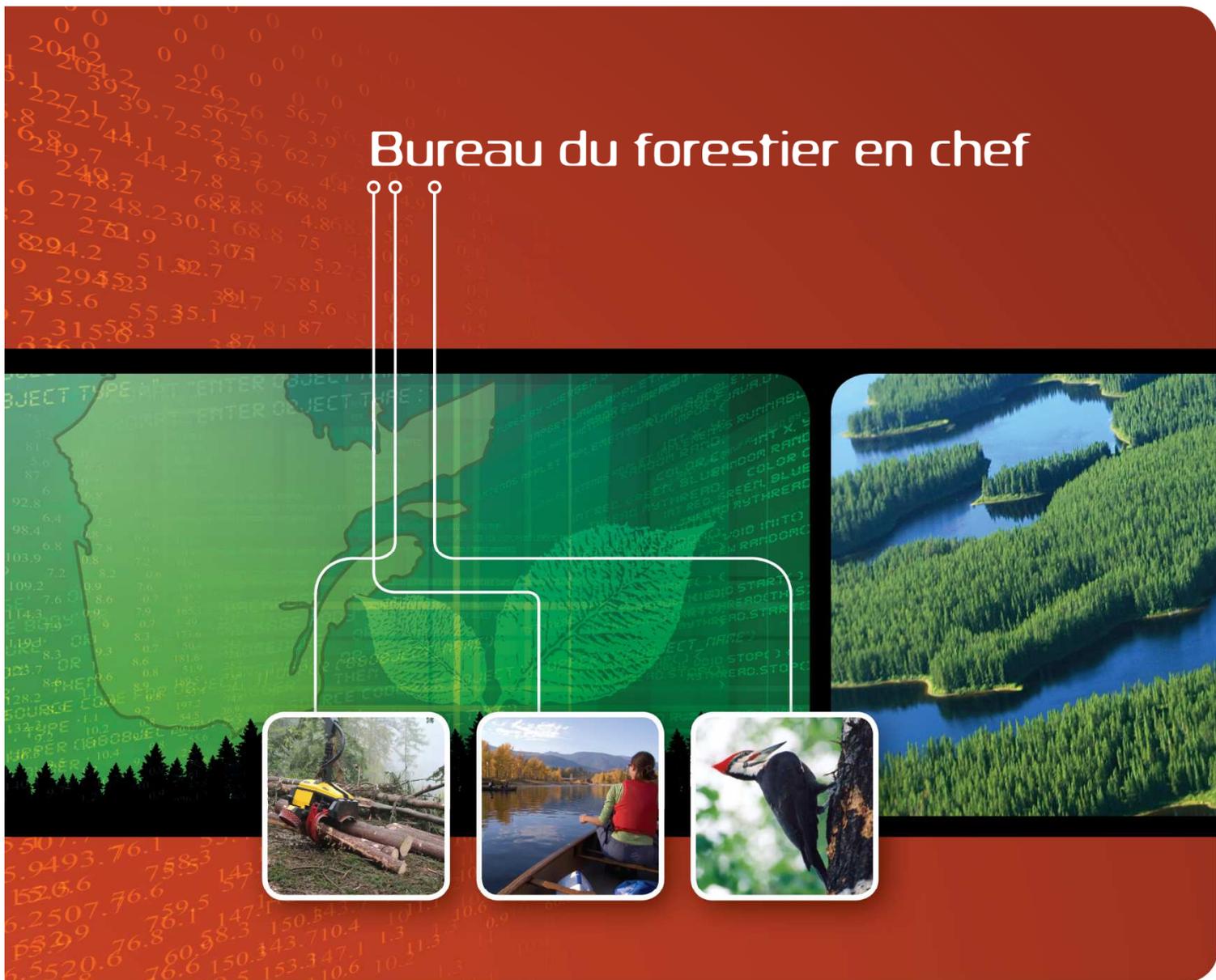


Analyses de sensibilité

Effets de la fluctuation de quatre variables sur les possibilités forestières

Bureau du forestier en chef



Analyses de sensibilité - Effets de la fluctuation de quatre variables sur les possibilités forestières

Coordination

Marc-Antoine Lambert, ing.f.

Rédaction

Gabriel Roy, ing.f., Ph.D.

Martin Côté, ing.f.

Lucie Bertrand, ing.f., Ph.D.

Marie-Josée Blais, ing.f., M.Sc.

Jean Girard, ing.f., M.Sc.

Collaboration

Simon Guay, ing.f.

Révision

France Fortin

Référence

Bureau du forestier en chef, 2017. Analyses de sensibilité – Effets de la fluctuation de quatre variables sur les possibilités forestières. Gouvernement du Québec. Roberval, Québec, 27 pages.

La présente publication est accessible dans Internet à l'adresse suivante :
www.forestierenchef.gouv.qc.ca

Le 9 août 2017

Bureau du forestier en chef

845, boulevard Saint-Joseph

Roberval (Québec) G8H 2L6

Téléphone : 418 275 7770

Courriel : bureau@fec.gouv.qc.ca

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	iii
TABLEAUX ET FIGURES	iv
MISE EN CONTEXTE	1
1 DESCRIPTION DES ANALYSES	4
1.1 Identification des variables sensibles	4
1.2 Évaluation du degré de sensibilité	4
1.3 Analyse de la robustesse des tendances	4
2 MÉTHODOLOGIE	7
2.1 Âge de maturité	7
2.2 Surface terrière	7
2.3 Rendement des plantations	7
2.4 Volume marchand brut	7
3 SENSIBILITÉ AUX SCÉNARIOS SYLVICOLES	8
4 DEGRÉ DE SENSIBILITÉ DES VARIABLES	11
4.1 Âge de maturité	11
4.2 Surface terrière	12
4.3 Rendement des plantations	13
4.4 Volume marchand brut	15
5 PRÉCISIONS SUR LA ROBUSTESSE DES TENDANCES	17
5.1 Âge de maturité	17
5.2 Volume marchand brut	18
6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	20
6.1 Âge de maturité	20
6.2 Surface terrière	20
6.3 Rendement des plantations	21
6.4 Volume marchand brut	21
6.5 Recommandations	21
RÉFÉRENCES	22
ANNEXE DESCRIPTION DES UNITÉS D'AMÉNAGEMENT SÉLECTIONNÉES	23
Unité d'aménagement 011-51	23
Unité d'aménagement 023-52	23
Unité d'aménagement 043-51	24
Unité d'aménagement 043-52	24
Unité d'aménagement 073-51	25
Unité d'aménagement 083-51	26
Unité d'aménagement 086-64	26
Unité d'aménagement 111-61	27



TABLEAUX ET FIGURES

Tableau 1. Caractéristiques des unités d'aménagement sélectionnées	3
Tableau 2 Variables analysées et modifications apportées aux valeurs.....	5
Tableau 3 Résultats de la valeur de l'objectif primaire (m ³ / 5 ans) des scénarios analysés.....	9
Tableau 4 Illustration d'une plage des critères d'admissibilité pour un exemple sans modification (A) et effet obtenu sur les critères d'admissibilité lorsque la surface terrière est modifiée (B)	10
Tableau 5 Exemple d'une modification des variables « surface terrière » (ST) et « volume marchand brut » (VOL) qui amène à une plage de retour inexistante (sections roses), ce qui provoque une solution irréalisable	10
Tableau 6 Activités d'aménagement en relation avec les courbes de rendement des plantations de la figure 4.....	14
Tableau 7 Écart (%) de la valeur des possibilités forestières pour les cinq variations de l'âge de maturité (A _{gemat})	18
Tableau 8 Écart (%) de la valeur des possibilités forestières en fonction des fluctuations du « volume marchand brut »	18
Figure 1 Localisation des unités d'aménagement retenues pour les analyses de sensibilité ...	2
Figure 2 Courbes illustrant l'effet de la modulation de l'âge de maturité (période de 5 ans) sur les possibilités forestières, exprimées en % par rapport au modèle de base.....	12
Figure 3 Courbes illustrant l'effet de la surface terrière sur les possibilités forestières, formulées par la différence en % du niveau de récolte par rapport au modèle de base.	13
Figure 4 Effet de la fluctuation du rendement des plantations sur les possibilités forestières par rapport au modèle de base (%).....	15
Figure 5 Effet de la fluctuation du volume marchand brut sur les possibilités forestières, par rapport au modèle de base (%).....	16
Figure 6 Effet de la fluctuation de l'âge de maturité exprimé en périodes de 5 ans sur les possibilités forestières, par rapport au modèle de base (%).....	17
Figure 7 Effet de la fluctuation du volume marchand brut sur les possibilités forestières, par rapport aux modèles de base (%)	19



MISE EN CONTEXTE

Dans des modèles aussi complexes que ceux du calcul des possibilités forestières (CPF), il est difficile de déterminer la précision de la prédiction par des méthodes conventionnelles, notamment parce que l'erreur associée à plusieurs des intrants est inconnue. Il est toutefois possible d'effectuer des analyses de sensibilité pour certaines variables. Le procédé consiste à modifier la valeur d'une variable, utilisée comme intrant au CPF et à comparer les résultats. Les analyses permettent d'évaluer leur degré de sensibilité et d'obtenir des informations sur leur comportement (tendance).

Le scénario 3 (complet avant la spatialisation) de la période 2015-2018 a été choisi comme référence pour ces analyses de sensibilité. Il exclut les réductions associées aux bandes riveraines, la spatialisation de la récolte réalisée avec Stanley et les décisions du Forestier en chef lors de la détermination. La seule modification apportée au scénario par rapport à l'original est l'utilisation de la fonction « ***COMPRESSTIME** », qui a pour objectif d'accélérer le temps de résolution.

Les unités d'aménagement (UA) retenues pour les analyses sont les suivantes (figure 1) :

- 011-51
- 023-52
- 073-51
- 083-51
- 086-64
- 043-51
- 043-52
- 111-61

L'annexe 1 décrit les UA à partir des rapports de détermination des possibilités forestières de la période 2015-2018.

Les variables retenues et vérifiées sont :

- l'âge de maturité
- la surface terrière
- le rendement des plantations
- le volume marchand brut

Les analyses, qui ont été réalisées avec Woodstock, avaient pour objectif de maximiser la récolte à la période critique¹.

¹ Voir le Manuel de détermination des possibilités forestières 2015-2018 <http://forestierenchef.gouv.qc.ca/documents/calcul-des-possibilites-forestieres/2013-2018/manuel-de-determination-des-possibilites-forestieres/> (consulté le 5 juin 2017)

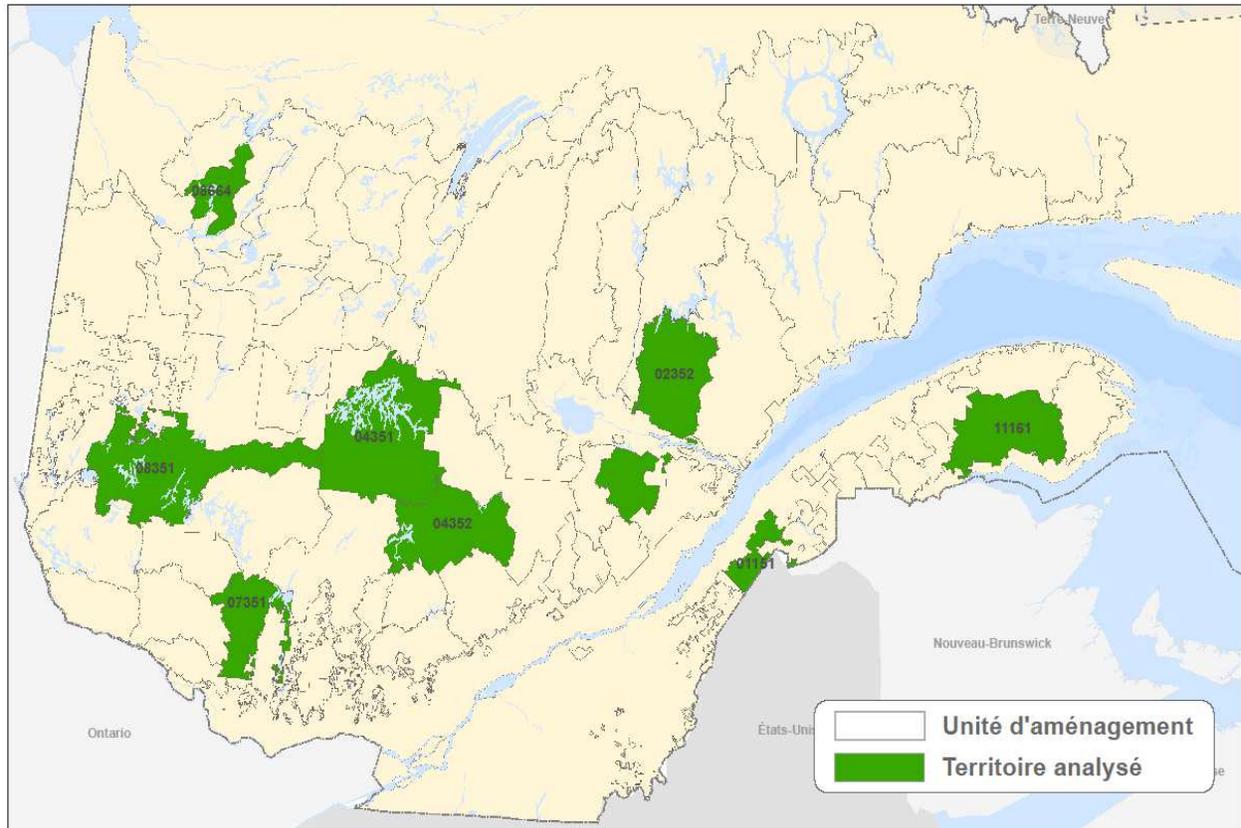


Figure 1 Localisation des unités d'aménagement retenues pour les analyses de sensibilité

Le tableau 1 présente quelques caractéristiques des UA sélectionnées. Elles sont classées, de gauche à droite, selon la prédominance des feuillus tolérants (FT). Ainsi, 55 % de la superficie destinée à l'aménagement de l'UA 073-51 est composée de feuillus tolérants. Progressivement, la superficie de FT diminue avec la latitude. Ainsi, l'UA la plus nordique, 086-64 ne renferme aucune superficie en FT. La quantité de bois récolté en coupes totales et en coupes partielles montre la même propension. Les possibilités forestières des deux UA les plus au sud proviennent principalement de coupes partielles alors que dans l'UA la plus nordique (086-64), ces dernières proviennent surtout des coupes totales.

Tableau 1. Caractéristiques des unités d'aménagement sélectionnées

Paramètres	Unités d'aménagement							
	073-51	011-51	043-52	111-61	023-52	083-51	043-51	086-64
Coupes totales (ha/an)	2 000	590	6 890	4 150	7 360	7 660	6 640	1 790
Coupes partielles (ha/an)	3 200	980	2 120	1 220	880	440	1 240	140
Plantations et regarni (ha/an)	780	210	2 890	1 950	2 600	1 860	2 610	900
Reboisement des CT (%)	30	25	30	17	34	24	32	50
Feuillus tolérants (ha)	182 941	24 736	49 185	24 337	31 270	31 370	0	0
Superficie récoltable en feuillus tolérants (%)	55	16	9	5	4	4	0	0
Forêt inéquienne (ha)	245 000	46 000	42 000	75 000	130 000	50 000	0	0
Superficie disponible à la récolte (ha)	332 620	154 660	546 500	486 740	781 760	784 250	663 540	159 640

1 DESCRIPTION DES ANALYSES

Les analyses de sensibilité permettent d'évaluer l'impact de la variation d'une variable sur les possibilités forestières. La sensibilité des variables se rapporte à la plus petite modification de leur valeur amenant un changement au niveau des possibilités forestières. Ces dernières représentent le volume marchand brut toutes essences récolté en m³/an (**OVOLTOTREC**). L'analyse a été réalisée en trois étapes. Le tableau 2 montre les fluctuations apportées aux valeurs des quatre variables.

1.1 Identification des variables sensibles

- Les analyses se basent sur la réponse obtenue à l'optimisation de la solution (objectif primaire).
- Une solution irréalisable indique que le calcul est sensible à la modification de la variable testée, c'est-à-dire que la fluctuation imposée rend impossible la résolution du modèle. Généralement, cela indique que la modification amène une condition dont le respect est imposé.
- Les analyses utilisent le modèle élaboré, sans simplification.
- Les analyses englobent les modèles de cinq UA (gradient nord-sud et est-ouest).
- Les résultats de cette étape sont présentés à la section 3.

1.2 Évaluation du degré de sensibilité

- Le degré de sensibilité mesure l'écart de possibilités forestières entre le modèle de référence, sans aucune modification et le résultat du scénario modifié aux fins des analyses.
- Les modèles sont utilisés sans simplification.
- Cette étape concerne uniquement les modèles qui ont donné une solution réalisable à l'étape précédente.
- Les résultats sont présentés à la section 4.

1.3 Analyse de la robustesse des tendances

- La robustesse se rapporte au degré de sensibilité d'une variable.
- Pour une même condition, soit la modification d'une variable, la résolution du modèle génère un résultat similaire à celui des autres modèles.
- Cette analyse consiste essentiellement à déterminer la possibilité d'extrapoler les tendances observées dans un modèle.
- L'analyse demande de simplifier le modèle sans trop en modifier le scénario sylvicole.
- Cette étape utilise sept modèles, uniquement pour les variables « âge de maturité » et « volume marchand ».

- Les résultats sont détaillés à la section 5.

Variables	Analyses	Valeurs vérifiées
Âge de maturité (années)	<ul style="list-style-type: none"> • Critères d'opérabilité utilisés pour déclencher certains traitements, surtout les coupes totales • Vérifie l'effet de devancer ou de retarder l'admissibilité des peuplements à la récolte 	+2 périodes (prématurité* de 10 ans) +1 période (prématurité de 5 ans) 0 -1 période (effet de postmaturité** de 5 ans) -2 périodes (effet de postmaturité de 10 ans)
Surface terrière (m ² /ha)	<ul style="list-style-type: none"> • Critères d'opérabilité utilisés pour déclencher les actions de coupe partielle • Vérifie l'effet d'allonger les rotations dans un peuplement inéquienne 	0 m ² +1 m ² +2 m ² +4 m ²
Rendement des plantations (m ³ /ha)	<ul style="list-style-type: none"> • Vérifie l'effet du rendement des plantations sur les possibilités forestières 	+30 % +15 % +10 % 0 % -10 % -15 % -25 %
Volume marchand brut (m ³ /ha)	<ul style="list-style-type: none"> • Vérifie la surestimation ou la sous-estimation du volume marchand des strates sur les possibilités forestières 	+ 15 % + 10 % + 5 % 0 % - 5 % - 10 % - 15 %

*Devancer l'admissibilité du peuplement au traitement sylvicole

**Retarder l'admissibilité du peuplement au traitement sylvicole

Tableau 2 Variables analysées et modifications apportées aux valeurs

Afin de vérifier la robustesse des tendances observées dans les analyses du degré de sensibilité, sept modèles d'optimisation ont été simplifiés. Pour répondre à cet objectif, les modèles des UA 043-51, 043-52 et 111-61 ont été ajoutés (meilleure représentativité des sous-domaines bioclimatiques). À la suite de problèmes rencontrés dans l'exécution du modèle de l'UA 011-51, ce dernier a été retiré de la sélection.

Pour alléger les modèles, la procédure suivante a été adoptée :

- Activation du « ***COMPRESSTIME** » (10,2, 15,5, 20,10)
- Élimination des plus petites superficies jusqu'à concurrence de 2 % du territoire total
- Désactivation des contraintes des niveaux préétablis de traitement (sylviculture imposée)
- Désactivation des contraintes de dimension des bois
- Normalisation des niveaux de récolte en utilisant une fonction « **_EVEN** » (1 %)

La même syntaxe a été appliquée pour vérifier l'effet de la fluctuation des variables testées.

Initialement, cette étape devait se concentrer sur toutes les variables identifiées. Toutefois, la variable « rendement des plantations » n'indique pas de tendance marquée suite aux vérifications de la sensibilité (résultats de l'étape 1). En outre, il n'a pas été possible d'analyser la variable « surface terrière » car la majorité des modèles étaient « *irréalisables* » (résultats des étapes 1 et 2).

De fait, pour valider la robustesse des tendances, seules les variables « âge de maturité » et « volume marchand brut » sont utilisables.



3 SENSIBILITÉ AUX SCÉNARIOS SYLVICOLES

Le tableau 3 présente les valeurs de la fonction objective² (primaire) pour tous les scénarios de fluctuation des variables. Afin d'obtenir un gradient nord-sud et est-ouest, cinq UA ont été analysées. Globalement, ces données indiquent que les variables « âge de maturité » et « surface terrière » affectent la réalisation des modèles pour les deux UA à prédominance de feuillus tolérants. Ce sont des UA principalement aménagées sous les régimes irrégulier et jardiné. Ce dernier est particulièrement privilégié dans l'UA 073-51, c'est-à-dire celle qui contient la plus grande superficie de feuillus tolérants à structure irrégulière (tableau 1).

Le tableau 3 montre qu'un seul modèle est réalisable pour toutes les modifications de la valeur de la variable « volume marchand brut ». De fait, ce dernier est de loin la variable la plus sensible.

Le rendement des plantations ne présente pas de problème dans l'exécution de ces scénarios. C'est la variable la moins sensible parmi les quatre analysées.

Les solutions irréalisables s'expliquent de deux façons :

1. Le critère d'admissibilité à une action sylvicole est délimité selon une plage commune à deux variables. Dans l'exemple suivant, l'admissibilité est autorisée selon une plage comprise entre une surface terrière de 25 à 35 m²/ha et un âge de maturité s'étalant de -5 à -3 (tableau 4). Le critère d'admissibilité est respecté uniquement pour l'âge de maturité de -5 (tableau 4-A).

Toutefois, en modifiant la valeur de la surface terrière (ajout de 4 m²/ha), il est impossible de trouver une plage commune aux deux variables utilisées simultanément comme critère d'admissibilité (tableau 4-B).

Cette modification d'un critère d'admissibilité peut générer une superficie insuffisante, entraînant le non-respect d'une contrainte de superficie minimale à exécuter pour une action. La solution devient alors irréalisable par l'impossibilité de respecter cette contrainte.

2. Lorsqu'une valeur est modifiée pour une variable utilisée comme critère d'admissibilité, sans modifier les valeurs de celle utilisée comme plage de retour, l'activité sylvicole ne peut être réalisée. Dans l'exemple du tableau 5, une action admissible pour une surface terrière comprise entre 22 et 30 m²/ha, doit se repositionner sur la courbe du volume marchand selon une plage s'étalant entre 120 et 149,9 m³/ha.

En modifiant la surface terrière, la valeur de 22,91 m²/ha correspond alors à un volume de 116,53 m³/ha, valeur qui ne respecte pas la limite inférieure de la plage de retour précisée dans le modèle à 120 m³/ha. La solution devient alors irréalisable à cause de l'incapacité de construire une matrice intègre. Cette même situation est valable lorsque les valeurs de volume sont réduites. La valeur de 22,65 m²/ha ne peut trouver une plage de retour assignée.

² Valeur qui maximise les possibilités forestières à la période critique, par période de cinq ans

Tableau 3 Résultats de la valeur de l'objectif primaire (m³ / 5 ans) des scénarios analysés

Intrants	Valeurs modifiées	Unités aménagement				
		073-51-F	011-51-M	083-51-M	023-52-R	086-64-R
Scénario de base		3 134 718	1 244 025	5 775 290	6 487 967	1 215 470
Âge de maturité (ex : -10 = admissible 10 ans plus jeune)	- 10 ans	IRR	IRR	5 843 965	6 972 818	1 312 206
	- 5 ans	3 170 904	IRR	5 870 286	6 808 684	1 290 844
	+ 5 ans	IRR	1 151 332	5 577 114	6 197 702	1 125 866
	+ 10 ans	IRR	IRR	4 850 340	5 734 388	1 044 052
Surface terrière	+ 1 m ²	IRR	IRR	5 753 803	6 487 950	1 215 470
	+ 2 m ²	IRR	IRR	5 638 319	6 487 959	1 215 470
	+ 4 m ²	IRR	IRR	5 624 844	6 465 927	1 215 470
Rendement des plantations	30 %	3 164 257	1 780 111	6 068 233	IRR	1 223 516
	15 %	3 148 597	1 772 614	5 923 534	IRR	1 219 578
	10 %	3 117 180	1 769 666	5 868 527	6 965 447	1 417 979
	-10 %	3 105 793	915 311	5 642 198	6 013 280	1 189 227
	-15 %	3 105 793	916 643	5 578 421	5 696 256	1 174 133
	-25 %	3 148 597	847 500	5 442 888	5 226 703	1 129 498
Volume marchand brut	15 %	3 326 500	IRR	7 100 469	IRR	IRR
	10 %	3 413 673	IRR	6 769 441	IRR	IRR
	5 %	3 289 143	IRR	6 363 979	IRR	1 276 833
	-5 %	3 753 500	IRR	5 121 761	IRR	IRR
	-10 %	3 270 000	IRR	IRR	IRR	IRR
	-15 %	3 038 000	IRR	IRR	IRR	IRR

Tableau 4 Illustration d'une plage des critères d'admissibilité pour un exemple sans modification (A) et effet obtenu sur les critères d'admissibilité lorsque la surface terrière est modifiée (B)

A			B (yG_S + 4 m ² /ha)		
_Age	yAgeMat	yG_S	_Age	yAgeMat	yG_S
4	-8	9,0	4	-8	13,0
5	-7	18,0	5	-7	22,0
6	-6	27,0	6	-6	31,0
7	-5	32,0	7	-5	36,0
8	-4	35,7	8	-4	39,7
9	-3	38,7	9	-3	42,7
10	-2	40,7	10	-2	44,7

Tableau 5 Exemple d'une modification des variables « surface terrière » (ST) et « volume marchand brut » (VOL) qui amène à une plage de retour inexistante (sections roses), ce qui provoque une solution irréalizable

_Age	Actuel		115 % ST		85 % VOL	
	yG_S	yV_S	yG_S	yV_S	yG_S	yV_S
13	19,92	116,53	22,91	116,53	19,92	99,05
14	21,08	125,27	24,24	125,27	21,08	106,48
15	21,85	132,83	25,13	132,83	21,85	112,91
16	22,65	140,42	26,05	140,42	22,65	119,36
17	23,13	146,00	26,60	146,00	23,13	124,10
18	23,60	151,59	27,14	151,59	23,60	128,85



4 DEGRÉ DE SENSIBILITÉ DES VARIABLES

Le degré de sensibilité (%) se définit comme la différence entre les valeurs des possibilités forestières (m^3/an) du scénario de référence et celles des scénarios modifiés. Pour réaliser cette étape, seules les UA dont les modèles ont été résolus ont été retenues (tableau 3). En cours d'analyse, des problèmes sont survenus avec l'UA 011-51, elle a donc été retirée pour les étapes subséquentes.

4.1 Âge de maturité

La figure 2 suggère une tendance sur les possibilités forestières bien définie, représentée par des courbes quasi parallèles. Elle indique que retarder l'admissibilité diminue le potentiel de récolte alors que la prématurité l'augmente. À l'intérieur des niveaux de variation, soit ± 10 ans, les possibilités forestières varient d'environ +7 % en prématurité à -15 % en effet de postmaturité. Hâter l'admissibilité amène donc une influence plus marquée sur les possibilités. L'écart engendré, surtout en effet de postmaturité, demeure important par rapport à la valeur des possibilités forestières. Cette variable montre également un degré de sensibilité élevé, c'est-à-dire un effet important sur les possibilités forestières.

Pour un intervalle court de cinq ans et moins, l'écart imposé sur les possibilités forestières est de plus ou moins 5 %. Toutefois, la véritable fluctuation de la variable (terme d'erreur) véhiculée dans le CPF ne peut être déterminée. Il n'est donc pas possible de préciser l'écart réel qu'entraîne cette variable. En outre, il est périlleux d'extrapoler cette tendance aux UA plus au sud (où les modèles révèlent une solution irréalisable), puisqu'elles ne donnent aucune information sur le degré de sensibilité.

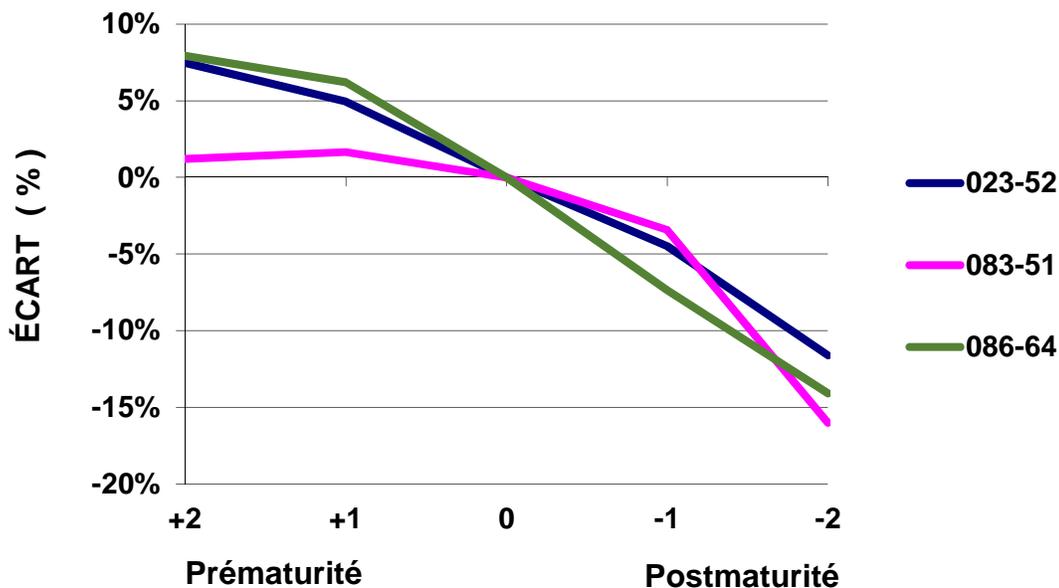


Figure 2 Courbes illustrant l'effet de la modulation de l'âge de maturité (période de 5 ans) sur les possibilités forestières, exprimées en % par rapport au modèle de base

4.2 Surface terrière

Les résultats de la figure 3 illustrent une tendance nord-sud bien marquée, mais pas nécessairement robuste. Dans un régime irrégulier ou jardiné, la variable « surface terrière » est très utilisée comme critère d'opérabilité des feuillus tolérants au traitement de coupes partielles (CP) et de coupes de jardinage (CJ), ainsi qu'aux éclaircies commerciales et aux CP des régimes réguliers. En augmentant la valeur de la surface terrière, le critère d'admissibilité est plus difficile à atteindre. La superficie admissible à la récolte tend, de fait, à diminuer. Cela peut expliquer la réduction des possibilités forestières.

À la figure 5, l'UA 086-64 n'indique aucune différence entre les trois intervalles. La variable « surface terrière » est peu ou pas utilisée comme critère d'admissibilité dans les UA les plus nordiques. Cette variable interfère peu sur l'exécution du modèle. Dans l'UA 083-51, située plus au sud dans le domaine de la sapinière à bouleau blanc et à bouleau jaune, une superficie plus importante est traitée par coupe d'amélioration (CA) ou par coupe progressive régulière (CProg) (annexe 2). Ces traitements sont exécutés selon un critère d'admissibilité défini par la surface terrière, quelquefois en combinaison avec la variable « âge de maturité ».

De fait, les résultats indiquent une plus grande influence de cette variable qui se traduit par une diminution des possibilités forestières. L'écart enregistré pour l'intervalle extrême de surface terrière (4 m²/ha) n'est que de -2,5 %. Considérant la complexité des modèles de CPF, cette

différence ne représente somme toute qu'un faible écart par rapport à la valeur prédite par le modèle de base. Cette variable est sensible, mais semble moins influencer le niveau de récolte que la variable « âge de maturité ».

La figure 3 suggère deux tendances : d'une part, un effet de cette variable de plus en plus marqué avec la latitude ; d'autre part, une réduction des possibilités forestières dans les UA où prédomine un régime d'aménagement irrégulier et jardiné. Puisqu'aucune réponse n'est disponible pour les UA les plus au sud, leur degré de sensibilité ne peut être précisé (tableau 3). Il n'est donc pas possible d'extrapoler ces tendances, faute de pouvoir obtenir de l'information dans les modèles qui sont réellement influencés par la variable « surface terrière ».

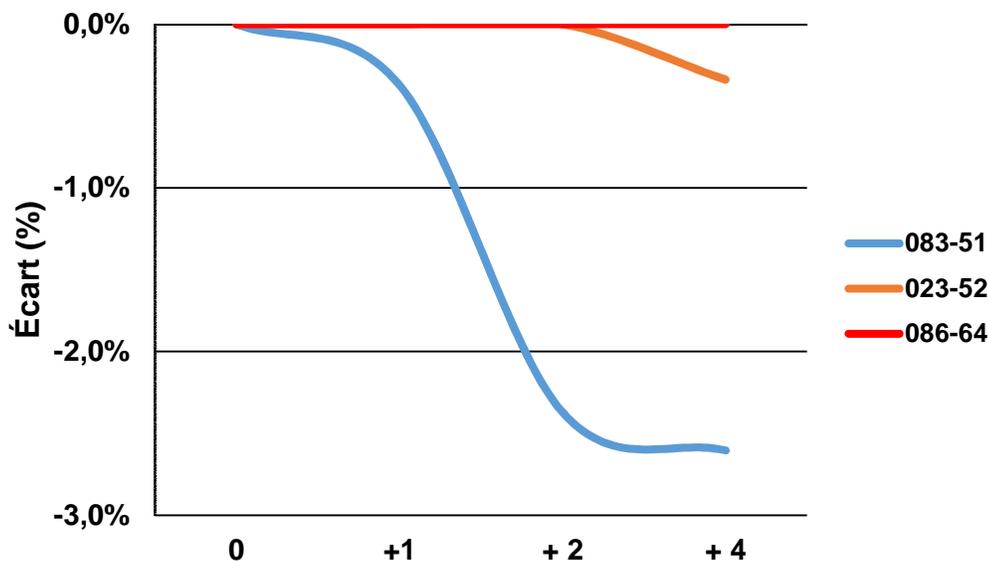


Figure 3 Courbes illustrant l'effet de la surface terrière sur les possibilités forestières, formulées par la différence en % du niveau de récolte par rapport au modèle de base.

4.3 Rendement des plantations

Les différents niveaux de rendement des plantations ne démontrent pas de tendance bien définie. En théorie, l'apport en volume provenant des plantations admissibles seulement après la période critique ne modifie pas les possibilités forestières.

C'est probablement le cas de l'UA 073-51. Elle présente un profil presque linéaire qui oscille autour de zéro. Cette UA a pour cible le reboisement de 30 % de la superficie des coupes totales (CT). Toutefois, plus de 62 % de la superficie exploitée provient des CP (tableau 6). Dans cette UA, le volume de bois provenant des plantations est relativement faible et n'a que peu d'influence sur les possibilités forestières.

À l'inverse, les UA 023-52, 083-51 et 086-64 utilisent peu la CP dans leur stratégie sylvicole. C'est l'élément (ou un des éléments) qui distingue ces trois UA de l'UA 073-51 (tableau 6). Pour ces trois UA, moins de 10 % du territoire est traité par CP. La superficie reboisée après une coupe totale amène probablement un plus grand apport aux possibilités forestières.

La figure 4 montre que, pour une augmentation du rendement supérieure à 10 %, certains modèles affichent une solution irréalisable. C'est entre autres le cas pour les modèles des

UA 025-52 et 073-51. En outre, le modèle de la 086-64, indique une brusque augmentation de 16 % (tableau 6) des possibilités forestières pour un rendement de plantation augmenté de 10 %.

Afin de déceler ce qui affecte les modèles au-delà de cette augmentation, plusieurs itérations ont été réalisées en ignorant certaines contraintes, en modifiant certains critères d'admissibilité et en élargissant la plage de retour sur la courbe. Le problème provenait de la plage de récolte de résineux imposée à la première période³. Élargir la plage du volume de récolte de résineux autorisé de 2 % à 10 % permet de résoudre le modèle.

Chaque UA se distingue par sa composition forestière, sa stratégie sylvicole et les caractéristiques intrinsèques au CPF. Le degré de sensibilité du rendement des plantations est de fait spécifique à chaque UA. Le rendement des plantations n'est pas une variable sensible et son degré de sensibilité n'est pas prévisible ou extrapolable.

Tableau 6 Activités d'aménagement en relation avec les courbes de rendement des plantations de la figure 4

Unités d'aménagement	086-64	023-52	083-51	073-51
Coupes totales / récolte (%)	93	89	95	38
Coupes partielles / récolte (%)	7	11	5	62
Écart du volume pour la classe de rendement de 10 %	16,66	7,63	1,61	-0,56
Plantation des CT (%)	50	34	24	30
Superficie en CT (ha/an)	1 790	7 360	7 660	2 000

³ Cette information provient de l'actualisation en volume lors de la mise à jour 2008-2013 selon l'attribution

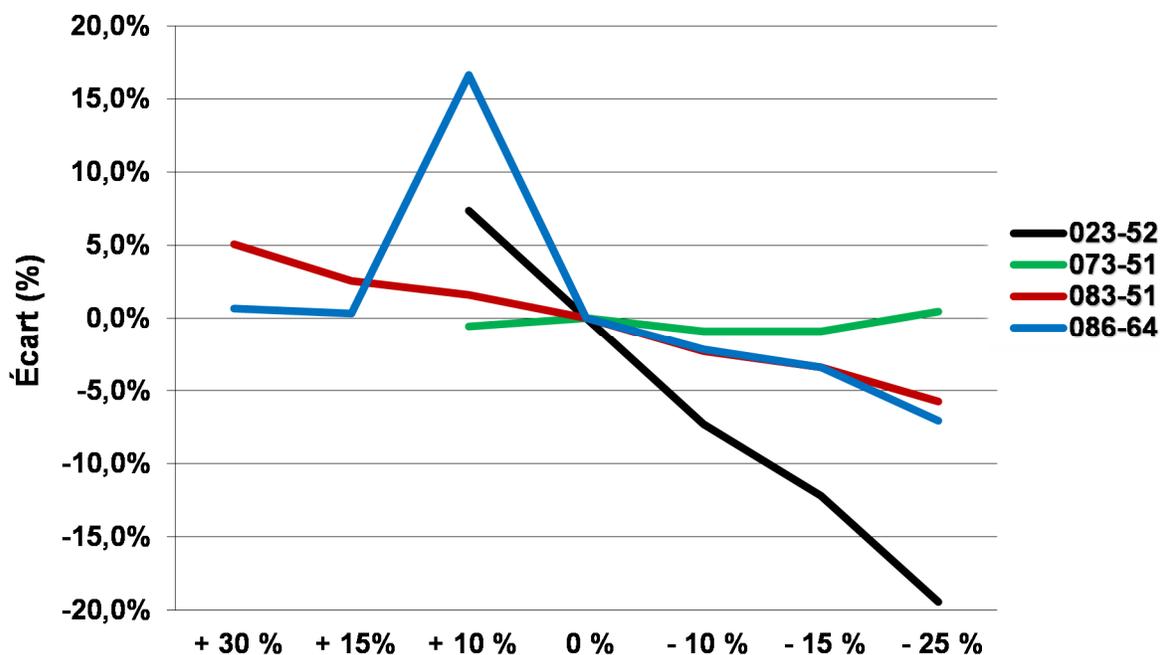


Figure 4 Effet de la fluctuation du rendement des plantations sur les possibilités forestières par rapport au modèle de base (%).

4.4 Volume marchand brut

En ce qui concerne le volume marchand brut, les résultats obtenus sont insuffisants pour identifier une quelconque tendance. Seulement deux modèles se sont avérés réalisables, dont un seul pour l'ensemble des intervalles de variation. Les courbes des deux UA analysées montrent des profils totalement différents (figure 5).

Néanmoins, le modèle de l'UA 083-51 illustre une courbe de pente positive presque linéaire. Ce profil est assez caractéristique pour des variables qui sont directement impliquées dans un CPF. Par ailleurs, le comportement du modèle 073-51 aux modifications apportées à la valeur du volume marchand brut n'est pas cohérent. Il va de soi que les résultats ne sont pas fiables. En conclusion, le volume marchand brut est de loin la variable la plus sensible. Son degré de sensibilité ne peut être précisé, faute de solutions réalisables.

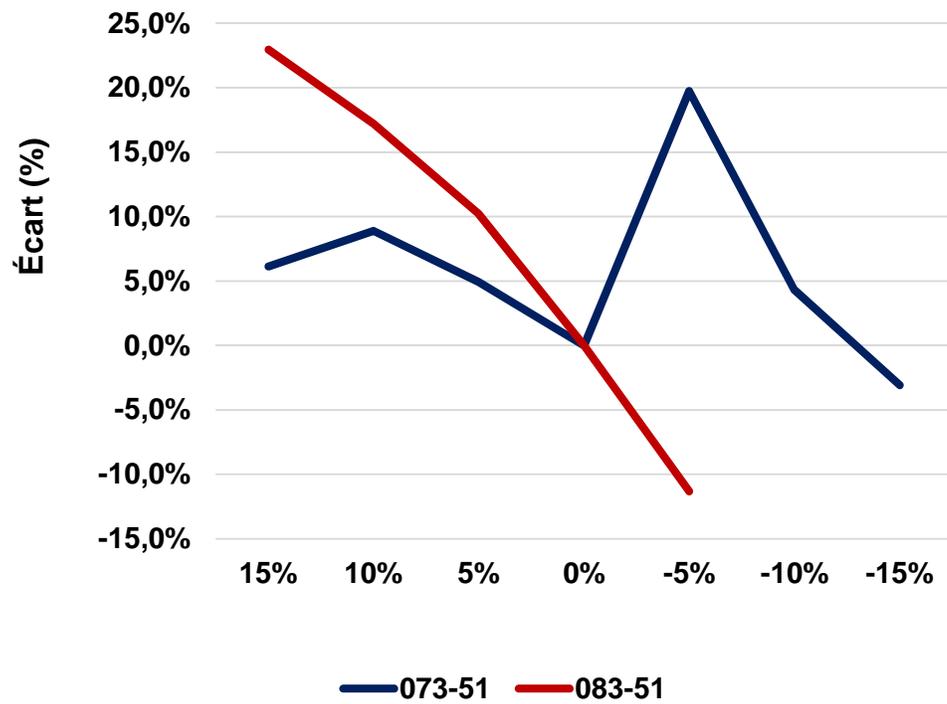


Figure 5 Effet de la fluctuation du volume marchand brut sur les possibilités forestières, par rapport au modèle de base (%)

5 PRÉCISIONS SUR LA ROBUSTESSE DES TENDANCES

5.1 Âge de maturité

La figure 6 illustre les tendances observées de l'âge de maturité sur les possibilités forestières en utilisant des modèles simplifiés. À l'exception de l'UA 111-61, les courbes donnent un faible écart. Autant en prématurité qu'en maturité, les écarts sont d'environ 10 %. Au même titre que pour les résultats précédents, hâter l'admissibilité d'un peuplement augmente les possibilités forestières, alors que la retarder les diminue.

En outre, un plus grand écart sur les possibilités forestières selon un effet de postmaturité est également observé. Ainsi, l'écart en prématurité varie de 2 à 11 % (moyenne de 7 %) alors qu'en postmaturité, il varie de -5 à -34 % (moyenne de -13 %) (tableau 7). Bien que cette tendance soit moins marquée que dans les cas précédents, elle demeure fiable.

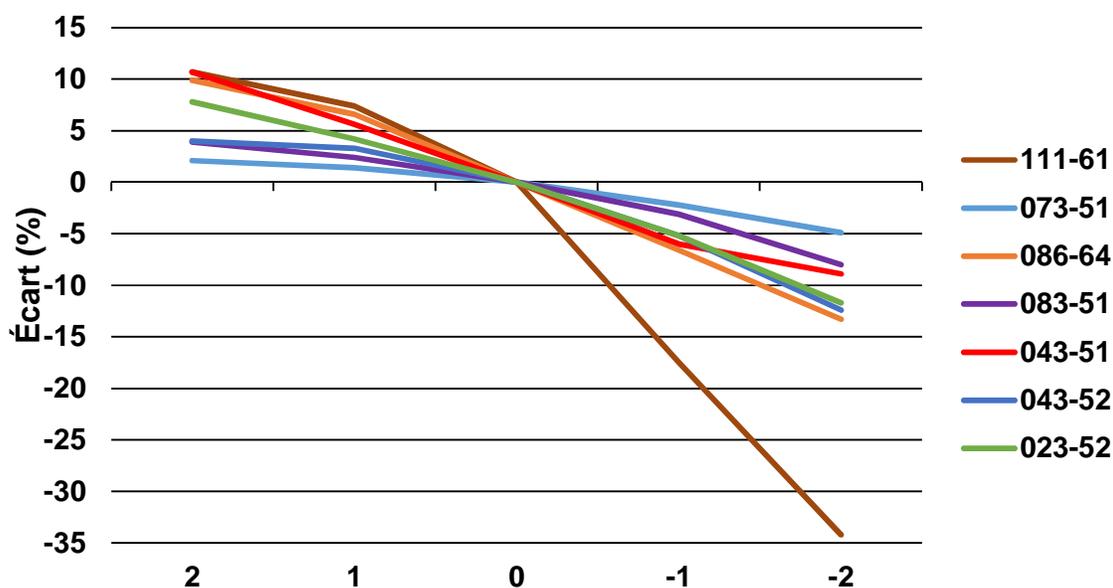


Figure 6 Effet de la fluctuation de l'âge de maturité exprimé en périodes de 5 ans sur les possibilités forestières, par rapport au modèle de base (%)

Le passage de la dernière épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette a fortement rajeuni les peuplements de l'UA 111-61. Cette courbe montre une forte diminution des possibilités forestières en retardant l'admissibilité d'un peuplement à un traitement. Par conséquent, lorsque l'admissibilité des peuplements est retardée, une importante superficie se retrouve non disponible à la récolte, ce qui explique la forte diminution des possibilités forestières. Le choix plus restreint de la disponibilité de peuplements aptes à la récolte augmente considérablement la valeur du degré de sensibilité.

Tableau 7 Écart (%) de la valeur des possibilités forestières pour les cinq variations de l'âge de maturité (Agemat)

UA	Agemat +2	Agemat +1	Agemat 0	Agemat -1	Agemat -2
023-52	7,8%	4,2%	0,0%	-5,2%	-11,7%
043-52	4,0%	3,3%	0,0%	-5,2%	-12,4%
043-51	10,7%	5,6%	0,0%	-6,0%	-8,9%
083-51	3,9%	2,4%	0,0%	-3,1%	-8,0%
086-64	9,9%	6,6%	0,0%	-6,6%	-13,3%
073-51	2,1%	1,4%	0,0%	-2,2%	-4,9%
111-61	10,7%	7,4%	0,0%	-17,5%	-34,2%

5.2 Volume marchand brut

Les résultats de l'analyse de la variable « volume marchand brut » sont présentés au tableau 8. Ces résultats ont été générés à partir des modèles simplifiés. Cette variable, très sensible, a généré trois scénarios irréalisables. Toutefois, ces données indiquent que les changements de la valeur des possibilités forestières sont du même ordre que ceux qui sont imposés au volume marchand brut (un pour un). La figure 7 n'affiche pratiquement aucun écart entre les courbes. Les faibles intervalles indiquent que la tendance est robuste. Elle est entre autres extrapolable entre les UA.

Tableau 8 Écart (%) de la valeur des possibilités forestières en fonction des fluctuations du « volume marchand brut »

UA	Volume marchand brut (%)						
	15 %	10 %	5 %	0 %	- 5 %	- 10 %	- 15 %
023-52	15,2 %	10,2 %	5,2 %	0,0 %	-5,0 %	-13,3 %	-15,1 %
043-51	15,4 %	10,3 %	5,3 %	0,0 %	-5,2 %	-11,0 %	-17,0 %
043-52	15,1 %	10,1 %	5,1 %	0,0 %	-5,1 %	-10,4 %	-15,4 %
083-51	15,0 %	10,0 %	5,0 %	0,0 %	-5,0 %	IRR	IRR
086-64	15,0 %	10,0 %	5,0 %	0,0 %	-5,0 %	-10,0 %	-15,0 %
111-61	15,0 %	10,4 %	5,9 %	0,0 %	-4,2 %	-10,4 %	IRR
073-51	15,4 %	10,3 %	5,2 %	0,0 %	-4,9 %	-9,8 %	-15,0 %

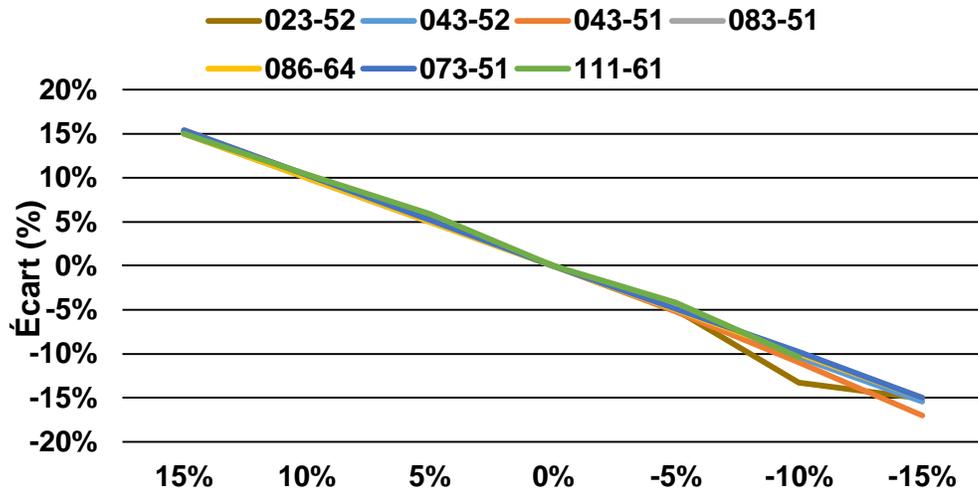


Figure 7 Effet de la fluctuation du volume marchand brut sur les possibilités forestières, par rapport aux modèles de base (%)

6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Dans l'ensemble, ces analyses de sensibilité se sont avérées beaucoup plus complexes que prévu à réaliser. L'identification des valeurs qui déterminent l'amplitude de la variation à vérifier pour chaque variable a demandé de nombreux essais. Cette démarche a permis de diminuer le nombre de solutions « irréalisables ». Il a toutefois été nécessaire de procéder à certains ajustements afin d'obtenir des solutions.

6.1 Âge de maturité

L'âge de maturité est une des deux variables ayant formulé des résultats probants. Son analyse indique des tendances bien définies. En outre, le degré de sensibilité de cette variable sur les possibilités forestières est important (plus ou moins 10 %). Ces tendances sont fiables et extrapolables à d'autres UA.

Les analyses révèlent qu'une trop grande utilisation de l'âge de maturité comme critère d'admissibilité avec un repositionnement sur une courbe d'effet de traitement à partir d'une variable différente entraîne une importante sous-estimation des possibilités forestières. Cette constatation est particulièrement observable pour des traitements de coupes partielles en effet de postmaturité. Dans ce contexte, les aménagistes doivent chercher à limiter l'utilisation de cette variable comme critère d'admissibilité, sinon il serait judicieux de l'employer de pair avec la variable de retour sur la courbe d'effet de traitement.

6.2 Surface terrière

La surface terrière est également une variable sensible pour les UA où est pratiqué un régime d'aménagement irrégulier et/ou jardiné. Sa particularité réside dans le degré de sensibilité qui diminue régulièrement avec une augmentation de la latitude, pour être quasi nul dans les UA du domaine de la pessière.

Étant donné que la surface terrière ne peut être analysée avec des modèles simplifiés, aucune information n'est disponible sur son comportement. Cette analyse de sensibilité n'a pas permis de déterminer le degré de sensibilité ni de confirmer une tendance. Toutefois, en augmentant la valeur de la surface terrière, un effet similaire à la postmaturité est provoqué dans le modèle. Sur la courbe de la figure 3, l'effet indique clairement une diminution en « paliers » pour l'UA 083-51. En augmentant la valeur de la variable de 1 m²/ha, cette modification n'a pas suffisamment d'ampleur pour produire un effet similaire à un changement de période (5 ans) de l'âge de maturité puisque cette section de la courbe indique une faible influence sur les possibilités forestières. Cependant, un changement de 2 m²/ha amène fréquemment un décalage de la période d'admissibilité, ce qui provoque une forte baisse de la valeur de la variable prédite. De fait, l'effet escompté de cette variable devrait être du même ordre que celle de l'âge de maturité.

6.3 Rendement des plantations

Les modèles sont peu sensibles à cette variable. Le rendement des plantations a donné des résultats très variés. Son influence dépend entre autres de la période de récolte des plantations en fonction de la période critique, du taux de coupes totales et du taux de plantation de la superficie traitée en CT. De fait, il n'est pas possible d'identifier une tendance générale spécifique à un ensemble de modèles. Chaque UA a ses caractéristiques particulières qui lui confèrent une courbe d'effet de rendement de plantation distinctif. Le rendement des plantations ne peut être extrapolé à d'autres UA.

6.4 Volume marchand brut

Le volume marchand brut est la variable qui a posé le plus de problèmes dans l'exécution des analyses. Les résultats initiaux n'ont pas permis de préciser adéquatement son degré de sensibilité. Il faut seulement retenir que le volume marchand brut est très sensible, dans la mesure où une petite modification de sa valeur amène une solution irréalisable.

L'analyse à partir de modèles simplifiés a néanmoins permis d'obtenir certaines informations. L'exécution des modèles a donné des résultats probants. Ils indiquent que le degré de sensibilité de la variable peut engendrer des écarts importants sur les possibilités forestières. L'écart engendré par la fluctuation de la variable donne une évolution à la fois de même sens (positif) et de même amplitude. Ainsi, ces écarts, de l'ordre de 15 à -15 % sur les possibilités forestières, sont obtenus pour une fluctuation du volume marchand brut de plus ou moins 15 %.

Pour la variable « volume marchand brut », il n'y a pas de véritable surprise. Son comportement est celui d'une variable directement impliquée dans un CPF. Dans ce cas, les possibilités forestières progressent dans le même sens que celui apporté au volume. Ces observations sont prévisibles et extrapolables à d'autres UA.

6.5 Recommandations

Le grand nombre de solutions « irréalisables » obtenues au cours des analyses met en évidence le manque de souplesse de plusieurs modèles.

L'utilisation de modèles simplifiés, qui n'affectent pas ou peu le scénario sylvicole, est une procédure plus performante en rapidité. L'assouplissement des modèles donne des solutions réalisables. Cette méthode a donné des résultats encourageants qui démontrent la possibilité de poursuivre les analyses de sensibilité afin mieux comprendre la notion de précision d'un CPF.

RÉFÉRENCES

MRNFP, 2004. Rapport détaillé du comité scientifique chargé d'examiner le calcul des possibilités forestières, 375 p.

HINES, William H., et al., 2005. *Probabilités et statistiques POUR ingénieurs*, Montréal, Québec, Éditions Chenelière éducation, 597 p.

SCHERRER, B., 1984. *Biostatistique*, Chicoutimi, QUÉBEC, Éditions Gaëtan Morin, 850 p.

SPIEGEL, M. R., 1974. *Théorie et applications de la statistique*, NEW York, NY, Éditions McGraw-Hill (Série SCHAUM), 358 p.

ANNEXE DESCRIPTION DES UNITÉS D'AMÉNAGEMENT SÉLECTIONNÉES

Unité d'aménagement 011-51⁴

L'unité d'aménagement 011-51 est située dans la région du Bas-Saint-Laurent. Son territoire fait partie des municipalités régionales de comté (MRC) de Kamouraska (56 %), Témiscouata (34 %) et Rivière-du-Loup (10 %). Elle est entièrement située dans le sous-domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'est. Elle se caractérise par sa diversité d'essences et par l'importance de sa forêt mixte (37 %). Son volume sur pied totalise 16 998 200 m³. Il est composé de :

- 48 % de sapin, épinettes, pin gris et mélèzes (SEPM)
- 10 % de bouleau à papier
- 20 % d'autres feuillus intolérants
- 15 % de feuillus tolérants
- 7 % d'autres résineux.

Les types de forêts représentatifs en superficie sont :

- 21 % de pessières
- 21 % de résineux à feuillus
- 10 % de feuillus tolérants
- 9 % de bétulaies blanches à résineux
- 8 % de peupleraies à résineux
- 7 % de sapinières
- 6 % de feuillus tolérants à résineux
- 5 % de peupleraies
- 5 % de bétulaies blanches
- 5 % de cédrières

Près de 25 % de la superficie est classée en forêt inéquienne et représente l'ensemble de la superficie modélisée en surface terrière. Elle regroupe les types de forêts dominés par l'érable à sucre, l'érable rouge, le bouleau jaune et le thuya. Les érablières (acéricoforestières) couvrent environ 10 % du territoire et sont traitées par des coupes de jardinage.

Unité d'aménagement 023-52⁵

L'UA 023-52 est située de part et d'autre du Fjord du Saguenay. Elle recoupe les régions du Saguenay–Lac-Saint-Jean (88 %) et de la Capitale-Nationale (12 %). Son territoire fait partie des MRC du Fjord-du-Saguenay (84 %), de Charlevoix (8 %), de la Côte-de-Beaupré (4 %), du Lac-Saint-Jean-Est (3 %) et de la ville de Saguenay (1 %).

L'UA 023-52 est répartie à :

⁴http://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2013/06/01151_Rapport_determination_v3.0.pdf (consulté le 5 juin 2017)

⁵http://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2013/06/02352_Rapport_determination_v3.0.pdf (consulté le 5 juin 2017)

- 47 % dans le sous-domaine de la sapinière à bouleau blanc de l'est
- 26 % dans le sous-domaine de la pessière à mousses de l'est
- 22 % dans le sous-domaine de la sapinière à bouleau blanc de l'ouest
- 5 % dans la sapinière à bouleau jaune de l'est.

Son volume sur pied est de 55 085 200 m³. L'UA est composée de :

- 80 % de sapin, épinettes, pin gris et mélèzes (SEPM)
- 12 % de bouleau à papier
- 7 % d'autres feuillus intolérants
- 2 % de feuillus tolérants.

Les types de forêts sont principalement représentés à :

- 45 % de pessières
- 24 % de sapinières
- 20 % de résineux à feuillus
- 4 % de peupleraies avec ou sans résineux
- 3 % de bétulaies blanches à résineux

Unité d'aménagement 043-51⁶

L'UA 043-51 est localisée principalement dans la région de la Mauricie. Son territoire fait partie de la municipalité de La Tuque et de trois municipalités régionales de comté (MRC), soit Domaine-du-Roy, Matawinie et Antoine-Labelle. Le territoire de cette UA est localisé à 93 % dans le sous-domaine de la sapinière à bouleau blanc de l'ouest. Les 7 % restants se situent dans le sous-domaine de la pessière à mousses de l'ouest. Le volume sur pied totalise 46 654 759 m³ et se compose à :

- 68 % de sapin, épinettes, pin gris et mélèzes (SEPM)
- 19 % de bouleau blanc
- 13 % de feuillus intolérants autres que le bouleau blanc

Le volume des feuillus tolérants est quasi inexistant sur ce territoire. Les types de forêts se composent de :

- 36 % de pessières
- 20 % de résineux à feuillus
- 20 % de bétulaies blanches avec ou sans résineux
- 13 % de pinèdes grises
- 8 % de sapinières
- 3 % de peupleraies avec ou sans résineux

Unité d'aménagement 043-52⁷

⁶ http://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2013/05/04351_Rapport_determination_v3.0.pdf (consulté le 5 juin 2017)

⁷ http://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2013/05/04352_Rapport_determination_v3.0.pdf (consulté le 5 juin 2017)

Cette UA est localisée dans les régions de la Mauricie (79 %) et de Lanaudière (21 %). Son territoire englobe trois municipalités régionales de comté (MRC), soit Agglomération de La Tuque (64 %), Matawinie (21 %) et Mékinac (15 %). L'UA est majoritairement localisée dans le sous-domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'ouest (93 %). Elle se situe également dans le sous-domaine de la sapinière à bouleau blanc de l'ouest (6 %) et dans celui de l'érablière à bouleau jaune de l'est (1 %). Le volume sur pied totalise 56 451 500 m³, dont :

- 48 % de sapin, épinettes, pin gris et mélèzes (SEPM)
- 24 % de bouleau blanc
- 17 % de feuillus intolérants autres que le bouleau blanc
- 9 % de feuillus tolérants

La présence de feuillus tolérants distingue cette UA de la précédente (043-51). Les types de forêts représentatifs du territoire sont :

- 29 % de bétulaies blanches avec ou sans résineux
- 20 % de pessières
- 18 % de résineux à feuillus
- 14 % de peupleraies avec ou sans résineux
- 9 % de feuillus tolérants avec ou sans résineux
- 9 % de pinèdes grises
- 1 % de sapinières

Unité d'aménagement 073-51⁸

L'UA 073-51 est située dans la région de l'Outaouais. Son territoire fait partie des MRC La-Vallée-de-la-Gatineau (89 %) et Pontiac (11 %). Près de 80 % de l'UA est située dans le sous-domaine de l'érablière à bouleau jaune de l'ouest. Le volume sur pied totalise 50 811 800 m³. La caractéristique de cette UA est la prédominance des feuillus tolérants. Ce territoire est réparti à :

- 40 % de feuillus tolérants
- 26 % de feuillus intolérants autres que le bouleau à papier
- 14 % de sapin, épinettes, pin gris et mélèzes (SEPM)
- 13 % de résineux autres que le SEPM
- 7 % de bouleau à papier.

La diversité des types de forêts est un trait distinctif de l'UA à dominance de peuplements feuillus. Ceux-ci se répartissent de la façon suivante :

- 55 % de feuillus tolérants avec ou sans résineux
- 13 % de peupleraies avec ou sans résineux
- 7 % de bétulaies avec ou sans résineux
- 7 % de résineux à feuillus
- 4 % de cédrières
- 4 % de pinèdes blanches
- 6 % de pessières, sapinières et pinèdes grises
- 3 % d'érablières rouges

⁸ http://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2013/02/07351_Rapport_determination_v3.0.pdf (consulté le 5 juin 2017)

Unité d'aménagement 083-51⁹

L'UA 083-51 est située dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue. Son territoire fait partie de trois municipalités régionales de comté (MRC) soit : La Vallée-de-l'Or, la ville de Rouyn-Noranda et le secteur de l'Abitibi-Témiscamingue. L'UA chevauche les domaines de la sapinière à bouleau blanc au nord et celui de la sapinière à bouleau jaune au sud. Le volume sur pied total est de 61 976 800 m³. Il est composé de :

- 55 % de sapin, épinettes, pin gris et mélèzes (SEPM)
- 32 % de feuillus intolérants
- 8 % de feuillus tolérants
- 5 % de résineux autres que le SEPM

Les types de forêts sont très diversifiés et se subdivisent à :

- 42 % de pessières
- 24 % de résineux à feuillus
- 16 % de bétulaies blanches avec ou sans résineux
- 5 % de peupleraies avec ou sans résineux
- 4 % de cédrières
- 4 % de feuillus tolérants avec ou sans résineux

Le reste du territoire (5 %) se compose de petites superficies en pinèdes grises, sapinières, pinèdes blanches ainsi qu'en érablières rouges.

Unité d'aménagement 086-64¹⁰

L'UA 086-64 est située dans la région du Nord-du-Québec. Son territoire fait partie de la municipalité régionale de comté (MRC) de la Jamésie. Elle se retrouve au nord-est de la ville de Matagami. L'UA est située dans le sous-domaine de la pessière à mousses de l'ouest. Le volume sur pied totalise 12 779 600 m³ et comporte :

- 88 % de sapin, épinettes, pin gris et mélèzes (SEPM)
- 1 % de bouleau à papier
- 11 % d'autres feuillus intolérants

Le type de forêt largement dominant est la pessière. Le territoire se subdivise en :

- 92 % de pessières
- 5 % de résineux à feuillus
- 3 % de peupleraies à résineux

La faible présence des bétulaies blanches est aussi un critère distinctif de cette UA.

⁹ http://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2013/06/08351_Rapport_determination_v3.0.pdf (consulté le 5 juin 2017)

¹⁰ http://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2013/06/08664_Rapport_determination_v3.0.pdf (consulté le 5 juin 2017)

Unité d'aménagement 111-61¹¹

Cette UA est située dans la région de la Gaspésie et des Îles-de-la-Madeleine. Son territoire fait partie des municipalités régionales de comté (MRC) d'Avignon, Bonaventure, La Matapédia et La Haute-Gaspésie. Elle englobe également des portions des MRC de Matane, Le Rocher-Percé et de La Côte-de-Gaspé. L'unité d'aménagement est située à 83 % dans le sous-domaine de la sapinière à bouleau blanc de l'est et à 17 % dans le sous-domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'est.

Le volume sur pied, d'une valeur totale de 45 279 300 m³, se compose de :

- 75 % de sapin, épinettes, pin gris et mélèzes (SEPM)
- 10 % de bouleau blanc
- 8 % de feuillus intolérants autres que le bouleau blanc
- 5 % de feuillus tolérants

Le 2 % restant du territoire représente des superficies en résineux autres que le SEPM. Les types de forêts identifiés sur ce territoire sont :

- 35 % de sapinières
- 26 % de résineux à feuillus
- 18 % de pessières
- 10 % de bétulaies blanches avec ou sans résineux
- 5 % de peupleraies avec ou sans résineux
- 5 % de feuillus tolérants avec ou sans résineux
- 1 % de cédrières

¹¹ http://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2013/07/11161_Rapport_determination_v3.0.pdf (consulté le 5 juin 2017)

