

Régénérons Vert l'Avenir

Municipalité régionale de comté du Rocher-Percé -  
Laboratoire rural *Agroforesterie et paysage*

Modélisation de la croissance et de la production de bois  
du chêne à gros fruits et du frêne de Pennsylvanie  
en conditions agrosylvicoles

Christian Besnier, Bertrand Anel et Marjolaine Bernier-Leduc

Décembre 2015

## Équipe de travail

Christian Besnier	Régénérons Vert l’Avenir
Bertrand Anel	Municipalité régionale de Comté du Rocher-Percé - Laboratoire rural <i>Agroforesterie et paysage</i>
Marjolaine Bernier-Leduc	Régénérons Vert l’Avenir

## Organisations impliquées

Ce travail a été réalisé dans le cadre du laboratoire rural *Agroforesterie et paysage*, un projet porté par la municipalité régionale de Comté (MRC) du Rocher-Percé. Son financement est le fruit d’un partenariat impliquant notamment le ministère des Affaires municipales et de l’Occupation du Territoire (mesure des laboratoires ruraux) et la Conférence régionale des élus de la Gaspésie – Îles-de-la-Madeleine.

La réalisation du projet a été confiée à l’organisme RÉgénérons Vert l’Avenir (RÉVA) déjà actif dans le domaine de la modélisation de la croissance des arbres en agroforesterie. RÉVA est un organisme à but non lucratif basé en Gaspésie. Sa mission est d’offrir à la population présente et à celles à venir, une planète plus verte et mieux équilibrée. RÉVA s’intéresse à la recherche, au développement et à la réalisation de stratégies environnementalement saines et responsables de l’utilisation du territoire.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à souligner la contribution d’Alain Cogliastro, chercheur à l’Institut de recherche en biologie végétale de Montréal pour sa contribution à l’ensemble du travail de modélisation entrepris par RÉVA.

## Référence

Besnier, C., Anel, B. et Bernier-Leduc, M. 2015. Modélisation de la croissance et de la production de bois du chêne à gros fruits et du frêne de Pennsylvanie en conditions agrosylvicoles. Régénérons Vert l’Avenir, St-Godefroi. 38 pages.

## Contact

Régénérons Vert l’Avenir (RÉVA) 160, 3e rang Saint-Godefroi (Qc) - G0C 3C0 Tél. : (418) 752-7382 christian.besnier@me.com	MRC du Rocher-Percé–Laboratoire rural <i>Agroforesterie et paysage</i> 129, boulevard René Lévesque Ouest, bureau 101 Chandler (Qc) - G0C 1K0 Tél. : (418) 689-4313 agroforesterie@rocherperce.qc.ca <a href="http://www.mrcrocherperce.qc.ca">www.mrcrocherperce.qc.ca</a>
---	---

# Table des matières

<b>INTRODUCTION</b>	<b>5</b>
<b>1. UNE APPROCHE À L'ÉCHELLE DE L'ARBRE</b>	<b>6</b>
1.1 L'OBJECTIF AGROSILVICOLE : FAIRE DE CHAQUE ARBRE UN SUCCÈS	6
1.2 DE L'ARBRE MOYEN AU SYSTÈME AGROSILVICOLE : DIFFÉRENTES APPROCHES	6
<b>2. LA SIMULATION DE LA CROISSANCE DE L'ARBRE AGROFORESTIER</b>	<b>7</b>
2.1 UNE SIMULATION ORIENTÉE PAR LES CARACTÉRISTIQUES DES ESSENCES	7
2.2 DES ÉQUATIONS POUR DÉCRIRE LE TAUX DE CROISSANCE ANNUEL	8
2.3 LE POTENTIEL PHYSIOLOGIQUE DES ESSENCES	10
2.4 LA RÉPONSE AUX CARACTÉRISTIQUES DU SOL ET DU CLIMAT : L'INDICE DE COMPATIBILITÉ AU SITE	12
2.5 LA PRISE EN COMPTE DES LARGES ESPACEMENTS : LE RATIO AGROFORESTERIE	21
2.6 LA PÉRIODE D'ACCLIMATATION : DURÉE ET RATIO SPÉCIFIQUE	22
2.7 DÉTERMINATION DE L'ÂGE AU POINT D'INFLEXION, DE L'ÂGE DE SÉNESCENCE ET DE L'ÂGE MAXIMAL	23
2.8 LA PRISE EN COMPTE DE LA VARIABILITÉ INTERANNUELLE	25
<b>3. ESTIMATION DES VOLUMES DE BOIS PRODUIT</b>	<b>26</b>
3.1 LE CALCUL DU VOLUME DE BOIS D'UN ARBRE	26
3.2 LE CLASSEMENT DE LA QUALITÉ DU BOIS	26
3.3 LE CALCUL DU VOLUME DES BILLES	27
<b>4. RÉSULTATS DES SIMULATIONS</b>	<b>28</b>
4.1 CHÊNE À GROS FRUITS	28
4.2 FRÊNE DE PENNSYLVANIE	30
<b>CONCLUSION</b>	<b>32</b>
<b>ANNEXE 1. COMPILATION ET ANALYSE DES DONNÉES ISSUES DE LA LITTÉRATURE</b>	<b>33</b>
<b>ANNEXE 2. DÉVELOPPEMENT DE L'INDICE DE COMPATIBILITÉ DE L'ESSENCE AU SITE (ICS) - SCHÉMA CONCEPTUEL</b>	<b>35</b>
<b>RÉFÉRENCES</b>	<b>36</b>



## Introduction

L'agrosylviculture consiste à associer sur la même parcelle des arbres destinés à la production de bois de qualité et des cultures agricoles. Cette association peut prendre plusieurs formes : de la simple haie en bordure de champ au système agroforestier intercalaire composé d'une alternance de rangées d'arbres et de bandes destinées aux productions agricoles.

En Gaspésie, le laboratoire rural *Agroforesterie et paysage* évalue le potentiel de cette approche (Laboratoire rural Agroforesterie et paysage, 2015). Les bénéfices recherchés se trouvent autant à l'échelle de la propriété privée qu'à celle du territoire rural. À l'échelle de la propriété privée, cette association de productions diversifiées est susceptible de profiter au propriétaire de la terre. Plus spécifiquement, dans le cas où celui-ci n'est pas agriculteur, une association « gagnant - gagnant » est à envisager, le propriétaire bénéficiant de la valeur des arbres et l'agriculteur-locataire conservant un accès pour ses productions. À l'échelle du territoire rural, l'approche agrosylvicole devrait permettre de contourner les inconvénients associés au boisement des terres agricoles, généralement pratiqué en résineux. En effet, si le boisement peut être une façon de valoriser le patrimoine foncier d'un propriétaire, il a pour conséquence la fermeture et l'homogénéisation des paysages. À la longue, il pourrait rendre le territoire moins attractif pour les résidents et les visiteurs. L'agrosylviculture, elle, conserve une certaine ouverture des paysages et maintient une activité agricole synonyme de territoire vivant.

L'évaluation du potentiel de l'agrosylviculture demande notamment de s'intéresser à sa rentabilité financière. Celle-ci consiste à intégrer les coûts et les revenus associés à l'utilisation agrosylvicole d'une terre sur une période allant de la plantation à la récolte des arbres. Or, étant donné l'absence de systèmes agrosylvicoles âgés en Gaspésie ou au Québec, il est difficile d'estimer le volume de bois de qualité qu'un arbre peut fournir, intrant pourtant indispensable au calcul des revenus. L'objectif de la modélisation de croissance est de pallier à cette absence.

Les modèles de simulation de croissance déjà développés dans d'autres régions du monde ne permettant pas une application facile et satisfaisante au contexte gaspésien, des travaux de modélisation de la croissance des arbres en conditions agrosylvicoles ont été entrepris dès 2006. Ils ont conduit au développement de l'Outil de modélisation agroforestier gaspésien (OMAG) (Besnier et coll., 2009). Cet outil de modélisation s'appuie sur une simulation de la croissance des arbres basée sur des données issues de la littérature et intégrées selon une méthodologie permettant de tenir compte de leurs conditions de croissance. Il permet donc de prédire, pour différentes essences, une hauteur et un diamètre pour un âge donné. À partir de ces données, il est possible d'estimer un volume de bois et de répartir celui-ci en différentes classes de qualité.

Pour répondre aux besoins du laboratoire rural *Agroforesterie et paysage*, l'OMAG a été utilisé pour simuler la croissance et la production de bois du chêne à gros fruits et du frêne de Pennsylvanie. Certains ajustements ont également été apportés au modèle. Afin de proposer au lecteur un document permettant à la fois de prendre connaissance des résultats et de comprendre la méthodologie employée, les auteurs ont fait le choix de reprendre plusieurs sections de texte présentées dans Besnier et coll. (2009) en les ajustant lorsque nécessaire.

## **1. Une approche à l'échelle de l'arbre**

### 1.1 L'objectif agrosylvicole : faire de chaque arbre un succès

Dans les systèmes agrosylvicoles, le nombre d'arbres est très faible. Les densités sont de l'ordre de 60 à 80 arbres par hectare pour les systèmes agroforestiers intercalaires. Elles sont encore moins importantes lorsqu'il s'agit de simples haies en bordure de champ.

Dans ces conditions, l'approche agrosylvicole consiste à tirer le meilleur parti de chaque arbre. Pour cela, une sylviculture intensive est envisagée. Les travaux de désherbage et de protection contre la faune ont pour objectif d'améliorer la survie et la croissance des arbres. Les tailles de formation et d'élagage visent l'amélioration de la qualité des tiges. Finalement, lors de la récolte, ce sont les caractéristiques de chaque bille prise individuellement qui détermineront la valeur des arbres.

La simulation de croissance s'inspire de cette approche. Elle vise à prédire une hauteur et un diamètre pour un « arbre moyen ».

### 1.2 De l'arbre moyen au système agrosylvicole : différentes approches

L'arbre moyen pour lequel la simulation est envisagée est représentatif des arbres qui seront récoltés. Or, ce ne sont pas tous les arbres plantés qui se rendront à cette étape. Une certaine variabilité est inévitable dans l'application des modalités de plantation ou d'entretien, mais aussi dans la réaction à des particularités environnementales s'exprimant à petite échelle comme des variations locales du drainage. De même, certains arbres seront affectés par les rongeurs malgré les protections. D'autres encore présenteront des problèmes de forme dus à leurs caractéristiques génétiques et ne pourront pas être commercialisés pour de la bille de qualité malgré les tailles. Enfin, des aléas climatiques ou d'autres incidents (bris par les oiseaux ou par la machinerie agricole) limiteront encore le nombre d'arbres atteignant cet objectif.

Pour simuler le volume de bois qui pourrait être produit dans un système agrosylvicole, la prise en compte de ces éventualités demande un modèle plus complexe qu'une simple multiplication des caractéristiques d'un arbre moyen. Il faut plutôt envisager d'additionner les volumes calculés pour chaque arbre, ceux-ci tenant compte de la probabilité d'occurrence de différents facteurs biotiques ou abiotiques (maladies ou insectes, feux, événements climatiques extrêmes...) pouvant affecter ponctuellement la croissance, et éventuellement causer la mort prématurée de certains individus. Cette approche est celle qui a été utilisée dans la première version de l'OMAG (Besnier et coll., 2009).

Une autre approche consiste à simuler la croissance et la production de volume d'un arbre moyen représentatif de l'ensemble des arbres qui se rendront à la récolte et à estimer « à dire d'expert » la proportion des arbres plantés qui se rendront à cette étape. Dans cette approche, le travail de simulation se trouve simplifié, en ce sens qu'il ne tient plus compte des événements ponctuels pouvant interférer avec la croissance de certains individus. En contrepartie, c'est à l'utilisateur des données que revient la responsabilité d'estimer combien d'arbres vont atteindre ce stade. Pour obtenir le volume de bois de qualité produit dans le système agrosylvicole, l'utilisateur pourra alors multiplier le volume de cet arbre moyen par le nombre d'arbres qui seront récoltés selon lui. C'est cette approche qui est retenue aux fins de la présente étude.

## 2. La simulation de la croissance de l'arbre agroforestier

Les objectifs de cette deuxième partie sont de présenter les bases théoriques de la modélisation de la croissance selon l'approche utilisée dans l'OMAG et d'illustrer leur mise en œuvre en utilisant les cas du chêne à gros fruits (CHG) et du frêne de Pennsylvanie (FRP).

Pour cela, cette partie est décomposée en huit sections. La première (2.1) introduit les orientations qui sous-tendent la démarche de modélisation. La deuxième (2.2) présente les équations de croissance développées (le cœur du modèle). Les sections suivantes (2.3 à 2.8) détaillent comment sont déterminés et quelles sont les valeurs des différents paramètres qui sont utilisés dans les équations.

### 2.1 Une simulation orientée par les caractéristiques des essences

#### *2.1.1 La spécificité de chaque essence doit être prise en compte*

Comme cela a été discuté dans la première partie, l'approche retenue consiste à travailler à l'échelle de l'arbre. La littérature s'intéressant aux arbres s'attarde généralement à décrire les spécificités de chaque essence, autant en termes de morphologie qu'en termes de milieux de vie. Pour que l'approche à l'échelle de l'arbre soit aussi fidèle que possible à la réalité, la prise en compte des caractéristiques spécifiques à chaque essence semble indispensable.

#### *2.1.2 La croissance résulte des caractéristiques de l'essence et du contexte de croissance*

Tel que suggéré par Ménard et coll. (1999), la croissance peut être considérée comme résultant de l'intégration de deux principaux termes : le potentiel physiologique de l'essence et sa réaction au contexte dans lequel elle croît.

Le potentiel physiologique correspond aux performances attendues d'une essence dans un milieu présentant un minimum de contraintes.

Le contexte de croissance entraîne des réactions propres à chaque essence. Aux fins de la présente étude, les influences du contexte de croissance peuvent être associées à deux groupes :

- Les caractéristiques du site :
  - o Sol ;
  - o Climat.
- Le contexte d'agrosylviculture, qui se caractérise notamment par :
  - o Les larges espacements qui font que l'arbre agroforestier a un développement similaire à celui d'un arbre isolé pendant une période importante de sa croissance, ce qui entraîne un fort développement des branches et la nécessité de l'application de tailles de formation et d'élagage pour développer une bille de qualité ;
  - o La présence d'une strate herbacée concurrente et la nécessité de son contrôle ;
  - o La présence de rongeurs et la nécessité de la protection des arbres.

## 2.2 Des équations pour décrire le taux de croissance annuel

### *2.2.1 Le taux de croissance annuel : unité de base de la modélisation*

La simulation de la croissance (diamètre et hauteur) est basée sur le calcul d'un accroissement annuel appelé taux. Ainsi, le diamètre d'un arbre pour une année donnée est calculé en faisant la somme des taux de croissance annuels en diamètre pour les années passées à laquelle est ajouté le diamètre à l'implantation. La démarche est la même pour la hauteur de cime.

### *2.2.2 La croissance de l'arbre peut être décrite en quatre étapes*

S'inspirant des travaux de Gompertz (1825), cité dans Cabanettes et coll. (1999), on considère que les croissances en diamètre et en hauteur des arbres des différentes essences correspondent à des courbes sigmoïdales (Figure 1). On peut distinguer quatre périodes de croissance différant les unes des autres par l'intensité de la croissance annuelle (taux de croissance) :

- La période d'implantation : le taux de croissance est relativement faible mais va en augmentant,
- La période de maturation : le taux de croissance progresse jusqu'à atteindre un maximum au point d'inflexion,
- La période de maturité : le taux de croissance reste relativement élevé mais va en diminuant à partir du point d'inflexion,
- La période de sénescence : le taux de croissance est faible et diminue progressivement.

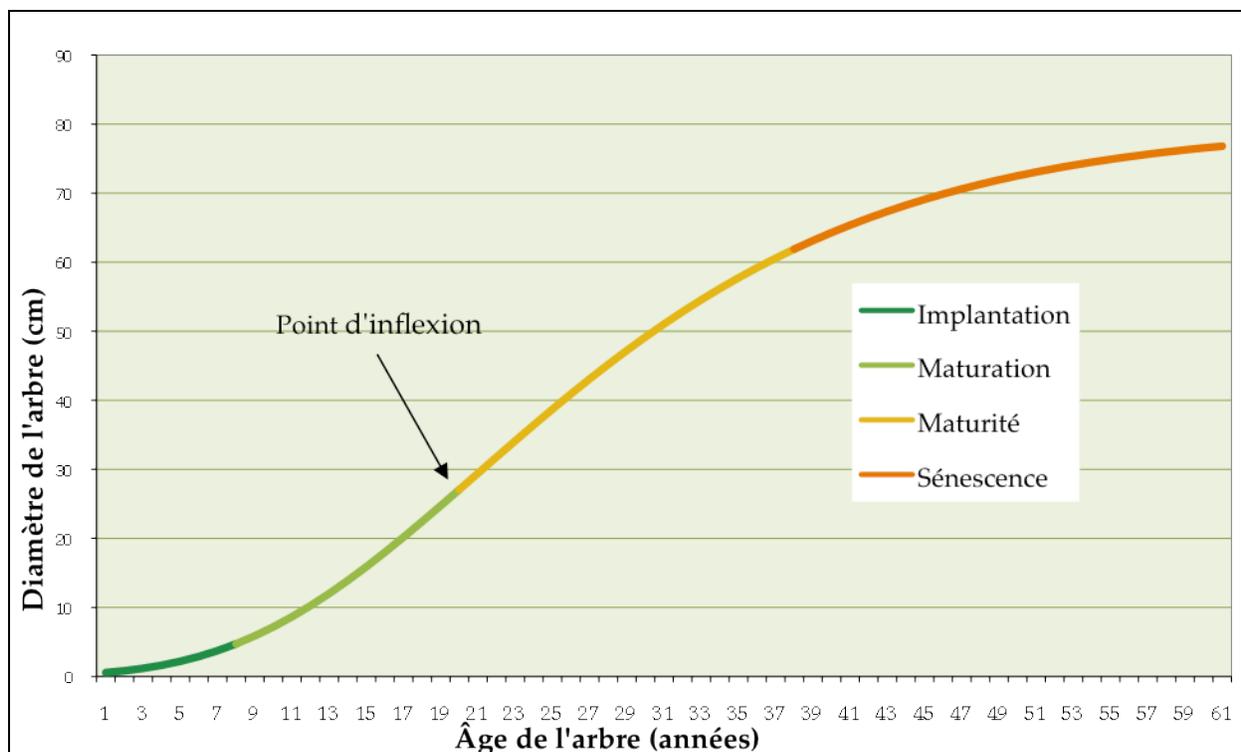


Figure 1 : Courbe théorique du diamètre en fonction de l'âge

### 2.2.3 Des équations pour décrire la croissance

Quatre équations permettent de calculer les taux de croissance annuels pour chacune des périodes de croissance des arbres. Elles ont été développées de sorte à produire une courbe similaire à la courbe théorique (Figure 1) en intégrant les données de croissance (potentiel physiologique) et les différents facteurs qui l'affectent (site et contexte agrosylvicole). Ces équations sont données ici pour le taux de croissance en diamètre. Elles sont identiques pour le taux de croissance en hauteur. Les indices et ratios sont propres à chaque essence pour tenir compte de leur spécificité. Leur signification est détaillée au tableau 1.

- Période d'acclimatation :  $Tcd = Cd_{lit} \cdot ICS \cdot Rd \cdot Ra \cdot \log_{Pd}(Aa+Am) \cdot (I + Vi)$   
( $Aa < Ta$ )

- Période de maturation :  $Tcd = Cd_{lit} \cdot ICS \cdot Rd \cdot \log_{Pd}(Aa+Am) \cdot (I + Vi)$   
( $Aa > Ta$  et  $(Aa + Am) < Pd$ )

- Période de maturité :  $Tcd = Cd_{lit} \cdot ICS \cdot Rd \cdot \frac{Pd}{(Aa + Am)} \cdot (I + Vi)$   
( $Pd \leq (Aa + Am) < As$ )

- Période de sénescence :  $Tcd = Dp \cdot Td \cdot (I + Vi)$   
( $As \leq (Aa + Am)$ ) :

Tableau 1 : Variables et paramètres des équations de croissance

VARIABLE	SIGNIFICATION	ATTRIBUTION DE VALEUR	FOURCHETTE DE VALEURS	VOIR SECTION
Aa	Année actuelle (de simulation) à partir de l'implantation	n.a.	[1 ; 500] (année)	n.a.
Am	Âge à l'implantation	Donnée (pépinière)	[1 ; 10] (ans)	n.a.
As	Âge de sénescence	Calculée	[65 ; 400] (ans)	2.7
$Cd_{lit}$	Croissance annuelle en diamètre en conditions forestières optimales au point d'inflexion	Donnée (littérature)	[0,64 ; 1,3] (cm/an)	2.3
Dp	Taux d'accroissement en diamètre annuel de l'année précédente	Calculée	[0,01 ; 2,15] (cm/an)	n.a.
ICS	Indice de Compatibilité au Site	Calculée	[0 ; 1]	2.4
Pd	Âge au point d'inflexion du diamètre	Calculée	[10 ; 250] (ans)	2.7
Ra	Ratio d'acclimatation	Calculée	[0,43 ; 1]	2.6
Rd	Ratio agroforestier pour la croissance en diamètre	Estimée	1,95	2.5
Ta	Temps d'acclimatation	Calculée	[4 ; 8] (ans)	2.6
Tcd	Taux de croissance annuel en diamètre	Calculée	[0,01 ; 2,15] (cm/an)	2.2
Td	Taux de dégénérescence	Estimée	[0,95 ; 0,98]	2.3
Vi	Variabilité interannuelle	Calculée	[-0.25 ; +0.25]	2.8

## 2.3 Le potentiel physiologique des essences

### *2.3.1 Nature des données*

Le modèle développé calcule le *taux de croissance annuel* (Tcd pour le diamètre) en modulant la *croissance annuelle en conditions optimales au point d'inflexion* ( $Cd_{lit}$  pour le diamètre) en fonction des conditions de croissance (2.2.3). Le paramètre  $Cd_{lit}$  correspond au potentiel physiologique de l'essence, soit la croissance annuelle la plus importante que peut atteindre un arbre dans des conditions ne lui imposant pas de facteur limitant, tel que défini par Reed et coll. (1990), dans Ménard et coll. (1999).

D'autres paramètres relevant du potentiel physiologique des essences (ou caractéristiques intrinsèques) sont utilisés dans les équations de croissance (2.2.3).

La détermination de la valeur de ces paramètres est faite à partir des données disponibles dans la littérature. Pour le frêne de Pennsylvanie, ces données ont été intégrées selon une méthodologie développée pour l'OMAG qui permet de tenir compte de leur précision et de leur représentativité (voir l'Annexe 1). Toutefois, pour le chêne à gros fruits, le nombre restreint de données disponibles n'a pas permis d'utiliser cette méthodologie et les auteurs ont utilisé leur sens critique pour déterminer les valeurs à partir des quelques informations disponibles.

Il est intéressant de remarquer que les données disponibles proviennent généralement d'études menées en milieu forestier. Or, dans des conditions agroforestières particulièrement favorables, il est possible que les taux de croissance simulés au point d'inflexion dépassent les croissances mentionnées dans la littérature (influence du Ratio Rd dans les équations). Le paramètre  $Cd_{lit}$  n'est donc pas considéré comme le potentiel physiologique *absolu* mais plutôt comme le potentiel physiologique *dans des conditions forestières optimales*.

### *2.3.2 Paramètres et valeurs du potentiel physiologique des essences*

Les paramètres utilisés dans les équations de croissance qui sont liés au potentiel physiologique des essences sont présentés au tableau 2. Les valeurs retenues pour les essences considérées dans cette étude y sont également mentionnées, ainsi que les références qui ont permis de les déterminer.

Tableau 2 : Paramètres de croissance et valeurs pour les essences considérées

PARAMÈTRES		VALEURS	RÉFÉRENCES
Diamètre maximal*	D <sub>max<sub>lit</sub></sub>	CHG : 122 cm	[12] [13]
		FRP : 65,1 cm	[15] [18] [26]
Hauteur maximale*	H <sub>max<sub>lit</sub></sub>	CHG : 30 m	[12] [13]
		FRP : 31,8 m	[11] [15] [18] [5]
Croissance annuelle en hauteur pendant la période de plus forte croissance (au point d'inflexion) *	Ch <sub>lit</sub>	CHG : 52 cm/an	[12] [13]
		FRP : 150 cm/an	[15]
Croissance annuelle en diamètre pendant la période de plus forte croissance (au point d'inflexion) *	Cd <sub>lit</sub>	CHG : 0.64 cm/an	[12] [13]
		FRP : 1,3 cm/an	[15]
Âge de sénescence*	A <sub>s<sub>lit</sub></sub>	CHG : 300 ans	[12] [13]
		FRP : 65 ans	D
Âge maximal*	A <sub>max<sub>lit</sub></sub>	CHG : 400 ans	[12] [13]
		FRP : 134 ans	[1] [18]
Temps d'acclimatation* (nombre d'années nécessaires à l'arbre pour reprendre son taux de croissance normale après sa plantation ; correspond au nombre d'années de transition entre la plantation et la période de maturation)	Ta <sub>lit</sub>	CHG : 8 ans	I
		FRP : 8 ans	[9] [18] [20]
Taux de dégénérescence (taux appliqué dans la formule de croissance lorsque l'arbre atteint l'âge de sénescence ; il permet de simuler la dégression finale du taux de croissance annuelle)	Td	CHG : 0,98	D
		FRP : 0,95	D

\* Déterminé à partir des données disponibles dans la littérature pour des arbres poussant en conditions forestières optimales. D = Valeur estimée selon une démarche itérative permettant de rendre les résultats du modèle cohérents ; I= Interprétation à partir des données qualitatives issues de la littérature

## 2.4 La réponse aux caractéristiques du sol et du climat : l'indice de compatibilité au site

### *2.4.1 Nature de l'indice de compatibilité au site*

Le principe de l'indice de compatibilité au site (ICS) est d'intégrer aux équations de croissance un terme multiplicateur unique rendant compte de l'impact des caractéristiques du milieu (sol et climat) sur la croissance des arbres (2.2.3). Pour cela, l'ICS intègre plusieurs facteurs dont chacun traduit la réponse spécifique à une variation de l'une des caractéristiques du milieu. La démarche est illustrée à l'Annexe 2.

#### *Caractéristiques du sol et du climat prises en compte*

Les caractéristiques du sol et du climat qui ont été retenues dans le modèle sont :

- Pour le sol :
  - o Le pH ;
  - o La combinaison texture / drainage (facteur « dratex »).
- Pour le climat :
  - o La pluviométrie ;
  - o La température annuelle moyenne ;
  - o La saison de croissance

Ces caractéristiques sont généralement reconnues pour leur impact sur la croissance des arbres. Elles ont été retenues car il s'agit de données :

- Relativement faciles à obtenir sur le terrain ;
- Pour lesquelles suffisamment d'informations sont disponibles dans la littérature.

#### *Détermination de la valeur des facteurs*

Afin de prendre en compte l'influence de chacune des caractéristiques du milieu sur la croissance, la démarche retenue a été de définir des zones de confort pour chacune d'elles. Ces zones de confort sont séparées par des seuils sur lesquels a porté le travail de recherche d'informations dans la littérature. À ces seuils sont associées des valeurs pour le facteur considéré (F<sub>x</sub>). Ces valeurs se situent entre 0 et 1.

De plus, à chaque zone de confort est associé un poids modérateur qui intervient dans l'intégration des différents facteurs au sein de l'ICS. Ces poids modérateurs (P<sub>mx</sub>) sont utilisés afin d'amplifier l'effet des facteurs sur la croissance lorsque des arbres se trouvent dans des conditions critiques (valeur du facteur <0,6). Ils permettent de mettre en évidence des facteurs qui pourraient affecter plus particulièrement la croissance, même lorsque les autres facteurs sont en zone optimale ou de confort. Cela fait appel à la méthode du facteur le plus limitant qui détermine plus particulièrement le potentiel de croissance d'un site (Shroeder et al. 2003).

Ces informations sont représentées à la figure 2.

Seuils	Néfaste min ↓	Tolérance min ↓	Confort min ↓	Optimum min ↓	Optimum mitoyen ↓	Optimum max ↓	Confort max ↓	Tolérance max ↓	Néfaste max ↓	
Zones de confort / classes de stress	Mortel	Néfaste	Tolérance	Confort	Optimum	Optimum	Confort	Tolérance	Néfaste	Mortel
Valeur du facteur (Fx)	↑ 0,05	↑ 0,35	↑ 0,6	↑ 0,8	↑ 1	↑ 0,8	↑ 0,6	↑ 0,35	↑ 0,05	
Poids modérateur (Pmx)	Absolu	500%	200%	100%	100%	100%	100%	200%	500%	Absolu

Figure 2 : Définition des zones de confort

À partir de l'identification des zones de confort, des courbes représentant l'effet des caractéristiques du milieu sur l'ICS ont été définies pour chaque facteur. Elles sont présentées dans les sections 2.4.2 et 2.4.3. Malheureusement, les informations disponibles dans la littérature ne permettent pas d'identifier systématiquement les seuils entre les différentes classes de confort. Les données disponibles ont donc été utilisées et des interpolations ou des extrapolations ont été réalisées pour déterminer les autres.

#### *Intégration des facteurs dans l'ICS*

L'intégration des facteurs au sein de l'ICS se fait en utilisant des regroupements et plusieurs niveaux de pondération.

Les facteurs sont regroupés en deux catégories : ceux qui relèvent des caractéristiques du sol (facteurs édaphiques) et ceux qui relèvent des caractéristiques du climat (facteurs climatiques).

Au sein de chaque catégorie, les facteurs sont pondérés par un terme défini par la multiplication du poids associé à ce facteur selon la littérature (Px) et du poids modérateur (Pmx). Le poids associé au facteur selon la littérature (Px) correspond à la somme des coefficients de pertinence totaux (Cpt) des valeurs associées aux seuils du facteur (voir l'annexe 1). Il augmente donc avec le nombre de références fiables trouvées, ces dernières témoignant de l'importance accordée à ce facteur par différents auteurs.

Ainsi :

$$Fe = \left( \frac{Fdt * Pdt * Pmdt + Fph * Pph * Pmph}{Pdt * Pmdt + Pph * Pmph} \right)$$

Avec :

Fe = Facteur édaphique

Fdt = Facteur drainage-texture

Fph = Facteur pH

Pdt= Poids du facteur « drainage-texture »

Pph = Poids du facteur « pH »

Pmdt = Poids modérateur du facteur « drainage-texture »

Pmph = Poids modérateur du facteur « pH »

De même :

$$F_c = \left( \frac{F_t * P_t * P_{mt} + F_p * P_p * P_{mp} + F_s * P_s * P_{ms}}{P_t * P_{mt} + P_p * P_{mp} + P_s * P_{ms}} \right)$$

Avec :

F<sub>c</sub> = Facteur climatique

P<sub>s</sub> = Poids du facteur « saison de croissance »

F<sub>t</sub> = Facteur température annuelle moyenne

P<sub>mt</sub> = Poids modérateur du facteur « température annuelle moyenne »

F<sub>p</sub> = Facteur pluviométrie annuelle moyenne

P<sub>mp</sub> = Poids modérateur du facteur « pluviométrie annuelle moyenne »

F<sub>s</sub> = Facteur saison de croissance

P<sub>ms</sub> = Poids modérateur du facteur « saison de croissance »

P<sub>t</sub> = Poids du facteur « température annuelle moyenne »

P<sub>p</sub> = Poids du facteur « pluviométrie annuelle moyenne »

Finalement, l'équation de l'ICS permet de combiner les facteurs édaphiques et les facteurs climatiques.

$$ICS = \frac{P_e * P_{me} * F_e + P_c * P_{mc} * F_c}{P_e * P_{me} + P_c * P_{mc}}$$

Avec :

F<sub>e</sub> = Facteurs édaphiques

P<sub>c</sub> = Poids des facteurs climatiques

F<sub>c</sub> = Facteurs climatiques

P<sub>me</sub> = Poids modérateur des facteurs édaphiques

P<sub>e</sub> = Poids des facteurs édaphiques

P<sub>mc</sub> = Poids modérateur des facteurs climatiques

La valeur du poids modérateur appliqué au poids d'un regroupement de facteurs (P<sub>e</sub> x P<sub>me</sub> ou P<sub>c</sub> x P<sub>mc</sub>) est la plus grande valeur issue de la combinaison du poids (P<sub>x</sub>) et du poids modérateur (P<sub>mx</sub>) des facteurs qui composent le regroupement.

*L'exemple du poids modérateur du regroupement des facteurs édaphiques (P<sub>me</sub>) pour le pin blanc (le sol est un loam argileux de drainage 2 et pH 4,25) permet d'illustrer la méthode :*

*Le poids du facteur pH (P<sub>ph</sub>) est de 0,66 et le poids modérateur (P<sub>mph</sub>) est de 200%, donc P<sub>ph</sub>\*P<sub>mph</sub> = 1,32.*

*Le poids du facteur drainage/texture (P<sub>dt</sub>) est de 0,33 et le poids modérateur (P<sub>mdt</sub>) est de 100%, donc P<sub>dt</sub>\*P<sub>mdt</sub> = 0,33*

*Ainsi, puisque la valeur de « P<sub>ph</sub>\*P<sub>mph</sub> » est supérieure à celle de « P<sub>dt</sub> \* P<sub>mdt</sub> », alors « P<sub>me</sub> = P<sub>ph</sub> \* P<sub>mph</sub> = 1,32 »*

### 2.4.2 Valeurs des facteurs édaphiques

Pour chacune des deux essences considérées, les réponses aux différentes conditions de pH sont décrites au tableau 3 et à la figure 3.

Tableau 3 : Facteur pH : définition des seuils pour les deux essences

	CHÊNE À GROS FRUITS		FRÊNE DE PENNSYLVANIE	
Seuils	Valeur	Références	Valeur	Références
Tolérance min	4	[7] [12] [13] [18]	4,3	[11] [18] [29]
Confort min	4,35	[7] [12] [13] [18]	4,8	I
Optimum min	5	[7] [12] [13] [18]	5,5	[6] [11] [15] [18]
Optimum mitoyen	6,25	[7] [12] [13] [18]	6,5	[6] [11] [26]
Optimum max	7,25	[7] [12] [13] [18]	6,9	[6] [7] [11]
Confort max	7,5	[7] [12] [13] [18]	7,5	[6] [15]
Tolérance max	7,75	[7] [12] [13] [18]	8	[15] [18] [29]

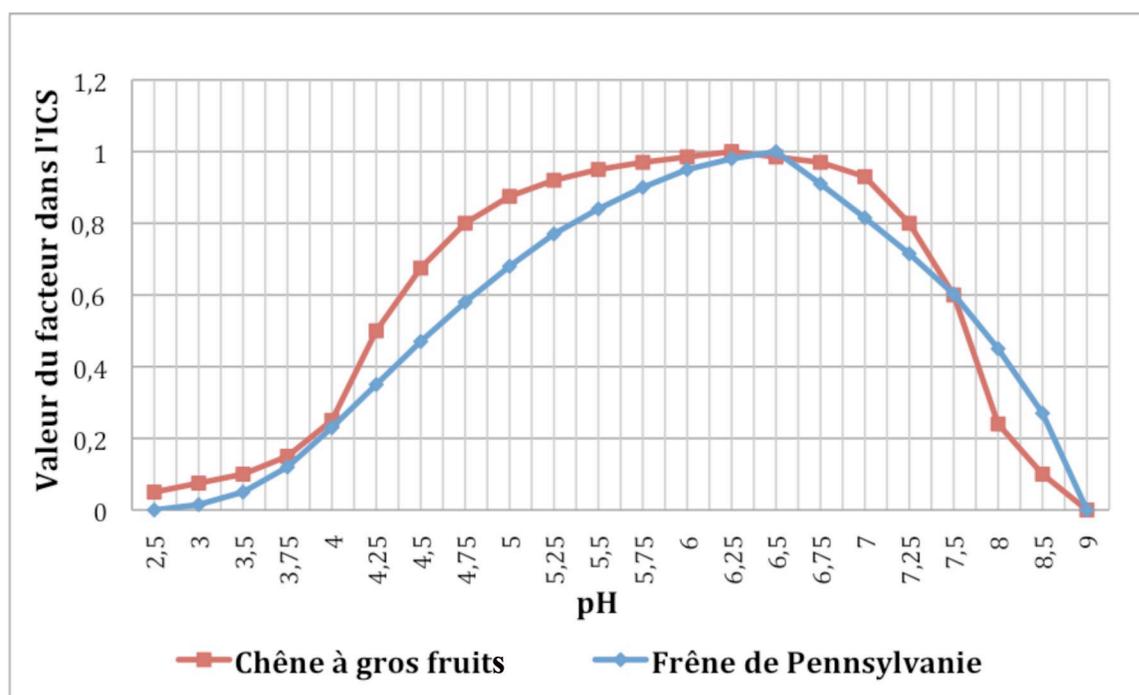


Figure 3 : Variations du facteur pH pour les deux essences

Dans le cas des facteurs drainage et texture du sol, un indice « dratex » a été développé pour tenir compte de leur forte corrélation, s'inspirant des travaux de Lupien (2004). C'est donc l'influence du facteur dratex qui est prise en compte dans l'ICS. Pour le construire, les seuils ont toutefois été définis indépendamment pour le drainage et pour la texture. Ils sont présentés aux tableaux 4 et 5 pour les deux essences. Les réponses à l'interaction entre la texture et le drainage (facteur dratex) sont présentées aux figures 4 et 5 pour chacune des essences.

6Tableau 4 : Définition des seuils pour le drainage pour les deux essences

Seuils	CHÊNE À GROS FRUITS		FRÊNE DE PENNSYLVANIE	
	Valeur	Références	Valeur	Références
Tolérance min	1	[12] [13] [18]	1	[18]
Confort min	1	[12] [13] [18]	2	[18] [15]
Optimum min	2	[12] [13] [18]	2	[6] [18] [25] [32]
Optimum mitoyen	2	[12] [13] [18]	2	[15] [18] [25] [32]
	3		3	
			4	
Optimum max	4	[12] [13] [18]	4	[6] [18] [25] [32]
Confort max	5	[12] [13] [18]	5	[18] [15]
Tolérance max	5	[12] [13] [18]	6	[15] [18] [25]

Tableau 5 : Définition des seuils pour la classe texturale pour les deux essences

Seuils	CHÊNE À GROS FRUITS		FRÊNE DE PENNSYLVANIE	
	Valeur	Références	Valeur	Références
Tolérance min	A	[12] [13] [18]	A-Lo	[9]* [11] [15]* [18] [25] [30]*
Confort min	A	[12] [13] [18]	A	[18] [25]*
Optimum min	L-A	[12] [13] [18]	A	[18] [25]*
Optimum mitoyen	L-Li L	[12] [13] [18]	L	[6]* [11] [15] [18] [25] [32]
			L-Li	
			Li	
			L-S-A	
			L-A	
			L-Li-A	
			A-S A-Li	
Optimum max	L-S	[12] [13] [18]	L-S	[15]* [18] [25]
Confort max	S-L	[12] [13] [18]	S-L	[18] [25]
Tolérance max	S	[12] [13] [18]	S	[9] [11] [15] [18]* [25] [30]
	SM			

\*Les valeurs issues de ces références ne contribuent pas directement à l'identification des seuils. Elles ont cependant été utilisées dans la détermination des marges des tableaux du facteur Dratex.

		Classes de drainage							
L	3	0	1	2	3	4	5	6	
Classes texturales	Fines (sols argileux)	A-Lo	0,05	0,05	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
		A	0,05	0,05	0,75	0,75	0,5	0,15	0,15
		A-Li	0,05	0,05	0,75	0,75	0,75	0,5	0,15
		A-S	0,05	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,15
	Moyennes (sols loameux)	L-Li-A	0,15	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,15
		L-A	0,15	0,75	0,95	0,95	0,75	0,75	0,15
		L-S-A	0,15	0,75	0,95	0,95	0,95	0,75	0,15
		Li	0,15	0,75	0,95	0,95	0,75	0,75	0,15
		L-Li	0,15	0,75	1	0,95	0,75	0,75	0,15
		<b>L</b>	0,15	0,75	1	1	0,95	0,75	0,15
	Grossières	L-S	0,15	0,75	0,95	0,95	0,95	0,75	0,15
		S-L	0,15	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,15
		S	0,15	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,15
Sol mince	SM	0,15	0,15	0,5	0,5	0,15	0,15	0	

Figure 4 : Variations du facteur dratex pour le chêne à gros fruits

		Classes de drainage							
L	3	0	1	2	3	4	5	6	
Classes texturales	Fines (sols argileux)	A-Lo	0,05	0,05	0,15	0,5	0,5	0,5	0,5
		A	0,05	0,05	0,75	0,75	0,95	0,75	0,5
		A-Li	0,05	0,05	0,75	0,95	1	0,75	0,5
		A-S	0,05	0,5	0,75	0,95	1	0,75	0,5
	Moyennes (sols loameux)	L-Li-A	0,15	0,5	0,95	1	1	0,75	0,5
		L-A	0,15	0,5	0,95	1	1	0,75	0,5
		L-S-A	0,15	0,5	1	1	0,95	0,75	0,5
		Li	0,15	0,5	1	1	0,95	0,75	0,5
		L-Li	0,15	0,5	1	0,95	0,95	0,75	0,5
		<b>L</b>	0,15	0,5	1	0,95	0,75	0,75	0,5
	Grossières	L-S	0,15	0,5	0,95	0,95	0,75	0,75	0,5
		S-L	0,15	0,5	0,75	0,75	0,5	0,5	0,5
		S	0,15	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Sol mince	SM	0,05	0,05	0,15	0,15	0,15	0,15	0,05	

Figure 5 : Variations du facteur dratex pour le frêne de Pennsylvanie

### 2.4.3 Valeurs des facteurs climatiques

Pour chacune des deux essences considérées, les réponses aux différentes conditions de température annuelle moyenne sont décrites au tableau 6 et à la figure 6.

Tableau 6 : Facteur température annuelle moyenne: définition des seuils pour les deux essences

	CHÊNE À GROS FRUITS		FRÊNE DE PENNSYLVANIE	
Seuils	Valeur (°C)	Références	Valeur (°C)	Références
Tolérance min	2	[12] [13]	3	[11] [18]
Confort min	3	[12] [13]	6	[11] <sup>2</sup>
Optimum min	4,5	[12] [13]	9	[11] <sup>2</sup>
Optimum mitoyen	10,8 <sup>3</sup>	[12] [13]	13,5	I
Optimum max	14,2	[12] [13]	16,5	I
Confort max	20	[12] [13]	18	I
Tolérance max	H.S.	-	21 <sup>1</sup>	[15]

I= Interpolation, H .S .= hors simulation

1-Correspond à l'isotherme le plus au sud de sa distribution à partir de Kennedy 1990 d'après les données climatiques du NCDC (2004). On connaît seulement les tolérances, confort et optimaux minimaux, aucun problème relié à la température excessive semble nuire à la croissance des frênes de Pennsylvanie.

Puisque le modèle ne sera pas utilisé pour des régions aux températures excessives, seuls les seuils minimaux interagissent dans le calcul de l'ICS.

2- Kozlowski et Pallardy 1979 dans Gucker 2005.

3 – Température annuelle moyenne des états de l'Illinois et de l'Indiana où le chêne à gros fruits aurait les meilleures croissances

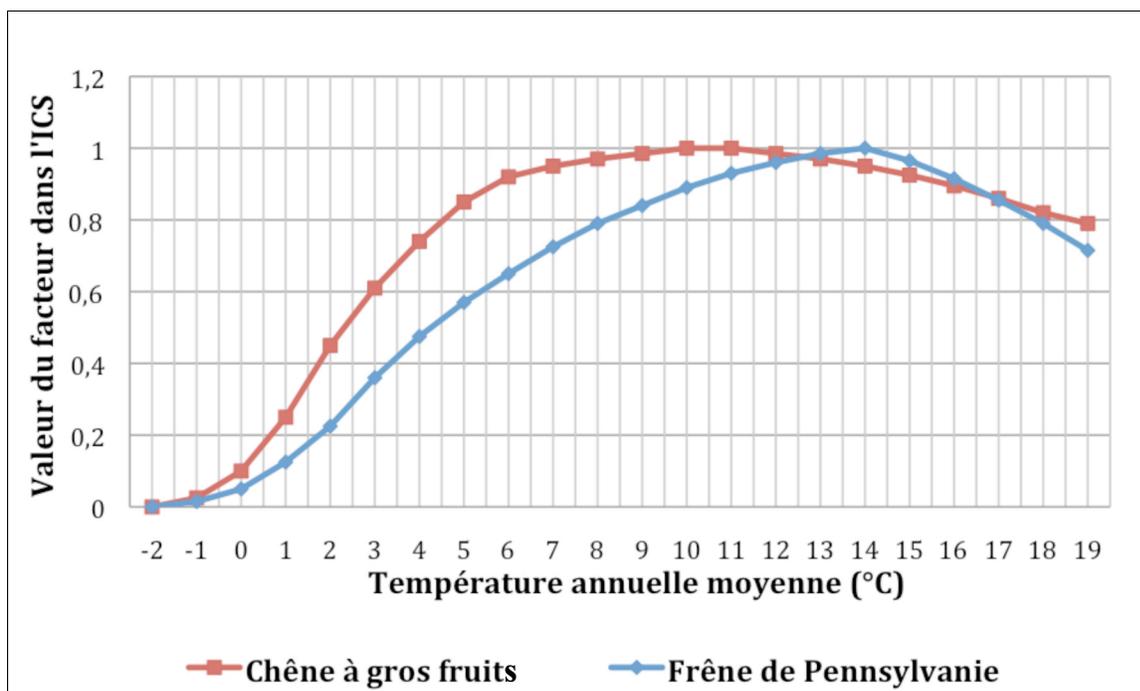


Figure 6 : Variations du facteur température annuelle moyenne pour les deux essences

Pour chacune des deux essences considérées, les réponses aux différentes conditions de pluviométrie annuelle moyenne sont décrites au tableau 7 et à la figure 7.

Tableau 7 : Facteur pluviométrie annuelle moyenne: définition des seuils pour les deux essences

	CHÊNE À GROS FRUITS		FRÊNE DE PENNSYLVANIE	
Seuils	Valeur (mm/an)	Références	Valeur (mm/an)	Références
Tolérance min	380	[12] [13]	322	[15] [25] [29]
Confort min	630	I	592	I
Optimum min	1000	[12] [13]	861	I
Optimum mitoyen	1140	[12] [13]	1131	I
Optimum max	1270	[12] [13]	1400	I
Confort max	1342	I	1670	[15] [29]
Tolérance max	1662	[23]	1940	E

I= Interpolation, E= Extrapolation, n.a. = non applicable

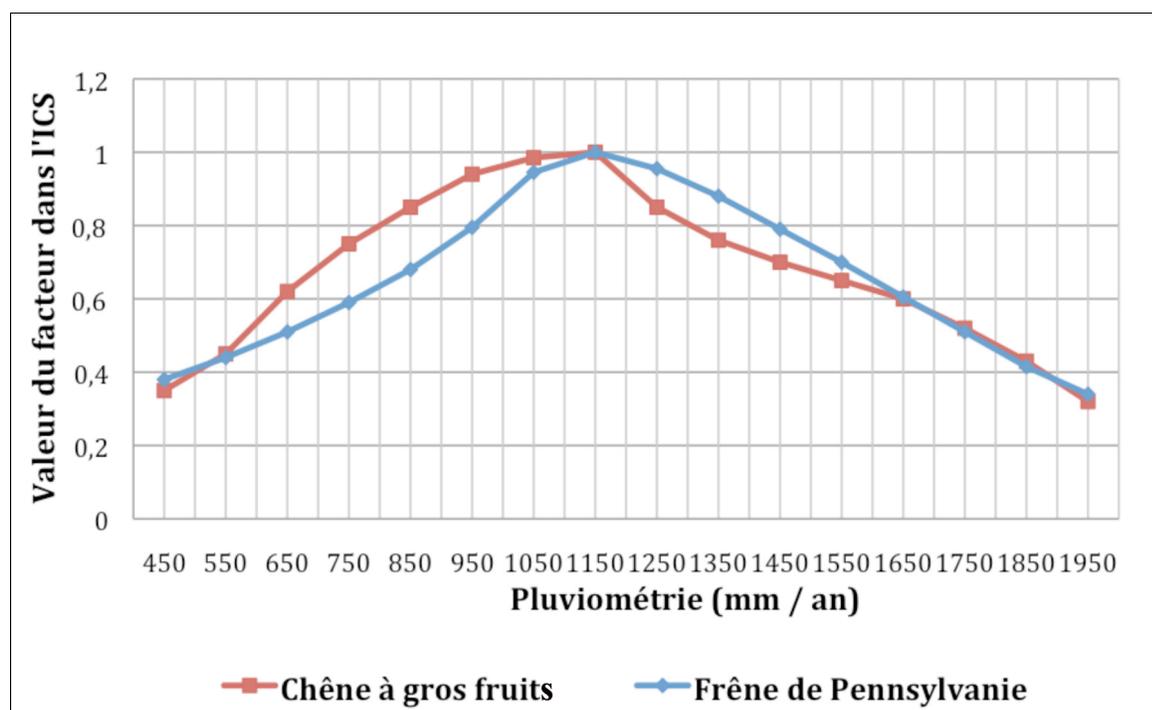


Figure 7 : Variations du facteur pluviométrie annuelle moyenne pour les deux essences

Enfin, les informations concernant la saison de croissance étant peu nombreuses, son influence n'apparaît dans l'ICS qu'en dehors de la zone de confort. Les seuils qui ont pu être identifiés et les valeurs correspondantes sont présentés au tableau 8.

Tableau 8 : Définition des seuils pour la saison de croissance

Seuils	CHÊNE À GROS FRUITS		FRÊNE DE PENNSYLVANIE	
	Valeur (jours*)	Références	Valeur (jours*)	Références
Tolérance min	100	[12] [13] [18]	120	[18]
Confort min			145	I
Optimum mitoyen	190	[12] [13]		
Confort max		[12] [13]	270 et +	E
Tolérance max	260	[12] [13]	270 et +	E

\* Nombre de jours dont la température moyenne dépasse 5°C

I= Interpolation, E= Extrapolation, D= Détermination

## 2.5 La prise en compte des larges espacements : le ratio agroforestier

Les larges espacements qui caractérisent les systèmes agroforestiers font que les arbres se font peu de compétition entre eux et ont un accès privilégié aux ressources (lumière, eau, nutriments) (Dupraz et Liagre, 2008). Rhoades et Stipes (1999) ont mis de l'avant que, dans des conditions de faible compétition comme c'est le cas après une éclaircie dans un peuplement, les taux de croissance des arbres ont tendance à augmenter en comparaison aux conditions de peuplement ou de plantation plus dense. Toutefois, selon ces auteurs, l'absence d'élagage tend à rendre le tronc plus conique. Or les tailles de formation et d'élagage peuvent permettre de maintenir la cylindricité du tronc. Dupraz et Liagre (2008) préconisent à cet effet des tailles annuelles jusqu'à l'obtention d'une bille de pied bien formée. La régularité de la taille permet d'adopter une démarche progressive, évitant ainsi des tailles trop sévères qui risqueraient d'avoir un effet négatif sur la croissance (Solomon et Blum 1977).

Par ailleurs, Cabanettes et ses collaborateurs (1999) notent qu'en milieu ouvert la croissance en diamètre est supérieure à celle en peuplement, alors que la croissance en hauteur y est inférieure. Les premiers résultats de l'équipe de Christian Dupraz de l'INRA (Montpellier, France) démontrent cependant que les arbres agroforestiers faisant l'objet de tailles régulières présentent, contrairement aux attentes, des hauteurs plus grandes et des diamètres plus larges que ceux en plantations forestières (C.Dupraz, comm. pers.; F.Liagre, comm. pers.).

Sur la base de ces informations, un coefficient permettant d'ajuster la croissance des arbres qui poussent dans des conditions agroforestières par rapport à ceux qui poussent dans des conditions forestières a été intégré aux équations de croissance (2.2.3). Ce coefficient est appelé ratio agroforestier et se décline en ratio agroforestier pour la croissance en diamètre (Rd) et en ratio agroforestier pour la croissance en hauteur (Rh).

Le manque de données disponibles rend difficile la détermination des valeurs du ratio agroforestier pour chacune des essences. Cela est d'autant plus vrai si on considère que la fréquence de la réalisation des tailles de formation et d'élagage pourrait aussi avoir un impact. Pour contourner cette difficulté, les ratios agroforestiers ont été déterminés en considérant que les tailles de formation et d'élagage sont réalisées sur une base annuelle afin que le volume prélevé chaque année reste faible et que l'impact sur la croissance de l'arbre soit minimal.

Les valeurs appliquées au ratio agroforestier sont présentées au tableau 9.

Tableau 9 : Ratio agroforestier : valeurs et références

		CHÊNE À GROS FRUITS		FRÊNE DE PENNSYLVANIE	
Paramètres		Valeur	Références	Valeur	Références
Ratio agroforestier pour le diamètre	Rd	1,95	Déterminé : [8] Dupraz et Liagre com pers 2008, Besnier et coll 2010 et Cogliastro comm pers	1,95	Déterminé : [8] Dupraz et Liagre com pers 2008, Besnier et col 2010 et Cogliastro comm pers
Ratio agroforestier pour la hauteur	Rh	1,4	Déterminé : [8] Dupraz et Liagre com pers 2008, Besnier et col 2010 et Cogliastro comm pers	0,95	Déterminé : [8] Dupraz et Liagre com pers 2008, Besnier et col 2010 et Cogliastro comm pers

## 2.6 La période d'acclimatation : durée et ratio spécifique

La mise en place des systèmes agroforestiers implique généralement la plantation des arbres. Ces arbres peuvent être des plants de plus ou moins fortes dimensions, à racines nues ou en récipients. Ils sont habituellement âgés de 1 à 3 ans. Après leur plantation, ces arbres traversent une période d'acclimatation (section 2.2.2). Plusieurs facteurs jouent sur cette période, notamment les caractéristiques de l'arbre planté, les soins apportés à la plantation (arrosage et fertilisation) et la compétition exercée par la végétation herbacée qui limite l'accès à l'eau et aux nutriments aux arbres dont le système racinaire est encore peu développé. Dans les équations de croissance, cette période est décrite par le temps d'acclimatation ( $T_a$ ) et le ratio d'acclimatation ( $R_a$ ) (2.2.3).

Les données disponibles dans la littérature au sujet du temps d'acclimatation sont rares et ne permettent pas de cerner les différents facteurs qui l'affectent. Une analyse des données disponibles a été réalisée en se basant sur le jugement critique des auteurs. Ainsi, un temps d'acclimatation moyen de huit ans a été retenu pour les deux essences considérées. Il est réduit de moitié (quatre ans) si un paillis de plastique est utilisé pour contrer la concurrence de la végétation spontanée.

Le temps d'acclimatation permet le calcul du ratio d'acclimatation ( $R_a$ ). Ce calcul s'effectue seulement à l'intérieur de la période d'implantation et utilise le logarithme de l'année en cours ( $A_a$ ) en base du temps d'acclimatation ( $T_a$ ). À toutes fins pratiques, si l'année en cours est 1 alors la valeur de  $R_a$  est fixée à 60% du  $R_a$  de la deuxième année.

$$R_a = \log_{T_a} A_a$$

## 2.7 Détermination de l'âge au point d'inflexion, de l'âge de sénescence et de l'âge maximal

### *2.7.1 L'âge au point d'inflexion*

Le point d'inflexion sépare la période de maturation de la période de maturité (2.2.2). Il détermine l'âge auquel un arbre atteint son taux de croissance annuel maximal. Dans la présente modélisation, on identifie un âge au point d'inflexion pour la croissance en diamètre (Pd) et un âge au point d'inflexion pour la croissance en hauteur (Ph).

Selon Greenwood (1989), la croissance maximale est atteinte plus rapidement lorsqu'un arbre rencontre des conditions de croissance favorables. Dans le cadre de cette étude, on considère que ce sont les conditions environnementales dans lesquelles l'arbre croît qui déterminent l'âge au point d'inflexion.

L'âge au point d'inflexion est déterminé par approximation, de sorte à faire coïncider la somme des croissances annuelles simulées avec le diamètre ou la hauteur attendue lorsque l'arbre atteindra son âge maximal. Dans le cas du diamètre, on recherche donc Pd de sorte à ce que :

$$\sum Tcd + Di = Dmax \pm 0,05 \cdot Dmax$$

Avec :

$\sum Tcd$  = somme des taux de croissance en diamètre annuel pour les années allant de l'implantation jusqu'à la fin de la vie de l'arbre sur le site considéré ( $A_{max}$ )

$Di$  = diamètre à l'implantation

$Dmax$  = diamètre atteint en fin de vie sur un site donné

La détermination de  $Dmax$  se fait en appliquant le calcul :

$$Dmax = Dmax_{lit} \cdot ICS \cdot Rd$$

La détermination de l'âge au point d'inflexion demande de connaître l'âge de sénescence, qui marque la transition entre la période de maturité et la période de sénescence, et l'âge maximal qui correspond à l'âge théorique de fin de vie de l'arbre.

### *2.7.2 L'âge de sénescence*

L'âge de sénescence ( $As$ ) sépare la période de maturité et la période de sénescence. Les données de la littérature utilisées ( $As_{lit}$ ) pour déterminer les âges de sénescence des essences sont peu nombreuses et souvent contextuelles. Dans le modèle, l'âge de sénescence attendu pour une essence sur un site donné ( $As$ ) est calculé selon la formule :

$$As = Amax * \frac{As_{lit}}{Amax_{lit}}$$

### 2.7.3 L'âge maximal

L'âge maximal ( $A_{max}$ ) est l'âge théorique de fin de vie d'un arbre sur un site donné. Dans la présente étude, il est utilisé pour le calcul de l'âge au point d'inflexion et celui de l'âge de sénescence.

Les données de la littérature utilisées pour déterminer l'âge maximal des essences ( $A_{max_{lit}}$ ) n'indiquent généralement pas les conditions de croissance de ceux-ci. Toutefois, pour plusieurs essences, l'âge que peut atteindre un arbre sur un site donné est inversement proportionnel à la qualité d'un site (Greenwood 1989). Ainsi, en augmentant la qualité d'un site, le potentiel de croissance est atteint plus rapidement, ce qui devance l'âge de sénescence et précipite la mortalité de l'arbre. C'est ce que démontrent des études telles que celle réalisée par Suarez et ses collaborateurs (1999). À partir de ces informations, on considère que l'âge maximal donné dans la littérature ( $A_{max_{lit}}$ ) a été obtenu sur des sites dont l'ICS est inférieur à 0,6. Cette valeur d'ICS représente en effet le seuil entre la zone de confort et la zone de tolérance pour une essence (voir figure 2).

L'âge maximal ( $A_{max}$ ) que peut atteindre un arbre sur un site donné est alors calculé par l'équation :

$$\text{SI } ICS \geq 0,6 : A_{max} = A_{max_{lit}} \cdot \frac{0,6}{ICS}$$

$$\text{SI } ICS < 0,6 \text{ alors } A_{max} = A_{max_{lit}}$$

## 2.8 La prise en compte de la variabilité interannuelle

Dans les équations de croissance, la variabilité interannuelle ( $V_i$ ) est un terme qui bonifie ou qui réduit le taux de croissance brut (potentiel physiologique modulé par les conditions de croissance rencontrées et par l'âge de l'arbre) (2.2.3). Elle est utilisée afin de décrire la variation aléatoire du taux de croissance d'une année à l'autre sous l'effet de facteurs environnementaux s'exprimant ponctuellement.

La variabilité interannuelle est limitée par un terme maximal ( $V_{i_{\max}}$ ) qui peut être ajusté en fonction de l'objectif de simulation. Par défaut, sa valeur est de 0,25. La connaissance des problématiques environnementales reliées à un territoire couplée à la connaissance des essences peuvent conduire à ajuster ce « bruit blanc » ajouté aux équations.

Le calcul de la variabilité interannuelle est fait pour chaque année de croissance et pour chaque essence à l'aide de trois nombres aléatoires dont la valeur se situe entre 0 et 1 ( $Na_1$ ,  $Na_2$  et  $Na_3$ ) en utilisant la formule :

$$\text{SI } Na_1 < 0,5 : V_i = Na_2 \cdot V_{i_{\max}} ;$$

$$\text{SI } Na_1 \geq 0,5 : V_i = -1 \cdot Na_3 \cdot V_{i_{\max}}$$

### 3. Estimation des volumes de bois produit

#### 3.1 Le calcul du volume de bois d'un arbre

La simulation de la croissance de l'arbre agroforestier donne la hauteur et le diamètre d'un arbre pour un âge donné en tenant compte des caractéristiques de l'essence et des conditions du milieu. À partir de ces données, il est possible d'estimer le volume de bois de l'arbre correspondant en utilisant l'équation de cubage de Perron (2003). L'utilisation de cette équation demande toutefois d'assumer l'hypothèse que, pour une hauteur et un diamètre donnés, le volume de l'arbre dépend de l'essence et ne varie pas en fonction du milieu de croissance.

L'équation de cubage de Perron permet de calculer le volume total des parties de l'arbre dont le diamètre est supérieur à 9 cm ( $v$ ) à partir de sa hauteur ( $H$ ) et de son diamètre à hauteur de poitrine<sup>1</sup> ( $d$ ). La hauteur de coupe théorique est de 15 cm au dessus du sol.

$$v = \alpha_0 + \alpha_1 d + \alpha_2 d^2 + \alpha_3 H + \alpha_4 dH + \alpha_5 H^2 + \alpha_6 d^2 H$$

Dans cette équation, les alphas ( $\alpha$ ) sont des constantes données pour chacune des essences. Malheureusement, ces constantes ne sont pas disponibles pour les deux essences considérées dans cette étude. À partir d'une analogie entre les morphologies de différentes essences, les constantes du chêne rouge sont utilisées pour le calcul du volume de bois du chêne à gros fruits et celles du frêne noir pour le calcul du volume du frêne de Pennsylvanie. Leurs valeurs sont précisées dans le tableau 10.

Tableau 10 : Valeurs des paramètres alpha de l'équation de cubage de Perron

Essence	alpha0	alpha1	alpha2	alpha3	alpha4	alpha5	alpha6
CHR	-7,6298	0	0	0	0	-0,0911019	0,035163
FRN	0,4784	-0,52712	0,101104	0	-0,27414	0	0,03885

#### 3.2 Le classement de la qualité du bois

Théoriquement, toutes les parties d'un arbre peuvent faire l'objet d'une valorisation. Il y a bien sûr la précieuse bille de pied qui sera idéalement destinée au déroulage, au tranchage ou au sciage. Il y a également la partie haute du tronc et les branches dont certaines, de fort diamètre et de belle allure, peuvent trouver des usages industriels. Toutes les parties qui ne se dirigent pas vers les usines de sciage et de déroulage peuvent finalement être valorisées en bois de chauffage ou en bois de pâte.

Dans le cadre de cette étude, les volumes correspondants à deux catégories de bois seulement sont évalués :

- Les billes prélevées dans la partie du tronc sans branche ;
- Le reste du volume.

---

<sup>1</sup> Le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) est calculé à 1,3 m du sol.

### 3.3 Le calcul du volume des billes

#### *3.3.1 Longueur totale des billes*

De façon arbitraire, on considère qu'un tiers de la hauteur totale de l'arbre a les caractéristiques nécessaires pour produire du bois de qualité (rectitude et absence de nœuds). Pour obtenir la longueur totale des billes, il faut retrancher de cette longueur la hauteur de souche, soit la hauteur de coupe au-dessus du sol. Cette hauteur de souche est fixée à 15 cm, pour être cohérent avec les équations de cubage de Perron (3.2).

Ainsi :

$$L_{\text{billes}} = 1/3 * H - H_S$$

Avec :

$$L_{\text{billes}} = \text{longueur totale des billes}$$

H = hauteur totale de l'arbre

H<sub>S</sub> = hauteur de la souche (15 cm)

Dans la suite des calculs, cette longueur est considérée comme une bille unique même si, en pratique, elle serait sectionnée en plusieurs sections pour être transformée.

#### *3.3.2 Détermination des diamètres au gros bout et au fin bout*

Les diamètres au gros bout (D<sub>G</sub>) et au fin bout (D<sub>F</sub>) sont calculés en appliquant le théorème de Thalès au cône que forme le tronc de l'arbre et en utilisant le diamètre à hauteur de poitrine (DHP, mesuré à 1,30 m) généré lors de la simulation.

Ainsi :

$$D_G = DHP * (H - H_S) / (H - 1,30)$$

Et :

$$D_F = D_G * 2/3 * H / (H - H_S)$$

#### *3.3.3 Calcul du volume total des billes*

Le volume de la bille peut alors être calculé en appliquant la formule :

$$V_{\text{billes}} = L_{\text{billes}} / 3 * (S_G + \sqrt{(S_G + S_F)} + S_F)$$

Avec :

$$V_{\text{billes}} = \text{volume total des billes}$$

S<sub>G</sub> = surface au gros bout

S<sub>F</sub> = surface au petit bout

## 4. Résultats des simulations

Aux fins du laboratoire rural *Agroforesterie et paysage*, le modèle a été utilisé pour simuler la croissance et la production de volume du chêne à gros fruits et du frêne de Pennsylvanie sur une parcelle de référence. Ses caractéristiques édaphiques sont un sol de type loam, un pH de 5,8 et un drainage modéré. Les caractéristiques climatiques sont une température moyenne annuelle de 3°C, des précipitations annuelles de 1100 mm et une saison de croissance de 150 jours. De plus, l'arbre bénéficie de la protection d'un paillis de plastique qui réduit le temps d'acclimatation à 4 ans.

### 4.1 Chêne à gros fruits

La hauteur, le diamètre, le volume total et le volume des billes simulés pour le chêne à gros fruits sont présentés au Tableau 11. L'évolution du volume total et du volume des billes est également représentée à la Figure 9.

Tableau 11 : Résultats de simulation pour le chêne à gros fruits

ANNÉE	HAUTEUR (m)	DIAMÈTRE À HAUTEUR DE POITRINE (cm)	VOLUME COMMERCIAL TOTAL (m <sup>3</sup> )	VOLUME DES BILLES (m <sup>3</sup> )
0	0,65	0,00	0,00	0,00
5	1,85	1,03	0,00	0,00
10	4,06	3,85	0,00	0,00
15	6,63	7,13	0,00	0,01
20	9,16	10,85	0,02	0,03
25	11,16	14,76	0,07	0,05
30	12,81	18,86	0,14	0,10
35	14,23	23,15	0,24	0,16
40	15,49	27,72	0,39	0,25
45	16,59	32,30	0,58	0,36
50	17,58	37,06	0,82	0,50
55	18,49	41,90	1,11	0,67
60	19,32	46,50	1,43	0,86
65	20,09	50,78	1,78	1,06
70	20,80	54,67	2,14	1,26
75	21,47	58,36	2,53	1,48
80	22,09	61,80	2,92	1,70
85	22,68	65,08	3,33	1,94
90	23,24	68,16	3,75	2,17
95	23,76	71,07	4,17	2,41
100	24,26	73,85	4,60	2,65

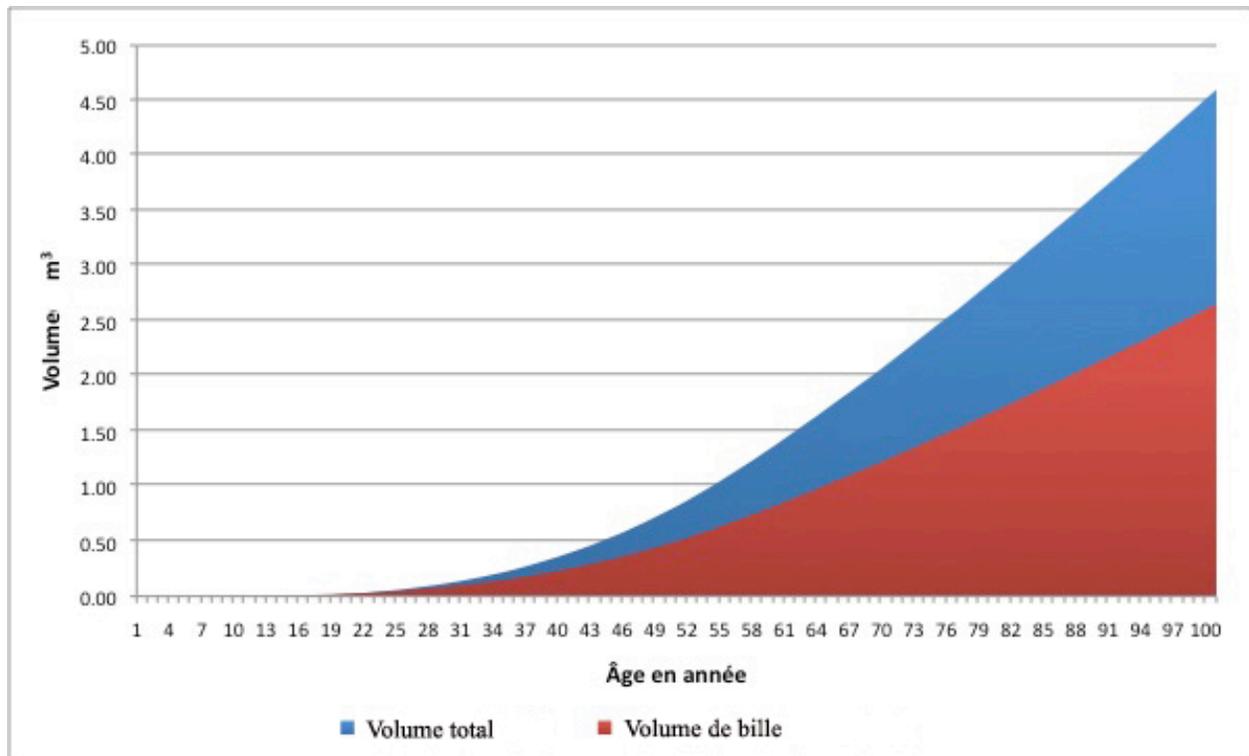


Figure 9 : Évolution du volume commercial total et du volume de bille pour le chêne à gros fruits

## 4.2 Frêne de Pennsylvanie

La hauteur, le diamètre, le volume commercial total et le volume des billes simulés pour le frêne de Pennsylvanie sont présentés au Tableau 12. L'évolution du volume total et du volume des billes est également représentée à la Figure 9.

Tableau 12 : Résultats de simulation pour le frêne de Pennsylvanie

ANNÉE	HAUTEUR (m)	DIAMÈTRE À HAUTEUR DE POITRINE (cm)	VOLUME COMMERCIAL TOTAL (m <sup>3</sup> )	VOLUME DES BILLES (m <sup>3</sup> )
0	0,85	0,00	0,00	0,00
5	3,15	3,21	0,00	0,00
10	7,40	9,47	0,01	0,02
15	11,66	17,04	0,10	0,07
20	14,80	25,28	0,32	0,20
25	17,37	33,07	0,68	0,39
30	19,51	39,54	1,13	0,62
35	21,32	44,96	1,61	0,87
40	22,91	49,72	2,14	1,14
45	24,31	53,93	2,68	1,42
50	25,39	57,19	3,17	1,66
55	26,27	59,81	3,63	1,87
60	26,94	61,90	4,09	2,05
65	27,47	63,53	4,49	2,20
70	27,88	64,79	4,86	2,32
75	28,19	65,72	5,18	2,41
80	28,40	66,36	5,42	2,47
85	28,56	66,85	5,61	2,52
90	28,66	67,17	5,74	2,56
95	28,73	67,43	5,86	2,58
100	28,78	67,59	5,95	2,60

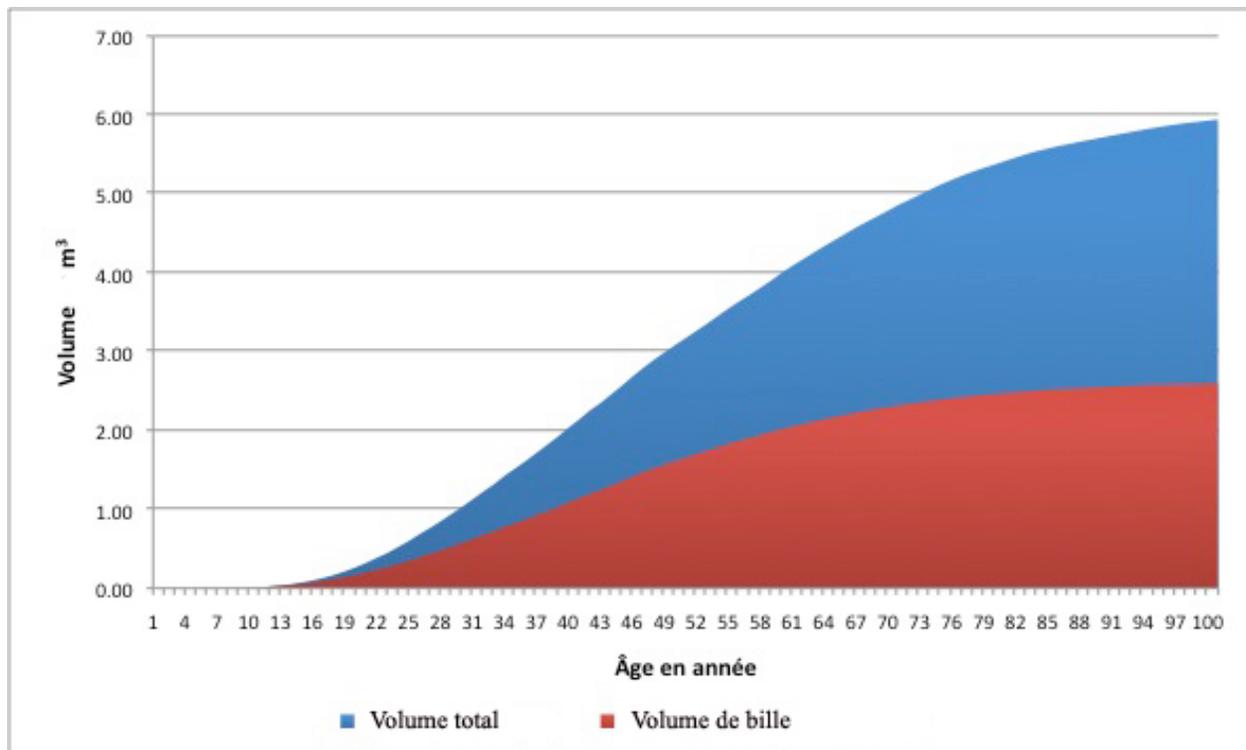


Figure 10 : Évolution du volume total et du volume de bille pour le frêne de Pennsylvanie

## Conclusion

Ce document a permis de présenter la démarche de modélisation utilisée dans l'OMAG ainsi que son application aux cas du chêne à gros fruits et du frêne de Pennsylvanie. La dernière section est consacrée aux résultats de simulation (hauteur, diamètre à hauteur de poitrine, volume total et volume de bille) pour ces deux essences. Les résultats obtenus correspondent à ceux attendus pour un arbre théorique dont la croissance ne dépendrait que du potentiel physiologique de l'essence et des caractéristiques édapho-climatiques du milieu, sans qu'elle ne soit affectée par aucun autre accident externe, et sans tenir compte de la variabilité génétique de l'essence.

La démarche de modélisation s'appuie sur des hypothèses traduisant l'interaction des différents facteurs susceptibles d'influencer la croissance. La validation de ces hypothèses demande des recherches spécifiques complexes et la part d'intuition dans la conception du modèle reste importante.

Le bon fonctionnement du modèle a été globalement confirmé lors d'une étude de validation menée sur le cas du chêne rouge (Besnier et coll. 2010). En fait, les résultats issus du modèle se sont révélés légèrement sous-estimés par rapport à la réalité (ce qui était prévisible, vue l'approche conservatrice adoptée), ce qui a conduit à ajuster certains facteurs. Un tel exercice est toutefois gourmand en énergie puisqu'il demande l'analyse de nombreux arbres dans des milieux eux-mêmes bien caractérisés. Cette validation n'a pas été entreprise pour les deux essences présentées ici. Il serait souhaitable qu'elle puisse être réalisée.

Un des défis de l'exercice de modélisation selon les principes de l'OMAG est d'avoir accès à suffisamment de données de qualité issues de la littérature. Malheureusement, dans le cas du chêne à gros fruits et, dans une moindre mesure, dans celui du frêne de Pennsylvanie, les données disponibles étaient peu nombreuses. Ainsi, les valeurs attribuées aux paramètres du potentiel physiologique et aux réactions aux caractéristiques de l'environnement ne s'appuient pas sur une compilation de données couvrant autant d'études qu'il aurait été souhaitable.

Par ailleurs, si l'application d'un *ratio agroforestier* permettant de moduler les données de croissance constatées en milieu forestier pour tenir compte des conditions rencontrées en agrosylviculture se justifie facilement, la détermination des valeurs de ce ratio souffre d'un manque de données et d'études liée au jeune âge des systèmes agroforestiers en zone tempérée.

En ce qui concerne le calcul du volume, les tables de cubage de Perron ont été utilisées. D'une part, les données pour les deux essences à l'étude n'étaient pas disponibles et il a fallu utiliser celles d'autres essences dont la forme était comparable. D'autre part, ces tables de cubage s'appliquent à des arbres ayant poussé en forêt et la morphologie des arbres poussant en conditions agrosylvicoles pourrait être assez différente.

Ces commentaires suggèrent que les résultats obtenus devraient être considérés comme des ordres de grandeur. Ils devront être confrontés à des mesures sur le terrain pour être affinés, comme cela a été fait pour le chêne rouge. Ils permettent toutefois d'entreprendre d'autres travaux, comme ceux de modélisation économique.

Enfin, l'OMAG a été conçu pour réaliser des simulations de croissance pour plusieurs autres essences et dans des milieux de croissances variés. Tout lecteur intéressé à l'utiliser ou à contribuer à son développement est invité à prendre contact avec les auteurs.

## **Annexe 1. Compilation et analyse des données issues de la littérature**

Le travail de modélisation s'appuie sur des données issues de la littérature. Ces données peuvent être qualitatives (par exemple le choix de facteurs à prendre en compte dans l'estimation de la croissance) ou quantitatives (par exemple la croissance annuelle des arbres en diamètre).

Afin de pouvoir définir des valeurs pour faire fonctionner le modèle, un travail de compilation et d'intégration des données issues de la littérature a été entrepris. Une approche décrite par Joss et coll. (2008) a été retenue et adaptée à cette fin. Elle permet d'identifier et de pondérer des données à partir de la littérature avant de soumettre les résultats à des comités d'experts. Toutefois, dans le cadre du travail présenté ici, seule l'analyse de la littérature a été réalisée pour le moment, sans que les données ne soient validées par un comité d'expert.

Un des principes sur lesquels repose cette méthode est que le nombre de fois où une donnée est présentée détermine son niveau d'acceptation et donc sa fiabilité. Toutefois, afin d'éviter qu'une donnée établie sans fondement mais reprise régulièrement dans la littérature ne soit évaluée comme une donnée fiable, chaque source est évaluée sur sa fiabilité.

Lorsqu'une source bibliographique présente des données utiles au développement du modèle, la fiabilité et la pertinence des données est évaluée en fonction de plusieurs critères. Un coefficient de pertinence ( $C_p$ ) lui est alors associé. Pour chaque paramètre auquel on souhaite donner une valeur, on réalise une moyenne pondérée des valeurs issues de la littérature en fonction des coefficients de pertinence qui leur sont associés. La somme des coefficients de pertinence correspond au coefficient de pertinence total ( $C_{pt}$ ). Plus le coefficient de pertinence total est élevé, plus les données trouvées dans la littérature sont nombreuses et meilleure devrait être la précision.

Les sources ont donc été évaluées à l'aide d'une grille d'analyse composée de sept critères. Les coefficients de pertinence sont chiffrés sur une échelle de dix et se décomposent de la façon suivante :

- La zone d'intérêt est couverte (1 ou 0). Cette dimension est importante, puisque le patron de croissance d'une espèce peut être affecté par les caractéristiques climatiques ou édaphiques propres aux aires éco-physiographiques (Pothier et Savard 1998). De plus, la variabilité génétique au sein d'une même essence diffère d'une région géographique à l'autre, ce qui peut influencer la réponse de croissance à un même facteur de stress (Kriebel 1993). L'objectif est donc de se rapprocher le plus possible d'un contexte gaspésien.
- La publication traite de la rotation complète des arbres (1 ou 0). Cette dimension permet de prendre en compte que le patron de croissance varie en fonction de l'âge de l'arbre (Vanclay 1994). Cela évite de reporter une réponse de croissance en début de rotation sur toute la durée de la rotation, puisque la modélisation vise à simuler la vie de l'arbre jusqu'à son exploitation.
- La publication est bien référencée (2-1-0) : la plus haute note est accordée à une revue de littérature puisqu'elle constitue déjà une méta-analyse des données disponibles, une note intermédiaire à une étude bien référencée qui permet de dresser un portrait du critère à l'étude, une note nulle à une étude ne présentant que des constats généraux émis sans justification.

- Les données présentées sont des mesures (et non des estimations) (1 ou 0). Un paramètre mesuré est soutenu par des résultats tangibles alors qu'un paramètre estimé n'est pas nécessairement garant d'une précision mesurable.

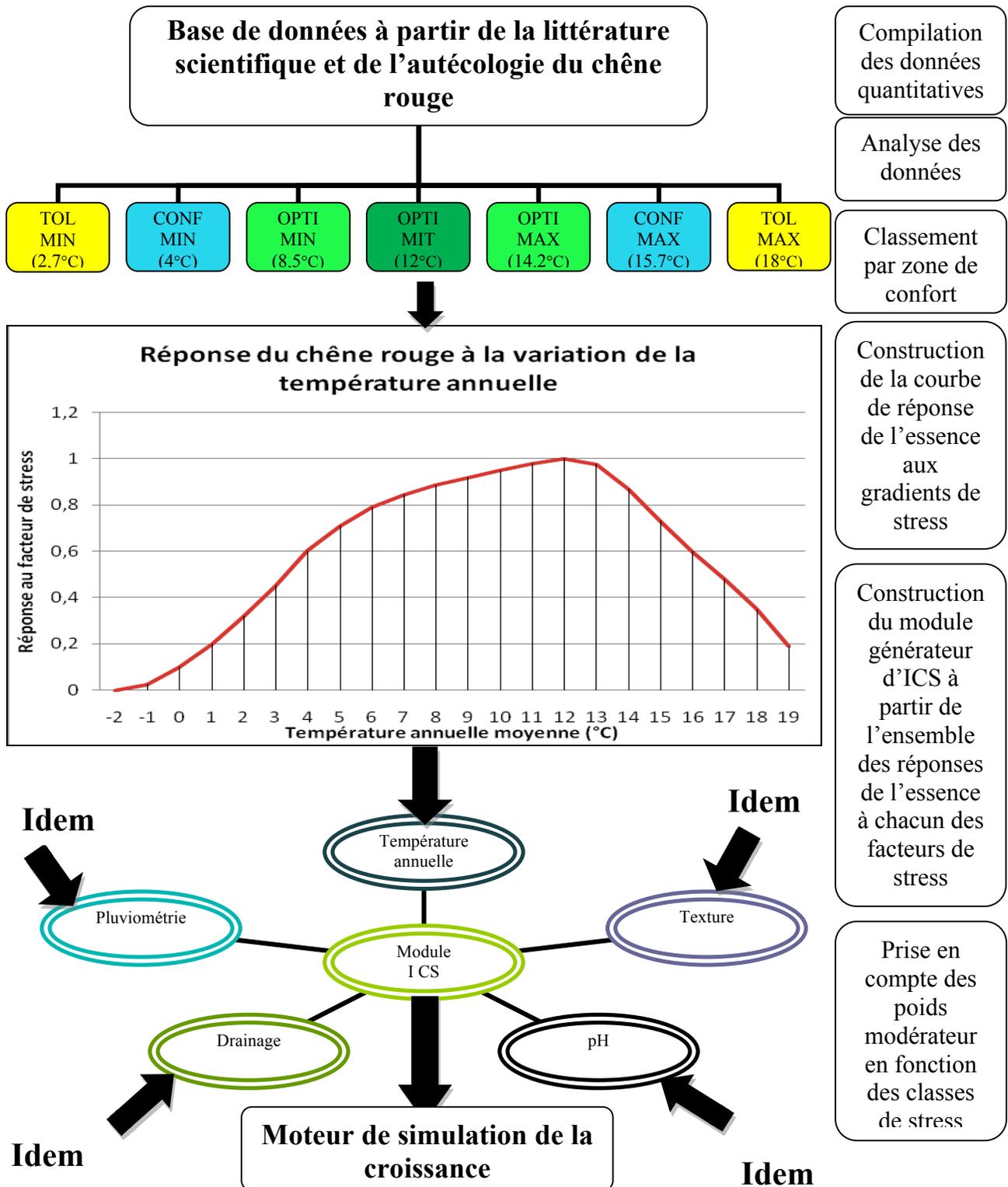
- La publication est approuvée par un comité de pairs (1 ou 0). Une publication dans un journal scientifique se voit automatiquement accorder une note de 1, puisqu'un processus de validation fiable a été effectué. Pour ce qui est des publications gouvernementales et universitaires, une vérification des processus de validation a été effectuée afin de déterminer leur note.

- Les données présentées sont généralisées pour l'espèce ou sont applicables seulement au contexte de l'étude (2-1-0). Des données contextuelles, même si elles permettent d'éclaircir certains aspects, peuvent débalancer l'équilibre lors de la détermination d'une tendance générale.

Des mesures de croissance qui ont été prises dans une variabilité ponctuelle d'un facteur de stress (3 types de pH : 6.5 -7-7.8 par exemple) peuvent faire ressortir un optimum contextuel (un pH de 6,5 par exemple), alors que l'optimum généralisé pour l'essence se situerait à 5.2. Le 6e critère permet donc de réduire l'impact de ce débalancement.

- L'étude met en relation les différents paramètres influençant la croissance ou les caractéristiques de l'essence (2-1-0). Cette dimension permet de mettre en relation les différents facteurs de la croissance des essences à l'étude afin de bien cibler la valeur et l'influence de chacune d'elle, puisque ce sont les objectifs visés par le projet de modélisation. Les publications intégrant une plus vaste gamme de variabilité d'un plus grand nombre de facteurs permettent de pondérer plus finement l'influence individuelle des facteurs expliquant la croissance mis en relation avec les autres facteurs.

**Annexe 2. Développement de l'Indice de Compatibilité de l'essence au Site (ICS) - Schéma conceptuel**



## Références

1. Bartlett, G.A. 1997. Crown development and architecture of *Fraxinus pennsylvanica* var. *subintegerrima* (Vahl) Fern. at different stages of growth and under different environmental conditions. University of Manitoba, Electronic Thesis + Dissertations.
2. Besnier, C., Bernier-Leduc, M., Anel, B. Raulier, F., Cogliastro, A. 2009. L'outil de modélisation agroforestier gaspésien (OMAG) : Principes de fonctionnement et paramétrage. Première version : la simulation de la croissance des arbres et de la production de bois des systèmes agroforestiers Régénérons Vert l'Avenir, St-Godefroi. 65 pages.
3. Besnier, C. et Bernier-Leduc, M. 2010. Résultats préliminaires de recherche : Acquisition de connaissance sur la croissance du chêne rouge (*Quercus rubra* L.) dans son aire de répartition naturelle en Gaspésie et évaluation préliminaire du modèle de croissance sur le chêne rouge de l'outil de modélisation agroforestier gaspésien. Régénérons Vert l'Avenir, St-Godefroi. 35 pages.
4. Cabanettes, A., Auclair, D., Imam, W. 1999. Diameter and height growth curves for widely-spaced trees in European agroforestry. *Agrofor. Syst.* 43: 169–181.
5. Clatterbuck, W.K., Ganus, L. 2000. Tree crop for marginal farmland. With a financial Analysis. Agricultural Extension Service The University of Tennessee PB 1462. 22p. Disponible sur : <http://www.utextension.utk.edu/publications/pbfiles/PB1462.pdf> Consulté le 22 février 2008.
6. Cogliastro, A., Gagnon, D., Bouchard, A. 1997. Experimental determination of soil characteristics optimal for the growth of ten hardwoods planted on abandoned farmland. *Forest Ecology and Management* 96 (1-2):49-63
7. Cogliastro, A., Gagnon, D., Daigle, S., Bouchard, A. 2003. Improving hardwood afforestation success: an analysis of the effects of soils properties in southwestern Québec. *Forest Ecology and Management* 177 (1-3): 347-359.
8. Dupraz, C., Liagre, F. 2008. *Agroforesterie: Des arbres et des cultures*. Editions France Agricole. 413 pages.
9. Gilman, E.F., Watson, D.G. 1993. *Fraxinus pennsylvanica*, Green Ash. USDA, Forest Service Fact Sheet ST-266, November 1993, 4p. Disponible sur: <http://hort.ufl.edu/trees/FRAPENA.pdf> Consulté le 25 mars 2008.
10. Greenwood, M. 1989. The effect of phase change on annual growth increment in eastern larch (*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch). *Ann.Sc.For.* 46 (suppl.) : 171s-177s.
11. Gucker, C.L. 2005. *Fraxinus pennsylvanica*. In: Fire Effects Information System, [Online]. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fire Sciences Laboratory (Producer). Disponible: <http://www.fs.fed.us/database/feis/> Consulté le 23 avril 2008.
12. Gucker, C. L. 2011. *Quercus macrocarpa*. In: Fire Effects Information System, [Online]. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fire Sciences Laboratory (Producer). Available: <http://www.fs.fed.us/database/feis/> [ 2016, January 17].
13. Johnson, P. S. 1990. *Quercus macrocarpa* Michx. Bur Oak. Pp. 686-692, *IN*: R. M. Burns and B. H. Honkala. *Silvics of North America. Volume 2. Hardwoods*. USDA, Forest Service Agric. Handbook 654, Washington, D.C.
14. Joss, B.N., Hall, R.J., Sidders, D.M., Keddy, T.J. 2008. Fuzzy-logic modeling of land suitability for hybrid poplar across the Prairie Provinces of Canada. *Environment Monitoring Assessment* 141 : 79-96.
15. Kennedy, H.E.J. 1990. *Fraxinus pennsylvanica* Marsh. Green Ash. Dans: Burns R., Honkala BH (1990) *Silvics of North America: Hardwoods*. Agriculture Handbook 654. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC. Vol. 2, 877p. Disponible sur : [http://www.na.fs.fed.us/pubs/silvics\\_manual/volume\\_2/fraxinus/pennsylvanica.htm](http://www.na.fs.fed.us/pubs/silvics_manual/volume_2/fraxinus/pennsylvanica.htm) Consulté le 28 janvier 2008.
16. Kriebel, H.B. 1993. Intraspecific variation of growth and adaptive traits in North American oak species. *Annals of Forest Science* 50 (suppl 1): 153s-165s.
17. Laboratoire rural Agroforesterie et paysage. 2015. Fiche 1 : Introduction au projet. Municipalité régionale de comté du Rocher-Percé. 4 pages.
18. Lupien, P. 2004. Des feuillus nobles en Basse-Mauricie: Guide de mise en valeur. Fonds d'information, de recherche et de développement de la forêt mauricienne (FIRDFPM). Syndicat des producteurs de bois de la Mauricie. Shawinigan. 248 pages.

19. Ménard, B., Lapointe, C., Bédard, S., Saucier, J.P., Majcen, Z. 1999. Modélisation de la croissance en diamètre des essences principales du sud-ouest du Québec (Projet 0901 1570) Ministère des Ressources Naturelles du Québec, Direction de la recherche forestière, 32 pages.
20. Pecknold, P.C. 2001. Transplant shock of trees and shrubs. Purdue University, Cooperative Extension Service, BP-31-W. Disponible sur : <http://www.ces.purdue.edu/extmedia/BP/BP-31.html> Consulté le 15 janvier 2008.
21. Perron, J.Y. 2003. Tarif de cubage général : Volume marchand brut. Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Forêt Québec, Direction des inventaires forestiers. 53 pages.
22. Pothier, D., Savard, F. 1998. Actualisation des tables de production pour les principales espèces forestières du Québec. Direction des inventaires forestiers, Ministère des Ressources Naturelles-Forêt Québec. 183 pages.
23. Ressources Naturelles Canada. 2014. Profil bioclimatique des espèces. Disponible sur : <http://gcartes.nrcan.gc.ca/fp/profile.php?lang=fr&speciesid=1000951> Consulté le 10 février 2014.
24. Rhoades, W.R., Stipes, R.J. 1999. Growth of the trees on Virginia Tech campus in response to various factors. *Journal of arboriculture* 25 (4): 211-217.
25. Schroeder, W., Silim, S., Fradette, J., Patterson, J., de Gooijer, H. 2003. Detailed site analysis and mapping of agroforestry potential in the northern agricultural zone of Saskatchewan. Agriculture and Agri-Food Canada, Final Report to Saskatchewan Forestry Centre. 30 pages.
26. Service Canadien des Forêts(SCF). 2008. *Fraxinus pennsylvanica* Marsh. Frêne rouge. Arbres et arbustes du Nouveau-Brunswick: Espèces menacées. Disponible sur : <http://www.cfs.nrcan.gc.ca/soussite/mx-212/frenerouge>. Consulté le 12 mai 2008.
27. Solomon, D.S., Blum, B.M. 1977. Effects of pruning height on the diameter growth of yellow birch. USDA Research note NE-233. 3p. Disponible sur [http://nrs.fs.fed.us/pubs/rn/rn\\_ne233.pdf](http://nrs.fs.fed.us/pubs/rn/rn_ne233.pdf). Consulté le 4 juin 2008.
28. Suarez, F., Binkley, D., Kaye, W.M. 1999. Expansion of forest stands into tundra in the Noatak National Preserve, northwest Alaska. *Écoscience* 06 (3): 465-470.
29. USDA. 2008. *Fraxinus pennsylvanica* Marsh. Natural Resources Conservation Service. Plants database. Conservation Plant characteristics. <http://plants.usda.gov/java/charProfile?symbol=FRPE>. Consulté le 10 mars 2008.
30. UTA (University of Texas at Austin). 2008. *Fraxinus pennsylvanica* Marsh. Native Plant Database, Wildflower center. Disponible: [http://www.wildflower.org/plants/result.php?id\\_plant=FRPE](http://www.wildflower.org/plants/result.php?id_plant=FRPE). Consulté le 12 mai 2008.
31. Vanclay, J.K. 1994. Modelling forest growth and yield. Application to mixed tropical forests. CAB International, Wallingford, U.K. 312 pages. Disponible sur : <http://espace.library.uq.edu.au>. Consulté le 18 juin 2008.
32. White, T.J.R., Dominy, S.W.J., Allen, D.J. 2005. Plantation d'arbres sur les terres agricoles marginales en Ontario. <http://cfs.nrcan.gc.ca/soussite/glfc-tree-planting/pin-blanc-rouge6e>. Consulté le 17 janvier 2008.