

→→→ 2.5 – Optimisation et variables de suivi



Manuel de détermination des possibilités forestières

Le 14 août 2024

Optimisation

Le calcul des possibilités forestières est un exercice de modélisation par programmation linéaire¹ à long terme. Il considère l'évolution de la forêt en fonction des effets de l'aménagement forestier. Le calcul par optimisation vise la résolution du problème suivant : Quelle est la stratégie d'aménagement qui permet des possibilités forestières maximales tout en respectant l'atteinte des autres objectifs d'aménagement durable des forêts ? L'optimisation implique que soient définies *des variables décisionnelles*, une *fonction objectif* et des *contraintes à l'optimisation*.

La complexité et le temps de résolution dépendent du nombre de *variables décisionnelles* et de *contraintes à l'optimisation* intégrées au modèle. Le principe de parcimonie s'applique dans le choix des éléments de la stratégie à modéliser, ceci pour assurer que le calcul demeure un outil d'aide à la décision efficace.

Les variables décisionnelles

Les *variables décisionnelles* du calcul décrivent les superficies forestières qui peuvent être récoltées, comment, où et quand² ? Elles représentent les choix de récolte possibles considérant les forêts, les scénarios sylvicoles et les entités territoriales d'une unité d'aménagement. Le nombre de ces éléments a un effet multiplicateur sur la quantité de *variables décisionnelles* à traiter dans un calcul. Ce dernier peut impliquer des milliers de *variables décisionnelles* considérant qu'une unité d'aménagement peut comporter des dizaines de groupes de strates, un à trois scénarios sylvicoles par groupe de strates et de nombreuses entités territoriales.

La fonction objectif

La *fonction objectif* du calcul est la valeur à maximiser. Aux fins du calcul des possibilités forestières 2023-2028, la valeur à maximiser est le volume de bois toutes essences récolté³. Cette valeur est obtenue en trouvant la combinaison de superficies récoltées qui génère le plus grand volume de bois. Un ensemble de *contraintes à l'optimisation*, dont celles liées à l'obligation de rendement non décroissant⁴, encadrent la résolution de la *fonction objectif*.

Les contraintes à l'optimisation

Les objectifs d'aménagement⁵ et les restrictions budgétaires, opérationnelles ou réglementaires⁶ peuvent être intégrés dans le modèle sous forme de *contraintes à l'optimisation*. En programmation linéaire, ces contraintes encadrent la recherche de la solution optimale en définissant une zone de faisabilité. Plus le modèle comprend de *contraintes*, plus la zone de faisabilité est restreinte et moins de solutions sont possibles.

La zone de faisabilité est d'autant plus restreinte lorsque les contraintes sont rigides. Par exemple, une contrainte d'égalité est plus contraignante qu'un seuil à ne pas dépasser. À l'extrême, la zone de faisabilité peut devenir tellement limitée que le recours à l'optimisation perd de sa pertinence; il n'y a qu'une solution possible. Or, l'optimisation est avantageuse lorsque plusieurs solutions sont possibles.

Par ailleurs, certaines *contraintes à l'optimisation* peuvent s'avérer incompatibles avec l'état actuel de la forêt et conduire à une solution infaisable. Par exemple, une solution infaisable survient lorsque la proportion de vieilles forêts est en deçà du seuil à respecter dès la première période. Un scénario sans récolte ou une programmation

¹ Les logiciels [WOODSTOCK](#) et [MOSEK](#) sont respectivement utilisés pour construire le modèle par programmation linéaire et pour le résoudre.

² Les superficies aménagées selon tel traitement sylvicole, pour tel groupe de strates et pour telle entité territoriale réfèrent aux « types de développement » dans WOODSTOCK.

³ Plus précisément, la *fonction objectif* intégrée dans WOODSTOCK cherche à maximiser ce volume sur la base d'un maximum possible à la période critique.

⁴ Se référer à la section 1.4 du Manuel – Calcul des possibilités forestières.

⁵ Se référer aux sections du chapitre 3 du Manuel sur l'aménagement durable des forêts.

⁶ Se référer au

par objectif permet de s'assurer d'établir des *contraintes* réalisables en début d'optimisation.

La programmation par objectif⁷ permet de convertir une *contrainte* en cible. Par exemple, cette programmation peut être utilisée lorsque l'objectif est d'augmenter de manière constante la superficie aménagée de façon intensive, mais que la cible ne peut être atteinte à certaines périodes. Ainsi, la programmation par objectif permet de déterminer la superficie la plus proche de la cible qu'il est possible de prévoir à ces périodes.

Compte tenu de ces limites, le principe de parcimonie s'applique également dans le choix des *contraintes* à inclure dans le modèle. Les *contraintes* intégrées en priorité sont celles reliées aux restrictions d'ordre réglementaire, budgétaire ou opérationnel ou à des objectifs d'aménagement critiques pour assurer un aménagement durable. Pour alléger la résolution du modèle, certains objectifs d'aménagement moins critiques ne sont pas intégrés comme *contrainte à l'optimisation*, mais font l'objet de suivi.

Le résultat : un calendrier d'interventions optimal

La résolution du modèle produit une solution optimale⁸, soit celle qui maximise le volume de bois qu'il est possible de récolter tout en respectant le rendement non décroissant et les autres contraintes. Par la suite, un calendrier qui prend la forme de superficies à récolter par traitement et par groupe de strates est produit. Il couvre chacune des entités territoriales et chacune des périodes (30 périodes, 150 ans). Ce calendrier est de portée stratégique, car il considère l'échelle du groupe de strates et un long horizon temporel.

Pour une mise en œuvre opérationnelle, à l'échelle du peuplement et à court terme, des analyses complémentaires accompagnent les résultats du calcul.

Exemple de modélisation par programmation linéaire⁹

Définition du problème

Un agriculteur veut obtenir un revenu d'appoint en exploitant le boisé derrière son champ. Quel est le revenu maximal qu'il peut tirer cette année étant donné qu'il ne veut pas allouer plus de la moitié de son temps à l'aménagement de sa forêt ?

Données de base

	Plantation de pin rouge	Érablière
Superficie forestière	40 ha	50 ha
Revenu	90 \$/ha	120 \$/ha
Effort requis	2 j/ha	3 j/ha

Modélisation du problème

Définir les *variables décisionnelles*

Ces variables permettent d'exprimer mathématiquement l'objectif (trouver le revenu maximal) et les contraintes (superficie et temps). Dans cet exemple, le revenu est généré par la superficie aménagée. Ainsi, les *variables décisionnelles* sont :

X_1 = hectares de plantation de pin rouge

X_2 = hectares d'érablière

Définir la *fonction objectif*

La *fonction objectif* est l'équation qui met en relation les *variables décisionnelles* et leurs coefficients déterminants de la valeur à optimiser. Dans cet exemple, la superficie est multipliée par les revenus à l'hectare afin d'obtenir un revenu maximal, soit :

$$\text{Revenu} = 90 X_1 + 120 X_2$$
$$(\$) = (\$/\text{ha}) * (\text{ha}) + (\$/\text{ha}) * (\text{ha})$$

⁷ Réfère au « Goal programming », Bettinger, P., K. Boston, J.P. Siry et D.L. Grebner. 2009. Forest management and planning. Academic Press, Londres, UK, 331 p.

⁸ Réfère au « Schedule » dans WOODSTOCK.

⁹ Adapté de Buongiorno, J. et J.K. Gilles. 2003. Decision method for forest resource management. Academic Press, Londres, UK, 439 p.

Définir les contraintes à l'optimisation

Les *contraintes à l'optimisation* limitent les valeurs possibles des *variables décisionnelles* pour atteindre l'objectif. Dans cet exemple, deux *contraintes* doivent être respectées :

1. Les superficies aménagées ne peuvent dépasser les superficies disponibles, soit :
 - $X_1 \leq 40$ ha de plantation de pin rouge
 - $X_2 \leq 50$ ha d'érablière
2. Le temps consacré à l'aménagement ne peut dépasser 180 jours par année, soit :
 - $2 X_1 + 3 X_2 \leq 180$
 - (j/ha)*(ha) + (j/ha)*(ha) (j)

La matrice

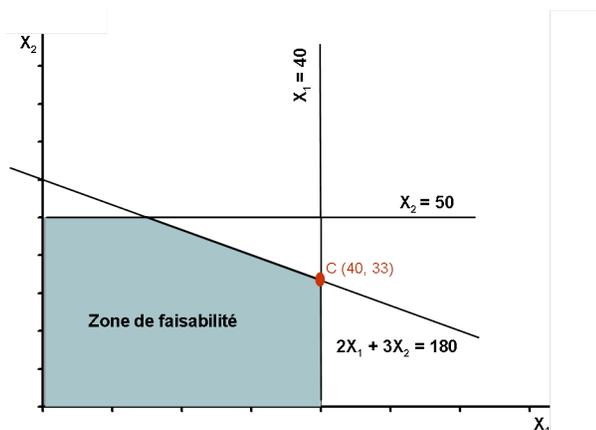
Les *variables décisionnelles*, la *fonction objectif* et les *contraintes à l'optimisation* sont représentées par une matrice en programmation linéaire. Les colonnes représentent les *variables décisionnelles* et les lignes, la *fonction objectif* et les *contraintes à l'optimisation*. Les valeurs inscrites dans la matrice sont les paramètres des équations linéaires.

Fonction objectif et contraintes à l'optimisation	Variables décisionnelles		
	X1	X2	
Revenu	90	120	
Superficie de plantation	1		≤ 40 ha
Superficie d'érablière		1	≤ 50 ha
Temps	2	3	≤ 180 j

Zone de faisabilité

L'ensemble des solutions réalisables constitue la zone de faisabilité. Elle est délimitée par le croisement des *contraintes à l'optimisation*. La solution optimale se trouve sur un des vertex de la zone de faisabilité. La représentation graphique est facile lorsque le problème à résoudre est limité à deux ou trois *variables décisionnelles*. Or, un calcul des possibilités forestières peut comporter des milliers de *variables décisionnelles*. Il devient donc nécessaire de recourir à des moyens informatiques.

Dans cet exemple, la solution optimale est représentée par le « C » sur le graphique.



Variables de suivi

Les variables de suivi¹⁰ servent à faire le portrait des différentes composantes de la forêt. D'une part, elles permettent de décrire différents éléments de la stratégie d'aménagement, tels que le volume récolté par essence ou la superficie touchée par chaque traitement sylvicole. D'autre part, elles permettent de décrire les caractéristiques biophysiques du territoire forestier qui évoluent dans le temps (composition végétale, structure

¹⁰ Les « variables de suivi » réfèrent aux « outputs » dans WOODSTOCK.

d'âge de la forêt). Ces différentes variables de suivi mesurent le respect de seuils ou de cibles d'indicateurs liés à des objectifs de production ligneuse, économiques, environnementaux, fauniques ou sociaux (figure 1). Ces derniers sont intégrés sous forme de *contraintes à l'optimisation*. Les variables de suivi permettent d'évaluer le respect d'engagements gouvernementaux (Règlement d'aménagement durable des forêts, Stratégie d'aménagement durable des forêts) ainsi que d'objectifs spécifiques.

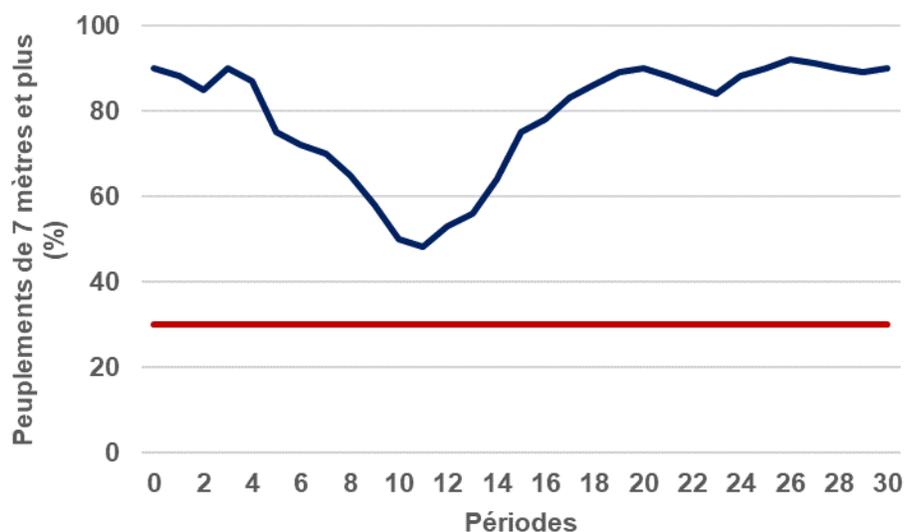


Figure 1. Portrait évolutif de la superficie de peuplements de 7 mètres et plus pour une unité territoriale de référence. Selon le *Règlement sur l'aménagement durable des forêts*, ce pourcentage doit être supérieur à 30 % (ligne rouge).

Présentation des résultats

Les résultats de la compilation peuvent être répartis en fonction de chaque valeur d'un thème. Par exemple, une répartition par unité territoriale de référence permet d'obtenir la superficie forestière productive en peuplements de 7 mètres et plus de hauteur pour chacune d'elles dans une unité d'aménagement.

Exemples de variables de suivi

La majorité des variables de suivi intégrées au calcul des possibilités forestières pour la période 2023-2028 peuvent être classées en trois grandes catégories :

- ▶ volume de matière ligneuse – Ces variables de suivi permettent d'évaluer le volume marchand sur pied, admissible à la récolte ou récolté. Ce volume peut être compilé par essence ou groupe d'essences. Les variables relatives au volume récolté sont utilisées à l'étape de l'optimisation afin d'évaluer les possibilités forestières¹¹.
- ▶ traitements sylvicoles – Ces variables de suivi concernent l'application des traitements sylvicoles. Elles permettent de compiler la superficie ou le volume admissible à chaque traitement. Elles permettent également d'obtenir le portrait des traitements à réaliser ainsi que du volume récolté par traitement.
- ▶ indicateurs d'aménagement durable des forêts – Ces variables de suivi visent à mesurer l'état de différents indicateurs¹². Les variables économiques permettent de compiler les coûts de la stratégie d'aménagement¹³. D'autres variables de suivi permettent de suivre l'état d'indicateurs forestiers (superficie des peuplements en fonction de la hauteur ou de l'âge) relatifs à des enjeux de production ligneuse, environnementaux, fauniques ou sociaux.

Le tableau 1 présente des exemples de variables de suivi pour chacune de ces catégories. Généralement, les variables concernant le volume de matière ligneuse et les traitements sylvicoles sont compilées sur la superficie incluse aux actions (INC). Dans le cas des indicateurs d'aménagement durable des forêts, la superficie de référence varie en fonction de l'objectif d'aménagement et de l'indicateur. La plupart des indicateurs

¹¹ Se référer à la section 1.4 du Manuel – Calcul des possibilités forestières

¹² Se référer aux sections du chapitre 3 du Manuel.

¹³ Se référer à la section 3.12 du Manuel – Intégration de la valeur financière dans le calcul des possibilités forestières.

environnementaux ou sociaux requièrent une compilation de l'ensemble de la superficie forestière productive (INC et EXIN). De plus, les résultats des compilations sont généralement répartis par entité territoriale (unité territoriale d'analyse, compartiment d'organisation spatiale).

Tableau 1. Exemples de variables de suivi utilisées au calcul. Selon la variable, la superficie peut être compilée sur l'ensemble du territoire analysé ou être précisée en fonction de différents thèmes (« superficie de référence »). De plus, les résultats peuvent porter sur la superficie de référence totale ou être répartis en fonction de chaque valeur d'un thème (« présentation des résultats »).

Catégories	Variables de suivi	Superficie de référence	Présentation des résultats
Volume de matière ligneuse	Volume récolté, par essence ou groupe d'essences	Superficie incluse aux actions et aux variables de suivi (INC) Superficie de certains groupes de strates	Unité d'aménagement
Traitements sylvicoles	Superficie traitée par traitement sylvicole	Superficie incluse aux actions et aux variables de suivi (INC)	Unité d'aménagement
Indicateurs d'aménagement durable des forêts	<i>Structure d'âge</i> - Superficie de vieilles forêts	Superficie forestière productive (INC et EXIN)	Unité territoriale d'analyse
	<i>Cerf de Virginie</i> - Superficie de peuplements <i>abri</i>	Superficie forestière productive (INC et EXIN) Superficie des ravages	Ravage ou par compartiment
	<i>Paludification</i> - Superficie récoltée	Superficie incluse aux actions et aux variables de suivi (INC) Superficie des strates paludifiées	Unité d'aménagement
	<i>Milieu aquatique</i> - Aire équivalente de coupe	Superficie totale (INC, EXIN, etc.) Superficie des bassins versants	Bassin versant
	<i>Rentabilité économique</i> - Coûts de la stratégie sylvicole	Superficie incluse aux actions et aux variables de suivi (INC)	Unité d'aménagement
	<i>Qualité visuelle des paysages</i> - Superficie de peuplements en régénération	Superficie forestière productive (INC et EXIN) Superficie des encadrements visuels	Encadrement visuel

Résultats

Les documents produits par le Forestier en chef sont disponibles sous différents formats en fonction du type de résultats et de la clientèle ciblée. La production et la diffusion des documents s'étalent dans le temps selon une chronologie spécifique (figure 2). Les documents renseignent sur la réalisation du calcul et sur la stratégie d'aménagement à mettre en œuvre.

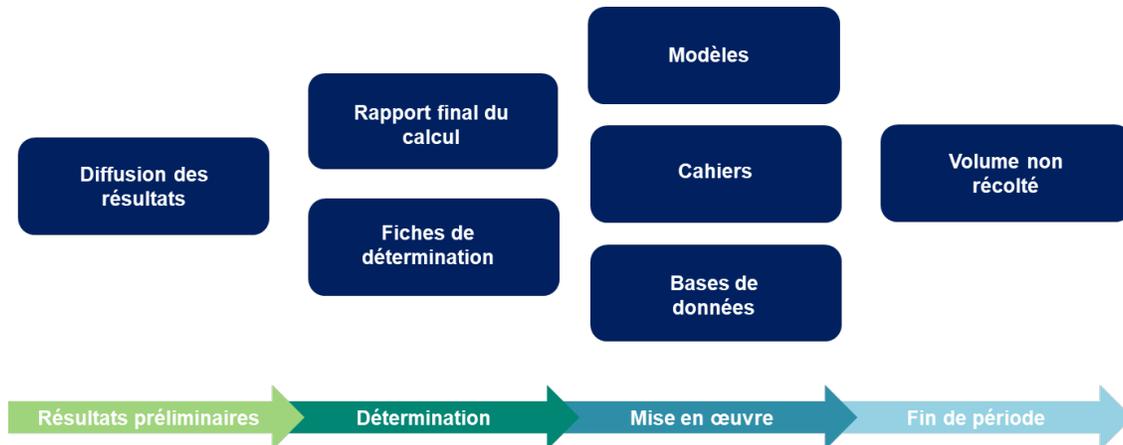


Figure 2. Chronologie de diffusion des résultats

Rédaction : Lucie Bertrand, ing.f., Ph.D., Karelle Jayen, Biol. M.Sc.

Révision : Jean Girard, ing.f., M.Sc.; David Baril, ing.f.; Marie-Josée Blais, ing.f., M.Sc.; Stéphane Petitclerc, ing.f.

Approbation : Louis Pelletier, ing.f., Forestier en chef