrissant la biodisponibilité des minéraux (Ranger et al., 2009). Par exemple, les mesures physico-chimiques reportées et prises dans le bassin versant de la Dore (Puy-de-Dôme) indiquent qu'il peut y avoir des relations entre le niveau d'acidification, l'augmentation de la teneur en matière organique d'un sol, et la présence de cultures des essence comme le douglas dans l'horizon de surface (Sauvanet, 2022). Les pratiques de coupe rase avec prélèvement de rémanents peuvent aussi être une source de diminution du pouvoir tampon des sols forestiers (Thüler, 2014; Sauvanet, 2022). Il a été rapporté que les plantations des essences résineux comme des sapinières et pessières, contribuent de façon importante à l'acidification du sol par ses litières et pluviolessivat, provoquant un affaiblissement nutritionnel du sol (Figure 55) (Pierret et al., 2019). De surcroît, cette détérioration peut devenir un risque pour les eaux souterraines en milieux forestiers puisque la migration d'eau acide vers la nappe phréatique est possible, et affecte par conséquent la qualité de l'eau dans la forêt et les communautés locales (figure 55) (DRAAF, 2019). La densité et la monospécificité peuvent être des facteurs qui aggravent d'autant plus le phénomène d'acidité possible avec des résineux (Landmann and Bonneau, 1994; Fermond et al., 2013).

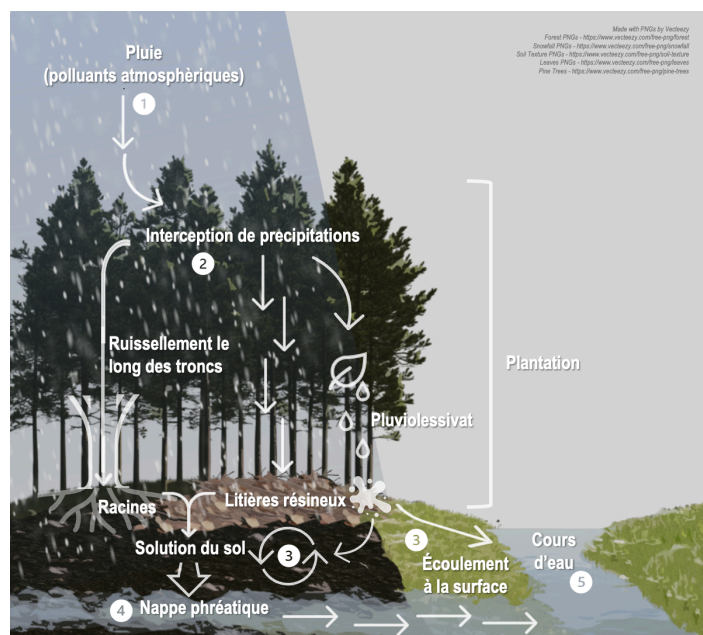


Figure 55 : Le processus d'acidification dans les plantations de résineux sur des sols acides

Pour limiter les risques et conséquences de l'acidification des eaux. Certaines pratiques peuvent être conseillées au vu du contexte pédologique et des dépôts atmosphériques passés.

Une des solutions consiste à limiter les exports forestiers des parties riches en éléments minéraux (feuillages, racines...) (Ranger et al., 2009). Ainsi lors des exploitations les parties hautes des houppiers (branches de diamètre inférieur à 7cm) devraient être laissées sur place dans l'idéal de manière la plus répartie possible sur la parcelle. De même, le dessouchage est fortement déconseillé.

Il peut être intéressant de promouvoir un mélange d'essences. L'effet acidifiant des litières de feuillus sur le sol est bien plus faible que celui des essences de résineux, ce qu'il facilite une concentration plus élevée d'azote et améliore le retour des éléments minéraux dans le sol (Pierret et al., 2019; Sauvanet, 2022; Thüler, 2014). Néanmoins, l'utilisation systématique de feuillus peut aussi avoir des répercussions. Il a été constaté d'autres types d'acidité dues à la concentration en nitrate dans les sols solubles, comme dans les plantations de hêtres (Van Der Heijden et al., 2013).

Le chaulage et l'application de cendres au sol sont d'autres alternatives possibles mais dont les effets sont limités à une dizaine d'années et varient en fonction de l'écosystème forestier (Bolou-Bi et al., 2016; Court et al., 2018; Augusto et al., 2022). L'utilisation de chaulage devra tenir compte de la fertilité du sol, des concentrations d'éléments tels que le potassium afin de choisir le produit le plus adapté (dolomite, calcite ou mixée) (Court et al., 2018). Si ces aspects ne sont pas pris en compte cela peut constituer un risque pour le sol. En ce qui concerne l'application de cendres, ils sont des bons moyens de réduire l'acidité du sol et d'améliorer l'accès aux nutriments et aux oligo-éléments mais il conduit à une réduction de la réserve de carbone organique dans le sol (Augusto et al., 2022).

VI - Pistes d'amélioration entre la forêt et l'eau : synthèse

Un ensemble de pistes d'amélioration a été établi selon trois échéances.

Actions à court terme :

- continuer de maintenir le réseau d'AEP fonctionnel
- inciter les propriétaires à gérer/faire gérer leur forêt, notamment en pratiquant des éclaircies
- mettre en avant les intérêts financiers et écologiques de la bonne gestion des sols et des rémanents auprès des propriétaires, ETF et gestionnaires
- mettre en avant les bénéfices de la plantation d'essences feuillus et le mélange d'essences dans les peuplements vis-à-vis du changement climatique et de la ressource en eau
- réaliser un chaulage au niveau des captages pour réduire l'acidité de l'eau potable
- mettre en avant les intérêts financiers et écologiques du maintien des zones humides fonctionnelles ainsi qu'une bonne gestion des cours d'eau comme cela est fait par le contrat territorial amont du nord amont (Ambert-Livradois-Forez, 2016)

Actions à moyen terme :

- anticiper les dépérissements des sapinières en ouvrant les peuplements et en diversifiant
- rétablir la bonne fonctionnalité de certains tronçons de cours d'eau

Actions à long terme :

- poursuivre la politique de regroupement parcellaire initiée par le CNPF et encouragée par le département
- convertir certains peuplements en futaie irrégulière lorsque les surfaces des parcelles le permettent techniquement, pour diversifier les modes sylvicoles afin limiter les risques vis-à-vis du changement climatique à l'échelle du massif
- rétablir un dialogue entre forestiers et gestionnaires des milieux aquatiques

De plus, pour accompagner ces différentes pistes d'amélioration, le territoire du Livradois bénéficie de nombreuses initiatives locales portées par une diversité d'acteurs. Toutes ces initiatives sont répertoriées sur le site internet du Parc du Livradois-Forez (pour celles touchant à gestion de forêt) (Ambert-Livradois-Forez, 2025).

En ce qui concerne la forêt, plusieurs actions apportent leur soutien pour une meilleure gestion de la forêt privée (actions pour le court et moyen terme), comme :

- les associations des propriétaires forestiers (APFL et APFAD) qui mettent en place des rencontres afin d'échanger sur les bonnes pratiques (Associations des Propriétaires Forestiers du Livradois, 2025) ;
- la plateforme "Je me forme pour mes bois" qui est un portail de formation en ligne (CNPF, 2025).
- création d'un poste : chargé de mission forêt à la ComCom

Et pour ce qui touche aux milieux aquatiques (actions pour le court et moyen terme) :

- le Parc Naturel du Livradois-Forez mène des actions de restauration des milieux aquatiques à l'échelle des bassins versant (Parc Naturel du Livradois, 2020) ;
- le Conservatoire des Espaces Naturels d'Auvergne (CEN) propose des fiches de bonnes pratiques, notamment pour les zones humides (CEN, 2025) ;
- la Fédération d'Associations Environnementales d'Auvergne-Rhône-Alpes (FRANE) mène des actions de sensibilisation du public (Frane, 2012).

Pour finir, le département du Livradois incite le regroupement parcellaire en prenant en charge les frais notariés lors d'un achat. Cela a pour but de réduire ce morcellement des parcelles et faciliter la gestion forestière (actions pour le long terme).

Des pistes de financement et des structures pouvant participer au financement de projets ou participer à l'animation locale sont détaillées sans pour autant être exhaustives.

Les organismes pouvant financer des projets sont :

- L'agence de l'eau pour obtenir des subventions sur les pratiques respectueuses de l'eau et l'amélioration des états des cours d'eau/zones humides tout en prenant en compte l'intérêt du sylviculteur.
- Une part du budget des communes/des ComCom actuellement dédié à l'eau, transféré pour soutenir les bonnes pratiques sylvicoles vis-à-vis de l'eau.
- Le département pourrait subventionner, au titre d'équipement, le potentiel chaulage (élément pris en compte dans la fiche "Subvention d'équipement Alimentation en eau potable" du conseil départemental du Puy-de-Dôme).

Les organismes pouvant participer à l'animation :

- ComCom d'Ambert Livradois-Forez
- Centre National de la Propriété Forestière
- Agence de l'eau
- Parc Naturel Régional du Livradois-Forez
- Société d'Aménagement Foncier et d'Etablissement Rural (SAFER) pour l'animation sur le morcellement parcellaire

La communauté des communes semble d'ores et déjà s'engager dans la promotion des Associations Syndicales Libres de Gestion Forestière.

Conclusion

L'état des lieux hydrologique du bassin versant a permis d'étudier plusieurs facteurs impliqués dans la ressource en eau et ses variations. Il est possible que la ressource en eau s'amoindrisse avec une augmentation des épisodes chauds et secs.

Le rôle des peuplements vis-à-vis de cette ressource est complexe. Leur effet positif sur la qualité est bien avéré mais tandis que celui sur la quantité est difficile à appréhender. Il ressort néanmoins de l'étude réalisée que les peuplements en place de résineux, sur-capitalisés, ont une forte consommation en eau tandis que celle de peuplements gérés est moindre.

La circulation de l'eau dans le bassin versant permet dans l'ensemble une bonne rétention de l'eau. Les cours d'eau étant dans l'ensemble bien fonctionnels malgré une forte vulnérabilité, ils permettent jusqu'à présent d'assurer ce rôle. Les zones humides fonctionnelles doivent être préservées afin d'assurer la continuité des services qu'elles rendent.

Le changement climatique et la modification des précipitations augmentent le risque de dépérissement de sapin. Ces dépérissements peuvent être suivis de coupes rases qui affectent la disponibilité de la ressource en eau en augmentant le ruissellement. Ainsi les problèmes rencontrés sont susceptibles de s'aggraver et de devenir plus fréquents. Il semble donc crucial de suivre et d'accompagner ces changements.

Concernant la qualité de l'eau, le problème d'acidité est dû conjointement aux dépôts de polluants atmosphériques et à la nature acide des sols. Une sylviculture de résineux, avec exportations des rémanents peut aggraver ce phénomène d'acidification.

Dans l'ensemble, des mesures peuvent être adoptées pour faire face aux diverses problématiques étudiées. Étant donnée la relation étroite entre sylviculture et eau, établie dans ce rapport, un ensemble de conseils a été formulé dans un guide intitulé "conseils pour une gestion durable des forêts dans le massif de Forez" essentiellement destiné aux propriétaires forestiers. En somme, renouer des liens entre forêt et eau pourrait être une piste d'amélioration de ce territoire pour faire face aux différents enjeux auxquels il est et sera confronté.

Étant donnée la période de temps relativement restreinte allouée à la collecte de mesures sur le terrain, le jeu de données sur lequel repose l'ensemble des études mériterait d'être étoffé. Il serait alors pertinent de poursuivre le travail effectué, en étendant les zones de prospection et le nombre de mesures. Par ailleurs, les problématiques soulevées s'inscrivent dans un cadre plus large que celui de l'étude, centrées sur les interactions entre forêts et hydrosystèmes. Pour apporter une réponse plus intégrative, une étude prenant en compte les espaces agricoles et les acteurs de cette filière pourrait être menée. Enfin, un travail de mise en valeur et d'animation devra être fait afin de faciliter la mise en œuvre des solutions proposées par cette étude. Dans les forêts des monts de Forez, l'ensemble des mesures qui pourraient être adoptées pour faire face aux problématiques rencontrées nécessitent une mobilisation des propriétaires. L'action d'animation, qui pourrait être portée par la ComCom et le PNR en association étroite avec les gestionnaires et le CNPF, et pouvant s'inspirer des fiches techniques réalisées, est primordiale.

Bibliographie :

- AFORCE, 2023. Cartes de compatibilité climatique | ClimEssences [WWW Document]. URL <https://climessences.fr/compatibilites-climatiques/cartes-de-compatibilite-climatique> (accessed 5.21.25).
- Ambert Livradois Forez, 2019. Chiffres-clés - Ambert Livradois Forez - Communauté de communes [WWW Document]. URL <https://www.ambertlivradoisforez.fr/votre-communaute-de-communes/le-territoire/chiffres-cles/> (accessed 5.6.25).
- Ambert-Livradois-Forez, 2019. Conseils et animation pour les propriétaires forestiers [WWW Document].
- Andréassian, V., 2004. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *J. Hydrol.* 291, 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.12.015>
- Augusto, L., Beaumont, F., Nguyen, C., Fraysse, J.-Y., Trichet, P., Meredieu, C., Vidal, D., Sappin-Didier, V., 2022. Response of soil and vegetation in a warm-temperate Pine forest to intensive biomass harvests, phosphorus fertilisation, and wood ash application. *Sci. Total Environ.* 850, 157907. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157907>
- Aussenac, G., 2002. Influence des changements climatiques sur les peuplements forestiers et le cycle de l'eau. *Houille Blanche* 88, 90–95. <https://doi.org/10.1051/lhb/2002050>
- Becker, M., Lévy, G., 1988. A propos du dépérissement des forêts : climat, sylviculture et vitalité de la sapinière vosgienne. *Rev. For. Fr.* 40, 345–358. <https://doi.org/10.4267/2042/25902>
- Blanchet, D., 2023. Définition d'indicateurs agroclimatiques caractérisant les risques liés au déficit hydrique et à l'excès d'eau. INRAE.
- Bolou-Bi, B.E., Dambrine, E., Angeli, N., Pollier, B., Nys, C., Guerold, F., Legout, A., 2016. Magnesium Isotope Variations to Trace Liming Input to Terrestrial Ecosystems: A Case Study in the Vosges Mountains. *J. Environ. Qual.* 45, 276–284. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.02.0096>
- Breda (Nathalie), 1999. L'Indice foliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle fonctionnel. *Rev. For. Fr.* 135. <https://doi.org/10.4267/2042/5426>
- Cailleret, M., Hendrik, D., Xie, Y., Chanzy, A., 2010. Complexité des facteurs prédisposants la mortalité du sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) sur le Mont Ventoux. *Collect. EDYTEM Cah. Géographie Panorama de la dendrochronologie en France*, 65.
- Carvalho-Santos, C., Honrado, J.P., Hein, L., 2014. Hydrological services and the role of forests: Conceptualization and indicator-based analysis with an illustration at a regional scale. *Ecol. Complex.* 20, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2014.09.001>
- Changements climatiques 2014: rapport de synthèse : contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2015. . GIEC, Genève (Suisse).
- CNPF, 2020. Itinéraires techniques de *Picea abies*.
- Cosandey, C., 2006. Conséquences des forêts sur l'écoulement annuel des cours d'eau. *Rev. For. Fr.* <https://doi.org/10.4267/2042/6702>
- Court, M., Van Der Heijden, G., Didier, S., Nys, C., Richter, C., Pousse, N., Saint-André, L., Legout, A., 2018. Long-term effects of forest liming on mineral soil, organic layer and foliage chemistry: Insights from multiple beech experimental sites in Northern France. *For. Ecol. Manag.* 409, 872–889. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.12.007>
- Dambrine (Etienne), Party (J.P.), Pollier (B.), Nicolai (M.), Probst (A.), Rozin (Ch.), Duc (M.), 1999. Acidification des eaux de source et saturnisme dans le Massif vosgien. *Rev. For. Fr.* 173. <https://doi.org/10.4267/2042/5429>
- Degoutte, G., 2012. Diagnostic, aménagement et gestion des rivières - Hydraulique et morphologie fluviales appliquées, 2e édition. ed. Lavoisier.
- DRAAF, 2019. Évaluation environnementale du Plan régional de la forêt et du bois de la région Auvergne-Rhône-Alpes 2018-2027: Plan environnemental.
- Eaufrance, 2025. Les impacts de l'érosion [WWW Document]. URL <https://www.eaufrance.fr/les-impacts-de-lerosion> (accessed 5.7.25).
- Fermond, C., Ferry, O., Fiquepron, J., Lachassagne, P., Rouquet, S., 2013. PRINCIPAUX ENJEUX ET PROPOSITIONS POUR UNE GESTION ET UNE PROTECTION HARMONIEUSES DES RESSOURCES EAU ET BOIS. *Rev. For. Fr.* 419. <https://doi.org/10.4267/2042/53706>

- Granier, A., 2012. Influence du couvert forestier sur le cycle de l'eau et comparaison avec le bilan hydrique d'autres couverts.
- IGN, 2025. Forêts anciennes.
- IGN, 2018. Cartographie des formations végétales.
- IGN, 2013a. SER G90 : Plaines alluviales et piémonts du Massif central.
- IGN, 2013b. SER G22 : Plateaux granitiques du centre du Massif central.
- IGN, 2012. Fiches descriptives des grandes régions écologiques (GRECO) et des sylvoécorégions (SER) - INVENTAIRE FORESTIER [WWW Document]. URL <https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?article773#GRECOG> (accessed 5.16.25).
- INPN, 2023. Probabilité de présence seuillée des zones humides Auvergne-Rhône-Alpes.
- INSEE, 2025. Dossier complet – France | Insee [WWW Document]. URL <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2011101?geo=FRANCE-1> (accessed 5.16.25).
- IPCC, Core Writing Team, Lee, H., Romero, J., 2024. Climate Change 2023 : Synthesis Report.
- La montagne, Thiers-Ambert, 2023. L'eau ne coule plus de source à Arlanc 5.
- Landmann, G., Bonneau, M., 1994. Le dépérissement du sapin pectiné et de l'épicéa commun dans les montagnes françaises au cours des années 1980. *Rev. For. Fr.* 522. <https://doi.org/10.4267/2042/26580>
- Langevin, P., Mugnier, R., Marcelpoil, E., 2008. Changement climatique dans le massif alpin français : état des lieux et propositions. DIACT.
- Laurent, L., Arnould, M., Hirt, N., Touche, J., 2023. Quelle place pour la recherche dans les choix de gestion face aux crises forestières ? *Rev. For. Fr.* 74, 299–306. <https://doi.org/10.20870/revforfr.2023.7614>
- Laurent, L., Lacombe, E., 2021. Guide pratique pour l'optimisation de la reconstitution forestière post-tempête.
- Legay, M., 2010. Les grandes orientations d'adaptation au changement climatique : point d'étape. Observer et s'adapter au changement climatique en forêt méditerranéenne.
- Legrand, P., 2016. Face au réchauffement climatique, quel avenir pour le sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) dans le Massif central ? *Rev. Sci. Nat. Auvergne* 3, 3–15.
- Lunel Agglo, 2012. Occupation du sol 2012 - data.gouv.fr [WWW Document]. URL <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/occupation-du-sol-2012/> (accessed 5.16.25).
- Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, Groupement d'Intérêt Scientifique Sol, 2013. Guide pour l'identification et la délimitation des sols de zones humides.
- Monnet, G., 2025. CNPF.
- Neary, D.G., Ice, G.G., Jackson, C.R., 2009. Linkages between forest soils and water quality and quantity. *For. Ecol. Manag.* 258, 2269–2281. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.05.027>
- OFB, 2025. Les zones humides [WWW Document]. Off. Fr. Biodiversité OFB. URL <https://www.ofb.gouv.fr/les-zones-humides> (accessed 5.12.25).
- OFB, 2000. Variables de réponse ou d'ajustement.
- Olei, S., 2025. Le parc naturel régional (PNR) | Outils de l'aménagement [WWW Document]. URL <https://outil2amenagement.cerema.fr/outils/parc-naturel-regional-pnr>
- ONF, 2002. Guide de sylviculture Lorraine.
- ONF, 1999. Bulletin technique n°37 : l'eau et la forêt.
- Piedallu, C., Perez, V., Gégout, J.-C., Lebourgeois, F., Bertrand, R., 2009. Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'Epicéa, du Sapin, du Hêtre et du Chêne sessile en France. *Rev. For. Fr.* LXI, 567–593. <https://doi.org/10.4267/2042/32924>
- Pierret, M.-C., Viville, D., Dambrine, E., Cotel, S., Probst, A., 2019. Twenty-five year record of chemicals in open field precipitation and throughfall from a medium-altitude forest catchment (Strengbach - NE France): An obvious response to atmospheric pollution trends. *Atmos. Environ.* 202, 296–314. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.12.026>
- PNR Livradois-Forez, 2024a. Révision de la Charte du Parc naturel régional Livradois-Forez – Diagnostic.
- PNR Livradois-Forez, 2024b. Etude gestion quantitative avec une analyse « Hydrologie-Milieus-Usages-Climat » sur le territoire du Bassin Versant de la Dore, phase 3.
- PNR Livradois-Forez, 2023. Plantation de résineux et cours d'eau, comment harmoniser ces milieux.
- Puget, A., Epalle, W., Besson, P., 2024. Fiche de synthèse : Etude HMUC Dore – Phase 3 Prospective.
- Ranger, J., Dambrine, E., Manuel, N., Landmann, 2009. Impacts de l'utilisation accrue de biomasse sur les sols forestiers.
- Rey Freddy, Ballais, J.-L., Marre, A., Rovéra, G., 2004. Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. (compte-rendu No. volume 336).

- Sardat, N., Curt, T., Ganteaume, A., Girard, F., Jappiot, M., Lampin, C., Long, M., Prévosto, B., Ripert, C., Vennetier, M., Brahic, E., Dehez, J., Deuffic, P., Rambonilaza, M., Sergent, A., Terreaux, J.-P., Adra, W., Berger, F., Bigot, C., Bourrier, F., Breton, V., Brun, J.J., Chauvin, C., Clouet, N., Cordonnier, T., Corona, C., Courbaud, B., Danieli, S. de, Defosse, E., Fuhr, M., Jancke, O., Kunstler, G., Lafond, V., Lopez, J., Luque, S., Monnet, J.M., Redon, M., Regolini, A., Rey, F., Saenger, A., Thiérion, V., Vanpeene, S., Cernesson, F., Chaffaut, I., Deshayes, M., Durrieu, S., Kosuth, P., Ose, K., Archaux, F., Balandier, P., Baldet, P., Ballon, P., Baltzinger, C., Bergès, L., Bouget, C., Chevalier, R., Collin, E., Gosselin, F., Mârell, A., Lassauce, A., Paillet, Y., Perot, T., Philippe, G., Vallet, P., Sardat, N., 2011. Quelle forêt pour les hommes ? Cemagref.
- Sauvanet, J., 2022. Mesures physico-chimiques de l'impact des plantations de résineux sur les milieux aquatiques de cours d'eau de tête de bassin versant de la Dore (Puy-de-Dôme, France).
- SIAEP Beurrieres Chaumont, 2021. Schéma Directeur du Réseau d'Eau Potable, rapport d'étude.
- SIAEP Beurrieres Chaumont, 2018. Schéma Directeur du Réseau d'Eau Potable, Fiche captage.
- TAMISIER, V., GOB, F., BILODEAU, C., THOMMERET, N., 2017. Caractérisation hydromorphologique des cours d'eau français (Carhyce). Agence française pour la biodiversité.
- Thüler, L., 2014. Estimation et cartographie de la vulnérabilité des aquifères en milieu forestier. Université de Neuchâtel. <https://doi.org/10.35662/unine-thesis-2423>
- United Nations Environment Programme, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2024. Global Nitrous Oxide Assessment. United Nations Environment Programme. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/46562>
- Université de Lorraine, AgroParisTech, INRA et laboratoire SILVA, 2014. SILVAE | Système d'Informations Localisées sur la Végétation, les Arbres et leur Environnement. URL <https://silvae.agroparistech.fr/home/> (accessed 5.16.25).
- Van Der Heijden, G., Legout, A., Pollier, B., Mareschal, L., Turpault, M.-P., Ranger, J., Dambrine, E., 2013. Assessing Mg and Ca depletion from broadleaf forest soils and potential causes – A case study in the Morvan Mountains. *For. Ecol. Manag.* 293, 65–78. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.045>
- Waring, R.H., Schlesinger, W.H., 1985. Forest ecosystems: concepts and management. Academic Press, Orlando.

Annexes

Annexes	1
Annexe 1 : Protocole zone humide	2
Annexe 2 : Protocole cours d'eau	7
Annexe 3 : Protocoles sylviculture et peuplement déperissant	16
Annexe 4 : Protocole pour parcelle coupe rase	19
Annexe 5 : Protocole captage	20
Annexe 6 : Méthode de calcul de la RUM	23
Annexe 7: Tableau de comparaison d'évapotranspiration entre les différentes natures d'occupation de sol	24
Annexe 8 : Localisation de la zone humide non fonctionnelle au niveau du PPR des captages 12 à 15	24
Annexe 9 : Carte des cours d'eau étudiés	25
Annexe 10 : Tableau de classification fonctionnelle	26
Annexe 11 : Détails des tronçons (les tronçons grisés sont les tronçons les plus vulnérables topographiquement (classes 1-10) et avec une rugosité faible ou absente)	27
Annexe 12 : rapport l/p	33
Annexe 13 : graphiques du rapport l/p des cours d'eau	33
Annexe 14: Carte présentant le niveau de rugosité des tronçons des cours d'eau étudiés	34
Annexe 15 : Carte présentant la pérennité des couverts (représentant la vulnérabilité long terme) sur les tronçons des cours d'eau étudiés	35
Annexe 16 : Clé de classification de la vulnérabilité topographique	36
Annexe 17 : Simulation Biljou – Modèle de bilan hydrique forestier	36
Annexe 18 : Tableau de situation des différents peuplements en termes de surface terrière "G", de part de sapin dans le capital, d'altitude et de situation topographique.	42
Annexe 19 : Test statistique sur le modèle linéaire "Nb_Sapins_TD_ou_morts_ha = G" et graphiques de diagnostic du modèle	43
Annexe 20 : Calculs, hypothèses et résultats de l'analyse économique	44

Annexe 1 : Protocole zone humide

I) Objectif

L'objectif est de caractériser l'état des zones humides identifiées afin d'estimer leur bon fonctionnement vis-à-vis du stockage en eau.

Un autre but est de pouvoir comparer deux cartes de zones humides potentielles afin d'évaluer laquelle modélise le mieux la présence des zones humides et ainsi estimer leur répartition sur la zone d'étude.

II) Matériel

- Tarière
- Relascope
- Flore forestière des montagnes et collines
- Guide Munsell
- Bâton de mesure
- décamètre ou vertex

III) Méthodologie

1 - Localisation et cheminement jusqu'aux zones humides

Se rendre sur les points d'arrêts prédéfinis sur la tablette des zones humides (ZH) potentielles identifiées comme intéressantes. S'arrêter lorsque la distance devient inférieure à 3 m. Choisir la plus proche du cours d'eau mais qui n'est pas sur le cours d'eau et pourrait être une zone humide. Ce point sera le début du transect, qui s'effectuera perpendiculaire au ruisseau.

On effectuera un transect de 4 points d'identification des zones humides (cf grand 2). L'objectif est que le dernier point ne soit plus dans la zone humide mais qu'au moins un des 3 d'avant le soit.

La distance entre les points sera laissée au libre choix de l'opérateur avec une distance minimale de 1 m et maximale de 50 m, à noter dans la colonne "pas choisi" en m. Les pas entre les points devront être constants lors du transect.

- Nommer les points sur iphigénie comme suit : mettre un nouveau point GPS, le renommer "**ZH_X**" (au niveau du X insérer une lettre de l'alphabet, en commençant par A pour le premier transect).

NB : Pour les zones humides identifiées lors du **protocole cours d'eau**, celle-ci devront être de plus de 30 ares (3000 m²) pour faire l'objet du protocole suivant

2 - Identification des zones humides

- Critère pédologique

Au point d'arrêt, faire un sondage tarière sur un point qui semble représentatif de la zone.

- Creuser à la tarière en nettoyant le sommet à chaque sortie d'échantillon avec un couteau pédologique
- Aligner les échantillons à partir d'un repère

- Noter les profondeurs d'apparition des signes d'hydromorphie et la nature (g ou G) dans la colonne "profondeur" et "signe d'hydromorphie"
 - tâches de rouille, ou noires/brunes : noter g
 - coloration verdâtre/bleuâtre : noter G

NB : ATTENTION, si présence d'hydromorphie dans les 5 premiers cm, les ignorer.

- Noter la présence éventuelle de tourbe et sa profondeur de disparition (à noter que si présence de tourbe en surface mais d'épaisseur inférieure à 11cm, cela signifie qu'il s'agit d'une ancienne ZH)

Faire une photo du sondage tarière avec une échelle

- Noter la classe d'hydromorphie (= type de ZH, ex : type IIIa, type IVc) dans la colonne "classe hydromorphie" selon le tableau de la figure 2. L'appellation dépendra de la profondeur prospectée et selon la profondeur où les tâches d'hydromorphie apparaissent (on fonctionne par facteur discriminant pour se placer dans la bonne colonne).

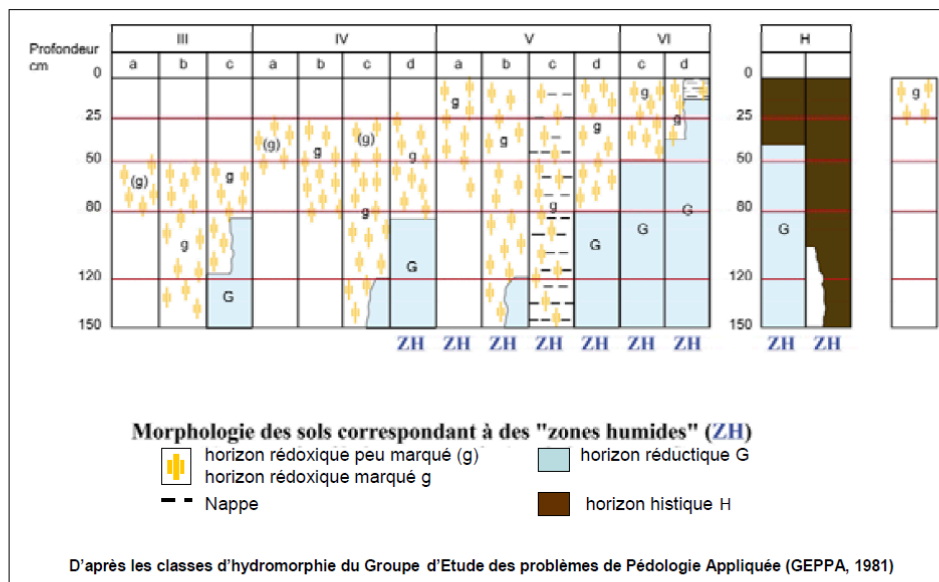
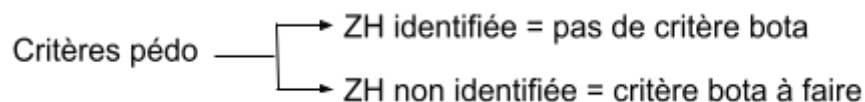


Figure 2 : Classes d'hydromorphie (GEPPA 1981 ; modifié). Les classes Vb, Vc, Vd, VI, H correspondent à des sols de zones humides ; les classes IVd et Va et les types de sols correspondants peuvent être exclus par le préfet de région après avis du conseil scientifique régional du patrimoine naturel

- Refermer le trou

Si le sondage tarière ne révèle aucune trace d'hydromorphie, passez au critère botanique.

Si le sondage relève des traces d'hydromorphie, passez directement au grand 3



● Critère botanique

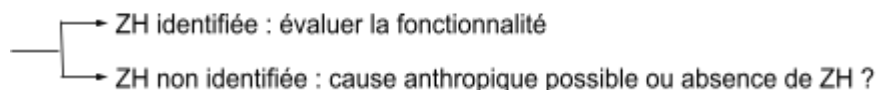
Faire un rapide relevé botanique :

- noter les espèces trouvées dans l'onglet "flore" avec leur nom complet en latin (genre et espèce)

- Si au moins une espèce est présente dans la liste “espèces des ZH” de l’onglet espèce, marquer “oui” dans la colonne “ZH?”

Si aucun des 4 points n’a permis d’identifier une zone humide, aller au **Cas d’une ZH non identifiée**, sinon passer au **3- Identification des ZH fonctionnelles**

3 - Identification des ZH fonctionnelles



• Cas d’une ZH identifiée : évaluation de la fonctionnalité

	Critères communs à toutes situations		
Éléments indicateurs de mauvaise fonctionnalité	présence de drain +/- bouchés (DRA)	modification visible du tracé du cours d’eau (TRA)	ouvrage modifiant l’arrivée d’eau ; vanne... (OUV)

Tableau 1 : identification des facteurs de fonctionnalités d’une ZH

- Si la ZH est bien une ZH et qu’aucun élément du tableau 1 n’est identifié. Noter “oui” dans la colonne “Fonctionnelle ?”.

En cas de boisement, noter :

- type de peuplement (aulnaie, frênaie...)
- typologie du peuplement à l’oeil en notant les 2 essences principales :

Peuplement (dominance de)	Notation
PB	1
BM	2
GB	3
irrégulier	5

- noter le niveau d’intérêt sylvicole porter à cette zone (“PI”: pas d’intérêt, “I”: grand intérêt)
- Si la ZH présente un des éléments de mauvaise fonctionnalité (cf tableau 1),:
 - le noter dans la colonne “éléments indicateurs” (“DR”, ”TR”, ”OUV”)
 - faire un THR en notant l’essence et la classe de diamètre :
 - **PB** : 17,5-27,5 cm
 - **BM** : 27.5-47,5 cm

- **GB** : 47.5-67.5 cm
- **TGB** : ≥ 67.5 cm

RQ : Si le peuplement est constitué de plus de 50% de résineux on prendra un facteur relascope de 2, le cas contraire de 1.

NB : Dans le cas où la ZH est en **zone non prospectée par le protocole cours d'eau**, noter dans "remarque" les caractéristiques suivantes si observées :

Critères	Modification visible du tracé du cours d'eau (TRA)	Ouvrage modifiant l'arrivée d'eau ; vanne... (OUV)	Incision marquée	Largeur anormale
Mesures à effectuer si critère présent	description des modifications	type à noter	oui/non présence curage ?	largeur plein bord (largeur du lit mineur)

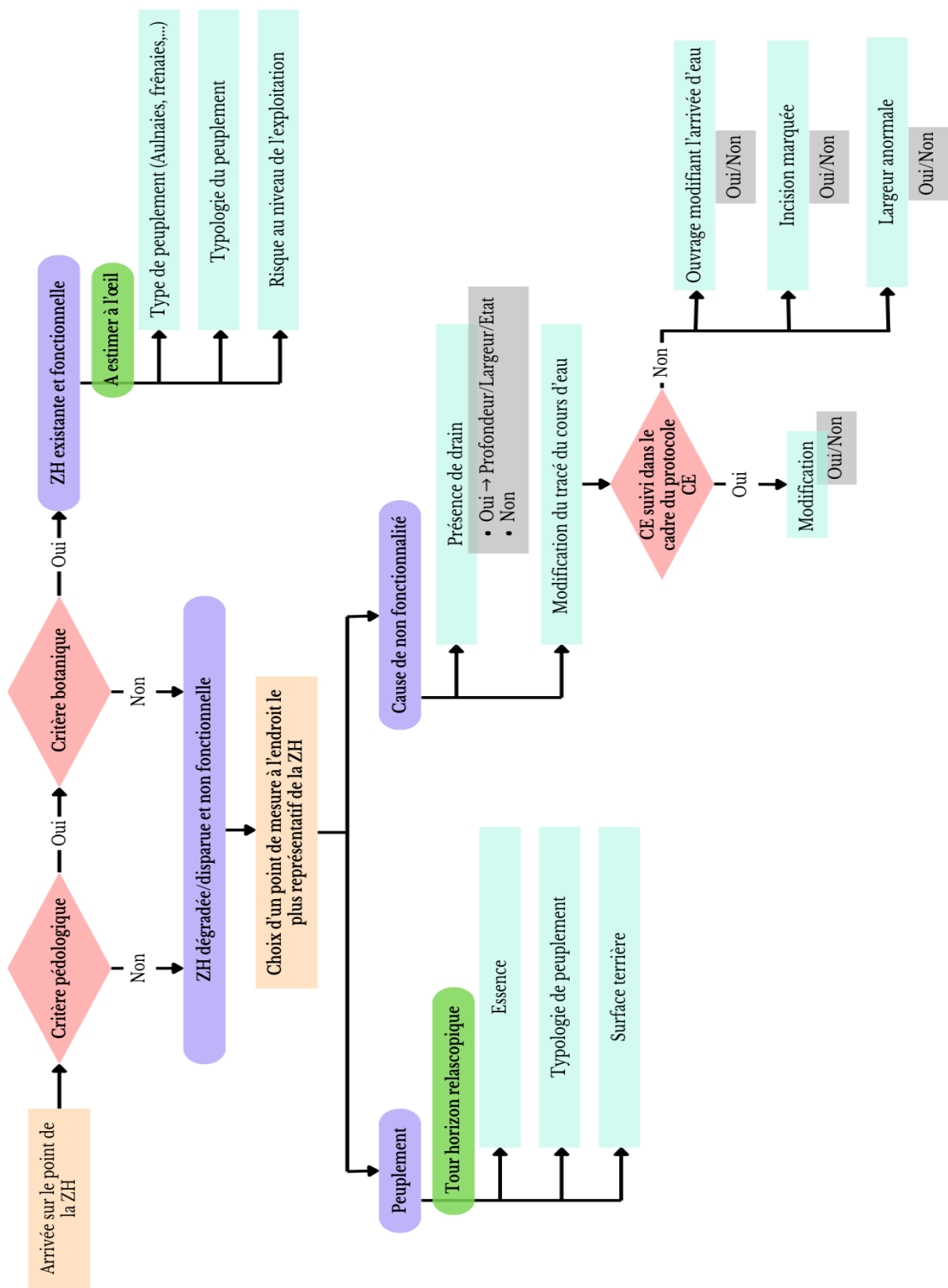
NB : en cas de **présence de drain**, on relèvera :

- leur profondeur mesurée au milieu du drain sur une profondeur représentative du drain en cm
- leur largeur au niveau du sol au voisinage, en cm
- leur état moyen sur la zone (non bouché="NB", en cours de colmatage="C", bouché="B")

- **Cas d'une ZH non identifiée**

- Noter la présence d'éléments du tableau 1 si présents dans la colonne "éléments ZHN" et les 2 essences principales dans le cas d'un boisement
- Sinon indiquer "NF" (non fonctionnelle) dans la colonne "fonctionnelle"

Récapitulatif de la démarche générale du protocole ZH



Annexe 2 : Protocole cours d'eau

I) Objectif

Décrire l'**état de fonctionnalité et de vulnérabilité** de l'ensemble des cours d'eau du bassin versant étudié.

Dans un premier temps, il s'agit pour cela de réaliser des mesures descriptives sur un **réseau hydrographique restreint**, en le parcourant dans son intégralité.

II) Matériel

- Carte des cours d'eau
- Topofil
- Clisimètre
- Bâton gradué de 2 mètres
- Décamètre
- Tarière
- Tablettes ou tableaux de saisie des données
- Clef simplifié de détermination des principaux invertébrés (annexe)
- Si possible des bottes

III) Méthodologie

1) Cheminement

Un cheminement sera mené le long du réseau de cours d'eau et de segments étudiés par des observateurs, pour relever les variables d'intérêt. L'intégralité du réseau retenu pour l'échantillonnage sera parcouru, et les mesures seront prises sur des tronçons de cours d'eau. Les tronçons seront directement définis sur le terrain par les observateurs, de sorte à ce qu'ils soient homogènes dans leurs caractéristiques fonctionnelles et de vulnérabilité.

Pour une distance de prospection importante, il est conseillé de mener le cheminement d'aval en amont, c'est-à-dire en remontant le cours d'eau. Les observateurs remontent alors le cours d'eau en choisissant à chaque intersection l'affluent dont le débit est jugé le plus important. Le cheminement s'arrête à la fin du segment étudié, à la source du cours d'eau ou lorsque la dimension plein bord est inférieure à 20 cm de large. La fin du cheminement nécessitera de noter le point d'arrêt choisi et la raison de l'arrêt du cheminement. Il est possible qu'au delà de ce point un diagnostic zone humide sera nécessaire (cf protocole ZH)

2) Type de relevé

Pour chaque segment de cours d'eau étudié (cf I) Objectif), des relevés seront réalisés par **tronçons** homogène du point de vue fonctionnalité et si possible vulnérabilité.

Pour chaque segment de cours d'eau étudié (cf I) Objectif) des **points d'intérêt** pourront également être relevés tout au long du cheminement.

a) Tronçons

Le cours d'eau sera analysé par tronçons, Les tronçons seront de longueur variable, puisqu'ils seront directement délimités sur le terrain par les observateurs. Dans tous les cas, afin d'éviter les évolutions très progressives et de ce fait discrètes, les tronçons ne pourront pas excéder 150 mètres.

La **fin d'un tronçon** (c'est-à-dire le passage d'un tronçon à un autre) est décidée par les observateurs si des changements des fonctionnalités du cours d'eau sont observés. Ce choix peut être complexe, et il faut ainsi rechercher un ou plusieurs changement(s) significatif(s) modifiant l'état ou la vulnérabilité du cours d'eau (et pas seulement sa morphologie). Toutefois, la présence d'un au moins des indicateurs suivants impliquent de changer de tronçon immédiatement :

- distance parcourue ayant atteint 150 mètres (longueur maximale pour un tronçon).
- coupe rase en bordure de cours d'eau (à moins de 5 mètres du lit mineur) ou impactant fortement le cours d'eau.
- rupture de pente conséquente
- route forestière traversant le cours d'eau
- passage de la présence à l'absence de corridor rivulaire fonctionnel (=essences de ripisylve) (ou l'inverse)
- présence d'une zone agricole (à moins de 5 mètres du lit mineur)

Un point GPS doit être pris à la fin du tronçon, en le renommant *nomCE_Tn* (avec “n” le numéro du tronçon qui vient d'être parcouru, et “nomCE” le nom du cours d'eau). A chaque changement de cours d'eau, le numéro de tronçon repart à 1 (ex. T1).

b) Points d'intérêt

Pour chaque segment de cours d'eau étudié, tout **élément jugé important** (influence sur le fonctionnement et/ou la vulnérabilité) devra être relevé. Il s'agit alors de renseigner le point GPS et les coordonnées (X,Y) de l'élément, en spécifiant son positionnement (dans le lit mineur du cours d'eau, en rive droite, rive gauche...).

- Les points suivants nécessitent seulement un relevé et une photographie. *Ils doivent être inscrits dans la feuille AUTRES_PT. Inscrire le nom du point et le type de point d'intérêt dans “Commentaire”.*
 - **Embâcles** entraînant une modification majeure du cours d'eau.
Définition : Un embâcle correspond à une accumulation de matériaux rocheux en travers du cours d'eau (roches, bois mort, troncs, plantes...), limitant ou déviant le flux d'eau. Pour être considéré dans notre étude, l'embâcle doit totalement entraver le cours d'eau, les embâcles partiels ne seront pas comptabilisés.
 - **Point de traversée ou d'abreuvement du bétail.** NB : Préciser la rive droite ou gauche sur le point GPS.
 - **Arrivée d'eau latérale** suffisamment importante pour être signalée (au moins 25% du débit du tronçon étudié). NB : Préciser la rive droite ou gauche sur le point GPS.
 - Tout autre point d'intérêt jugé entraînant une modification de la fonctionnalité et vulnérabilité du cours d'eau
-
- Les points suivants nécessitent un relevé, une photographie et des commentaires dans un fichier excel spécifique :

- **Infrastructures** anthropiques dégradant la qualité et la quantité d'eau (buses, pont, radier..). L'ouvrage devra être décrit dans la feuille *POINT_INF* en donnant le type d'ouvrage, la section de l'ouvrage (ex. diamètre pour une buse, largeur et hauteur pour un pont), la chute d'eau à l'aval mesurée au niveau de la lame d'eau, la longueur de l'ouvrage et sa position si besoin.

NB : Nommer le point GPS de la façon suivante : INF_nomCE_Tn (avec nomCE_Tn le nom du cours d'eau et tronçon).

Remarque : ces points font l'objet d'un arrêt de tronçon.

- **Passage de desserte dans le cours d'eau** (route, piste, cloisonnement, passage à guet...) **ou de fossé**. Préciser dans une feuille *POINT_DES*, la rive, présence de zone de dépôt des sédiments issus de la desserte à proximité (choisir "atterrissement" dans l'excel) ou dans le cours d'eau (choisir "arrivée dans l'eau" dans l'excel) la pente de l'infrastructure et sa longueur qui impacte le cours d'eau.

NB : Nommer le point GPS de la façon suivante : DESCE_nomCE_Tn avec nomCE_Tn le nom du cours d'eau et tronçon.

Une fin de tronçon pourra s'accompagner de points d'intérêt (compatibilité).

3) Description des tronçons :

Les tronçons seront décrits en **trois axes**, chaque axe correspondant à une zone différente par rapport au cours d'eau. Il s'agit des axes "**Cours d'eau**", "**Corridor rivulaire**", et "**Paysage**", lesquels seront détaillés dans la suite du protocole (voir 4) *Mesures à réaliser*). Chaque axe est associé à une série de mesures.

Le schéma suivant rappelle la terminologie employée pour décrire la structure d'un cours d'eau, et indique les zones inféodées aux 3 axes d'étude.

4) Mesures à réaliser :

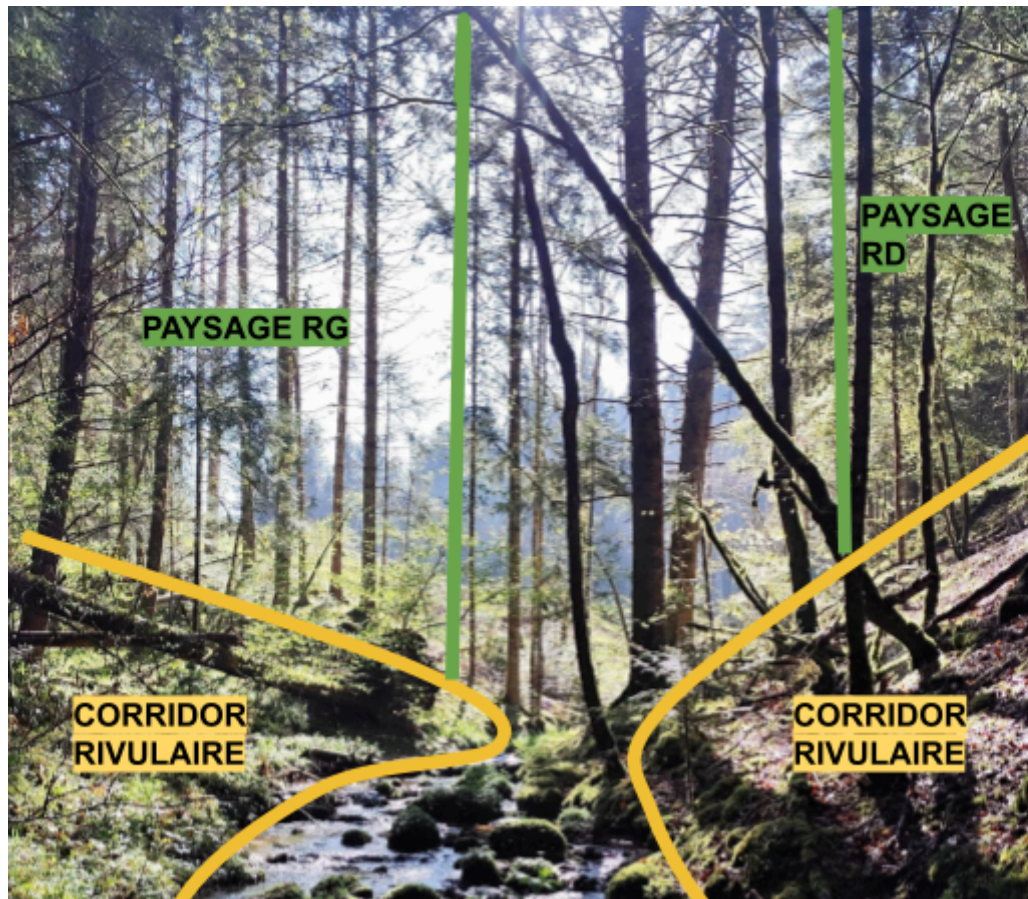


Figure 1 : Schéma d'un cours d'eau avec son corridor rivulaire et paysage associé

Les observations seront faites tout au long du tronçon mais les mesures seront prises une fois que la fin du tronçon sera définie. Une fois le tronçon parcouru, les observateurs rempliront ainsi la fiche de saisie, en revenant si besoin sur leurs pas pour se référer à un **contexte représentatif** du tronçon. Il faut veiller à apprécier le tronçon dans sa globalité.

NB : Les données sont à reporter dans la fiche de saisie associée.

A) Cours d'eau

Sur chaque tronçon, relever sur le cours d'eau les données suivantes :

NB : Les données sont à saisir dans la catégorie "Cours d'eau"

- Profil en travers

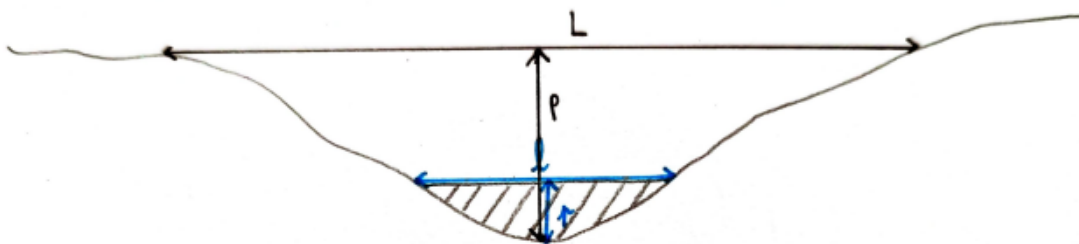


Figure 2 : Mesures sur le profil en travers

L : largeur plein bord (largeur du lit mineur) et P : profondeur plein bord

l : largeur de la lame d'eau (surface de l'eau) et p : profondeur de la lame d'eau

On cherchera un profil représentatif du tronçon sur lequel relever la **largeur plein bord**, la **largeur de la lame d'eau**, , la **profondeur plein bord**, et la **profondeur de la lame d'eau** (toutes les mesures seront appréciées au décimètre près). Les profondeurs se mesurent à mi distance de leur largeur associée. Le relevé s'effectue grâce à un bâton gradué tous les 10 cm.

NB : Les données sont à saisir dans la sous-catégorie "profil en travers" sous les cases correspondantes à chaque mesure en cm.

En cas d'**incision** du cours d'eau, noter si celui-ci provient d'un curage. Le curage se remarque par la présence d'andains et/ou de traces de pelleteuse sur les berges.

NB : Noter dans la case "Incision" la présence ou l'absence d'incision. Si l'incision est causée par un curage, mettre "curage", sinon "oui".

- **Morphologie du cours d'eau**

Une appréciation de la morphologie du cours d'eau doit être réalisée. L'observateur devra déterminer si celle-ci est **artificielle ou naturelle**.

NB : Noter dans la sous-catégorie "Tracé" la forme du cours d'eau en précisant s'il semble naturel ou artificiel dans la catégorie "origine".

Remarque : si un segment rectiligne d'origine anthropique est relevé sur une longueur relativement importante et impacte le cours d'eau, il faudra faire un tronçon spécifique.

- **Granulométrie et colmatage**

Définition : Le colmatage correspond à un dépôt de particules fines limitant l'écoulement de l'eau (réduction de la hauteur d'eau claire).

Voir illustrations en annexe.

La granulométrie et le colmatage potentiel dans le fond du cours d'eau devront être spécifiés.

Pour chaque tronçon, **relever si la tendance est équilibrée ou non**

Voir illustrations en annexe.

- **Embâcles**

Sur chaque tronçon **compter le nombre d'embâcles** présents.

- **Érosion des rives :**

Relever le pourcentage d'érosion des rives sur le tronçon parcouru.

NB : le pourcentage d'érosion est à relever dans la catégorie "Erosion"

B) Corridor rivulaire

Le corridor rivulaire est à définir selon l'emprise de la ripisylve, c'est-à-dire qu'il correspond à la surface où la ripisylve (*voir essences couramment présentes en ripisylve en annexe*) est présente. Il faut donc chercher la présence éventuelle d'une ripisylve.

Relever sur les deux rives la ripisylve en indiquant une classe de largeur : absente ("*absence*"), inférieure à la largeur plein bord ("*inf PB*"), égale à la largeur plein bord, deux fois supérieure à la largeur plein bord, plus de deux fois supérieure à la largeur plein bord.

S' il y a absence de ripisylve, le corridor sera noté comme absent. Ne rien relever pour le corridor rivulaire sauf s'il y a un changement de pente avec le paysage. Dans ce cas là, seulement relever la pente (en %) dans "Pente" et la longueur de cette zone en commentaire.

Si il y a présence de ripisylve, décrire le corridor rivulaire en indiquant la rugosité (*dans "Rugosité"*), la pente en travers (*dans "Pente"*).

- **Pente :**

La pente devra être appréciée selon les catégories suivantes : absence de pente (0-5°), faible pente (5°-20°), pente moyenne (20°-40°), forte pente (plus de 40°).

- **Rugosité :**

Définition : La rugosité correspond à la présence de végétation, bois, blocs, racines, roches ou de tout autre obstacle pouvant entraver l'écoulement des sédiments ou de l'eau. La prise en compte de ces "irrégularités" correspond à la rugosité. L'annexe RUGOSITE permet d'apprécier la rugosité.

Voir illustrations en annexe RUGOSITÉ.

La rugosité devra être évaluée selon la gradation suivante : absente, faible, moyenne, forte. Cette évaluation se base sur la présence sur les berges et l'emprise d'éléments pouvant entraver l'écoulement des sédiments et d'eau (voir définition ci-dessus)

C) Paysage

Sur chaque tronçon, relever sur le paysage les données suivantes en distinguant le paysage de droite et le paysage de gauche (*en notant la rive droite (RD) ou rive gauche (RG) dans "Rive"*).

NB : Les données sont à saisir dans la catégorie "Paysage"

Relever le type de paysage représentatif du tronçon visible depuis le cours d'eau de chaque côté des rives hors corridor rivulaire (forestier, agricole, zone humide, urbanisé).

Il est à noter que dans le cas d'un paysage en coupe rase ou en plantation, celui-ci sera relevé comme forestier. En cas de divers paysage sur le tronçon, l'information sera donnée par rapport à la longueur de chaque paysage.

Noter dans "Type" les paysages ("Paysage 1" et "Paysage 2") avec les pourcentages associés.

Relever la pente et la rugosité du paysage comme dans la section "corridor rivulaire".

NB : Noter dans "pente" et "rugosité".

Dans le cas d'un paysage "forestier", indiquer également :

- **le pourcentage d'enrésinement** à noter dans la catégorie "enrésinement".
- **les essences** du paysage : *noter l'essence dominante ("Essence 1"), secondaire ("Essence 2") et minoritaire ("Essence 3"). Il est à noter que la coupe-rase est considérée comme une essence.*
- **stade de peuplement dominant** : plantations, perchis, PB, BM, GB, TGB, IRR.

NB : A noter dans la catégorie "stade".

Dans le cas d'un paysage "zone humide" et si celle-ci présente des dysfonctionnements et a une superficie de plus de 30 ares, se reporter au protocole zone humide pour des relevés supplémentaires.

A la fin d'un tronçon, **noter la raison d'arrêt** de fin du tronçon.

ESSENCES COURAMMENT PRÉSENTES EN RIPISYLVE

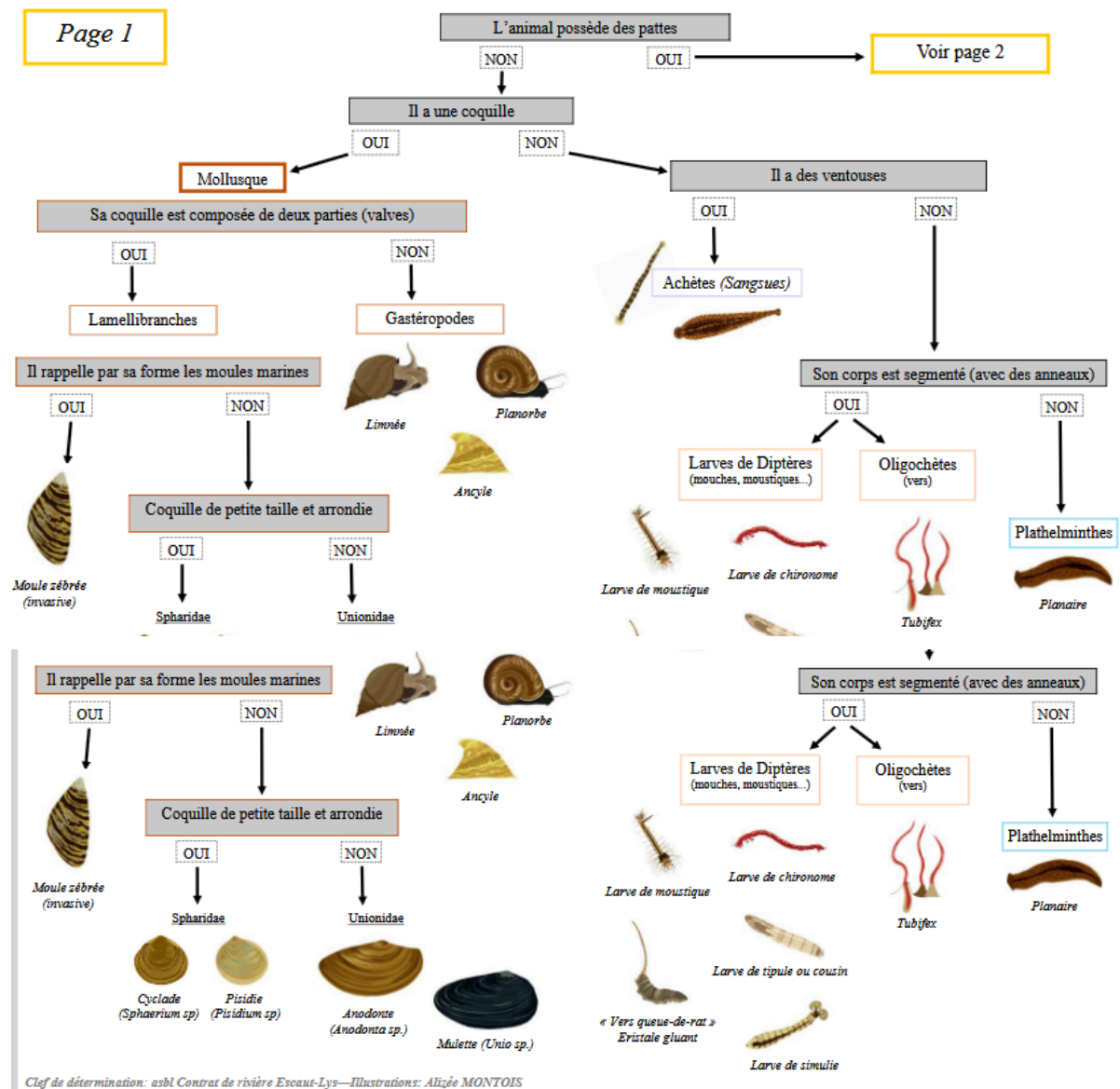
- Aulne glutineux (*Alnus glutinosa*)
- Frêne (*Fraxinus excelsior*)
- Orme des montagnes (*Ulmus major*)
- Tilleul grandes feuilles (*Tilia platyphyllos*)
- Erable sycomore (*Acer pseudoplatanoides*)
- Saule (*Salix caprea*)
- Bouleau (*Betula pendula*)

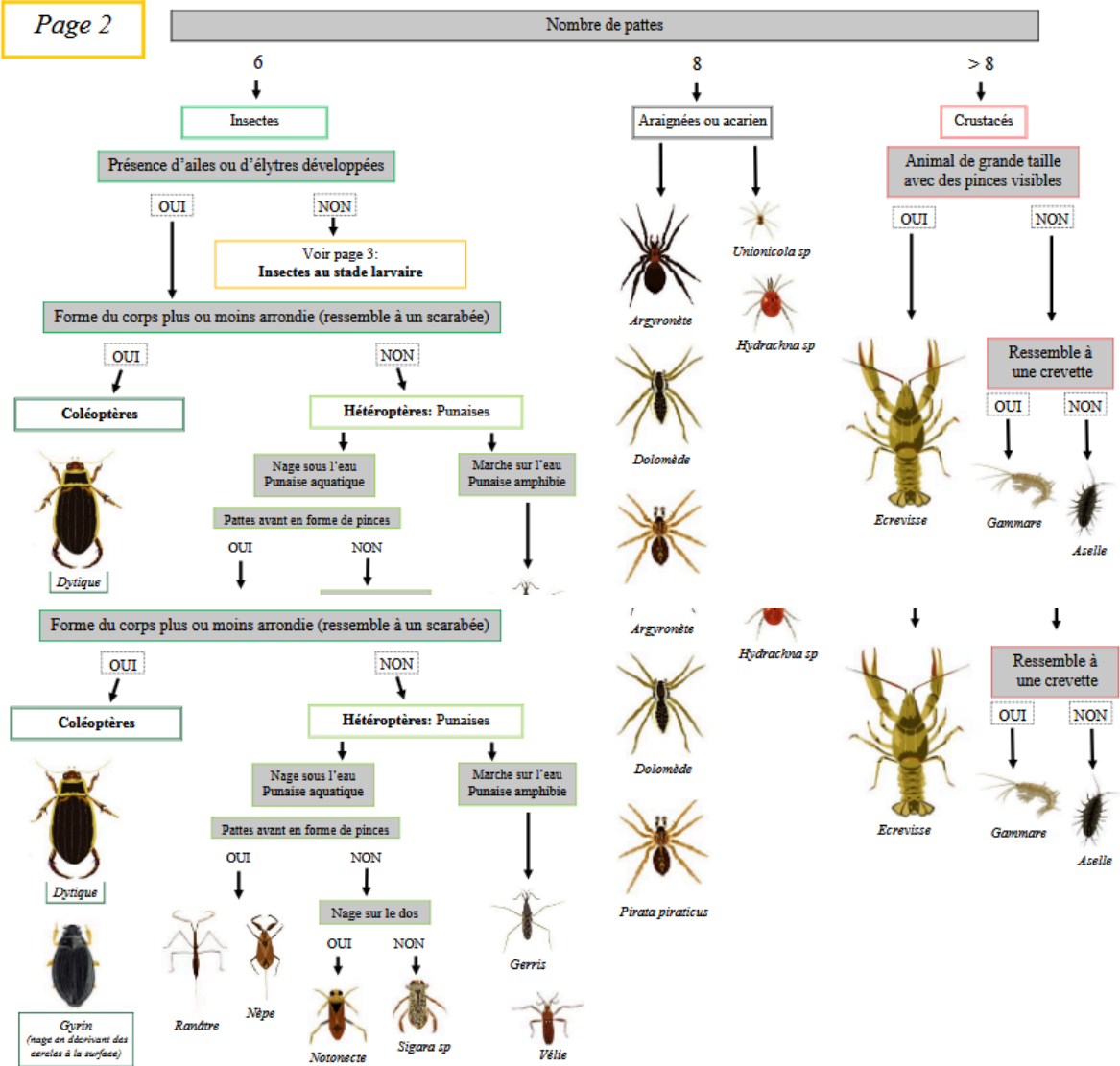
NOM DES COURS D'EAU ET ACRONYMES

Nom du ruisseau	Acronyme
Ruisseau de Tonvic	<i>RTON</i>
Ruisseau 1	<i>RI</i>
Ruisseau du Cros	<i>RCROS</i>
Ruisseau de beurières	<i>RBEU</i>
Ruisseau des vernades	<i>RVER</i>

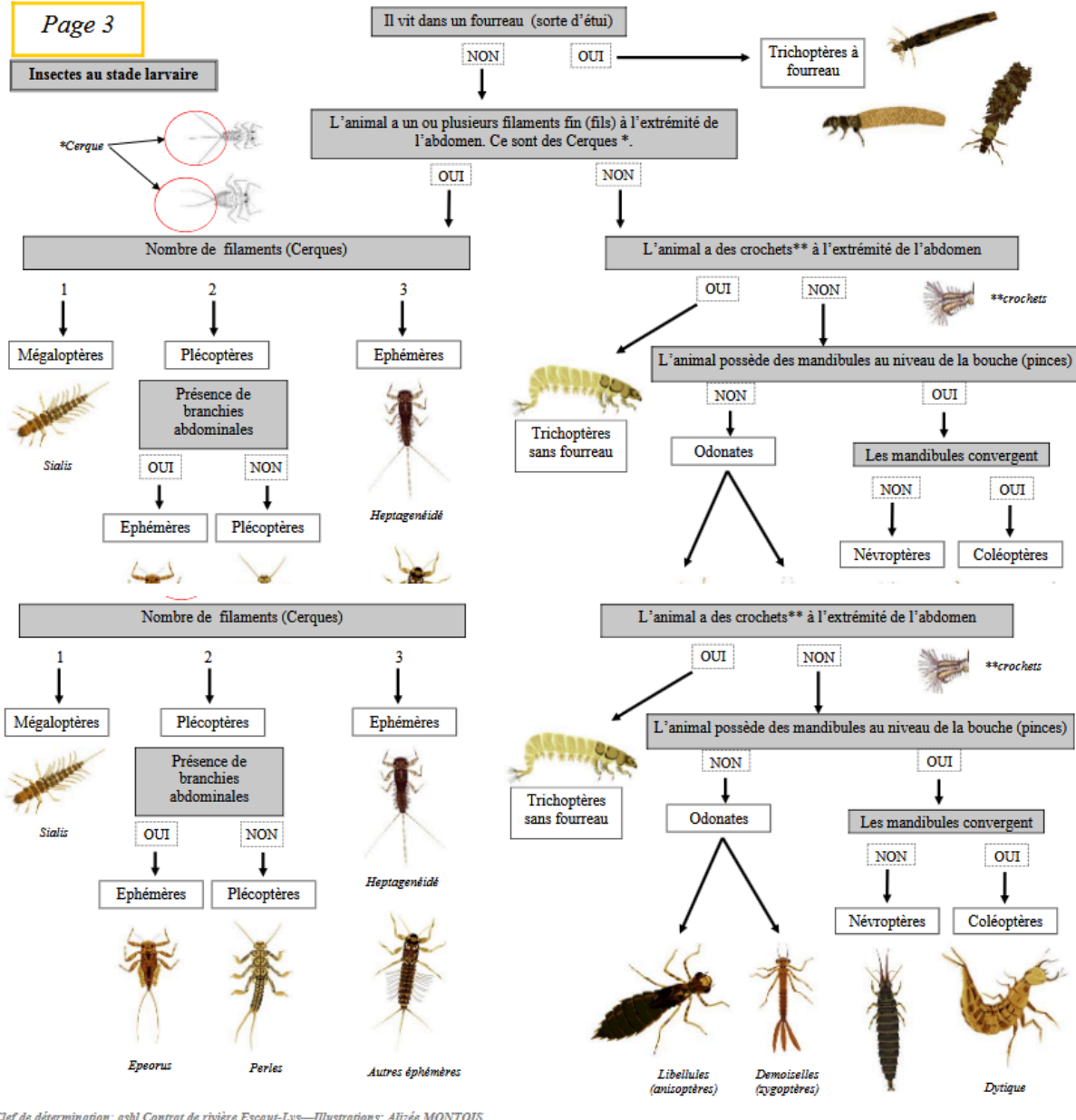
CLÉ D'IDENTIFICATION DES PRINCIPAUX INVERTÉBRÉS

Page 1





Insectes au stade larvaire



Annexe 3 : Protocoles sylviculture et peuplement dépérissant

Équipes de 3 personnes

Matériel:

- 1 tablette avec l'excel de saisie et iphigénie avec le fond de carte et les points GPS des parcelles chargés
- 1 boussole
- 1 protocole imprimé
- 1 kit "papiers de pédo" avec :
 - 1 fiche relevé de sol et un crayon
 - 1 fiche triangle des textures et clé des types d'humus
- 1 téléphone pour les photos
- 1 guide des stations du Livradois-Forez chargé sur un téléphone
- 1 code Munsell
- 1 tarière
- 1 pioche
- 1 relascope à chaînette
- 1 compas
- 1 vertex et/ou 1 mètre ruban
- 1 perche graduée

En cas de peuplement hétérogène, suffisamment grand pour être séparé en deux, on peut le découper en deux peuplements homogènes différents et réaliser deux fois le protocole.

Pour chaque peuplement, on réalise 3 ou 4 placettes (suivant la taille du peuplement) espacées de 40m minimum, à plus de 20 m de la bordure. Le protocole suivant concerne la réalisation d'une placette. La partie station n'est à faire que sur la première placette.

THR angle fixe :

Faire un tour d'horizon relascopique avec un facteur 2, compter les arbres par essence et catégorie de grosseur de bois (tous les arbres comptent avec le même poids, y compris les arbres limite).

- **PB** : 17,5-27,5 cm
- **BM** : 27.5-47,5 cm
- **GB** : 47.5-67.5 cm
- **TGB** : ≥ 67.5 cm

Rayon de 15m :

Dans un rayon de 15m autour du centre de la placette, compter le nombre d'arbres de diamètre supérieur à 17,5cm, morts ou très dépérissants (cf def de "très dépérissant"). Relever les essences concernées.

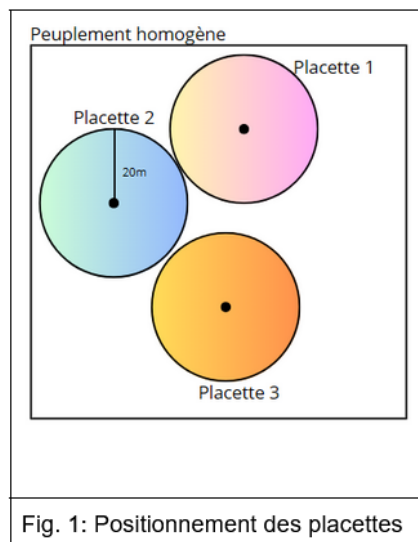


Fig. 1: Positionnement des placettes

Très déperissant :

- Sapin : plus de 30 % d'aiguilles jaunes – oranges
- Toutes essences : plus de 50 % du houppier mort

Rayon de 10m (régénération vivante) :

- Compter les perches (diamètre > 7,5 cm et <17.5cm) par essence
- Estimer le taux de recouvrement (en pourcent) de la régénération ligneuse arborée (les arbustes comme les noisetiers ne sont pas pris en compte) entre 10 cm et 2m de haut. Relever les principales essences concernées (4 maximum).
- Idem pour la régénération ligneuse entre 2m de haut et 7,5cm de diamètre.
- Relever l'espèce et le taux de recouvrement de la végétation compétitrice (ronce, genêt à balais, fougère aigle, herbacées, noisetiers), noter si cette compétitrice est majoritairement au-dessus ou en dessous de la régénération (si régénération absente, ne rien noter).

Station (une fois par peuplement) :

- Déterminer le type d'humus.
- A l'aide d'une tarière, faire un sondage (maximum 80 cm) et décrire les horizons (profondeur, texture, charge en éléments grossiers*, couleur), prendre une photo de la carotte (et noter la parcelle correspondante).
- Si la tarière bloque avant 30cm, faire une fosse à la pioche (60 cm maximum). relever les mêmes informations que précédemment. Prendre une photo de la fosse (et noter la parcelle correspondante).
- Déterminer la station à l'aide du guide des stations.

* Si le sondage est réalisé à la tarière, on considère la charge en éléments grossier < 10%.

PEUPLEMENT DÉPÉRISSANT AVANT COUPE

Équipes de 2 personnes

Matériel:

- 1 tablette avec l'excel de saisie et iphigénie avec le fond de carte et les points GPS des parcelles chargés
- 1 boussole
- 1 protocole imprimé
- 1 téléphone pour les photos
- 1 relascope à chaînette
- 1 compas
- 1 vertex et/ou 1 mètre ruban
- 1 perche graduée

Pour chaque peuplement étudié, on réalise 1 placette relascope et 3 placettes régé/bois mort.

Prendre une photo qui vous paraît illustrative et l'envoyer sur le groupe avec l'index parcelle.

- THR facteur 2 :

Faire un tour d'horizon relascopique avec un facteur 2, noter dans le tableur pour chaque essence (si possible), le nombre d'arbres comptés, par catégorie de grosseur de bois (PB, BM, GB, TGB), et catégorie (mort, très dépérissant, « ok »). Les chandelles sont comptées comme des arbres morts si leur hauteur dépasse 1,30m.

Très dépérissant :

- Sapin : plus de 30 % d'aiguilles jaunes – oranges dans le houppier
- Toutes essences : plus de 50 % du houppier mort

3 placettes de rayon 10m sans intersections (régénération et bois mort) :

- régénération:

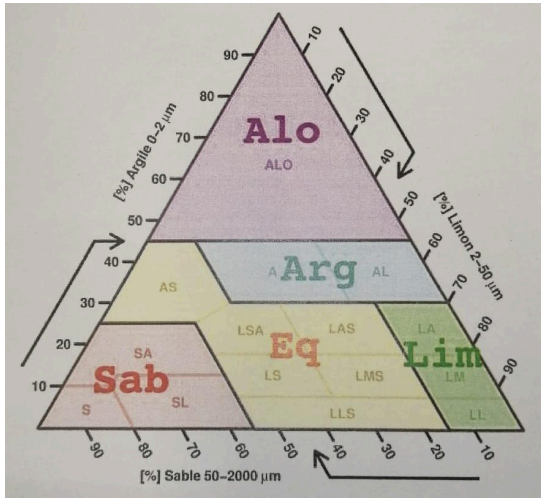
- Compter les perches (diamètre > 7,5 cm et <17.5cm) par essence
- Estimer le taux de recouvrement (en pourcentage) de la régénération ligneuse arborée (les arbustes comme les noisetiers ne sont pas pris en compte) entre 10 cm et 2m de haut. Relever les principales essences concernées (4 maximum).
- Idem pour la régénération ligneuse entre 2m de haut et 7,5cm de diamètre.
- Relever l'espèce et le taux de recouvrement (en pourcentage) de la végétation compétitrice (ronce, genêt à balais, fougère aigle, herbacées, noisetiers), noter si cette compétitrice est majoritairement au-dessus ou en dessous de la régénération (si régénération absente, ne rien noter).

- quantité de bois mort au sol :

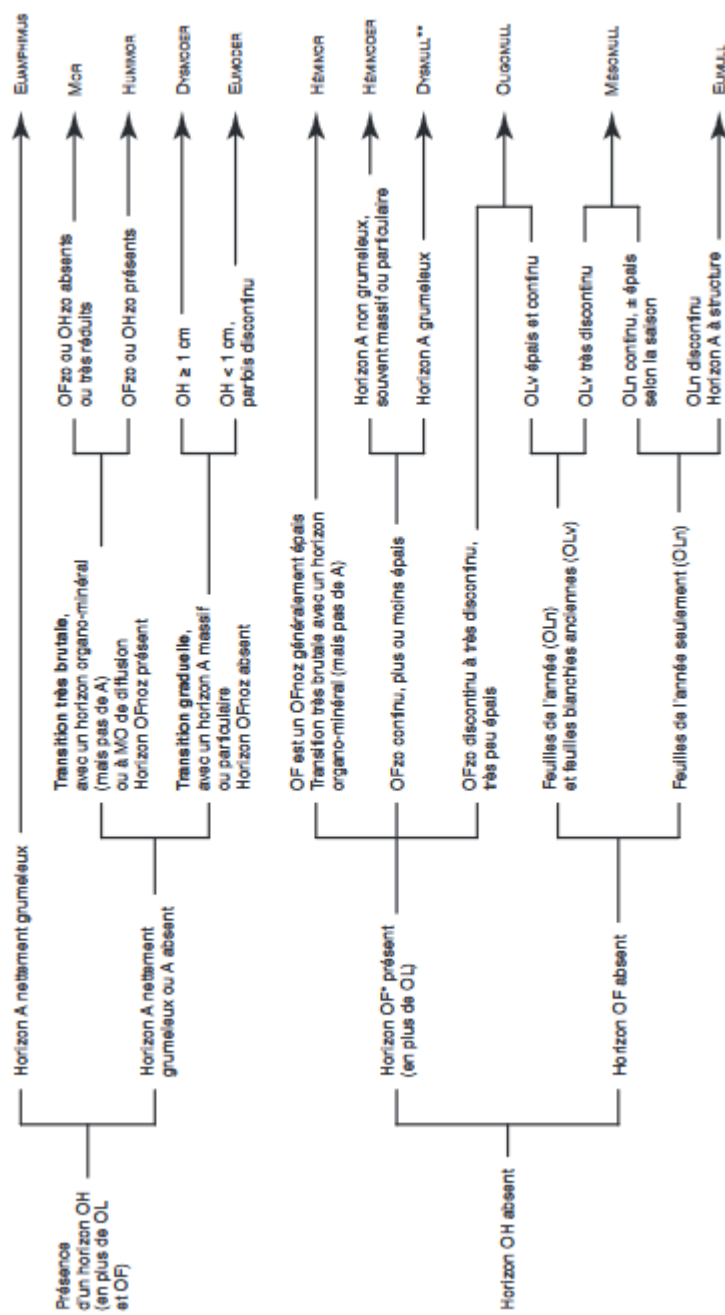
- Dans un rayon de 10 m, déterminer le taux de recouvrement du bois mort au sol (à partir d'un diamètre de 30 cm inclus).

Index de parcelle	Station	Humus	Sondage	Profondeur (cm)	Texture (selon triangle des textures)	Charge en éléments grossiers (%)	Couleur (code Munsell)
			horizon 1				
			horizon 2				
			horizon 3				
			horizon 4				
			horizon 5				
			horizon 6				
			horizon 7				
			horizon 8				
			horizon 1				
			horizon 2				
			horizon 3				
			horizon 4				
			horizon 5				
			horizon 6				
			horizon 7				
			horizon 8				
			horizon 1				
			horizon 2				
			horizon 3				
			horizon 4				
			horizon 5				
			horizon 6				
			horizon 7				
			horizon 8				
			horizon 1				
			horizon 2				
			horizon 3				
			horizon 4				
			horizon 5				
			horizon 6				
			horizon 7				
			horizon 8				

Protocole Sylviculture - Fiche descriptive des sols



Triangle des textures
source: Augusto et al., 2018



* Ne pas confondre quelques cébris de feuilles blanchies de l'année (horizon OLn) avec un véritable horizon OF. À débors généralement transformés et toujours mêlés de granules de matières organiques (boulettes fécales).

** Si l'horizon A est à structure grumeleuse très nette et stable : dymull actif.

Annexe 4 : Protocole pour parcelle coupe rase

Réaliser un transect suivant la diagonale de la parcelle en partant d'un angle, en faisant un arrêt tous les 10m sur 100 m maximum. En cas d'arrêt sur un cloisonnement, un andain, une zone de rassemblement de bois ou une piste, le point est décallé au plus proche sur le transect. Noter si le sol au niveau de l'arrêt dans un rayon de 1m est tassé, non-tassé, ou travaillé. En cas d'ornière, noter « tassé » puis « X », relever sa profondeur, et son orientation par rapport à la pente. En cas de sillons de décompactage, noter « retravaillé » puis « X », puis profondeur et orientation.

Après avoir fait le transect, répondre aux questions suivantes :

- Y a t il une plantation ? Si oui de quelle essence ?
- Y a t il des andains ? Fait à la pelle (avec de la terre dedans) ? Selon quelle orientation suivant la pente ?
- Y a t il des cloisonnements ? De quelle largeur ? Quel espacement ? Ont-ils été respectés ?

Dans la perspective de créer des chantiers exemples, noter tout ce qui semble intéressant comme exemples du lien forêt-eau lors d'une coupe (« cas d'école » positif ou négatif) :

- Remarques sur la desserte (érosion, sens)
- Remarques par rapport aux cours d'eau (s'il y en a un à proximité)

Annexe 5 : Protocole captage

Matériel (à doubler si besoin):

- Fiche de relevé diagnostic sylvicole
- Fiche protocole Zone Humide
- 1 Tablette avec Excel à remplir et logiciel Iphigénie avec les points des captages
- Vertex
- Compas forestier
- Plan papier des zones de captages inventoriées
- Décamètre
- Tarière
- Pioche
- Guide description des sols
- Relascope à chaînette (avec une encoche de facteur 1 et facteur 2)
- Guide correspondance pente/rayon de la placette
- Plan des réseaux d'alimentation en eau potable
- Clisimètre

1 - Localisation et cheminement jusqu'aux captages d'intérêts

La quasi-totalité des **29 captages** du Syndicat Intercommunal d'Aménagement et de l'Eau Potable (SIAEP) est à analyser. Une attention particulière sera portée sur les captages **n°2, n°4, n°10, n°17, n°19, n°22, n°24, n°25, n°29**.

Le captage n°29 est le seul forage du SIAEP. Il ne concerne donc pas notre étude. Au total, cela fait une surface de 62,5 ha de prospecté.

Pour se rendre sur chaque captage, se déplacer avec l'aide des points sur Iphigénie et au carte réalisée sur ArcGis des zones PPR ou grâce au Plan des réseaux d'alimentation en eau potable. Pour chaque captage, des unités de peuplement ont été pré-établies sur le plan papier (fait à partir des Images Infra-rouge Fausse Couleur). Le point de coordonnées exact du captage est à ajouter sur Iphigénie et à renommer : "**Point_Captage_X**" (avec X le numéro du captage).

Cependant si l'opérateur se rend compte qu'une unité peut être scindée en sous-unité, il faudra découper ces zones en maximum 2 unités de peuplement (surface minimum possible $>25m*25m$), il sera nécessaire de :

- prendre les coordonnées du nouveau point (iphigénie)
- tracer les unités de peuplement estimée sur le plan papier
- donner un nom décrivant l'unité de peuplement

Le centre de la placette à étudier sera laissée au libre choix de l'opérateur dans le cas d'un scindage ou s'il juge pertinent de le faire, avec comme critère un souci de représentabilité de l'unité de peuplement.

Unité de peuplement = espace dont la composition en essence et/ou en structure diffère clairement de la zone voisine

2 - Infrastructure et état général

Pour tous les captages, lors du cheminement entre les unités de peuplement, il est important de noter la présence d'éléments notables (voire liste ci-dessous) et de les relever dans la rubrique "général" selon les colonnes correspondantes :

- Présence de route forestière :
- Piste forestière : orientation selon la pente ? (oui/non) qui arrive directement sur le périmètre immédiat
- Sédiments déplacés à proximité de la voirie, en contact direct sur le périmètre de protection immédiate ?
- Coupe rase : Présence d'andains ? Fait à la pelle (avec de la terre dedans) ? Orientation des andains selon la pente ?
- Présence d'une place de dépôt à proximité (et donner une estimation de la distance)
coordonnées à relever avec iphigénie
description rapide à saisir
- Parcelle avec cloisonnements : sont-elles orientées selon la pente ?
- PPI déboisé ? PPI clôturer ?

Le niveau de menace pour le captage (faible, moyen, fort) est à apprécier une fois toutes les cases complétées et à **expliquer concrètement dans remarques** (ex: cloisonnements qui peuvent mener les sédiments directement sur le périmètre de protection immédiate). Il permet d'établir une estimation de la vulnérabilité du captage.

Pour les captages 1, 2, 3, 8, 19, 25, 26, 27, on chemine sur les routes identifiées sur l'IGN en notant la présence éventuelle des éléments listés ci-dessus.

3 - Peuplement

Si présence d'une coupe rase dans le périmètre, relever :

- Présence d'une plantation ? Si oui de quelle essence ? La densité ?
- Y a-t-il des cloisonnements ? De quelle largeur ? Quel espacement ?

Ces éléments seront à noter dans la case "remarque" de la rubrique "Peuplement".

Sinon, faire un tour d'horizon relascopique (THR) et noter dans le tableur l'essence, la catégorie de grosseur de bois et le surface terrière qui correspond (tous les arbres comptent avec le même poids, y compris les arbres limite (rentre de manière limite dans l'encoche)). La surface terrière est à "découper" selon les essences présentes, exemple : si présence de 2 essences, faire 2 THR distincts.

Si vous hésitez sur l'encoche, appréciez la pente avec le clisimètre.

Les valeurs à entrer dans l'excel sont :

- essence ;
- classe de diamètre
 - **PB** : 17,5-27,5 cm
 - **BM** : 27.5-47,5 cm
 - **GB** : 47.5-67.5 cm
 - **TGB** : ≥ 67.5 cm
- hauteur en m (précision au 10e) de l'arbre le plus proche du centre de la placette des deux essences dominantes. Les arbres mesurés seront des GB ou des TGB. A reporter à BM si absence de GB ou TGB. Indiquer également son diamètre précis au cm.

Dépérissement, dans un rayon de 15 m depuis le centre de la placette, noter :

- nombre d'arbres morts ou très dépérissants (cf def de "très dépérissant") de diamètre supérieur à 17,5 cm, chandel compris.
- essence concernée si possible

Très dépérissant :

- Sapin : présence d'aiguilles jaunes – oranges sur supérieur à 30% du houppier notable
- Toutes essences : plus de 50 % du houppier mort

Dans un rayon de 10 m (qui part du centre), noter la régénération :

- nombre de perches (d'essence ayant un intérêt sylvicole) par essence ($7,5 \text{ cm} < \text{diamètre} < 17,5 \text{ cm}$) ;
- le taux de recouvrement total de la régénération ligneuse arborée d'intérêt sylvicole en 2 classes (comprise entre 10 cm et de 2 m de hauteur, et entre 2 m de hauteur et un diamètre $< 7,5 \text{ cm}$). ATTENTION, les arbustes comme les noisetiers ne sont pas pris en compte.
 - essences présentes (max les 4 principales)
 - taux de recouvrement par essence
- noter leur aboutissement (0 = pas d'abroutissement, 1, 2, 3 = tout est abrouti) sur bourgeon terminal
- le taux de recouvrement de la végétation compétitrice (ronce, genêt à balais, fougère aigle, herbacées, noisetiers,...) :
 - position : végétation compétitrice au-dessus ou en dessous de la régénération (si régénération absente, noter au-dessus),
 - espèces de la végétation compétitrice,
 - taux de recouvrement de la végétation compétitrice par espèce.

4 - Zone humide :

Si des points du maillage captage sont identifiés comme zone humide potentielle, il sera demandé de réaliser le protocole "zone humide" (cf protocole dédiée).

5 - Estimation RUM :

Pour chaque unité de peuplement identifié, mettre un point GPS sur iphigénie et le nommer : **numéro de captage_numéro du peuplement** : Ex: 9_1. Un seul sondage est réalisé par peuplement.

- Creuser un trou à l'aide d'une tarière (1 mètre maximum) par unité de peuplement, noter pour chaque horizon identifié :
 - texture (combinaison de 2 lettres de l'ensemble : A, S, L, a, l, s, exemple : As pour dominance d'argile et présence de sable)
 - charge en éléments grossier (estimation selon le blocage et la profondeur de blocage) (supérieur ou inférieur à 10%)
 - raison d'arrêt (volontaire ou blocage)

NB : Si le sondage est bloqué (blocage par des cailloux) à moins de 20cm de profondeur, réessayer à côté. Au bout de 3 essais, utiliser la pioche pour au moins creuser jusqu'à 60 cm.

Faire une photo du sondage tarière avec une échelle

Annexe 6 : Méthode de calcul de la RUM

D'après (Bouthier, 2022) [BOUTHIER A. et SCHEURER O. 2022, Réservoir en eau du sol utilisable par les cultures, Guide d'estimation, Editions Arvalis, 104 pages] :

$$RUM = \sum_{\text{horizons } i} RUM_i$$

➤ Dans le cas où $EG > 10\%$:

$$RUM_i = [HUM_i \times (100 - EG) / 100] \times e$$

➤ Dans le cas où $EG < 10\%$:

$$RUM_i = HUM_i \times e$$

avec :

- RUM_i la Réserve Utile Maximale d'un horizon i (mm)
- HUM_i l'Humidité Utile Maximale d'après Al majou [AL MAJOU H. et al, 2008, Étude et prédiction des propriétés de rétention en eau des sols : Prise en compte de la composition et de l'état structural du sol, Science du Sol, université d'Orléans, 266 pages.] ($mm.cm^{-1}$)
- e l'épaisseur de l'horizon i (cm)
- EG le pourcentage volumique en éléments grossiers (%)

NB : Il a été choisi d'utiliser les valeurs de HUM décrites par H.Al Majou car elles sont adaptées aux sols forestiers.

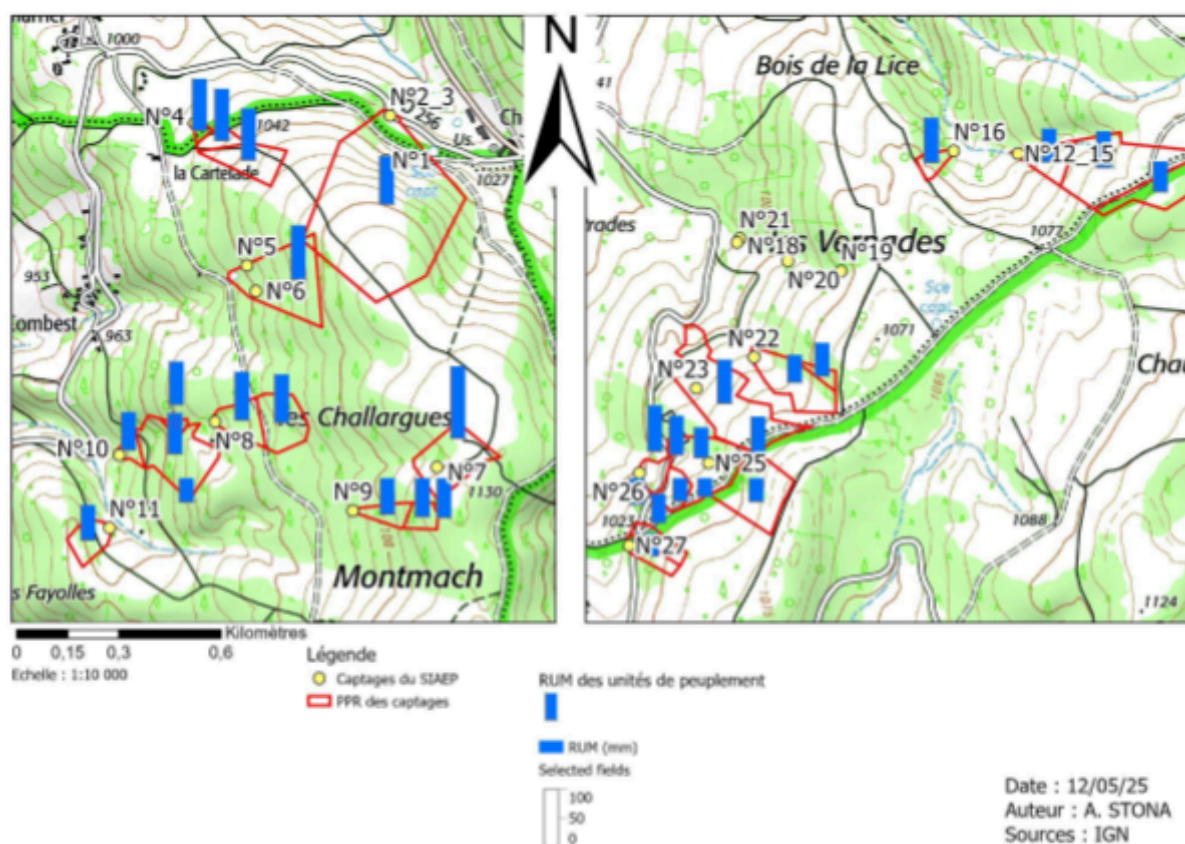


Figure 1: Valeur de la RUM pour les différentes unités de peuplements des captages du SIAEP

Annexe 7: Tableau de comparaison d'évapotranspiration entre les différentes natures d'occupation de sol

Tableau VII "Comparaison" proposée entre valeurs(1) d'évapotranspiration				
	Forêts tempérées	Hales	Prairies	Cultures
Évapotranspiration (mm/an)	450 à 600	~ 450	400	250

(1) Valeurs arrondies pour simplification

Tableau VIII Valeurs d'évapotranspiration et de transpiration potentielles exprimées en [évapotranspiration (milliers de km ³ /an) / surface (millions de km ²)]					
	Forêts	Zones humides	Prairies	Cultures	Autres
Rochström & Gordon, 2001	0,72	0,82	0,51	0,38	
Oki & Kanae, 2006 ⁽¹⁾	0,72	1	0,43	0,49	0,24
Pour comparaison	lacs	0,48			
	océans ⁽¹⁾	1,14			
⁽²⁾ Tremberth <i>et al.</i> , 2007	océans ⁽²⁾	1,21			

Annexe 8 : Localisation de la zone humide non fonctionnelle au niveau du PPR des captages 12 à 15

Légende :

ZH (=zone humide)

• oui

• Points Captages

□ PPR_12_13_14_15

— Réseau hydrographique

Valeur prédictive ZH (INPN)

0,001 - 20

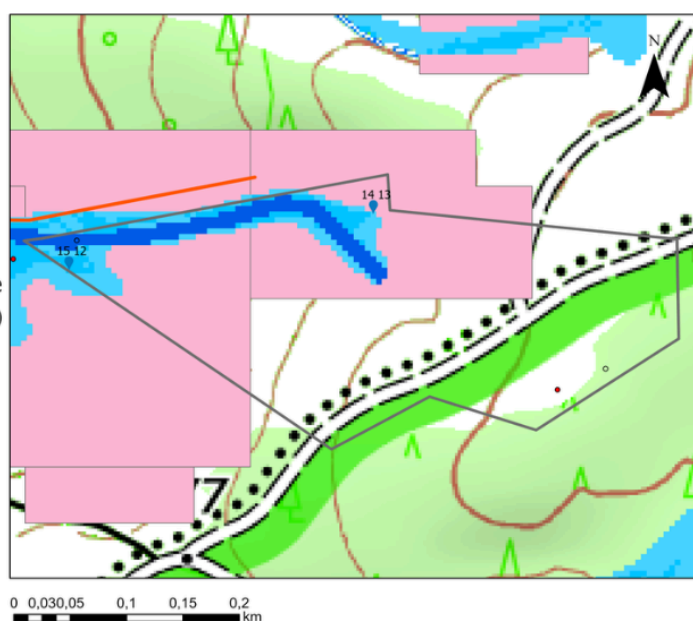
20,001 - 46

46,001 - 60

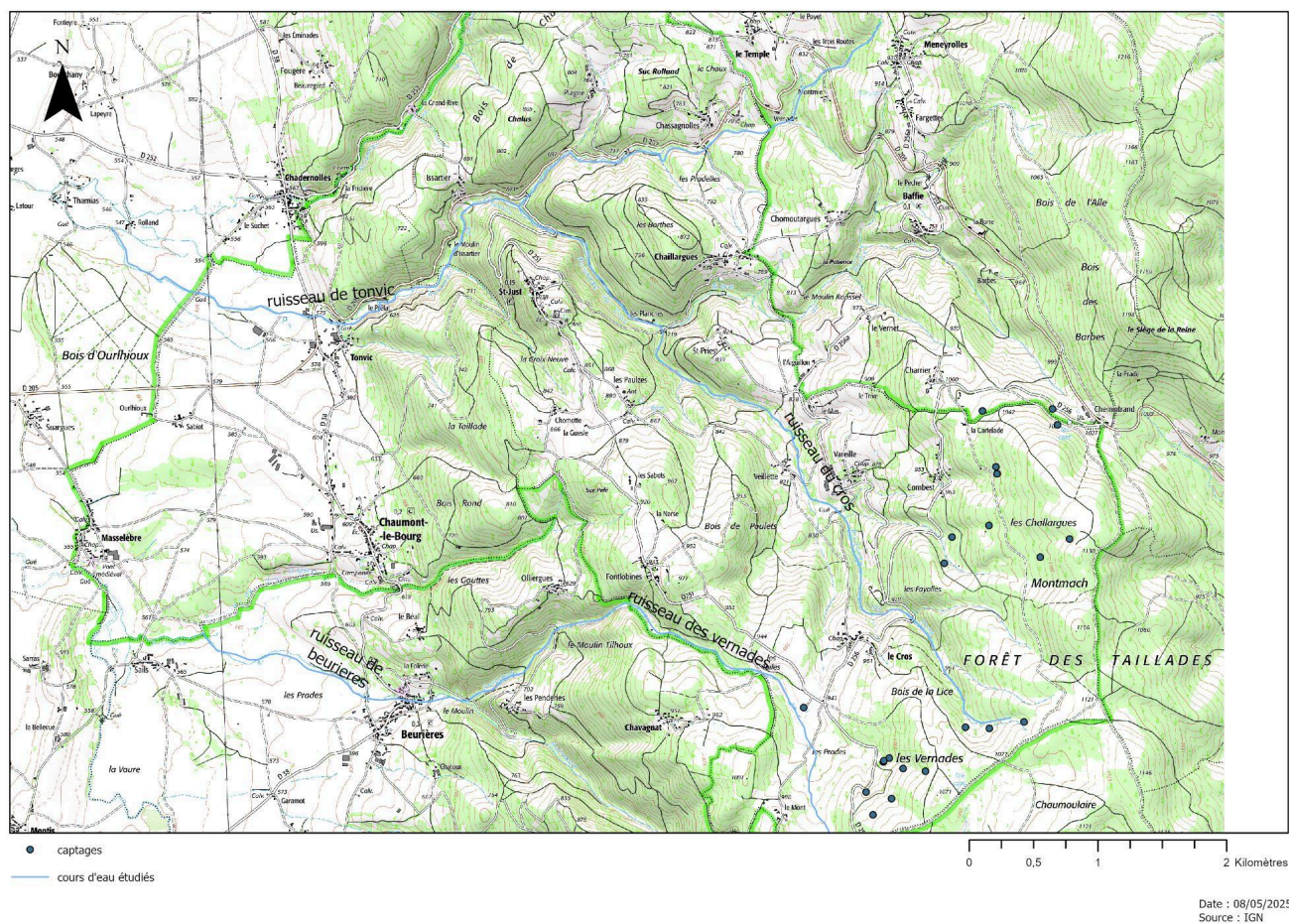
60,001 - 84

84,001 - 100

■ ZH_potentielles_Dore



Annexe 9 : Carte des cours d'eau étudiés



Annexe 10 : Tableau de classification fonctionnelle

		Granulométrie équilibrée		Granulométrie déséquilibrée	
		l/p correct	l/p incorrect	l/p correct	l/p incorrect
Présence de ripisylve	Tracé naturel	A	B	B	C
	Tracé artificiel	B	C	C	D
Absence de ripisylve	Tracé naturel	B	B	C	D
	Tracé artificiel	C	C	D	E

Annexe 11 : Détails des tronçons (les tronçons grisés sont les tronçons les plus vulnérables topographiquement (classes 1-10) et avec une rugosité faible ou absente)

Ruisseau	Tronçon	Longueur (m)	Fonctionnalité	vulné_topo	vulné_rugosité	vulné_lgterme
RCROS	T1	92,3	B	16	faible	DI
RCROS	T2	66,4	B	16	faible	DA
RCROS	T3	130,4	B	25	faible	DA
RCROS	T4	109,5	B	2	faible	DI
RCROS	T5	157,8	A	13	absente	DI
RCROS	T6	20,6	B	7	faible	DI
RCROS	T7	196,4	B	16	faible	DI
RCROS	T8	195,0	B	13	faible	DI
RCROS	T9	224,6	A	7	faible	DI
RCROS	T10	140,9	A	7	faible	DI
RCROS	T11	181,6	B	2	faible	DI
RCROS	T12	196,2	D	1	faible	DI
RCROS	T13	169,9	B	16	faible	DP
RCROS	T14	79,8	A	16	faible	DI
RCROS	T15	383,3	B	17	faible	DI
RCROS	T16	257,1	A	17	faible	DI
RCROS	T17	270,648347	A	26	moyenne	DA
RCROS	2_T1	210,6	C	17	absente	DA
RCROS	2_T2	60,3	B	7	faible	DI
RCROS	2_T3	100,2	B	18	faible	DI
RCROS	2_T4	50,2	B	8	absente	DI
RCROS	2_T5	137,8	B	23	faible	DA
RCROS	2_T6	78,9	C	22	faible	DI
RCROS	2_T7	201,9	B	8	faible	DI
RCROS	2_T8	163,6	B	13	faible	DA
RCROS	2_T9	238,2	B	19	faible	DA
RCROS	2_T10	119,1	B	10	faible	DA
RCROS	2_T11	210,1	C	26	faible	DA
RCROS	2_T12	193,3	D	8	faible	DI
RCROS	2_T13	305,5	C	26	faible	DA
R1	T3	116,5	B	1	faible	DI
R1	T4	60,2	C	1	moyenne	DI
R1	T5	77,5	B	1	absente	DP
R1	T6	238,4	B	10	moyenne	DI
R1	T7	140,8	A	17	moyenne	DI
R1	T8	98,9	B	2	absente	DP
R1	T11	91,1	B	11	moyenne	DI
R1	T12	160,86001	B	1	absente	DA
R1	T13	260,0	B	1	absente	DP
R1	T14	104,7	B	1	absente	DP
R1	T15	208,3	B	18	faible	DI
R1	T16	195,2	B	1	absente	DI
R1	T17	78,9	A	23	forte	DA
R1	T18	172,3	B	1	absente	DP
R1	T19	226,9	C	13	faible	DA
R1	T20	205,1	C	1	absente	DI
R1	T9	112,2	A	13	moyenne	DI
R1	T10	184,1	A	26	faible	DA
R1	T1	180,2	C	1	moyenne	DI
R1	T2	121,9	B	1	moyenne	DI
RTONV	T1	71,1	A	12	moyenne	DA
RTONV	T2	73,0	A	15	faible	DI
RTONV	T3	154,2	A	16	faible	DI

RTONV	T4	49,6	A	7	faible	DI
RTONV	T5	103,8	A	19	faible	DP
RTONV	T6	63,3	A	18	faible	DP
RTONV	T7	167,8	A	7	faible	DI
RTONV	T10	248,1	B	8	faible	DI
RTONV	T11	135,2	B	5	faible	DI
RTONV	T12	99,4	B	18	faible	DI
RTONV	T13	115,2	C	2	faible	DI
RTONV	T14	150,9	B	8	faible	DI
RTONV	T15	121,9	A	13	moyenne	DI
RTONV	T16	92,4	A	10	moyenne	DI
RTONV	T8	207,6	A	16	faible	DI
RTONV	T9	103,1	A	17	faible	DI
RTONV	T17	33,7	A	7	absente	DI
RVER	T1	83,3	B	1	faible	DA
RVER	T2	49,0	B	1	absente	DA
RVER	T3	59,4	A	19	absente	DP
RVER	T4	243,1	B	1	faible	DI
RVER	T5	146,2	A	10	moyenne	DA
RVER	T6	206,1	B	2	faible	DI
RVER	T7	148,5	B	16	faible	DI
RVER	T8	95,9	B	3	faible	DI
RVER	T9	134,7	B	1	faible	DI
RVER	T10	105,8	B	1	faible	DI
RVER	T11	91,6	B	14	faible	DI
RVER	T12	108,1	C	17	moyenne	DI
RVER	T13	86,8	C	14	faible	DI

RVER	T14	180,8	B	9	faible	DI
RVER	T15	73,9	B	9	faible	DA
RVER	T16	204,4	A	18	faible	DI
RVER	T17	500,3	C	9	faible	DA
RVER	T18	212,9	C	9	faible	DP
RVER	T19	84,1	D	9	faible	DI
RVER	T20	75,3	C	24	faible	DI

Ruisseau	Tronçon	Origine	Granulométrie	L/P	Ripisylve	Classe de fonctionnalité
RVER	T1	naturelle	équilibré	4,4	présente	B
RVER	T2	naturelle	équilibré	6,8	présente	B
RVER	T3	naturelle	équilibré	4,2	présente	A
RVER	T4	naturelle	équilibré	3,8	présente	B
RVER	T5	naturelle	équilibré	4,6	présente	A
RVER	T6	naturelle	équilibré	5,3	absence	B
RVER	T7	naturelle	équilibré	1,5	présente	B

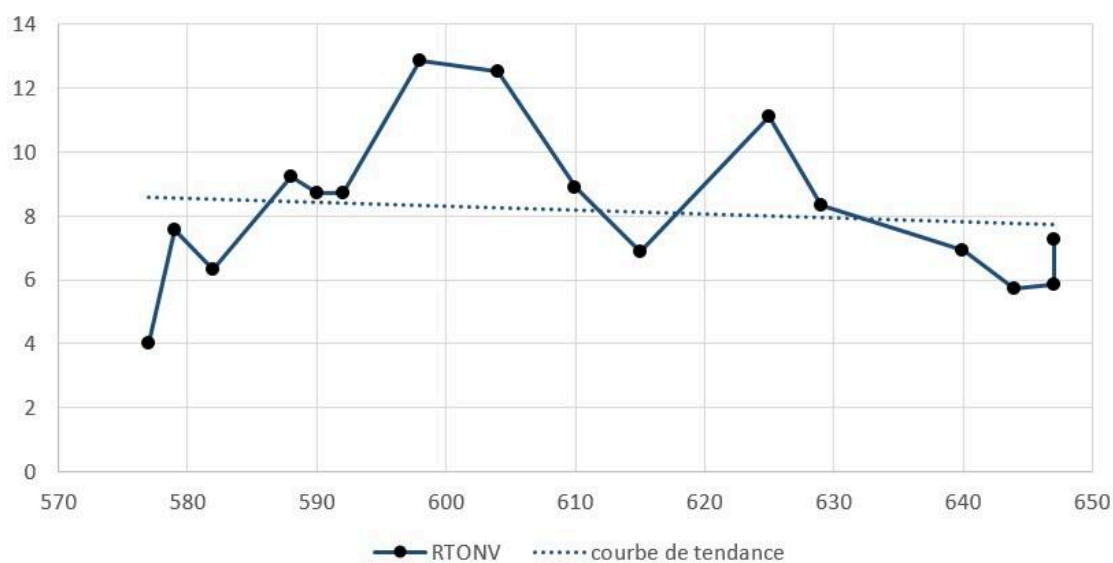
RVER	T8	naturelle	équilibré	4,2	présente	B
RVER	T9	naturelle	équilibré	5,0	absence	B
RVER	T10	naturelle	équilibré	8,0	absence	B
RVER	T11	naturelle	équilibré	2,2	présente	B
RVER	T12	naturelle	équilibré	2,0	présente	C
RVER	T13	naturelle	équilibré	2,8	absence	C
RVER	T14	naturelle	équilibré	4,8	absence	B
RVER	T15	naturelle	équilibré	5,5	absence	B
RVER	T16	naturelle	équilibré	4,0	présente	A
RVER	T17	naturelle	équilibré	1,0	absence	C
RVER	T18	naturelle	équilibré	1,0	absence	C
RVER	T19	artificielle	équilibré	1,8	absence	D
RVER	T20	artificielle	équilibré	1,0	présente	C
R1	T1	naturelle	équilibré	0,4	absence	C
R1	T2	naturelle	équilibré	8,3	absence	B
R1	T3	naturelle	équilibré	6,5	absence	B
R1	T4	naturelle	tendance sableuse	3,8	absence	C
R1	T5	naturelle	équilibré	4,0	absence	B
R1	T6	naturelle	équilibré	0,2	présente	B
R1	T7	naturelle	équilibré	4,2	présente	A
R1	T8	naturelle	équilibré	4,8	absence	A
R1	T9	naturelle	équilibré	8,2	présente	A
R1	T10	naturelle	équilibré	7,4	présente	B
R1	T11	naturelle	équilibré	8,7	présente	B
R1	T12	naturelle	équilibré	7,2	absence	B

R1	T13	naturelle	équilibré	10,0	absence	B
R1	T14	naturelle	équilibré	8,0	absence	B
R1	T15	naturelle	tendance sableuse	9,5	présente	B
R1	T16	naturelle	tendance sableuse	4,4	présente	B
R1	T17	naturelle	équilibré	4,4	présente	A
R1	T18	naturelle	tendance sableuse	6,0	absence	B
R1	T19	artificielle	tendance sableuse	4,8	absence	C
R1	T20	naturelle	tendance sableuse	1,5	absence	C
RCROS	T1	naturelle	bloc gravillons	6,3	présente	B
RCROS	T2	naturelle	bloc gravillons	11,6	présente	B
RCROS	T3	naturelle	bloc gravillons	11,0	présente	B
RCROS	T4	naturelle	bloc gravillons	13,2	absence	B
RCROS	T5	naturelle	bloc gravillons	9,7	présente	A
RCROS	T6	naturelle	bloc gravillons	8,5	absence	B
RCROS	T7	naturelle	bloc gravillons	5,7	présente	B
RCROS	T8	naturelle	bloc gravillons	5,8	présente	B
RCROS	T9	naturelle	bloc gravillons	8,1	présente	A
RCROS	T10	naturelle	bloc gravillons	7,4	présente	A
RCROS	T11	naturelle	équilibré	6,3	absence	B
RCROS	T12	naturelle	tendance sableuse	25,0	absence	D
RCROS	T13	naturelle	équilibré	5,0	absence	B
RCROS	T14	naturelle	équilibré	7,5	présente	A

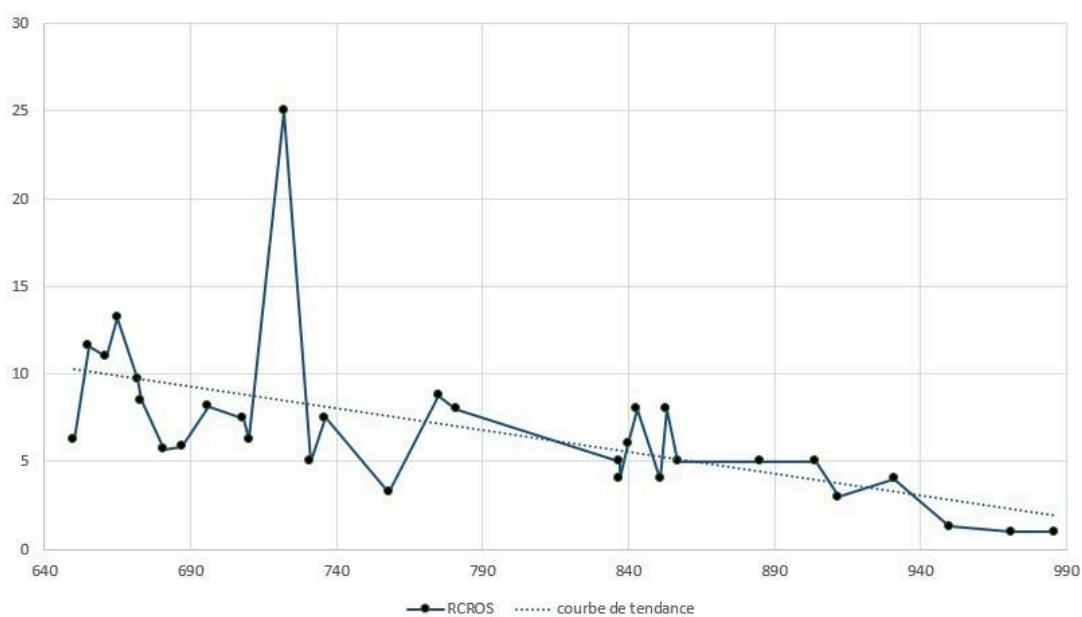
RCROS	T15	naturelle	équilibré	3,3	présente	B
RCROS	T16	naturelle	équilibré	8,8	présente	A
RCROS	T17	naturelle	équilibré	8,0	présente	A
RCROS	2_T1	artificielle	équilibré	4,4	présente	C
RCROS	2_T2	naturelle	équilibré	6,0	présente	B
RCROS	2_T3	naturelle	équilibré	2,3	présente	B
RCROS	2_T4	naturelle	équilibré	2,0	absence	B
RCROS	2_T5	naturelle	équilibré	3,3	présente	B
RCROS	2_T6	naturelle	tendance sableuse	1,6	présente	C
RCROS	2_T7	naturelle	équilibré	2,6	absence	B
RCROS	2_T8	naturelle	tendance sableuse	4,6	présente	B
RCROS	2_T9	naturelle	équilibré	4,6	présente	B
RCROS	2_T10	naturelle	tendance sableuse	7,3	présente	B
RCROS	2_T11	naturelle	tendance sableuse	6,4	présente	C
RCROS	2_T12	naturelle	tendance sableuse	15,4	absence	D
RCROS	2_T13	artificielle	tendance sableuse	8,0	présente	C
RCROS	2_T14	artificielle	tendance sableuse	8,0	présente	C
RTONV	T1	naturelle	équilibré		présente	A
RTONV	T2	naturelle	tendance sableuse	7,5	présente	A
RTONV	T3	naturelle	tendance sableuse	6,3	présente	A
RTONV	T4	naturelle	tendance sableuse	9,2	présente	A

RTONV	T5	naturelle	tendance sableuse	8,7	présente	A
RTONV	T6	naturelle	tendance sableuse	8,7	présente	A
RTONV	T7	naturelle	tendance sableuse	12,9	présente	A
RTONV	T8	naturelle	tendance sableuse	12,5	présente	A
RTONV	T9	artificielle	tendance sableuse	8,9	présente	A
RTONV	T10	naturelle	tendance sableuse	6,9	présente	A
RTONV	T11	naturelle	tendance sableuse	11,1	absence	B
RTONV	T12	naturelle	tendance sableuse	8,3	présente	B
RTONV	T13	artificielle	tendance sableuse	7	absence	B
RTONV	T14	naturelle	tendance sableuse	6,9	absence	C
RTONV	T15	naturelle	tendance sableuse	5,7	présente	B
RTONV	T16	naturelle	tendance sableuse	5,8	présente	A
RTONV	T17	naturelle	tendance sableuse	7,3	présente	A

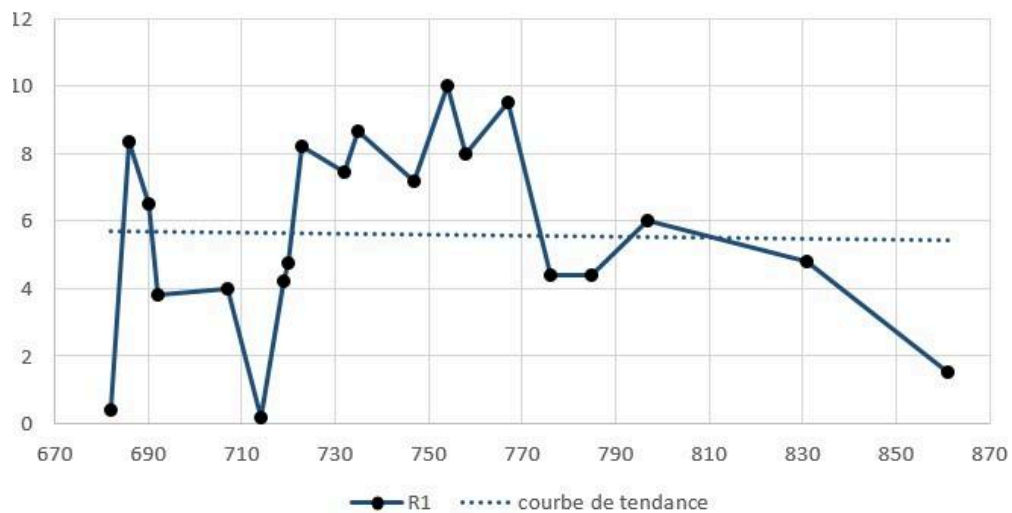
Annexe 12 : graphiques du rapport l/p des cours d'eau



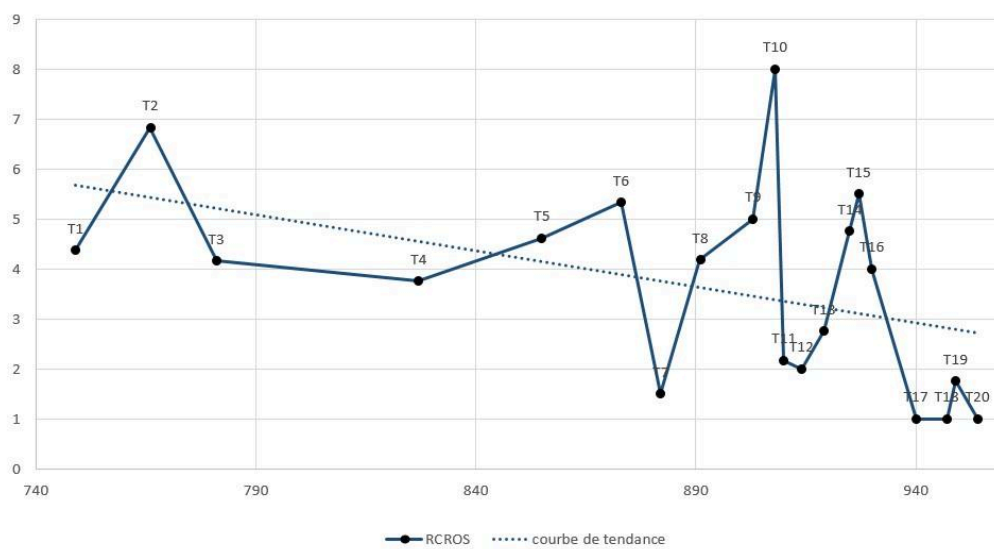
Rapport L/P en fonction de l'altitude pour RTONV



Rapport L/P en fonction de l'altitude pour RCROS

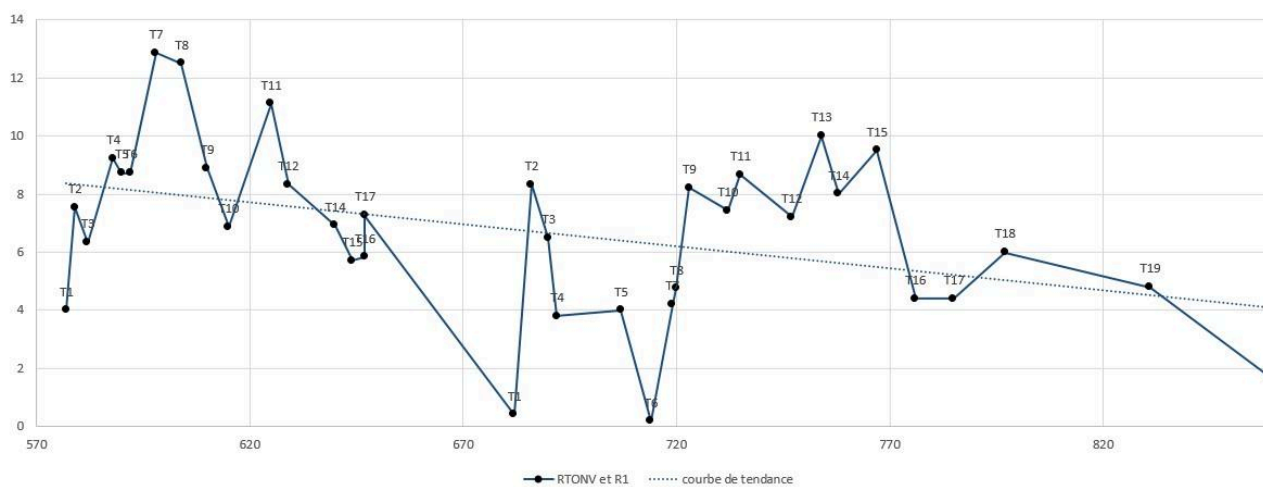


Rapport L/P en fonction de l'altitude pour R1

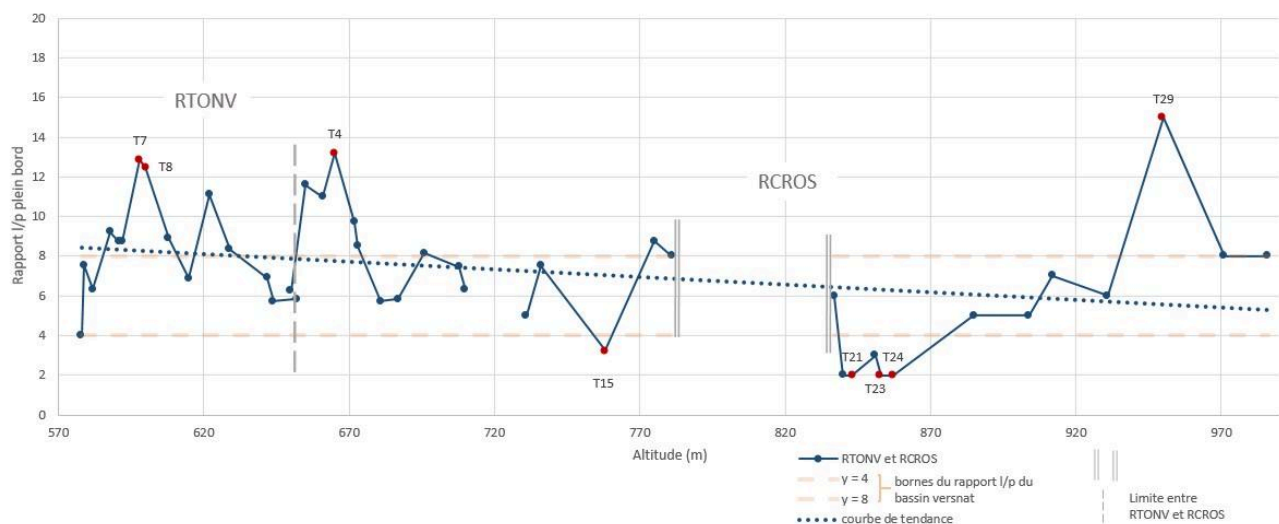


Rapport L/P en fonction de l'altitude pour RCROS

L/P en fonction de l'altitude pour RTONV et R1

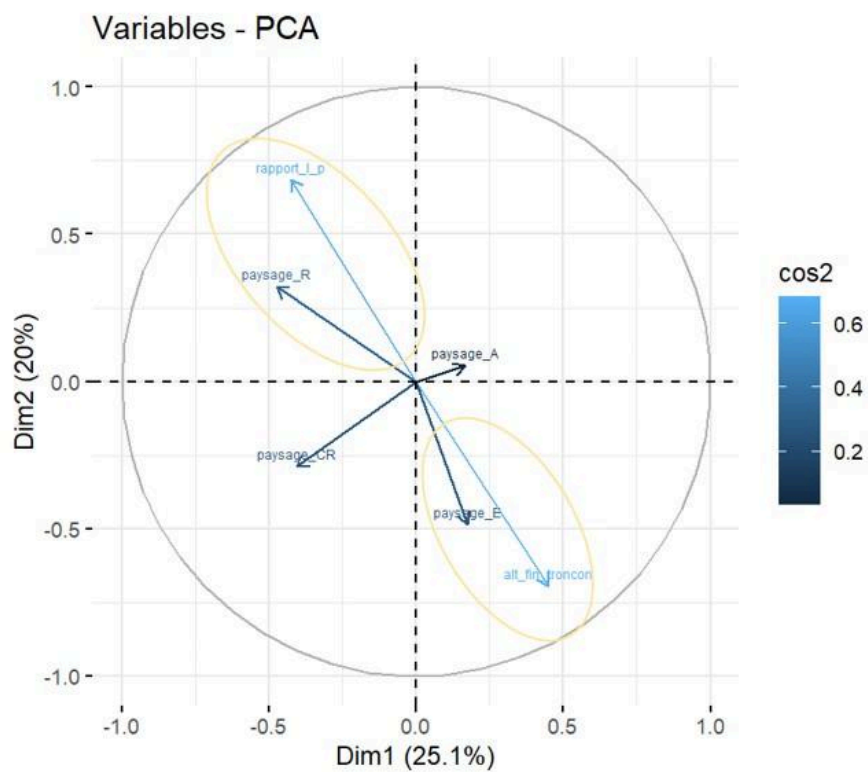
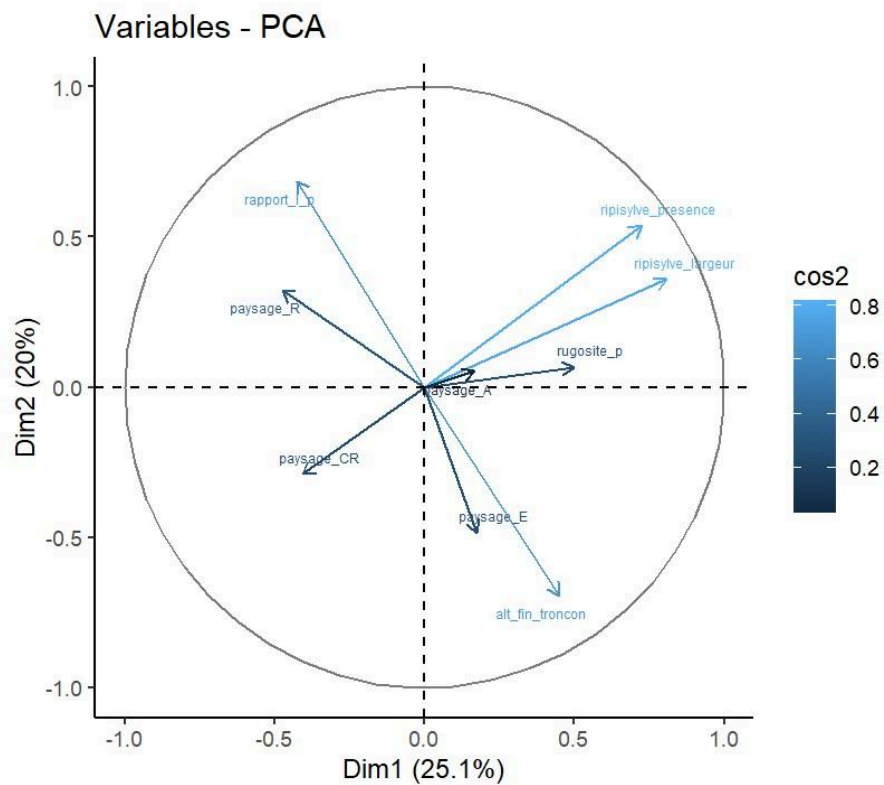


Rapport L/P en fonction de l'altitude pour RTONV et R1



Rapport L/P en fonction de l'altitude pour RTONV et RCROS

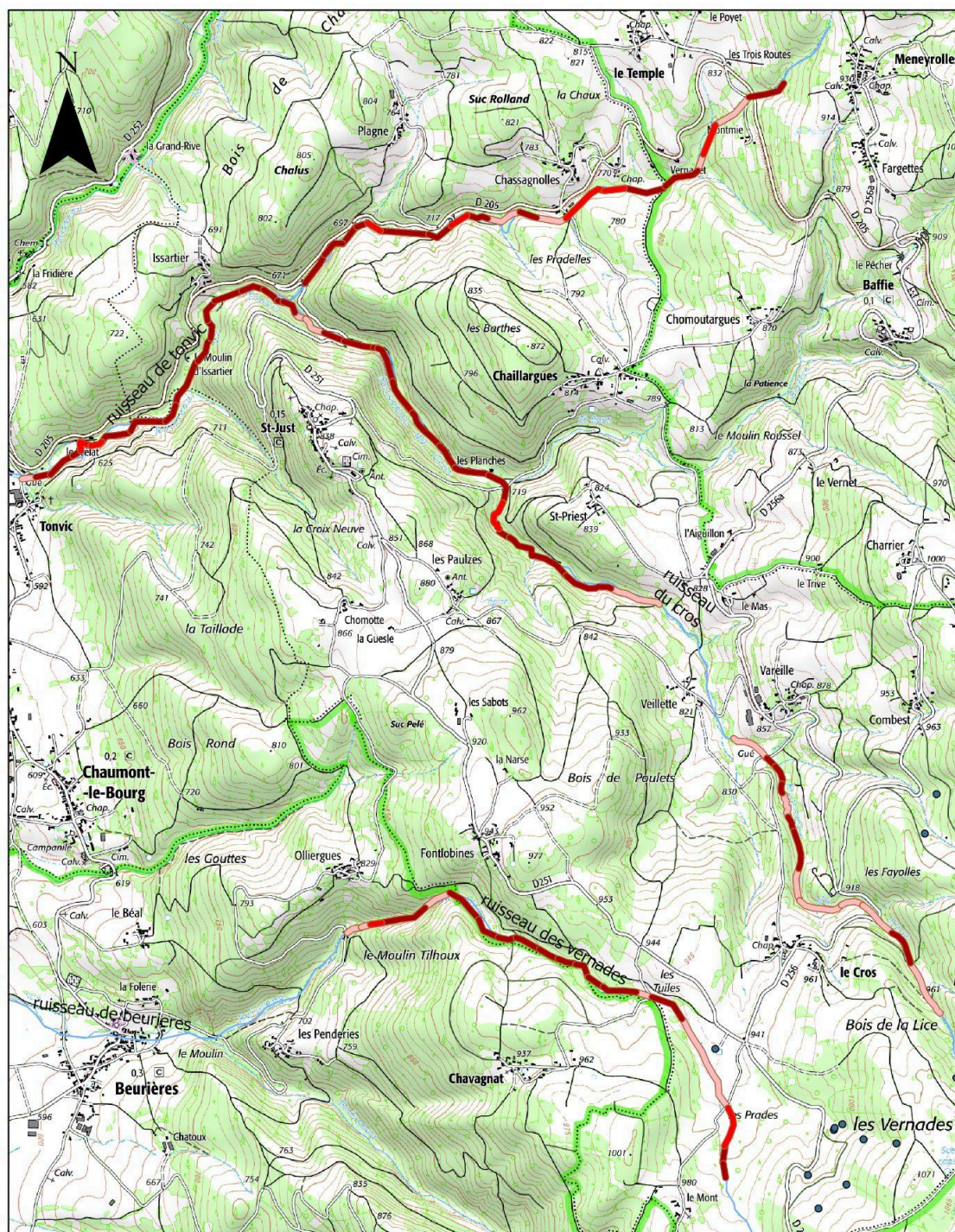
Annexe 13 : Analyse en Composantes Principales (ACP) réalisée avec le script R



Annexe 14: Carte présentant le niveau de rugosité des tronçons des cours d'eau étudiés



Annexe 15 : Carte présentant la pérennité des couverts (représentant la vulnérabilité long terme) sur les tronçons des cours d'eau étudiés



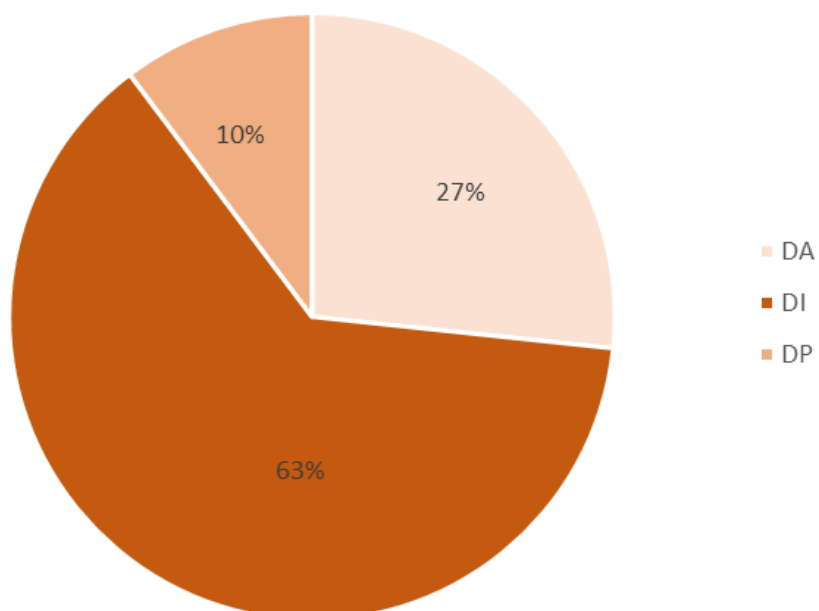
vulnérabilité long terme

- Danger amoindri
- Danger immédiat
- Danger potentiel
- <all other values>

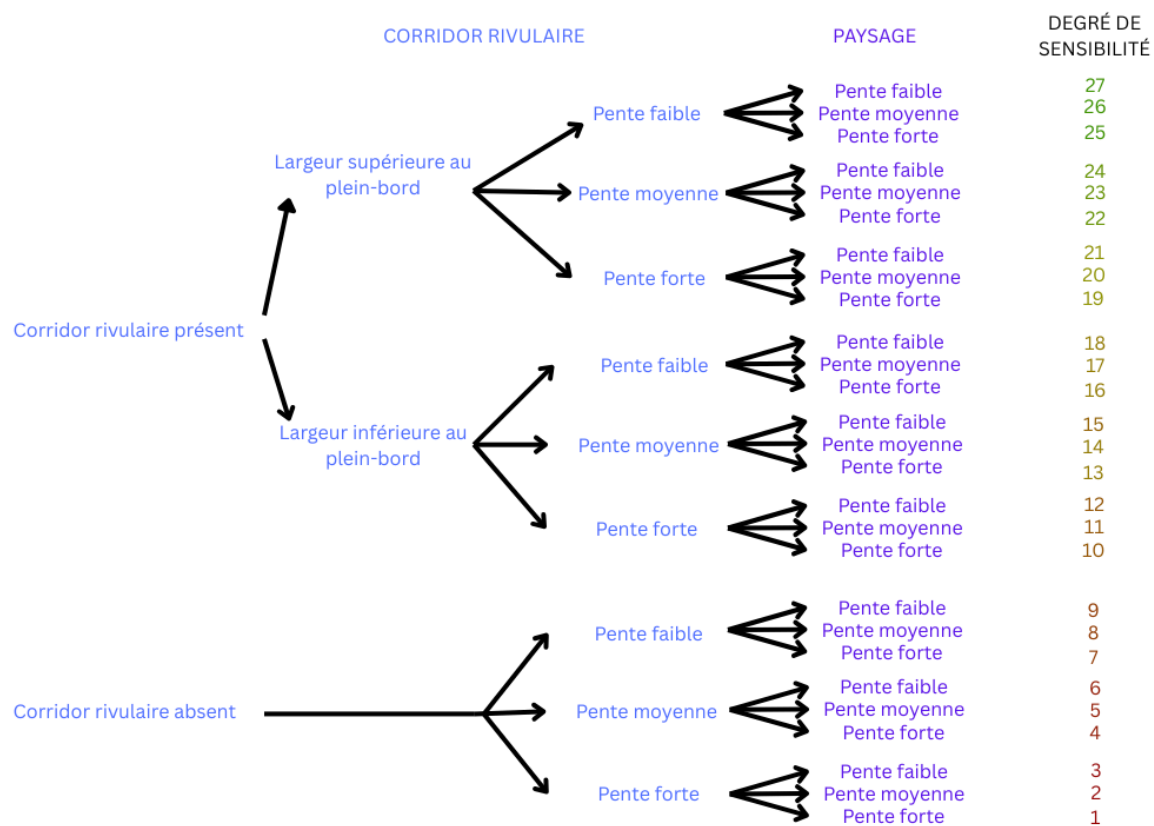
0 0,28 0,55 1,1 Kilomètres

Date : 12/05/2025
Source : IGN

Catégorie de vulnérabilité long terme pour l'ensemble des cours d'eau



Annexe 16 : Clé de classification de la vulnérabilité topographique



Annexe 17 : Simulation Biljou – Modèle de bilan hydrique forestier

Simulation réalisée en ligne par le modèle Biljou© (<https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/>)

Démarche

Objectif

Comprendre les impacts potentiels du changement climatique sur les peuplements forestiers de résineux, connus pour leur forte consommation en eau, présents sur le territoire étudié. L'objectif est d'évaluer leur vulnérabilité hydrique face à des scénarios climatiques futurs.

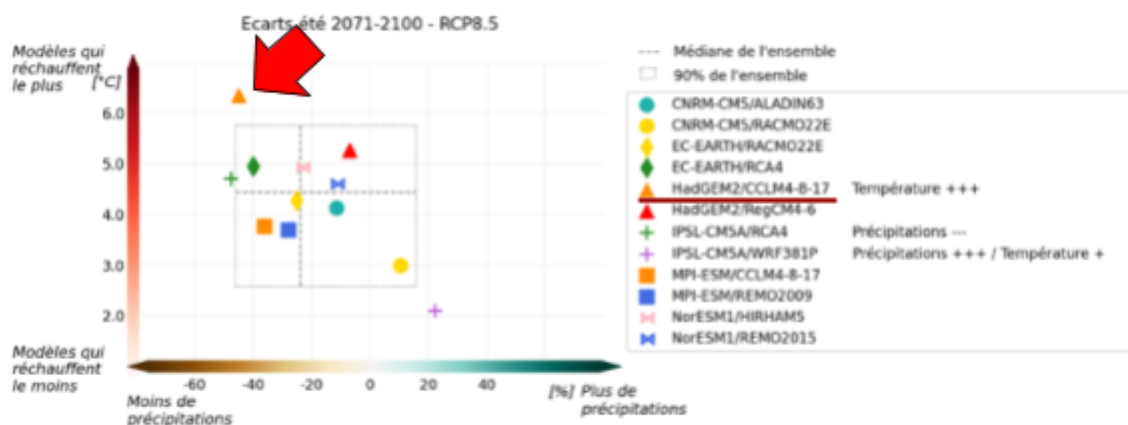
Outil utilisé

Les simulations ont été réalisées à l'aide de l'outil Biljou ©, développé par l'unité mixte de recherche Ecologie et Ecophysiologie Forestière devenue depuis l' UMR Silva, pour estimer le bilan hydrique forestier. Il permet de tester différents scénarios de sensibilité climatique et sylvicole, en particulier sur la consommation en eau des peuplements.

Paramètres de simulation

→ **Modèle climatique utilisé** : Modèle régional : **HadGEM2-ES/ CCLM4-8-17**

Ce modèle est associé à un narratif climatique caractérisé par un fort réchauffement et des contrastes saisonniers marqués en précipitations.



→ **Scénario d'émissions** : **RCP8.5**,

Un scénario souvent retenu comme hypothèse haute dans les études d'impact (correspondant à la moyenne des projections du 6e rapport du GIEC).

→ **Période étudiée : Horizon moyen 2040–2070**, permettant une anticipation à moyen terme des impacts climatiques.

→ **Altitude :**

- ◆ **600 mètres où les peuplements sont déperissants**
- ◆ **900 mètres où a priori les peuplements sont sains**

→ **Type de peuplement : Sempervirents**

→ **LAI (Leaf Area Index)** selon la structure du peuplement:

- ◆ **LAI = 9** pour un peuplement à forte surface foliaire, que nous avons assimilé à un peuplement résineux très dense, très capitalisée.
- ◆ **LAI = 5** pour un peuplement à faible surface foliaire, que nous avons assimilé à un peuplement résineux peu dense, peu capitalisée.

Ces valeurs extrapolées sont issues des travaux de **Bréda et al.**, largement utilisés pour paramétrer les modèles hydriques forestiers.

→ **Sol :**

Les valeurs des caractéristiques hydriques des différentes couches de sol :

Profondeur	RU	%_racine	hpfllet	D_apparente
50	55	0.75	0.05	1.4
70	76	0.25	0.05	1.4

Profondeur : 1,2 mètre, considéré comme profond, ce qui permet une bonne réserve utile.

Réserve utile (RU) : calculée à partir des textures types Almajou, fréquemment observées en sondages pédologiques dans la zone d'étude.

Teneur en éléments grossiers : faible (**5 %**), ce qui améliore la capacité de rétention d'eau.

Répartition racinaire : 55 % des racines dans les 0–50 cm, 45 % entre 50–100 cm, conformément au système pivotant du sapin.

Scénario de référence : Altitude 600, LAI 10

Ces caractéristiques correspondent à un sol qui a été observé parmi les placettes et jugé comme le sol le plus profond avec un RUM élevé, car en raison du protocole utilisé la réserve en eau utile de sol pourrait être sous-estimée. N'ayant pas pu avoir les informations sur le pourcentage racinaire, l'humidité pondérale au point de flétrissement permanent en grammes d'eau par gramme de sol et la densité apparente de la couche du sol, ces données ont été tirées du tableau des réservoirs en eau selon les textures disponible sur le site de Biljou (Service de cartographie des sols de l'Aisne, Jamagne et al., 1977 ; in Baize et Jabiol, 1995) .

Résultats:

D'après les données de simulation, pour le scénario de référence dans le massif étudié, il a été observé un dépassement systématique du seuil de déficit hydrique chaque été entre 2040 et 2070. La réserve en eau relative (REW) chute fortement entre mai et août, atteignant des niveaux inférieurs au seuil de stress hydrique, ce qui indique des conditions de stress hydrique sévère et récurrent au cours de la période estivale. Le drainage du sol est nulle en période estivale avec l'interception des peuplements en place des précipitations.

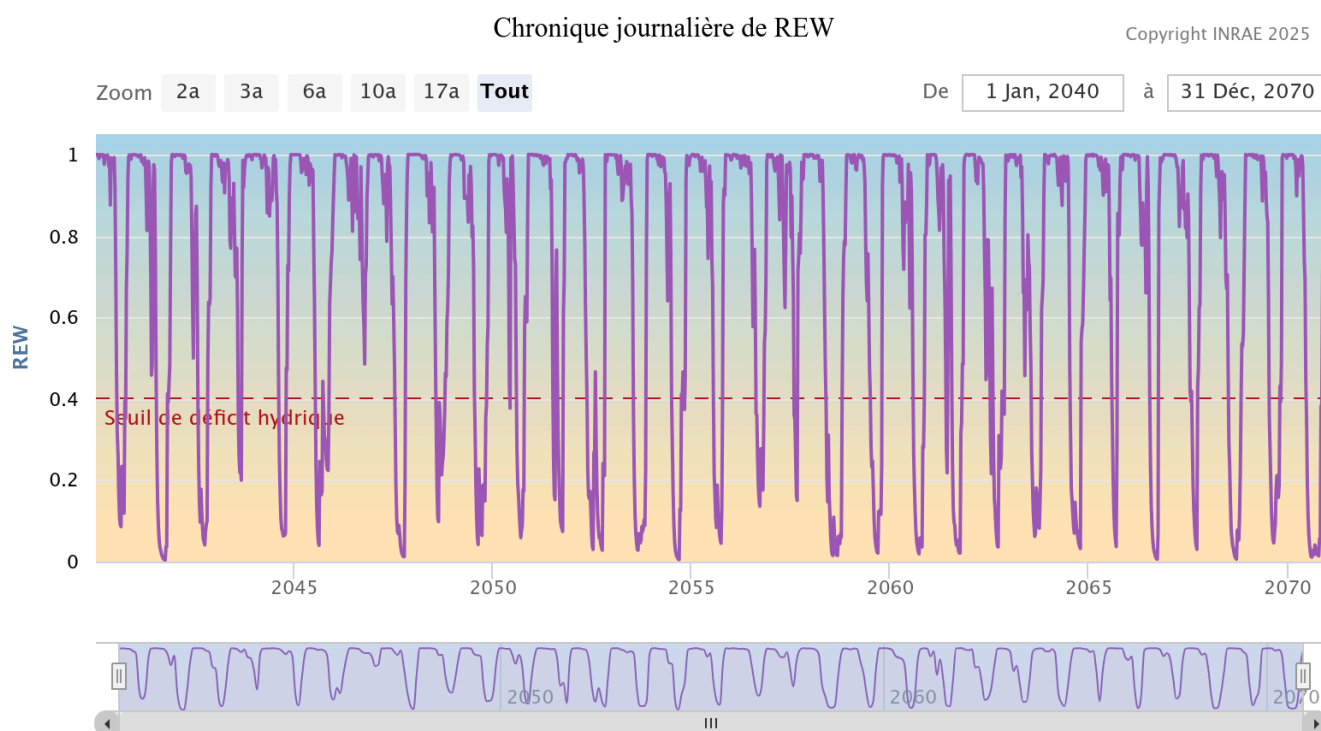


Fig 1 : Chronique journalière simulée de la réserve en eau relative (REW) pour un peuplement situé à 600 m d'altitude avec un LAI de 10, sur la période 2040–2070, selon le modèle Biljou.

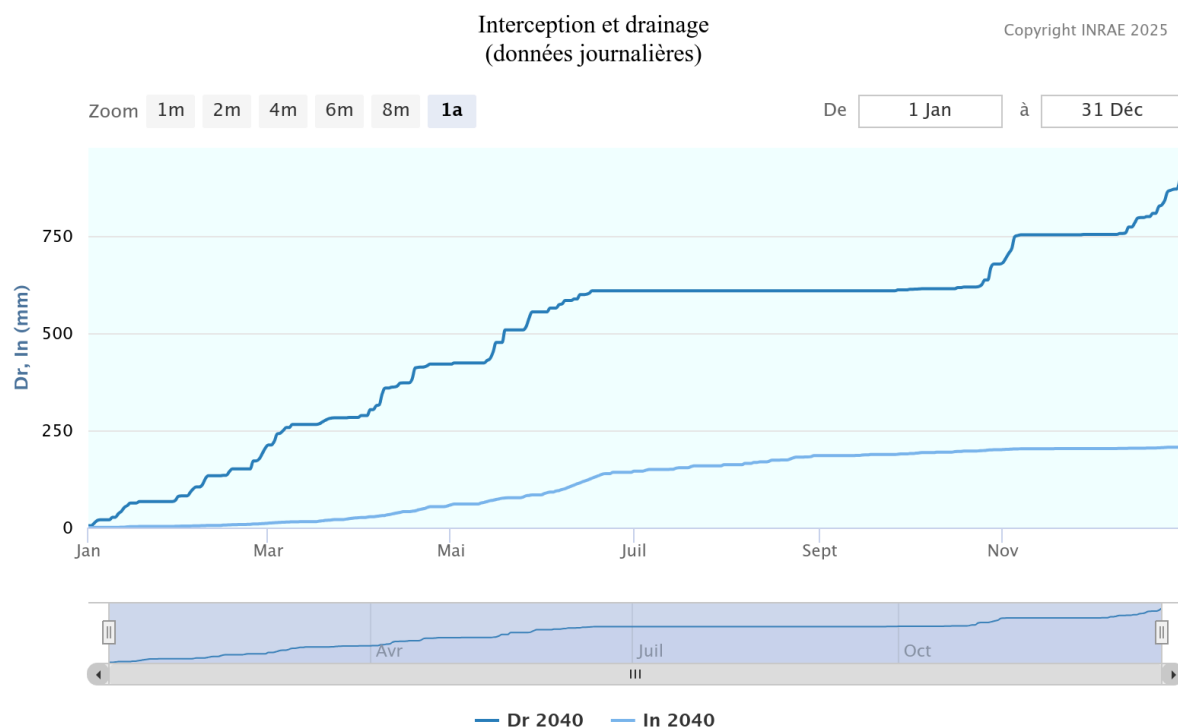


Fig 2 : Interception et drainage cumulés en mm au cours de l'année pour un peuplement situé à 600 m d'altitude avec un LAI de 10, sur la période 2040–2070, selon le modèle Biljou.

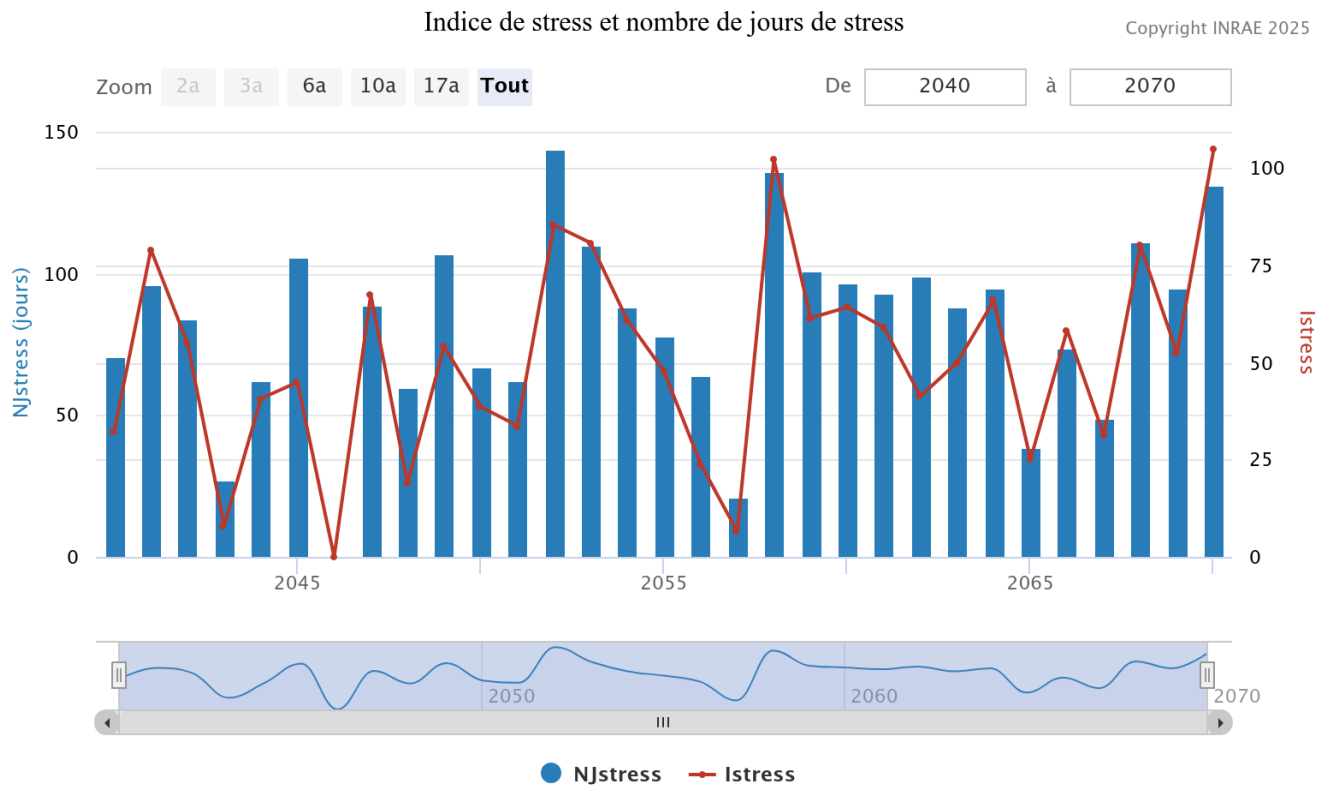


Fig 3 : Indice de stress hydrique et du nombre de jours de stress pour un peuplement situé à 600 m d'altitude avec un LAI de 10, sur la période 2040–2070, selon le modèle Biljou.

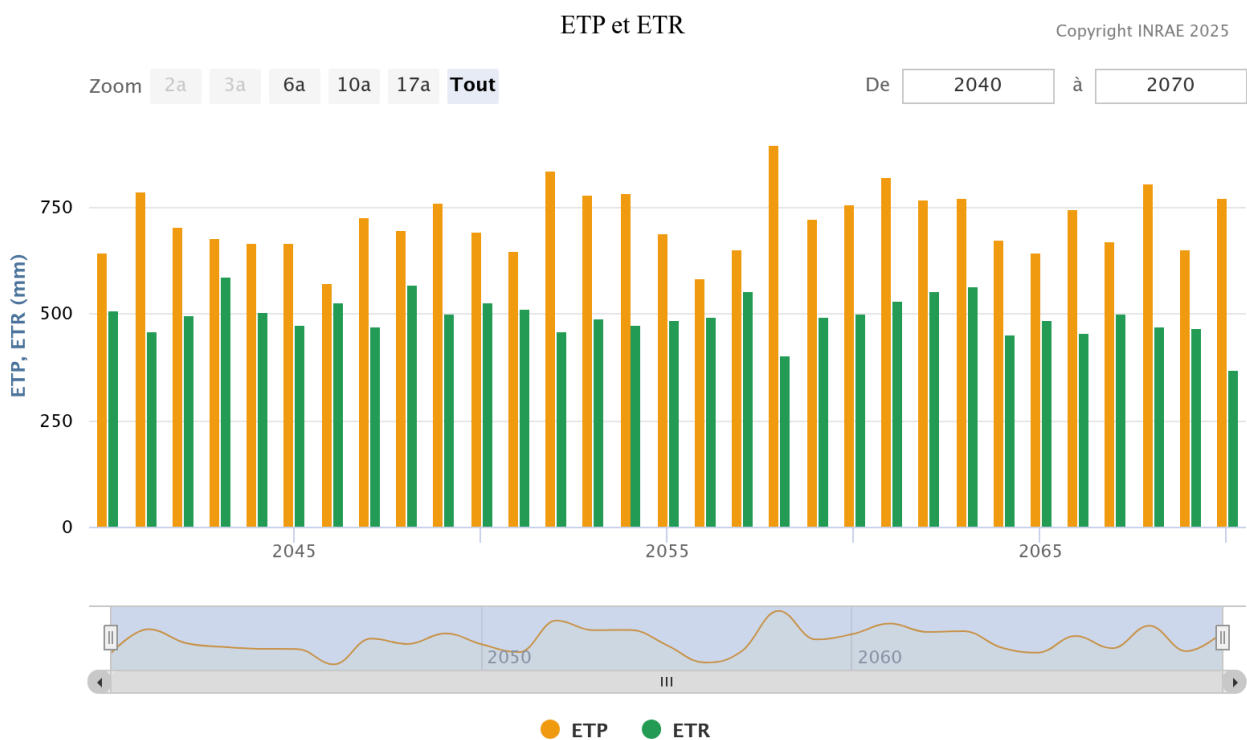


Fig 4 : Evapotranspiration potentielle (ETP) et réelle (ETR) pour un peuplement situé à 600 m d'altitude avec un LAI de 10, sur la période 2040–2070, selon le modèle Biljou.

Le nombre de jours de stress hydrique fluctue selon les années, mais atteint en moyenne 83 jours par an à 600 m d'altitude.

Comparaison entre altitudes:

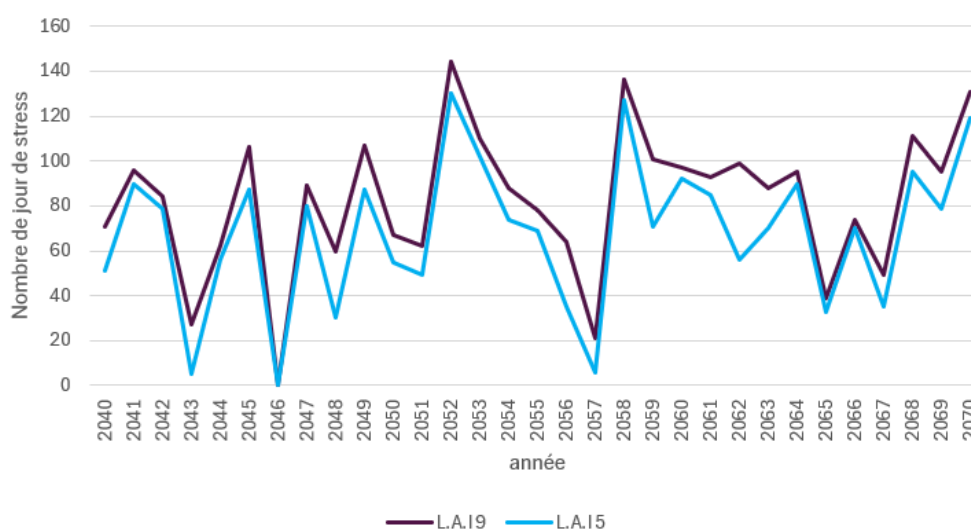
À 900 mètres d'altitude, les peuplements sont également soumis à un déficit hydrique estival, mais de manière moins marquée qu'à 600 mètres. Le nombre moyen de jours de stress hydrique y est plus faible, avec 74 jours contre 83 jours à 600 mètres, ce qui suggère un effet atténuateur de l'altitude sur l'intensité du stress hydrique, possiblement lié à des températures plus fraîches et une évapotranspiration réduite.

Fig 5 : Nombre de jours de stress hydrique simulés pour des peuplements situés à deux altitudes (600 m et 900 m), à partir du modèle Biljou



Comparaison entre LAI différents:

Fig 6 : Nombre de jours de stress hydrique simulés pour des peuplements avec L.A.I (5 et 9), à partir du modèle Biljou



Le nombre de jours de stress est généralement inférieur pour la simulation avec LAI faible par rapport au LAI fort, avec des débuts de stress plus tardifs.

Discussion :

Les résultats de simulation mettent en évidence une tendance nette au renforcement du stress hydrique dans les scénarios climatiques futurs, en lien avec l'augmentation des températures et la modification des régimes de précipitations induite par le changement climatique. Ces effets varient selon les altitudes, les caractéristiques de peuplement et les caractéristiques pédologiques.

Ces constats soulignent la nécessité d'intégrer le fonctionnement hydrique des peuplements dans les choix sylvicoles, notamment dans une perspective d'adaptation des forêts au changement climatique. Bien que les simulations soient basées sur des valeurs fixes et simplificatrices, elles permettent néanmoins de dégager des tendances sur les enjeux futurs de gestion forestière.

Références bibliographiques

Bréda, N., Soudani, K., Bergonzini, J.-C., 2002. Mesure de l'indice foliaire en forêt. GIP ECOFOR, Paris.

Bréda N., 2008. Leaf Area Index in Ecology. Sven Erik Jorgensen & Brian D. Fath. Encyclopedia of Ecology, 1st Edition, Elsevier B.V., Oxford, 2148-2154.

Breda, N.J.J., 2003. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. Journal of Experimental Botany 54, 2403–2417. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg263>*

Degoutte. *Diagnostic, Aménagement et Gestion Des Rivières: Hydraulique et Morphologie Fluviales Appliquées*. (Lavoisier, 2012). doi:10.3917/lav.degou.2012.01.

GRANIER A., BRÉDA N., BIRON P., VIVILLE S., 1999. A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling*, 116, 269-283

INRAE, 2024. *Biljou – Modèle de bilan hydrique forestier*. Disponible sur : <https://appgeodb.nancy.inrae.fr/biljou/fr/> (consulté le 10 mai 2025).

ONF, 2024. *La phénologie et le climat*. Réseau RENECOFOR – Office national des forêts. Disponible sur : <https://www.onf.fr/renecofor/%2B/1772::la-phenologie-et-le-climat.html> (consulté le 11 mai 2025).

Jamagne M., Bétrémieux R., Bégon J.C., Mori A., 1977, Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. Bull. Tech. Inf. 324-325, 627-641.

Annexe 18 : Tableau de situation des différents peuplements en termes de surface terrière “G”, de part de sapin dans le capital, d’altitude et de situation topographique.

Index_parcelle	G	G_sapin	Part_sapin	Altitude	Versant
F1	48	44	92%	738,57	chaud
F6	26	24,5	94%	752,76	frais
F7	55,5	53,5	96%	726,13	frais
E1	24,5	19,5	80%	831,16	chaud
E2	25,5	25	98%	845,39	chaud
E4	35	12	34%	816,33	chaud
E6	26,5	12,5	47%	750,34	frais
FN1	35	6,5	19%	962,92	Frais
FN2	19,5	7	36%	988,09	chaud
FN3	34	0	0%	1041,94	chaud
FN_vendredi	44,5	39	88%	740,00	frais
E9	34	33,5	99%	1046,36	frais
E6_bis	36,5	27	74%	750,34	frais
FN6	34,5	33	96%	728,32	chaud
EN1	30	21,3333333	71%	720,98	chaud

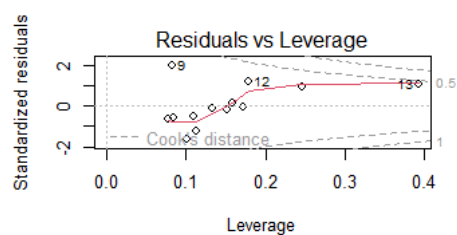
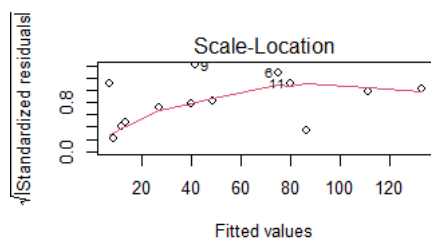
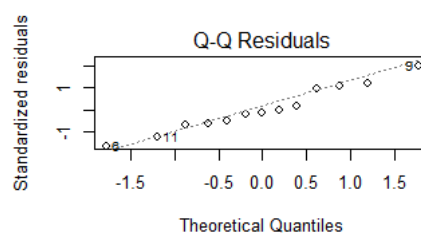
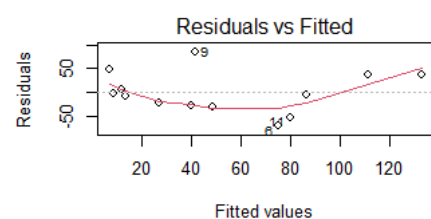
Annexe 19 : Test statistique sur le modèle linéaire

“Nb_Sapins_TD_ou_morts_ha = G” et graphiques de diagnostic du modèle

Anova Table (Type II tests)

Response: Sapins_morts_ou_TD_ha
Sum Sq Df F value Pr(>F)
G 20348 1 10.051 0.008913 **
Residuals 22269 11

Signif. codes: 0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1



Annexe 20 : Calculs, hypothèses et résultats de l'analyse économique

Les calculs économiques réalisés sont basés sur les formules du bénéfice actualisé (BA) et du bénéfice actualisé en séquence infinie (BASI). Ces formules prennent en compte le taux d'actualisation (pour le BA et le BASI) et permettent de simuler un nombre infini de rotation de peuplement forestier (pour le BASI). Les valeurs de BASI du tableau 3 ont été calculées lors d'un projet des étudiants de deuxième année du cycle ingénieur d'AgroParisTech campus Nancy. On cherche, à partir de données du peuplement, à donner une valeur financière à la parcelle.

$$BA = \sum_i \frac{B_i - C_i}{(1+r)^i}$$

$$BASI = \sum_i \frac{B_i - C_i}{(1+r)^i} * \frac{(1+r)^N}{(1+r)^N - 1}$$

$$= BA * \frac{(1+r)^N}{(1+r)^N - 1}$$

$$Valeur\ parcelle = BA_{hérité_N} + \frac{BASI_N}{(1+r)^{N-a}}$$

Figure 1 : Méthode de calcul du Bénéfice Actualisé (BA), Bénéfice Actualisé à Séquence Infinie (BASI) et Valeur de la parcelle.

N : Temps de révolution du peuplement ; a : âge du peuplement hérité à l'instant 0 ; r : taux d'actualisation.

Tableau 1 : récapitulatif des différents scénarii, point de vue peuplement et sylviculture

Paramètre	Scénario	Éclaircies/Régénération naturelle	Coupe rase/plantation à l'instant 0	Coupe rase/plantation plus tard
Essence		Epicéa	Epicéa	Epicéa
Age peuplement lors de la coupe rase (date à partir de maintenant) (année)		100 (30)	70 (0)	100 (30)
Volume à l'instant 0 (m3/ha)		462,5	462,5	462,5
Structure		Majorité Bois Moyen	Majorité Bois Moyen	Majorité Bois Moyen
Fertilité à 100 ans (m)		31	31	31
Intensité éclaircie (%)		15	-	-

Production (m3/ha/an) ¹	8,5	8,5	8,5
Peuplement suivant la coupe rase	Epicéa par régénération naturelle	Epicéa par plantation	Epicéa par plantation
Sylviculture du peuplement suivant	“Classique”	“Classique”	“Classique”

Tableau 2 : récapitulatif des différents scénarii, point de vue financier

Paramètre	Scénario	Éclaircies/Régénération naturelle	Coupe rase/plantation à l’instant 0	Coupe rase/plantation plus tard
Prix du bois (€/m3) (qualité 2 et 0,63-1,27 m3/tige)		48	48	48
Coût d’exploitation lors des éclaircies (€/m3)		16,5	-	-
Coût d’exploitation lors de coupe rase (€/m3)		14	14	14
Coût de plantation (€/m3)		-	3000	3000
Coût total du dégagement (€/m3)		-	2000	2000
Coût de régénération naturelle (€/m3)		2875	-	-

Le nouveau peuplement est constitué uniquement d’*épicéa*. Considérer un peuplement mélangé dans la régénération naturelle, avec les différentes espèces présentes et des enrichissement est trop complexe pour être traité.

Tableau 3 : Valeur des parcelles en fonction du scénario et du taux d'actualisation.

BA : Bénéfice Actualisé ; BASI : Bénéfice Actualisé en Séquence Infinie

Taux d’actualisation	Scénario	Eclaircies/Régénération naturelle BA + BASI actualisé	Coupe rase/plantation à l’instant 0 BA+BASI actualisé	Coupe rase/plantation plus tard BA + BASI actualisé
2 %		15 640 + 1 661 = 17 344 €	15 725 + 600 = 16 325 €	13 468 + 331 = 13 799 €
3 %		13 027 - 224 = 12 803 €	15 725 - 2 722 = 13 003 €	10 050 - 1 121 = 8 929 €
4 %		10 986 - 574 = 10 412 €	15 725 - 3 926 = 11 799 €	7 521 - 1 210 = 6 311 €

NB : les calculs sont accessibles dans la base de données fournie avec ce rapport.

¹ Document de synthèse, CNPF, 2018

https://auvergnerhonealpes.cnpf.fr/sites/auvergnerhonealpes/files/2022-01/docsyntheseforet63_03_18.pdf