



Nov.
2021

LIVRABLE

3.1B

Résultat des simulations et
comparaison des scénarios

MONNET Jean-Matthieu
AUSSENAC Raphaël
VALLET Patrick



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE

Résultat des simulations, PNR du Massif des Bauges

Comparaison des scénarios

Jean-Mathieu Monnet, Raphaël Aussenac, Patrick Vallet

2022-01-07

- [1 Introduction](#)
- [2 Volumes coupés et surface traitée](#)
 - [2.1 Aperçu général](#)
 - [2.2 Carte des volumes coupés](#)
 - [2.3 Par propriété](#)
 - [2.4 Par essence](#)
 - [2.5 Par essence et propriété](#)
 - [2.6 Par itinéraire](#)
- [3 Interventions sylvicoles](#)
 - [3.1 Nombre](#)
 - [3.2 Intensité](#)
- [4 Surface terrière](#)
 - [4.1 Par itinéraire](#)
 - [4.2 Par essence](#)
 - [4.3 Par propriété](#)
- [5 Services écosystémiques](#)
 - [5.1 Stocks de carbone](#)
 - [5.2 Récolte de bois](#)
 - [5.3 Production de chaleur](#)
 - [5.4 Prévention des avalanches](#)
 - [5.5 Protection contre les chutes de bloc](#)
 - [5.6 Érosion](#)
 - [5.7 Biodiversité : indice de Shannon pour la flore](#)
 - [5.8 Compromis entre services](#)
- [References](#)

1 Introduction

L'objectif de ce document est de présenter les simulations d'évolution forestière réalisées par le logiciel SIMMEM sur le territoire du PNR du Massif des Bauges. SIMMEM est un module de la plateforme CAPSIS (Dufour-Kowalski et al. 2012) qui gère l'évolution d'un ensemble de peuplements qui sont ici individuellement simulés par le module Salem (Aussenac et al. 2021).

Le nombre de polygones simulés est de 26654, pour une surface totale de 52570 ha. On s'intéresse à une durée simulée de 30 années, avec un pas de simulation de 3 ans.

Dans le fichier de sortie de SIMMEM, une ligne par année est indiquée. La première année reprend les valeurs initiales. Une intervention est éventuellement déclenchée dès la première année. Ce sont donc les caractéristiques du peuplement avant intervention qui sont indiquées. Les caractéristiques du peuplement juste après intervention ne sont pas disponibles, la ligne suivante présentant les caractéristiques du peuplement après intervention éventuelle et croissance du peuplement pendant la période de simulation suivante. Aucune exploitation n'est donc réalisée lors de la dernière année de simulation.

2 Volumes coupés et surface traitée

Le simulateur comptabilise le volume (volume sur écorce du tronc jusqu'à la découpe 7 cm) des arbres coupés. On entend par surface traitée la superficie des polygones où a eu lieu une intervention sylvicole de coupe (éclaircie, coupe finale ou rase, coupe en irrégulier).

2.1 Aperçu général

Les surfaces traitées et volumes coupés annuellement sont présentés sur le graphique ci-dessous, le scénario "Patrimonialisation" (PTR) représentant la base 100. Par rapport aux volumes et surfaces annoncés pour les scénarios, les résultats de simulation sont moins contrastés. Les augmentations pressenties étaient :

- 67 % en volume et 8 % en surface pour "Adaptation forcée" (ADA),
- 67 % en volume et 0 % en surface pour "Transition énergétique" (TRE),
- 42 % en volume et 8 % en surface pour "Redynamisation forestière" (DYN),
- -33 % en volume et -33 % en surface pour "Sanctuarisation" (SCT).

Il paraît difficile de décorrélérer les volumes coupés et surfaces traitées, sauf à introduire des modifications plus importantes sur la sylviculture, notamment les diamètres objectifs et les régimes d'éclaircie.

Pour mobiliser davantage, les deux principaux leviers sont en effet :

- l'augmentation de la surface traitée obtenue par l'augmentation de l'accessibilité et/ou l'augmentation de la probabilité de gestion,
- l'augmentation du prélèvement, qui se traduit par une décapitalisation dans la mesure où les différences entre itinéraires n'ont qu'une influence marginale sur la productivité.

Pour rappel (voir détails dans le document "13cd_Initialisation_gestion_all"), les principales modifications par rapport au scénario de référence PTR sont :

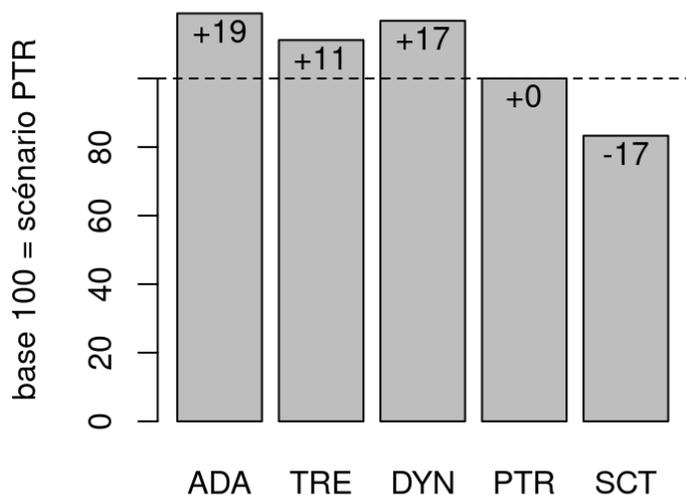
- multiplication de la surface cadastrale moyenne (facteur 5 à 10) pour certaines catégories de peuplement selon les scénarios (effet simulé du regroupement forestier) ;
- multiplication de la probabilité de gestion par 1,1 (zones de dépérissement, secteurs d'animation, selon scénario) ;
- diminution de la distance de débardage pour certaines certaines catégories de peuplement selon les scénarios (équivalent à une augmentation du prix du bois).

Étant donné que le massif est dans l'ensemble peu accessible et que l'effet de la taille de la parcelle sur la probabilité de gestion est d'ordre logarithmique, les efforts même importants consentis ci-dessus ont un effet limité en terme de surface additionnelle entrant en gestion. Ainsi l'augmentation de la surface cadastrale moyenne selon de telles proportions nécessiterait un travail d'animation très conséquent, même s'agissant d'une partie seulement des peuplements.

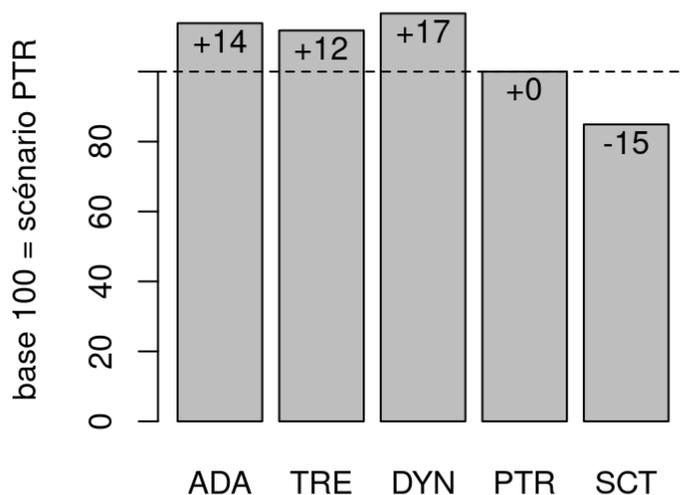
L'augmentation de la surface traitée via l'accessibilité représente de même un effort très important. La création de 45 km de route forestière, soit +8 % du linéaire, et de 40 km de pistes forestières dans le scénario DYN, ne permet pas d'augmenter la surface traitée dans une même proportion par rapport aux scénarios ADA et TRE. En l'absence de cette desserte supplémentaire, les augmentations de volume et de surface par rapport au scénario PTR seraient respectivement de +12 % et +13 %, contre +17 %.

Enfin le seul scénario comportant un transfert important entre scénario avec une diminution des diamètres d'exploitation est le scénario ADA. C'est le seul pour lequel l'augmentation du volume mobilisé est supérieure à celle de la surface traitée.

Volume total coupé



Surface annuelle traitée



Les tableaux ci-dessous montrent la surface gérée, la surface traitée en moyenne annuelle, le volume total coupé en moyenne annuelle, et le volume coupé moyen en m³ par an et par hectare de forêt gérée. Le premier présente les chiffres en valeur absolue, le second en relatif (pourcentage) par rapport au scénario "PTR".

Scénario	Surface gérée		Volume coupé moyen	
	(ha)	Surface traitée (ha/an)	(m ³ /ha/an)	Volume coupé total (m ³ /an)
ADA	23300	1270	9.6	223000
TRE	23900	1250	8.7	208000
DYN	24900	1300	8.8	219000
PTR	21400	1120	8.8	187000
SCT	18500	950	8.4	156000

Scénario	Surface gérée		Volume coupé moyen	
	(ha)	Surface traitée (ha/an)	(m ³ /ha/an)	Volume coupé total (m ³ /an)
ADA	+9 %	+14 %	+9 %	+19 %
TRE	+12 %	+12 %	0 %	+11 %
DYN	+17 %	+17 %	0 %	+17 %
SCT	-13 %	-15 %	-4 %	-17 %

À titre de comparaison, l'IFN calcule un accroissement de 11,5 m³/ha/an pour la forêt de production pour les peuplements résineux d'altitude 600 à 1200 m de la sylvoécocorégion "Préalpes du Nord". Il est de 7,5 m³/ha/an pour l'ensemble des

forêts de la sylvoécocorégion.

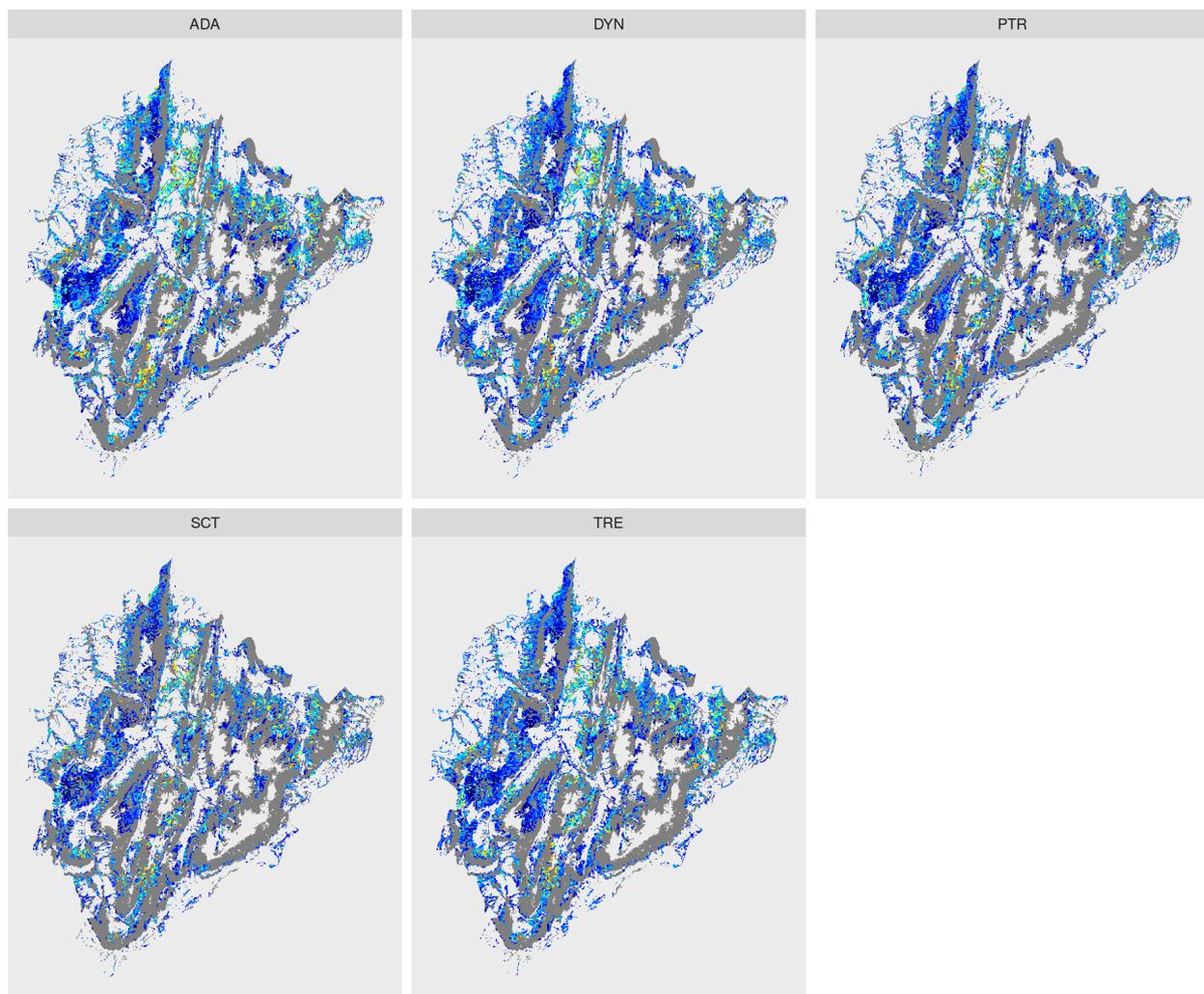
Méthode : Nouvelle méthode	
Échantillons :	Echantillon annuel IFN 2015 - phase 2 Echantillon annuel IFN 2016 - phase 2 Echantillon annuel IFN 2017 - phase 2 Echantillon annuel IFN 2018 - phase 2 Echantillon annuel IFN 2019 - phase 2 Modifier ↻
Domaine d'étude :	Forêt de production Modifier ↻
Lots :	Arbre vif en forêt Arbre vif en peupleraie Modifier ↻
Variables :	Production biologique en forêt de production (2 composantes) Modifier ↻
Ventilations de niveau placette :	Essence principale du peuplement Classe d'altitude Modifier ↻
Séparation levé / non levé :	Oui
Données de filtrage placette :	Occupation du sol
Domaine géographique :	Sylvoécocorégion - Préalpes du Nord Modifier ↻



Point Levé	Groupement en essences feuillues ou résineuses (2 modalités)	Regroupement des classes d'altitude de montagne (3 classes)	Production biologique en forêt de production (2 composantes) (millions de m3/an)	Production biologique en forêt de production (2 composantes) (m3/ha/an)
Oui	Feuilleu	De 0 à 600 m	n.s.	n.s.
Oui	Résineux	De 0 à 600 m	n.s.	n.s.
Oui	Feuilleu	De 600 à 1200m	0,3 ± 0,1	5,3 ± 1,2
Oui	Résineux	De 600 à 1200m	0,6 ± 0,2	11,3 ± 2,8
Oui	Feuilleu	Plus de 1200 m	n.s.	n.s.
Oui	Résineux	Plus de 1200 m	0,5 ± 0,1	8,4 ± 1,7
Total levé			1,6 ± 0,2	7,5 ± 0,8

2.2 Carte des volumes coupés

La répartition des volumes coupés sur le territoire est présentée sur la carte suivante. Les zones en gris sont les polygones en inaction.



Volumes coupés sur 30 ans (m³/ha) 0 250 500 750 1000

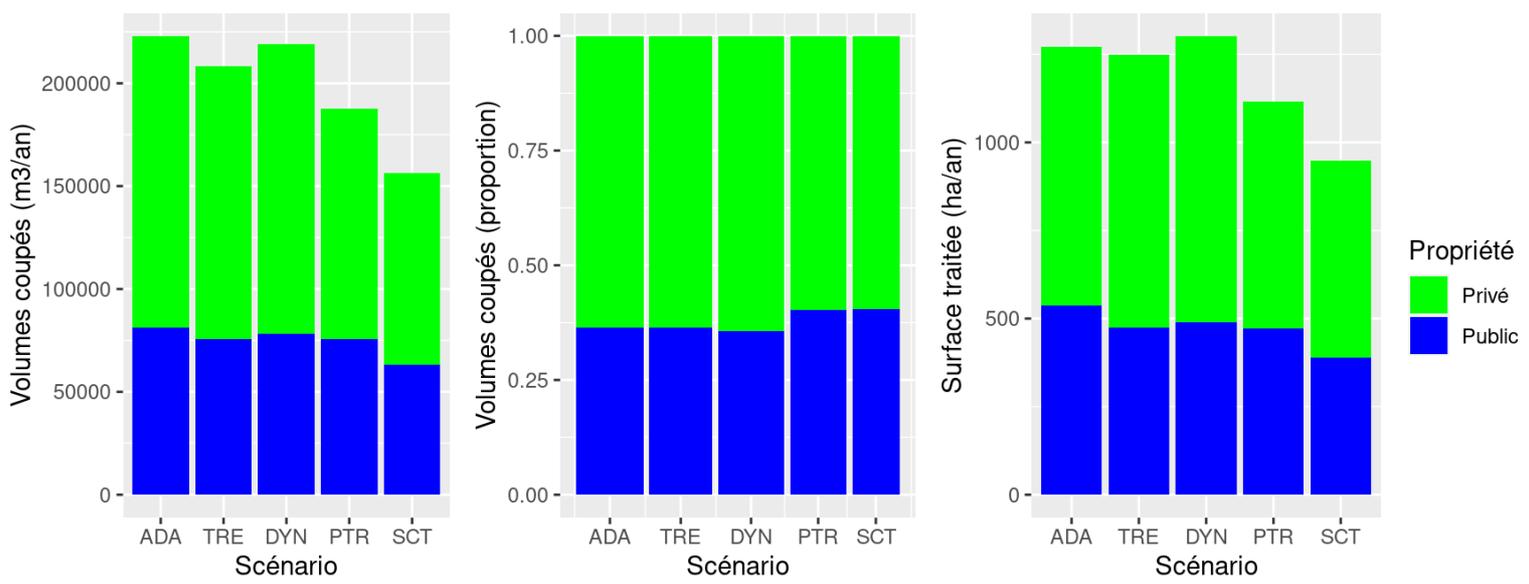
2.3 Par propriété

Concernant la répartition des volumes coupés par type de propriété, les différences avec les scénarios sont importantes :

- ADA prévoyait +50 % en forêt publique et +100 % en forêt privée,
- TRE prévoyait environ +10 % en public et presque +175 % en privé,
- DYN +125 % en privé,
- SCT -25 % en public et -50 % en privé.

Le scénario de référence prévoyait sur un volume récolté deux fois supérieur en public qu'en privé, alors que les simulations donnent un volume coupé près de 1,5 fois supérieur en privé.

Dans les simulations, ADA comporte une augmentation en privé et public. Pour les scénarios TRE et DYN, l'augmentation est réalisée majoritairement en privé. La répartition des volumes coupés change peu avec le scénario SCT.

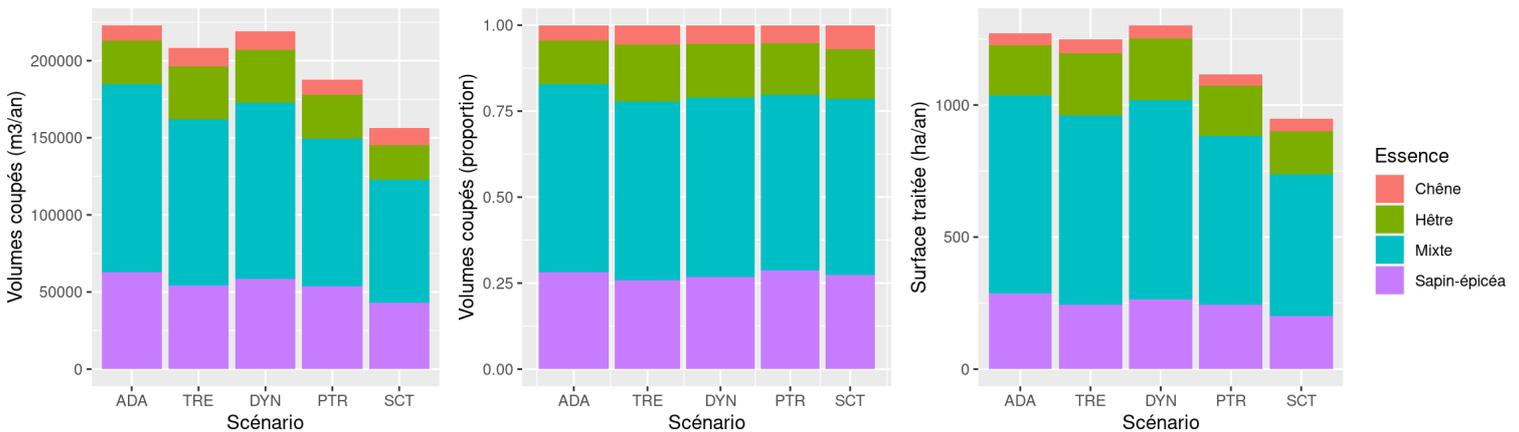


2.4 Par essence

Là encore les scénarios restent peu contrastés.

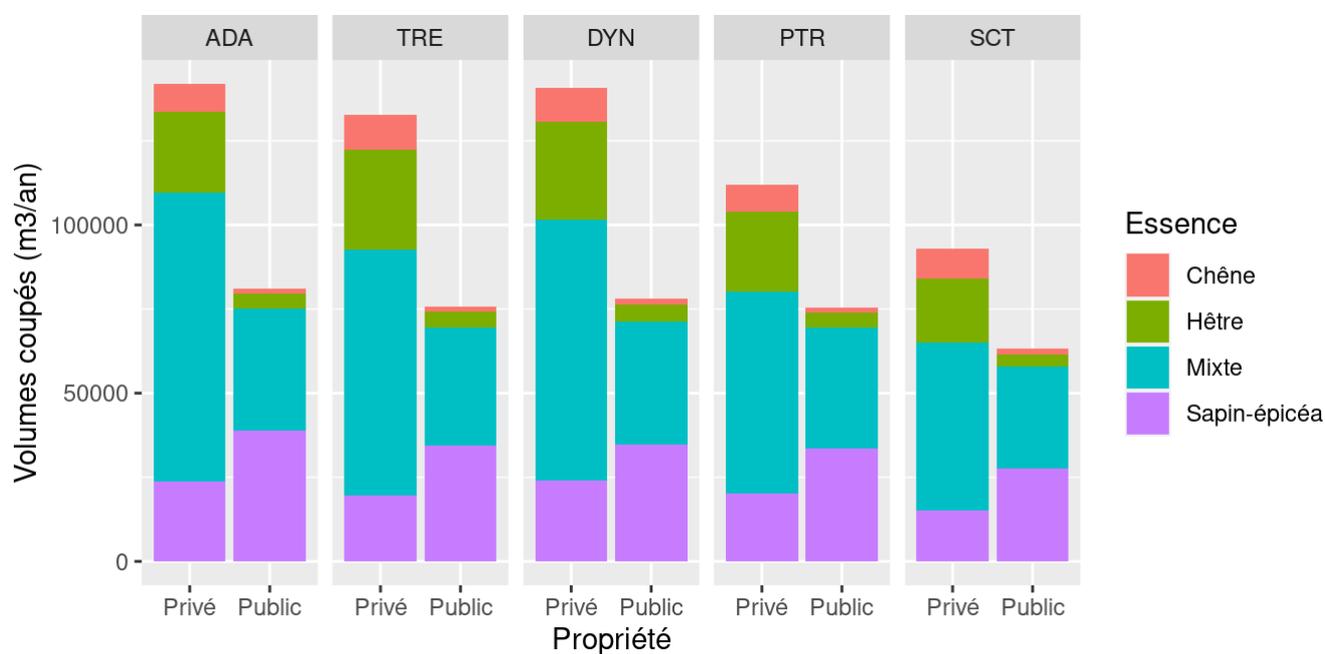
- ADA a une proportion plus importante de volumes coupés en mixte, et très légèrement en sapin-épicéa.
- TRE et dans une moindre mesure DYN ont des volumes coupés un peu plus importants en feuillus.
- SCT a une proportion plus importante en chêne.

Ces différences sont cohérentes avec les modifications entre les scénarios concernant l'augmentation de la probabilité de gestion des différentes catégories de peuplement.



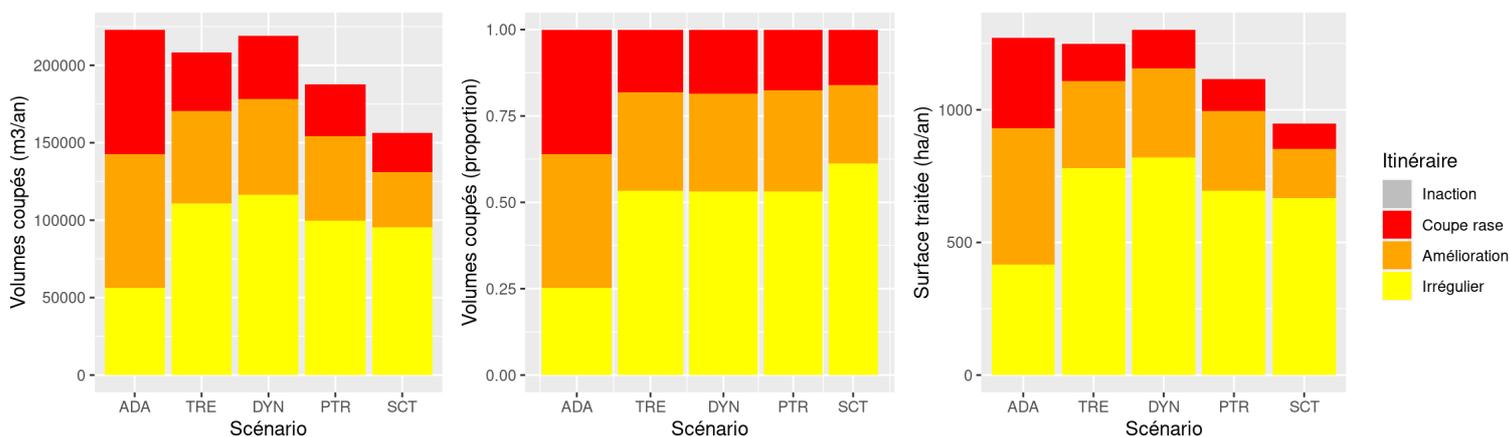
2.5 Par essence et propriété

En public, les volumes coupés sont majoritairement en sapin-épicéa et en mixte. Il y a moins de peuplements feuillus qu'en privé.

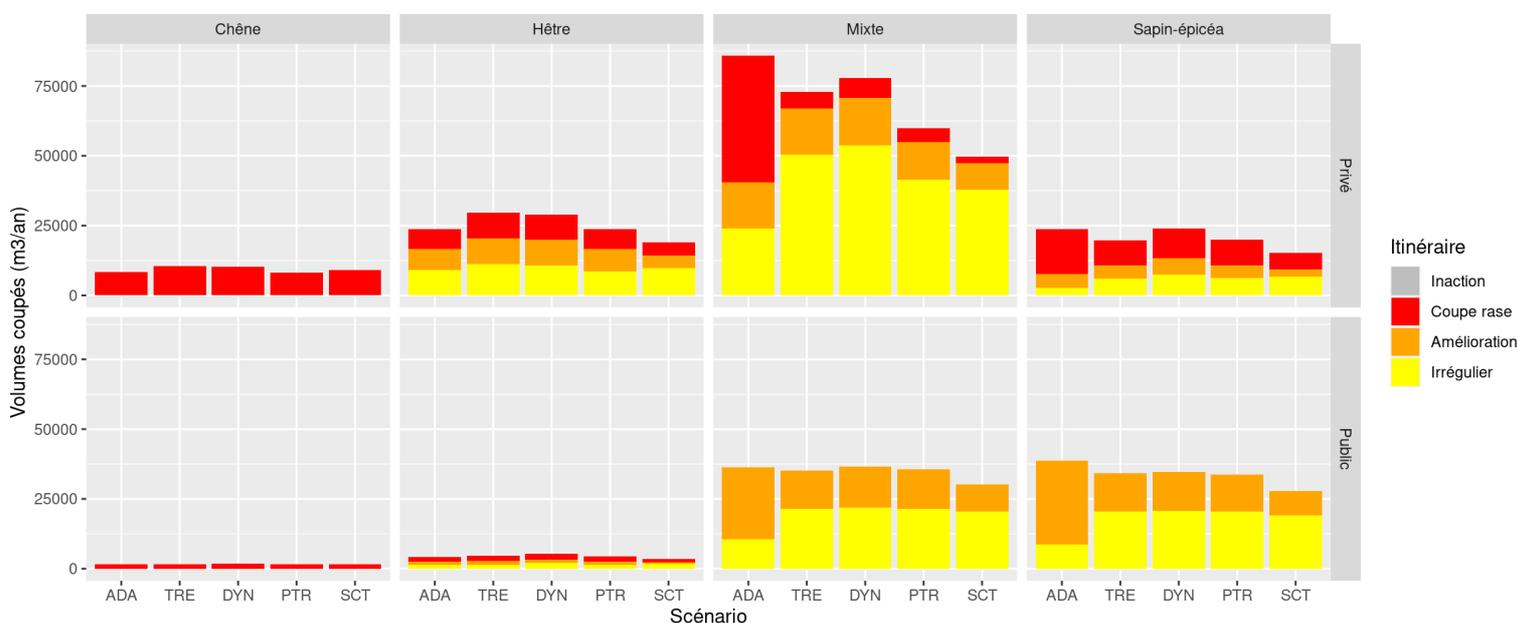


2.6 Par itinéraire

ADA est caractérisé par une augmentation de la proportion de coupe rase (surtout en privé) et d'amélioration (surtout en public) par rapport aux autres scénarios. SCT a une proportion plus importante d'irrégulier.



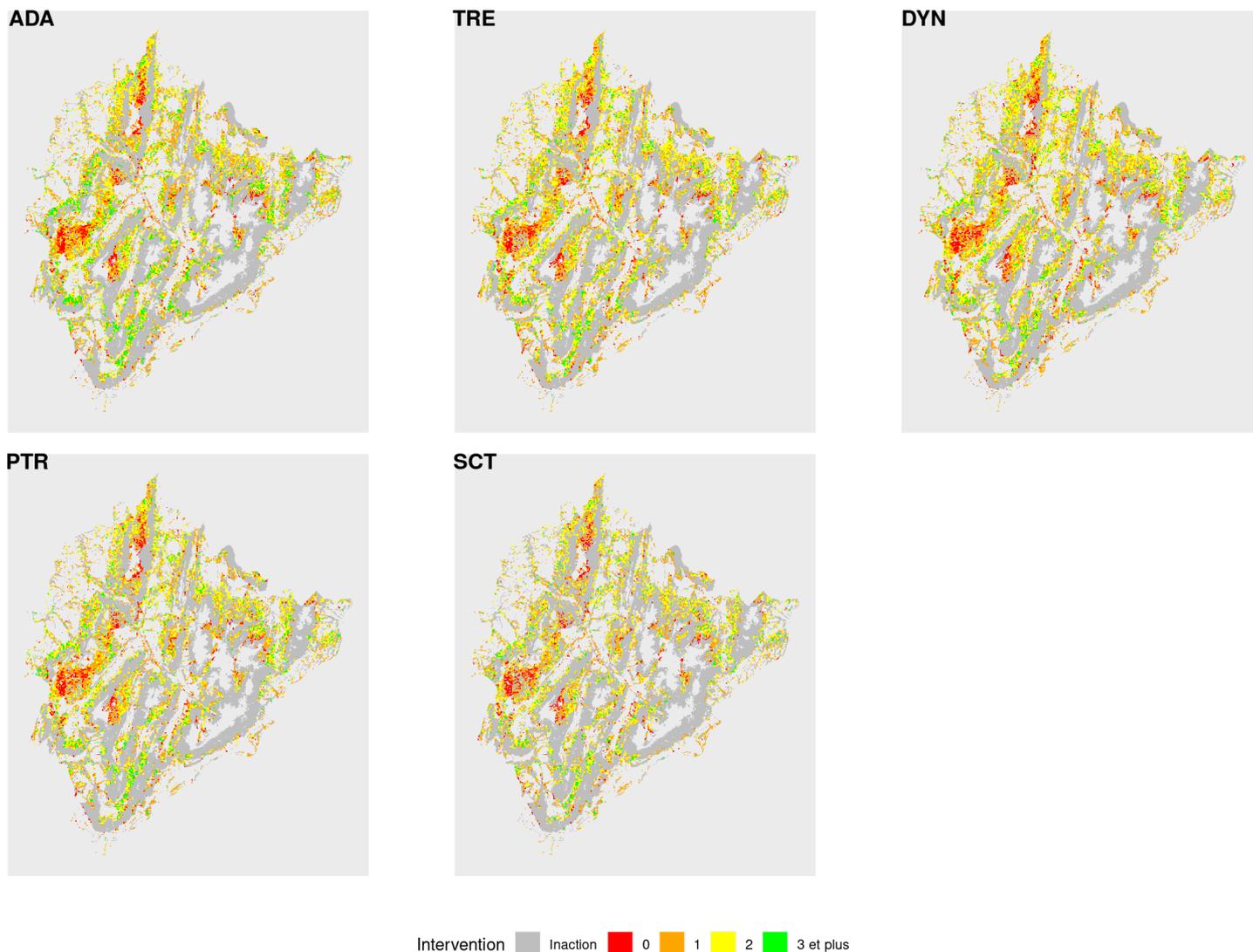
La répartition des volumes coupés par itinéraire, essence et propriété est présentée ci-dessous.



3 Interventions sylvicoles

3.1 Nombre

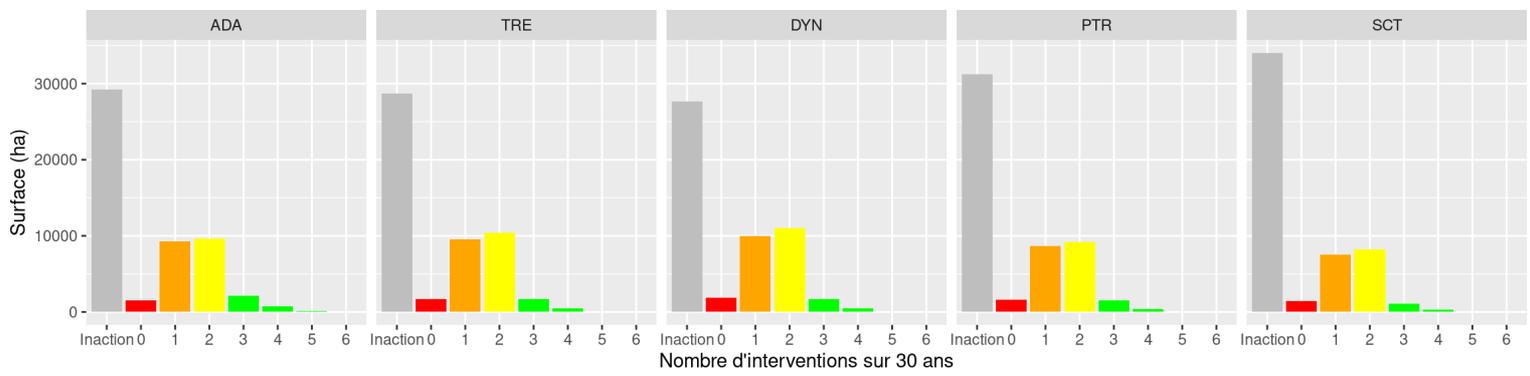
Les cartes ci-dessous montrent le nombre d'interventions sur la période (éclaircie ou coupe). Il n'y a pas de différence flagrante entre les scénarios.



Le nombre moyen d'interventions est de 1.45 pour le scénario de référence. Il est plus élevé pour les autres scénarios, sauf SCT.

	Nombre moyen	Écart avec PTR
ADA	1.61	+11 %
TRE	1.62	+12 %
DYN	1.69	+17 %
PTR	1.45	0 %
SCT	1.25	-14 %

Les graphiques suivants présentent la distribution du nombre d'interventions par polygone.



3.2 Intensité

La moyenne de l'intensité des interventions est environ de 170 m³/ha pour tous les scénarios. Cependant la distribution des intensités varie entre les scénarios. Ainsi le scénario ADA comporte 42 % de surface en plus que PTR pour les opérations d'intensité supérieure à 200 m³/ha. La surface avec une forte coupe diminue pour SCT qui comporte à la fois moins de surface traitée et une plus forte proportion de gestion en irrégulier.

	Intensité moyenne (m ³ /ha)	Intensité moyenne (écart avec PTR)	Surface traitée (écart avec PTR)	Surface traitée >200m ³ /ha (écart avec PTR)
ADA	175	+5 %	+14 %	+42 %
TRE	167	-1 %	+12 %	+10 %
DYN	168	0 %	+17 %	+17 %
PTR	168	0 %	0 %	0 %
SCT	165	-2 %	-15 %	-26 %

À titre de comparaison, l'IFN calcule un volume moyen sur pied de 435 m³/ha pour la forêt de production pour les peuplements résineux d'altitude 600 à 1200 m de la sylvoécocorégion "Préalpes du Nord". Il est de 328 m³/ha pour

Méthode : Nouvelle méthode

Échantillons : Échantillon annuel IFN 2015 - phase 2
 Échantillon annuel IFN 2016 - phase 2
 Échantillon annuel IFN 2017 - phase 2 **Modifier** 
 Échantillon annuel IFN 2018 - phase 2
 Échantillon annuel IFN 2019 - phase 2

Domaine d'étude : Forêt de production **Modifier** 

Lots : Arbre vif en forêt **Modifier** 
 Arbre vif en peupleraie

Variables : Volume **Modifier** 

Ventilations de niveau placette : Essence principale du peuplement **Modifier** 
 Classe d'altitude

Séparation levé / non levé : Oui

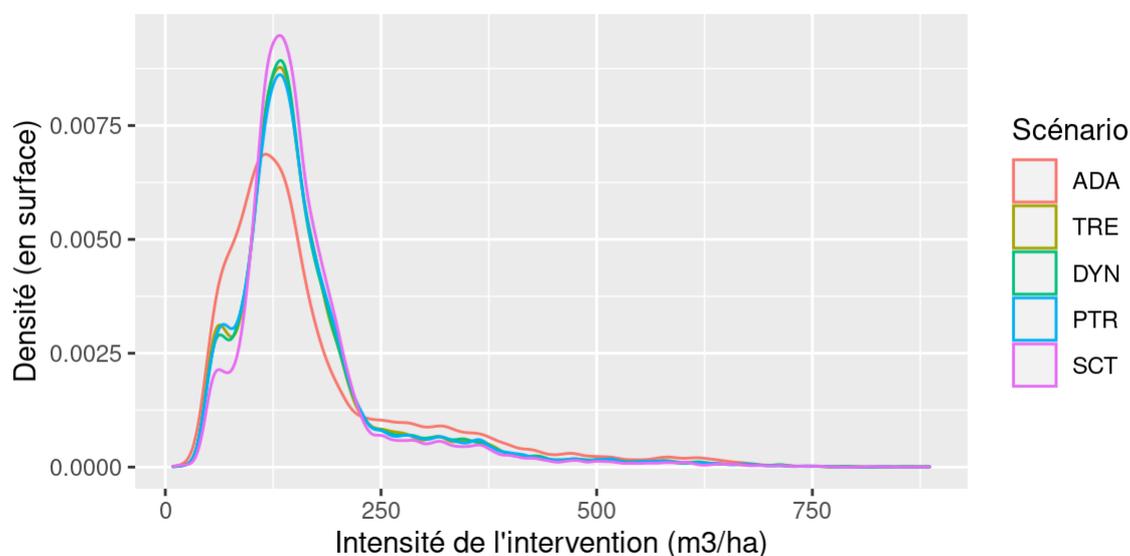
Données de filtrage placette : Occupation du sol

Domaine géographique : Sylvoécocorégion - Préalpes du Nord **Modifier** 

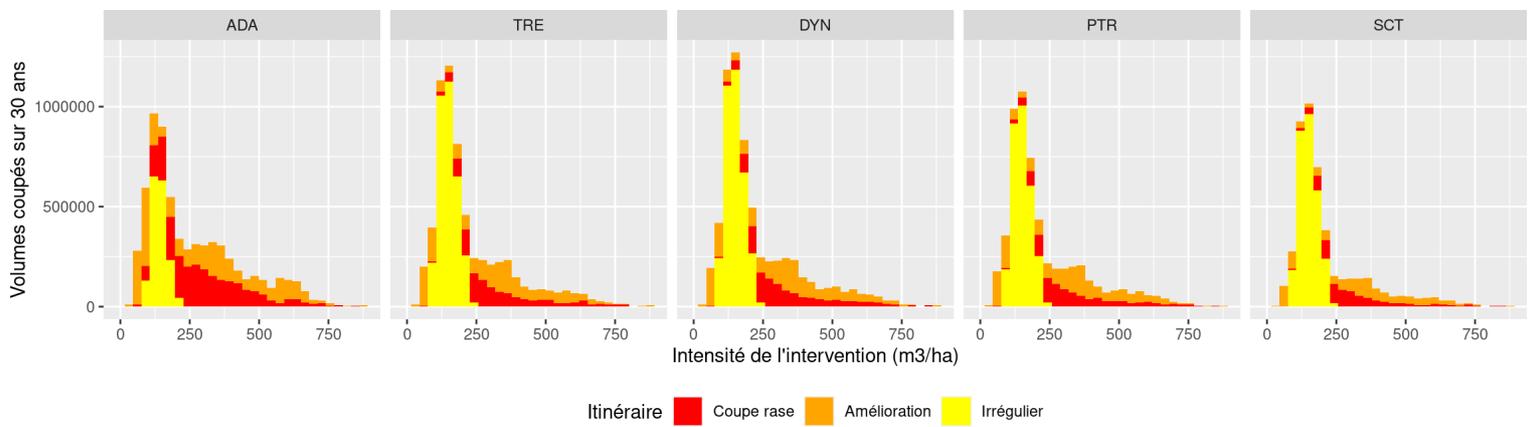
Point Levé	Groupement en essences feuillues ou résineuses (2 modalités)	Regroupement des classes d'altitude de montagne (3 classes)	Volume (millions de m3)	Volume (m3/ha)
Oui	Feuillu	De 0 à 600 m	n.s.	n.s.
Oui	Résineux	De 0 à 600 m	n.s.	n.s.
Oui	Feuillu	De 600 à 1200m	15 ± 6	239 ± 76
Oui	Résineux	De 600 à 1200m	22 ± 8	435 ± 152
Oui	Feuillu	Plus de 1200 m	n.s.	n.s.
Oui	Résineux	Plus de 1200 m	24 ± 7	389 ± 100
Total levé			71 ± 12	328 ± 45

Les **résultats** sont exprimés sous la forme : $x \pm y$. Cela signifie que la valeur estimée est comprise dans l'intervalle

Globalement, la répartition de la surface traitée par l'intensité des interventions reste peu changée, sauf pour le scénario ADA, qui comporte plus de coupe rase et d'amélioration. Ce scénario comporte donc à la fois plus de légères et plus de fortes coupes.



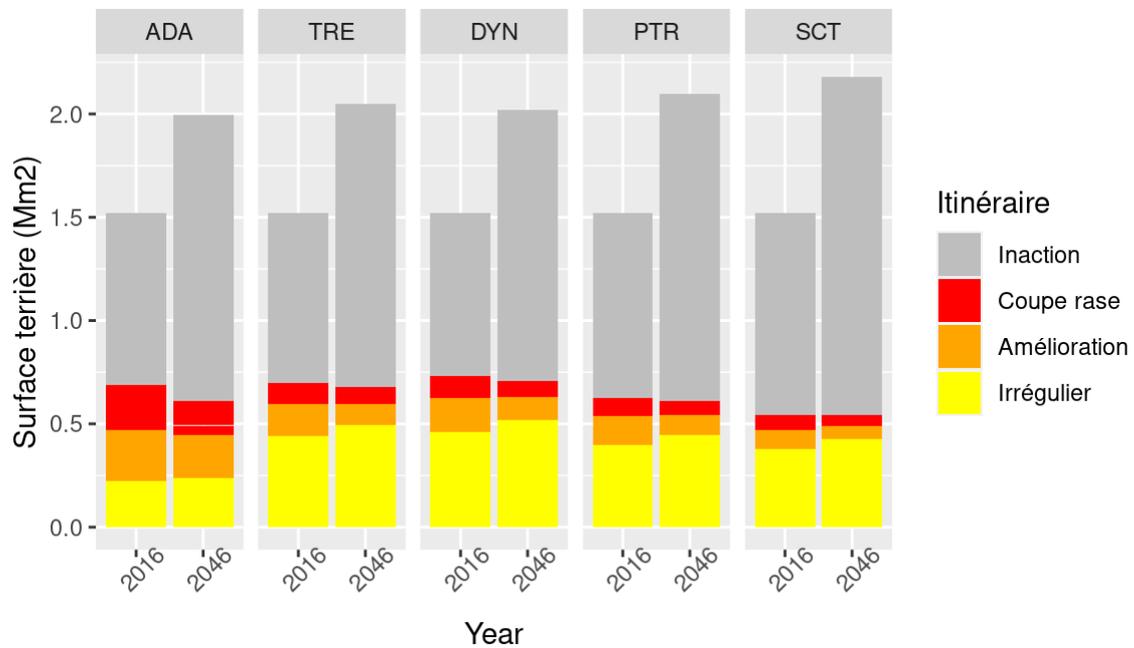
La répartition des volumes coupés par intensité d'intervention est présentée ci-dessous. On constate qu'effectivement ADA comporte plus de volumes prélevés lors de fortes coupes.



4 Surface terrière

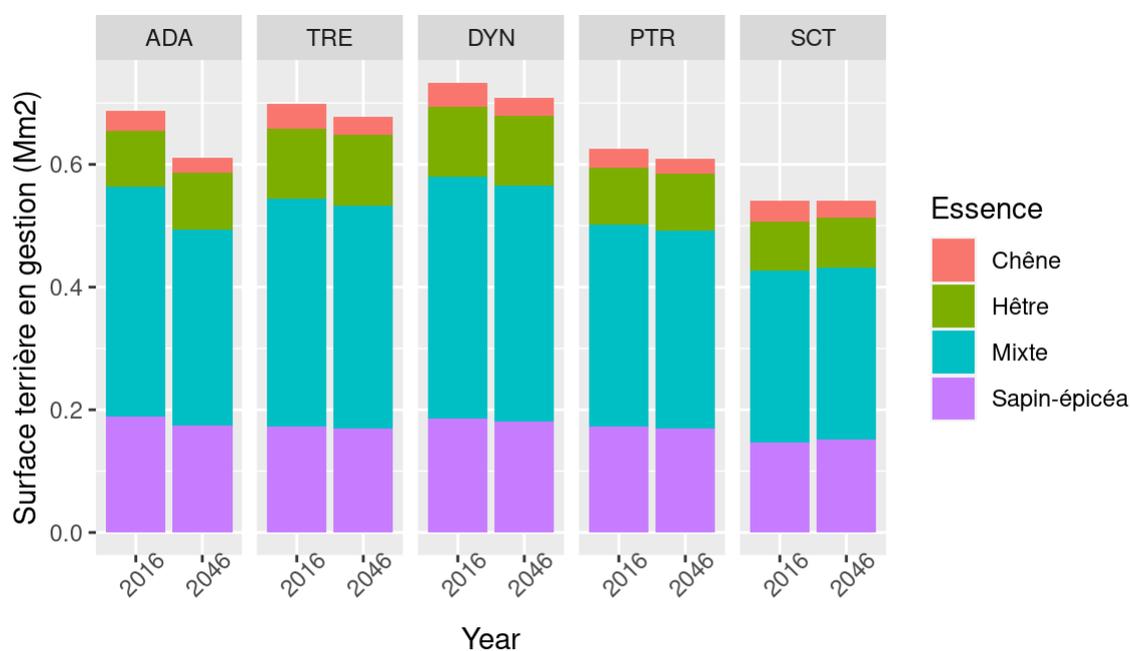
4.1 Par itinéraire

Exceptés les peuplements en inaction, on constate une légère décapitalisation pour tous les scénarios. Celle-ci est plus importante pour le scénario ADA, et quasi inexistante pour SCT.



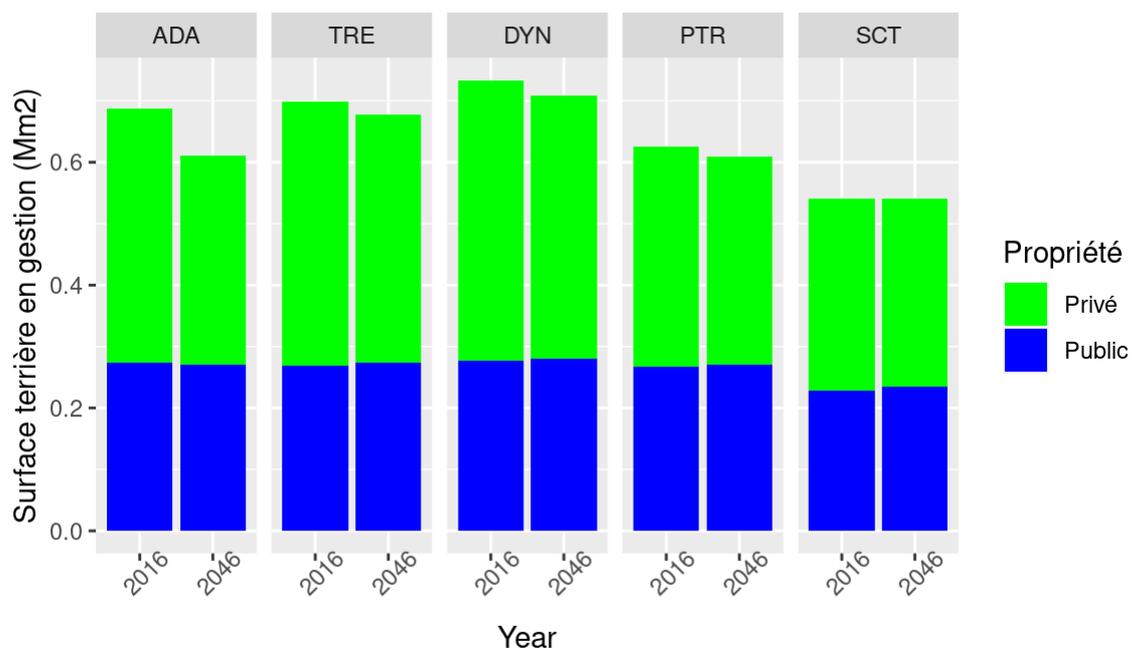
4.2 Par essence

Pour ADA, ce sont essentiellement les peuplements mixtes en forêt privée qui sont décapitalisés.



4.3 Par propriété

La surface terrière des polygones gérés est légèrement croissante en forêt publique (sauf ADA), la diminution se faisant essentiellement en forêt privée.



5 Services écosystémiques

Le calcul des services écosystémiques de stock de carbone, production de bois et de chaleur a été réalisé avec l'outil CAT (Pichancourt et al. 2018). Les calculs des autres services écosystémiques à partir des caractéristiques du peuplement se basent sur un travail de stage de master (Nzeta Kenne 2019).

On constate de manière générale assez peu de différences entre les scénarios du point de vue des services écosystémiques, autre que stockage de carbone et production de bois, calculés à partir des résultats de simulation. La majeure partie du massif étant non gérée, les modifications de sylviculture s'appliquent sur un part minoritaire des forêts. Les différences de services écosystémiques entre les structures qui en découlent étant également faibles, l'écart entre scénarios pour l'ensemble du massif est le plus souvent ténue. Cependant des différences plus conséquentes peuvent exister localement. Elles n'ont pas été étudiées dans le cadre du projet.

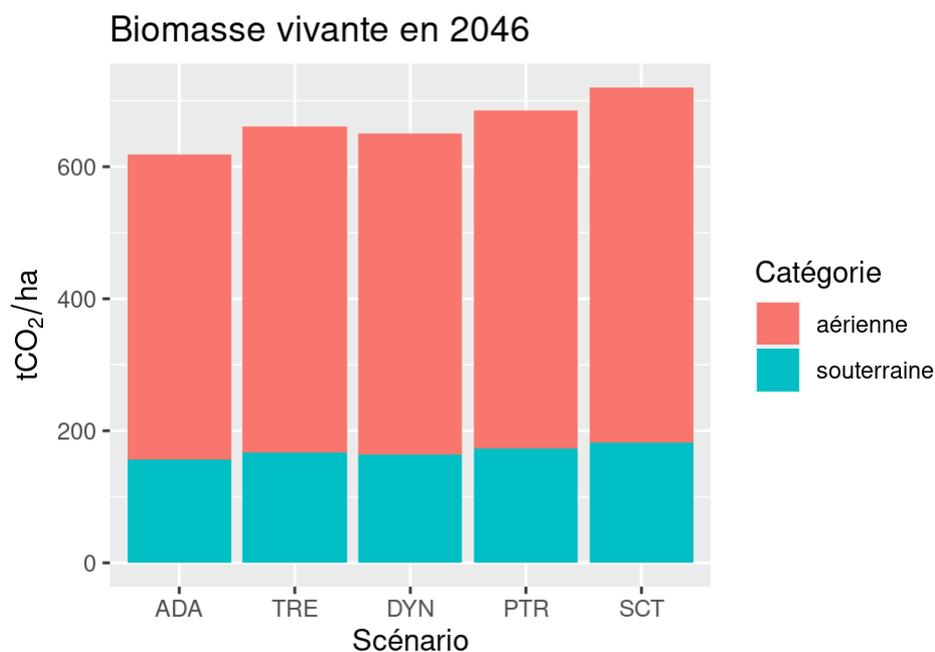
5.1 Stocks de carbone

5.1.1 Biomasse vivante en début de simulation

La biomasse vivante en début de simulation est estimée à 23100 ktCO₂ pour une surface de 52600 ha, soit 439 tCO₂/ha. À titre de comparaison, le document "Profil climat air énergie du Massif des Bauges (PNR)" édité par l'Observatoire régional climat air énergie Auvergne-Rhône-Alpes (ORCAE 2021b), estime le stock de carbone à 13800 ktCO₂ pour 48400 ha de forêts, soit 285 tCO₂/ha. Dans ce calcul (ORCAE 2021a) la surface forestière de référence est constituée par les classes 311, 312 et 313 de Corine Land Cover (2018), à laquelle est appliquée le ratio national de 285 tCO₂/ha (source : CLIMAGRI, ADEME).

5.1.2 Biomasse vivante en fin de simulation

Les figures suivantes présentent le stock de carbone dans la biomasse vivante en fin de simulation (2046). Par rapport au scénario de référence, le scénario SCT a un stock supérieur de 5.1 %, alors que les autres scénarios ont un stock inférieur de 3.6 % (TRE) à 9.7 % (ADA).



Scénario	Biomasse vivante (MtCO ₂)	Biomasse vivante (tCO ₂ /ha)	Écart avec PTR
ADA	32.5	619	-9.7 %
TRE	34.7	660	-3.6 %
DYN	34.2	650	-5.1 %
PTR	36.0	685	0 %
SCT	37.8	720	+5.1 %

5.1.3 Stockage de carbone en forêt en début de simulation

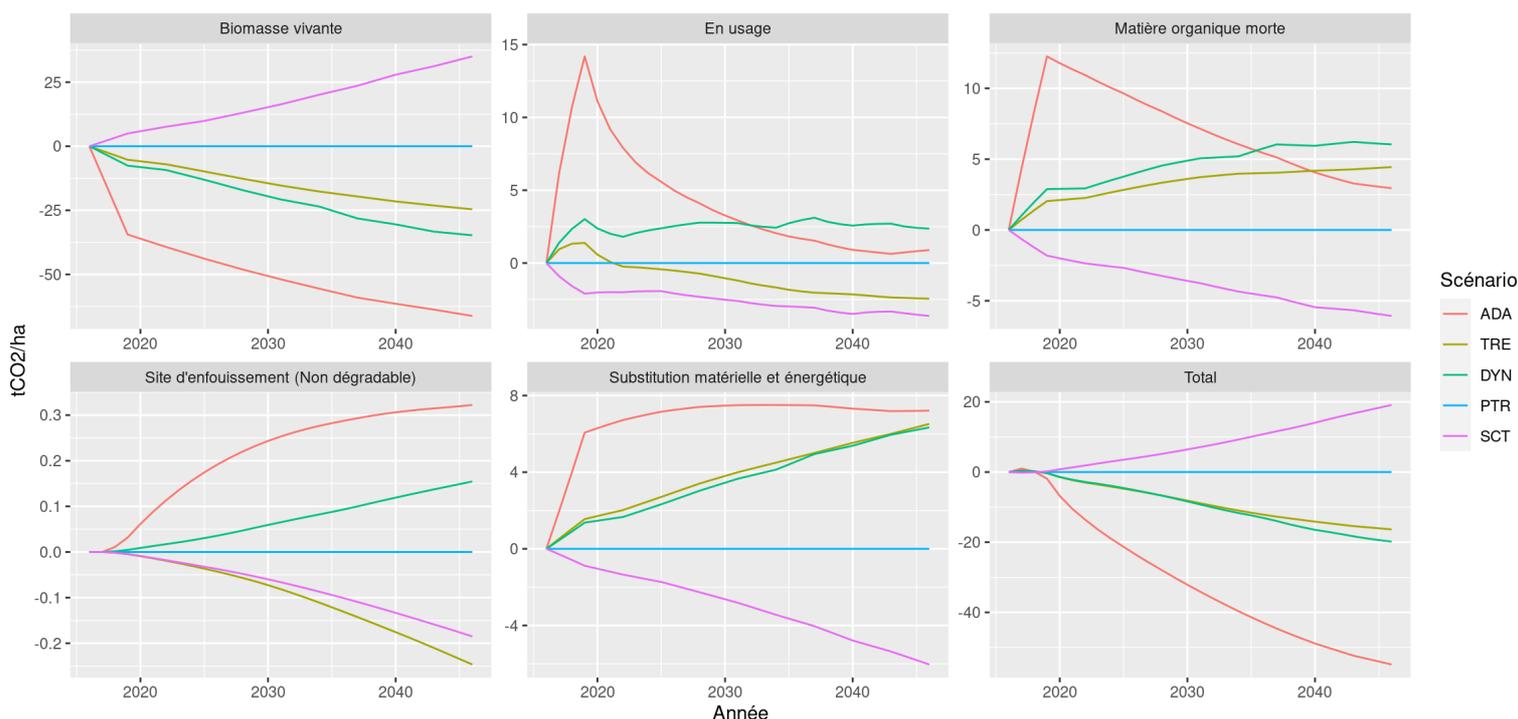
Sur les trois premières années simulées dans le scénario PTR, le carbone absorbé annuellement par les forêts est de 10 tCO₂/ha, incluant la biomasse aérienne, la biomasse souterraine et la matière organique morte. Le ratio utilisé par ORCAE (2021a) pour les forêts de Savoie et Haute-Savoie est de 11.06. Il semble que la matière organique morte n'y soit pas prise en compte.

5.1.4 Évolution des stocks par rapport au scénario PTR

L'évolution sur 30 ans des stocks est présentée ci-dessous, le scénario PTR constituant la référence. Pour une meilleure comparaison des scénarios, l'échelle des ordonnées n'est pas la même sur les différents graphiques. Le scénario ADA comporte des coupes sanitaires effectuées en début de simulation, qui se traduisent par un stock de carbone en matière organique morte et en produits en usage plus élevé en début de période.

Avec le scénario PTR comme référence pour la substitution matérielle et énergétique, le scénario SCT présente une substitution négative, alors que les autres scénarios, du fait de volumes récoltés plus importants, ont une substitution positive. La substitution pour le scénario ADA se fait principalement en début de période, la valeur cumulée en fin de période étant proche de celles des scénarios DYN et TRE.

Évolution des stocks de carbone



Si l'on considère le total (carbone stocké et carbone "évité" par substitution), on constate que le scénario SCT a le meilleur bilan carbone, avec un bilan net de 19 tCO₂/ha par rapport à PTR, contre -55 pour le scénario ADA. Le stockage de carbone en forêt semble être à court terme la meilleure manière de réduire les émissions de carbone pour le territoire du PNR. Cependant le stockage de carbone en forêt atteint une limite lorsque les forêts sont à l'équilibre sur un massif, alors que la substitution matérielle et énergétique est cumulative lorsque ce sont des énergies fossiles qui sont remplacées. Selon le mix énergétique de substitution, on peut donc se demander à quelle échéance temporelle les différences entre scénarios pourraient s'inverser. À titre de comparaison, les émissions annuelles de GES sur le territoire du PNR sont de 328 ktCO₂/an, soit 9.8 MtCO₂ sur trente ans à rythme constant (ORCAE 2021b). L'écart de bilan entre les scénarios et PTR représente jusqu'à 30% de cette valeur.

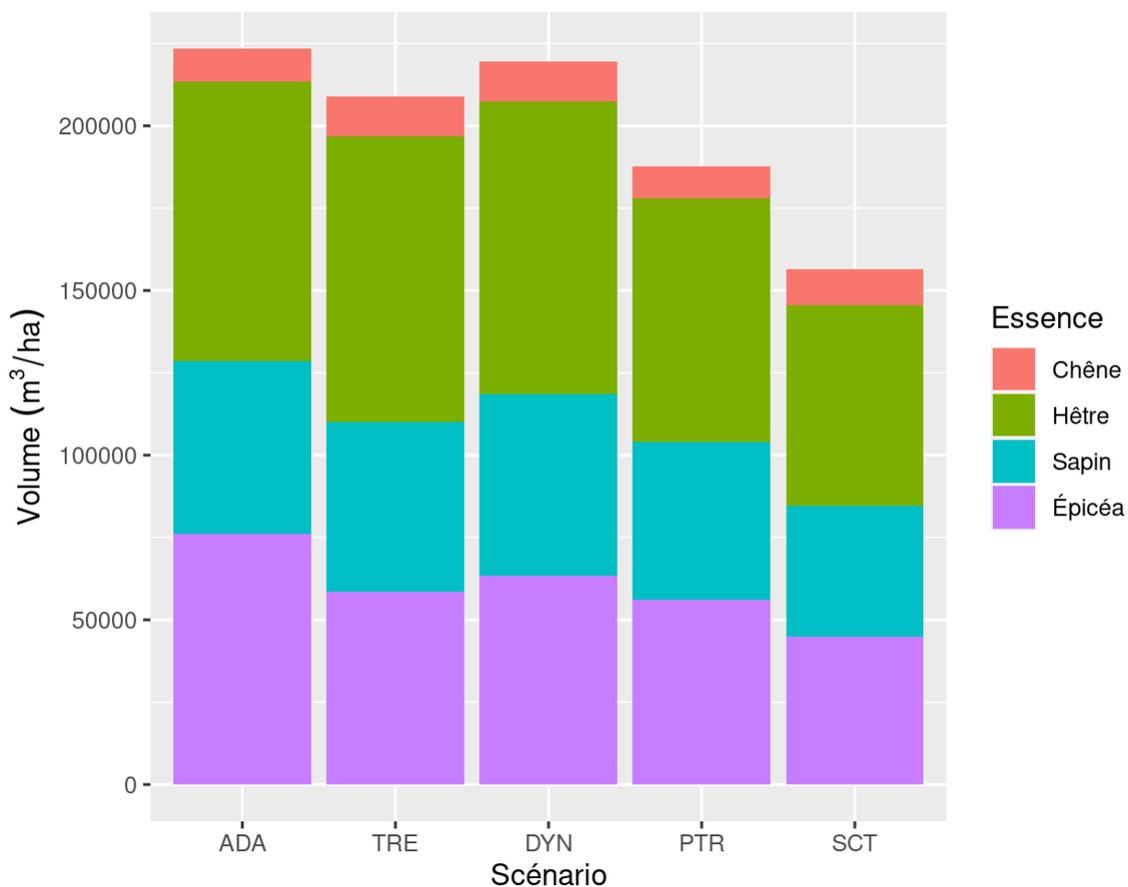
Scénario	Écart avec PTR (tCO ₂ /ha)	Écart avec PTR (MtCO ₂)
ADA	-55	-2.9
TRE	-16	-0.9
DYN	-20	-1.0
PTR	0	0.0
SCT	19	1.0

5.2 Récolte de bois

La récolte annuelle de bois s'échelonne de 3 à 4.3 m³/ha/an, PTR étant à 3.6.

Scénario	Récolte annuelle moyenne (m ³ /an)	Récolte annuelle moyenne (m ³ /ha/an)	Écart avec PTR
ADA	223000	4.3	+19 %
TRE	209000	4.0	+11.2 %
DYN	219000	4.2	+16.8 %
PTR	188000	3.6	0 %

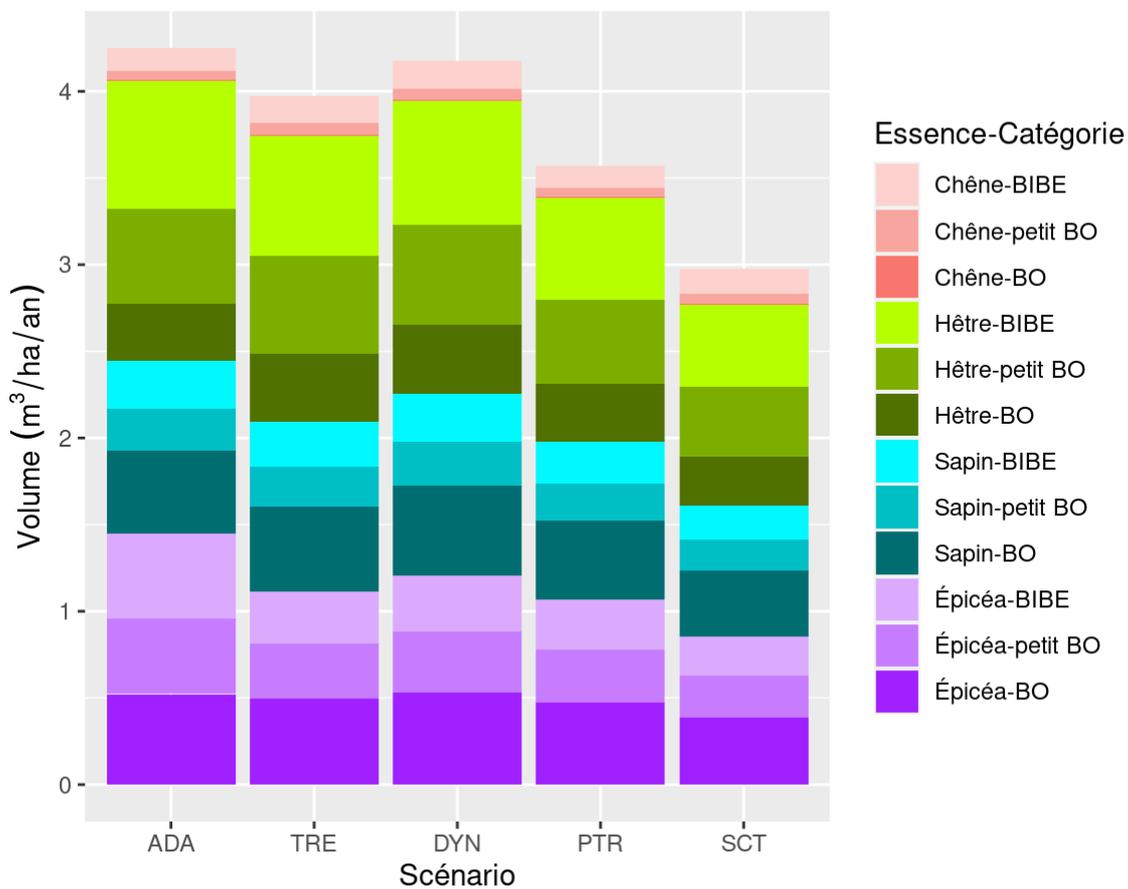
Récolte annuelle moyenne



5.2.1 Par catégorie de billons et essence

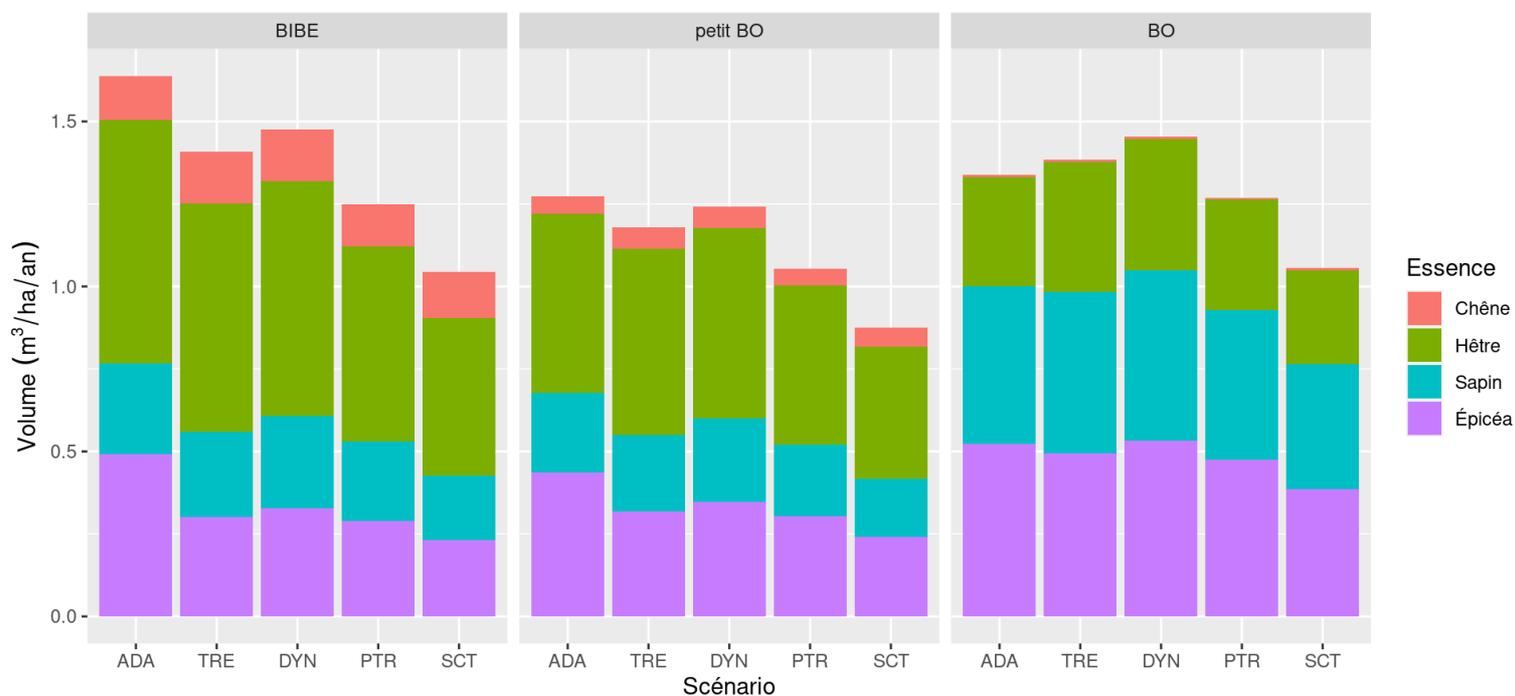
En moyenne sur la durée simulée, le scénario ADA est celui qui produit le plus grand volume de billons, principalement par une augmentation des catégories BIBE (bois d'industrie et bois énergie) et petit BO (bois d'oeuvre). La répartition dans les différentes catégories est assez similaire pour les autres scénarios.

Récolte moyenne

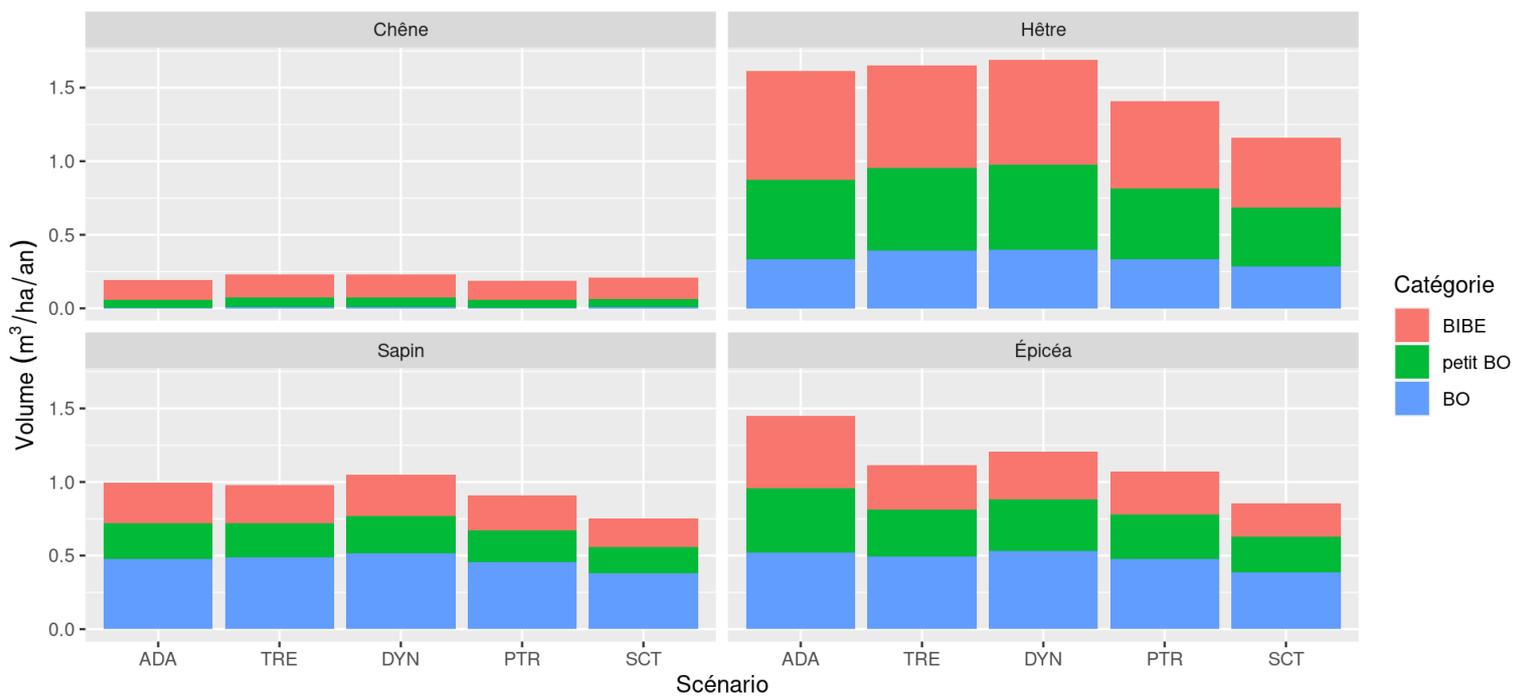


Le détail de la répartition par catégorie de billons et essence est présenté sur les figures suivantes. Les scénarios DYN et TRE produisent plus de bois d'oeuvre. Le scénario ADA produit plus de bois d'industrie et énergie, principalement par une augmentation en épicéa.

Récolte moyenne (m³/ha/an)

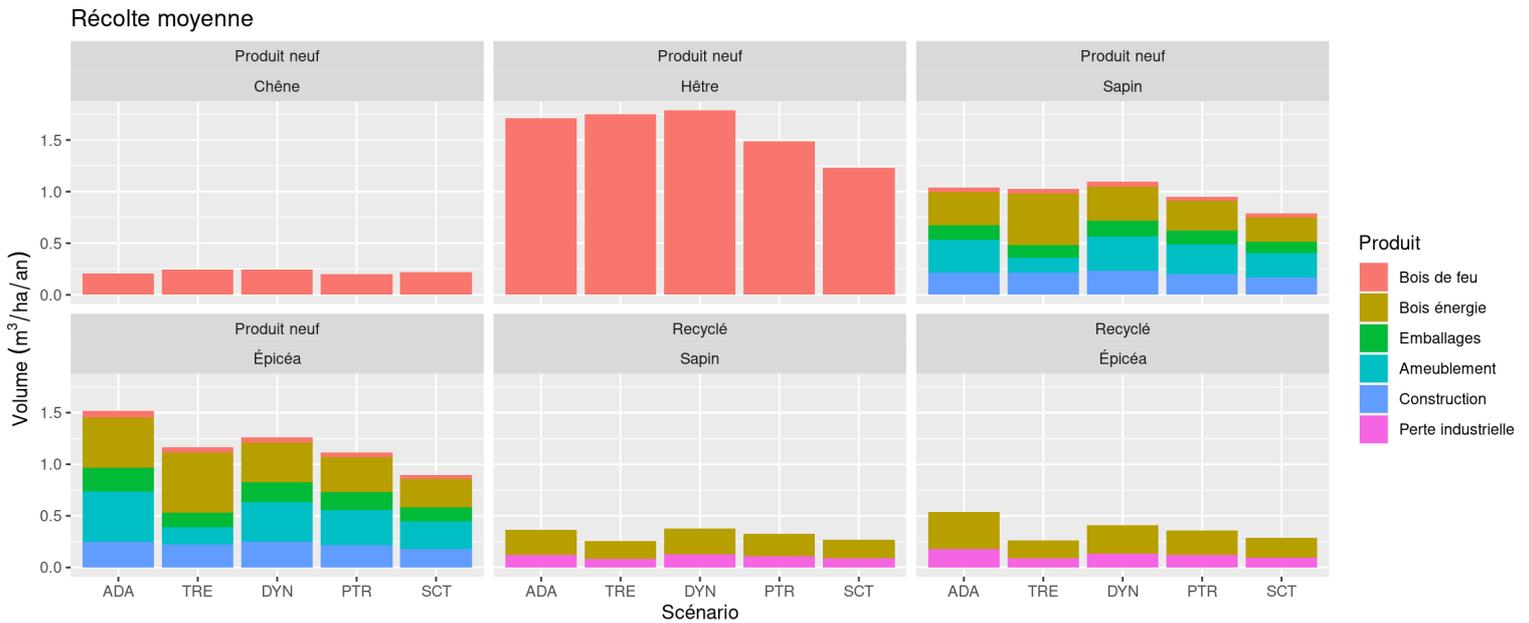


Récolte moyenne (m³/ha/an)

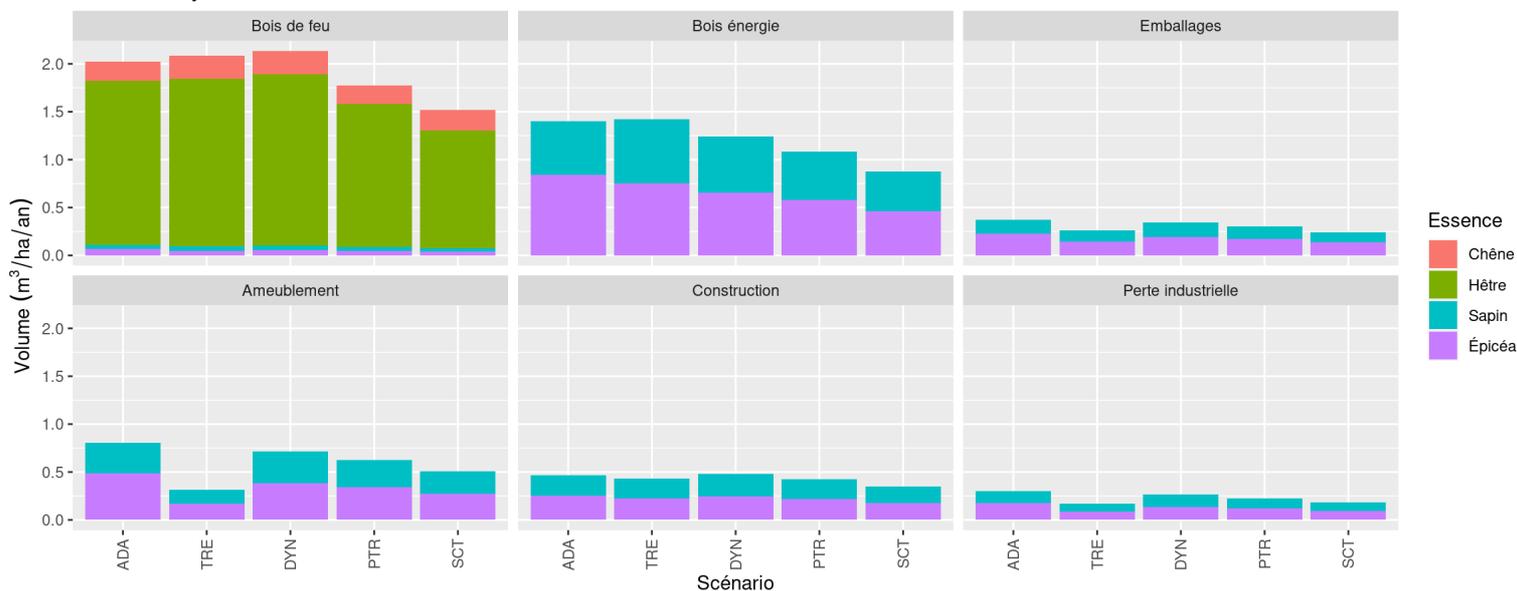


5.2.2 Par produits bois

La répartition par produit bois et essence est présentée sur les graphiques suivants. Les feuillus sont orientés uniquement vers le bois de feu. Le scénario TRE diffère des autres car une partie du résineux est orienté vers le bois énergie plutôt que l'ameublement.

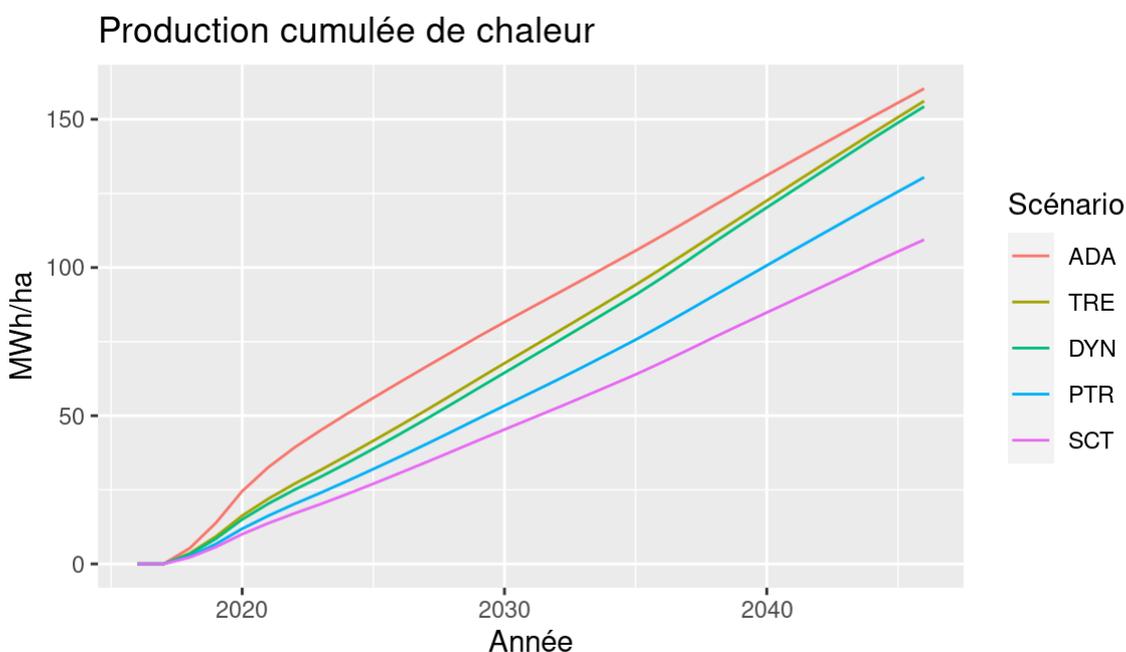


Récolte moyenne



5.3 Production de chaleur

La production cumulée de chaleur reflète la récolte de produits bois dans les différents scénarios : des quantités plus fortes de bois à destination de l'énergie pour ADA en début de simulation, mais un rattrapage ensuite pour les scénarios DYN et TRE.



5.4 Prévention des avalanches

5.4.1 Méthode de calcul

Seules les forêts situées à plus de 800 m d'altitude et avec une pente entre 28 et 55 degrés sont considérées comme jouant un rôle de prévention. Le mode de calcul est détaillé dans le document de Cordonnier et al. (2014). Les formules employées sont les suivantes, avec G la surface terrière en m^2/ha , \bar{D} le diamètre moyen du peuplement, $slope$ la pente en degrés. Pour les peuplements résineux (dans notre cas la catégorie sapin-épicéa) :

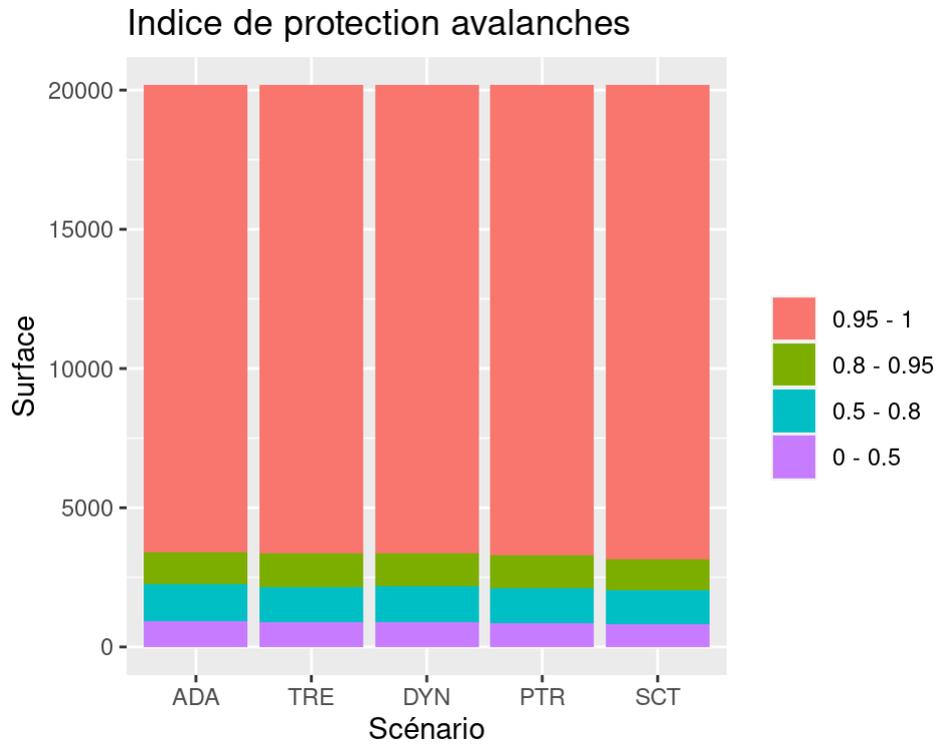
$$API = \min \left\{ \frac{G}{(0.2901 \times \bar{D} + 1.494) \times (0.1333 \times slope - 3)}, 0 \right\}$$

Pour les peuplements feuillus et mixtes :

$$API = \min \left\{ \frac{G}{(0.528 \times \bar{D} + 1.5566) \times (0.1333 \times slope - 3)}, 0 \right\}$$

5.4.2 Comparaison des scénarios

La majorité des polygones ont un indice proche de 1. Le scénario SCT a des indices de protection légèrement plus élevés, ADA légèrement plus faibles. Le graphique ci-dessous présente les surfaces de forêt avec un potentiel de prévention des avalanches en fin de simulation, selon leur catégorie d'indice de stabilisation du manteau neigeux.

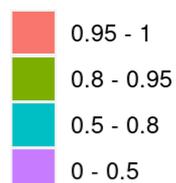


La carte de l'indice de protection contre les avalanches en 2046 pour le scénario PTR est présentée ci-dessous.

Scénario PTR



Avalanche protection index

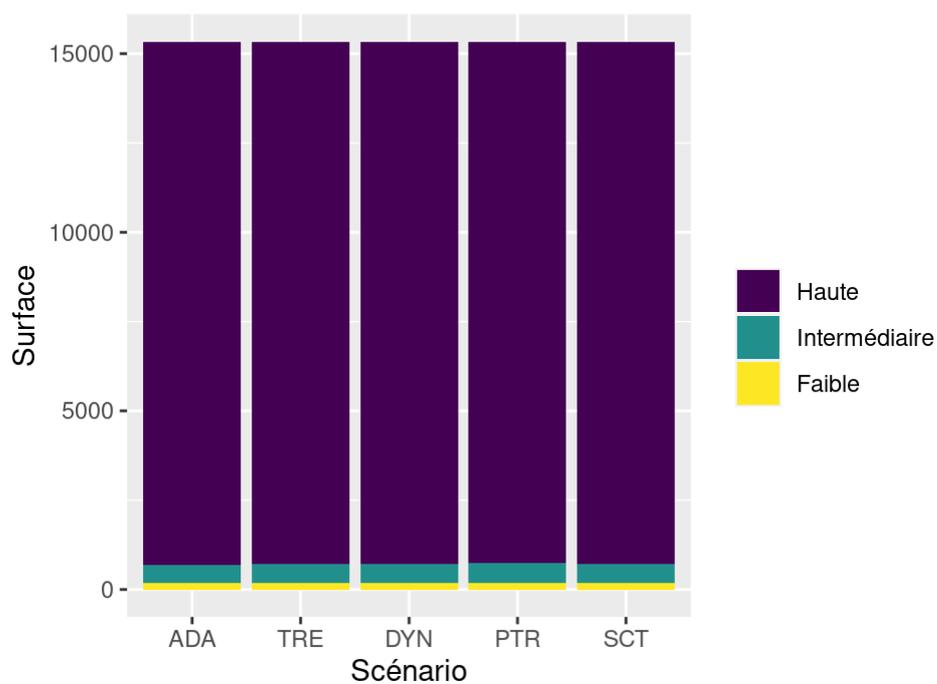


5.5 Protection contre les chutes de bloc

Le niveau de protection est calculé selon la méthodologie détaillée dans l'article de Dupire et al. (2016).

Le graphique ci-dessous présente les surfaces de forêt de protection en fin de simulation, selon leur niveau de protection vis à vis d'un aléa de chute de pierre d'un volume de 1 m^3 . La majorité des polygones a un niveau élevé de protection. Le scénario ADA présente légèrement plus de polygones avec un haut niveau de protection (+ 0.25 points de pourcentage par rapport à PTR).

Protection contre les chutes de bloc (1 m³)

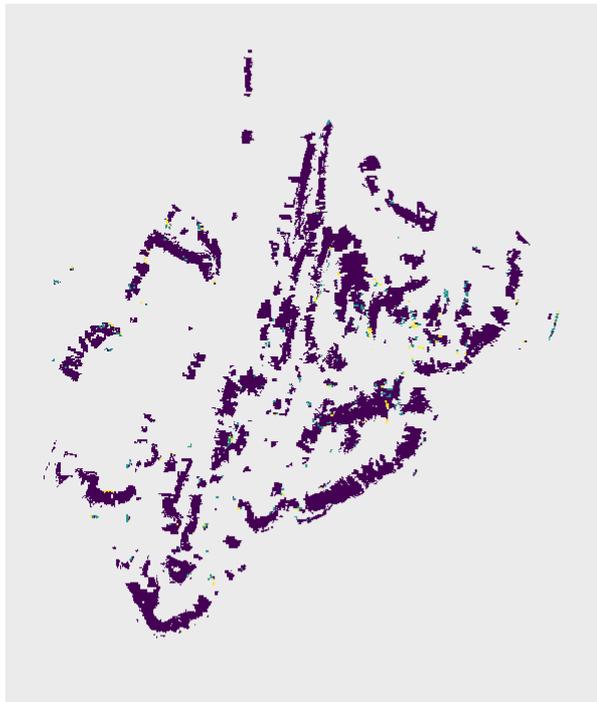


Le tableau ci-dessous présente le pourcentage des forêts de protection dans les trois classes de protection (haute, intermédiaire, faible), et l'écart en points de pourcentage par rapport au scénario PTR.

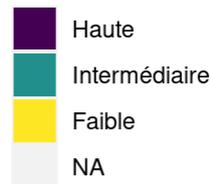
	Scénario	Haute	Intermédiaire	Faible	Écart avec PTR - Haute	Écart avec PTR - Intermédiaire	Écart avec PTR - Faible
1	ADA	95.50	3.37	1.13	0.25	-0.21	-0.04
4	TRE	95.37	3.46	1.17	0.12	-0.12	0.00
7	DYN	95.29	3.49	1.22	0.04	-0.09	0.05
10	PTR	95.25	3.58	1.17	0.00	0.00	0.00
13	SCT	95.26	3.52	1.23	0.01	-0.07	0.06

La carte du niveau de protection contre les chutes de blocs en 2046 pour le scénario PTR est présentée ci-dessous.

Scénario PTR



Protection contre les chutes de bloc



5.6 Érosion

5.6.1 Méthode de calcul

L'érosion est calculée via l'équation universelle des pertes en sol : $E = R \times K \times LS \times P \times C$ avec

- R l'érosivité des pluies,
- K l'érodabilité des sols,
- P le facteur lié aux pratiques anti-érosives,
- LS l'effet de la topographie sur l'érosion, et
- C l'effet de la végétation.

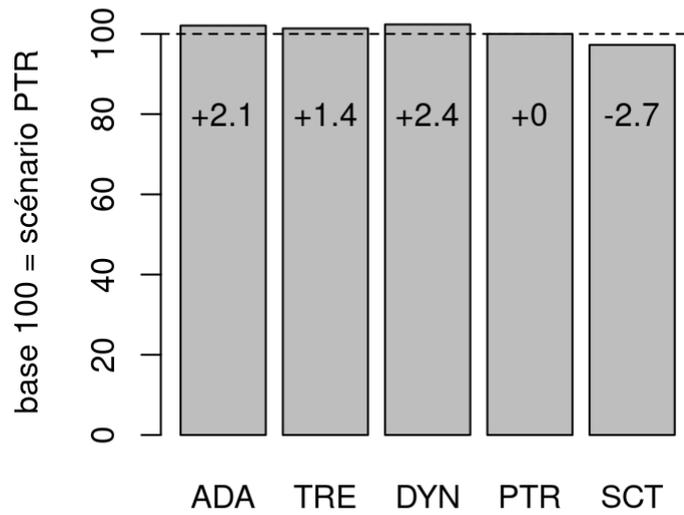
Pour les surfaces boisées, on peut estimer C par $C = 0.0001 + 0.0029 \times (1 - tc)$ avec tc le taux de couvert de la forêt. Les paramètres R , K , P et LS sont extraits pour chaque polygone à partir des données disponibles sur le site du [European soil data centre](#). Afin d'adapter le taux de couvert aux caractéristiques simulées des peuplements, un modèle liant le taux de couvert à la surface terrière G et au diamètre quadratique D_G a été calibré à partir des données IFN. Le modèle est de la forme $\log(tc) = \log(G)^a \times (b \times \log(D_G) + c)$. Les coefficients obtenus sont:

```
##           a           b           c
## 0.1722507 -0.0620161  3.6982703
```

5.6.2 Comparaison des scénarios

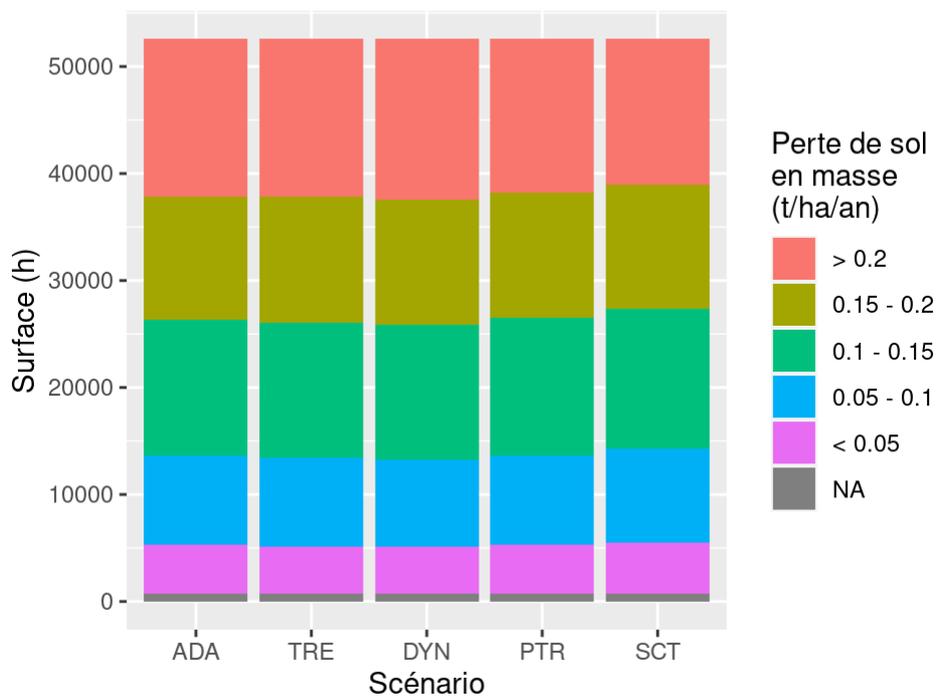
Le graphique ci-dessous présente la perte totale de sol en masse pour l'année 2046, le scénario PTR représentant la base 100.

Perte de sol en 2046

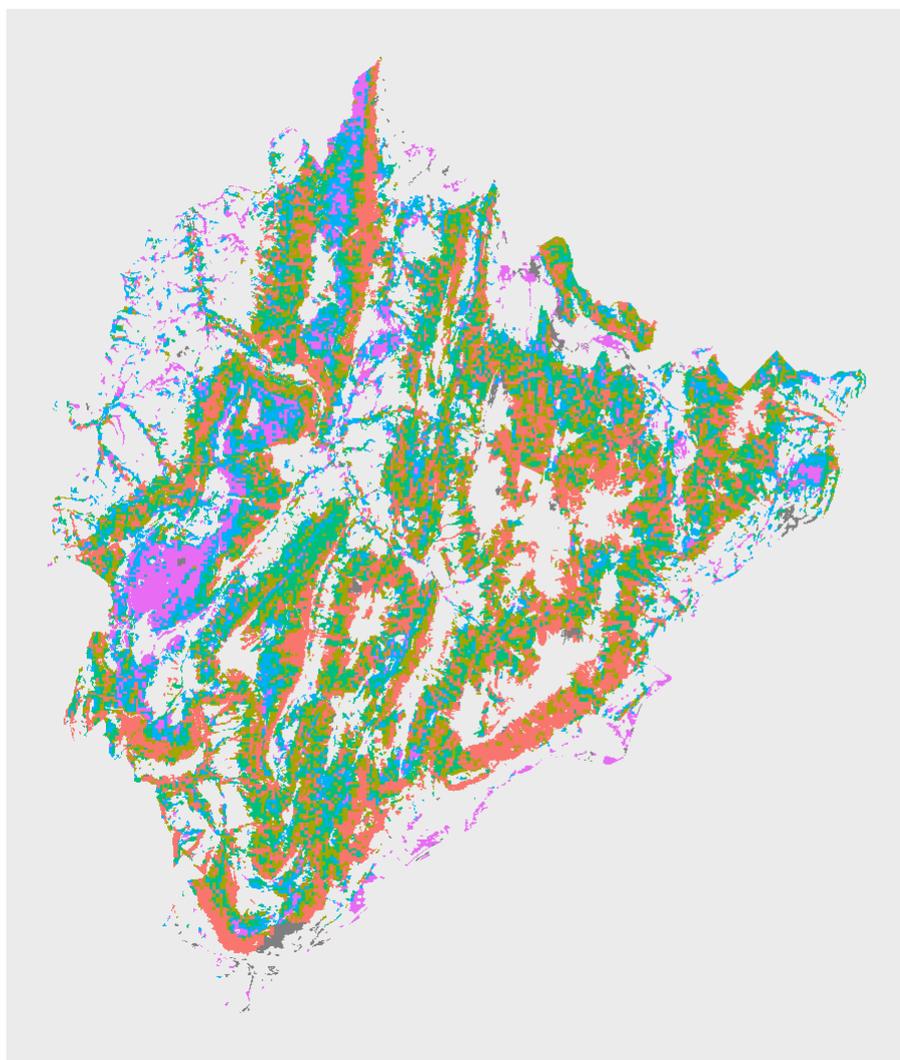


Le graphique suivant présente les surfaces ventilées par classe de perte de sol en 2046 pour les différents scénarios.

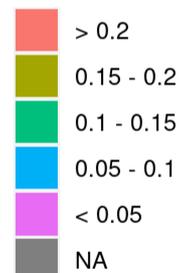
Surface de forêt par catégorie d'érosion



La carte de perte de sol en masse en 2046 pour le scénario PTR est présentée ci-dessous.



Perte de sol
(t/ha/an)



5.7 Biodiversité : indice de Shannon pour la flore

Cette section apporte un éclairage sur l'influence des scénarios identifiés sur la biodiversité. L'étude est focalisée sur la flore vasculaire, qui n'est qu'un seul aspect de la biodiversité. Par ailleurs, l'approche est réalisée à l'échelle du peuplement. Une perspective intéressante, mais en dehors de PROTEST, serait d'aborder le sujet à l'échelle du territoire (i.e. la biodiversité au sein d'un peuplement, versus la diversité des peuplements d'un territoire).

5.7.1 Méthode de calcul

L'indice de biodiversité calculé est l'indice de Shannon calculé sur les relevés de flore herbacée des données IFN, selon la méthode proposée par Zilliox et Gosselin (2014). Afin de pouvoir estimer cet indice pour les peuplements simulés, un modèle liant l'indice aux variables dendrométriques et environnementales est calibré. Le modèle retenu est de la forme:

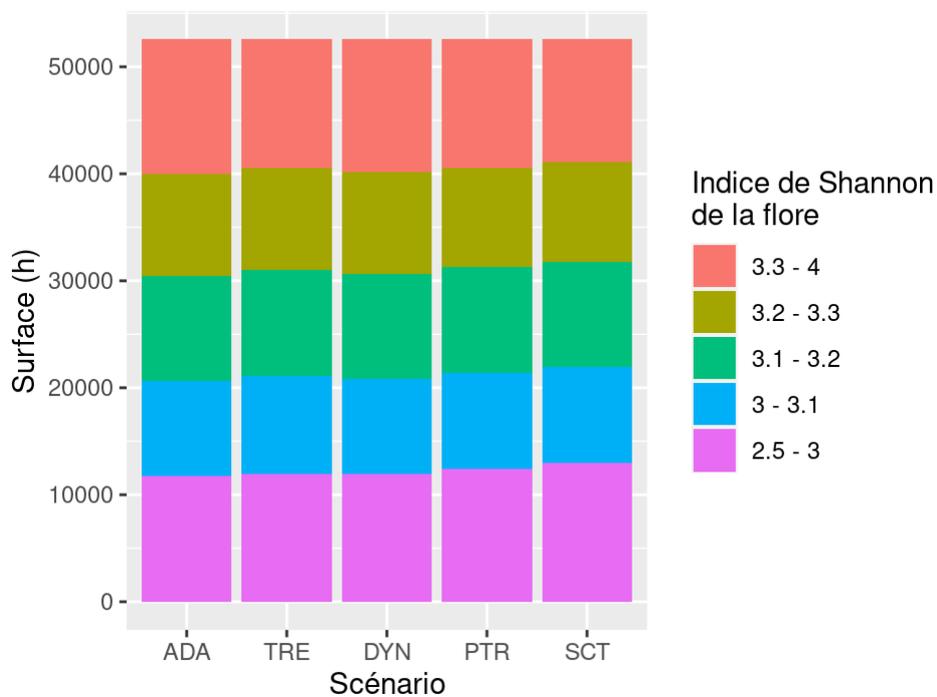
$H = a + b \times G + c \times expoEW + d \times altitude + e \times pente$ avec G la surface terrière en m^2/ha , $expoEW$ le sinus de l'exposition, l' $altitude$ exprimée en m et la $pente$ en degrés. Les coefficients obtenus sont :

##	a	G	expoEW	altitude	pente
##	2.6254618682	-0.0035276880	0.0355652583	0.0005631647	0.0015776114

5.7.2 Comparaison des scénarios

Le graphique suivant présente les surfaces ventilées par classe d'indice de Shannon en 2046 pour les différents scénarios. Comme le modèle prévoit une diminution de l'indice lorsque la surface terrière augmente, les scénarios présentant plus de surface en inaction enregistrent mécaniquement une diminution de l'indice de biodiversité.

Surface de forêt par catégorie de biodiversité

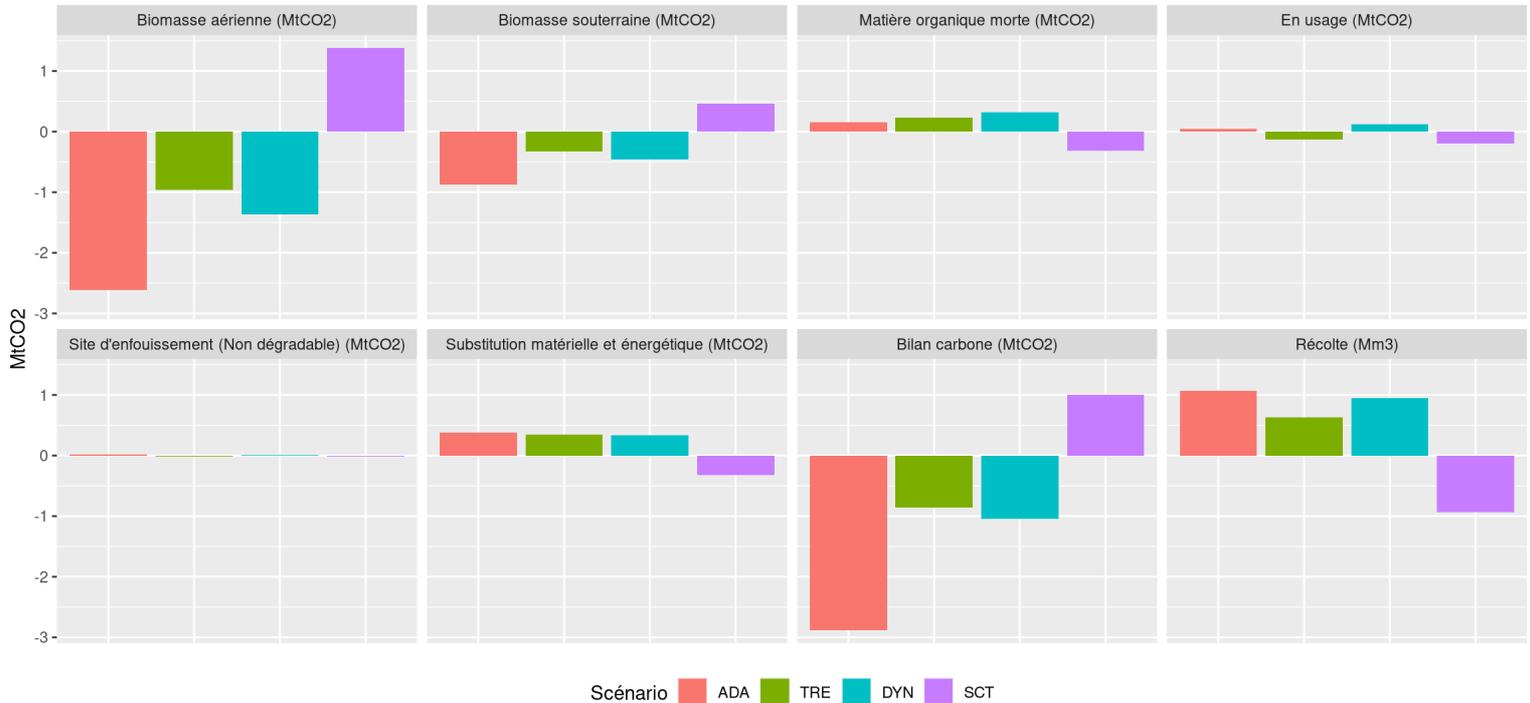


5.8 Compromis entre services

5.8.1 Stockage de carbone et production de bois

Le graphique ci-dessous présente les écarts de stock de carbone dans les différents compartiments ainsi que la récolte de bois, pour chaque scénario en relatif par rapport au scénario PTR.

Bilan carbone et récolte cumulée en 2046 : écart par rapport au scénario PTR



Sur la période simulée, la mobilisation supplémentaire de bois se fait au détriment du stockage. Pour le scénario ADA, pour chaque m³ récolté, 2.7 tonnes de CO₂ en moins sont stockées. Pour le scénario SCT, pour chaque m³ récolté en moins, 1.1 tonnes de CO₂ sont stockées en plus. Les différences du ratio tonne de CO₂ stockée par m³ récolté s'expliquent par les différences entre les scénarios. Dans ADA la récolte additionnelle se fait principalement par décapitalisation ; dans TRE c'est une utilisation en énergie qui est privilégiée.

	Bilan carbone (MtCO ₂)	Substitution matérielle et énergétique (MtCO ₂)	Récolte (Mm ³)	Ratio bilan/récolte (tCO ₂ /m ³)	Ratio substitution/récolte (tCO ₂ /m ³)
ADA	-2.88	0.38	1.07	-2.70	0.36

TRE	-0.86	0.34	0.63	-1.37	0.55
DYN	-1.04	0.33	0.95	-1.10	0.35
SCT	1.01	-0.32	-0.94	-1.07	0.34

L'effet de substitution reste faible sur la durée considérée, avec des valeurs de l'ordre de 0.34 tCO₂ évitée par m³ récolté supplémentaire, sachant que 1 m³ de bois stocke environ 1 tCO₂. Les valeurs sont similaires pour les différents scénarios, sauf TRE qui comporte une part plus forte d'utilisation en bois énergie et présente un ratio de 0.55 tCO₂/m³.

5.8.2 Érosion et production de bois

Par rapport au scénario PTR, l'augmentation de production de bois engendre une augmentation de la perte de sol. Pour un m³ supplémentaire récolté, une perte additionnelle de 5.2 à 6.6 kg de sol est estimée. La valeur est plus faible dans le scénario ADA car l'exploitation est augmentée dans des zones peu sujettes à l'érosion. Dans le scénario SCT, l'érosion diminue de 7.7 kg pour chaque m³ non récolté.

	Écart de récolte (m ³ /ha/an)	Écart de perte de sol (kg/ha/an)	Ratio récolte/perte de sol (kg/m ³)
ADA	0.7	3.5	5.2
TRE	0.4	2.3	5.8
DYN	0.6	4.0	6.6
SCT	-0.6	-4.6	7.7

5.8.3 Impact paysager de la gestion

Si le volume moyen récolté change peu entre les scénarios, il a été montré auparavant que des différences existent dans la répartition des intensités d'exploitation. Le scénario ADA qui comporte plus de peuplements gérés en régulier engendre ainsi une augmentation de 42% des coupes de plus 200 m³/ha. Selon la localisation de ces coupes, un effet paysager important pourrait être ressenti par les habitants du territoire.

5.8.4 Autres services

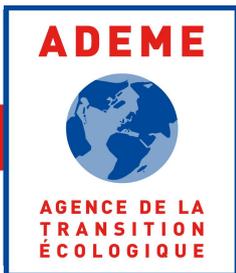
Pour les autres services, les différences sont très faibles au niveau agrégé. Une analyse spatialisée doit être menée afin de voir si des interactions sont remarquables au niveau local.

En ce qui concerne l'indice de biodiversité, la modélisation de la diversité floristique au niveau local n'est probablement pas un indicateur adapté pour un territoire forestier. La tendance moyenne de la diversité étant de diminuer avec la fermeture du couvert, globalement cet indice diminue lorsque les forêts se capitalisent. Là encore, il serait plus pertinent d'analyser les effets locaux et la répartition spatiale sur le territoire.

References

- Aussenac, R., T. Pérot, M. Fortin, F. de Coligny, J.-M. Monnet, et P. Vallet. 2021. « The Salem simulator version 2.0: a tool for predicting the productivity of pure and mixed forest stands and simulating management operations [version 2; peer review: 2 approved] ». *Open Research Europe* 1 (61). <https://doi.org/10.12688/openreseurope.13671.2>.
- Cordonnier, Thomas, Frédéric Berger, Ché Elkin, Tomas Lämås, et Maria Martinez. 2014. « ARANGE Deliverable D2.2: Models and linker functions (indicators) for ecosystem services - Updated version 28.03.2014 ». http://www.arange-project.eu/wp-content/uploads/ARANGE-D2.2_Models-and-linker-functions.pdf.
- Dufour-Kowalski, Samuel, Benoît Courbaud, Philippe Dreyfus, Céline Meredieu, et François de Coligny. 2012. « Capsis: an open software framework and community for forest growth modelling ». *Annals of Forest Science* 69 (2): 221-33. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0140-9>.
- Dupire, S., F. Bourrier, J.-M. Monnet, S. Bigot, L. Borgniet, F. Berger, et T. Curt. 2016. « Novel quantitative indicators to characterize the protective effect of mountain forests against rockfall ». *Ecological Indicators* 67: 98-107. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.023>.

- Nzeta Kenne, Vanneck. 2019. « Évaluation spatialisée des services écosystémiques forestiers sur le PNR du Massif des Bauges ». Mémoire de master, Master 2 AETPF, Université de Lorraine.
- ORCAE. 2021a. « Principes méthodologiques de production des données et indicateurs climat, air et énergie ». https://www.orcae-auvergne-rhone-alpes.fr/fileadmin/user_upload/mediatheque/ORCAE/Documents/Publications/ORCAE_Methodologie_globale.pdf.
- . 2021b. « Profil climat air énergie du Massif des Bauges (PNR) ». https://www.orcae-auvergne-rhone-alpes.fr/fileadmin/user_upload/mediatheque/orcae/Profils_v1/Profil_FR8000031.pdf.
- Pichancourt, Jean-Baptiste, Rubén Manso, François Ningre, et Mathieu Fortin. 2018. « A carbon accounting tool for complex and uncertain greenhouse gas emission life cycles ». *Environmental Modelling & Software* 107: 158-74. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.06.005>.
- Zilliox, Christophe, et Frédéric Gosselin. 2014. « Tree species diversity and abundance as indicators of understory diversity in French mountain forests: Variations of the relationship in geographical and ecological space ». *Forest Ecology and Management* 321: 105-16. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.049>.



www.ademe.fr

