

V. Notion de période critique

Selon Wagner et al., (2006) un accroissement substantiel du volume de production de bois par la gestion de la compétition compétitrice a été étudié pour une large variété de types de forêts et de conditions autour du globe. Wagner & Robinson (2006) présentent le fait que si les gains de rendements (entre 30 et 500%) ont couramment été étudiés suite au contrôle de la végétation, la durée optimale de ce contrôle requise pour atteindre le rendement souhaité n'est pas clairement identifiée. La connaissance de cette durée optimale pourrait pourtant permettre de réduire les coûts de production pour les gestionnaires, qui ne feraient pas d'entretien superflus et de limiter l'utilisation d'herbicides ou d'action mécaniques.

Cette notion fut développée pour la première fois dans les années 60 en agriculture pour affiner les stratégies de gestion (Nieto et al. 1968; Zimdahl 1988) et peut être étendue aux écosystèmes forestiers pour quantifier l'influence temporelle de la compétition interspécifique dans les jeunes peuplements. Dans le contexte agricole, cette période, qui représente la durée durant laquelle la compétition doit être régulée afin d'éviter une perte significative de rendement, est de quelques semaines après émergence (Hewson et Roberts 1973; Hall et al. 1992; Woolley et al. 1993). Ce processus a été intégré aux pratiques forestières récemment (Wagner et al. 1996, 1999; Adams et al. 2003) et est d'importance pour une stratégie de gestion intégrée (Wagner 1994).

Sur le principe, la période critique (CP) a deux composantes (Weaver et Tan 1983). La première, décrite par une courbe de croissance sans compétition, représente la durée durant laquelle le contrôle doit être maintenu après la plantation pour prévenir une perte de rendement. La seconde, décrite par une courbe de croissance avec compétition, représente la durée durant laquelle la végétation compétitrice coexiste avec la culture avant qu'elle n'interfère avec sa croissance et ne réduise le rendement. Cette CP est déterminée par une distance linéaire entre les points où les rendements décroissent significativement au niveau de la courbe de croissance avec compétition et les niveaux de rendement de la courbe de croissance sans compétition. Autrement dit, c'est la période de temps entre le moment où la compétition commence à réduire les rendements et celui où des contrôles supplémentaires de la végétation n'ont plus de réels

effets significatifs. Le point d'intersection entre les deux courbes identifie le temps d'interférence égal (TEI) où les pertes de rendement dues à la compétition interspécifique sont égales sous les deux régimes (Cf. Figure 3 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

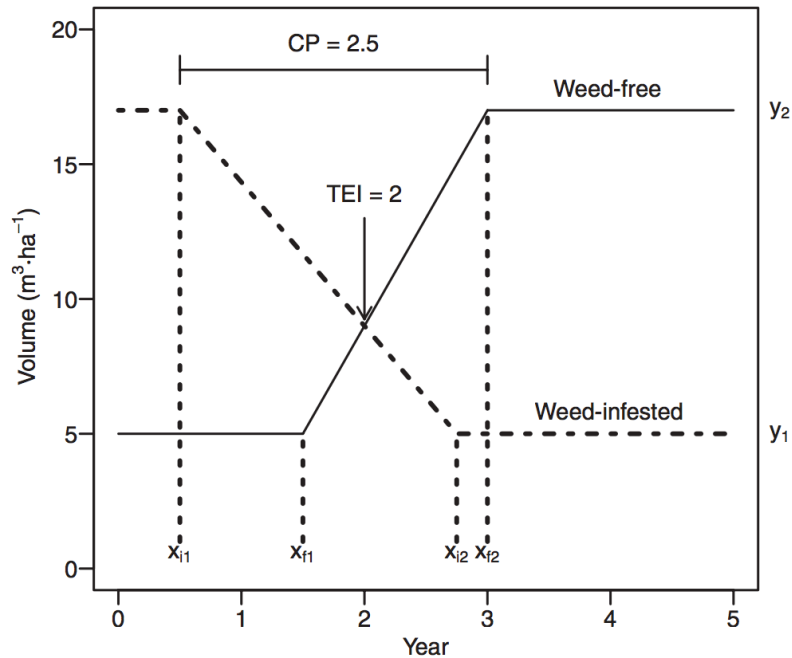


Figure 3. Exemple idéalisé de régression simultanée du point de changement utilisé pour décrire les courbes sans mauvaises herbes et infestées de mauvaises herbes avec des composants clés de la période critique. CP est la période critique (2,5 ans dans l'exemple), TEI est le moment de l'interférence égale (survenant dans l'année 2 dans l'exemple), y_1 est le volume de 10 ans pour le traitement infesté de mauvaises herbes de 5 ans, y_2 est le Volume sur 10 ans pour les 5 ans de traitement sans mauvaises herbes, x_{i1} est le point de la courbe infestée de mauvaises herbes où la croissance du volume diminue, x_{i2} est le point de la courbe infestée de mauvaises herbes où la croissance du volume cesse de décroître, et x_{f1} et x_{f2} sont les points sur la courbe sans mauvaises herbes où la croissance du volume commence et cesse d'augmenter, respectivement (Figure tirée de Wagner et Robinson 2006).

VI. La modélisation en foresterie

VI.1. Le modèle comme outil d'aide à la prise de décision

Les écosystèmes forestiers font face à deux forces sociétales qui s'opposent avec d'une part une demande en bois qui s'accroît et de l'autre une demande à ce que la forêt joue son rôle vital socio-économique et soit gérée de façon durable. Les questions sur les politiques forestières, qui en résultent ont mené à deux approches de modélisation différentes (Fontes et al. 2010) :

1. **Economique** : Quel type de stratégie sylvicole dois-je adopter pour atteindre un certain but ? Quelle quantité de bois et quelle qualité de bois ? Quelles espèces, hybrides, clones et substituts dois-je planter ? Comment est-il possible, sur le long terme, de maintenir le couvert forestier, le puits de carbone associé et la production de bois ? Comment cette biomasse sera utilisée ? → modèles de croissance dendrométriques avec un accent sur les effets globaux des forçages environnementaux (Seynave et al. 2005, 2008; Bontemps et Bouriaud 2013).
2. **Environnementale** : Quels effets l'espèce cultivée et le type de gestion forestière peuvent avoir sur la fertilité des sols, la matière organique et la dynamique des sols ? Quels effets ont les changements environnementaux sur les interactions sol-plantes ? → modèles écophysologiques et/ou biogéochimiques (Saint-André et al. 2014).

Les modèles de rendements et de croissance sont d'importants outils d'aide à la décision pour la gestion forestière (Westfall et al. 2004). Ces modèles doivent avoir la possibilité de prendre en compte les effets des pratiques forestières actuelles et futures. Au cours des dernières décennies, la pratique forestière dans certaines régions du globe a vu le développement de pratiques de gestion plus intensives dans les plantations forestières (Albaugh et al. 1998; Martin et Jokela 2004). Cette intensification des pratiques concerne tout particulièrement la préparation de la plantation et les premières saisons de croissance (Morris et al. 1993; Nilsson et Allen 2003). En effet, les processus de croissance et mortalité durant cette période jouent un rôle majeur dans la détermination de la durée de révolution, la structure et le rendement final du peuplement (Nilsson et Albrektson 1994).

Pour Amateis et al.,(1997) l'importance de l'obtention de prédictions précises sur la survie en plantation est bien connue des acteurs de la foresterie. La précision des modèles doit éviter de donner des mauvaises prédictions qui entraîneraient une perte financière pour l'exploitant. Pour répondre à cet objectif, des modèles spécifiques aux régions bioclimatiques ont été créés afin d'assurer une certaine homogénéité biologique. Les modèles ainsi obtenus ont été basés sur des fonctions de type sigmoïde similaires à celles développées par Von-Bertalanffy et Richards (Von Bertalanffy 1957; Richards 1959).

Dans leur article Mason & Dzierzon, (2006), suggèrent que les outils d'aide à la décision destinés aux gestionnaires de la forêt ne sont pas toujours adaptés car ils ne prennent pas en compte les effets de la végétation herbacée sur la croissance et l'acquisition de ressources par les semis. Une prise en compte des effets de la gestion de cette végétation à travers des modèles plus complexes devrait produire des modèles possédant une meilleure précision générale pour les prises de décision.

Les gestionnaires de plantations forestières ont besoin de comprendre la dynamique de terrains qui comprennent diverses essences plantées. Cette planification se conçoit souvent à partir d'une approche « top-down » à quatre niveaux de considération selon Westerling, (1992). Ainsi, il y a la planification « stratégique » (50-100 ans), la planification « long-terme » (10-15 ans), la planification « sur plusieurs années » (3-5 ans) et la planification « opérationnelle » (jusqu'à 1 an). De nombreuses décisions de gestion de la végétation s'inscriraient dans le cadre d'une planification opérationnelle et pluriannuelle mais il peut être approprié d'inclure des options de gestion de la végétation dans la planification à long terme ou stratégique dans certains cas. Les outils utilisés pour ce genre de planifications incluent les simulateurs de terrain (García 1981; Allison 1992), les optimisateurs de programmation linéaire (García et al. 1989; García 1990) et les systèmes d'information géographique (GISs) (Westerling 1992).

VI.2. Les modèles juvéniles

VI.2.1. Les différentes carences dans l'offre de modélisation actuelle

Faire des estimations pour le développement futur des forêts est d'une grande importance à la fois comme outil de gestion et de planification, mais aussi pour évaluer

différentes options sylvicoles (Fahlvik et Nyström 2006). Les modèles individuels sont couramment utilisés en foresterie pour soutenir la prise de décision. Parce qu'ils tiennent compte du sort de chaque individu, ces modèles sont flexibles et peuvent simuler le développement de la structure du peuplement sous certains traitements sylvicoles (Fahlvik et Nyström 2006). Ils sont utilisés dans la gestion et la planification, mais aussi comme outil de recherche pour l'évaluation et la comparaison de différentes stratégies de gestion (Fahlvik et Nyström 2006).

Ces simulateurs sont basés sur des modèles décrivant la croissance des arbres, et la plupart des modèles de croissance existants se concentrent sur des peuplements avancés, avec une hauteur dominante de 5 à 10 m jusqu'à la coupe finale (Hynynen et al. 2002; Andreassen et Tomter 2003; Lexerod et Eid 2005; Huuskonen et Miina 2007) mais seuls quelques-uns intègrent les stades des jeunes arbres et des semis (Chapagain et al. 2014). La période juvénile est l'étape la plus mal connue et la plus difficile à prédire dans les modèles de croissance en raison du grand nombre de facteurs qui affectent la croissance (Huuskonen et Miina 2007). Le nombre de tiges et la distribution des tailles peuvent changer rapidement pendant le développement du peuplement et dépendent de nombreux facteurs, y compris les opérations de gestion (Huuskonen et Miina 2007).

En France, les modèles individuels existants couvrent un large éventail d'espèces. Fagacées (Le Moguédec et Dhôte 2012) et Mathilde (Fortin et al. 2019; Fortin et Manso 2019) ont tous deux été calibrés sur des peuplements de chênes ou de hêtres âgés d'au moins 30 ans. Forceps (Morin et al. 2020) est un modèle conçu pour plusieurs espèces. Il comprend le stade juvénile, mais les paramètres associés à ce stade sont basés sur la littérature. SimCoP (Ottorini 1995; Pulkkinen et al. 2014) prédit la croissance des sapins de Douglas. A notre connaissance, il a été testé sur des arbres d'au moins 4m de haut. Le modèle Oakpine (Perot et al. 2010) traite des peuplements mixtes de chêne sessile et de pin sylvestre, mais là encore, il a été adapté aux peuplements intermédiaires et matures. Samsara2 (Courbaud et al. 2015) simule la croissance de peuplements mixtes d'épicéas et de sapins, mais il a été adapté aux zones montagneuses.

VI.2.2. L'apport des modèles juvéniles

Les modèles juvéniles sont moins bien représentés (Avila 1993) bien qu'ils soient nécessaires pour une compréhension complète de toute la phase de développement et par extension, pour la planification des traitements sylvicoles pour les jeunes plants (Zhang et al. 1996). Les modèles de croissance juvénile sont utiles comme outils de gestion et de planification pour prédire la production des peuplements et pour comparer les différentes options sylvicoles (Fahlvik et Nyström 2006).

Il y a relativement peu d'études pour les jeunes arbres et les semis, appelés juvéniles (définis comme une plante $> / = 30\text{cm}$ de hauteur et $< 10\text{cm}$ de circonférence de la tige à 10cm au-dessus de la surface du sol) (Chapagain et al. 2014) à cause de la difficulté pour les modéliser. En effet, la prédiction du développement des peuplements juvéniles à l'aide de modèles d'arbres individuels est difficile en raison du grand nombre de facteurs qui affectent la croissance et la mortalité des arbres individuels dans un jeune peuplement. Ainsi, la modélisation au niveau du peuplement est une approche appropriée (Huuskonen et Miina 2007).

La croissance des juvéniles étant sensible à l'environnement et aux pratiques d'établissement des plantations, la modélisation doit identifier les principales variables et prédire les réponses de croissance sur différents sites et différentes opérations sylvicoles (Zhao 1999). En foresterie, la préparation du site est utilisée pour créer des conditions optimales pour la survie et la croissance des semis (Löf et al. 2012). En conséquence, lorsque différentes pratiques sont envisagées, les modèles existants doivent souvent être révisés (Fahlvik et Nyström 2006). Les efforts de modélisation spécifiques au développement des jeunes plantations ont fourni un moyen de simuler le développement précoce des peuplements (Ritchie et Powers 1993; Knowe et al. 2005). Cependant, la dynamique de la végétation concurrente reste une faiblesse de ces simulateurs. La plupart des recherches sur la préparation du site et la performance des plantations ont été menées en utilisant quelques espèces d'arbres résineux (Löf et al. 2012) même si certains grands feuillus peuvent être inclus (Hann et Larsen 1991; Hann et Hanus 2002).

Des modèles empiriques de croissance juvénile d'une grande variété de conifères et de feuillus sont actuellement disponibles, principalement en Amérique du Nord, en Europe du

Nord et en Nouvelle-Zélande (Belli et Ek 1988; Payendeh 1988; Knowe et al. 1997; Huuskonen et Miina 2007). Cependant, l'impact de la concurrence herbacée est généralement ignoré dans ces simulateurs (Ritchie et Hamann 2006). Par conséquent, lorsque des pratiques alternatives sont envisagées, le modèle existant doit souvent être révisé (Fahlvik et Nyström 2006).

Des modèles de croissance et de survie des plantations de conifères en Amérique du Nord ont été développés pour différentes espèces d'arbres, l'âge des semis au moment de la plantation, la préparation du site et les traitements sylvicoles (Westfall et al. 2004; Newton et Cole 2006; South et Miller 2007).

En Nouvelle-Zélande, un modèle de croissance pour *Pinus radiata* D. Don a été développé (Mason 1992; Mason et al. 1997) et des analyses de variance pour les coefficients d'équations créés avec une régression non linéaire pour chaque graphique individuel ont été utilisées pour identifier les variables importantes. Plus récemment, des modèles empiriques de croissance juvénile de *Pinus radiata* ont été construits pour les sites humides (Mason et al. 1997; Mason 2001) et les sites secs (Zhao 1999). Bien que simple à paramétrer, cet empirisme implique que ces modèles sont limités à leur propre applicabilité et à leur capacité à élucider les mécanismes de croissance.

En Europe, la modélisation de la croissance et des rendements s'est concentrée sur les peuplements avancés des pays nordiques. Les modèles juvéniles ont été créés principalement sur des conifères et en étudiant des variables telles que la densité (Huuskonen et Miina 2007). Les progrès réalisés par les pays nordiques sur la question ont fourni de bonnes pistes quant à la manière de modéliser la croissance des plantations juvéniles, mais les conditions forestières de ces pays les orientent naturellement vers les conifères et le bouleau, et la croissance juvénile des espèces feuillues a été en partie laissée de côté (Drössler et al. 2014; Holmström et al. 2017, 2018; Hjelm et al. 2019; Nilsson et al. 2019). Dans les principaux simulateurs de croissance utilisés en Suède, le passage des modèles de peuplements jeunes aux modèles de peuplements établis se fait normalement à une hauteur moyenne de peuplement de 7 à 8m (Lundström et Söderberg 1996).

Récemment, des méthodes plus avancées sur le plan statistique ont été utilisées pour modéliser la croissance des juvéniles de Pin taeda (Hall et Bailey 2001) et de pin d'Elliotte

(Fang et al. 2001; Hall et Clutter 2004) avec des modèles à effets mixtes non linéaires à plusieurs niveaux pour incorporer les effets des traitements sylvicoles, de la préparation du site et de la libération de la concurrence.

Plusieurs simulateurs de croissance et de rendement ont été largement acceptés. Ces modèles visent généralement à simuler le développement de structures de peuplements spécifiques ou à souligner l'effet de certains traitements (Fahlvik et Nyström 2006). Les modèles de croissance en hauteur sont particulièrement importants pour prédire le développement des semis et des jeunes arbres. Les modèles de croissance du diamètre ne peuvent pas être appliqués tant que la population principale d'arbres n'a pas dépassé la hauteur de poitrine (1,3m), et dans la pratique, la transition de la hauteur de modélisation à la croissance en diamètre est reportée jusqu'à ce que la plupart des arbres ait atteint un diamètre seuil valide pour le modèle appliqué (Fahlvik et Nyström 2006). La question de la relation entre la croissance juvénile et les modèles de croissance plus anciens s'est posée depuis la création des modèles de croissance juvénile. Mason et al. (1997) ont montré la performance prédictive et la différence entre IGM (un modèle de croissance juvénile) et PPM88 (un modèle de croissance plus ancien) avec des données provenant d'une forêt. Lier les deux modèles en douceur peut être utile mais compliqué en raison de la différence entre les sources de données, les formes de modèles et les variables incluses dans les modèles (Zhao 1999). Les conditions nécessaires aux connexions fluides entre les modèles sont d'atteindre la même valeur de prédiction et la même dérivée aux points de connexion pour les courbes juvéniles et les courbes plus anciennes. L'alternative est probablement de formuler une équation par morceaux compatible et d'obtenir simultanément des estimations de paramètres pour la croissance juvénile et la croissance plus ancienne pendant le processus d'ajustement (Zhao 1999).

VI.2.3. La nécessité d'intégrer les préparations de sites sylvicoles aux modèles juvéniles

Pour Zhang et al., (1996), beaucoup de modèles ont été créés (Stage 1973; Ek et Monserud 1974; Burkhart et al. 1987; Amateis et al. 1989; Huang et Titus 1995) mais se sont traditionnellement attachés à décrire la croissance une fois la canopée refermée quand la

compétition entre arbres est évaluée comme étant la plus significative. En comparaison, la modélisation des stades juvéniles n'a pas été aussi développée (Avila 1993) alors qu'il y a un véritable besoin de ces modèles pour pouvoir prétendre à une meilleure compréhension de l'ensemble du processus de développement des arbres et pour pouvoir correctement programmer les interventions sylvicoles (Zhang et al. 1996).

L'établissement et les traitements d'entretien peuvent avoir des effets variables sur le développement à long terme et le rendement des plantations. En effet, plusieurs études ont mentionné des réponses différentes à certains types de traitements. Par exemple, South et Miller (2007) ont constaté que l'utilisation d'herbicides était favorable à l'augmentation du volume du Pin taeda alors que son utilisation était défavorable aux essences de feuillus observées. De même, Thiffault et al. (2010) ont noté que, contrairement au pin gris et à l'épinette noire, l'utilisation d'herbicides n'avait aucun effet sur le mélèze. De plus, dans cette même étude, les auteurs notent également qu'en ce qui concerne l'utilisation des engrais, seule l'épinette noire a répondu favorablement. Pour Mason et Milne (1999), l'utilisation d'engrais a eu des effets aléatoires selon les sites considérés. Pour atténuer ces effets, des traitements combinés sont souvent utilisés pour augmenter le rendement (Munson et Timmer 1995; Otsamo et al. 1995; Nilsson et Allen 2003; Löff et al. 2006). Il est donc important de relier les espèces cultivées au type de traitement à utiliser.

Il peut être difficile de prévoir la réponse des semis à long terme, même si des effets positifs immédiats sont observés (Löff et al. 2012; Buitrago et al. 2015; Aleksandrowicz-Trzcińska et al. 2017). Différents types de réponses à long terme aux traitements sylvicoles précoces ont été documentés (Hughes et al. 1979; Morris et Lowery 1988): toutes les courbes de croissance sont spécifiques au traitement, et les différences initiales de croissance des arbres observées entre les traitements peuvent rester stables, augmenter, disparaître ou même s'inverser sur de longues périodes. Il est donc nécessaire de modéliser la réponse des semis sur l'ensemble du profil de croissance des juvéniles et d'éviter de conclure sur l'efficacité du traitement en se basant uniquement sur la réponse initiale des semis (Nilsson et Allen 2003). Ces caractéristiques de croissance sont représentées dans la littérature par le concept de type de réponse. Quatre types de réponses à long terme aux traitements sylvicoles pendant la phase

juvénile ont été décrits dans la littérature (Hughes et al. 1979; Morris et Lowery 1988). Ces types de réponses montrent une pente et des formes de courbes spécifiques qui font qu'une courbe spécifique au traitement, au fil des ans, traverse la courbe de contrôle et inversent ainsi l'ordre absolu d'efficacité du traitement. Il est donc impératif de conserver la majeure partie du profil de croissance juvénile afin d'éviter de prendre trop rapidement des décisions sur l'efficacité d'un type de traitement (Nilsson et Allen 2003). Il est aussi important de relier les espèces cultivées au type de traitement à utiliser.

VI.3. Les différentes approches de modélisation en foresterie

Les modèles de croissance initiaux représentent la croissance et le rendement des arbres en réponse à des pratiques de culture, depuis la plantation jusqu'à la fermeture de la canopée. En effet, comme nous l'avons évoqué dans la partie sur la période juvénile, la croissance des arbres en période juvénile est d'avantage conditionnée par la compétition interspécifique. Une fois la taille critique dépassée, les arbres se libèrent alors de la compétition avec la végétation compétitrice et la compétition intraspécifique devient alors prédominante. Lier des modèles adultes et juvéniles n'a pas été concluant (Mason 1996, 2001; Mason et al. 1997; Mason et Milne 1999). En effet, si un modèle de croissance et de rendement adulte était construit avec l'utilisation de données provenant de modèles de croissances juvéniles initiaux, même si les plants sont établis avec les mêmes préparations de site et la même gestion de la végétation dans les deux modèles, les projections de ce nouveau modèle ne seront alors que du bruit.

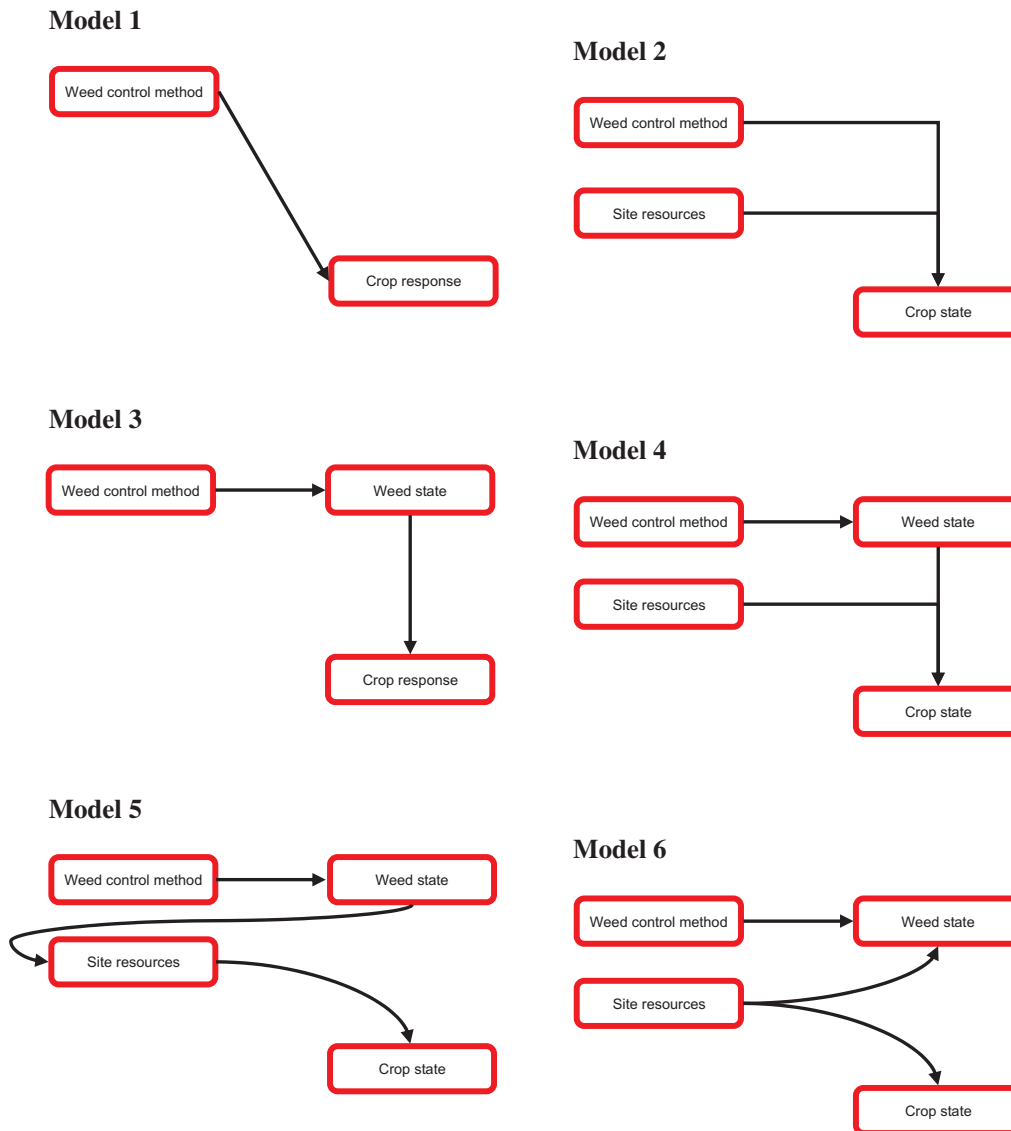


Figure 4. Diagrammes schématiques des différentes approches de modélisation adoptées par les chercheurs en gestion de la végétation (Figure tirée de Mason et Dzierzon 2006).

Selon Mason et Dzierzon (2006), plusieurs types de modèles peuvent se distinguer et sont mentionnés dans la Figure 4. La palette s'étend de la simple représentation de la technique de contrôle et de son effet sur les plantes (modèle 1) au modèle de la dynamique en ressources du site utilisées par les plantes qui constituent l'écosystème (modèle 6). Entre les deux, nous avons le modèle 2 représentant les interactions entre les ressources du site et les méthodes de contrôle de ce site influençant les changements sur l'état de la culture. Le modèle 3, où les contrôles de la végétation herbacée sont comparés, dans leurs effets relatifs, sur la végétation herbacée et les effets conséquents sur l'état de la culture sont évalués. Le modèle 4, qui est une combinaison des modèles 2, 3 et 5, et qui fonctionne comme le modèle 3, représente les effets

de la végétation herbacée sur les ressources du site, permettant une estimation des ressources disponibles pour la plante en culture.

Certains de ces types de modèles contiennent des hypothèses implicites assez restrictives. Cannell et Grace (1993) ont distingué la concurrence unilatérale, où une seule espèce est affectée, et la concurrence symétrique qui affecte les deux espèces suggérant que la concurrence pour la lumière pourrait être le premier cas tandis que la concurrence pour les nutriments ou l'eau serait le second. Les modèles de types 3 et 5 impliquent une concurrence unilatérale uniquement car ils ne tiennent pas compte des effets des arbres sur les mauvaises herbes.

L'analyse de la période critique (Wagner et al. 1999) trouve son intérêt pour modéliser implicitement la dynamique des cultures et des mauvaises herbes. La lutte contre ces dernières est mise en œuvre pour différentes périodes dans différentes parcelles qui peuvent être laissées pendant un certain nombre d'années avant le début du contrôle. Toutefois, cette analyse implique également les effets des cultures sur les mauvaises herbes car lorsque la culture d'arbres a dominé un site, la lutte contre les mauvaises herbes sera moins efficace. On pourrait dire qu'il s'agit d'une version à très basse résolution du modèle 6.

Les modèles impliquant des indices de compétition sont généralement de type 3 ou 4. La réponse à la compétition est souvent non linéaire et les chercheurs créent donc des mesures de la végétation compétitrice à proximité des plantes cultivées afin de prédire leur croissance (Comeau et al. 1993; Lauer et al. 1993; Wagner et Radosevich 1998; Glover et Quicke 1999; Richardson et al. 1999; Ter-Mikaelian et al. 1999). Burton (1993) a effectivement résumé leurs limites comme des mesures statiques de la concurrence : les relations avec la végétation compétitrice changent avec le temps, les cultures réagissent en fonction des environnements, les mauvaises herbes sont affectées par les semis, et enfin les mauvaises herbes limitent la croissance sans la déterminer.

Les modèles généralisables devraient prendre en compte les relations dynamiques entre les mauvaises herbes et les plantes cultivées, et un moyen d'adapter les modèles d'indice de concurrence au modèle de type 5 ou 6 a été décrit par Richardson et al. (1999). Les modèles

mécanismes de concurrence sont généralement de type 6, mais ils peuvent être excessivement compliqués et donc difficiles à utiliser.

Model	Growth and (or) yield of trees	Growth and (or) yield of weeds	Resources used by trees	Resources used by weeds
1	×			
2	×		×	
3	×	×		
4	×	×	×	
5	×		×	×
6	×	×	×	×

Table 1. Résumé des attributs prédits par les types de modèles génériques de gestion de la végétation (Tableau tiré de Mason et Dzierzon 2006).

VI.4. Modèles phénoménologiques

Les modèles de croissance et de rendements ont été utilisés largement par les gestionnaires de plantations pour la prise de décision et la planification (Mason et Dzierzon 2006; Mason et al. 2011; Marsden et al. 2012). Ces fonctions prédisent la croissance et par extension, la biomasse marchande basée sur les données acquises sur les précédentes performances du site exploité ainsi que d'une espèce voire d'un clone très spécifique (Clutter 1963; Tomé et al. 2006; Nambiar 2008).

Ces modèles utilisent des équations sigmoïdes et, malgré leur simplicité, ils fournissent des prédictions précises de la croissance lorsque les conditions actuelles et futures sont identiques (Battaglia et al. 1999; Mason et Dzierzon 2006). Malgré tout, ces modèles sont très abstraits sur les processus de développement des peuplements dans le temps (Mason et Dzierzon 2006).

En effet, d'un point de vue physiologique, la croissance dépend des apports de ressources telles que le rayonnement solaire, l'eau, les nutriments et la température ambiante. Les modèles de croissance utilisés en foresterie utilisent le temps (l'âge du peuplement) pour représenter les apports cumulatifs de ressources de croissance sur un site donné (Mason et al. 2011).

C'est pourquoi les prédictions de croissance de ces modèles vis-à-vis de nouveaux sites sont très incertaines (Bikindou et al. 2012), compromettant leur utilité si les conditions

d'application ne sont pas strictement respectées. Par conséquent, bon nombre des problèmes potentiels associés à l'application des modèles de croissance traditionnels impliquent de caractériser avec précision comment les conditions du site affecteront la qualité et le rendement du bois sur la période d'une rotation (Battaglia et al. 1999).

VI.5. Modèles écophysiologicals

En parallèle, les modèles basés sur des principes écophysiologicals fonctionnent avec des données climatiques dans la gamme des facteurs intégrés par le modèle et, pour chaque facteur, dans la gamme des valeurs prises en compte pour calibrer ce dernier. L'inclusion explicite de ces ressources de croissance conduit à des modèles plus complexes qui représentent des processus de croissance à un niveau de résolution plus élevé. (Mason et al. 2011).

Les modèles de croissance basés sur les processus représentent les processus d'acquisition et de respiration du carbone avec plus réalisme et de détails (Battaglia et al. 1999). Ils peuvent prendre en compte les variations entre sites ainsi que les caractéristiques du sol et du climat et sont théoriquement transposables à de nouveaux sites analogues (Marsden et al. 2012).

Durant les dernières décennies, beaucoup de modèles écophysiologicals se sont attachés à décrire les relations entre la croissance des arbres et les variables climatiques (Kirschbaum et Watt 2011). La complexité de ces modèles s'étend de simples modèles d'utilisation de la lumière (Monteith et Moss 1977) aux modèles les plus complexes qui lient les circulations de carbone, d'eau et d'azote à travers les arbres et le sol (Running et Coughlan 1988; Kellomäki et Väisänen 1997; Kirschbaum 1999; Battaglia et al. 2004).

Toutefois, ces modèles ne sont pas très utilisés en gestion forestière car ils ont une certaine tendance à magnifier les erreurs et requièrent souvent une large gamme de paramètres, qui sont parfois difficiles à évaluer (Mäkelä et al. 2000). En effet, l'invariance est particulièrement importante pour ce genre de modèle car elle garantit que les modèles ne souffrent pas d'erreurs composées puisque les résultats d'une simulation sont utilisés comme points de départ pour les simulations ultérieures (Mason et Dzierzon 2006). Cependant, plus un modèle est compliqué, plus il est susceptible d'être biaisé en raison d'erreurs dans les sous-

modèles et des multiples itérations d'un modèle composé. Par ailleurs, des modèles physiologiques extrêmement complexes peuvent être trop lourds pour prédire avec précision les processus de croissance au niveau des peuplements forestiers (Mason et Dzierzon 2006; Mason et al. 2011). Pour être exploités, ces modèles doivent correspondre aux données de productivité, or la plupart d'entre eux sont paramétrés au niveau local, voire régional (Coughenour et Chen 1997; Hasenauer et al. 1999; Sabaté et al. 2002; Grant et al. 2003; Magnani et al. 2004; Simioni et al. 2008), ce qui rend l'extrapolation problématique (Kirschbaum et Watt 2011).

Par ailleurs, les processus impliqués dans la partition de la biomasse sont souvent représentés de manière très simplifiée. Ceci est dû au fait que notre compréhension des processus de coordination est limitée (par exemple, Cannell 1985; Cannell et Dewar 1994). La mauvaise gestion du partage de la biomasse dans les modèles basés sur les processus a considérablement limité leur utilité pour prédire la dynamique de croissance, en particulier des peuplements qui ont été éclaircis ou élagués. À ce jour, le rôle majeur des modèles basés sur les processus a été soit de développer des relations de réponses de peuplements à long terme (Dewar et McMurtrie 1996; Murty et al. 1996), soit d'expliquer les réponses à court terme en utilisant des données détaillées sur les sites et les arbres (Nygren et al. 1996).

Des progrès considérables ont été accomplis pour améliorer les systèmes de croissance et de rendement avec des variables qui remplacent les facteurs influençant la croissance (Mason et al. 1997; Woollons et al. 1997; Methol 2001). Les paramètres asymptotiques, les paramètres de forme ou parfois les deux sont représentés comme des fonctions linéaires de ces variables de substitution (Mason et al. 2011). Bien que ces approches puissent améliorer les ajustements des modèles aux données brutes, elles ne représentent pas explicitement une utilisation de la lumière (Zon 1917).

Landsberg et Waring (1997) décrivent la construction d'un système de croissance mécaniste, qui représente explicitement l'utilisation de la lumière, appelé le modèle 3-PG qui peut être classé dans la classe générale des modèles « d'efficacité d'utilisation des rayonnements ». Les conditions microclimatiques locales modifient la croissance des cultures en facilitant l'utilisation de la lumière. Le modèle 3-PG a suscité beaucoup d'intérêt, mais il

présente quelques caractéristiques que les modélisateurs forestiers essaient généralement d'éviter. Il n'est pas invariant et possède de nombreux paramètres estimés. De plus, le modèle est hautement récursif et des erreurs peuvent donc se propager lorsque des variables dépendantes, issues de la simulation d'un mois, sont utilisées comme variables indépendantes au cours du mois suivant (Mason et al. 2011). Selon Mason et al. (2011) il est clair qu'il vaut la peine d'explorer quelque chose entre la croissance traditionnelle et 3-PG. L'approche présente des caractéristiques intéressantes, mais elle peut être encore trop compliquée pour être comparée favorablement à un modèle de croissance et de rendement bien construit.

VI.6. Modèles hybrides

Des modèles simples, mais qui sont plus représentatifs des conditions de sites et de climat ont très vite été nécessaires. Korzukhin et al. (1995) mettent en avant la manifestation du besoin d'estimations quantitatives des effets sur la performance des cultures des stratégies alternatives. En effet, les auteurs mettent l'accent sur cette double nécessité avec la planification de la récolte qui nécessite des estimations du rendement, tandis que des modèles sensibles à la taille et à l'éclaircie sont nécessaires pour les décisions relatives à l'entretien. Ainsi, les chercheurs se sont efforcés de fournir aux gestionnaires des moyens d'ajuster les modèles de croissance et de rendement pour tenir compte des effets des mauvaises herbes et du contrôle des mauvaises herbes observés dans leurs expériences (Mason et Dzierzon 2006).

Bien souvent, les modèles de croissance utilisent le concept d'indice de site pour donner un peu plus de robustesse (Ford et Bassow 1989). Pour une espèce donnée, la croissance peut être exprimée comme une fonction de l'âge, un indice du site et du statut compétitif de l'arbre (Clutter et al. 1983; Burkhart et al. 1987; Amateis et al. 1989; Avery et Burkhart 1994). Selon Zhang et al., (1996), des trois facteurs de modélisation, le statut compétitif de l'arbre est le plus difficile à mesurer quantitativement. L'indice de site est une mesure du potentiel de croissance d'un site, souvent exprimé comme la hauteur attendue d'une forêt à un âge donné. Ce concept suppose implicitement que les forêts suivent une évolution temporelle prévisible de la croissance déterminée par une seule mesure de la qualité du site et que des relations spécifiques

et invariantes existent entre le peuplement des tiges, la hauteur, le diamètre et le volume (Ford et Bassow 1989).

De nombreuses tentatives ont été faites pour déduire la qualité du site à partir de facteurs biophysiques du site (Hunter et Gibson 1984; Monserud 1984; Carter et Klinka 1990; Rayner 1992; Battaglia et al. 1999), toutefois, sauf lorsqu'un facteur est d'une importance primordiale dans l'explication de la variation inter-sites ou interannuelle de la croissance (Snowdon et Waring 1991), les tentatives de prédire la qualité du site à l'aide d'un seul facteur climatique ou pédologique se sont généralement avérées infructueuses (Rayner 1992). Le développement d'indices utiles et robustes combinant des informations sur les caractéristiques climatiques et pédologiques s'est avéré plus efficace bien que pas toujours facile (Battaglia et al. 1999). En effet, la réponse de la croissance aux facteurs environnementaux peut être très non linéaire et les formes de ces relations peuvent être difficiles à prévoir sans une expérimentation physiologique détaillée (Battaglia et al. 1999).

Dans son étude, Mason (2013), établit le parallèle sur des modèles de croissance qui seraient bâtis sur une base fonctionnelle. Si les modèles traditionnels de croissance représentent l'application de méthodes statistiques à de grands ensembles de données, les modèles écophysologiques sont censés représenter des processus de croissance sous-jacents. Un modèle qui se situe entre ces extrêmes est appelé un modèle «hybride» (Mason et Dzierzon 2006). Ces modèles «hybrides», qui incluent certains éléments de détail physiologique reposent fortement sur des relations allométriques et pourraient en théorie être ajustés aux données dendrométriques (Mason et al. 2011).

Pour marier la sensibilité des modèles basés sur des processus détaillés avec la précision, l'efficacité et l'applicabilité pratique des modèles de croissance, nous devons conserver les meilleurs aspects de chacun en évitant toute forme de récursivité et en permettant suffisamment de complications pour que l'impact des cultures et du changement climatique sur la croissance des forêts y soit représentés (Mason et Dzierzon 2006; Mason et al. 2011). L'« hybridation » des modèles est préconisée comme le moyen le plus rapide de fournir aux aménagistes forestiers des informations précises sur la croissance des forêts (Rayner et Turner 1990; Candy 1997).

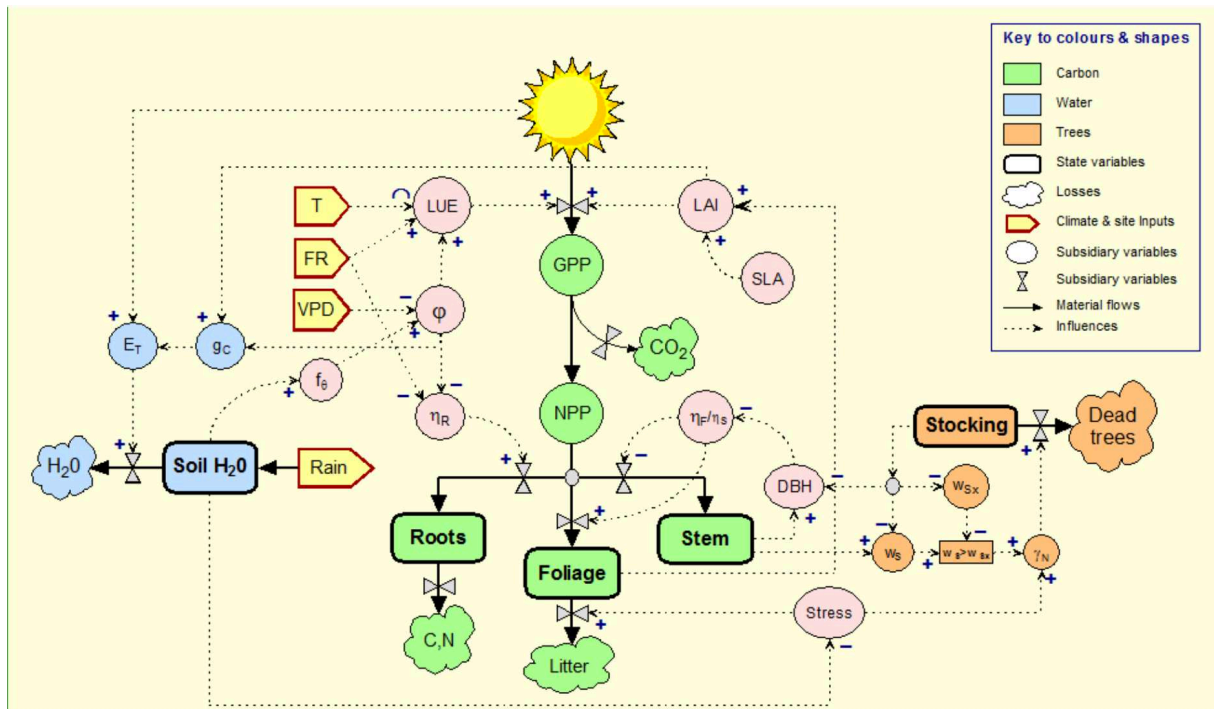


Figure 5. Diagramme du modèle 3P-G (Landsberg et Waring 1997) mettant en avant le principe d'efficacité d'utilisation de la lumière.

L'efficacité d'utilisation des rayonnements (Monteith 1972; Monteith et Moss 1977) est le principal mécanisme utilisé pour modéliser la croissance dans les modèles hybrides (Cf. Figure 5). En effet, l'utilisation des rayonnements est généralement le processus le plus affecté lorsque les cultures arboricoles subissent la concurrence des mauvaises herbes (Mason 2013). La concurrence directe pour la lumière influence clairement la quantité de lumière interceptée (Chan et Walstad 1987; Morris et Macdonald 1991; Burton 1993; Comeau et al. 1993; Richardson et al. 1999). Bien qu'il y ait une variation dans la forme de l'indice de compétition, le plus souvent une mesure de l'abondance des mauvaises herbes dans un voisinage fixe et la hauteur relative des mauvaises herbes par rapport à l'arbre focal est incorporée (Burton 1993; Richardson et al. 1996, 1999). La concurrence pour l'eau influe sur l'efficacité d'utilisation des rayonnements (Watt et al. 2003a, 2007; Mason et al. 2007), tout comme les limitations nutritionnelles (Bown et al. 2007) et les déficits de pression de vapeur élevés. Si les réductions observées de l'efficacité d'utilisation des rayonnements peuvent être injectées dans des modèles hybrides qui s'étendent au-delà de la phase d'établissement (Mason et al. 2011), alors il peut

être possible d'utiliser de tels modèles pour estimer les gains des traitements de préparation de site (Mason 2013).

VII. Objectifs de l'étude

Cette étude a pour but d'amener des éléments de réponse sur les facteurs influençant la croissance juvénile des semis en plantation. Nous pouvons ainsi représenter notre environnement de croissance comme un système complexe et multifactoriel où les ressources du milieu, la végétation compétitrice et les semis sont en constantes interactions (Cf. Figure 6).

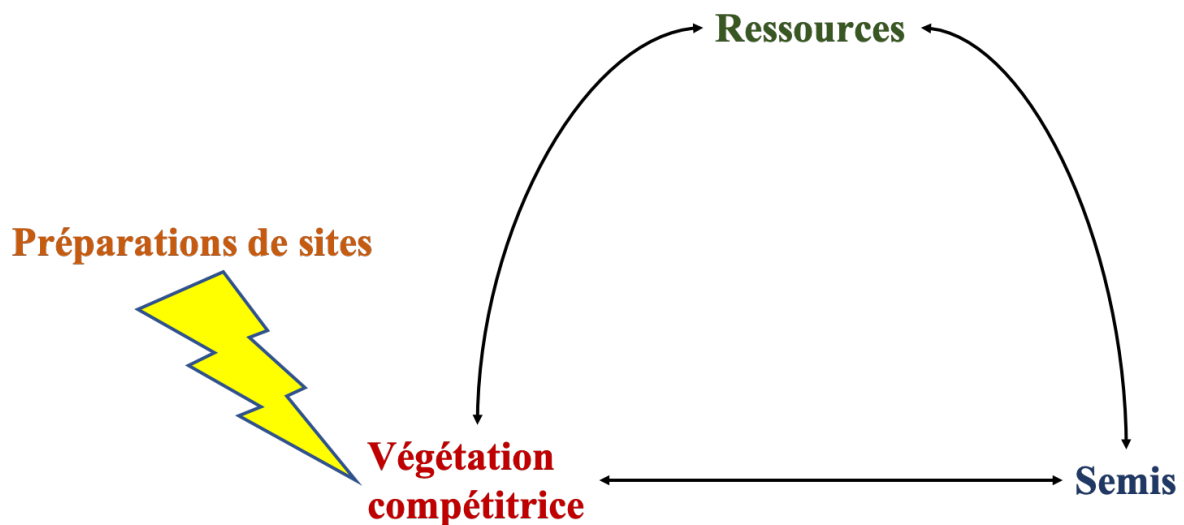


Figure 6. Schéma représentant le système d'étude.

Comme nous l'avons vu, la végétation herbacée, par l'intermédiaire de la compétition, a un fort impact sur le développement des semis. Afin de maximiser la production des plantations forestières, les professionnels du secteur emploient et développent différentes techniques de préparation du site afin de dégager le plant de cette compétition pour lui assurer les meilleures chances de survie et de croissance. Toutefois, les implications de telles pratiques sont souvent difficiles à estimer et il est nécessaire d'en constater les effets sur plusieurs années (Cf. Figure 7).

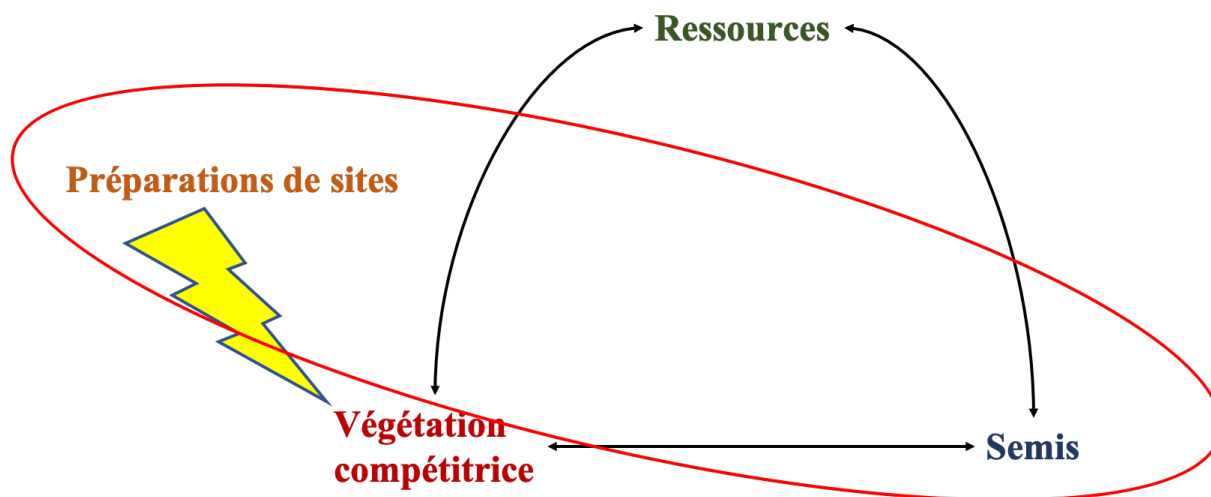


Figure 7. Schéma représentant le système d'étude avec la définition du premier objectif mettant en relation l'impact des préparations de site sur la croissance des semis.

Les préparations de site, par leur action de contrôle sur la végétation compétitrice, ont un impact sur tout le système. Bien souvent, la suppression de cette compétition a pour effet, entre autres, de maximiser le taux de ressources disponibles pour le semis ce qui se traduira par une meilleure croissance et par extension une productivité et une survie accrue sur la parcelle.

Dans cette première partie nous faisons les hypothèses que :

- 1. Les préparations de site ont un impact favorable sur la croissance des semis ;**
- 2. Que certains « types » de traitements sont plus favorables que d'autre ;**
- 3. Pour un même traitement la réponse est espèce dépendante.**

Pour répondre à cet objectif, nous avons constitué une base de données regroupant des expérimentations conduites en France sur la croissance juvénile de plusieurs essences commerciales cultivées selon différents traitements de préparation du site . Cette base de données référence plusieurs essences qui sont : chêne sessile, chêne pédonculé, peuplier, douglas, épicéa, pin laricio et pin sylvestre. Les différents itinéraires sylvicoles testés ont été regroupés en grandes catégories qui sont : préparation mécanisée, herbicide, fertilisation, amendement, traitements combinés, témoin sans intervention. Sur l'ensemble des profils fournis, par soucis de cohérence avec le sujet et d'homogénéité, seule la phase de croissance juvénile a été conservée.

Pour modéliser la croissance juvénile nous avons privilégié des modèles non linéaires de type exponentiel et mixtes en considérant le type de traitement comme un effet fixe (Objectif 1).

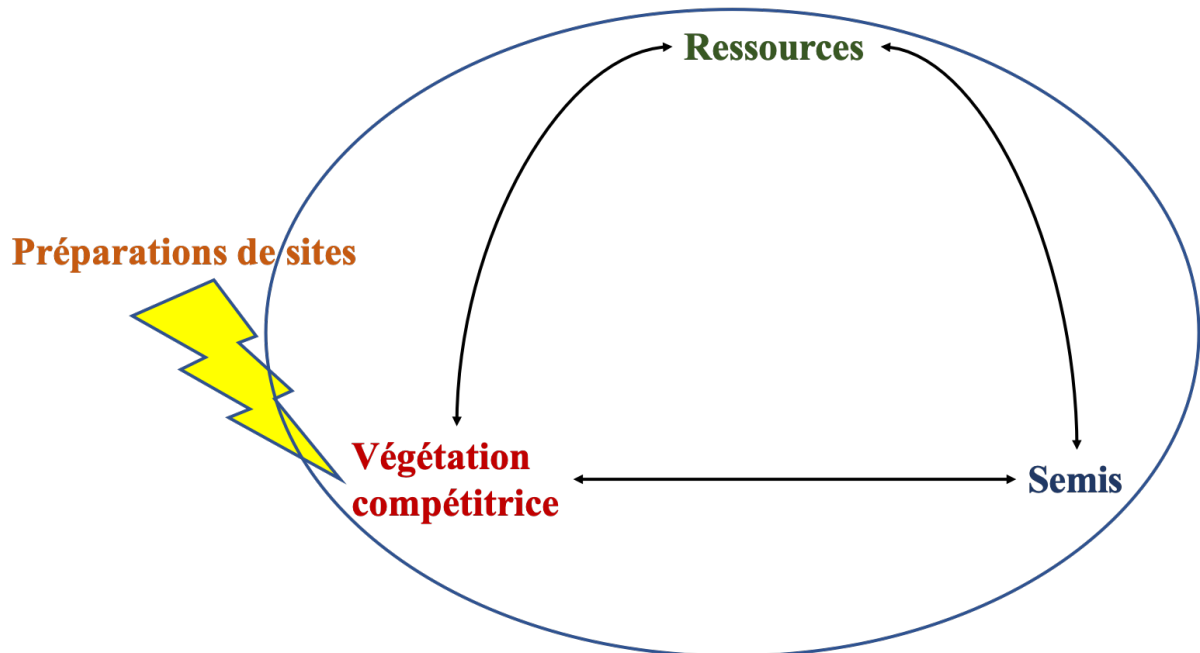


Figure 8. Schéma représentant le système d'étude avec la définition du second objectif décrivant les différentes relations entre niveau de ressource, végétation compétitrice et semis.

Dans un second temps, nous nous intéresserons plus spécifiquement à la nature des relations entre ressources, végétation compétitrice et semis (Cf. Figure 8). Dans cette seconde partie, nous faisons les hypothèses suivantes :

- 1. L'impact de la végétation compétitrice sur le niveau de ressources disponibles augmente avec l'intensité de la compétition ;**
- 2. Cet impact se traduit négativement sur la croissance des semis ;**
- 3. L'impact sur la croissance dépend du type de ressource.**

Pour répondre à cet objectif, un dispositif expérimental a été établi en Forêt de Fontaine d'Olive (51) où des semis de pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) sont soumis à différentes intensités de compétitions croisées eau et lumière avec la fougère aigle (*Pteridium aquilinum*). Les campagnes de mesure menées en 2018 et 2019 devront servir à mettre en relation les variables dendrométriques et climatiques collectées sur le terrain.

Tester nos hypothèses s'effectuera à travers une démarche en trois phases :

1. Étudier la croissance des semis de pin sylvestre en fonction du niveau de ressource observé. Création d'un modèle de croissance hybride (type potentiel réducteur) en fonction des ressources (Objectif 2.1).
2. Étudier le niveau de ressource observé en fonction des différents niveaux d'intensité de compétition croisés eau et lumière. Création de modèles de compétition pour les ressources (Objectif 2.2).
3. Étudier l'impact des différentes intensités de compétition sur la croissance des semis de pin sylvestre. Construction d'un modèle liant intensité de compétition et croissance sur la base des deux réalisations précédentes (Objectif 2.3).

La combinaison de nos deux parties offre une démarche complémentaire. En effet, le premier chapitre s'attache à observer l'évolution des croissances juvéniles sous différents protocoles de préparation de site à un niveau pluriannuel. Le second chapitre rentre plus en profondeur car il explore la nature de la compétition entre fougère aigle et pin sylvestre à un niveau intra-annuel. La synthèse de ces deux approches devra nous permettre, par l'étude des différents impacts des traitements sylvicoles d'une part, et par l'observation des effets de la compétition sur les ressources et la croissance d'autre part, d'améliorer notre compréhension des mécanismes de la croissance juvénile en plantation et de proposer des pistes de réflexion pour optimiser cette dernière.

Enfin, la mortalité, bien que composante essentielle de la réussite d'une plantation forestière, ne sera pas traitée ici. En effet, les données collectées dans nos deux parties ne sont pas suffisantes pour traiter ce processus.