
Aide technique sur les partenariats entre les distributeurs d'eau et les propriétaires forestiers

Office fédéral de l'environnement



Impressum

Mandant :

Jean-Laurent Pfund, OFEV

N° de contrat : 00.5052.PZ / 6A397AA69

Auteur :

EcoEng SA

Federico Ferrario, Chef de projet

Cédric Choffat, Chef de projet adjoint

Mark Bertogliati, Collaborateur

Rocio Andrey, Collaboratrice

Luc Dolivo, Collaborateur

Valérie Parietti, Collaboratrice

Patrick Dellacroce, Collaborateur

Photo de couverture :

Dominique Favre

Date :

03 février 2022

Porrentruy, le 03.02.2022



Federico Ferrario
Chef de projet



Cédric Choffat
Ingénieur de projet

Résumé

Ce projet a été initié par la division Forêts de l'OFEV dans l'optique de soutenir les objectifs de la politique forestière 2020, plus précisément les objectifs 6 et 7 portant sur les services écosystémiques rendus par la forêt. L'entreprise EcoEng SA a été mandatée pour mener cette étude. L'objectif du document qui en résulte est de faciliter la réflexion en termes de partenariats entre exploitants forestiers et distributeurs d'eau et, dans les contextes qui s'y prêtent, de permettre la rémunération des prestations forestières pour la protection des eaux souterraines pour des mesures allant au-delà des exigences légales. Il donne une base pour encourager et faciliter la discussion et ainsi améliorer la compréhension des problématiques et des enjeux des parties concernées, en se basant sur la valeur ajoutée d'interventions forestières ciblées.

Les partenariats permettent d'engager un dialogue important entre gestionnaires de ressources naturelles et d'assurer le maintien à long terme de la fonction protectrice de la forêt sur la qualité des eaux souterraines, tout en valorisant le travail sylvicole qui y est lié. À ce jour, seuls quelques cas de partenariats entre exploitants forestiers et distributeurs d'eau sont en place en Suisse, notamment dans le canton de Vaud. Ils sont considérés comme constructifs et utiles par les acteurs qui ont choisi cette voie.

La forêt offre de nombreux services écosystémiques (protection contre les dangers naturels, qualité de l'air, habitats, etc.). La Loi sur les forêts a pour but de conserver les fonctions forestières prioritaires, intimement liées aux services et certaines bonnes pratiques sylvicoles sont en partie déjà soutenues par la confédération par le biais de différentes subventions¹. La protection de la qualité des eaux souterraines bénéficie en Suisse d'une législation claire grâce à la Loi sur la protection des eaux, et les diverses pratiques actuelles effectuées en milieux forestiers soutiennent également une bonne qualité des eaux souterraines. Dans ces contextes légaux clairement définis, ce projet a pour but de définir des mesures sylvicoles garantissant la qualité des eaux souterraines et allant au-delà des bases légales, afin de renforcer l'effet protecteur de la forêt sur la qualité des eaux.

Ces mesures sylvicoles spécifiquement orientées vers la protection des eaux souterraines et allant au-delà des bases légales induisent des surcoûts qui ont été estimés. L'application de ces surcoûts à différentes situations fictives permet d'évaluer les cas où la mise en place de ces mesures et leur indemnisation est intéressante pour les acteurs impliqués. Il apparaît que l'instauration de ces mesures strictes est la plus favorable pour les captages dont la production d'eau est importante.

¹ En particulier pour les forêts protectrices, la gestion des forêts et la protection de la nature et du paysage. Cf OFEV 2018, Manuel sur les conventions-programmes 2020-2024 dans le domaine de l'environnement.

Table des matières

1	Introduction	6
1.1	Cadre du mandat	6
1.2	Objectif	7
2	Conditions cadres	7
3	Qualité des eaux souterraines en forêt	8
4	Les bienfaits d'une gestion adaptée de la forêt	10
4.1	Les principes de base	10
4.2	Service écosystémique de protection de l'eau	13
4.3	Sylviculture – recommandations pour la pratique	19
4.4	Impacts d'une mesure sylvicole	21
5	Nécessité et impact des mesures sylvicoles	24
5.1	Définition de la surface d'influence	24
5.2	Etat des peuplements	25
5.2.1	Analyse de l'état actuel d'un peuplement	26
5.2.2	Analyse de l'état idéal d'un peuplement	27
5.3	Exigences sylvicoles des milieux	27
5.3.1	Documents de référence et méthodologie de l'analyse	27
5.3.2	Exigences	28
5.3.3	Evaluation des mesures sylvicoles	30
5.4	Mesures spécifiquement orientées vers la qualité des eaux souterraines	31
5.5	Impact des mesures supplémentaires pour la gestion forestière	33
6	Estimation économique du service écosystémique forestier	35
6.1	Coûts des mesures sylvicoles supplémentaires	35
6.2	Calcul des surcoûts pour un captage	39
6.3	Exemple concret	40
6.3.1	Coûts des mesures sylvicoles	41
6.4	Cas de figure généraux	42
6.4.1	Petite surface d'influence	43
6.4.2	Surface d'influence moyenne	44
6.4.3	Grande surface d'influence	45
6.5	Redistribution du bénéfice total des indemnités	46
7	Vers un modèle de partenariat	47
7.1	Définition de mesures durables	47

7.2	Monitoring	48
7.3	Mise en place d'un partenariat	48
7.4	Contrat de partenariat	49
8	Situation des partenariats en Suisse	50
9	Conclusion	51
10	Références	52

1 Introduction

1.1 Cadre du mandat

L'objectif de la politique forestière 2020 est une gestion durable des forêts suisses, permettant de garantir la multifonctionnalité forestière sur le long terme. Les services écosystémiques offerts par la forêt sont multiples ; la protection des eaux souterraines en fait partie.

Les eaux souterraines constituent de loin la principale source d'eau potable en Suisse (80%) (OFEV 2019). Près de 40% de l'eau souterraine captée en Suisse peut être mise à la disposition du consommateur sans aucun traitement (OFEV 2015). Pour assurer la qualité de eaux souterraines, des zones de protection ont été délimitées sur le territoire suisse. 47% de ces zones de protection se situent en forêt, ce qui représente plus de 100'000 ha (WSL/LFI 2011).

La qualité des eaux souterraines dépend de divers facteurs environnementaux de type géologique, pédologique, topographique et climatique, mais surtout de l'activité anthropique. La relation entre la forêt et l'eau potable se concrétise à travers le service de rétention et d'immobilisation (stockage) des polluants vers les eaux souterraines qu'on peut assimiler à une filtration² naturelle de l'eau d'infiltration.

La préservation d'un couvert forestier continu ainsi qu'une exploitation forestière adaptée renforcent la permanence de ces effets de filtration en maintenant des conditions écologiques favorables. La mise en place de mesures sylvicoles supplémentaires ciblées allant au-delà des exigences légales permet ainsi de renforcer l'effet protecteur de la forêt sur la qualité des eaux souterraines. L'indemnisation de ces prestations supplémentaires par les producteurs d'eau est une incitation pour les propriétaires forestiers à mener une pratique sylvicole particulière.

C'est dans cette optique que l'Office fédéral de l'environnement OFEV a mandaté le bureau d'ingénieurs EcoEng SA pour élaborer ce document portant sur les partenariats entre les distributeurs d'eau et les propriétaires forestiers.

² Par filtration, on entend la capture et la rétention d'éléments, uniquement des nitrates dans ce rapport, avant qu'ils ne se retrouvent dans les eaux souterraines.

1.2 Objectif

Ce document constitue une aide technique pour **consolider et pérenniser le rôle protecteur de la forêt afin de préserver de manière durable la ressource en eau potable**.

Il est conçu comme :

- ✓ **un guide pratique** proposant des mesures forestières allant au-delà des bases légales et apportant une véritable plus-value à la protection de la ressource en eau potable ;
- ✓ **un outil** facilitant les échanges et les partenariats entre acteurs de l'eau et de la forêt pour soutenir des actions de préservation de la qualité de l'eau souterraine forestière ;
- ✓ **une référence nationale** pour les propriétaires forestiers et les producteurs de l'eau assurant une cohérence des actions menées.

2 Conditions cadres

Différentes bases légales fédérales ont été utilisées pour établir ce document. La loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux) et la loi fédérale sur les forêts (LFo) constituent les piliers centraux de la réflexion. Des bases légales cantonales plus détaillées complètent ces bases légales fédérales³.

La protection des eaux souterraines utilisées pour l'approvisionnement en eau potable est un devoir auquel le propriétaire foncier doit se soumettre. Les contraintes liées aux zones de protection des eaux souterraines sont donc à charge du propriétaire et ne sont pas indemnisées. En revanche, lorsque des perturbations apparaissent, les fournisseurs d'eau potable assument les surcoûts du traitement de l'eau. Le principe du pollueur-payeur peut être appliqué, si le type et l'origine des perturbations sont connus. En outre, des mécanismes de partenariat volontaires sont envisageables.

La géologie des aquifères influence les prescriptions légales. Dans les aquifères en roches meubles et dans les aquifères karstiques ou fissurés faiblement hétérogènes, les prescriptions sont d'autant plus sévères que l'on est proche du captage. Pour les aquifères karstiques ou fissurés fortement hétérogènes, les prescriptions sont plus sévères là où la vulnérabilité est forte.

³ L'annexe 1 détaille les différentes bases légales et les exigences liées à la protection des eaux souterraines en lien avec les activités en forêt.

Tableau 1 - Zones de protection des eaux et type d'aquifère

Type d'aquifère	Roches meubles	Karstique / Fissuré		
		Faiblement hétérogène	Fortement hétérogène	
Zones de protection des eaux souterraines	S1	S1	S1	 Prescriptions
	S2	S2	S2	
			S _h	
	S3	S3	S _m	

Les activités en forêt sont concernées directement ou indirectement par certaines exigences légales en matière de protection des eaux souterraines (LEaux, OEaux). Toute exploitation forestière est interdite en zone S1 ; certaines pratiques particulières sont exigées en zone S2, S3 et Sh/Sm.

3 Qualité des eaux souterraines en forêt

En Suisse, les substances qui dépassent le plus souvent les valeurs limites sont avant tout le nitrate, mais aussi les résidus de produits phytosanitaires et d'hydrocarbures halogénés (OFEV, 2019). Les eaux souterraines émanant de forêts, ainsi que de pâturages d'estivage et de régions non productives généralement isolées se trouvant en altitude, contiennent nettement moins de substances nocives que l'eau en provenance de bassins versants agricoles ou urbains. En forêt, les activités humaines potentiellement néfastes pour la qualité des eaux souterraines sont interdites ou limitées (CSD 2020, Wenger 2002, Bharati 2002, Küchli et Meylan 2002).

L'OFEV et les services cantonaux font le suivi de la qualité et de la quantité des eaux souterraines au travers de l'Observation nationale des eaux souterraines NAQUA qui couvre l'ensemble du territoire, pour tous les types d'aquifères, tous les types de captages (puits, sources, piézomètres) et l'utilisation des sols, y compris les zones forestières. Les résultats principaux du rapport de 2019 sont les suivants (détails en annexe 2) :

- Nitrate : la présence de surface agricole implique une concentration de nitrate dans le sol nettement supérieure à toute autre utilisation du sol. Les bassins d'alimentation boisés présentent une concentration de nitrate généralement basse (5-10 mg/l). Par sa simple présence et la législation forestière qui y est associée, la forêt empêche l'intrant de nitrate, protégeant de manière passive la qualité des eaux souterraines.

Les teneurs excessives en nitrate provenant de l'agriculture engendrent des coûts de traitements des eaux supplémentaires, voire pourraient mener à l'abandon ponctuels de captages destinés à l'eau potable. Ce risque est réduit dans un bassin d'alimentation majoritairement occupé par la forêt.

- Résidus phytosanitaires : les bassins d'alimentation occupés par l'agriculture sont également ceux présentant les concentrations en résidus phytosanitaires les plus hauts. Contrairement au milieu forestier et aux pâturages d'estivage, la quasi-totalité des échantillons provenant d'un milieu agricole montrent des traces de pesticides. Sauf exceptions⁴, l'utilisation de tels produits est interdite en forêt.
- Hydrocarbures : de nombreux hydrocarbures halogénés volatils (HHV), ainsi que quelques hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM) polluent les eaux souterraines. Les pollutions par hydrocarbures sont en général plus accentuées dans les zones plus urbanisées.

La majeure partie des contaminants non naturels (nitrate, produits phytosanitaires, HHV) sont généralement liés à la présence de zones urbanisées ou à des pratiques agricoles. Les contaminants arrivent directement dans les eaux souterraines, soit par l'utilisation des engrais et des produits phytosanitaires sur des terres agricoles, soit par des sites industriels ou des sites contaminés. Les dérivés azotés peuvent eux revenir à travers des précipitations (voir annexe 3).

Par conséquent, les résultats du rapport NAQUA démontrent clairement les effets positifs du respect des prescriptions légales et donc de la protection passive de la forêt. Par contre, ils ne permettent pas de démontrer le rôle actif de la forêt pour la protection des eaux souterraines. Le chapitre suivant décrit les propriétés de l'écosystème forestier qui permettent une meilleure protection active.

⁴ Les autorisations sont délivrées par les autorités cantonales.

4 Les bienfaits d'une gestion adaptée de la forêt

4.1 Les principes de base

Les strates végétales et le sol forestier assimilent ou ralentissent voire retiennent les polluants atmosphériques (azote / ammonium) avant qu'ils ne parviennent dans l'aquifère où sont stockées les eaux souterraines. Les types de litières et les formes d'humus jouent un rôle clé dans la capacité de rétention des sols forestiers. Par ailleurs, la zone racinaire des arbres assure, par assimilation, un rôle épuratoire au contact d'eaux chargées en azote provenant essentiellement de l'atmosphère.

Les caractéristiques naturelles de la surface forestière exercent une influence importante sur la qualité de l'eau qui s'écoule vers l'aquifère. Une couverture boisée importante avec une composition adaptée à la station permet notamment de retenir une quantité maximale de polluants dans la biomasse et dans le sol forestier. Par conséquent, une sylviculture adaptée à la protection de la qualité des eaux est une mesure efficace pour préserver sur le long terme la qualité des eaux souterraines (figure 1). Pour mettre en œuvre ce type de sylviculture axé sur la qualité des eaux, une coordination entre les producteurs d'eau et les exploitants forestiers est nécessaire.

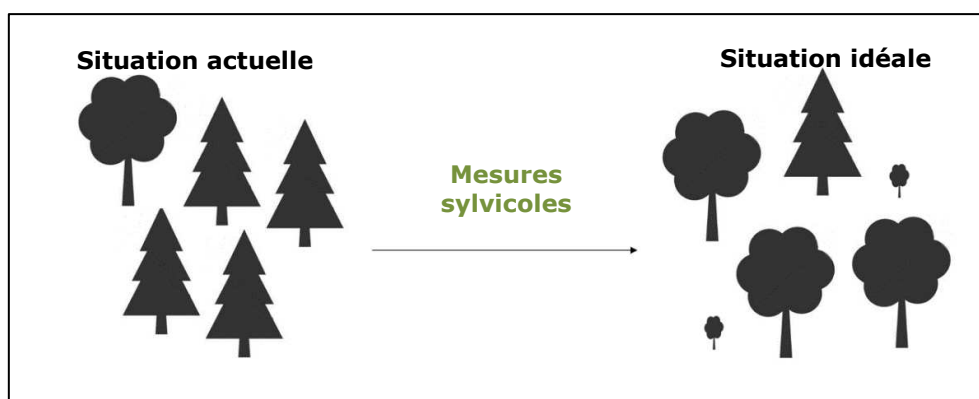


Figure 1 - Situation actuelle-Situation idéale

On définit la situation idéale d'une forêt par rapport à la qualité des eaux souterraines comme l'état dans lequel cette forêt atteint son plus haut potentiel de rétention (filtration). Il s'agit de la situation où les caractéristiques naturelles de la forêt lui permettent d'éviter un maximum d'infiltration de polluants vers les eaux souterraines. Par conséquent, la situation idéale dépendra directement des conditions écologiques de chaque type de forêt et de sa station⁵.

⁵ Station forestière : surface présentant des conditions physiques et biologiques homogènes (relief, climat, topographie, géologie, nature du sol, association végétale spontanée, etc.)

L'idée principale est, ici, d'analyser les prestations supplémentaires, non-imposées par les bases légales, que la forêt exerce sur la qualité de l'eau, et de répondre à trois questions :

- ❖ Qui réalise ces prestations ?
- ❖ Qui en bénéficie ?
- ❖ Sont-elles reconnues et compensées de manière équitable ?

L'évaluation des prestations fournies par la forêt est basée sur la manière dont elle remplit sa fonction protectrice. Les points clés sont les suivants :

- ✓ Les surfaces forestières présentent généralement des eaux souterraines de meilleure qualité que les surfaces agricoles.
- ✓ La quantité d'eau qui s'infiltre dans le sol et atteint l'aquifère est plus grande sur une surface forestière saine que dans le cas d'une majorité d'autres utilisations du sol (bonne porosité du sol, peu de ruissellement)⁶.
- ✓ Les conditions écologiques de la forêt (végétation, topographie, géologie, ...) affectent la structure et la composition de la forêt et donc la qualité de l'eau souterraine.
- ✓ Certaines pratiques forestières permettent d'agir sur les conditions écologiques de la forêt pour optimiser le potentiel de rétention de l'azote dans le sol forestier et garantir un effet sur la qualité des eaux sous couvert forestier.
- ✓ Certaines pratiques forestières légales peuvent avoir un effet négatif sur la qualité des eaux (coupes de grande ampleur sans être considérées comme coupes rases, choix des essences, etc...).

La législation suisse requiert une exploitation durable et suggère une gestion proche de la nature. Bien appliquée, la sylviculture dite « proche de la nature » permet entre autres d'atteindre une plus grande résilience des écosystèmes forestiers face aux événements climatiques majeurs (catastrophes naturelles, maladies, changement climatique). Les exigences de cette pratique sylvicole se basent sur quelques grands principes ; elles n'en constituent toutefois pas une définition légale (OFEV, 2010). Dans de nombreuses situations, les propriétaires forestiers qui choisissent de pratiquer une sylviculture proche de la nature assument les pertes de rendements et les surcoûts qui peuvent en découler.

La pratique d'une sylviculture proche de la nature soutient la multifonctionnalité forestière et différents services écosystémiques (protection contre les dangers naturels, habitat, qualité de l'air, etc.). Elle profite à différents secteurs. Certains de ces autres services écosystémiques peuvent faire l'objet de contributions financières publiques (sous forme de

⁶ Une surface forestière saine présente également une forte évapotranspiration, ce qui diminue la quantité d'eau d'infiltration. Toutefois, à grande échelle, les précipitations induites par l'évapotranspiration annulent cet aspect qui peut être localement négatif.

conventions-programmes par exemple) ou privées (vente de certificats forestiers sur le marché volontaire du carbone). Indirectement, les pratiques sylvicoles soutenues par ces contributions financières peuvent aussi bénéficier au service écosystémique forestier de filtration de l'eau et donc à la qualité des eaux souterraines.

4.2 Service écosystémique de protection de l'eau

En forêt, différents processus écologiques influencent directement la qualité de l'eau depuis l'atmosphère jusqu'à l'aquifère (Figure 2). Ces processus peuvent être physiques, biologiques ou chimiques.

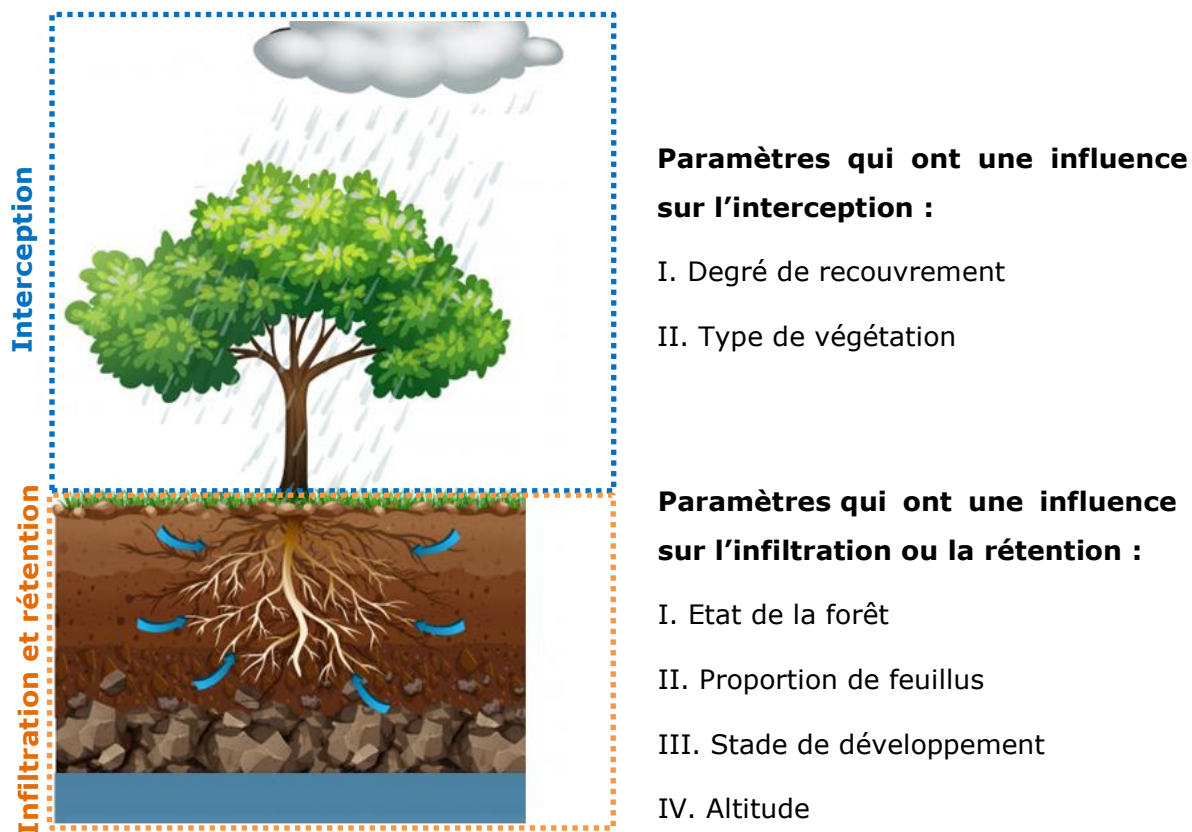


Figure 2 - Schéma des influences écologiques de la forêt sur l'eau potable

Les polluants atmosphériques sont interceptés par le houppier sous forme sèche (dépôt de substances sur les feuilles ou les branches) ou humide (pluie, brouillard ou neige qui captent les aérosols et les gaz présents dans l'air). La constitution de la végétation influence fortement l'infiltration des dépôts secs, offrant un effet filtrant de l'air.

La nature du sol et de la végétation détermine la capacité d'infiltration et donc d'immobilisation des polluants contenus dans l'eau, ainsi que la quantité d'eau retenue dans le sol. Les conditions météorologiques (intensité des précipitations, vents, etc.) influencent également cette quantité. L'eau qui n'est pas évaporée à la surface du sol, retenue dans le sol ou absorbée par les racines, s'infiltre jusqu'à l'aquifère et devient disponible pour la production d'eau potable. Les processus de transformation et de décomposition qui ont lieu dans le sol forestier permettent de rendre certains éléments disponibles pour la végétation (par exemple à travers le cycle de l'azote). Ils peuvent également mais dans une moindre mesure influencer la nocivité d'une molécule

(modification d'une molécule par l'activité bactérienne par exemple). Le sol forestier contribue de la sorte à une amélioration de la qualité de l'eau qui s'infiltre. La rétention des composés chimiques dépend de la dynamique et de l'évolution biologique du sol ainsi que du type de végétation présent qui alimente ces processus. En outre, en particulier pour l'azote, elle dépend également en grande partie des rôles joués par les complexes argilo-humiques et par l'activité biologique des sols. Les polluants atmosphériques que la forêt accumule peuvent atteindre les eaux souterraines s'ils ne sont pas stockés à long terme dans la biomasse ou retenus dans le sol.

Ci-après, les différents paramètres sont expliqués de manière plus détaillée et l'annexe 3 offre une illustration et un commentaire des relations forêts-eau à l'exemple de l'azote.

INTERCEPTION

- I. **Degré de recouvrement** : il est important de garantir un couvert continu sans grosses trouées. L'ensoleillement sur des sols sans couvert végétal peut provoquer une forte minéralisation de l'humus et une nitrification excessive du sol (Küchli & Meylan 2002).

Le maintien d'un couvert forestier continu est favorable à une bonne qualité de l'eau car il permet de réduire efficacement les lessivages du nitrate par l'eau d'infiltration (Bartsch 2000; Weiss 2002) et il limite l'érosion et donc la turbidité de l'eau (Guide Alpeau 2012). Pour cela, il est recommandé d'éviter de créer des surfaces largement dénudées à la suite d'interventions sylvicoles. L'établissement d'un plan de gestion adéquat et l'entretien d'une régénération préétablie ont un effet positif sur la qualité de l'eau d'infiltration (Von Wilpert et Zirlewagen 2003).

En Suisse, seules les « coupes rases » sont interdites (Loi sur les forêts, art. 22). Cette loi définit la coupe rase comme l'élimination totale des arbres forestiers, sans notion de surface ou d'étendue.

- II. **Type de végétation** : l'espèce (indice de la surface foliaire⁷, houppier...) influence la quantité et la qualité de l'eau qui arrive au sol.

Les résineux présentent généralement une plus grande surface foliaire que les feuillus, notamment dans la zone du houppier (Breda, 1999). Ils sont ainsi dotés d'une plus grande capacité à intercepter les polluants atmosphériques, y compris

⁷ Surface de feuille par unité de surface au sol. Cette dernière peut être le m², l'hectare, le km², etc. selon l'échelle d'analyse (arbre, peuplement, biome, etc.)

les dépôts acides et azotés. À cela s'ajoute la persistance de leurs feuilles qui augmente leur capacité de filtration annuelle en comparaison aux feuillus (Breda, 1999). Par ailleurs, les pertes par interception sont plus élevées dans les peuplements de résineux. Cela produit une augmentation de la concentration de substances dans l'eau d'infiltration (Hegg C. et al. 2006).



L'interception des polluants par la végétation peut, sous certaines conditions, avoir des effets négatifs sur la qualité de l'eau. En effet, les forêts situées à proximité des grandes villes ou de zones industrielles peuvent, sous l'influence des vents, agir comme des éponges en s'emparant des polluants présents dans l'air. Ces polluants, retenus dans les feuilles et les parties aériennes des arbres finiront, par l'action des précipitations, par atteindre le sol et s'infiltrer jusqu'aux eaux souterraines (Hamilton et al. 1997). C'est ainsi que les apports d'azote de l'agriculture peuvent, sous l'influence des vents, se retrouver en forêt même si aucune exploitation n'est tolérée dans l'aire forestière d'alimentation du captage (BAFU, 2020 ; OFEV 2019 ; EKL, 2005 et annexe 3).

INFILTRATION ET RETENTION

Les sols forestiers se caractérisent généralement par une porosité forte et profonde, due à une activité biologique intense et un développement de racines pérennes et profondes. Par ailleurs, un couvert végétal permanent sous forêt diminue le risque de formation de croûtes et les pertes par ruissellement s'en trouvent réduites (Maître & Jenni 2007). La recharge des aquifères est généralement meilleure sous les sols forestiers, en comparaison avec les autres couvertures végétales⁸.

En période de repos, l'infiltration est nettement plus élevée sous les peuplements de feuillus. En période de végétation, l'infiltration dépendra principalement du stade de développement et de la structure. Elle est plus élevée sous les jeunes peuplements, indépendamment de l'essence (Maître & Jenni 2007). L'épicéa présente une évaporation plus forte et une infiltration plus faible que le hêtre mais cette différence s'atténue lors d'années particulièrement sèches ou humides (Salihi 1984)

Comme mentionné précédemment, le nitrate est une substance problématique sur le plan de la qualité des eaux souterraines en Suisse. Pour cela, le comportement et la

⁸ Cet aspect est à nuancer en raison de la forte évapotranspiration du couvert forestier. Seul un faible nombre d'études s'est penché sur cette question et d'autres types de végétation sont performants pour cet effet physique, ce qui n'est pas considéré dans le document.

concentration de cette substance, ainsi que l'influence de la végétation sur celle-ci a été analysée plus en détail⁹.

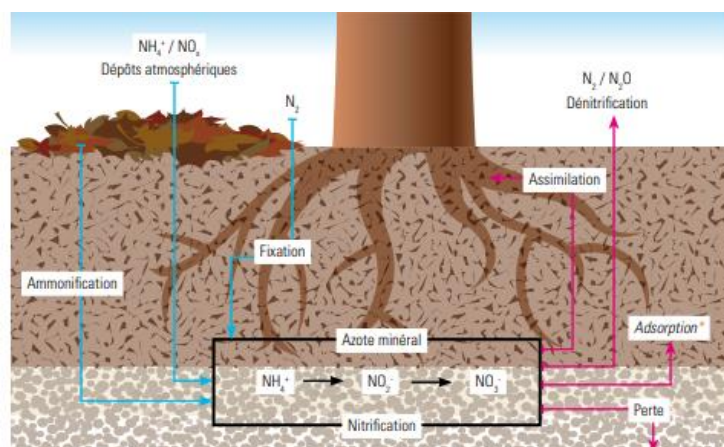


Figure 3 - Cycle simplifié de l'azote (Source : projet Alpeau)

Dans le cycle de l'azote, les processus d'ammonification et de nitrification permettent une remise à disposition, notamment pour la végétation, de composés azotés indispensables à leur vie. Cependant, des apports élevés d'azote peuvent entraîner une saturation de l'écosystème. L'excès d'azote est alors lessivé sous forme de nitrates dans les eaux de surface et souterraines, menaçant ainsi leur qualité. En Suisse, ce problème est particulièrement présent dans les aires d'alimentation occupées par une exploitation agricole intensive.

Les paramètres qui ont une influence dans les processus d'infiltration et de rétention de composés chimiques de l'eau sont les suivants :

- III. **Etat de la forêt :** l'eau d'infiltration est de meilleure qualité dans le sol d'une forêt saine et proche de l'état naturel que dans celui de surfaces comparables intensément exploitées et entraînant des surfaces de terrain découvert (Benecke 1993 ; Einsele et al. 1990). Le sol y est plus finement structuré et biologiquement plus actif.
- IV. **Proportion de feuillus :** l'eau potable captée sous des peuplements de feuillus est de meilleure qualité en ce qui concerne les concentrations en nitrate que celle qui est récoltée sous les résineux (Kreutzer 1994; Meesenburg et al. 2003; Rothe et al. 1998, 2004 ; Langusch et Matzner 2002).

⁹ Le cycle de l'azote est présenté ci-dessous et détaillé dans l'annexe 3. L'influence de la forêt sur d'autres polluants que l'azote est discutée en annexe 4.

L'activité organique plus intense d'une litière de feuillus permet une réutilisation (immobilisation bactérienne et prélèvement par les racines) rapide des nitrates libérés, ce qui diminue les pertes en nitrates vers les eaux souterraines (Duchaufour 1997 ; Rothe et Mellert 2004). Par ailleurs, grâce à leur système racinaire profond, les feuillus disposent d'un plus grand volume dans lequel ils prélèvent des nitrates contenus dans les eaux de percolation avant qu'elles n'atteignent les eaux souterraines. Cela favorise la diminution de la concentration en nitrate, notamment lorsque les dépôts d'azote sont élevés (Rothe et al. 1998).

À l'inverse, les processus d'ammonification, dominant dans l'humus de type « moder » des forêts de résineux, contribue à acidifier le sol. Les peuplements de résineux captent plus efficacement les particules en suspension dans l'air, ce qui les rend plus concernés par le phénomène de « pluies acides ». Le sol reçoit un taux d'azote supérieur aux besoins des arbres, entraînant la saturation et l'entraînement de nitrates et d'ammonium vers les eaux souterraines (Rothe et Mellert 2004).

- V. **Stade de développement de la forêt** : il existe une étroite corrélation entre l'âge du peuplement et la concentration en nitrate dans l'eau d'infiltration (Rothe & Mellert 2004). La migration du nitrate vers les eaux souterraines augmente avec l'âge de l'arbre parce que son rythme de croissance est ralenti, c'est-à-dire la capacité d'assimiler l'azote diminue, et qu'il est capable de filtrer de plus grandes quantités d'azote d'origine atmosphérique (Rothe et al. 1998).
- VI. **Altitude** : l'altitude influence fortement la composition de la forêt (pourcentage de feuillus). En outre, dans les plaines fluviales, l'influence de la forêt est plus importante que dans les forêts de montagne car les eaux souterraines sont souvent plus proches des racines des arbres. L'altitude est également liée à l'éloignement des facteurs de perturbation humains.
- VII. **Le type de sol** : les sols forestiers n'ont pas tous la même capacité de rétention.

Un sol riche en matière organique (MO) a une plus grande capacité à retenir l'eau et les éléments potentiellement polluants. Les complexes argilo-humiques peuvent adsorber certaines substances du sol, ce qui réduit les transferts vers les eaux souterraines (Fageria 2012). Par ailleurs, l'acidité modifie le pH de l'eau, pouvant augmenter la mobilité de certains polluants et entraver l'activité biologique.

La perméabilité, déterminée par la macroporosité et la granulométrie du sol, augmente l'infiltration et l'oxygénation de l'eau, permettant aux microorganismes de dégrader certains polluants en les métabolisant.

La combinaison de la perméabilité et du taux de MO détermine la capacité de rétention d'un sol. Un sol riche en MO et peu perméable représente le pire des scénarios ; l'accumulation de MO faiblement dégradée provoque une acidification des sols et donc des processus de lixiviation, de lessivage et de chélation de certains polluants dans les eaux souterraines.

La capacité d'échange cationique (CEC), utilisée comme mesure de la fertilité d'un sol, indique la capacité de rétention des éléments nutritifs et des cations d'un sol donné. Ce paramètre est également directement lié au pouvoir tampon des sols. Une CEC élevée est synonyme d'un sol ayant une grande capacité tampon et donc moins sous l'influence des facteurs d'acidification (Gobat et al. 2010). Ces sols retiennent efficacement les polluants.

Finalement, lorsque les divers facteurs des sols énumérés ci-dessus sont favorables à la rétention des polluants, l'épaisseur du sol joue également un rôle non négligeable. Plus le sol est épais, plus la surface de réaction est grande, augmentant ainsi les échanges entre l'eau et la matrice du sol.

VIII. **Le type d'aquifère :** l'eau d'infiltration provenant de différentes parties du bassin d'alimentation se mélange dans l'aquifère. Les processus de mélange et de transformation ainsi que la durée d'écoulement varient en fonction du type et des caractéristiques de l'aquifère (roches meubles, fissurées, karstiques).

Plusieurs paramètres, accessibles via les Géoportails cantonaux sur de larges portions du territoire, ont une influence sur la vulnérabilité des aquifères (Thüler 2014) :

1. La conductivité hydraulique des aquifères : dans les aquifères karstiques ou fissurés, la présence de conduits induit des écoulements rapides. Ces derniers atténuent les phénomènes de dispersion, de dilution, de rétention et d'adsorption des polluants. À l'inverse, dans les aquifères ayant des matrices plus fines tels que les aquifères poreux, et donc des écoulements plus lents, ces phénomènes améliorent sensiblement la qualité de l'eau y transitant.
2. Couche de couverture de l'aquifère : la sensibilité aux polluants varie fortement selon la situation. En effet, la présence d'une couche de couverture peu perméable offre une meilleure protection des eaux souterraines.

4.3 Sylviculture – recommandations pour la pratique

Certaines pratiques forestières dépassent déjà les exigences légales dans le but de favoriser les processus positifs agissant sur l'eau d'infiltration dans l'écosystème forêt (effet du sol et des racines) et d'atténuer les influences négatives (lessivage de polluants atmosphériques). Les propriétaires forestiers soutenant ces pratiques assument actuellement seuls les pertes de rendement et les surcoûts qui en découlent. Les exploitants des captages situés sous couvert forestier bénéficient donc parfois déjà gratuitement de ce service rendu par les forestiers et la forêt.

Les recommandations qui suivent reflètent les prescriptions légales en matière de protection de la forêt, des eaux et du sol. Le renforcement de ces mesures ou leur extension à des zones plus grandes constituerait donc une plus-value pour la protection des eaux souterraines.

Les recommandations portent sur :

A faire

Exploitation fine et planifiée : une récolte de bois à petite échelle et bien répartie dans le temps et dans l'espace permet d'avoir une forêt offrant un couvert régulier et composé de différentes classes d'âges. Les structures irrégulières permettent par ailleurs une plus grande résilience des peuplements face aux dangers naturels. En outre, il est désirable de faciliter la régénération naturelle avec des essences en station – en tenant compte des effets des changements climatiques – afin d'obtenir une forêt plus proche de l'état naturel. Par ailleurs, il est recommandé de renoncer aux coupes définitives en l'absence de recrû. D'une manière générale et chaque fois que cela est possible, la régénération naturelle doit être privilégiée sur la régénération artificielle.

Priorisation des essences : favoriser la présence des feuillus tout en considérant les stations (végétation naturelle potentielle, parfois bien sûr composée de résineux). Comme il a été mentionné ci-dessus, en augmentant la part de feuillus dans un peuplement, il est possible de réduire les apports de polluants atmosphériques et de favoriser l'emmagasinement de l'azote (Gundersen et al. 2006).

Utilisation des carburants et lubrifiants respectueux de l'environnement : l'utilisation de lubrifiants biologiquement dégradables peut aussi réduire au minimum les conséquences néfastes des huiles de graissage des machines forestières (Heidelbauer 2002). Pour les chantiers situés en zone S, l'utilisation de ces produits est demandée. La généralisation de cette recommandation dans toute la zone d'un bassin

d'alimentation d'un captage permettrait d'assurer l'absence d'infiltration de ces produits dans les eaux souterraines.

A éviter

Exploitation de grande ampleur : il convient d'éviter les grosses trouées et les coupes de grande ampleur.

Dommages au sol : le sol est protégé et sa compaction doit être évitée quelle que soit son utilisation (LPE, OSol)¹⁰. Or, toute exploitation du sol implique une modification de ce dernier, généralement provisoire. La protection du sol porte donc sur les atteintes persistantes à long terme, au niveau de la structure du sol, de la succession des couches pédologiques ou sur leur épaisseur. La compaction constitue l'atteinte la plus fréquente lors de la récolte du bois. Le passage d'engins sur un sol dans de mauvaises conditions provoque des dégâts importants et durables à la structure du sol, qui ne peut dès lors plus assumer ses différentes fonctions (Lüscher et al. 2019). L'interruption des travaux et le déplacement des machines sur un chantier alternatif en cas d'humidité trop élevée des sols permet de diminuer le risque d'altération de la qualité du sol forestier et de préserver sa fonction de filtration des eaux d'infiltration. Une bonne organisation de la desserte forestière permet également de diminuer la part de la surface qui sera perturbée par le passage des engins. Planifier en amont l'exploitation forestière, reporter des travaux en cas de mauvaises conditions du sol, voire renoncer au passage d'engins sur certains sols constituent des mesures efficaces mais contraignantes pour l'exploitant forestier.

Traitement phytosanitaire pour la conservation des bois : le bois exploité dans les zones de protection des eaux souterraines n'est pas traité contre des attaques d'insectes ou de champignons. L'objectif est de diminuer le risque de pollution dû à l'utilisation de produits phytosanitaires, maintenir les fonctions du sol ainsi que de maintenir la qualité des eaux souterraines.

Concentration de rémanents de coupe : les processus de décomposition de la matière organique libèrent naturellement de l'azote minéral dans les sols mais le bois mort est nécessaire au cycle forestier naturel. Une présence diffuse de

¹⁰ L'objet protégé « sol » est constitué par la couche de terre meuble dans laquelle croissent les plantes, soit le sol fertile (OFEV, 2016)

rémanents est préférable à une accumulation importante de rémanents de coupe, qui pourrait contribuer à une accumulation ponctuelle de réserves d'azote dans les matériaux organiques du sol. L'élimination de rémanents permettrait de réduire les quantités de dépôts azotés (Dissmeyer 2000, Lundborg 1997) mais induirait également la diminution d'autres nutriments. La décomposition d'un tas de branches (bois et feuilles) ne présente toutefois pas de risque de lessivage de nitrate dans le sol¹¹, ce dernier dépendant du rapport carbone/azote dans les rémanents.

Si les propriétaires forestiers qui gèrent la même aire d'alimentation se concertent sur la manière d'agir dans ces lieux, ils peuvent diminuer les influences négatives et renforcer les positives (Wenger 2002). L'extension de l'application des prescriptions spécifiques aux zones de protection des eaux à l'ensemble d'une aire d'alimentation d'un captage dans le cadre d'un partenariat offrirait une véritable plus-value à la qualité des eaux souterraines. Les coûts supplémentaires pour les gestionnaires forestiers des mesures allant au-delà des prescriptions légales peuvent être compensées pour encourager la mise en œuvre de mesures.

Toutefois, comme il a été mentionné ci-dessus, l'effet de ces actions dépend largement des conditions locales, comme le peuplement, le sol ou le climat (Schleppi et al. 2003). En outre, certaines mesures ne sont pas toujours réalisables et les mêmes mesures dans des forêts avec des caractéristiques différentes ne produiront pas les mêmes résultats. Etant donné que la situation de chaque aire d'alimentation est différente, il conviendra d'évaluer les mesures et leurs applications au cas par cas.

Il est important de signaler que des effets secondaires négatifs peuvent aussi se produire comme conséquence d'un processus de récolte de bois. Par exemple, le compactage du sol, l'altération de la végétation au sol, les pollutions causées par des accidents (huile de moteur...) pourront également être considérés dans des partenariats à élaborer.

4.4 Impacts d'une mesure sylvicole

La bonne qualité globale des eaux souterraines situées sous la forêt dépend de plusieurs facteurs qui peuvent varier. Elle n'est pas garantie dans l'espace et le temps.

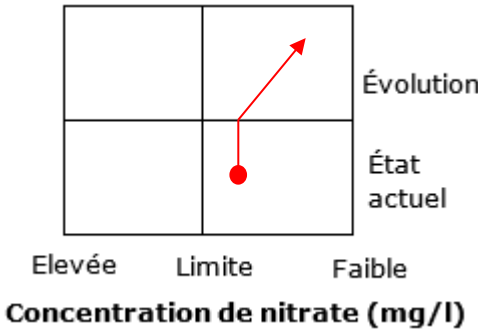
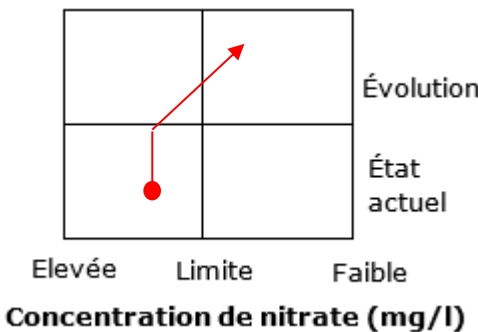
Des accidents, des mesures sylvicoles pas suivies dans le temps ou une sylviculture inadaptée peuvent provoquer une diminution de la qualité de l'eau. En revanche, pour autant que la station¹² le permette, une adaptation de la sylviculture, favorisant par

¹¹ Communication orale de P. Schleppi (WSL), 2021.

¹² Voir note de bas de page p.24

exemple le pourcentage de feuillus ou réalisant une plantation d'essences adaptées à la station dans une zone où la régénération naturelle est difficile, peut aider à garantir à long terme la bonne qualité des eaux souterraines.

Compte tenu du chapitre précédent, les figures suivantes illustrent schématiquement la variation dans le temps de la concentration de nitrate (mg/l) en fonction de différentes mesures sylvicoles. Il est important de noter que ces schémas illustrent une **tendance générale** de la variation des taux de nitrates dans le sol. Un passage, peut-être temporaire, de la valeur maximale souhaitée (valeur « limite » sur les schémas¹³) suite à une intervention, n'est pas et ne peut pas être garanti.

 Concentration de nitrate (mg/l)	Forêt composée par une plantation d'épicéas hors de la station. Mesure sylvicole : coupe pour augmenter le pourcentage de feuillus en station et favoriser la régénération naturelle. Résultat attendu : diminution de la concentration de nitrate dans le sol (ch. 4.2)
 Concentration de nitrate (mg/l)	Forêt sans végétation dû à l'impact d'une tempête. Mesure sylvicole : plantation d'essences en station Résultat attendu : diminution de la concentration de nitrate dans le sol (ch. 4.2)

¹³ La valeur limite de concentration exigée par l'ordonnance sur la protection des eaux pour les eaux souterraines utilisées comme eau potable est de 25 mg/l, mais elle ne correspond pas à la « limite » indicative des schémas.

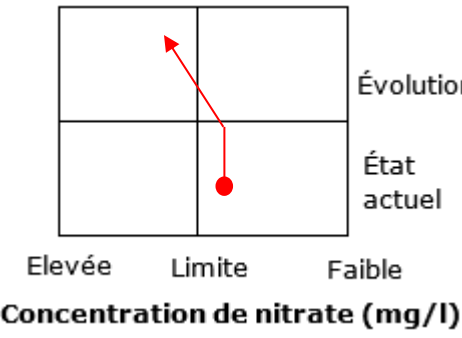
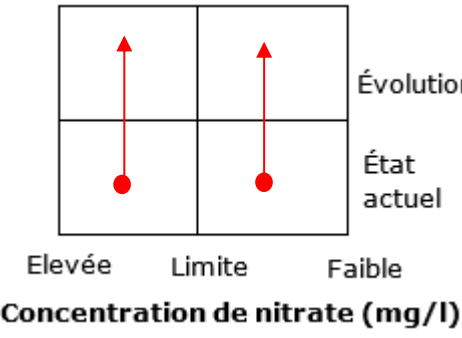
 Évolution État actuel Elevée Limite Faible Concentration de nitrate (mg/l)	Peuplements de vieux arbres. Mesure sylvicole : intervention forte avec création de grosses trouées. Résultat attendu : augmentation de la concentration des nitrates (ch. 4.2)
 Évolution État actuel Elevée Limite Faible Concentration de nitrate (mg/l)	Mesure sylvicole : pas d'intervention Résultat attendu : la concentration de nitrates reste constante.

Figure 4 - Mesures sylvicoles vs. Concentration de nitrate (mg/l)

La vitesse de réponse de la mesure sylvicole dépend de plusieurs facteurs tels que la station, la perméabilité du sol, la pente du terrain, le type d'aquifère ou l'ampleur de la mesure. Par exemple, un accident d'un engin forestier dans une forêt où le sol est très perméable peut endommager la qualité de l'eau plus rapidement que si le sol est moins perméable. Il faut plusieurs années (période de croissance selon les espèces plantées et la station) pour connaître l'effet positif d'une mesure sylvicole.



L'objectif ici est de **PRESERVER** la qualité de l'eau afin qu'à l'avenir la qualité reste bonne.

5 Nécessité et impact des mesures sylvicoles

La mise en place volontaire de bonnes pratiques forestières allant au-delà des bases légales permet aux exploitants d'un captage situé sous couvert forestier de bénéficier gratuitement des effets positifs sur la qualité des eaux souterraines.

Ce chapitre vise à estimer la prestation supplémentaire rendue par les propriétaires et gestionnaires forestiers qui gèrent leurs forêts de façon particulièrement favorable à la production d'eau potable de haute qualité.

Une première étape consiste à évaluer la situation du peuplement forestier afin de définir la nécessité de mettre en place des mesures sylvicoles ainsi que la nature exacte de ces mesures. L'objectif de cette première étape d'analyse est d'atteindre un peuplement le plus proche possible de son état naturel.

Dans un deuxième temps, une liste de mesures sylvicoles strictes et spécifiquement orientées vers la préservation de la qualité des eaux souterraines est définie et analysée. Cette analyse ne concerne que des mesures allant au-delà des bases légales. Elle permet également de mettre en évidence les difficultés induites et de faciliter la prise de conscience sur de potentielles synergies bénéfiques aux producteurs d'eau et aux propriétaires forestiers.

L'objectif de l'évaluation qui suit est d'offrir aux gestionnaires forestiers et aux producteurs d'eau une base de discussion qui puisse refléter leur propre situation dans l'optique de faciliter l'établissement d'un partenariat.

5.1 Définition de la surface d'influence

Dans le cadre de ce manuel, on définit comme **surface d'influence** d'un captage l'aire géographique qui peut avoir un effet sur la qualité de l'eau issue de ce captage. Il y a différentes manières de définir cette surface. La manière choisie dépend principalement des informations à disposition, mais peut également dépendre d'autres données comme les caractéristiques géologiques de la zone concernée (zone karstique par exemple).

- **Zones de protection des eaux souterraines** : espaces réservés réglementairement autour des captages utilisés pour l'alimentation en eau potable. Leurs limites se basent soit sur les temps de transfert d'eau, soit sur la vulnérabilité de l'aquifère.
 - ✓ Surface qui influence avec certitude l'eau
 - ✗ Elle ne couvre pas toute la surface d'influence d'une source

- **Bassin versant hydrologique** : l'étendue drainée par un cours d'eau et ses affluents et limitée par une ligne de partage des eaux. Il comprend l'ensemble des pentes inclinées vers le cours d'eau qui y déverse leurs eaux de ruissellement.

✗ Il ne prend pas en compte la géologie. La surface ne sera pas précise pour délimiter la zone d'influence.
- **Aire d'alimentation Z_u** : l'aire d'alimentation Z_u couvre la zone où se reforment, à l'étiage, environ 90 % des eaux du sous-sol pouvant être prélevées au maximum par un captage. Lorsque la détermination de la zone exige un travail disproportionné, l'aire d'alimentation Z_u couvre tout le bassin d'alimentation du captage.

✓ L'aire permet de lutter contre tout signal de pollution continu (sans notion de temps).
✓ Les caractéristiques des ressources en eaux souterraines (débit, chimie, etc.) sont plus conditionnées par leur aire d'alimentation que par les zones de protection.
✗ Les aires d'alimentation ne sont définies que pour un nombre restreint de ressources et ces informations ne sont pas centralisées¹⁴
- **Surface avec lien prouvé avec le captage** : défini par une étude qui prend en compte la perméabilité du sol et les essais de traçage.

✓ Surface qui influence avec certitude l'eau
✗ Il faut faire une analyse par captage

5.2 Etat des peuplements

Différents éléments permettent à la forêt de mieux remplir sa capacité naturelle de rétention et de protection de la qualité de l'eau. L'identification de ces éléments passe par l'analyse de l'état actuel de la forêt et l'analyse de son état idéal par rapport à la qualité des eaux souterraines.

Une gestion sylvicole mesurée et réfléchie améliore sur la durée la qualité des eaux souterraines. Comme décrit dans le chapitre 4.2, un faible taux de résineux et un couvert forestier durable et important aboutira à éviter plus fortement une pollution de l'eau que

¹⁴ Ces zones font partie de la carte de protection des eaux. Elles devraient être définies et transmises à l'OFEV, avec une mise à jour chaque année. Actuellement il y a un déficit à l'exécution.

dans une zone couverte par un peuplement de résineux purs comportant de grandes trouées. Il s'agit néanmoins d'une généralité qui ne peut s'appliquer à tous les peuplements sans distinction. Les conditions physiques et biologiques du terrain doivent être prises en compte puisqu'elles influencent l'état naturel du peuplement.

Une forêt d'altitude est naturellement plus riche en résineux qu'une forêt de plaine, de même qu'une forêt sur sol très sec est plus ouverte qu'une forêt sur sol humide. Un propriétaire forestier ne peut pas être pénalisé sur la base de ces critères uniquement. Il est essentiel de connaître pour chaque type de milieu forestier le taux de mélange et le degré de fermeture naturels.

5.2.1 Analyse de l'état actuel d'un peuplement

Les paramètres suivants sont à analyser pour établir l'état actuel d'un peuplement :

- La végétation
- Le sol
- La gestion forestière

Certaines informations peuvent être obtenues à travers les Géoportails de l'OFEV ou des cantons.

L'analyse doit idéalement être transcrite avec une fiche de contrôle (Figure 5).

FICHE DE CONTRÔLE

Producteur d'eau.....

Propriétaire de forêt.....

Surface d'influence..... ha

Nature du sol :

☐ Forêt.....% ☐ Agricole.....% ☐ Urbain.....% ☐ Autre.....%

ANALYSE DE LA FORÊT

	Description	Explication
Végétation		
Type de station		
Mélange		
%Feuillus		
Degré de couverture		
Stade de développement		
Stade sanitaire du peuplement		
Rajeunissement		
Sol		
Sec/humide		
Ph (basique, neutre, acide)		
Type d'aquifère		
Capacité d'échange cationique		
Profondeur du sol		
Vulnérabilité		
Gestion forestière		
Type d'exploitation		
Utilisation des huiles BIO		
Mesures supplémentaires---		

Figure 5 – Exemple d'une fiche de contrôle pour l'analyse de l'état d'un peuplement

5.2.2 Analyse de l'état idéal d'un peuplement

L'état idéal d'un peuplement dépend des conditions naturelles et climatiques (stations) de la surface forestière. Dans le cadre de cette analyse, on recherche l'état idéal d'un peuplement par rapport à sa fonction protectrice de la qualité des eaux souterraines.

La situation idéale de la forêt est l'état dans lequel cette forêt atteint son plus haut potentiel. C'est-à-dire, les caractéristiques naturelles de la forêt lui permettant de réaliser de la manière la plus efficace et durable les processus de filtration de l'eau de pluie chargée en polluants atmosphériques.

La situation idéale dépendra donc directement des conditions naturelles de chaque type de forêt et de la station.

5.3 Exigences sylvicoles des milieux

5.3.1 Documents de référence et méthodologie de l'analyse

Le « Guide des milieux naturels de Suisse » (Delarze et al. 2015) décrit chaque milieu présent sur le territoire, définissant notamment ses caractéristiques physionomiques, biologiques ou écologiques. Les forêts y sont classifiées en 6 milieux principaux, eux-mêmes différenciés de manière plus précise, ce qui aboutit à 30 types de formations forestières différentes.

Le guide des soins sylvicoles NaiS (OFEFP, 2005) a été développé dans le but d'assurer la gestion durable des forêts de protection contre les dangers naturels. Il contient une fiche détaillée pour chaque type de station forestière suisse. Ce sont ainsi 144 stations forestières qui sont précisément décrites, notamment au niveau de l'état naturel de la forêt, le mélange des espèces et leur représentation, ainsi que la structure du peuplement. Un profil d'exigence sylvicole y est également défini.

Ces deux documents ont été utilisés afin de définir des profils d'exigences sylvicoles en fonction de la qualité de l'eau pour chaque type de milieu forestier (Tableau 2).

Chaque station forestière a dans un premier temps été affectée au type de milieu naturel à laquelle elle correspond, en prenant en compte les conditions du sol, le climat, l'humidité et l'acidité du substrat, la flore ainsi que la répartition altitudinale et géographique.

Le taux de mélange minimal et idéal, ainsi que le pourcentage de fermeture du peuplement ont ensuite été définis pour chaque milieu naturel, à partir des taux des stations qui s'y apparentent.

Finalement, les milieux naturels présentant des caractéristiques identiques (mélange et taux de couverture) ont été regroupés (Figure 6).

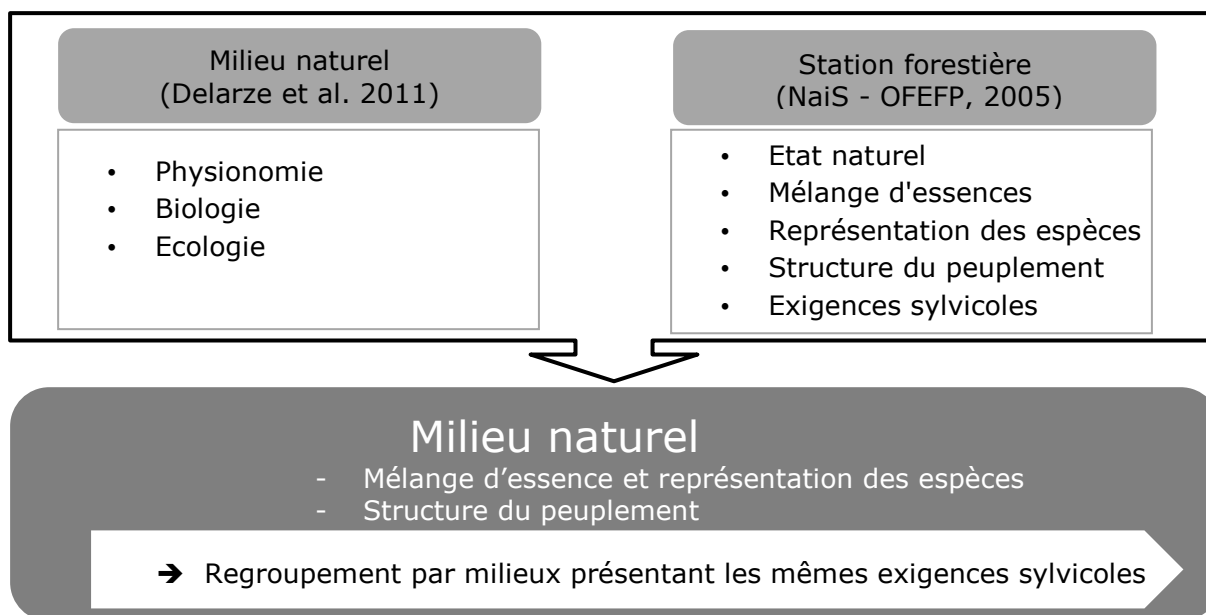


Figure 6 - Méthode utilisée pour définir les exigences sylvicoles pour chaque milieu

5.3.2 Exigences

Pour chaque type de milieu forestier sont définies les exigences minimales et idéales au niveau du pourcentage de résineux et du pourcentage de fermeture. Il s'agit de valeurs correspondant à la situation naturelle du milieu, en absence de l'influence humaine ou de catastrophes naturelles.

Le Tableau 2 présente le résultat de cette analyse (résultats détaillés en annexe 5). Certains milieux forestiers présentent des exigences sylvicoles particulières selon les caractéristiques de la surface concernée (éboulis, sols mouillés, etc.). Le Tessin présente également certaines variations spécifiques.

Tableau 2 - Exigences sylvicoles minimale et idéale pour chaque type de milieu forestier

	Présence maximale de résineux (%)	Présence idéale de résineux (%)	Degré de fermeture du peuplement (%)
Aulnaies	0 - 20	0	50 - 80
Aulnaies d'altitude	20 - 40	20 - 40	80 - 100
Frênaies	0 - 20	0 - 20	80 - 100
Hêtraies mésophiles et thermophiles	20 - 40 ¹	0 - 20 ²	80 - 100
Hêtraies acidophile	40 - 60 ³	40 - 60 ⁴	80 - 100
Hêtraies à Sapins	50 - 70 ⁵	50 ⁶	80 - 100
Erablaies et tillaies	0 - 20	0	50 - 80
Chênaies à charmes	0 - 20	0	80 - 100
Chênaie buissonnante et ostryaie	0	0	50 - 80
Chênaie acidophile	0 - 20	0 - 20	50 - 80
Pinèdes	80 - 100	80 - 100	50 - 80
Pessièrès	80 - 100	80 - 100	80 - 100 ⁷
Mélézins, arolières et pinèdes de montagne	80 - 100	80 - 100	50 - 80 ⁸
Forêts de robiniers	0	0	50 - 80 ⁹
Bétulaies sur tourbe	40 - 60	40 - 60	80 - 100
Pinèdes sur tourbe	80 - 100	80 - 100	50 - 80
Pessièrès sur tourbe	80 - 100	100	50 - 80

¹ Tessin et stations sur éboulis : 0-20 ; sol acide : 40-60

² sur sol acide : 40-60

³ Tessin : 0-20

⁴ Tessin : 0-20

⁵ sols mouillés influencés par l'eau stagnante : 80-100

⁶ stations thermophiles et éboulis : 20-40 ; sols mouillés influencés par l'eau stagnante : 60-80

⁷ 50%-80% à la limite de la forêt

⁸ <50% à la limite de la forêt

⁹ <50% à la limite de la forêt

5.3.3 Evaluation des mesures sylvicoles

L'utilisation d'un profil d'exigences minimales et idéales permet d'évaluer la nécessité d'entreprendre des mesures sylvicoles ainsi que leur effet sur le milieu. Cette méthodologie est similaire à celle utilisée dans les forêts de protection contre les dangers naturels définies sur le plan national (NaiS). L'objectif est d'évaluer la situation initiale et son décalage par rapport à la situation idéale, ainsi que l'influence d'une intervention.

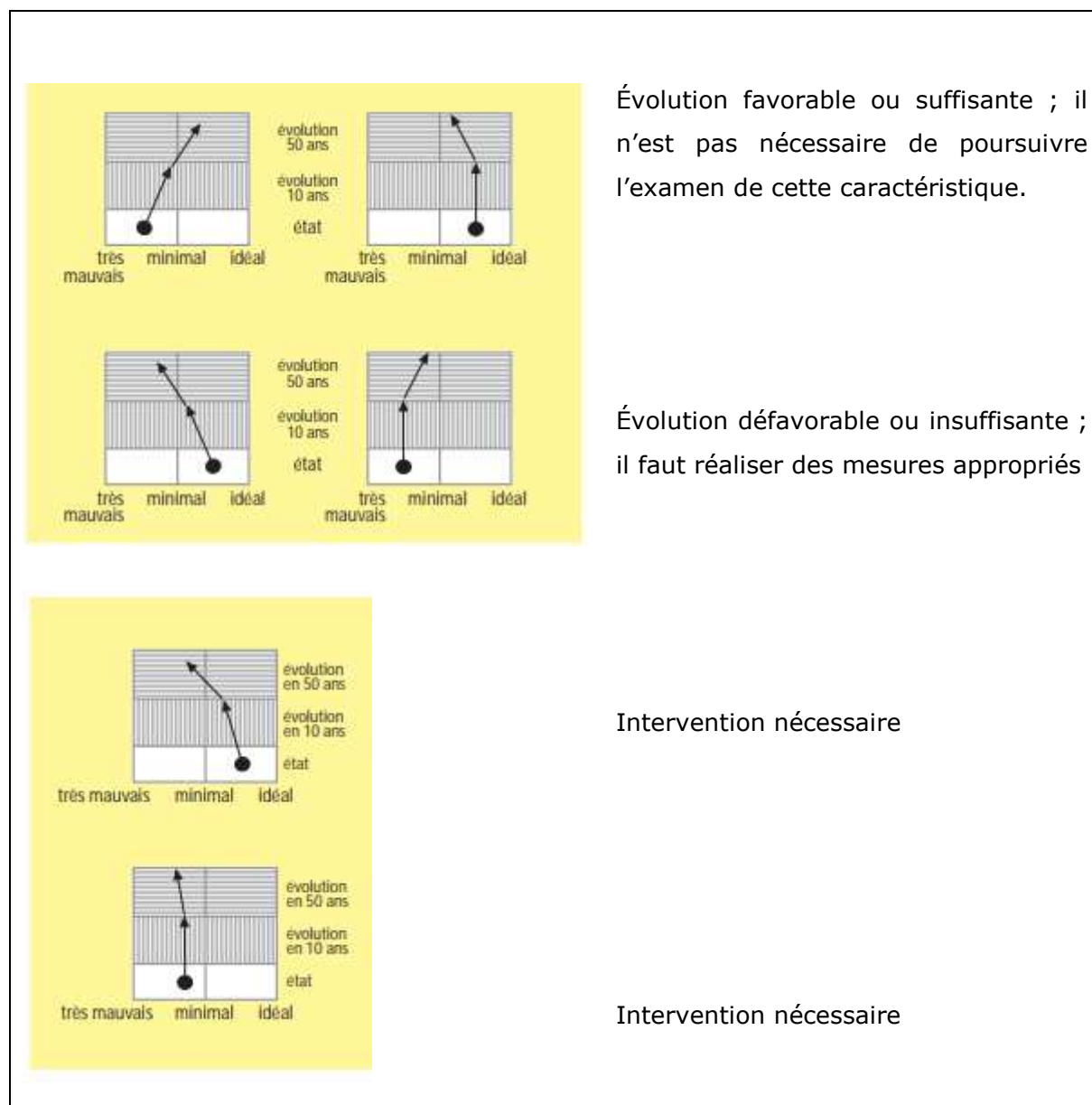


Figure 7 - Graphique explicatif de l'état actuel de la surface forestière évaluée par rapport à son état idéal (axe X) et de la tendance évolutive (axe Y) (Source : NaiS)

Les résultats de cette évaluation sont importants pour les deux acteurs : les gestionnaires forestiers et les distributeurs d'eau. Ils permettent de savoir si la forêt est dans sa situation optimale ou s'il est judicieux d'améliorer son service de filtration de l'eau.

5.4 Mesures spécifiquement orientées vers la qualité des eaux souterraines

Une analyse des mesures de gestion sylvicole permettant une véritable plus-value pour la protection des eaux souterraines a été menée. Quelques pratiques concrètes à mettre en place dans le cadre de l'exploitation sylvicole ont été mises en évidence. Les contraintes qu'elles impliquent pour le sylviculteur ont été analysées.

Ces pratiques influencent les éléments suivants :

Couvert végétal : exploitation régulière dans l'espace et le temps, sur le modèle de la forêt pérenne : récolte de bois dispersée sur le territoire selon un calendrier régulier de manière à obtenir un peuplement avec un couvert constant sans grande trouée, d'âge et de structure diversifiés sur l'ensemble du territoire, avec une croissance ininterrompue. Pratiquer une exploitation en forêt jardinée lorsque cela est possible (peuplements naturellement composés de hêtres, sapins et épicéas).

Base légale : comme détaillé au point 4.2, les défrichements et coupes rases sont interdits (LFo art. 5, 20, 22). En dehors de cela, une grande marge de manœuvre est laissée à l'appréciation du forestier dans sa pratique sylvicole (taille des ouvertures, périodicité des coupes, etc.) et un modèle de type pérenne n'est pas requis.

Mesure supplémentaire : assurer une diversité d'âges et de structures des peuplements, diminuer la taille des ouvertures¹⁵

Zone d'application : l'ensemble des peuplements situés sur la surface d'influence (ch. 5.1)

Mélange d'essences : pas de plantation de monoculture de résineux (épicéas, douglas), diversification des monocultures existantes (augmentation du taux de feuillus).

Base légale : les essences plantées doivent être adaptées à la station (LFo art. 24), la composition du peuplement n'est pas légiférée.

Mesure supplémentaire : proscrire les peuplements dont la composition est non diversifiée, à l'exception de certains peuplements situés au-dessus de la limite altitudinale des feuillus.

Zone d'application : l'ensemble des peuplements situés sur la surface d'influence (ch. 5.1)

Tassement du sol : planification de la desserte forestière pour éviter le tassement du sol par la mise en place d'un réseau de layons défini et non modifiable permettant la

¹⁵ Aspect non légiféré qui est à adapter aux conditions spécifiques du peuplement (composition, altitude, exposition, etc.)

réduction des passages d'engins forestiers dans les zones de coupe. Garder 50 mètres entre chaque layon.

Base légale : la gestion de la desserte forestière est du ressort cantonal (LFo art. 20). Dans le cadre d'une sylviculture proche de la nature, l'écartement minimal entre les layons peut être réduit jusqu'à 20 mètres (OFEV, 2010). Certains cantons ont fixé une distance minimale entre les layons dans leur législation forestière (par ex. 20 mètres dans le canton du Jura) ; d'autres s'appuient sur la recommandation fédérale (par ex : VD, FR).

Mesure supplémentaire : fixer à 50 mètres l'écartement entre les layons.

Zone d'application : l'ensemble des peuplements situés sur la surface d'influence (ch. 5.1)

Sols mouillés : pas de passage d'engins forestiers sur les sols humides à mouillés : report de travaux ou du débardage en cas de mauvaises conditions ; exploitation au câble-grue dans les stations à sols mouillés (frênaies, aunaies).

Base légale : l'utilisation de véhicules en forêt doit tenir compte de l'humidité du sol afin de prévenir les atteintes physiques (Osol art. 6). La force de succion (ou tension hygrométrique) du sol est mesurée à l'aide de tensiomètres. Il est généralement admis qu'aucun véhicule ne devrait rouler sur un sol dont la force de succion est inférieure à 10 cbar (OFEV 2001, 2015). Pour définir cette valeur d'engagement des engins, la teneur en argile du sol est également à prendre en compte, de même que les caractéristiques de l'engin forestier (poids, surface de contact). L'objectif est d'éviter l'apparition d'ornièrre de type 3, synonyme de dégâts écologiques au sol et impliquant la suspension des travaux forestiers (WSL, 2018).

Mesure supplémentaire : proscrire le passage d'engin des stations humides à mouillées afin de préserver le sol de toute atteinte physique (y compris ornières de type 1 et 2) provoquée par le passage d'engin.

Zone d'application : frênaies et aunaies de la surface d'influence (ch. 5.1) ; tous les peuplements en cas de mauvaises conditions du sol (humidité excessive).



Figure 8 Les atteintes physiques au sol ont une influence importante sur sa capacité d'infiltration

Prévention d'accident : utilisation de bacs de rétention pour le remplissage des tronçonneuses sur l'ensemble de la zone d'influence du captage.

Base légale : le ravitaillement de machines est interdit en zone S1, S2 et Sh. Selon la distance par rapport à la zone S3 ou Sm, le ravitaillement se fait tout de même dans la zone de la coupe à l'aide de bacs de rétention. L'utilisation de tels bacs fait partie des mesures généralement demandées pour les chantiers en zone S, répondant à l'exigence fédérale en cas de manipulation de substances de nature à polluer les eaux (LEaux art. 3, 6, 22).

Mesure supplémentaire : l'obligation d'utiliser des bacs de rétention pour le remplissage des tronçonneuses sur l'ensemble de la surface d'influence, en plus des zones S1, S2 et Sh, va au-delà des bases légales.

Zone d'application : les zones S3 ou Sm¹⁶ et sans statut de protection des eaux de la surface d'influence (ch. 5.1).

Produits phytosanitaires : stockage contrôlé des résineux pour éviter la dépréciation du bois en l'absence de traitement contre les pathogènes. Création de places de stockage arrosées pour chaque canton / région permettant l'entreposage du bois non traité.

Base légale : l'utilisation de produits phytosanitaire sur le bois coupé est interdite en forêt et en zone S1, S2, Sh (ORRChim, annexe 2.5 et 2.6 ; OFEV 2004). Elle peut être autorisée en forêt en zone S3 ou Sm et hors zone de protection des eaux à condition que le bois soit entreposé sur une place étanche et empêchant l'infiltration.

Mesure supplémentaire : la mise en place de places de stockage arrosées permet de renoncer à l'utilisation de produits phytosanitaires sur l'ensemble de la surface d'influence du captage.

Zone d'application : les zones S3 ou Sm¹⁶ et sans statut de protection des eaux de la surface d'influence (ch. 5.1).

5.5 Impact des mesures supplémentaires pour la gestion forestière

La mise en place des mesures suggérées implique une complexification de la planification de l'exploitation et de sa réalisation pour le gestionnaire sylviculteur. Les contraintes qui découlent du respect de l'ensemble de ces mesures sont diverses en

¹⁶ Donc en dehors de S1, S2 et Sh pour les aquifères karstiques et fissurés fortement hétérogènes.

fonction des peuplements et de leur gestion passée. Quelques exemples de la diversité des situations et des mesures à prendre sont donnés ci-dessous.

Les modèles pérennes, idéaux pour la protection de la qualité des eaux, sont déjà mis en place et recommandés dans certaines régions. Les gestionnaires de feuillus du Plateau Suisse pratiquent de plus en plus l'exploitation dite en forêt permanente (ZU, BE, AG, TG, SO, etc.) (WSL, 2016). Dans le canton de Neuchâtel, la forêt jardinée est historiquement pratiquée dans certaines régions. Ce modèle peut être rentable, à condition que la desserte soit suffisante (Pro Silva Helvetica, 2010).

Ce type de sylviculture nécessite par ailleurs un personnel qualifié et un équipement adéquat, afin d'abattre de gros arbres sans provoquer de dégâts aux tiges alentours qui constituent l'avenir du peuplement.

Dans le cadre des mesures énumérées ci-dessus, la diminution de la desserte pour la protection des sols implique un surcoût à l'exploitation important, voire très important en cas d'exploitation au câble-grue sur les sols mouillés.

Le passage d'engin forestier doit être évité à tout prix sur sol mouillé. La coupe peut toutefois avoir lieu, mais le débardage est différé et effectué lorsque le sol est sec ou gelé. Le bois peut donc rester sur place, évidemment sans être traité, mais le risque de dépréciation de sa qualité par les attaques d'insectes ou de champignons est grand. Cet aspect est à nuancer selon l'essence et l'utilisation du bois, le bois d'œuvre perdant bien plus de valeur que le bois-énergie par exemple. Le débardage différé est en outre problématique pour les résineux qui sont la cible fréquente de ravageurs comme le bostryche liseré.

Il en découle une perte de rendement relativement importante composée de frais bruts (coûts des bacs de rétention, etc.) et de coûts secondaires (perte de valeur du bois en cas de débardage différé, perte impliquée par l'utilisation d'une méthode d'exploitation alternative sur les sols mouillés, etc.).

Finalement, il est important de garder à l'esprit que la pratique de la sylviculture implique une vision à long terme. Le passage à une exploitation en forêt pérenne est un processus lent et long, passant par plusieurs interventions sur une génération d'arbre, soit en moyenne une centaine d'année (WSL 2009).

Le Tableau 4 page 38 résume les différentes mesures supplémentaires proposées pour une meilleure protection de la qualité des eaux souterraines et les implications qui en découlent (pratique sylvicole, coûts, etc.).

6 Estimation économique du service écosystémique forestier

Donner une valeur à un service écosystémique est un exercice difficile et plusieurs méthodes différentes sont proposées dans la littérature. Les données qui suivent sont les seules chiffrées qui ont actuellement pu être trouvées.

Le coût annuel des mesures forestières légalement obligatoires en faveur de la protection des eaux souterraines a été évalué à 15 millions de francs (Blatter et al. 2012, De Büren et al. 2012). En plus des prescriptions légales, certaines pratiques spécifiques (par exemple l'utilisation d'essence et d'huile biodégradable y compris hors des zones de protection) sont mises en place par les gardes forestiers de manière volontaire, malgré les surcoûts qu'elles entraînent.

Le prix moyen de traitement de l'eau en Suisse est estimé à 20 centimes par m³ d'eau, et près de 400 millions de m³ d'eau peuvent être injectés dans le réseau sans traitement préalable. C'est ainsi environ 80 millions de francs qui sont économisés chaque année par les distributeurs d'eau (Hartmann et al. 2008). Or, une importante partie de cette eau provient des forêts (De Büren et al. 2012).

Ces chiffres moyens ne reflètent toutefois pas les variations de traitements dues notamment à la nature du sous-sol (dans les zones de roches fissurées et karstiques fortement hétérogènes, l'eau doit plus souvent subir un traitement préventif), ni les différences dues aux spécificités de chaque région du pays.

Cette économie, qui est actuellement réalisée en partie grâce à une sylviculture respectueuse des bases légales, pourrait être plus importante en renforçant et en généralisant des pratiques sylvicoles ciblées à plus grande échelle.

Au vu de la variabilité des situations des captages d'eau potable en termes de conditions géographiques, géologiques, hydrogéologiques ou forestières, il est impossible de calculer l'économie effective pour la production de l'eau potable faite grâce à la mise en place de mesures sylvicoles spécifiquement orientées vers la protection de la qualité des eaux souterraines, telles qu'énumérées au chapitre 5.4.

Une évaluation des surcoûts impliqués pour le sylviculteur et un exemple pratique d'un captage en Suisse permettent toutefois d'estimer l'intérêt financier de la mise en place de ce genre de partenariat.

6.1 Coûts des mesures sylvicoles supplémentaires

La manière de pratiquer la sylviculture telle qu'exposée au chapitre 5.4 entraîne des coûts supplémentaires et une perte de rendement. Cette valeur a été estimée pour chaque mesure proposée.

- Dans une forêt pérenne, tous les engins forestiers ne peuvent pas être utilisés et le personnel est plus qualifié afin de pratiquer des coupes sans dégâts alentours.
- L'augmentation de la distance entre les layons a une incidence sur la manière de travailler (type d'engins).
- L'interruption et le report d'une coupe en cas de mauvaise condition du sol oblige l'exploitant forestier à réorganiser son travail et son équipe. Dans ces conditions, la coupe peut avoir lieu mais le débardage est différé, impliquant une possible baisse de valeur pour le bois.
- L'exploitation au câble-grue sur les sols mouillés entraîne des coûts supplémentaires.
- Le surcoût de l'utilisation de bacs de rétention pour le remplissage des tronçonneuses prend en compte leur prix brut ainsi que leur durée de vie.
- La conversion d'une monoculture de résineux signifie sa coupe prématurée avant la maturité du peuplement. Cela implique une perte d'accroissement en volume et en valeur.
- Le stockage contrôlé des résineux implique un temps de travail plus long (chargement et déchargement du bois, transport) ainsi qu'une place de stockage adaptée. Le surcoût qu'il implique est difficile à estimer car il dépend de la distance de transport et des possibilités de stockage dans la zone concernée (disponibilité d'une place de taille suffisante, proche d'un point d'eau, etc.).

Ces coûts supplémentaires ont été calculés à l'aide des outils « Trinkwasserschutz-Tool » et du logiciel « HeProMo », tous deux développés par le WSL, ainsi que par calculs basés sur notre expertise du domaine forestier (Tableau 3). Le détail des calculs et des caractéristiques du peuplement fictif choisi se trouvent en annexe 6.

Ces estimations ne peuvent être prises comme une représentation fidèle de la situation dans tout le pays et dans tous les peuplements. Elles se basent sur les prix pratiqués sur le marché du bois actuel dans le canton du Jura. De plus, ces surcoûts bruts calculés à l'hectare doivent ensuite être adaptés selon les caractéristiques des peuplements concernés (stations forestières, taux de monocultures, etc.).

Tableau 3 – Estimation du surcoût de chaque mesure supplémentaire. Le prix est indiqué en francs suisse par hectare de forêt et par année.

Mesure	Surcoût (CHF / ha/ an)
Couvert végétal continu (forêt pérenne)	43.-
Ecartement des layons de débardage de 50 mètres	23.-
Coupe au câble-grue	13.-
Bacs de rétention pour les tronçonneuses	16.-
Conversion des monocultures d'épicéa	85.-
Stockage contrôlé des résineux	2.-

Tableau 4 – Mesures supplémentaires proposées en faveur d’une plus grande protection de la qualité des eaux souterraines avec précision de l’impact qui en résultent sur les pratiques sylvicoles. L’application concerne la zone où la mesure va au-delà des bases légales.

Les calculs se basent sur une situation fictive décrite dans l’annexe 6, soit : un peuplement composé de 60% de feuillus, de 20% de résineux mélangés et de 20% de résineux en monoculture ; une récolte de bois semi-mécanisée sur 70% de la surface et entièrement mécanisée sur 30% de la surface ; des layons espacés de 20m.				
Mesure supplémentaire	Pratiques sylvicoles	Zone d’application comme mesure supplémentaire	Apport à la qualité des eaux	Surcoût estimé
Maintenir un couvert végétal constant grâce à une exploitation sur le modèle de la forêt pérenne, et plus précisément de la forêt jardinée quand les conditions le permettent	Jardinage, forêt permanente ou pérenne, exploitation pied par pied, coupe en mosaïque	L’ensemble des peuplements situés sur la surface d’influence du captage	Le maintien du couvert forestier réduit le lessivage des nitrates par l’eau d’infiltration et limite l’érosion et donc la turbidité de l’eau.	43 CHF / ha / an
Maintien de 50m. entre chaque layon pour limiter au maximum le tassement du sol	Coupe au tracteur forestier, utilisation de l’abatteuse pas possible		La structure du sol a une influence importante sur sa capacité d’infiltration. Eviter les atteintes physiques au sol (tassement) garanti le maintien de sa fonction protectrice des eaux souterraines.	23 CHF / ha / an
Protéger les sols mouillés en reportant l’exploitation en cas d’humidité du sol excessive et par exploitation au câble-grue dans les frênaies et aulnaies	Câble-grue, report du débardage			13 CHF / ha / an
Prévenir la pollution par l’utilisation de bacs de rétention pour le remplissage des tronçonneuses	-	Zones S3 ou Sm ¹⁴ et zones sans statut de protection des eaux de la surface d’influence du captage	L’extension de cette mesure légalement exigée en zone S1, S2 et Sh permet de renforcer la protection des eaux souterraines sur l’ensemble de la surface d’influence du captage.	16 CHF / ha / an
Garantir une composition diversifiée des peuplements par le bannissement de plantation de monocultures de résineux et par la conversion des monoculture	Coupe prématurée de résineux pour la conversion des monocultures	L’ensemble des peuplements situés sur la surface d’influence du captage	Les résineux captent et filtrent plus efficacement les polluants atmosphériques que les feuillus. L’humus de ces peuplements contribue à acidifier le sol. À l’inverse, l’activité organique plus forte dans la litière des feuillus permet la diminution des pertes en nitrates vers les eaux souterraines. Une composition diversifiée et adaptée à la station a une influence positive sur la qualité des eaux souterraines.	85 CHF / ha / an
Renoncer à l’utilisation de produits phytosanitaires pour le traitement du bois sur toute la surface d’influence	Transport du bois à risque d’attaques par les pathogènes et stockage contrôlé de ce bois non traité sur place arrosée	Dans la surface d’influence du captage, en dehors des zones S1, S2 et Sh (surface actuellement soumise à autorisation)	L’extension de cette mesure légalement exigée en zone S1, S2 et Sh permet de renforcer la protection des eaux souterraines sur l’ensemble de la surface d’influence du captage. Mesure incitative, traitement soumis à autorisation actuellement (hors zones S1/S2/Sh)	2 CHF / ha / an

6.2 Calcul des surcoûts pour un captage

Le surcoût effectif des mesures sylvicoles énumérées au point 5.4 dépend de la situation de chaque captage. La méthodologie pour l'analyse de la situation d'un captage en particulier est détaillée dans la Figure 9.

Pour un captage dont on connaît le débit et le volume d'eau exploité, la surface d'influence est définie (voir point 5.1). La carte phytosociologique des forêts présentes sur cette surface d'influence permet de définir les milieux des forêts concernées (voir point 5.3). Le passage de la carte phytosociologique à une carte des milieux implique une perte d'informations mais permet d'obtenir à un coût abordable les exigences minimales et idéales en termes de taux de résineux notamment ainsi que les indices de fertilité¹⁷ des forêts concernées. En cas de besoin, il sera bien sûr possible de préciser certains milieux en les divisant selon la carte phytosociologique.

Les mesures sylvicoles choisies sont séparées selon les exigences légales pour chaque type de zone de protection des eaux. Cela assure de ne calculer que les coûts supplémentaires allant au-delà des exigences légales.

Pour les calculs effectués dans ce rapport, les mesures sylvicoles analysées sont celles qui sont énumérées au point 5.4. Parmi elles, l'absence de traitement avec des produits phytosanitaires et l'utilisation de bacs de rétention pour le ravitaillement des machines sont légalement exigées en zone S2. Toutes les autres mesures vont au-delà des bases légales sur l'ensemble de la surface d'influence du captage.

¹⁷ L'indice de fertilité représente le rendement d'un peuplement. Il est défini comme la hauteur maximale d'une essence à un âge de référence (hêtre 100 ans, épicéa 70 ans).

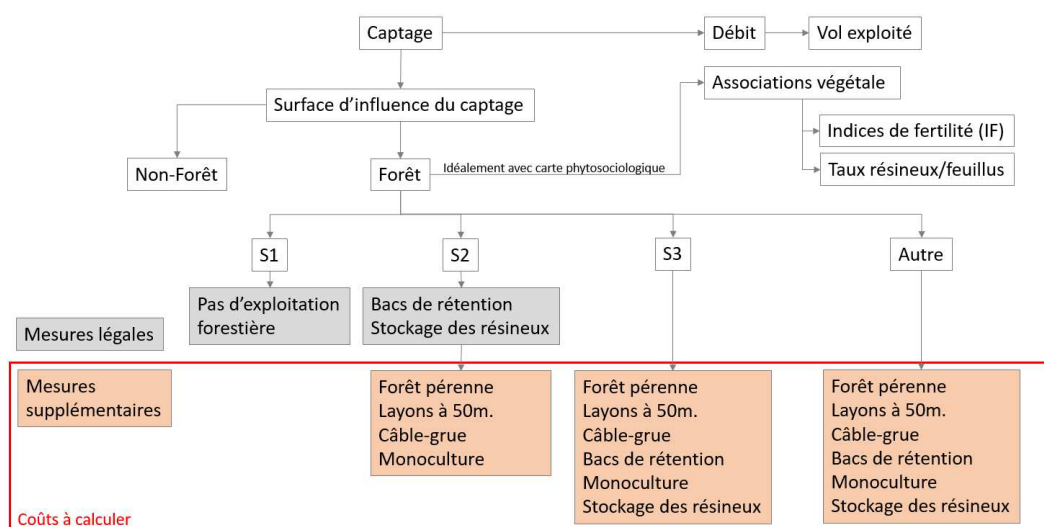


Figure 9¹⁸ - Schéma de la méthodologie pour calculer le coût des mesures sylvicoles appliquées à un captage donné

6.3 Exemple concret

Cette méthodologie de calcul des coûts a été appliquée à un captage dont les données sont en partie authentiques (production d'eau) et en partie estimées (surface d'influence). Il s'agit donc d'un exemple fictif mais vraisemblable.

Les données relatives à ce captage sont détaillées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 5 – Données de base du captage fictif

Surface d'influence du captage (ha)	
Surface totale	77
Surface couverte par la forêt	46
Surface forestière en zone S2	1.8
Surface forestière en zone S3	2.3
Surface forestière hors zone S	41.9

Production du captage	
Production (litres/minute)	300
Production (m ³ /an)	157'680

¹⁸ Sera adapté avec les zones Sh et Sm

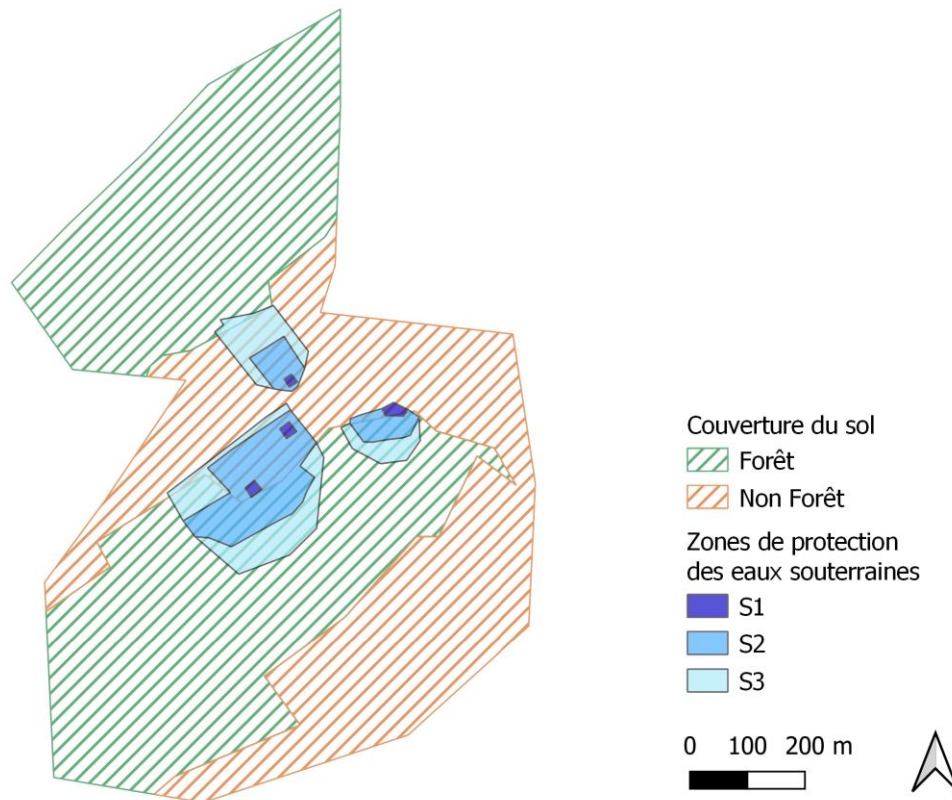


Figure 10 - Schéma d'un captage fictif avec mise en évidence de la surface d'influence et des zones de protection des eaux souterraines

6.3.1 Coûts des mesures sylvicoles

Le surcoût annuel impliqué par les mesures sylvicoles énumérées au point 5.4 appliquées dans le cas de ce captage fictif a été calculé de la manière suivante :

Surface forestière de la surface d'influence * (somme des surcoûts forêt pérenne + layons + câble-grue + monoculture) + surface forestière hors zone S1 et S2 de la surface d'influence * (surcoût stockage des résineux + bacs de rétention)

$$46 \cdot (43 + 23 + 13 + 85) + (2.3 + 41.9) \cdot (16 + 2) = 8'339.6 \text{ CHF}$$

Afin de donner une information « parlante » aux distributeurs et utilisateurs d'eau, et sans que cela soit un quelconque « forfait », puisque directement dérivé de mesures concrètes, ce surcoût est ensuite rapporté à la production du captage :

$$8'339.6 / 157'680 = 0.05 \text{ CHF} / \text{m}^3 / \text{an}$$

Dans le cas de ce captage fictif, dont la surface forestière petite à moyenne est faiblement occupée par la zone de protection des eaux souterraines, pour une production d'eau (m³) faible à moyenne à l'échelle du pays, la mise en place des mesures sylvicoles proposées sur l'ensemble de la zone d'influence implique un surcoût de 5 centimes par m³ d'eau produit chaque année.

6.4 Cas de figure généraux

Dans la réalité, la situation varie très fortement d'un captage à l'autre, tant au niveau de sa production que des caractéristiques du bassin d'alimentation qui l'alimente. Une analyse de ces différentes situations a été menée dans l'optique d'obtenir une vision « générale » des cas de figure possibles et afin de visualiser ceux où l'indemnisation est intéressante pour les acteurs impliqués.

Les classes choisies pour cette analyse s'appuient sur les chiffres de la SSIGE¹⁹ et sur les cas étudiés pour le développement de l'outil Trinkwasserschutz-Tool (WSL, 2012).

L'analyse a été faite en appliquant toutes les mesures sylvicoles calculées au point 6.1 sur l'ensemble de la zone forestière de la surface d'influence²⁰. Cette méthode permet de calculer le surcoût des mesures sylvicoles appliquées en plus d'une sylviculture classique. Seules les surfaces exploitées actuellement sous la forme de forêts jardinées ne rentrent pas tout à fait dans ces exemples-types.

Les résultats sont présentés dans les chapitres suivants selon la taille de la surface d'influence du captage. Il est important de noter que tous les cas représentés dans ces résultats ne sont pas forcément existants (par exemple une source très productive dont le bassin d'alimentation serait très petit). De manière générale, plus la production d'un captage est grande, plus l'indemnisation des mesures sylvicoles est intéressante (faible coût par m³ produit).

¹⁹ Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux, « Résultats statistiques des distributeurs d'eau en Suisse. Année de l'exercice 2019 »

²⁰ Pour le surcoût du stockage contrôlé des résineux et l'utilisation des bacs de rétention, le calcul porte sur la surface forestière hors zone de protection des eaux.

6.4.1 Petite surface d'influence

Avec une surface d'influence de 10 hectares, le surcoût des mesures sylvicoles va de moins de 1 centimes à 6 centimes / m³ d'eau environ. Ce sont les cas où l'indemnisation est la plus intéressante.

Tableau 6 – Surcoût des mesures sylvicoles pour un captage avec une petite surface d'influence

CARACTERISTIQUES DE LA SURFACE D'INFLUENCE DU CAPTAGE

Taille de la surface d'influence (ha)	10			
Couverture forestière	Importante (80%)		Peu importante (20%)	
Surface couverte par la forêt (ha)	8		2	
Zone de protection des eaux S1/S2	Importante (80%)	Peu importante (20%)	Importante (80%)	Peu importante (20%)
Surface forestière hors zone S1/S2 (ha)	1.60	6.40	0.40	1.60
Coûts des mesures sylvicoles proposées (CHF / ha / an)	1'341	1'427	335	357

PRIX PAR m3 D'EAU PRODUIT

Petite production (25'000 m ³ /an)	0.0536	0.0571	0.0134	0.0143
Production moyenne (250'000 m ³ /an)	0.0054	0.0057	0.0013	0.0014
Grande production (2'500'000 m ³ /an)	0.0005	0.0006	0.0001	0.0001

6.4.2 Surface d'influence moyenne

Pour un captage dont la surface d'influence est moyenne (100 hectares), le surcoût va de moins de 1 centime à 60 centimes / m³ d'eau, selon les caractéristiques de la surface et du captage. La production d'eau doit être moyenne à grande pour que l'indemnisation ne dépasse pas 6 centimes / m³ d'eau.

Tableau 7 - Surcoût des mesures sylvicoles pour un captage avec une surface d'influence moyenne

CARACTERISTIQUES DE LA SURFACE D'INFLUENCE DU CAPTAGE

Taille de la surface d'influence (ha)	100			
Couverture forestière	Importante (80%)		Peu importante (20%)	
Surface couverte par la forêt (ha)	80		20	
Zone de protection des eaux S1/S2	Importante (80%)	Peu importante (20%)	Importante (80%)	Peu importante (20%)
Surface forestière hors zone S1/S2 (ha)	16	64	4	16
Coûts des mesures sylvicoles proposées (CHF / ha / an)	13'408	14'272	3'352	3'568

PRIX PAR m3 D'EAU PRODUIT

Petite production (25'000 m ³ /an)	0.5363	0.5709	0.1341	0.1427
Production moyenne (250'000 m ³ /an)	0.0536	0.0571	0.0134	0.0143
Grande production (2'500'000 m ³ /an)	0.0054	0.0057	0.0013	0.0014

6.4.3 Grande surface d'influence

Avec une grande surface d'influence (1'000 hectares), la production d'eau doit être importante pour que l'indemnisation ne dépasse pas 6 centimes / m³ d'eau.

Tableau 8 - Surcoût des mesures sylvicoles pour un captage avec une grande surface d'influence

CARACTERISTIQUES DE LA SURFACE D'INFLUENCE DU CAPTAGE

Taille de la surface d'influence (ha)	1'000			
Couverture forestière	Importante (80%)		Peu importante (20%)	
Surface couverte par la forêt (ha)	800		200	
Zone de protection des eaux S1/S2	Importante (80%)	Peu importante (20%)	Importante (80%)	Peu importante (20%)
Surface forestière hors zone S1/S2 (ha)	160	640	40	160
Coûts des mesures sylvicoles proposées (CHF / ha / an)	134'080	142'720	33'520	35'680

PRIX PAR m3 D'EAU PRODUIT

Petite production (25'000 m ³ /an)	5.3632	5.7088	1.3408	1.4272
Production moyenne (250'000 m ³ /an)	0.5363	0.5709	0.1341	0.1427
Grande production (2'500'000 m ³ /an)	0.0536	0.0571	0.0134	0.0143

6.5 Redistribution du bénéfice total des indemnités

Par l'application des mesures définies, le sylviculteur participe activement à la protection de la qualité des eaux souterraines. L'indemnisation calculée au point 6.4 devra servir à compenser en partie les frais bruts et les pertes de rendement qui en découlent.

Il est difficile d'évaluer exactement cette perte, tout comme il est difficile de connaître l'avantage quantitatif de ces mesures sylvicoles sur la qualité de l'eau, du moins à court terme (à plus long terme, influence attendue sur les coûts de traitement). Une base concrète et chiffrable est donc utile, voire nécessaire, pour redistribuer l'indemnité perçue sur la production d'eau au sylviculteur à hauteur de sa participation.

Les profils d'exigences sylvicoles permettent de visualiser l'évolution d'une surface forestière par rapport à des exigences minimales et idéales. Un montant de base (0.01 CHF / m³ d'eau) est proposé pour l'engagement du sylviculteur dans la mise en place de mesures spécifiques à la qualité des eaux souterraines. Un forfait plus élevé correspond à un état des peuplements forestiers minimal (0.03 CHF / m³ d'eau) ou idéal (0.05 CHF / m³ d'eau) atteint. Une très bonne gestion sylvicole de longue date ou d'autres éléments particuliers peuvent également être récompensés sous forme de bonus.

Tableau 9 – Catégories proposées pour l'indemnisation des mesures sylvicoles

Indemnisation	CHF / m³ d'eau
Forfait de base	0.01
Exigence minimale atteinte	0.03
Exigence idéale atteinte	0.05
Bonus	Selon les cas

Dans la pratique, ces considérations doivent évidemment être discutées entre les acteurs concernées afin de prendre en compte les caractéristiques spécifiques et l'historique de la zone concernée.

7 Vers un modèle de partenariat

7.1 Définition de mesures durables

Le choix des mesures à mettre en place doit se faire en fonction de la situation initiale et la situation idéale analysée au point 5.2. Les partenaires peuvent choisir une ou plusieurs mesures supplémentaires. Le choix doit être fait d'un commun accord entre le gestionnaire forestier et l'exploitant d'eau.

Un partenariat peut porter sur d'autres mesures que celles qui ont été présentées et calculées dans le cadre de ce manuel. À titre d'exemple, la chambre des Bois de l'Ouest Vaudois (CBOVd) a créé un catalogue des mesures visant à garantir la protection des eaux souterraines en milieu forestier. Ce catalogue prend en compte la législation en vigueur et la situation sur le terrain. Chaque mesure est expliquée et argumentée (<https://cbovd.ch/index.php/je-filtre-accueil/boite-a-outils>).



Figure 11 - catalogue des mesures de la CBOVd

Le niveau de complexité des mesures établies dans le cadre d'un partenariat dépend particulièrement de la volonté des acteurs concernés. Sa relation avec d'autres milieux liés à la protection des eaux également. D'autres domaines dont l'activité entre en interaction

avec la qualité des eaux souterraines pourraient engager une collaboration du même type avec les producteurs d'eau potable sur le même modèle de partenariat.

La mise en place d'un partenariat entre les domaines de l'eau et de la forêt nécessite une concertation entre les acteurs impliqués, en particulier afin de refléter les spécifications du captage auquel il se réfère.

7.2 Monitoring

Les deux acteurs doivent pouvoir suivre ensemble et analyser les résultats des deux parties : qualité de l'eau, état du peuplement forestier et mesures prises. Deux suivis sont donc nécessaires : eau et forêt.

7.3 Mise en place d'un partenariat

Pour élaborer un partenariat qui reflète la situation de l'endroit concerné, il est nécessaire de connaître certaines données de base. Une partie de ces données sont essentielles, d'autres sont facultatives mais permettent d'affiner l'analyse.

Données essentielles :

- La taille de la surface d'influence du captage
- La surface forestière présente dans le bassin d'alimentation du captage
- Le débit annuel du captage
- Les zones de protections des eaux
- Les mesures sylvicoles supplémentaires

Données facultatives :

- Carte phytosociologique, ou à défaut carte des milieux naturels
- Monocultures de résineux présentes et dates de plantations
- Historique de la sylviculture pratiquée

7.4 Contrat de partenariat

Pour finaliser, il est convenable de réaliser un contrat entre les deux acteurs²¹. Les avantages, confirmés par les premières expériences, sont les suivants :

- Renforcer l'union entre les deux parties concernées
- Valoriser concrètement les prestations que la forêt fournit à la production d'eau potable
- Créer une relation durable
- Permettre une gestion en commun de l'évolution des contraintes et des attentes de chaque partie
- Etablir une communication positive auprès des utilisateurs de la forêt et des clients des distributeurs d'eau

Pour garantir la réussite du partenariat sur le long terme, le contrat doit clairement établir les attentes et les responsabilités des acteurs impliqués. Les informations suivantes sont importantes et peuvent être complétées selon la volonté des parties concernées :

- Mesures sylvicoles choisies
- Zones d'application des mesures sylvicoles avec définition claire de la surface concernée par chacune des mesures
- Suivi des mesures sylvicoles (périodicité, critères et méthode d'évaluation, etc.)
- Suivi de la qualité des eaux (périodicité, critères et méthode d'évaluation, etc.)
- Montant de l'indemnisation et conditions d'octroi

²¹ Exemple de contrat : <https://cbovd.ch/index.php/je-filtre-accueil/boite-a-outils>

8 Situation des partenariats en Suisse

Selon une étude réalisée en Suisse (GGCONSULTING, 2019), il n'existe que quelques cas de partenariats effectifs entre propriétaires forestiers et producteurs d'eau. Le sujet est traité de façon disparate dans le pays. La moitié des cantons ne compte aucun projet réalisé ou en cours à ce sujet. Pour les autres, la réflexion va de la production de recommandations jusqu'à la mise en place de collaboration effective entre les deux secteurs concernés.

L'étude n'a permis de lister que 9 partenariats en place actuellement sur le territoire helvétique. Ils sont définis par un contrat, une convention, ou issus d'une décision cantonale ou d'un plan de gestion. Ces accords sont parfois de très courte durée (un an renouvelable) ou très longue (100 ans) jusqu'à une durée indéterminée.

L'indemnisation est elle aussi très variable. Selon les cas, le distributeur d'eau prend en charge les coûts des travaux forestiers, indemnise la perte de rendement, paie un droit de superficie ou compense la prestation par un forfait à l'hectare. L'outil du WSL « Trinkwasserschutz-Tool » est utilisé plusieurs fois comme base de calcul pour définir le montant de l'indemnité. Les montants précis sont restés confidentiels mais oscillent fortement, entre 35 CHF/ha/an et 200 CHF/ha/an selon la zone concernée (S1/S2/S3) et le type de prestations fournies.

Selon une enquête de satisfaction effectuée dans le cadre de cette même étude, le bilan de ces partenariats est positif pour les deux secteurs concernés (GGCONSULTING, 2019). La mise en place d'un dialogue et d'une meilleure compréhension de la problématique sont particulièrement appréciées par les deux parties. La communication est néanmoins également vue comme une difficulté et un enjeu important, entre chacun des acteurs mais également auprès du grand public.

9 Conclusion

La forêt couvre plus de 30% de la superficie de la Suisse. Par l'absence quasi-complète de l'utilisation de polluants et par son activité de stockage dans la biomasse et de rétention de l'azote dans le sol, elle fournit une aide incontestable pour une distribution d'eau de haute qualité à la population suisse. Les eaux souterraines sous couvert forestier sont dans la grande majorité des cas de très bonne qualité. Cette fonction de protection de la qualité des eaux souterraines est en partie due à des bases légales contraignantes.

Toutefois, en pratiquant une sylviculture réfléchie et orientée, il est possible de renforcer cette vocation de protection afin de préserver la ressource en eau potable sur le long terme. Les différentes mesures qui peuvent être mises en place dans ce but entraînent des surcoûts à l'exploitation et une perte de rendement qui ne devraient idéalement pas être supportés uniquement par les exploitants forestiers. Une analyse de ces mesures a permis d'estimer ces coûts. En les rapportant à la production d'eau qui en dépend, on parvient à évaluer le surcoût des mesures sylvicoles et d'estimer les situations où l'effort consenti est économiquement viable.

La mise en place d'un partenariat volontaire entre les gestionnaires forestiers et les distributeurs d'eau assure le maintien dans le temps de ce service écosystémique forestier afin de préserver la ressource en eau. Un tel partenariat permet en outre de renforcer la collaboration entre le domaine forestier et le domaine de l'eau pour améliorer les connaissances transversales des acteurs impliqués et favoriser la synergie vers une protection optimale de la qualité des eaux souterraines à l'échelle du pays.

10 Références

- Bartsch N. (2000). Element release in beech (*Fagus sylvatica* L.) forest gaps. *Water, Air and Soil Pollution* 122, 3–16.
- Benecke P. (1993). Zur Aufforstung von Wassereinzugsgebieten, Wald in Wasserschutzgebieten. Ergebnisse aus einem Fachgespräch am 04. Juni 1992. Niedersächsisches Umweltministerium, Hannover, 48–58.
- Benecke P., Van der Ploeg R.R. (1978). Wald und Wasser I. Komponenten des Wasserhaushalts von Waldökosystemen. *Forstarchiv* 1, 49, 1–7.
- Besson A., Baume M., Jenni R. (2007). Aspects législatifs de la protection des eaux souterraines en forêt. Projet-pilote de partenariat entre la sylviculture proche de la nature et les distributeurs d'eau potable. Fribourg : Forum broyard de la forêt et du bois, Bureau Nouvelle Forêt sàrl.
- Bharati L., Lee K. H., Isenhardt T. M., Schultz R. C. (2002). Soil-water infiltration under crops, pasture, and established riparian buffer in Midwestern USA. *Agroforestry systems*, 56(3), 249-257.
- Blattert C.; Bürgi A., Lemm R. (2012). Berechnung von Mehraufwand und Minderertrag infolge des Trinkwasserschutzes im Wald. *Schweiz. Z. Forstwes.* 163(11), 437-444.
- Braun S., Tresch S., Augustin S. (2020) Soil solution in Swiss forest stands: A 20 year's time series. *PLoS ONE* 15(7).
- Breda N. (1999). L'indice foliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle fonctionnel. *Revue forestière française*, 51(2), 135-150.
- CSD Ingénieurs SA. (2020). Influence de la présence de la forêt sur les eaux souterraines en Suisse. Rapport de projet.
- Dissmeyer G. E. (2000). Drinking water from forests and grasslands: a synthesis of the scientific literature. *Gen. Tech. Rep.*, vol. 39. US Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station.
- Duchaufour P. (1997). *Abrégé de pédologie, sol, végétation, environnement*. 5ème édition. Ed. Masson.
- Einsele G., Köhler W., Plum H., Schraft A., Seiler K., Udluft P. (1990). *Stoffeintrag und Stoffaustrag in bewaldeten Einzugsgebieten*. DVWK Schriften. Hamburg und Berlin, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau eV (DVWK).
- EKL (2005). Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz. Status-Bericht der Eidg. Kommission für Luft-hygiene (EKL). Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL, Ed.), *Schriftenreihe Umwelt* Nr. 384, Bern, 168 S.

Fageria N. K. (2012). Role of Soil Organic Matter in Maintaining Sustainability of Cropping Systems. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 43 (16), 2063-2113.

FAO, IUFRO and USDA (2021). A guide to forest-water management. FAO Forestry Paper, 185. Rome.

GGCONSULTING Sàrl (2019). Partenariat pour l'eau forestière, rapport final.

Gobat J. M., Aragno M., Matthey W. (2010). *Le sol vivant : bases de pédologie, biologie des sols*. PPUR Presses polytechniques, 817 p.

Bligny C., Cholin E., Ferry O., Godi F., Jenni R., Mabboux J.-L., Moser U. (2012). Protection des eaux souterraines en forêt. Guide Alpeau dans l'arc alpin et jurassien. Guide réalisé dans le cadre du projet Interreg Alpeau.

Gundersen P. (1995). Nitrogen deposition and leaching in European forests – Preliminary results from a data compilation. *Water, Air and Soil Pollution* 85(3), 1179–1184.

Gundersen P., Schmidt I. K., Raulund-Rasmussen K. (2006). Leaching of nitrate from temperate forests effects of air pollution and forest management. *Environmental reviews*, 14(1), 1-57.

Hamilton L.S., Gilmour D.A. & Cassells D.S. (1997). Montane forests and forestry. In B. Messerli and J.D. Ives, eds. *Mountains of the world: a global priority*, 281–311. New York and Carnforth, UK, Parthenon Publishing Group.

Heidelbauer M. (2002). Wasserschutzwald zielgerecht bewirtschaften und entschädigen. *Österreichische Forstzeitung: Die Zeitschrift für Wald, Forstwirtschaft und Landschaft, Forsttechnik, Wildbach- und Lawinenverbauung, Jagdwirtschaft* 113(5), 12–13.

Keller H.M. (1971). Der Einfluss des Waldes auf den Kreislauf des Wassers. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 122(10), 453-466.

Kreutzer K. (1994). Folgerungen aus der Höglwaldforschung. *AFZ*, 14, 769-774.

Küchli C., Meylan B. (2002). La meilleure eau potable sort des forêts. *La Forêt*, 10(02), 15-18.

Langusch J. J., Matzner E. (2002). N fluxes in two nitrogen saturated forested catchments in Germany: dynamics and modelling with INCA. *Hydrology and Earth System Sciences*. 6(3), 383-394.

Lovett G. M., Weathers K. C., & Sobczak W. V. (2000). Nitrogen saturation and retention in forested watersheds of the Catskill Mountains, New York. *Ecological Applications*, 10(1), 73-84.

Lundborg A. (1997). Reducing the nitrogen load: whole-tree harvesting: A literature review. *Ambio*, 26(6), 387-393.

MacDonald J. A., Dise N. B., Matzner E., Armbruster M., Gundersen P., & Forsius M. (2002). Nitrogen input together with ecosystem nitrogen enrichment predict nitrate leaching from European forests. *Global Change Biology*, 8(10), 1028-1033.

Maître V., Jenni R. (2007). Etude bibliographique sur la relation forêt-eau souterraine. Fribourg: Bureau Nouvelle Forêt sarl.

Meesenburg H., Horváth B., Meiwes K. J. (2003). Stoffhaushalt von Waldökosystemen NW-Deutschlands unter hoher Stickstoffbelastung. In Boden- und Wasservorsorge. *Freibg. forstl. Forsch., Ber.*, 49, 57-69.

Mitscherlich G. (1981). *Wald, Wachstum und Umwelt. Eine Einführung in die ökologischen Grundlagen des Waldwachstums. Zweiter Band: Waldklima und Wasserhaushalt*. Frankfurt am Main: J.D. Sauerländer's Verlag, 402 p.

OFEV (éd.) (2004). Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne. *L'environnement pratique*, 141 p.

OFEV (éd.) (2020). Immissions excessives de dépôts azotés ou d'ammoniac. Évaluation sur la base des charges et niveaux critiques en relation avec l'élaboration des plans de mesures cantonaux. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne. *L'environnement pratique* n°2003, 23p.

OFEV (éd.) Bellini E. (2015). Sols et constructions. Etat de la technique et des pratiques. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne. *Connaissance de l'environnement* n° 1508, 113 p.

OFEV (éd.) Hartmann D., Meylan B., Jordi B. (2008). Gestion des eaux souterraines en Suisse. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne. *Connaissance de l'environnement* n°0806, 40p.

OFEV (éd.) Häusler S., Salm C. (2001). Construire en préservant les sols. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne. *Guide de l'environnement* n°10, 82 p.

OFEV (éd.) Kaufmann Geri, Staedeli Martin, Wasser Berchthold (2010). Exigences de base d'une sylviculture proche de la nature. Rapport de projet. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne.

OFEV (éd.) Reinhardt M., Güler A., Schürch M., Sinreich M., Zimmermann S., Kunz M. (2019). Etat et évolution des eaux souterraines en Suisse. Résultats de l'Observation nationale des eaux souterraines NAQUA, état 2016. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne. *Etat de l'environnement* n° 1901, 144 p.

OFEV WSL (éds.) (2005). Rapport forestier 2005. Faits et chiffres sur l'état de la forêt en Suisse. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne ; Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), Birmensdorf, 151p.

Pro Silva Helvetica (2010). Portrait de la forêt jardinée de l'Envers à Couvet / NE ; Harmonie durable entre utilités et beauté.

Rothe A., Mellert K. H. (2004). Effects of forest management on nitrate concentrations in seepage water of forests in southern Bavaria, Germany. *Water, Air, and Soil Pollution*, 156(1), 337-355.

Rothe A., Kölling C., Moritz K. (1998). Waldbewirtschaftung und Grundwasserschutz. *AFZ/Der Wald*, 6, 291-295.

Salihi OOA (1984). Potentielle Verdunstung eines Buchen- und eines Fichtenwaldes auf der Basis von Daten des deutschen Wetterdienstes als Parameter der aktuellen Evapotranspiration. Dissertation. Universität Göttingen.

Schleppi P., Curtaz F., Krause K. (2017). Nitrate leaching from a sub-alpine coniferous forest subjected to experimentally increased N deposition for 20 years, and effects of tree girdling and felling. *Biogeochemistry* 134(3), 319–335.

Schleppi P., Waldner P., Hegg C. (2003). Einfluss des Waldes auf Nitrat-Gehalte im Wasser. *Bündner Wald*, 56(4), 27-30.

Schütz K., Nagel P., Vetter W., Kandeler E., Ruess L., (2009). Flooding forested groundwater recharge areas modifies microbial communities from top soil to groundwater table. *FEMS Microbiology Ecology*, 67(1), 171–182.

Stähli M., Seibert J., Kirchner J. W., Von Freyberg J., Van Meerveld I., (2021). Hydrological trends and the evolution of catchment research in the Alptal valley, central Switzerland. *Hydrological Processes*, 35(4) e14113.

Thüler L. (2014). Estimation et cartographie de la vulnérabilité des aquifères en milieu forestier. Doctoral dissertation, Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie, Université de Neuchâtel.

Von Wilpert K., Zirlewagen D. (2003). Indikatoren der N-Sättigung und des N-Austrags an BZE-Standorten im Schwarzwald. In Boden- und Wasservorsorge. *Freibg. forstl. Forsch., Ber.* 49, 125–135.

Waldner P., Braun S., Kurz D., Thimonier A., (2016). Nährstoffflüsse im Wald mit Fokus auf Stickstoff und basische Kationen. In Pluess A.R., Augustin S., Brang P., Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, & Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf (Eds.), *Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien*, 61-73. Haupt.

Weis W., (2002). Beeinflusst der Standort den Nitrataustrag? *LWF aktuell, Magazin für Wald, Wissenschaft und Praxis* 34(11), 21–24.

Wenger W. (2002). Bedeutung des Waldes für die Trinkwassergewinnung. *LWF aktuell Magazin für Wald Wissenschaft und Praxis*, 34(11), 3-8.

WSL (éd) Bachofen H., Zingg A. (2009). Est-il possible de transformer des peuplements d'épicéas uniformes en forêts jardinées de montagne stables ? Institut de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), Birmensdorf. Adapté de Bachofen, H., Zingg, A. (2005): Auf dem Weg zum Gebirgspflanzwald: Kurzzeiteffekte von Durchforstungen auf die Struktur subalpiner Fichtenwälder. *Schweiz. Z. Forstwes.* 156(12), 456-466.

WSL (éd) Hegg C., Jeisy M., Waldner P., Hartmann D., Dousse M. (2006). La forêt et l'eau potable : Une étude bibliographique. Institut fédéral de recherche sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), Birmensdorf, 60 p.

WSL (éd) Hunziker Kempf B. (2016). S'exercer à la forêt permanente. Institut de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), Birmensdorf. Adapté de Hunziker Kempf B. (2015). Dauernd Dauerwald üben. *Wald Holz* 96(2), 27-30.

WSL (éd) Lüscher P., Frutig F., Sciacca S., Spjevak S., Thees O. (2018). Protection physique des sols en forêt ; protection des sols lors de l'utilisation d'engins forestiers. Institut fédéral de recherches (WSL). *Notice pour le praticien n°45*, 3^e édition révisée.

Wuepper D., Le Clech S., Zilberman D., Mueller N., Finger R., (2020). Countries influence the trade-off between crop yields and nitrogen pollution. *Nature Food*, 1(11), 713-719.

Zhao H., Yang W., Wu F., Tan B. (2017). Mixed forest plantations can efficiently filter rainfall deposits of sulfur and chlorine in Western China. *Sci. Rep.* 7, 41680.

Zwahlen F. (2012). Présentation au Colloque final du projet Interreg Alpeau.
http://www.alpeau.org/images/pdf/120329_seminaire_final/3_IAO_EVIAN_ZWAHLEN.pdf

Liste des annexes

Annexe 1 : Législation liée à la protection des eaux et des forêts

Annexe 2 : Qualité des eaux souterraines en forêt

Annexe 3 : Schémas des processus impliqués entre les domaines de l'eau et de la forêt

Annexe 4 : Influence de la forêt sur d'autres polluants que l'azote

Annexe 5 : Equivalences entre les milieux naturels (Delarze) et les stations forestières (NaiS)

Annexe 6 : Coûts des mesures sylvicoles – détails des calculs

Annexe 1 : Législation liée à la protection des eaux et des forêts

1.1 Bases légales

Forêts

- Loi fédérale sur les forêts (LFo) du 4 octobre 1991
- Ordonnance fédérale sur les forêts (OFo) du 30 novembre 1992

Eaux

- Loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux) du 24 janvier 1991
- Ordonnance fédérale sur la protection des eaux (OEaux) du 28 octobre 1998

Sols

- Ordonnance fédérale sur les atteintes portées aux sols (OSol) du 1er juillet 1998.

Nature

- Loi fédérale sur la protection de la nature et du paysage (LPN) du 1^{er} juillet 1966
- Ordonnance fédérale sur la protection de la nature et du paysage (OPN) du 16 janvier 1991
- Loi fédérale sur la protection de l'environnement (LPE) du 7 octobre 1983

Produits chimiques

- Loi fédérale sur la protection contre les substances et les préparations dangereuses (LChim) du 15 décembre 2000
- Ordonnance fédérale sur la réduction des risques liés à l'utilisation de substances, de préparations et d'objets particulièrement dangereux (ORRChim) du 18 mai 2005.
- Ordonnance fédérale concernant la mise sur le marché et l'utilisation des produits biocides (OPBio) du 18 mai 2005.
- Ordonnance fédérale sur la mise en circulation des produits phytosanitaires (OPPh) du 12 mai 2010
- Ordonnance fédérale sur la protection contre les substances et les préparations dangereuses (OChim) du 5 juin 2015

Sites contaminés

- Ordonnance fédérale sur l'assainissement des sites pollués (OSites) du 26 août 1998.

Aménagement du territoire

- Loi fédérale sur l'aménagement du territoire (LAT) du 22 juin 1979
- Ordonnance fédérale sur l'aménagement du territoire (OAT) du 28 juin 2000

1.2 Secteurs particulièrement menacés

L'OEaux définit les secteurs particulièrement menacés (art. 29). Seuls les secteurs les plus importants pour ce manuel sont détaillés ci-dessous :

- Secteur A_u : Eaux souterraines exploitables et zones attenantes nécessaires à leur protection.
- Aire d'alimentation Z_u : Zone où se reforment, à l'étiage, environ 90% des eaux du sous-sol pouvant être prélevées au maximum par un captage (selon les cas, Z_u peut couvrir tout le bassin d'alimentation du captage)
- Zones de protection des eaux souterraines : Les zones de protection des eaux souterraines visent à protéger les captages et les eaux souterraines juste avant leur utilisation comme eau potable. Elles sont délimitées autour des ouvrages d'intérêt public, soit autour des captages, dont l'eau doit respecter les exigences de la législation sur les denrées alimentaires, et des installations d'alimentation artificielle des eaux souterraines. Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre les différentes zones en fonction du type d'aquifère.
- Périmètres de protection des eaux souterraines : Protection des eaux souterraines, en vue d'une exploitation ou alimentation artificielle future.

1.3 Zones de protection des eaux souterraines

Dans les aquifères en roche meuble et les aquifères karstiques ou fissurés faiblement hétérogènes :

- Zone S1 : Zone de captage et terrains environnants. Minimum de 10 m autour des captages. Doit être clôturée si la protection du captage n'est pas suffisamment garantie.
- Zone S2 : Zone de protection délimitée de telle sorte que la durée d'écoulement des eaux souterraines (entre la limite extérieure de cette zone et le captage) soit de 10 jours. La dimension doit être de minimum 100 m.
- Zone S3 : Zone de protection délimitée de telle sorte qu'en cas de danger imminent, on dispose du temps et de l'espace nécessaire pour prendre les mesures qui s'imposent. La distance entre la limite extérieure de la zone S2 et la limite extérieure de la zone S3 doit en règle générale être aussi grande que la distance entre la zone S1 et la limite extérieure de la zone S2.

Dans les aquifères karstiques ou fissurés fortement hétérogènes :

Dans de tels aquifères, en plus des zones S1 et S2, des zones S_h et S_m sont délimitées en fonction de la vulnérabilité¹.

- Zone S1 : Zone de captage et terrains environnants. Minimum de 10 m autour des captages. Doit être clôturée si la protection du captage n'est pas suffisamment garantie.
- Zone S2 : La dimension doit être de minimum 100 m.
- Zone S_h : Zone où la vulnérabilité de l'aquifère est élevée.
- Zone S_m : Zone où la vulnérabilité de l'aquifère est moyenne.

1.4 Protection des eaux souterraines en forêt

Des exigences légales en matière de protection des eaux souterraines concernant directement ou indirectement les activités en forêt sont exposées ci-dessous. Ces exigences proviennent de la Loi sur la protection des eaux (LEaux) et de son ordonnance (OEaux).

Tableau 1 - Mesures et restrictions principales pour la protection des eaux souterraines

(Tableau adapté de Besson et al, 2007)

Partout	Principes de base : Chacun doit s'employer à empêcher toute atteinte nuisible aux eaux en y mettant la diligence qu'exigent les circonstances. (LEaux) Interdiction de polluer (LEaux) La qualité des eaux doit présenter des caractéristiques proches de l'état naturel et ne pas contenir de substances persistantes ou pouvant polluer les eaux. (OEaux)
Secteur A_u	Sont interdits : • les installations présentant un danger particulier pour les eaux ; • les installations situées au-dessous du niveau moyen de la nappe souterraine Sont soumises à condition : • les constructions et installations soumises à une autorisation cantonale ; • l'exploitation de matériaux (graviers, sable ou autres matériaux) soumises à des prescriptions particulières
Secteur A_o	Sont interdits : • Les installations présentant un danger particulier pour les eaux

¹ La vulnérabilité est déterminée en fonction de la nature des couches protectrices (sol et couches de couverture) et du milieu karstique ou fissuré, ainsi que des conditions d'infiltration.

Aires d'alimentation Z_u et Z_o	Lors d'une pollution des eaux liées à l'exploitation des sols dans ces aires d'alimentation (produits phytosanitaires et engrais entraînés par ruissellement ou lessivage), les cantons prennent les mesures nécessaires, notamment : • Restriction de l'utilisation de produits phytosanitaires et d'engrais ; • Utilisation exclusive de moyens auxiliaires techniques, procédés, équipements et méthodes d'exploitation particulièrement adaptés. Emploi restreint de produit phytosanitaire dans l'aire d'alimentation Z_u si « la présence de ce produit est constatée dans un captage d'eau potable et que la qualité des eaux souterraines en exploitation ou dont l'exploitation est prévue s'avère à plusieurs reprises ne pas satisfaire aux exigences »
--	---

Zones et périmètre de protection des eaux souterraines

S1	
Sont uniquement autorisés :	
- les travaux et les activités servant à l'approvisionnement en eau;	
S2	
Sont notamment interdits :	
- la construction d'ouvrages et d'installations; - les travaux d'excavation altérant des couches protectrices (sol et couches de couverture); - les autres activités qui constituent une menace pour l'utilisation de l'eau potable. A cela s'ajoutent les exigences de la zone S3 respectivement S_h	
S3	S_h
Sont notamment interdits :	Sont notamment interdits :
	- les installations et les activités qui constituent une menace pour l'utilisation de l'eau potable. A cela s'ajoutent les exigences de la zone S_m
- l'extraction de matériaux; - les décharges; - les constructions diminuant le volume d'emménagement ou la section d'écoulement de l'aquifère; - la réduction préjudiciable des couches protectrices (sol et couches de couverture).	S_m
	Sont notamment interdits :
	- les ouvrages de construction qui altèrent l'hydrodynamique des eaux du sous-sol; - la réduction préjudiciable des couches protectrices (sol et couches de couverture).

Périmètres de protection des eaux souterraines
Les travaux de construction et les autres activités exécutés dans les périmètres de protection des eaux souterraines doivent satisfaire aux exigences de la zone S2. Sont interdits les travaux de construction et les autres activités de la zone S2 et S3 respectivement S2 et S_h/S_m.

1.5 Produits phytosanitaires et engrais

L'utilisation de produits phytosanitaires et d'engrais est régie par les annexes 2.5 et 2.6 de l'ORRChim.

Produits phytosanitaire	Il est interdit d'employer des produits phytosanitaires en forêt et sur une bande de 3 m de large le long de la zone boisée. Exceptions : L'interdiction ne s'applique pas au traitement plante par plante des plantes posant des problèmes, s'il est impossible de combattre celles-ci efficacement par d'autres mesures telles que la fauche régulière dans les pâturages boisés ou dans la bande de 3 m de large le long de la zone boisée. Lorsque, en forêt, les produits phytosanitaires ne peuvent pas être remplacés par des mesures polluant moins l'environnement, l'autorité cantonale compétente peut délivrer, une autorisation permettant l'usage de produits phytosanitaires: a. pour le traitement du bois pouvant entraîner des dégâts aux forêts à la suite de catastrophes naturelles, ainsi que contre les agents pathogènes pouvant causer ces dégâts, si la conservation de la forêt l'exige; b. pour le traitement du bois coupé avec des insecticides qui, en vertu de l'ordonnance sur les produits phytosanitaires, sont homologués pour la culture nommée «grumes en forêt et sur les places de stockage», dans des sites appropriés et pour autant que ce bois ne puisse pas être évacué à temps, que ces sites ne se trouvent pas dans des zones S1, S2 et S_h de protection des eaux souterraines, et que des mesures efficaces soient prises pour empêcher l'infiltration et l'entraînement par ruissellement des produits; c. dans les pépinières forestières situées en dehors des zones S1, S2, S3 et S_h de protection des eaux souterraines; d. pour remédier aux dégâts causés par le gibier dans des rajeunissements naturels, ainsi que dans des afforestations ou des reboisements, si la conservation de la forêt l'exige.
Engrais	Il est interdit d'épandre des engrais en forêt et sur une bande de 3 m de large le long de la zone boisée. Des exceptions sont possibles en dehors des zones de protection des eaux souterraines (voir chiffre 3.3.2 ORRChim)

1.6 Exigences légales liées à l'exploitation forestière

L'exploitation forestière et les pratiques sylvicoles sont régies par différentes bases légales (LFo, OFo, OSol).

Protection de la forêt	Les défrichements sont interdits. Une autorisation peut être accordée à titre exceptionnel. Dans ce cas, le défrichement doit être compensé en nature dans la même région, avec des essences adaptées à la station (LFo).
------------------------	---

	Les exploitations qui ne constituent pas un défrichement au sens de l'art. 4, mais qui compromettent ou perturbent les fonctions ou la gestion de la forêt sont interdites LFo). Les coupes rases et toutes les formes d'exploitation dont les effets peuvent être assimilés à ceux des coupes rases sont inadmissibles (LFo).
Protection des sols	L'exploitation forestière doit, en tenant compte des caractéristiques physiques du sol et de son état d'humidité, choisir et utiliser des véhicules, des machines et des outils de manière à prévenir les compactations et les autres modifications de la structure des sols qui pourraient menacer la fertilité du sol à long terme. (OSols)

Annexe 2 : Qualité des eaux souterraines en forêt

L'Observation nationale des eaux souterraines NAQUA (OFEV, 2021) étudie les eaux souterraines de Suisse, de manière qualitative et quantitative. Il met en évidence les sources de pollution des eaux souterraines et l'apport des surfaces forestières pour la préservation de la qualité des eaux souterraines.

Cette annexe détaille certains résultats du rapport de 2019.

Tableau 1 - Liste des substances/paramètres sélectionnés et des exigences de qualité pour les eaux du sous-sol utilisées comme eau potable ou destinées à l'être (Annexe 2 de l'OEaux)

N°	Paramètres	Exigences
1	Carbone organique dissous (COD)	2 mg/l C
2	Ammonium (Somme de $N-NH_4^+$ et $N-NH_3$)	Dans des conditions oxydantes: 0,08 mg/l N (correspond à 0,1 mg/l ammonium) Dans des conditions anoxiques: 0,4 mg/l N (correspond à 0,5 mg/l ammonium)
3	Nitrate ($N-NO_3^-$)	5,6 mg/l N (correspond à 25 mg/l nitrate)
4	Sulfate (SO_4^{2-})	40 mg/l SO_4^{2-}
5	Chlorure (Cl^-)	40 mg/l Cl^-
6	Hydrocarbures aliphatiques	0,001 mg/l pour chaque substance
7	Hydrocarbures aromatiques monocycliques	0,001 mg/l pour chaque substance
8	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	0,1 µg/l pour chaque substance
9	Hydrocarbures halogénés volatils (HHV)	0,001 mg/l pour chaque substance
10	Composés organiques halogénés adsorbables (AOX)	0,01 mg/l X
11	Pesticides organiques (produits biocides et produits phytosanitaires)	0,1 µg/l pour chaque substance. Sont réservées les autres exigences fixées sur la base de l'appréciation des différentes substances dans le cadre de la procédure d'autorisation.

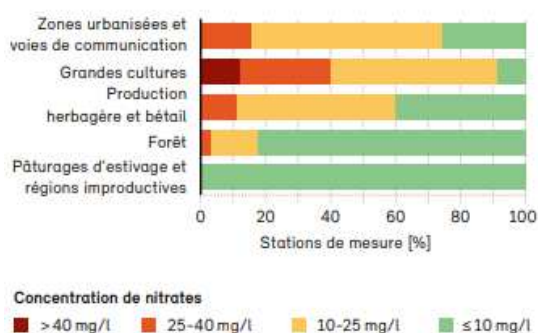
2.1 Nitrate

Le rapport NAQUA (OFEV, 2021) démontre que les surfaces agricoles induisent la présence de nitrate en concentration nettement supérieure aux autres utilisations du sol, notamment la forêt, les pâturages d'estivage et les régions non productives généralement isolées se trouvant en altitude (Figure 1a).

Le principal facteur qui détermine la concentration de nitrate dans les eaux souterraines est l'excédent de nitrate ou d'azote dans le sol. Ces concentrations sont sensiblement accrues dans les bassins d'alimentation dans lesquels une exploitation agricole intensive est réalisée et des engrais azotés organiques ou minéraux sont épandus en quantités supérieures à la capacité d'absorption des cultures.

Dans les bassins d'alimentation boisés, la concentration de nitrate est généralement de 5 à 10 mg/l – principalement en raison de l'absence d'activités agricoles (« protection passive »). Seules quelques stations catégorisées « Forêt » dépassent les 25 mg/l, valeur limite fixée par l'OEaux (Figure 1b). Cela peut s'expliquer par la présence de surfaces agricoles non majoritaires dans ces bassins d'alimentation.

a)



b)

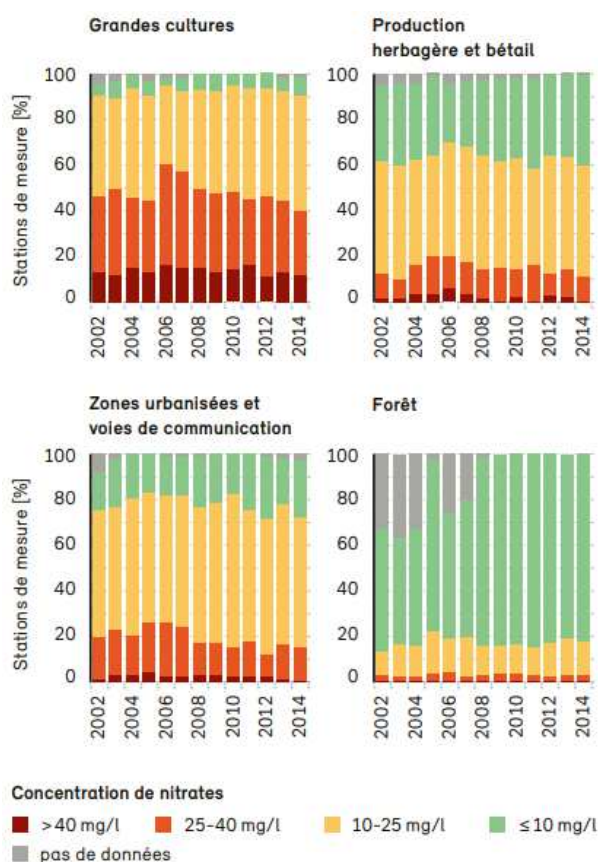


Figure 1 - (a) Nitrate dans les eaux souterraines (2014) par rapport à l'utilisation principale du sol et (b) Nitrate dans les eaux souterraines (2002 à 2014) par rapport à l'utilisation principale du sol (Source : OFEV 2019)

2.2 Résidus phytosanitaires

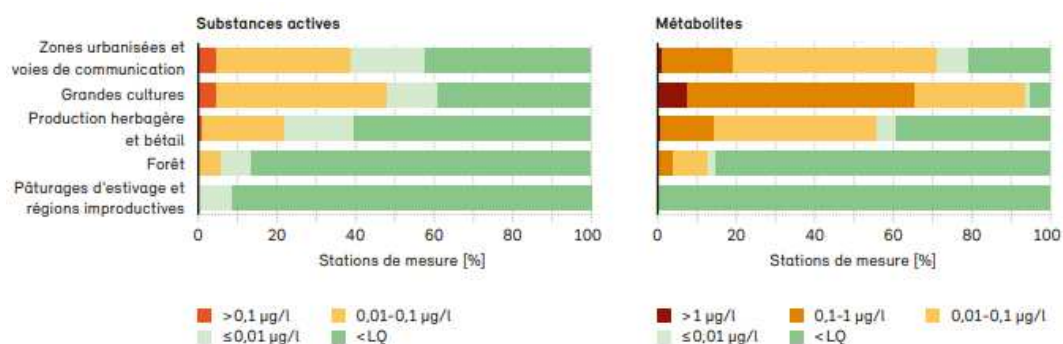


Figure 2 - Substances actives et métabolites de produits phytosanitaires dans les eaux souterraines (2014) par rapport à l'utilisation principale du sol (OFEV 2019)

2.3 Hydrocarbures

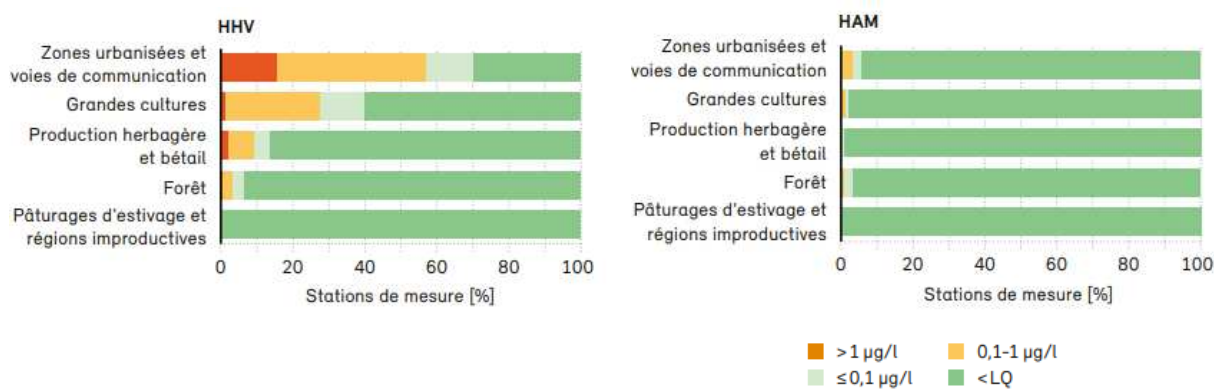
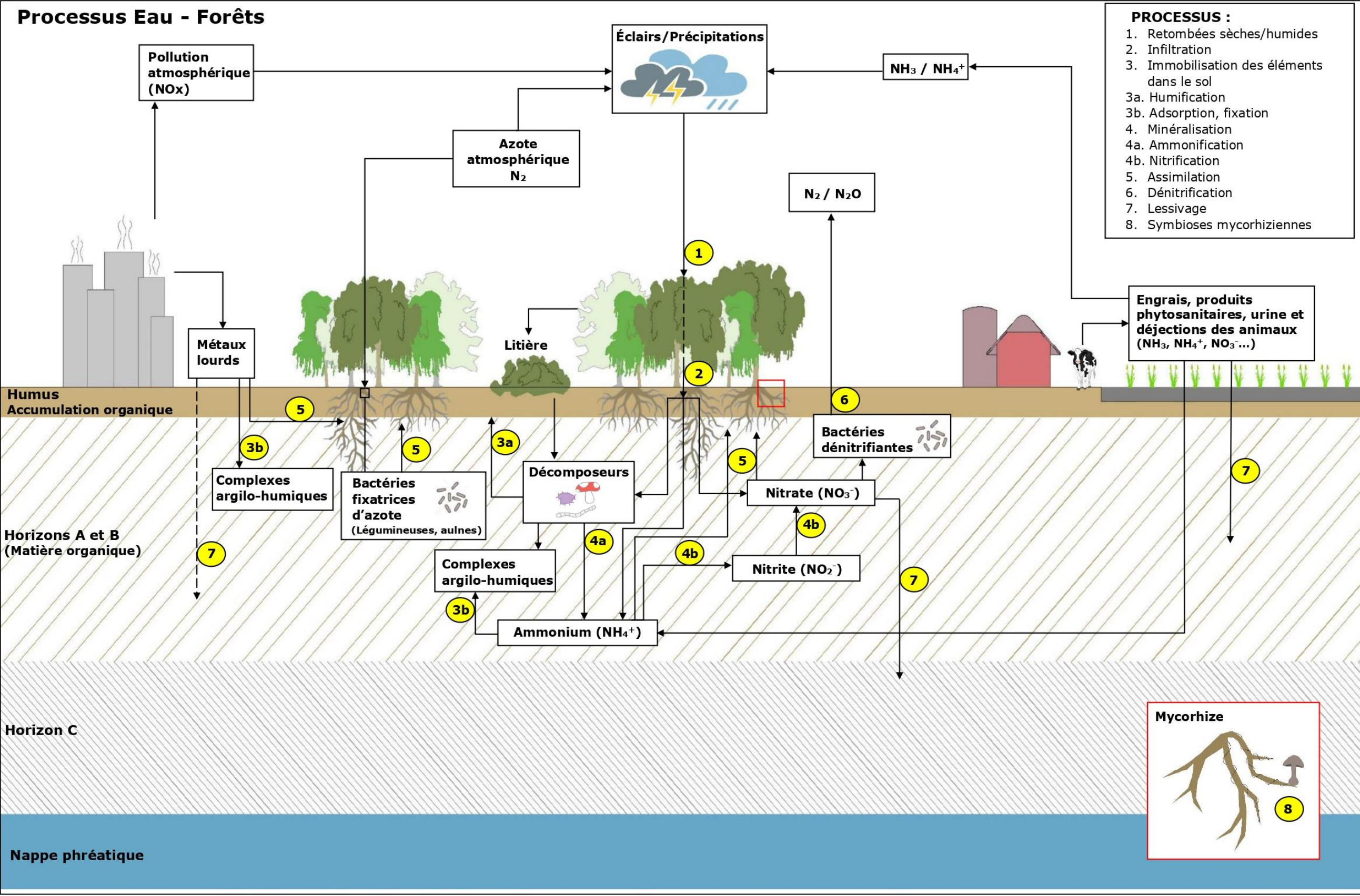


Figure 3 - Hydrocarbures halogénés volatils (HHV) et hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM) dans les eaux souterraines (2014) par rapport à l'utilisation principale du sol (OFEV 2019)

Annexe 3 : Schémas des processus impliqués entre les domaines de l'eau et de la forêt



Les processus écologiques de la relation Eau-Forêts qui influencent la filtration réalisée par des écosystèmes forestiers (protection active de l'eau souterraine)

1. Retombées sèches/humides

- Interception de l'humidité et de polluants atmosphériques → résineux > feuillus [22]
- Les arbres peuvent assimiler des polluants par les stomates [15]. L'absorption par les stomates est très dépendante des composés chimiques et de leurs concentrations : en particulier pour l'ammoniac qui provient majoritairement de l'élevage et l'agriculture.
- Interception des précipitations → diminution de la quantité d'eau qui arrive au sol [14]
- Couvert végétal fermé → évite des concentrations élevées de nitrate dans la nappe phréatique [1]
→ limite l'érosion et donc la turbidité de l'eau [10]

2. Infiltration

- La forêt et ses sols favorisent l'infiltration de l'eau, comparée aux autres couvertures végétales. [12]
- L'infiltration sous feuillus est plus importante que sous résineux. [12]
- L'infiltration dans les jeunes peuplements est plus importante que dans une futaie mature. [12]

3. Immobilisation des éléments dans le sol

3a. Humification

- Certains composés contaminants sont intégrés et stabilisés dans l'humus (et les xénobiotiques peuvent être ensuite minéralisés). [21]
- N dans l'humus : le sol minéral peut emmagasiner plus d'azote sous forme stable par rapport à la quantité d'humus. → feuillus > résineux [22]

3b. Adsorption, fixation

- Les complexes argilo-humiques peuvent adsorber des molécules organiques contaminantes et des métaux lourds dans les sols, ce qui réduit la toxicité pour les plantes et les transferts vers la nappe phréatique [7]. Ces immobilisations sont potentiellement réversibles en fonction de l'évolution du système.

4. Décomposition/minéralisation de matière organique

- L'activité biologique est intense dans les litières forestières peu acides des peuplements de feuillus et plus faible dans celle plus acide des peuplements de résineux. [4]
- Forêts proches de l'état naturel → Sol biologiquement très actif [2] [6] [22]

4a. Ammonification

- L'ammonification est le processus dominant, voir exclusif dans les cas les plus défavorables, c'est-à-dire les milieux acides et mal aérés. → résineux > feuillus [3]

4b. Nitrification

- La nitrification est plus lente à un pH plus bas. → feuillus > résineux [20]

5. Assimilation

- Un système racinaire plus profond permet une meilleure utilisation des nitrates contenus dans les eaux de percolation avant qu'elles ne rechargent les eaux souterraines. → feuillus > résineux [17]
- Les arbres assimilent des nutriments et des métaux lourds (pour les métaux lourds, en fonction des métaux et des essences). [9]

6. Dénitrification

- La dénitrification dépend de l'humidité du sol. → plus forte quand le sol est gorgé d'eau. [11]
- Les taux de dénitrification sont plus faibles dans les sols acides. [5]

7. Lessivage

- Lessivage de nitrate réduite par l'écosystème forestier : corrélation entre l'intensité d'exploitation forestière (coupes rases p.ex.) et la concentration de nitrate dans l'eau d'infiltration → La migration augmente après l'exploitation [19] pour diminuer à nouveau avec le retour de la végétation [18]. La décomposition des tas de bois et des résidus végétaux (rapport C/N élevé) contribue en outre à immobiliser de l'azote minéral, et ainsi à limiter les lessivages de nitrate.
- Le sol acide relâche plus de nitrates dans la nappe phréatique. → résineux > feuillus [18]
- Issus de source naturelle ou anthropogène, les oligo-éléments, dont les métaux lourds, réagissent de manière très diverse. Ils n'apparaissent qu'en petite quantité, non problématique, dans les nappes phréatiques suisses. [16]

8. Symbioses mycorhiziennes

- Les champignons reçoivent des composés carbonés de la plante hôte. [8]
- La plante bénéficie de l'association par une absorption accrue de nutriments (principalement du phosphore et de l'azote), une meilleure tolérance au stress abiotique et une résistance aux parasites. [8]
- Les mycorhizes accumulent des éléments et protègent la plante contre les pathogènes ainsi que le sol contre les éléments toxiques et les métaux lourds. [13]

CONCLUSION

Les bassins versants couverts de forêts ont une influence directe et reconnue sur la qualité de l'eau des eaux souterraines puis de l'eau potable qui en est tirée. Comme celle de certains autres milieux naturels ou exploités de manière extensive (prairies extensives, pâturages d'estivage), l'eau souterraine issue des milieux forestiers présente des concentrations en contaminants systématiquement plus basses que celle provenant des autres utilisations des sols. Ces propriétés protectrices sont très clairement mises en évidence par l'étude de l'OFEV 2019 présentant les résultats d'analyses des eaux souterraines du réseau NAQUA [16]. De nombreuses villes, en Suisse et à travers le monde (Evian, New York), ont d'ailleurs, souvent depuis longtemps, décidé de protéger le couvert forestier des bassins versants d'où ils tirent leur eau potable. La gestion des forêts est en effet réalisée sans apport d'intrants ni, quasiment, d'utilisation de produits chimiques. L'effet de l'absence de polluants est déterminant, il est parfois appelé l'effet de protection *passive* de la forêt.

Il existe en outre un effet de protection active, largement reconnu sur le plan international, qui est beaucoup plus complexe à généraliser du point de vue scientifique. Les peuplements et sols forestiers sont très diversifiés en Suisse. Tous deux sont avant tout dépendants des conditions de stations (de l'écologie des sites). En outre, les peuplements sont influencés par leur gestion passée (structure, composition), par les sols et par ce qu'ils reçoivent de ces mêmes peuplements (matière en décomposition) et, de manière ponctuelle, par des influences anthropiques (compaction notamment).

Il est donc très difficile de s'aventurer à donner des généralités. On peut cependant tirer du schéma et des explications qui précèdent que, par comparaison avec d'autres usages des sols, les peuplements et sols forestiers ont une **capacité élevée à retenir et parfois éliminer des substances nocives issues de la pollution atmosphérique**. Ce rôle est important en vue du captage des eaux souterraines pour l'approvisionnement en eau potable dont l'aire d'alimentation est essentiellement recouverte par la forêt...

On sait toutefois aussi que, par leurs canopées, les forêts retiennent des substances nocives de l'atmosphère même sans précipitations. La FAO met notamment en garde contre cet effet pour les forêts qui se trouvent dans les zones de nuages ou brouillards persistants. Les arbres peuvent également absorber les substances toxiques par les stomates (effet mesuré dans des villes polluées p.ex.) mais, même s'il est positif pour l'atmosphère, cet effet se limite à quelques pourcents selon les polluants. La foresterie proche de la nature vise des peuplements adaptés à leurs stations. Les essences résineuses occupent naturellement certaines stations, notamment en altitude. Sur d'autres stations cependant, il est connu que leur litière est moins bénéfique pour le développement du sol (acidification, réduction de l'activité biologique) que celle des feuillus.

Par rapport à leurs effets sur la filtration de l'eau, les atouts de l'écosystème forestier sont en particulier liés à la bonne structure, l'activité biologique et la quantité de matière organique des sols ainsi qu'à un effet de rétention ou d'assimilation, dans un volume racinaire important, de certaines substances par les racines des arbres. Sur le plan des nappes phréatiques, l'impact qualitatif majeur est lié aux nitrates. De nombreuses études ont été menées sur la bonne capacité de rétention des nitrates par les écosystèmes forestiers, ainsi que par la réversibilité qui peut être provoquée par des coupes rases (libération de nitrates). Un couvert du sol et donc une assimilation aussi constante que possible sont cruciaux pour garantir une rétention optimale.

Par ses caractéristiques de gestion et ses propriétés de filtration et de purification, la forêt peut fournir une aide incontestable pour une distribution d'eau de haute qualité à la population suisse. En pratiquant une gestion précautionneuse pour les sols et une sylviculture adaptée à cet objectif, il est possible de renforcer cette vocation de protection afin de préserver à moindre coût la ressource en eau potable sur le long terme. La gestion sylvicole visera un couvert continu dans l'espace et dans le temps, une structure hétérogène mesurée et un mélange adapté à la station et aux changements climatiques pour assurer cette prestation de manière régulière et durable. Un faible taux de résineux et une sylviculture fine aboutiront à une meilleure filtration et purification de l'eau que dans un peuplement de résineux purs comportant de grandes trouées. Il s'agit néanmoins d'une généralité qui ne peut s'appliquer à tous les peuplements sans distinction. Une forêt d'altitude est naturellement plus riche en résineux qu'une forêt de plaine, de même qu'une forêt sur sol très sec est plus ouverte qu'une forêt sur sol humide. Par conséquence, il est essentiel de connaître pour chaque type de milieu forestier le taux de mélange et le degré de fermeture naturels. Tenant compte des diverses caractéristiques des milieux écologiques suisses, un guide est en cours de réalisation en vue de soutenir le partenariat entre le gestionnaire forestier et le producteur d'eau



Fontaine en forêt (©CFPF)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Bartsch, N. (2000). Element release in Beech (*Fagus sylvatica* L.) forest gaps. *Water, Air and Soil Pollution* 122(1-2), 3-16.
- [2] Benecke, P. (1993). Zur Aufforstung von Wassereinzugsgebieten, Wald in Wasserschutzgebieten. Ergebnisse aus einem Fachgespräch am 04.Juni 1992. Niedersächsisches Umweltministerium, Hannover, pp.48–58
- [3] Deletraz G. (2002). Géographie des risques environnementaux liés aux transports routiers en montagne. Incidences des émissions d'oxydes d'azote en vallées d'Aspe et de Bariatou (Pyrénées). Doctoral dissertation, Géographie, Université de Pau et des Pays de l'Adour.
- [4] Duchaufour P. (1997). *Abrégé de pédologie, sol, végétation, environnement*. 5ème édition. Ed. Masson.
- [5] Eaton L., Patriquin D. (1989). Denitrification in lowbush blueberry soils. *Canadian Journal of Soil Science* 69(2), 303-312.
- [6] Einsele G., Köhler W., Plum H., Schraft A., Seiler K., Udluft P. (1990). *Stoffeintrag und Stoffaustrag in bewaldeten Einzugsgebieten. Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau*. DVWK Schriften. Hamburg und Berlin, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau eV (DVWK)
- [7] Fageria N. K. (2012). Role of Soil Organic Matter in Maintaining Sustainability of Cropping Systems. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 43(16), 2063-2113.
- [8] García-Garrido J. M., Ocampo J. A. (2002). Regulation of the plant defense response in arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Journal of experimental Botany* 53(373), 1377-1386.
- [9] Godt J. (1986). Untersuchung von Prozessen im Kronenraum von Waldökosystemen und deren Berücksichtigung bei der Erfassung von Schadstoffeinträgen : unter besonderer Beachtung von Schwermetallen. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme der Universität Göttingen* 19. 265p.
- [10] Guide Alpeau dans l'arc alpin et jurassien (2012). Protection des eaux souterraines en forêt.
- [11] Hénault C. (1993). Quantification de la dénitrification dans les sols à l'échelle de la parcelle cultivée, à l'aide d'un modèle prévisionnel. Doctoral dissertation, Chimie, École nationale supérieure agronomique (Montpellier).
- [12] Maître V., Jenni R. (2007). Etude bibliographique sur la relation forêt-eau souterraine. Fribourg : Bureau Nouvelle Forêt sàrl.
- [13] Miransari M. (2010). Contribution of arbuscular mycorrhizal symbiosis to plant growth under different types of soil stress. *Plant Biology* 12(4), 563-569.
- [14] Navar J. (2020). Modeling rainfall interception loss components of forests. *Journal of Hydrology* 584, 124449.
- [15] Nowak D. J., Crane D. E., Stevens J. C. (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry and Urban Greening* 4 (3-4), 115-123.
- [16] OFEV (éd) Reinhardt M., Güler A., Schürch M., Sinreich M., Zimmermann S., Kunz M. (2019). Etat et évolution des eaux souterraines en Suisse. Résultats de l'Observation nationale des eaux souterraines NAQUA, état 2016. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne. *Etat de l'environnement* n°1901, 144 p.
- [17] Rothe A., Kölling C., Moritz K. (1998). Waldbewirtschaftung und Grundwasserschutz. Der aktuelle Kenntnisstand *AFZ/Der Wald*, 53(6), 291-295.
- [18] Rothe A., Mellert K. H. (2004). Effects of forest management on nitrate concentrations in seepage water of forests in southern Bavaria, Germany. *Water, Air, and Soil Pollution* 156(1), 337-355.
- [19] Schleppi P., Curtaz F., Krause K. (2017). Nitrate leaching from a sub-alpine coniferous forest subjected to experimentally increased N deposition for 20 years, and effects of tree girdling and felling. *Biogeochemistry* 134(3), 319–335.
- [20] Ste-Marie C., Paré D. (1999). Soil, pH and N availability effects on net nitrification in the forest floors of a range of boreal forest stands. *Soil Biology and Biochemistry* 31(11), 1579-1589.
- [21] Weber J. (2020). Humic Substances and their Role in the Environment. *EC Agriculture* (2020): 03-08.
- [22] WSL (éd) Hegg C., Jeisy M., Waldner P., Hartmann D., Dousse, M. (2006). La forêt et l'eau potable : Une étude bibliographique. Institut fédéral de recherche sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), Birmensdorf. 60p.

Annexe 4 : Influence de la forêt sur d'autres polluants que l'azote

La gestion forestière peut avoir une influence positive sur les taux de nitrate des eaux souterraines, et sur les autres risques ?

Les interactions entre les écosystèmes, dont la forêt, et le cycle de l'azote ont fait l'objet de recherches relativement nombreuses et représente l'élément central considéré dans ce guide. Les dépositions actuelles d'azote déséquilibrent le cycle des nutriments et représentent dorénavant un problème de pollution (Wuepper et al. 2020), influençant entre autres les écosystèmes naturels et la qualité des eaux souterraines (OFEV 2019). A propos de l'effet des écosystèmes forestiers, plusieurs résultats sont confirmés sur le plan scientifique : ils filtrent en partie l'azote, cependant la durabilité de la rétention de nitrate dépend des peuplements, de leur gestion, de leurs sols et de bien sûr de l'évolution des apports (Waldner et al. 2015). L'influence des essences en présence, en particulier la distinction entre résineux et feuillus, est significative (IAP 2018), de même que l'intensité des interventions d'exploitation (surface et répétitions) (Schleppi et al. 2017). L'acidification des sols se poursuit et leurs potentiels d'immobilisation peut arriver à saturation.

Malgré tout, de nombreuses questions restent ouvertes et les recherches se poursuivent, surtout au niveau des processus biogéochimiques et de leur dynamique temporelle, moins sur le plan de la variabilité spatiale et des relations directes entre forêts et eaux souterraines. En Suisse, ce sont surtout l'IAP et le WSL qui sont impliqués, notamment à travers d'importants séries d'observations (Braun et al. 2020) et de suivis de terrain (Stähli et al. 2020).

Et que sait-on d'autre sur les relations forêts-eau ? Dès 1912 à Bâle, la capacité de filtration des forêts a été utilisée de manière indifférenciée dans le cadre du projet « Lange Erlen » : l'eau du Rhin est pompée pour ensuite être filtrée par les sols forestiers avant de recharger la nappe phréatique (Schütz et al 2009). Il y a une dizaine d'années, un projet Interreg France et Suisse « Alpeau » a plus récemment spécifiquement été mené sur la relation entre gestion forestière et qualité des eaux suite à des problèmes de turbidité directement liés aux tempêtes et exploitations forestières observés en France voisine. Les milieux, notamment forestiers aux USA, en Allemagne et en Suisse, poursuivent des recherches pour améliorer leur gestion en faveur de la qualité de l'eau. Les interactions entre les écosystèmes forestiers et d'autres sources de pollution que l'azote sont étudiées de manière plus disparate et de nombreux résultats sont restés très contextuels, parfois dans des rapports non publiés. Au-delà de la qualité des eaux souterraines, elles sont aussi menées en fonction de la relation entre forêts et qualité de l'air et des sols, notamment par rapport à la présence de métaux lourds.

La FAO vient de publier un guide combinant les effets physiques et chimiques de la gestion forêt-eau (FAO 2021). Des dynamiques de restauration et plantations, notamment en Chine, sont en cours et amènent également de nouvelles informations sur des effets positifs concernant d'autres polluants (Zhao et al. 2017 pour le chlore et le soufre).

A l'image de ce qui est recherché ici à travers des partenariats locaux, une meilleure collaboration entre chercheurs, disciplines et secteurs permettrait d'appréhender de manière plus systémique, suivant les cycles biologiques, les effets des écosystèmes sur d'autres pollutions, au niveau des feuilles (stomates), en fonction des espèces (p.ex. le rôle des *Alnus spp*), des sols (surface, matière organique) et enfin des eaux de surface, des eaux du sol et enfin des eaux souterraines.

Annexe 5 : Equivalences entre les milieux naturels (Delarze) et les stations forestières (NaiS)

Ce tableau compile les données concernant les milieux naturels et les stations forestières. Les colonnes en bleu contiennent les données issues de cette analyse. Il a été décidé de catégoriser les pourcentages de résineux par tranche de 20 et les catégories de fermeture des peuplements en deux classes.

	Delarze		NaiS		Répartition géographique		Représentation des résineux				Structure du peuplement	
Milieu forestier	Milieu	Code	Stations	Code	Etage de végétation (NaiS)	Région CH (NaiS)	exigence minimale (NaiS)	exigence idéale (NaiS)	% résineux maximum	% résineux idéal	Fermeture naturelle (NaiS)	Catégorie de fermeture
Aulnaies	Aulnaie noire	6.1.1	Aunaie marécageuse à Laiche	44	submontagnard et montagnard inférieur		ND	ND	0-20	0	ND	2
			Forêts mixtes sur substrat humide et aulnaies à osmonde	33-27	collinéen	sud des Alpes	20	0			entrouvert à clairié	
	Aulnaie alluviale	6.1.3	Aulnaie à Érable	27*	haut-montagnard et subalpin		20	10	0-20	0	espacé à clairié	2
			Frênaie à Merisier à grappes	30	submontagnard et montagnard inférieur		ND	ND			ND	
Aulnaies d'altitude	Aulnaie verte	5.3.9	Forêt de Sorbiers à Aune vert	21*	haut-montagnard et subalpin		30	30	20-40	20-40	ND	1
Frênaies	Frênaie humide	6.1.4	Frênaie à Érable	26	submontagnard et montagnard inférieur		10	0	0-20	0-20	normal à dense	1
			Frênaie à Érable avec Adénostyle	26h	montagnard supérieur		30	20			entrouvert à normal	
			Frênaie à Laiche avec Adénostyle	27h	montagnard supérieur		20	10			entrouvert à espacé	
			Frênaie à Orme avec Prêle des bois	29h	montagnard supérieur		ND	ND			ND	
			Frênaie à Laiche avec Prêle géante	27	submontagnard et montagnard inférieur		10	0			normal à dense	
			Frênaie à Orme sur limon engorgée	29	submontagnard et montagnard inférieur		ND	ND			ND	
			Châtaigneraie acidophiles à fougères	33AV-33A	collinéen	sud des Alpes	0	0			normal	
			Châtaigneraie mésophile à fougères et forêts mixtes sur sol riche	25Am-33m	collinéen	sud des Alpes	20	0			normal	
			Châtaigneraies mésophiles à fougères et forêts mixtes sur substrat neutre à basique	25AB-33B	collinéen	sud des Alpes	20	0			normal	
Hêtraies mésophiles et thermophiles	Hêtraie xérophile	6.2.1	Hêtraie à Dentaire avec Laiche blanche	12e	montagnard inférieur		40	20	20-40	0-20	normal à entrouvert	1
			Hêtraie à Dentaire avec Laiche glauque	12w	montagnard inférieur		40	20			normal à entrouvert	
			Hêtraie mésophile insubrienne sur calcaire	12*	montagnard inférieur		10	10			normal à ouvert	
			Hêtraie xérophile insubrienne sur calcaire	14*	montagnard inférieur		10	10			normal à ouvert	
			Hêtraie à Séslerie	16	montagnard inférieur		ND	ND			ND	
			Hêtraie à Pulmonaire avec Mélitte	10a	submontagnard		30	10			normal à ouvert	
			Hêtraie à Pulmonaire avec Mélitte var. à Laiche glauque	10w	submontagnard		30	10			normal à ouvert	
			Hêtraie à Pulmonaire à Laiche typique	14	submontagnard		30	10			ND	
			Hêtraie à Pulmonaire à Laiche avec Laiche des montagnes	15	submontagnard		30	10			ND	
			Hêtraie à IF / Hêtraie de pente à Calamagrostide	17	submontagnard		30	10			normal à entrouvert	
	Hêtraie mésophile de basse altitude	6.2.3	Hêtraie à Aspérule typique	7a	submontagnard		30	0	20-40	0	normal à dense	1
			Hêtraie à Aspérule avec Epiaire des forêts	7S	submontagnard		20	0			normal à dense	
			Hêtraie à Pulmonaire typique	9a	submontagnard		30	0			normal à dense	
			Hêtraie à Pulmonaire avec Laiche glauque	9w	submontagnard		30	0			normal à dense	
			Hêtraie à Gouet	11	submontagnard		20	0			normal à dense	
	Hêtraie mésophile de l'étage montagnard inférieur	6.2.4	Hêtraie à Millet typique	8a	montagnard inférieur		40	20	20-40	0-20	normal à dense	1
			Hêtraie à Millet avec Épiaire des forêts	8S	montagnard inférieur		20	10			normal	
			Hêtraie à Millet avec Blechnum en épi	8*	montagnard inférieur		60	50			normal	
			Hêtraie à Dentaire typique	12a	montagnard inférieur		40	20			normal à dense	
			Hêtraie à Dentaire avec Épiaire des forêts	12s	montagnard inférieur		20	10			normal à dense	
			Hêtraie à Tilleul typique	13a	montagnard inférieur		20	0			normal à dense	
			Hêtraie à tilleul avec laiche blanche	13e	montagnard inférieur		10	10			normal à ouvert	
Hêtraies acidophile	Hêtraie acidophile	6.2.2	Hêtraie à Luzule blanc-de-neige typique	3	montagnard inférieur		40	40	40-60	40-60	normal à entrouvert	1
			Hêtraie à Luzule blanc-de-neige riche en fougères	4	montagnard inférieur		60	60			normal à entrouvert	
			Hêtraie à Luzule blanc-de-neige typique	1	submontagnard		ND	ND			ND	
			Hêtraie oligotrophe à houx	3VL	collinéen	sud des Alpes	20	10			normal à entrouvert	
			Hêtraie mésophile à houx	3mL-4L	collinéen	sud des Alpes	20	10			normal à entrouvert	
Hêtraie à Sapins	Hêtraie à sapins de l'étage montagnard	6.2.5	Hêtraie à Érable	21	haut-montagnard et subalpin		50	20	50-70	50	entrouvert à espacé ¹	1
			Hêtraie à Sapin typique	18	montagnard supérieur		60	50			normal à entrouvert	
			Hêtraie à Sapin avec Adénostyle glabre	18M	montagnard supérieur		60	50			normal à entrouvert	
			Hêtraie à Sapin avec Laiche blanche	18*	montagnard supérieur		60	40			entrouvert à espacé	
			Hêtraie à Sapin avec Calamagrostide bigarrée	18w	montagnard supérieur		70	50			entrouvert à clairié	
			Hêtraie à Sapin avec Calamagrostide bigarrée et Laiche ferrugineuse	18v	montagnard supérieur		70	50			entrouvert à clairié	
			Hêtraie à Sapin avec Luzule des forêts	19	montagnard supérieur		60	50			normal à entrouvert	
			Hêtraie à Luzule des forêts typique, var. d'altitude	1h	montagnard supérieur		60	50			normal à entrouvert	
			Hêtraie à Sapin avec Luzule des forêts, var. sur pseudogley	19f	montagnard supérieur		90	80			normal à entrouvert	
			Hêtraie à Sapin avec Hordélyme d'Europe	20E	montagnard supérieur		90	80			normal à entrouvert	
			Hêtraie à Sapin avec hautes herbes	20	montagnard supérieur		60	50			normal à entrouvert	
			Hêtraie avec Érable, Sapin et hautes herbes	20*	montagnard supérieur		70	50			normal à entrouvert	
			Hêtraie à Sapin avec Aubours	19L	montagnard supérieur		80	60			normal à entrouvert	
			Hêtraie insubrienne sur calcaire, variante d'altitude	12*h	montagnard supérieur		50	30			normal à clairié	
			Hêtraie à Adénostyle typique	13h	montagnard supérieur		50	30			normal à dense	
			Hêtraie à Adénostyle avec Séslerie	13eh	montagnard supérieur		50	30			normal à ouvert	

Erablaies et tillaies	Erablaie de ravin méso-hygrophile	6.3.1	Forêts de ravin, var. acide	25AF	collinéen	sud des Alpes	20	0	0-20	0	normal à entrouvert	2
			Érablaie à Langue-de-Cerf typique	22			10	0			normal à entrouvert	
			Erablaie à Corydale	22C			ND	ND			ND	
			Erablaie à alisier	23			ND	ND			espacé à clairié	
			Érablaie à Orme	24*			10	0			entrouvert à clairié	
	Tillaie thermophile sur éboulis ou lapiez	6.3.2	Tillaie à Frêne sur roche	25e	collinéen	Alpes externes du Nord et intermédiaires	ND	ND	0-20	0	ND	2
			Forêt d'alisiers à Noisetier	23*			ND	ND			ND	
			Tillaie à Érable	25*			10	0			entrouvert à espacé	
			Tillaie insubrienne à Aspérule de Turin	25B			0	0			entrouvert à espacé	
			Tillaie à Aspérule de Turin	25			10	0			normal à entrouvert	
Chênaies à charmes	Chênaie à charmes	6.3.3	Chênaie à châtaignier avec tilleul et merisier sur substrat acide	25A-34mA	collinéen	sud des Alpes	0	0	0-20	0	normal	1
			Chênaie à châtaignier avec tilleul sur substrat neutre à basique	34B	collinéen	sud des Alpes	20	0			normal	
			Charmaie à Gaillet des bois	35	collinéen	Alpes externes du Nord et intermédiaires	ND	ND			ND	
			Chênaie à Gouet	35A	collinéen	Alpes externes du Nord et intermédiaires	ND	ND			ND	
			Charmaie à Scille	35S	collinéen	sud des Alpes	ND	ND			ND	
Chênaie buissonnante et ostryaie	Chênaie buissonnante	6.3.4	Chênaie à Arabette tourette	38	collinéen	Alpes externes du Nord et intermédiaires	ND	ND	0	0	entrouvert	2
			Chênaie à Saponaire	38S	collinéen	Alpes externes du Nord et intermédiaires	ND	ND			ND	
			Chênaie à Aspérule pourpre	38*	collinéen	sud des Alpes	ND	ND			ND	
			Chênaie à Coronille en couronne	39	collinéen	Alpes externes du Nord et intermédiaires	ND	ND			ND	
			Chênaie à Nerprun des Alpes	39*	collinéen	Alpes externes du Nord et intermédiaires	ND	ND			ND	
			Chênaie à Germandrée	40*	collinéen	Alpes externes du Nord et intermédiaires	ND	ND			ND	
			Chênaie à châtaignier sur roche	42R	collinéen	sud des Alpes	ND	ND			entrouvert à clairié	
			Chênaie à châtaignier oligotrophe	42C/Q	collinéen	sud des Alpes	20	10			normal à clairié	
			Chênaie à châtaignier avec myrtille	42V	collinéen	sud des Alpes	20	30			normal à entrouvert	
	Ostryaie buissonnante du sud des Alpes	6.3.5	Forêt mixte à charme-houblon et charme	36	collinéen	sud des Alpes	0	0	0	0	variable	2
			Forêt mixte à charme-houblon et orme	37	collinéen	sud des Alpes	0	0			variable	
Chênaie acidophile	Chênaie acidophile	6.3.6	Chênaie à Gesse noire	41	collinéen	Alpes externes du Nord et intermédiaires	ND	ND	0-20	0-20	ND	2
			Chênaie à Luzule	41*	collinéen	Alpes externes du Nord et intermédiaires	ND	ND			ND	
			Chênaie à châtaignier avec myrtille	42V	collinéen	sud des Alpes	20	30			normal à entrouvert	
			Chênaie à châtaignier oligotrophe de transition	(42)-34A	collinéen	sud des Alpes	20	10			normal	
Forêts de robiniers	Forêt secondaire de robiniers	6.3.9	Forêts de robinier sur substrat acide	ROB	collinéen	sud des Alpes	0	0	0	0	normal	1
Pinèdes	Pinède subatlantique des pentes marneuses	6.4.1	Pineraie à molinie	61			ND	ND	80-100	80-100	entrouvert à clairié	2
			Pineraie à Orchidées	62			95	90			entrouvert	
	Pinède subcontinentale basophile	6.4.2	Pineraie à Bruyère	65			95	90	80-100	80-100	entrouvert à clairié	2
	Pinède continentale xérophile	6.4.3	Pineraie à Bugrane	65*			95	90	80-100	80-100	entrouvert à clairié	2
	Pinède mésophile sur silice	6.4.4	Pineraie à Callune	68			95	90	80-100	80-100	entrouvert à clairié	2
			Pineraie à Airelle	68*			95	90			entrouvert à clairié	
Bétulaie sur tourbe	Bétulaie sur tourbe	6.5.1	Forêt marécageuse à Bouleau pubescent	45			ND	ND	40-60	40-60	ND	1(2)
Pinède sur tourbe	Pinède sur tourbe	6.5.2	Pineraie de montagne à sphaignes	71			ND	ND	80-100	80-100	entrouvert à clairié	2
Pessière sur tourbe	Pessière sur tourbe	6.5.3	Pessière à sphaigne typique	56			ND	ND	80-100	100	espacé à clairié	2

Pessières	Pessière-sapinière	6.6.1	Pessière à Calamagrostide bigarrée	60*	subalpin		100	90	80-100	80-100	entrouvert à espacé	1 -> 2 (alt)
			Pessière à Polygale petit buis	53	subalpin		100	90			espacé à clairié	
			Sapinière à Mélèze avec Rhododendron	47*	subalpin		90	90			clairié	
			Pessière-Sapinière à Myrtille typique	46	haut-montagnard		100	90			normal à entrouvert	
			Pessière-Sapinière à Myrtille, var. sur podzol	46M	haut-montagnard		100	95			normal à entrouvert	
			Pessière-Sapinière à Myrtille avec Sphaignes	46*	haut-montagnard		100	90			entrouvert	
			Pessière-Sapinière à Calamagrostide velue typique	47	haut-montagnard		100	95			normal à entrouvert	
			Pessière-Sapinière à Calamagrostide velue riche en fougères	47D	haut-montagnard		100	95			normal à entrouvert	
			Pessière-Sapinière à Calamagrostide velue avec Mélampyre	47M	haut-montagnard		100	90			normal à entrouvert	
			Pessière-Sapinière à Prêle typique	49	haut-montagnard		100	100			espacé à clairié ²	
			Pessière-Sapinière à Prêle avec Laiche ferrugineuse	49*	haut-montagnard		100	100			espacé à clairié ²	
			Pessière-Sapinière à Adénostyle typique	50	haut-montagnard		100	100			normal à entrouvert	
			Pessière-Sapinière à Pétasite	50P	haut-montagnard		100	90			normal à clairié	
			Pessière-Sapinière à Gaillard typique	51	haut-montagnard		100	90			normal à entrouvert	
			Pessière-Sapinière à Gaillard avec noisetier	51C	haut-montagnard		90	80			normal à entrouvert	
			Pessière-Sapinière à Adénostyle glabre	50*	haut-montagnard		100	90			normal à entrouvert	
			Pessière-Sapinière à Laiche blanche	52	haut-montagnard		100	90			normal à entrouvert	
			Pessière-Sapinière à Bazzania	46t	montagnard inférieur		ND	ND			ND	
			Pessière-Sapinière à Asplénium sur gros blocs	48			100	90			entrouvert à espacé	
	Pessière	6.6.2	Pessière à Homogyne typique	57V	subalpin		100	95	80-100	80-100	espacé	1 -> 2 (alt)
			Pessière à Homogyne avec Calamagrostide velue	57C	subalpin		100	95			entrouvert à espacé	
			Pessière à Homogyne avec Sphaignes	57S	subalpin		100	95			espacé à clairié	
			Pessière à Homogyne avec Mélampyre	57M	subalpin		100	100			très fermé	
			Pessière à Airelle typique	58	subalpin		100	100			entrouvert à espacé	
			Pessière à Airelle avec Calamagrostide velue	58C	subalpin		100	100			entrouvert à espacé	
			Pessière à Airelle avec Laser	58L	subalpin		100	100			espacé à clairié	
			Pessière à hautes herbes typique	60	subalpin		100	95			espacé	
			Pessière à hautes herbes avec Athyrium alpestre	60A	subalpin		100	95			entrouvert à espacé	
			Pessière à hautes herbes avec Prêle	60E	subalpin		100	95			clairié ³	
			Pessière à Bruyère	53*	haut-montagnard		100	95			entrouvert à espacé	
			Pessière à Mélisque	54	haut-montagnard		100	100			normal à entrouvert ⁴	
			Pessière à Véronique	55	haut-montagnard		100	100			normal à entrouvert ⁴	
			Pessière à Luzule blanc-de-neige	55*	haut-montagnard		100	95			entrouvert	
			Pessière à Hypne cyprès	47H			100	95			normal à entrouvert	
			Pessière à Homogyne typique, var. à gros blocs	57Bl			100	95			entrouvert à clairié	
Mélézins, arolières et pinèdes de montagne	Forêt de mélèzes et d'aroles	6.6.3	Arolière à Rhododendron	59	subalpin supérieur		100	100	80-100	80-100	entrouvert à espacé	2
			Arolière à Myrtille	59V	subalpin supérieur		100	100			entrouvert à espacé	
			Arolière à Laser	59L	subalpin supérieur		100	100			espacé	
			Arolière à bruyère	59E	subalpin supérieur		ND	ND			fortement clairié	
			Arolière à cotonéaster	59C	subalpin supérieur		ND	ND			espacé à clairié	
			Arolière des Alpes du Nord	72	subalpin supérieur		ND	ND			espacé à clairié	
	Mélèzein	6.6.4	Mélézin à Genévrier	59J	subalpin supérieur		100	95	80-100	80-100	espacé	2
			Mélézin à adénostyle	59A	subalpin supérieur		ND	ND			espacé à clairié	
			Mélézin à Rhododendron	59*	subalpin supérieur		90	90			entrouvert à clairié	
	Pinède de montagne	6.6.5	Pineraie de montagne à bruyère	67			ND	ND	80-100	80-100	entrouvert à clairié	2
			Pineraie de montagne à rhododendron	69			ND	ND			entrouvert à clairié	
			Pineraie de montagne à rhododendron ferrugineux	70			ND	ND			entrouvert à clairié	

¹ Bcp de peuplements plus riches en résineux et plus dense qu'ils ne le seraient naturellement en raison de la pâture et des défrichements effectués autrefois

² le degré de fermeture dépend des proéminence acides du relief

³ Pessière avec végétation d'aulnaies vertes (5.3.9)

⁴ forêts anciennement parcourues par le bétail : clairiérées et aspect herbeux

Annexe 6 : Coûts des mesures sylvicoles – détails des calculs

6.1. Situation de base

Le calcul est fait pour une coupe semi-mécanisée sur 70% de la surface et entièrement mécanisée sur 30% de la surface, avec des layons espacés de 20 mètres.

Semi-mécanisée : Bucheronnage manuel + tracteur forestier sur 70% de la surface de coupe

Entièrement mécanisée : Récolteuse + porteur sur 30% de la surface de coupe

Bucheronnage :

 Bûcheronnage manuel

Lieu de travail / coupe de bois:

Entrées

Objet de travail Système de travail Facteurs

Bois martelé

Quantité de bois (m ³ n.éc.)	100	(89.2 m ³ éc.)
DHP moyen (cm n.éc.)	30	
Pourcentage de résineux (sans pin, %)	40	
Pourcentage de pin (%)	0	
Pourcentage de feuillus (%)	60	
Région	Terrain plat ou vallonné	

Entrées

Objet de travail Système de travail Facteurs

Tarif

			Part du temps d'utilisation (%)	Pourcentage des frais du personnel (%)
Salarié 1	66 Fr./h		100	35
Salarié 2	60 Fr./h		100	32
Salarié 3	60 Fr./h		100	32
Salarié 4	0 Fr./h		0	0
Tronçonneuse	15 Fr./PMH15			

Déplacements et pauses payées

Temps de travail par jour (min.)

dont déplacements et pauses payées

Autres

	Fr.	h.
Déplacements	0	0
Autres coûts	0	0

Résultat

	Volume de travail (h)		Coûts (Fr.)	
			par m ³ éc.	total
Durée du travail	12.82	WPSH		
Personnel	38.47	WPPH	26.74	2'384.90
Tronçonneuse	17.10	PMH15	2.87	256.44
Déplacement	0.00	WPPH	0.00	0.00
Autres travaux	0.00	WPPH	0.00	0.00
Total			 29.61 	 2'641.34

Productivité de l'équipe (m³ n.éc. / WPSH) (6.96 m³ éc. / WPSH)

Tracteur forestier (débardage) :

Tracteur forestier

Lieu de travail / coupe de bois:

Entrées

Objet de travail Système de travail Facteurs

Bois martelé

Quantité de bois (m³ n.éc.) (89 m³ éc.)

Volume moyen de la bille (m³ n.éc.)

Distance moyenne de débardage

Suppléments et décomptes sur la productivité

Distance de treuillage

Entrées

Objet de travail Système de travail Facteurs

Type de tracteur forestier

Tarif

Conducteur d'engin Fr./h

Tracteur forestier Fr./PMH15

Déplacements et pauses payées

Temps de travail par jour (min.)

dont déplacements et pauses payées

Autres

	Fr.	h.
Déplacements	0	0
Autres coûts	0	0

Résultat

	Volume de travail (h)		Coûts (Fr.)	
			par m ³ éc.	total
Durée du travail	10.20	WPSH		
Conducteur d'engin	10.20	WPPH	6.76	601.69
Tracteur forestier	8.24	PMH15	9.26	824.09
Déplacement	0.00	WPPH	0.00	0.00
Autres travaux	0.00	WPPH	0.00	0.00
Total			16.02	1'425.78

Productivité (m³ n.éc./PMH15) (10.80 m³ éc./PMH15)

Récolteuse

Récolteuse sur roues

Lieu de travail / coupe de bois:

Entrées

Objet de travail

Système de travail

Facteurs

Bois martelé

Quantité de bois (m³ n.éc.)

100

(89 m³ éc.)

DHP moyen (cm n.éc.)

30

Suppléments et décomptes sur la productivité (pourcentage du volume)

Forme des tiges

décroissance normale (+0 %)

0 %

Pourcentage de feuillus

jusqu'à 50 % (-5 %)

-5 %

Bois abattu sur parterre de coupe

aucun (+0 %)

0 %

Total des suppléments/décomptes

-5 %

Entrées

Objet de travail

Système de travail

Facteurs

Type d'engin (récolteuse) moyen

Tarif

Conducteur d'engin

59

Fr./h

Récolteuse sur roues

230

Fr./PMH15

Déplacements et pauses payées

Temps de travail par jour (min.)

540

dont déplacements et pauses payées

60

Autres

Fr.

h.

Déplacements

0

0

Autres coûts

0

0

Résultat

Volume de travail (h)		
Durée du travail	7.54	WPSH 
Conducteur d'engin	7.54	WPPH 
Récolteuse sur roues	6.09	PMH15 
Déplacement	0.00	WPPH 
Autres travaux	0.00	WPPH 
Total		

Coûts (Fr.)		
	par m ³ éc.	total
	5.00	444.96
	15.75	1'401.70
	0.00	0.00
	0.00	0.00
	20.75	1'846.66

Productivité (m³ n.éc./PMH15)

16.41

(14.60 m³ éc./PMH15)

Porteur (bois rond et bois énergie)

Porteur (bois rond et bois énergie)

Lieu de travail / coupe de bois:

Entrées

Objet de travail

Système de travail

Facteurs

Bois du tige (m³ n.éc.)

70

Bois énergie (m³ n.éc.)

30

Bois énergie de bois du tige (m³ n.éc.)

0

Bois énergie de bois fort des branches et de brindilles (m³ n.éc.)

0

Assortiments bois rond (m³ n.éc.)

70

(62.3 m³ éc.)

DHP moyen (cm)

30

Distance de débardage

201-400 m

Pente

<15 %

Nombre d'assortiments

1-3

Difficultés

aucune

Ecartement des layons de débardage

20 m

Diamètre de cime (cm)

15

Volume de bois énergie (m³ n.éc. par ha)

petite (15 m³)

Calculer

Affichage des résultats pour

Bois rond (grumes)

Résultat bois rond (grumes)

Volume de travail (h)

Durée du travail	7.17	WPSH
Conducteur d'engin	7.17	WPPH
Porteur	5.79	PMH15
Déplacement	0.00	WPPH
Autres travaux	0.00	WPPH
Total		

Coûts (Fr.)

par m ³ éc.	total
8.06	501.93
10.23	637.37
0.00	0.00
0.00	0.00
18.29	1'139.30

Productivité (m³ n.éc. / PMH15)

12.08

(10.75 m³ éc. / PMH15)

Affichage des résultats pour

Bois énergie

Résultat bois énergie

Volume de travail (h)

Durée du travail	4.45	WPSH
Conducteur d'engin	4.45	WPPH
Porteur	3.59	PMH15
Déplacement	0.00	WPPH
Autres travaux	0.00	WPPH
Total		

Coûts (Fr.)

par m ³ n.éc.	total
10.38	311.38
13.18	395.40
0.00	0.00
0.00	0.00
23.56	706.77

Productivité m³ n.éc. / PMH15

8.35

Pour une coupe avec 70% de bois de grumes et 30% de bois énergie : $18.29 \times 0.7 + 23.56 \times 0.3 = 19.8 \text{ CHF / m}^3 \text{ n. éc.}$

Coût de la coupe en situation de base :

Bucheronnage manuel + tracteur sur 70% de la surface de coupe

Récolteuse + porteur sur 30% de la surface de coupe

$$((29.6+16)*0.7)+((20.8+19.8)*0.3)= \mathbf{44.1 \text{ CHF / m}^3 \text{ de bois écorcé}}$$

On admet qu'on coupe en moyenne 7 m³ / ha / an → **308.7 CHF / ha / an**

6.2. Ecartement des layons 50m.

Récolteuse plus possible donc toutes la coupe en bucheronnage manuel + tracteur avec layons à 50m.

Bûcheronnage

idem situation initiale

Tracteur forestier (débardage)

Tracteur forestier

Lieu de travail / coupe de bois:

Entrées

Objet de travail

Système de travail

Facteurs

Bois martelé

Quantité de bois (m³ n.éc.)

100

(89 m³ éc.)

Volume moyen de la bille (m³ n.éc.)

0.65

Distance moyenne de débardage

0-300 m

Suppléments et décomptes sur la productivité

Distance de treillage

20-40 m (-10 %)

-10 %

Résultat

Volume de travail (h)

Durée du travail	11.33	WPSH
Conducteur d'engin	11.33	WPPH
Tracteur forestier	9.16	PMH15
Déplacement	0.00	WPPH
Autres travaux	0.00	WPPH
Total		

Coûts (Fr.)

par m ³ éc.	total
7.51	668.54
10.29	915.66
0.00	0.00
0.00	0.00
17.80	1'584.20

Productivité (m³ n.éc./PMH15)

10.92

(9.72 m³ éc./PMH15)

Surcoût de la coupe avec layons à 50m

$29.6 + 17.8 = 47.4 \text{ CHF / m}^3 \text{ de bois écorcés}$

On admet qu'on coupe en moyenne $7 \text{ m}^3 / \text{ha} / \text{an}$: $(47.4 * 7) = 331.8 \text{ CHF / ha / an}$

→ + 23.1 CHF / ha / an

6.3. Forêt jardinée

Il n'est pas possible d'utiliser la récolteuse, le personnel est plus qualifié pour abattre sans faire de dégât aux arbres adjacents

Bûcheronnage

Bûcheronnage manuel

Lieu de travail / coupe de bois:

Entrées

Objet de travail | Système de travail | Facteurs

Tarif

	Fr./h	Part du temps d'utilisation (%)	Pourcentage des frais du personnel (%)
Salarié 1	71	100	35
Salarié 2	65	100	32
Salarié 3	65	100	32
Salarié 4	0	0	0
Tronçonneuse	15		

Déplacements et pauses payées

Temps de travail par jour (min.)

dont déplacements et pauses payées

Autres

	Fr.	h.
Déplacements	0	0
Autres coûts	0	0

Résultat

	Volume de travail (h)		Coûts (Fr.)	
			par m ³ éc.	total
Durée du travail	12.82	WPSH		
Personnel	38.47	WPPH	28.89	2'577.23
Tronçonneuse	17.10	PMH15	2.87	256.44
Déplacement	0.00	WPPH	0.00	0.00
Autres travaux	0.00	WPPH	0.00	0.00
Total			31.77	2'833.67

Productivité de l'équipe (m³ n.éc. / WPSH) (6.96 m³ éc. / WPSH)

Tracteur forestier (débardage)

Tracteur forestier

Lieu de travail / coupe de bois:

Entrées

Objet de travail | Système de travail | Facteurs

Bois martelé

Quantité de bois (m³ n.éc.) (89 m³ éc.)

Volume moyen de la bille (m³ n.éc.)

Distance moyenne de débardage

Suppléments et décomptes sur la productivité

Distance de treuillage

Entrées

Objet de travail Système de travail Facteurs

Type de tracteur forestier Tracteur forestier muni d'une grue

Tarif

Conducteur d'engin 64 Fr./h

Tracteur forestier 100 Fr./PMH15

Déplacements et pauses payées

Temps de travail par jour (min.) 540

dont déplacements et pauses payées 60

Autres

	Fr.	h.
Déplacements	0	0
Autres coûts	0	0

Résultat

	Volume de travail (h)		Coûts (Fr.)	
			par m ³ éc.	total
Durée du travail	11.33	WPSH		
Conducteur d'engin	11.33	WPPH	8.15	725.20
Tracteur forestier	9.16	PMH15	10.29	915.66
Déplacement	0.00	WPPH	0.00	0.00
Autres travaux	0.00	WPPH	0.00	0.00
Total			18.44	1'640.86

Productivité (m³ n.éc./PMH15) 10.92 (9.72 m³ éc./PMH15)

Surcoût de la coupe dans une forêt jardinée

$31.8 + 18.4 = 50.2$ CHF / m³ de bois écorcés

On admet qu'on coupe en moyenne 7 m³ / ha / an : $(50.2 * 7) = 351.4$ CHF / ha / an

→ + 42.7 CHF / ha / an

6.4. Câble-grue

Câble-grue mobile

Lieu de travail / coupe de bois:

Entrées

Objet de travail **Système de travail** Facteurs

Peuplement

Quantité de bois (m³ n.éc.) (89 m³ éc.) **Distance moyenne de déplacement du chariot (m)**

Volume moyen de la bille (m³ n.éc.) **Distance moyenne de treuillage (m)**

Difficultés au treuillage facile

Installation

Système de câble **Système à 2 câbles** Supports intermédiaires nombre no. Hauteur du câble porteur

Emplacement de l'engin **en haut** **Ajouter** **Eliminer**

Longueur de ligne (m) **Mât terminal** ☒

Entrées

Objet de travail **Système de travail** Facteurs

Tarif

Personnel Fr./h

Câble-grue mobile Fr./h expl.

Engin muni d'une grue Fr./h expl.

Temps machine (% du temps de câblage)

Déplacements et pauses payées

Temps de travail par jour (min.)

dont déplacements et pauses payées

Nombre de personnes

Planification **Installation**

Câblage

Place de dépôt

Temps d'utilisation (en % du temps de câblage)

Autres

Déplacements Fr. h.

Autres coûts Fr. h.

Résultat

	Volume de travail (h)		Coûts (Fr.)	
			par m ³ éc.	total
Durée du travail	29.82	WPSH		
Personnel	81.44	WPPH	60.39	5'374.93
Câble-grue mobile	10.39	PMH15	14.01	1'246.67
Engin muni d'une grue	7.48	PMH15	6.72	598.37
Déplacement	0.00	WPPH	0.00	0.00
Autres travaux	0.00	WPPH	0.00	0.00
Total			81.12	7'219.97

Productivité du câblage (m³ n.éc./PMH15) (9.92 m³ éc./PMH15)

Surcoût de la coupe au câble-grue

81.1 CHF / m³ de bois écorcés

On admet qu'on coupe en moyenne 7 m³ / ha / an : (81.1 * 7) = 567.7 CHF / ha / an

→ + 259 CHF / ha / an

Les frênaies (sols mouillés) représentent en moyenne 5% de la surface des forêts

→ + 12.95 CHF / ha / an

6.5. Bacs de rétention

Arbeitsobjekt	Kostenansätze		
HV 1	Fällen / Aufarbeiten:	motormanuelle Holzhauerei (Personal + Motorsäge)	67 Fr./h
zusätzl. Transport	Rücken:	Forstspezialschlepper (Maschinist + Schlepper)	170 Fr./h

Arbeitsobjekt	$A_{\text{Wanne}} = \frac{A_{S2+S3}}{200 \text{ ha}} \quad (\text{Ergebnis wird aufgerundet})$		
HV 1	$ZK_{\text{Wanne}} = \frac{A_{\text{Wanne}} \times K_{\text{Wanne}}}{L_{\text{dauer}} \times A_{S2+S3}}$		
zusätzl. Transport			
Auffangwanne	Anzahl benötigter Wannen	Abk. A_{Wanne} (genau) 0.01 - (gerundet) 1 -	
Treib- und Schmierstoffe	Anschaffungskosten einer Auffangwanne	K_{Wanne}	80 Fr.
Erhöhung LH-Anteil	Lebensdauer der Auffangwanne	L_{dauer}	5 a
Betanken in S3	Fläche S2 und S3	A_{S2+S3}	1 ha
Ernte- rückstände	Zusätzliche Kosten für Auffangwannen	ZK_{Wanne}	<u>16.00 Fr./ha a)</u>

Surcoût pour l'utilisation des bacs de rétention

→ + 16 CHF / ha / an

! Attention ! L'utilisation de bacs de rétention est demandée en zone S. Le surcoût est à calculer uniquement sur les surfaces forestières hors zone de protection des eaux.

6.6. Conversion de monoculture

Le calcul est fait pour le passage d'une monoculture d'épicéas à un peuplement de feuillus à 80% (Hêtraie à Dentaire typique (12a)). Il est basé sur les « directives pour l'estimation des valeurs de forêts » de la société forestière suisse, établies en 1999 et révisées en 2018.

La coupe prématurée d'un peuplement implique une perte de valeur liée à une perte de l'accroissement volumique du peuplement. Cette perte est estimée comme étant la différence entre la valeur du peuplement à un âge cible et sa valeur à l'âge de la coupe.

Âge du peuplement

Pour l'épicéa, l'âge cible est de 120 ans. Le calcul repose sur un âge de coupe à 80 ans, qui représente une moyenne entre la coupe des peuplements jeunes (60 ans) et celle des peuplements quasiment matures (100 ans).

Valeur du peuplement

La perte de valeur pour la coupe d'un peuplement d'épicéas de 80 ans est évaluée à 8'500 CHF / ha.

Perte de valeur due à la conversion

La surface des monocultures d'une zone de forêt a été fixée à 20%. La transition a été fixée sur 20 ans.

8'500 CHF / ha → sur 20% de la surface : 1'700 CHF / ha → coupes sur 20 ans : 85 CHF / ha / an

Surcoût pour la conversion d'une monoculture

→ + 85 CHF / ha / an

6.7. Stockage contrôlé des résineux

Le principe est d'évacuer les résineux qui présentent un risque vis-à-vis d'une attaque de pathogène (selon la période de coupe, la durée du stockage, ...)

Calcul

On fait le calcul pour un bassin d'alimentation de 1'000 ha couvert à 50% par la forêt : 500 ha

On prend une moyenne de 40% de résineux dans les peuplements : 200 ha

On exploite en moyenne 7 m³ / ha / an, ce qui équivaut à l'exploitation de 1'400 m³ de résineux / an

On évalue à 25% le taux de résineux qui nécessiteraient un traitement, ce qui correspond à 350 m³ à traiter par année.

Stockage du bois sur place arrosée dont la location est estimée à 30 CHF / m³ (location + installations (pompes, etc.))

Coût du stockage arrosé des résineux : 10'050 CHF / an

Surcoût pour l'évacuation et le stockage de résineux

→ + 2 CHF / ha de forêt / an

OU + 1 CHF / ha du bassin d'alimentation du captage / an