

### II.3.1. Définition du modèle de base

Comme en première partie, nous avons adapté des modèles de puissance à la première année de croissance individuelle des plants (Clark 1983). Toutefois, nous avons utilisé la modification décrite dans le modèle PULSE de Mason et al. (2007) et substitué la variable de temps par la quantité de lumière cumulée. Le modèle peut être exprimé comme suit :

$$Y_t = Y_0 + \alpha \left( \frac{\psi(t)}{10^9} \right)^\beta + \varepsilon$$

*Équation 7. Modèle de croissance exponentielle adapté à la période juvénile (Clark 1983) et modifiée dans le modèle PULSE de Mason et al. (2007).*

où  $Y_0$  correspond au volume initial de l'arbre,  $\psi(t)$  est la quantité de lumière reçue par l'arbre depuis le début de la saison de végétation jusqu'au moment  $t$  de la mesure,  $Y_t$  est le volume de l'arbre au temps  $t$ ,  $\alpha$  et  $\beta$  sont les paramètres du modèle à estimer et  $\varepsilon$  est un terme d'erreur résiduel. La quantité de lumière est divisée par  $10^9$  afin que le modèle puisse converger correctement.

La structure hiérarchique de la base de données, c'est-à-dire des arbres imbriqués dans des parcelles unitaires, eux-mêmes imbriqués dans des blocs, a probablement abouti à des données auto-corrélées et à une violation de l'hypothèse d'indépendance. L'utilisation de techniques statistiques traditionnelles, fondées sur les estimateurs des moindres carrés conduit à un niveau de signification biaisé des effets fixes lorsque l'hypothèse d'indépendance ne tient pas (Gregoire et al. 1995). L'approche du modèle à effets mixtes (à la fois aléatoires et fixes) permet d'assouplir l'hypothèse d'indépendance, par la spécification d'effets aléatoires dans le modèle.

Différents niveaux d'effets aléatoires ont été testés dans le modèle : arbre, parcelle unitaire et bloc. Les critères d'information Akaike et Bayésien (Pinheiro 2000, p.84) ont été utilisés pour sélectionner les modèles qui correspondaient le mieux aux données. En plus des critères, des corrélations empiriques ont été calculées sur les résidus normalisés pour identifier les corrélations persistantes résiduelles qui ne seraient pas expliquées par les effets aléatoires (Fortin et al. 2008).

Le modèle générique, ajusté pour le volume, résultant de ce processus de sélection pourrait être exprimé comme suit :

$$y_{(t)ijk} = y_{0ijk} + (\alpha_s + b_{i,1} + b_{ij,1} + b_{ijk,1}) \left( \frac{\psi(t)}{10^9} \right)^{\beta_s + b_{i,2} + b_{ij,2} + b_{ijk,2}} + \varepsilon_{ijk}$$

Équation 8. Adaptation du modèle sélectionné pour l'ajustement aléatoire multi-niveaux.

où  $y_{(t)ijk}$  est le volume de l'arbre pris sur l'arbre  $k$  de la parcelle  $j$  du bloc  $i$  ;  $\psi(t)$  est la quantité de lumière depuis le début de la saison de végétation jusqu'au moment de la mesure ;  $\alpha_s$  et  $\beta_s$  sont les paramètres d'effets fixes;  $b_{x,i}$ ,  $b_{x,ij}$ ,  $b_{x,ijk}$  (où  $x = 1$  ou  $2$ ) sont des effets aléatoires de bloc, de parcelle unitaire et d'arbre, respectivement ; et  $\varepsilon_{ijk}$  est le terme d'erreur résiduel. Chaque niveau d'effets aléatoires est en fait représenté par un vecteur de deux effets aléatoires, par ex.  $b_i = (b_{i,1}, b_{i,2})^T$ . On suppose que ces vecteurs d'effets aléatoires suivent des distributions normales bivariées avec une moyenne de 0 et une variance à estimer. De même, le terme d'erreur résiduelle  $\varepsilon_{ijk}$  est supposé suivre une distribution normale multivariée avec une moyenne de 0 et une variance-covariance  $R$ .

Cette relation va constituer notre courbe de croissance potentielle pour le modèle hybride potentiel réducteur.

### II.3. 2. Construction du réducteur d'humidité

Le réducteur d'humidité est formulé en prenant en compte le déficit hydrique moyen depuis le début de la saison de végétation. Une parcelle est considérée en déficit si son REW est inférieur à une limite de 0,4. L'équation du réducteur peut s'écrire de la manière suivante :

$$f_D(REW) = \frac{0,4 - \bar{d}_M}{0,4}$$

Équation 9. Équation du réducteur d'humidité du sol pour le modèle hybride.

avec  $f_D(REW)$  le réducteur lié à l'humidité du sol au mois  $M$  et  $\bar{d}_M$  le déficit moyen depuis le début de la saison de végétation au temps  $t$ . Le déficit moyen au temps  $t$  peut se calculer de la manière suivante :

$$\bar{d}_M = \sum_{m=1}^M \frac{\bar{d}_m * N_{jour_m}}{N_{jour_{total}}}$$

Équation 10. Équation du déficit moyen au temps M.

avec  $d_m$  le déficit moyen mensuel,  $N_{\text{jour } m}$  le nombre de jours dans le mois  $m$  et  $N_{\text{jour total}}$ , le nombre de jours depuis le début de la saison de végétation jusqu'à la fin du mois  $M$  (Cf. Figure 27).

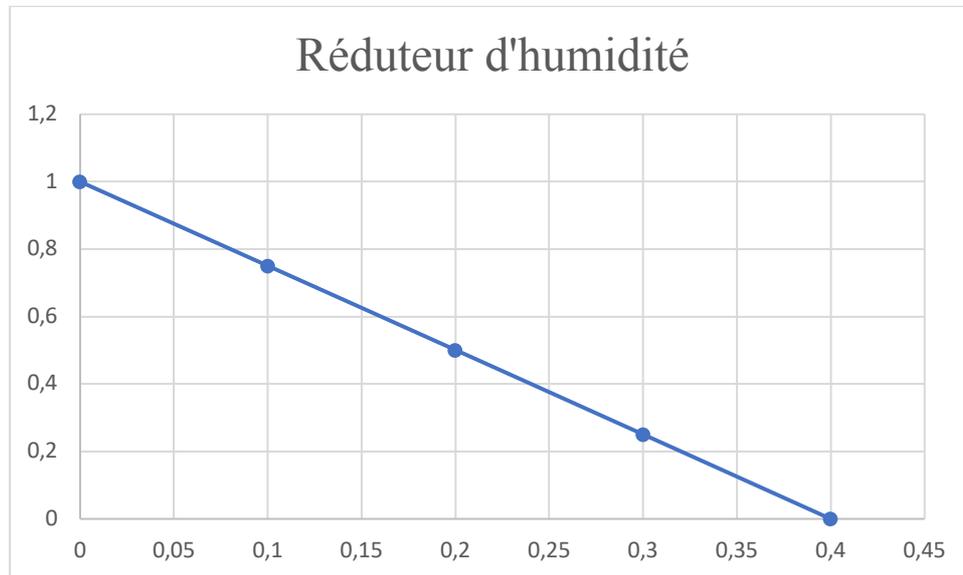


Figure 27. Illustration des effets du réducteur d'humidité (abscisse) en fonction du déficit moyen (ordonnées).

### II.3. 3. Construction du réducteur de température

Le réducteur de température est identique à celui défini dans le modèle 3PG (Landsberg et Waring 1997). Ce dernier est basé sur les températures minimale, optimale et maximale pour la photosynthèse mentionnées par (Lewis et al. 1999). On note  $T$  la température moyenne de l'air depuis le début de la saison de végétation jusqu'au temps  $t$  et l'équation du réducteur s'écrit de la façon suivante :

$$f_T(\bar{T}) = \left( \frac{\bar{T} - T_{\min}}{T_{\text{opt}} - T_{\min}} \right) \left( \frac{T_{\max} - \bar{T}}{T_{\max} - T_{\text{opt}}} \right)^{\left( \frac{T_{\max} - T_{\text{opt}}}{T_{\text{opt}} - T_{\min}} \right)}$$

Équation 11. Équation du réducteur de température pour le modèle hybride.

pour  $T$  compris entre  $T_{\min}$  et  $T_{\max}$  et vaut zéro sinon; avec  $T_{\min}$ ,  $T_{\text{opt}}$  et  $T_{\max}$  les températures minimale, optimale et maximale pour la production photosynthétique nette (respectivement -2°C, 20°C et 40°C (Lewis et al. 1999)). Ce modificateur est identique à celui utilisé dans le modèle 3-PG. Il est basé sur les températures minimale, optimale et maximale pour la

photosynthèse (Cf. Figure 28). Les valeurs données en référence sont tirées de Lewis et al. (1999) et correspondent à la réponse lumineuse photosynthétique chez le Douglas.

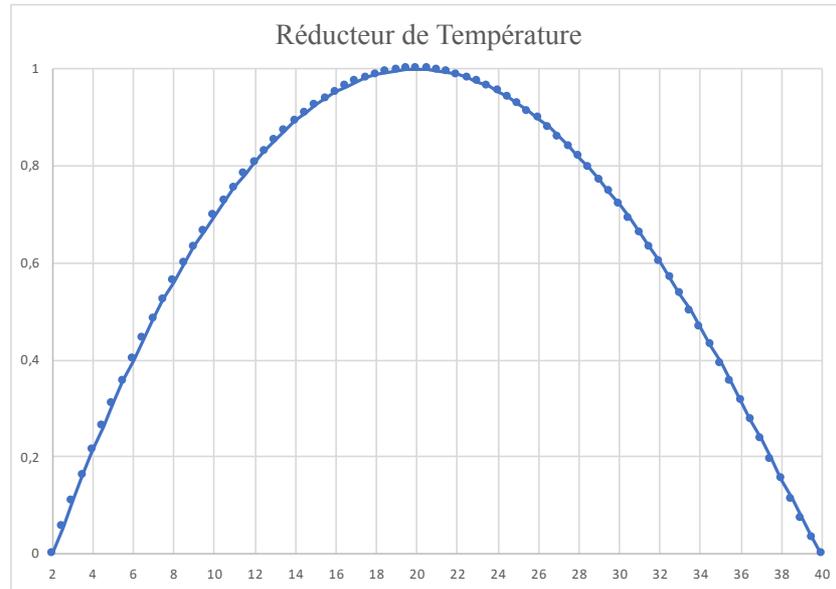


Figure 28. Illustration des effets du réducteur de température (abscisse) en fonction de la température en °C (ordonnées).

### II.3. 4. Définition du modèle hybride de type potentiel/réducteur

Le modèle de base définissant la courbe de croissance potentielle, nous pouvons la réduire avec les deux réducteurs décrits précédemment selon l'équation suivante :

$$Y_t = Y_0 + \alpha \left( \frac{\psi(t)}{10^9} \right)^\beta * f_D * f_T + \varepsilon$$

Équation 12. Équation du modèle hybride de type potentiel/réducteur.

où  $Y_0$  correspond aux valeurs initiales des variables dendrométriques  $Y$  (volume de l'arbre),  $\psi(t)$  est la quantité de lumière depuis le début de la saison de végétation jusqu'au moment  $t$  de la mesure,  $Y_t$  est le  $Y$  observé au temps  $t$ ,  $\alpha$  et  $\beta$  sont les paramètres du modèle à estimer,  $f_D$  le réducteur de stress hydrique (0-1),  $f_T$  le réducteur de température (0-1) et  $\varepsilon$  est un terme d'erreur résiduel.

Le modèle générique, ajusté séparément pour la hauteur ou le diamètre, résultant de ce processus de sélection pourrait être exprimé comme suit :

$$y_{(t)ijk} = y_{0ijk} + (\alpha_s + b_{i,1} + b_{ij,1} + b_{ijk,1}) \left( \frac{\psi(t)}{10^9} \right)_{ikl}^{\beta_s + b_{i,2} + b_{ij,2} + b_{ijk,2}} * f_D * f_T + \varepsilon_{ijk}$$

*Équation 13. Adaptation du modèle hybride de type potentiel/réducteur pour l'ajustement multiniveau.*

où  $y_{(t)ijk}$  est le volume de l'arbre pris sur l'arbre  $k$  de la parcelle  $j$  du bloc  $i$  et;  $\psi(t)$  est la quantité de lumière depuis le début de la saison de végétation jusqu'au moment  $t$  de la mesure;  $\alpha_s$  et  $\beta_s$  sont les paramètres d'effets fixes;  $b_{x, i}$ ,  $b_{x, ij}$ ,  $b_{x, ijk}$  (où  $x = 1$  ou  $2$ ) sont des effets aléatoires de bloc, de parcelle unitaire et d'arbre, respectivement;  $f_D$  le réducteur de déficit (0-1),  $f_T$  le réducteur de température (0-1) et  $\varepsilon_{ijk}$  est le terme d'erreur résiduel. Chaque niveau d'effets aléatoires est en fait représenté par un vecteur de deux effets aléatoires, par ex.  $b_i = (b_{i, 1}, b_{i, 2})^T$ . On suppose que ces vecteurs d'effets aléatoires suivent des distributions normales bivariées avec une moyenne de 0 et une variance à estimer. De même, le terme d'erreur résiduelle  $\varepsilon_{ijk}$  est supposé suivre une distribution normale multivariée avec une moyenne de 0 et une variance-covariance  $R$ .

## II.4. Intégration de la compétition dans le modèle de croissance

### II.4. 1. Présentation des données et impact sur la modélisation

Dans notre modélisation, les données qui constituent nos variables d'entrée, sont des produits des différentes modalités au sein du site expérimental. Par conséquent, elles sont déjà la résultante de la compétition pour la lumière et pour l'eau. Ainsi, pour exprimer les variables climatiques en fonction de la compétition à notre modèle, nous devons partir des modalités de « référence ».

Dans cette section, nous faisons l'hypothèse que la compétition exercée par la fougère aigle sur les ressources peut être modélisée. Considérant que les modalités expriment chacune un niveau de compétition, en modélisant l'évolution de la ressource en fonction du temps à travers des modèles à effets mixtes, nous pourrions capter la part d'influence de la compétition sur la ressource considérée pour chaque modalité.

Les valeurs ainsi estimées pour nos modalités traduiraient donc un niveau plus ou moins intense de compétition qu'il serait possible de mettre en relation avec une variable simple représentant cette compétition. Nous pourrions alors, en fonction de cette variable, reconstituer un profil type d'eau et de lumière qui serait dépendant du niveau de compétition en fonction du temps.

L'objectif de cette démarche est de pouvoir, à terme, établir des courbes mettant en relation la compétition et la part de ressources interceptée par cette dernière ainsi que la perte de production qui lui est associée.

## II.4. 2. Estimation de la compétition pour la lumière

La quantité de lumière sur la saison de végétation variant grandement d'une modalité à l'autre, un modèle visant à estimer la compétition a été ajusté. Dans le jeu de données, les sommes de lumière ne sont calculées que sur la période de végétation, leur donnant une forme de croissance asymptotique. Pour confirmer cet effet et faciliter la modélisation, nous avons assigné en dernière valeur la première quantité de lumière du profil météorologique de 2019. Plusieurs formes de modèles ont été testées comme des formes polynomiales par exemple. Toutefois, ces dernières présentaient trop de corrélation entre leurs différents paramètres et n'ont donc pas été retenues. Sur cette base, une équation de régression de Mitscherlich, qui était notre meilleure option, a été ajustée :

$$\Psi(t)_{ijk} / 10e9 = (\alpha_s + b_{i,1} + b_{ij,1} + b_{ijk,1}) - (\beta_s + b_{i,2} + b_{ij,2} + b_{ijk,2}) * k_{ijk}^{t_{ijk}} + \varepsilon_{ijk}$$

*Équation 14. Équation de Mitscherlich modélisant la compétition exercée par la fougère aigle sur la ressource en lumière.*

où  $\Psi(t)_{ijk}$  est la quantité de lumière depuis le début de la saison de végétation jusqu'au moment de la mesure prise sur l'arbre k de la parcelle j du bloc i ;  $\alpha_s$  et  $\beta_s$  sont les paramètres d'effets fixes ;  $b_{x,i}$ ,  $b_{x,ij}$ ,  $b_{x,ijk}$  (où  $x = 1$  ou  $2$ ) sont des effets aléatoires de bloc, de parcelle unitaire et d'arbre, respectivement ;  $k$  est un paramètre fixe et  $t_{ijk}$  est le jour de végétation. Chaque niveau d'effets aléatoires est en fait représenté par un vecteur de deux effets aléatoires, par ex.  $b_i = (b_{i,1}, b_{i,2})^T$ . On suppose que ces vecteurs d'effets aléatoires suivent des distributions normales bivariées avec une moyenne de 0 et une variance à estimer. De même, le terme d'erreur résiduelle  $\varepsilon_{ijk}$  est supposé suivre une distribution normale multivariée avec une moyenne de 0 et une variance-covariance R.

Les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  étant estimés avec un effet fixe pour chaque modalité, il est donc possible de récupérer ces estimations pour leur associer une variable de distance vis-à-vis de la

fougère et qui correspond à la modalité, estimations sur lesquelles nous pouvons ajuster une simple régression linéaire polynomiale de type  $a*x^2 + b*x + c$ .

### II.4. 3. Intégration de la compétition pour l'eau

La somme de REW sur la saison de végétation variant grandement d'une modalité à l'autre, un modèle visant à estimer la compétition a été ajusté. Dans le jeu de données, les sommes de REW ne sont calculées que sur la période de végétation, leur donnant une forme de croissance asymptotique. Plusieurs options de modélisation ont été envisagées. Toutefois, la forme polynomiale, qui était la plus simple, nous donnait des résultats tout à fait satisfaisants. Nous avons donc choisi de conserver cette forme. Sur cette base, une équation de régression de type polynomiale a été ajustée :

$$\sum_{ijk} REW(t) = (\alpha_s + b_{i,1} + b_{ij,1} + b_{ijk,1}) * t_{ijk}^2 + (\beta_s + b_{i,2} + b_{ij,2} + b_{ijk,2}) * t_{ijk} + \gamma_{ijk}$$

*Équation 15. Régression polynomiale modélisant la compétition exercée par la fougère aigle sur la ressource en eau.*

où  $\sum_{ijk} REW(t)$  est la somme de REW depuis le début de la saison de végétation jusqu'au moment de la mesure prise sur l'arbre  $k$  de la parcelle  $j$  du bloc  $i$ ;  $\alpha_s$  et  $\beta_s$  sont les paramètres d'effets fixes ;  $b_{x,i}$ ,  $b_{x,ij}$ ,  $b_{x,ijk}$  (où  $x = 1$  ou  $2$ ) sont des effets aléatoires de bloc, de parcelle unitaire et d'arbre, respectivement ;  $\gamma$  est un paramètre fixe et  $t_{ijk}$  est le jour de végétation. Chaque niveau d'effets aléatoires est en fait représenté par un vecteur de deux effets aléatoires, par ex.  $b_i = (b_{i,1}, b_{i,2})^T$ . On suppose que ces vecteurs d'effets aléatoires suivent des distributions normales bivariées avec une moyenne de 0 et une variance à estimer. De même, le terme d'erreur résiduelle  $\epsilon_{ijk}$  est supposé suivre une distribution normale multivariée avec une moyenne de 0 et une variance-covariance  $R$ .

Les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  étant estimés avec un effet fixe pour chaque modalité, il est donc possible de récupérer ces estimations pour leur associer une variable de distance vis-à-vis de la fougère et qui correspond à la modalité, estimations sur lesquelles nous pouvons ajuster une simple régression linéaire polynomiale de type  $a*x^2 + b*x + c$ .

## II.4. 4. Intégration de la compétition

A travers les modalités, la modélisation de la compétition pour les ressources devrait nous permettre, à partir de variables potentielles issues des données de nos modalités herbicides sans compétition, de reconstituer les profils eau/lumière de l'ensemble de nos plants en fonction de la distance vis-à-vis de la fougère aigle.

En effet, le modèle ressource/lumière nous permettra d'établir, à partir du profil de référence, un nouveau profil « pondéré » par la compétition en fonction de la distance de la fougère. Le modèle ressource/eau quant à lui nous permettra de reconstituer un profil « pondéré » de la ressource en eau, qui sera la condition pour obtenir un profil de déficit et par extension notre réducteur de déficit hydrique.

Durant cette étape, nous réestimerons les paramètres de croissance  $\alpha$  et  $\beta$  et retesterons les effets liés à la modalité à cause de l'effet produit par la moyennisation des variables d'entrée, qui nous font perdre en variabilité. Cette étape nous permettrait de confirmer que l'eau et la lumière sont bien les deux seules variables nécessaires à la modélisation de la croissance et qu'il ne subsiste aucun effet caché, que seul un effet fixe sur la modalité pourrait expliquer.

## II.5. Simulation sur l'année par Monte-Carlo

Les projections de nos modèles se feront, comme en partie 1, sur la base de réalisation Monte-Carlo. Chaque arbre sera simulé 1000 fois et l'ensemble des réalisations sera analysé, soit collectivement pour permettre une estimation générale sur le site, soit groupées en modalité pour mettre en évidence l'impact des différents niveaux de compétition croisés au sein du site expérimental. Des intervalles de confiance et des comparaisons entre différents traitements à différentes dates cibles ont été obtenus à l'aide de simulations de Monte Carlo.

### III. Résultats

#### III.1. Données récoltées sur la campagne de mesure 2018

##### III.1.1. Croissance du pin sylvestre

###### III.1.1.1. Diamètre

Les résultats sur la campagne de mesure 2018 montrent que le diamètre s'accorde avec le gradient théorique de compétition imaginé pour le site de Fontaine d'Olive (Cf. Table 4). Nous pouvons observer, en fin de saison de végétation, une valeur pour les modalités **herbicides** (1,57cm de diamètre) sensiblement plus élevée que pour les autres modalités (respectivement 0,92, 1,04, 0,79, 0,87, 0,72 cm de diamètre pour les modalités **L1 af**, **L1 sf**, **L50 dro**, **L50 inc** et **témoins**) montrant un fort impact de la compétition (Cf. Table 6 et Table 7). En effet, nous pouvons observer entre autres que les modalités **herbicides** se détachent des autres modalités tôt dans la saison de végétation à partir de mi-Juin. Par ailleurs, pour les modalités avec compétition, les résultats mettent en évidence une augmentation du taux de croissance à partir du premier tiers d'Août (Cf. Figure 29 et Table 5).

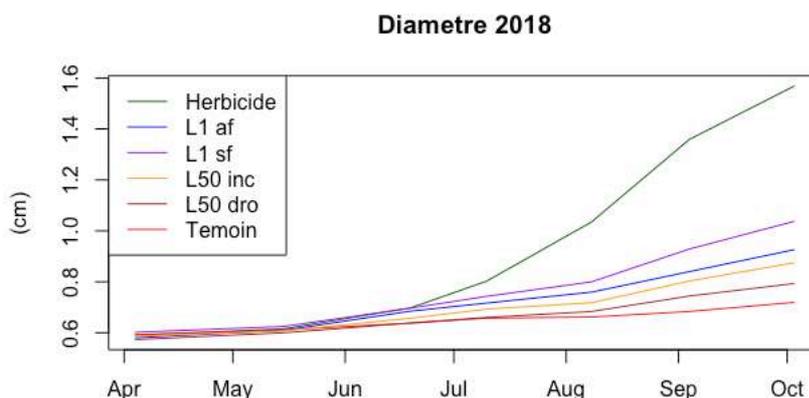


Figure 29. Diamètre moyen des pins sylvestres pour les différentes modalités sur la campagne de mesure 2018.

Diamètre (cm) sur la saison de végétation 2018

Date	4-avr.	15-mai	19-juin	10-juil.	8-août	4-sept.	3-oct.	
Jours de Végétation	94	135	170	191	220	247	276	
Modalités	HE	0,59	0,62	0,70	0,80	1,03	1,36	1,57
	L <sub>1</sub> <i>af</i>	0,58	0,61	0,68	0,72	0,76	0,84	0,93
	L <sub>1</sub> <i>sf</i>	0,60	0,62	0,70	0,74	0,80	0,93	1,04
	L <sub>50</sub> <i>dro</i>	0,57	0,60	0,64	0,66	0,68	0,74	0,79
	L <sub>50</sub> <i>inc</i>	0,59	0,61	0,66	0,69	0,72	0,80	0,87
	TEM	0,59	0,61	0,64	0,66	0,66	0,68	0,72

Table 5. Diamètres moyens pour le pin sylvestre en fonction de la modalité sur la saison de végétation 2018.

Diamètre (cm) 2018

Modalités	Estimations	Erreur std	t value	p.value
HE	1,57	0,02	75,06	<2E-16 ***
L <sub>1</sub> <i>af</i>	0,92	0,03	26,81	<2E-16 ***
L <sub>1</sub> <i>sf</i>	1,04	0,03	29,88	<2E-16 ***
L <sub>50</sub> <i>dro</i>	0,79	0,03	24,37	<2E-16 ***
L <sub>50</sub> <i>inc</i>	0,87	0,04	24,31	<2E-16 ***
TEM	0,72	0,03	25,90	<2E-16 ***

Table 6. Estimation du diamètre (cm) en fin de saison de végétation 2018. Les étoiles indiquent les valeurs p : \*\*\* :  $p < 0,001$  ; \*\* :  $p < 0,01$  ; \* :  $p < 0,05$ .

### Diamètre (cm) 2018

Modalités	t	df	p.value	
HE - L <sub>1</sub> <i>af</i>	16,19	72,60	<2E-16	***
HE - L <sub>1</sub> <i>sf</i>	11,69	57,82	<2E-16	***
HE - L <sub>50</sub> <i>dro</i>	22,87	104,46	<2E-16	***
HE - L <sub>50</sub> <i>inc</i>	16,71	62,83	<2E-16	***
HE - TEM	25,56	122,87	<2E-16	***
L <sub>1</sub> <i>af</i> - L <sub>1</sub> <i>sf</i>	-2,54	54,69	1,39E-02	*
L <sub>1</sub> <i>af</i> - L <sub>50</sub> <i>dro</i>	3,25	52,88	2,02E-03	**
L <sub>1</sub> <i>af</i> - L <sub>50</sub> <i>inc</i>	0,90	54,42	3,70E-01	
L <sub>1</sub> <i>af</i> - TEM	5,26	53,12	2,67E-06	***
L <sub>1</sub> <i>sf</i> - L <sub>50</sub> <i>dro</i>	5,69	45,44	8,71E-07	***
L <sub>1</sub> <i>sf</i> - L <sub>50</sub> <i>inc</i>	3,31	53,42	1,69E-03	**
L <sub>1</sub> <i>sf</i> - TEM	7,46	44,63	2,21E-09	***
L <sub>50</sub> <i>dro</i> - L <sub>50</sub> <i>inc</i>	-2,11	46,77	4,06E-02	*
L <sub>50</sub> <i>dro</i> - TEM	2,42	72,50	1,79E-02	*
L <sub>50</sub> <i>inc</i> - TEM	4,02	46,35	2,10E-04	***

Table 7. Comparaison des modalités deux à deux sur le diamètre en fin de saison de végétation 2018. Les étoiles indiquent les valeurs p : \*\*\* :  $p < 0,001$  ; \*\* :  $p < 0,01$  ; \* :  $p < 0,05$ .

#### III.1.1.2. Hauteur

Les résultats sur la campagne de mesure 2018 montrent donc que la hauteur totale ne s'accorde pas avec le gradient théorique de compétition imaginé pour le site de Fontaine d'Olive (Cf. Table 4). En effet, les résultats mettent en avant plusieurs faits intéressants. En premier, nous remarquons que les modalités herbicides ne présentent pas les meilleures hauteurs totales en moyenne sur le site avant septembre, date à laquelle elles dépassent les modalités L<sub>1</sub> *sf*. Par ailleurs, nous pouvons observer que les modalités témoins ont une hauteur moyenne supérieure aux modalités L<sub>50</sub> confondues (Cf. Figure 30 et Table 8). En fin de saison de végétation, les hauteurs constatées sont respectivement 67,34, 64,73, 66,38, 60,21, 63,33 et

64,20cm de hauteur pour les modalités **herbicides**, **L<sub>1</sub> af**, **L<sub>1</sub> sf**, **L<sub>50</sub> dro**, **L<sub>50</sub> inc** et **témoins** (Cf. Table 9 et Table 10).

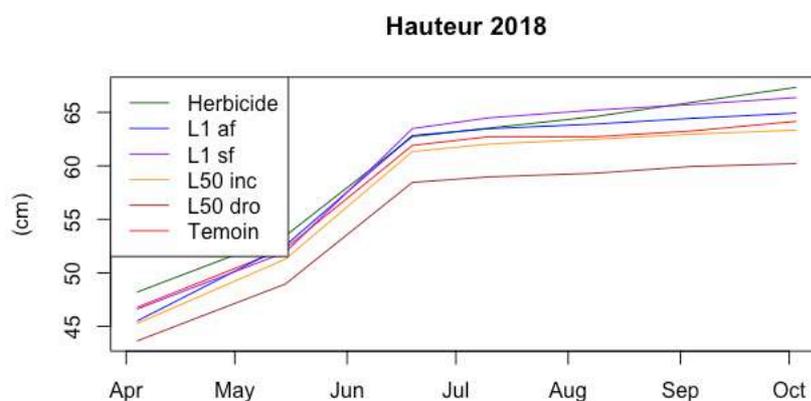


Figure 30. Hauteur moyenne des pins sylvestre pour les différentes modalités sur la campagne de mesure 2018.

Hauteur (cm) sur la saison de végétation 2018

Date	4-avr.	15-mai	19-juin	10-juil.	8-août	4-sept.	3-oct.
Jours de Végétation	94	135	170	191	220	247	276
HE	48,20	53,48	62,73	63,53	64,59	65,93	67,34
L <sub>1</sub> af	45,50	52,57	62,83	63,47	63,90	64,43	64,93
L <sub>1</sub> sf	46,62	51,93	63,48	64,48	65,21	65,72	66,38
L <sub>50</sub> dro	43,64	48,97	58,45	58,97	59,30	59,94	60,21
L <sub>50</sub> inc	45,26	51,30	61,33	62,04	62,48	62,96	63,33
TEM	46,78	52,30	61,91	62,72	62,72	63,26	64,16

Table 8. Hauteurs moyennes pour le pin sylvestre en fonction de la modalité sur la saison de végétation 2018.

Hauteur (cm) 2018

Modalités	Estimations	Erreur std	t value	p.value
HE	67,34	0,74	91,37	<2E-16 ***
L <sub>1</sub> <i>af</i>	64,73	1,20	53,79	<2E-16 ***
L <sub>1</sub> <i>sf</i>	66,38	1,22	54,23	<2E-16 ***
L <sub>50</sub> <i>dro</i>	60,21	1,15	52,47	<2E-16 ***
L <sub>50</sub> <i>inc</i>	63,33	1,27	49,92	<2E-16 ***
TEM	64,20	0,98	65,33	<2E-16 ***

Table 9. Estimation de la hauteur (cm) en fin de saison de végétation 2018. Les étoiles indiquent les valeurs p : \*\*\* :  $p < 0,001$  ; \*\* :  $p < 0,01$  ; \* :  $p < 0,05$ .

Hauteur (cm) 2018

Modalités	t	df	p.value
HE - L <sub>1</sub> <i>af</i>	1,82	54,58	7,39E-02
HE - L <sub>1</sub> <i>sf</i>	0,72	58,33	4,75E-01
HE - L <sub>50</sub> <i>dro</i>	4,68	55,43	1,89E-05 ***
HE - L <sub>50</sub> <i>inc</i>	2,56	44,03	1,40E-02 *
HE - TEM	2,84	111,72	5,38E-03 **
L <sub>1</sub> <i>af</i> - L <sub>1</sub> <i>sf</i>	-1,02	56,60	3,14E-01
L <sub>1</sub> <i>af</i> - L <sub>50</sub> <i>dro</i>	2,54	60,91	1,36E-02 *
L <sub>1</sub> <i>af</i> - L <sub>50</sub> <i>inc</i>	0,77	53,31	4,44E-01
L <sub>1</sub> <i>af</i> - TEM	0,37	52,93	7,12E-01
L <sub>1</sub> <i>sf</i> - L <sub>50</sub> <i>dro</i>	3,62	59,14	6,06E-04 ***
L <sub>1</sub> <i>sf</i> - L <sub>50</sub> <i>inc</i>	1,75	50,61	8,61E-02
L <sub>1</sub> <i>sf</i> - TEM	1,62	55,55	1,10E-01
L <sub>50</sub> <i>dro</i> - L <sub>50</sub> <i>inc</i>	-1,65	56,88	1,04E-01
L <sub>50</sub> <i>dro</i> - TEM	-2,61	54,21	1,18E-02 *
L <sub>50</sub> <i>inc</i> - TEM	-0,55	43,55	5,84E-01

Table 10. Comparaison des modalités deux à deux sur la hauteur en fin de saison de végétation 2018. Les étoiles indiquent les valeurs p : \*\*\* :  $p < 0,001$  ; \*\* :  $p < 0,01$  ; \* :  $p < 0,05$ .

### III.1.1.3. Volume

Les résultats sur la campagne de mesure 2018 montrent que le volume calculé s'accorde avec le gradient théorique de compétition imaginé pour le site de Fontaine d'Olive (Cf. Table 4). Nous pouvons observer en fin de saison de végétation une valeur pour les modalités **herbicides** ( $44,97\text{cm}^3$  de volume) sensiblement plus élevée que pour les autres modalités (respectivement  $14,79$ ,  $19,74$ ,  $10,39$ ,  $13,39$  et  $9,12\text{cm}^3$  de volume pour les modalités **L1 af**, **L1 sf**, **L50 dro**, **L50 inc** et **témoins**) montrant un fort impact de la compétition (Cf. Table 12 et Table 13). Les observations sont tout à fait comparables aux résultats de diamètres moyens présentés plus haut (Cf. Figure 31 et Table 11).

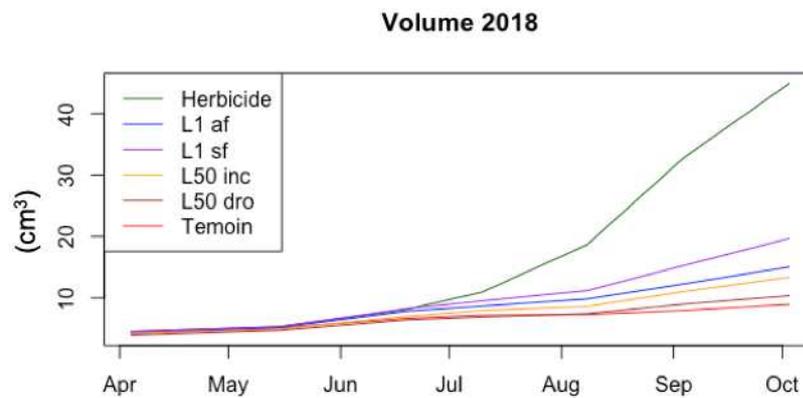


Figure 31. Volume calculé moyen des pins sylvestres pour les différentes modalités sur la campagne de mesure 2018.

Volume (cm<sup>3</sup>) sur la saison de végétation 2018

Date	4-avr.	15-mai	19-juin	10-juil.	8-août	4-sept.	3-oct.	
Jours de Végétation	94	135	170	191	220	247	276	
Modalité	HE	4,52	5,32	8,11	10,93	18,64	32,92	44,94
	L <sub>1</sub> <i>af</i>	4,13	5,17	7,83	8,67	9,82	12,30	15,05
	L <sub>1</sub> <i>sf</i>	4,51	5,30	8,23	9,51	11,19	15,32	19,69
	L <sub>50</sub> <i>dro</i>	3,89	4,69	6,41	6,92	7,46	9,00	10,36
	L <sub>50</sub> <i>inc</i>	4,19	4,88	7,01	7,96	8,62	11,06	13,37
	TEM	4,37	5,09	6,68	7,21	7,31	7,98	8,95

Table 11. Volumes moyens pour le pin sylvestre en fonction de la modalité sur le site de Fontaine d'Olive sur la saison de végétation 2018.

Volume (cm<sup>3</sup>) 2018

Modalités	Estimations	Erreur std	t value	p.value
HE	44,97	1,12	40,07	<2E-16 ***
L <sub>1</sub> <i>af</i>	14,79	1,83	8,07	3,45e-14 ***
L <sub>1</sub> <i>sf</i>	19,74	1,86	10,59	<2E-16 ***
L <sub>50</sub> <i>dro</i>	10,39	1,75	5,95	9.67e-09 ***
L <sub>50</sub> <i>inc</i>	13,39	1,93	6,93	3,90e-11 ***
TEM	9,12	1,50	6,10	4,37e-09 ***

Table 12. Estimation du volume (cm<sup>3</sup>) en fin de saison de végétation 2018. Les étoiles indiquent les valeurs p : \*\*\* : p < 0,001 ; \*\* : p < 0,01 ; \* : p < 0,05.

### Volume (cm<sup>3</sup>) 2018

Modalités	t	df	p.value	
HE - L <sub>1</sub> <i>af</i>	14,60	106,81	<2E-16	***
HE - L <sub>1</sub> <i>sf</i>	10,87	89,44	<2E-16	***
HE - L <sub>50</sub> <i>dro</i>	18,61	101,85	<2E-16	***
HE - L <sub>50</sub> <i>inc</i>	15,39	103,16	<2E-16	***
HE - TEM	19,56	100,09	<2E-16	***
L <sub>1</sub> <i>af</i> - L <sub>1</sub> <i>sf</i>	-2,54	52,02	1,42E-02	*
L <sub>1</sub> <i>af</i> - L <sub>50</sub> <i>dro</i>	3,21	49,28	2,32E-03	**
L <sub>1</sub> <i>af</i> - L <sub>50</sub> <i>inc</i>	0,86	54,95	3,91E-01	
L <sub>1</sub> <i>af</i> - TEM	4,25	47,33	9,92E-05	***
L <sub>1</sub> <i>sf</i> - L <sub>50</sub> <i>dro</i>	5,41	39,70	3,24E-06	***
L <sub>1</sub> <i>sf</i> - L <sub>50</sub> <i>inc</i>	3,28	50,17	1,88E-03	**
L <sub>1</sub> <i>sf</i> - TEM	6,25	37,94	2,62E-07	***
L <sub>50</sub> <i>dro</i> - L <sub>50</sub> <i>inc</i>	-2,23	45,47	3,10E-02	*
L <sub>50</sub> <i>dro</i> - TEM	1,30	71,15	1,98E-01	
L <sub>50</sub> <i>inc</i> - TEM	3,26	43,48	2,19E-03	**

Table 13. Comparaison des modalités deux à deux sur le volume en fin de saison de végétation 2018. Les étoiles indiquent les valeurs p : \*\*\* :  $p < 0,001$  ; \*\* :  $p < 0,01$  ; \* :  $p < 0,05$ .

### III.1.2. Croissance de la fougère aigle

Les résultats de mesures de hauteur de la fougère aigle sur le site de Fontaine d'Olive nous montrent que la fougère débute fortement sa croissance à partir de Mai pour atteindre très rapidement un plateau sur le second tiers du mois de Juin (203,5cm de hauteur  $\pm$  56cm). Ce statut perdure jusqu'au premier tiers de Juillet, date à laquelle la fougère décroît lentement sur le site jusque vers début Octobre (Cf. Figure 32 et Table 14). En 2018, la fougère était uniforme sur le site. La densité moyenne relevée était de 25 frondes par m<sup>2</sup> pour un LAI moyen de 12,9.

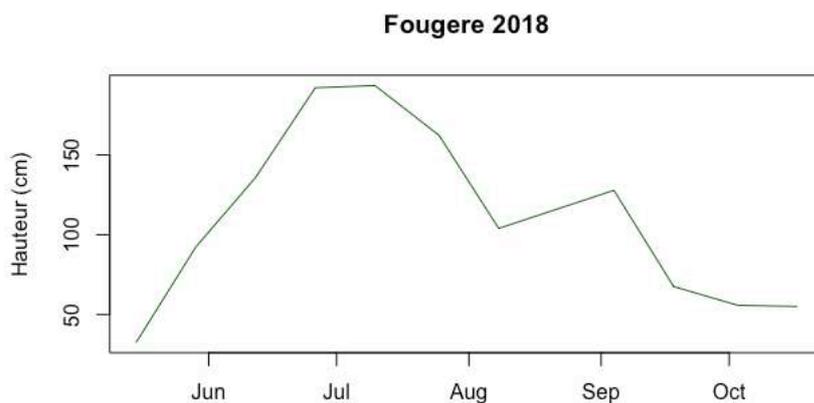


Figure 32. Hauteur moyenne de la fougère aigle sur la campagne de mesure 2018.

Saison de végétation 2018

Date	Jour de végétation	Hauteur (cm)
15-mai	135	18,78
29-mai	149	92,35
12-juin	163	168,11
26-juin	177	203,50
10-juil.	191	200,63
25-juil.	206	173,86
8-août	220	134,53
4-sept.	247	177,50
18-sept.	261	64,84
3-oct.	276	55,78
17-oct.	290	65,31

Table 14. Hauteurs moyennes pour la fougère aigle en fonction de la modalité sur le site de Fontaine d'Olive sur la saison de végétation 2018.

### III.1.3. Mesures climatiques

#### III.1.3.1. Pluviométrie et température moyenne de l'année 2018

La Figure 33 nous montre que la saison de végétation 2018 a été régulièrement sujette à des épisodes pluvieux. On peut observer malgré tout une diminution de ces épisodes entre Juin et Août, couplée à une forte température moyenne journalière pouvant expliquer des épisodes de sécheresse constatés sur le terrain.

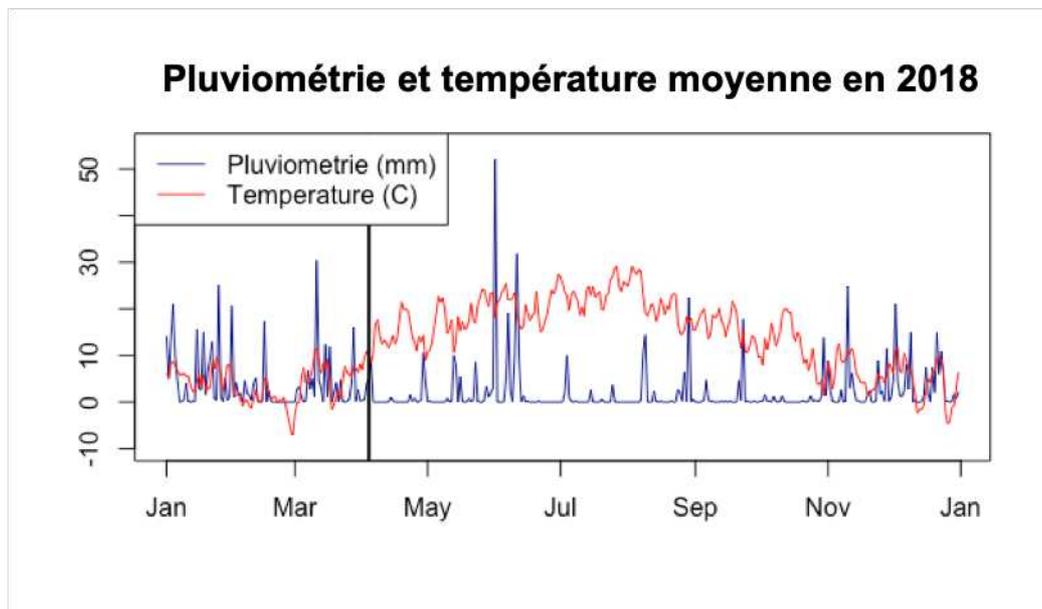


Figure 33. Diagramme ombro-climatique relevé sur le site de Fontaine d'Olive en 2018. La ligne noire représente la date de plantation des pins sylvestre.

#### III.1.3.2. Eau du sol

La Figure 34, montrant les relevés de données climatiques des teneurs de REW moyennes sur le site de Fontaine d'Olive sur la saison de végétation 2018, nous montre que les modalités avec compétition sont en déficit à partir du mois de Juillet pour les modalités **témoins** (0,36 de REW moyen) et à mi-Juillet pour les modalités **L<sub>1</sub>** et **L<sub>50</sub>** (0,29, 0,29, 0,19 et 0,20 respectivement pour les modalités **L<sub>1</sub> af**, **L<sub>1</sub> sf**, **L<sub>50</sub> dro** et **L<sub>50</sub> inc**) (Cf. Table 15). Par ailleurs, les modalités avec compétition restent en déficit jusqu'à la fin de la saison de végétation.

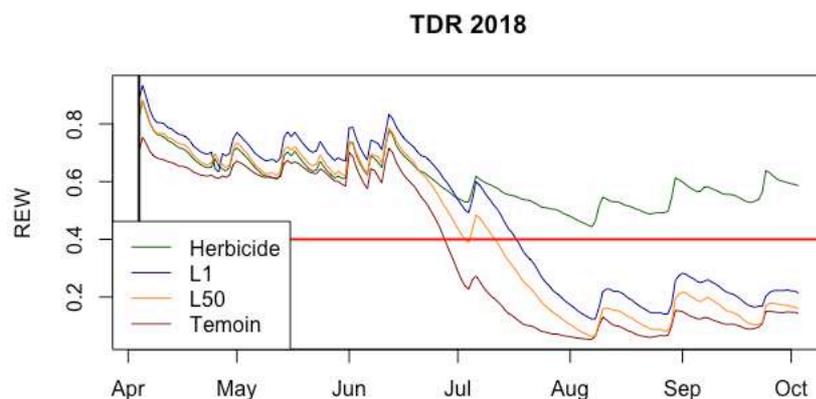


Figure 34. REW moyennes pour chaque modalité sur la saison de végétation 2018. La ligne noire représente la date de plantation des pins sylvestres. La ligne rouge représente la limite théorique de stress hydrique fixée à 0,4

		REW moyen 2018					
Date		15-mai	19-juin	10-juil.	8-août	4-sept.	3-oct.
Jours de Végétation		135	170	191	220	247	276
Modalités	HE	0,69	0,67	0,59	0,51	0,53	0,57
	L <sub>1</sub> <i>af</i>	0,74	0,74	0,60	0,29	0,20	0,22
	L <sub>1</sub> <i>sf</i>	0,74	0,74	0,60	0,29	0,20	0,22
	L <sub>50</sub> <i>dro</i>	0,70	0,68	0,50	0,19	0,14	0,15
	L <sub>50</sub> <i>inc</i>	0,71	0,69	0,50	0,20	0,14	0,16
	TEM	0,64	0,63	0,36	0,10	0,10	0,12

Table 15. REW moyens en fonction de la modalité sur le site de Fontaine d'Olive sur la saison de végétation 2018. Les valeurs en rouge se situent en dessous de notre limite de 0,4 et témoignent d'un stress hydrique.

La Figure 35, qui représente les intégrales de REW moyen en fin de saison de végétation pour chaque modalité, nous montre que le gradient théorique de compétition au niveau de la teneur en eau du sol est bien respecté (Cf. Table 4). En effet, nous pouvons voir que les modalités herbicides montrent les meilleurs résultats suivis dans l'ordre des modalités L<sub>1</sub>, des modalités L<sub>50</sub> et des modalités témoin. La Table 16 et la Table 17 nous montrent que l'**herbicide** avec somme de REW de 3,57 est statistiquement supérieur au deux modalités L<sub>1</sub> *af* et L<sub>1</sub> *sf* qui ont toutes deux 2,79. Les modalités L<sub>50</sub> *dro* et L<sub>50</sub> *inc* sont en dessous des

modalités L<sub>1</sub> avec 2,36 et 2,40 de somme de REW respectivement mais devant le **témoin** qui a une somme de REW de 1,94 en fin de saison de végétation.

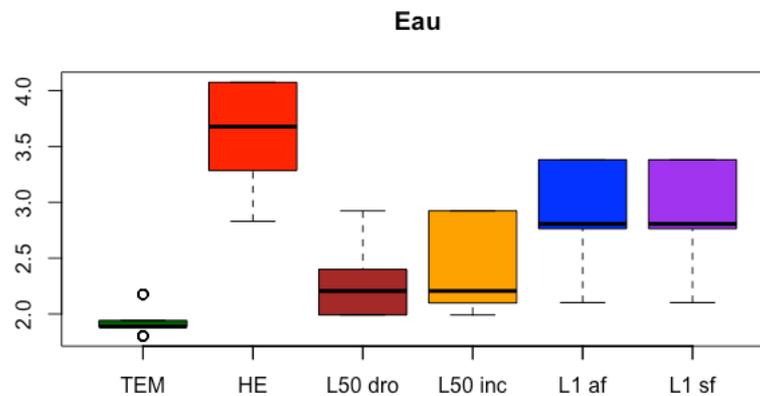


Figure 35. Intégrale du REW moyen calculée en fin de saison de végétation 2018 pour chaque modalité sur le site de Fontaine d'Olive.

#### Somme REW 2018

Modalités	Estimations	Erreur std	t value	p.value
HE	3,57	0,05	75,26	<2E-16 ***
L <sub>1</sub> af	2,79	0,08	35,95	<2E-16 ***
L <sub>1</sub> sf	2,79	0,08	35,36	<2E-16 ***
L <sub>50</sub> dro	2,36	0,07	31,98	<2E-16 ***
L <sub>50</sub> inc	2,40	0,08	29,37	<2E-16 ***
TEM	1,94	0,06	30,71	<2E-16 ***

Table 16. Estimation de la somme de REW en fin de saison de végétation 2018. Les étoiles indiquent les valeurs p : \*\*\* :  $p < 0,001$  ; \*\* :  $p < 0,01$  ; \* :  $p < 0,05$ .

La somme de REW présente plusieurs avantages pour notre étude. En plus de permettre la reconstitution des profils de déficit nécessaires pour notre réducteur d'humidité, elle permet également de mettre en évidence un effet de la compétition, même quand le semis n'est pas en déficit hydrique.

### Somme REW 2018

Modalités	t	df	p.value	
HE - L <sub>1</sub> <i>af</i>	7,65	59,76	2,02E-10	***
HE - L <sub>1</sub> <i>sf</i>	7,46	55,92	6,01E-10	***
HE - L <sub>50</sub> <i>dro</i>	14,15	88,28	<2E-16	***
HE - L <sub>50</sub> <i>inc</i>	12,58	63,71	<2E-16	***
HE - TEM	25,99	96,02	<2E-16	***
L <sub>1</sub> <i>af</i> - L <sub>1</sub> <i>sf</i>	-0,01	56,85	9,95E-01	
L <sub>1</sub> <i>af</i> - L <sub>50</sub> <i>dro</i>	4,07	54,33	1,53E-04	***
L <sub>1</sub> <i>af</i> - L <sub>50</sub> <i>inc</i>	3,50	54,47	9,26E-04	***
L <sub>1</sub> <i>af</i> - TEM	9,77	32,38	3,52E-11	***
L <sub>1</sub> <i>sf</i> - L <sub>50</sub> <i>dro</i>	3,99	51,75	2,11E-04	***
L <sub>1</sub> <i>sf</i> - L <sub>50</sub> <i>inc</i>	3,44	52,82	1,14E-03	**
L <sub>1</sub> <i>sf</i> - TEM	9,47	31,05	1,15E-10	***
L <sub>50</sub> <i>dro</i> - L <sub>50</sub> <i>inc</i>	-0,38	54,33	7,03E-01	
L <sub>50</sub> <i>dro</i> - TEM	6,48	38,93	1,11E-07	***
L <sub>50</sub> <i>inc</i> - TEM	6,11	30,14	1,02E-06	***

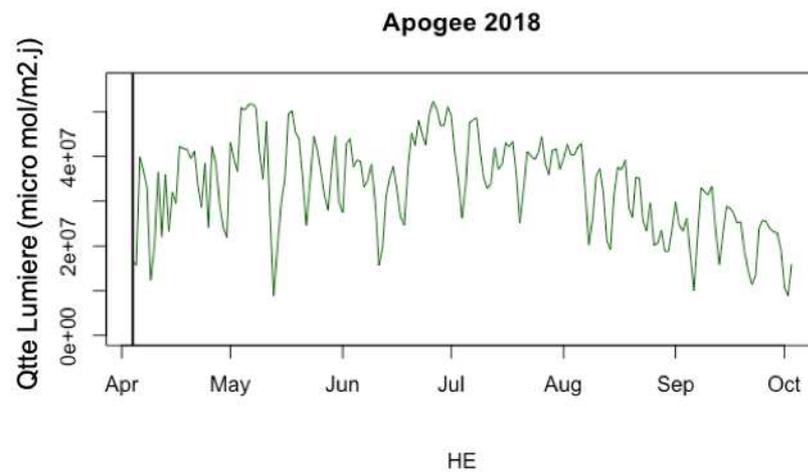
Table 17. Comparaison des modalités deux à deux sur la somme de REW en fin de saison de végétation 2018. Les étoiles indiquent les valeurs p : \*\*\* :  $p < 0,001$  ; \*\* :  $p < 0,01$  ; \* :  $p < 0,05$ .

#### III.1.3.3. Lumière incidente

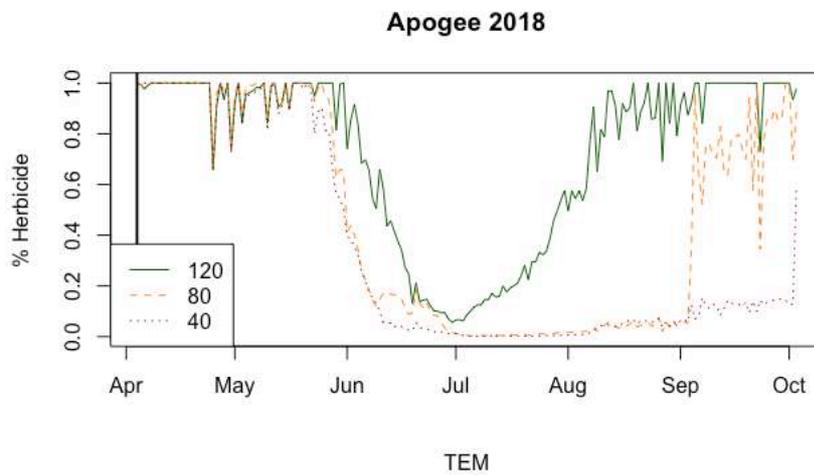
Les résultats des relevés de lumière incidente sur la saison de végétation 2018 mettent clairement l'accent sur l'impact de la compétition exercée par la fougère aigle. Sur la Figure 36, nous pouvons voir que la fougère impacte les *maxima* des quantités de lumières perçues, comme c'est le cas pour les modalités **témoins** (volet b). Plus spécifiquement les modalités témoins (volet b) rendent compte d'une dépréciation importante entre Juin et Août quelle que soit la hauteur de capteur considérée. De plus, cela met en avant l'importance de la hauteur puisque les trois hauteurs « rattrapent » le profil de lumière a des dates très différentes. En effet, à la hauteur de 120cm le profil sera similaire au profil herbicide aux alentours d'Août alors qu'il faudra attendre Septembre et Octobre pour les hauteurs de 80cm et 40cm respectivement.

Cet effet sera constaté de façon plus ou moins prononcée sur chaque modalité avec compétition. Par ailleurs, que l'on considère les modalités L50 (volets c et d) ou L1 (volets e et f) on peut voir une légère dépréciation, qui débute entre Juin et Juillet au moment où la fougère est à son paroxysme (Cf. Figure 32).

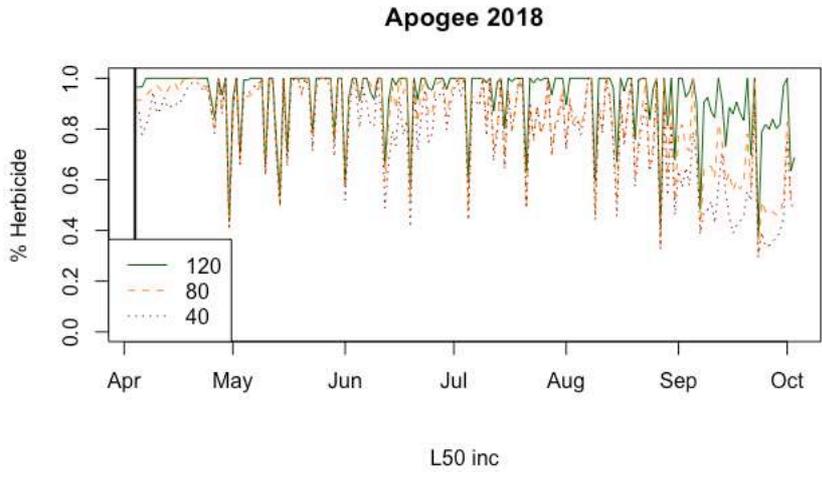
(a)



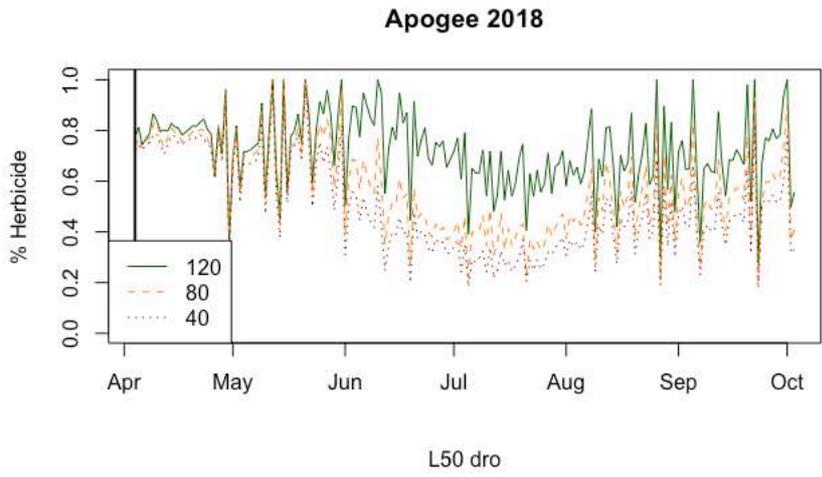
(b)



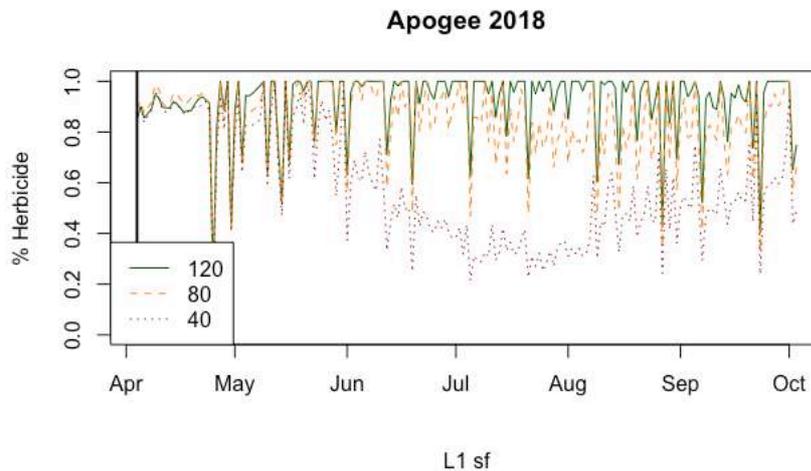
(c)



(d)



(e)



(f)

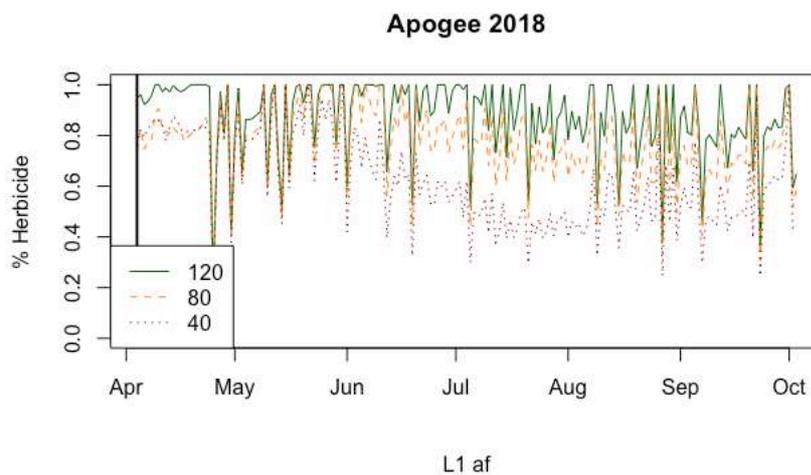


Figure 36. Relevés de mesures de la lumière incidente moyenne ( $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$ ) pour la modalité herbicide (volet a). Proportion de lumière par rapport à la référence herbicide (volets b à f) Les trois hauteurs considérées sont 120cm en vert, 80 cm en jaune et 40 cm en rouge. Les modalités présentées sont (b) témoin ; (c)  $L_{50}$  incliné ; (d)  $L_{50}$  droit ; (e)  $L_1$  sans filet et (f)  $L_1$  avec filets. La ligne noire représente la date de plantation des plants de pin sylvestre.

La Table 18 nous montre qu'en fin de saison de végétation, l'impact de la compétition est très marqué. En effet, alors que les modalités **herbicides** ont une quantité de lumière de  $6,07\text{E}+09 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ , les modalités avec compétition ont quant à elles  $4,38 \text{E}+09$ ,  $4,58 \text{E}+09$ ,  $3,20 \text{E}+09$ , et  $2,48 \text{E}+09 \mu\text{mol.m}^{-2}$  pour les modalités  $L_1$  *af*,  $L_1$  *sf*,  $L_{50}$  *dro* et **témoins** respectivement. Nous pouvons aussi voir le profil élevé des modalités  $L_{50}$  *inc* puisque ces dernières donnent la seconde meilleure quantité de lumière en fin de saison de végétation avec  $5,21 \text{E}+09 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  (Cf. Table 19 et Table 20).

Quantité de lumière ( $\mu\text{mol.m}^{-2}$ ) 2018

Date	15-mai	19-juin	10-juil.	8-août	4-sept.	3-oct.	
Jours de Végétation	135	170	191	220	247	276	
Modalités	HE	1,41E+09	2,65E+09	3,57E+09	4,68E+09	5,43E+09	6,07E+09
	L <sub>1</sub> <i>af</i>	1,13E+09	2,18E+09	2,83E+09	3,50E+09	3,97E+09	4,38E+09
	L <sub>1</sub> <i>sf</i>	1,21E+09	2,27E+09	2,92E+09	3,60E+09	4,11E+09	4,58E+09
	L <sub>50</sub> <i>dro</i>	1,02E+09	1,77E+09	2,11E+09	2,51E+09	2,87E+09	3,20E+09
	L <sub>50</sub> <i>inc</i>	1,31E+09	2,47E+09	3,32E+09	4,27E+09	4,86E+09	5,21E+09
	TEM	1,41E+09	2,08E+09	2,11E+09	2,12E+09	2,16E+09	2,48E+09

Table 18. Quantité de lumière ( $\mu\text{mol.m}^{-2}$ ) depuis la plantation en fonction de la modalité sur le site de Fontaine d'Olive sur la saison de végétation 2018.

La Figure 37, qui représente la quantité de lumière moyenne perçue pour chaque modalité en fin de saison de végétation 2018, nous montre que le gradient théorique de compétition de lumière n'est pas respecté (Cf. Table 4). En effet les modalités **L<sub>50</sub> inc**, qui devraient se situer entre les modalités **L<sub>1</sub>** et les modalités **L<sub>50</sub> dro**, se situent en réalité entre les modalités **L<sub>1</sub>** et les modalités **herbicides**. Cette information sera à prendre en compte dans le traitement ultérieur des données.

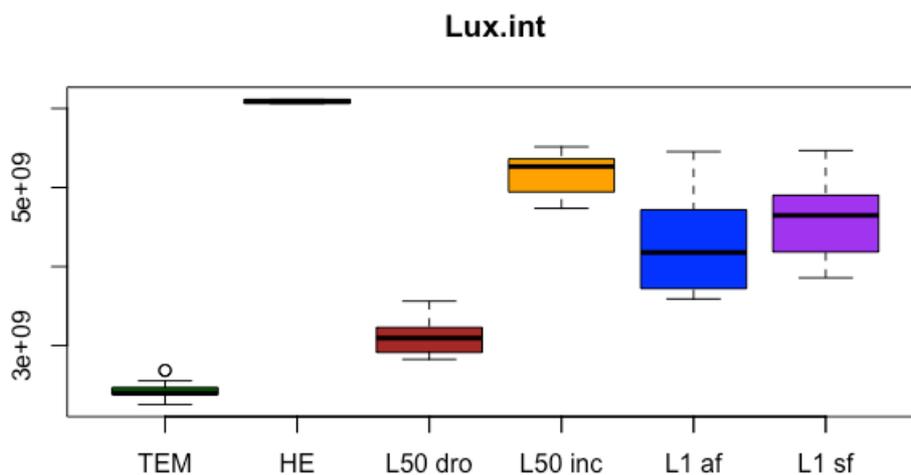


Figure 37. Quantité de lumière ( $\mu\text{mol.m}^{-2}$ ) calculée en fin de saison de végétation 2018 pour chaque modalité sur le site de Fontaine d'Olive.

Quantité de lumière ( $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) 2018

Modalités	Estimations	Erreur std	t value	p.value
HE	6,07E+09	3,61E+07	168,21	<2E-16 ***
L <sub>1</sub> <i>af</i>	4,38E+09	5,89E+07	74,39	<2E-16 ***
L <sub>1</sub> <i>sf</i>	4,58E+09	5,99E+07	76,46	<2E-16 ***
L <sub>50</sub> <i>dro</i>	3,20E+09	5,61E+07	57,02	<2E-16 ***
L <sub>50</sub> <i>inc</i>	5,21E+09	6,21E+07	83,95	<2E-16 ***
TEM	2,48E+09	4,81E+07	51,67	<2E-16 ***

Table 19. Estimation de la quantité de lumière ( $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) en fin de saison de végétation 2018. Les étoiles indiquent les valeurs p : \*\*\* :  $p < 0,001$  ; \*\* :  $p < 0,01$  ; \* :  $p < 0,05$ .

Quantité de lumière ( $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) 2018

Modalités	t	df	p.value	
HE - L <sub>1</sub> <i>af</i>	13,60	29,12	3,83E-14	***
HE - L <sub>1</sub> <i>sf</i>	19,53	28,30	<2E-16	***
HE - L <sub>50</sub> <i>dro</i>	53,50	32,69	<2E-16	***
HE - L <sub>50</sub> <i>inc</i>	16,80	26,62	1,08E-15	***
HE - TEM	117,88	47,03	<2E-16	***
L <sub>1</sub> <i>af</i> - L <sub>1</sub> <i>sf</i>	-1,37	47,90	1,78E-01	
L <sub>1</sub> <i>af</i> - L <sub>50</sub> <i>dro</i>	8,75	39,50	8,63E-11	***
L <sub>1</sub> <i>af</i> - L <sub>50</sub> <i>inc</i>	-6,21	38,30	2,85E-07	***
L <sub>1</sub> <i>af</i> - TEM	14,89	32,41	4,73E-16	***
L <sub>1</sub> <i>sf</i> - L <sub>50</sub> <i>dro</i>	14,86	51,44	<2E-16	***
L <sub>1</sub> <i>sf</i> - L <sub>50</sub> <i>inc</i>	-6,92	48,15	9,47E-09	***
L <sub>1</sub> <i>sf</i> - TEM	25,68	36,78	<2E-16	***
L <sub>50</sub> <i>dro</i> - L <sub>50</sub> <i>inc</i>	-27,37	57,84	<2E-16	***
L <sub>50</sub> <i>dro</i> - TEM	11,74	51,60	3,43E-16	***
L <sub>50</sub> <i>inc</i> - TEM	46,43	44,14	<2E-16	***

Table 20. Comparaison des modalités deux à deux sur la quantité de lumière en fin de saison de végétation 2018. Les étoiles indiquent les valeurs  $p$  : \*\*\* :  $p < 0,001$  ; \*\* :  $p < 0,01$  ; \* :  $p < 0,05$ .

## III.2. Modèle de croissance

Du point de vue performances statistiques, notre modèle avec les deux réducteurs d'humidité et de température n'est pas celui qui explique le mieux la variabilité observée (Cf. Table 21). En effet, le modèle sans réducteur est celui qui a montré les meilleures performances générales.

	AIC	BIC
Modèle lumière	6547,66	6635,129
Modèle lumière + réducteur d'humidité	6692,854	6780,323
Modèle lumière + réducteur d'humidité + réducteur de température	6699,945	6787,414

Table 21. Performances statistiques des différents modèles initiaux en fonction de l'intégration des réducteurs d'humidité et de température.

L'ajustement des paramètres de notre modèle de croissance a montré une bonne convergence sur l'ensemble des ajustements pour les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  (Cf. Table 22).

Modalités	Modèle de croissance	
	AIC 6547,66	BIC 6635,129
	$\alpha$	$\beta$
HE	0,066403 ***	3,522449 ***
L <sub>1</sub> af	0,996868 ***	1,449454 ***
L <sub>1</sub> sf	0,316811 ***	2,437125 ***
L <sub>50</sub> dro	0,813792 ***	1,698111 ***
L <sub>50</sub> inc	0,385182 ***	1,789299 ***
TEM	0,523901 ***	2,178987 ***

Table 22. Estimations des paramètres du modèle de croissance de la croissance en volume par rapport à la Quantité de Lumière sur la saison de végétation (Cf. Équation 8). Les étoiles indiquent les valeurs p : \*\*\* :  $p < 0,001$  ; \*\* :  $p < 0,01$  ; \* :  $p < 0,05$ .

Dans l'ensemble, les prédictions réalisées par Monte-Carlo en fin de saison de végétation de notre modèle de croissance sont cohérentes avec les données observées dans notre jeu de données 2018 (Cf. Table 23 et Figure 38). En effet, que l'on considère une prédiction générale pour l'ensemble des arbres du site ou que l'on regarde plus spécifiquement modalité par modalité, nous observons que les prédictions sont très proches des moyennes observées et

que les écarts de confiance donnés par le modèle sont dans la gamme de la variabilité observée sur nos données.

Modalités	Modèle de croissance			Jeu de données 2018		
	Inf	Pred	Sup	Inf	Moy	Sup
HE	32,16	42,36	54,70	25,38	44,29	71,86
L <sub>1</sub> af	7,85	10,30	13,51	7,95	12,72	17,62
L <sub>1</sub> sf	10,00	14,71	21,23	8,15	19,74	35,71
L <sub>50</sub> dro	5,85	7,80	10,93	4,23	9,69	15,65
L <sub>50</sub> inc	5,38	9,46	13,21	5,23	12,78	22,15
TEM	4,64	6,76	10,15	4,95	7,94	10,77
Prédiction générale	5,40	20,87	51,11	5,18	23,26	63,15

Table 23. Comparaison des prédictions du modèle de croissance de volume (cm<sup>3</sup>) pour les différentes modalités et pour le volume général en fin de saison de végétation par rapport au jeu de données (moyennes et intervalles de confiance de 0,95).

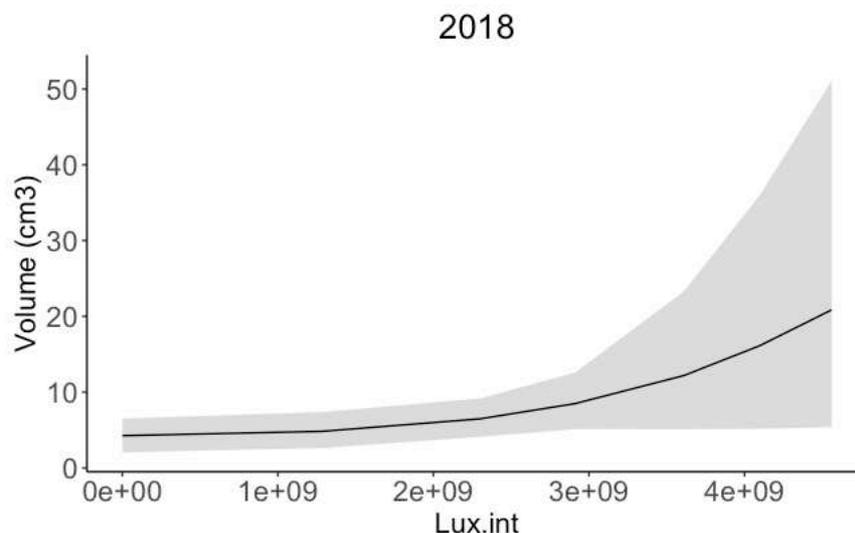


Figure 38. Prédiction du modèle de croissance du volume général en fonction de la quantité de Lumière (Lux.int en  $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) sur le site expérimental de Fontaine d'Olive. Les valeurs prédites et intervalles de confiance à 95% obtenus par Monte-Carlo.

Nous pouvons observer sur la Figure 39 le gradient de lumière résultant des différentes modalités. Nous pouvons remarquer que la seule Quantité de Lumière ne permet pas de garantir un meilleur volume en fin de saison de végétation. Comme nous pouvons le voir sur le

graphique, la modalité L<sub>50 inc</sub>, qui bénéficie de la seconde meilleure Quantité de Lumière sur la saison de végétation 2018, ne donne pas le meilleur volume après la modalité herbicide.

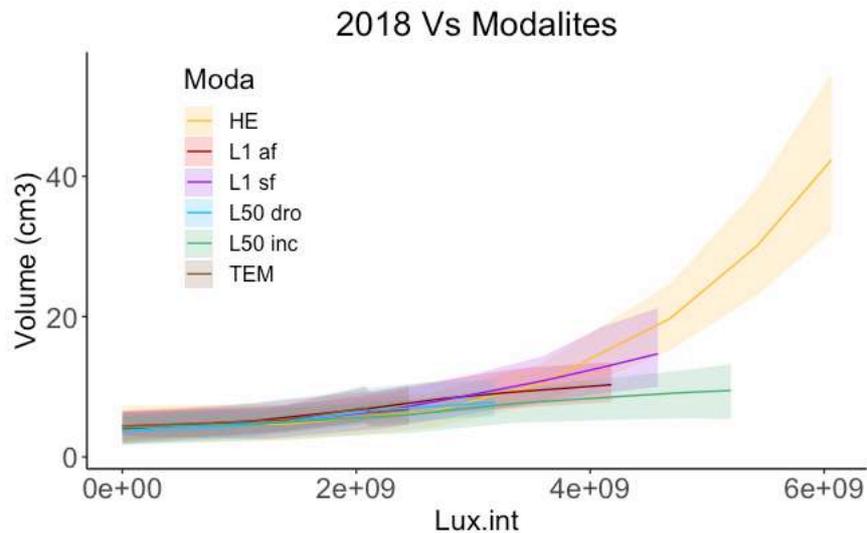


Figure 39. Prédiction du modèle de croissance du volume général en fonction de la quantité de Lumière ( $Lux.int$  en  $\mu mol.m^{-2}$ ) par modalité sur le site expérimental de Fontaine d'Olive. Les valeurs prédites et intervalles de confiance à 95% obtenus par Monte-Carlo.

La Figure 40 nous montre un dégagelement de la modalité herbicide, qui survient à partir de la moitié de la saison de végétation avec un volume final qui est le double de celui observé dans la meilleure modalité avec compétition (Cf. Table 23). Par ailleurs, la Figure 39 et la Figure 40 nous montrent que les projections liées aux parcelles témoins diminuent en milieu de saison de végétation pour augmenter de nouveau en fin de saison. Cela peut s'expliquer par le fait qu'une très forte mortalité a été constatée dès la fin de première année de croissance puisque nous avons relevé 50 % de mortalité. Par ailleurs, la fougère aigle a exercé une forte contrainte mécanique au moment où ses frondes se sont couchées en brisant la cime de certains de nos semis dans ces modalités. Le regain de croissance observé à partir de fin septembre pour les semis peut s'expliquer par le déclin entre août et septembre de la fougère.

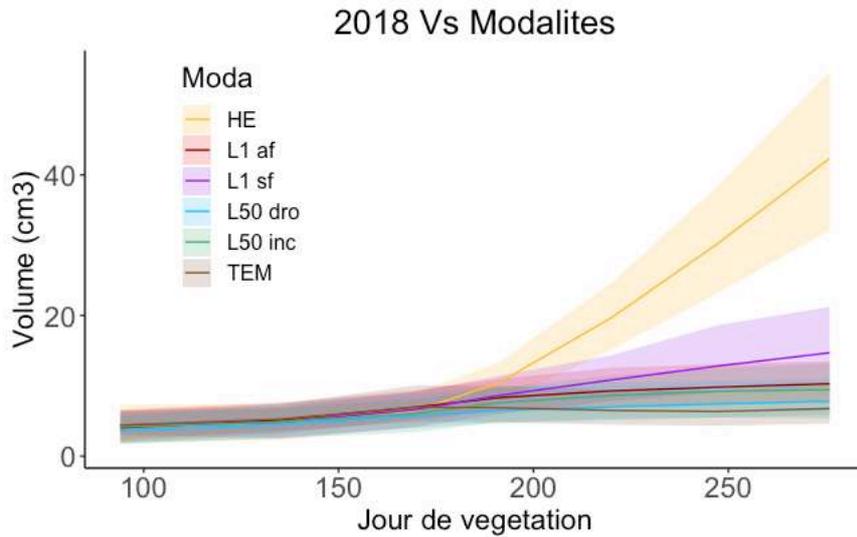


Figure 40. Prédiction du modèle de croissance du volume général en fonction du jour de végétation par modalité sur le site expérimental de Fontaine d'Olive. Les valeurs prédites et intervalles de confiance à 95% obtenus par Monte-Carlo.

### III.3. Modèle composé

#### III.3.1. Modèle de lumière

##### III.3.1.1. Cas particulier de la modalité L<sub>50 inc</sub>

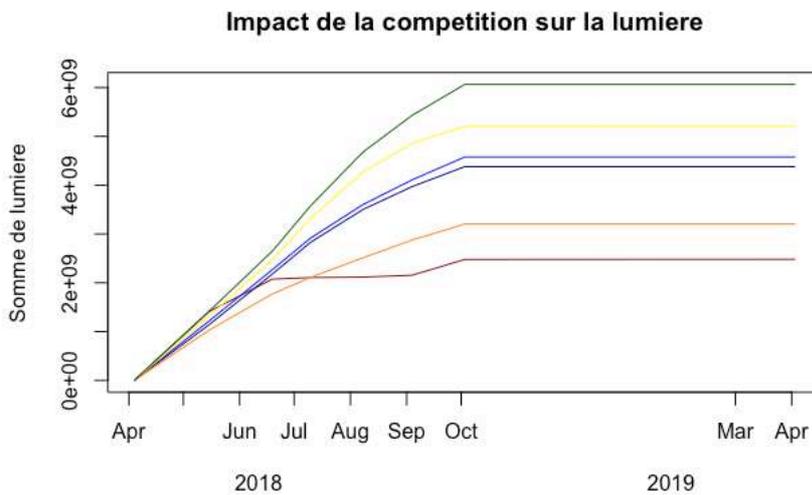


Figure 41. Quantité de Lumière (exprimée en  $\mu\text{mol.m}^{-2}$ ) en fonction du temps sur le site expérimental. La courbe verte représente notre herbicide sans compétition, la courbe jaune représente la modalité 50cm piquets inclinées, la courbe bleu clair représente notre modalité 1m sans filets, la courbe bleu sombre représente notre modalité 1m avec filets, la courbe orange représente notre modalité 50cm piquets droits et la courbe rouge représente notre modalité témoin.

L'écartement à 30° des piquets qui constituent la modalité **L<sub>50 inc</sub>**, nous donne une Quantité de Lumière sur la saison de végétation, supérieure aux estimations faites lors de l'installation du site expérimental, probablement dû à un volume aérien disponible plus important. En effet, nous pouvons constater sur la Figure 37, la Figure 39 et la Figure 41 que les quantités de lumières des modalités **L<sub>50 inc</sub>** sont en moyenne entre celles des modalités herbicides et celles des modalités **L<sub>1 af</sub>** et **L<sub>1 sf</sub>** qui ont pourtant un écartement plus grand.

Dans un premier temps, les premières régressions des paramètres de l'équation de lumière alpha et beta ont été faites sans les valeurs de cette modalité (Cf. Table 24).

Modèles sans L <sub>50 inc</sub>	Pente	Intercepte	R <sup>2</sup>
Paramètre $\alpha$	0,0039879 **	0,2594813 **	0,9662
Paramètre $\beta$	0,013103 **	0,645282 **	0,9581

Table 24. Estimations des pentes et des interceptes pour les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  en fonction de la distance à la fougère (cm) issues du modèle de lumière. Modèles sans les valeurs de la modalité L<sub>50 inc</sub> pour les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$ . Les étoiles indiquent les valeurs p : \*\*\* : p < 0,001 ; \*\* : p < 0,01 ; \* : p < 0,05.

Sur la base de ces premières modélisations, les valeurs de distance équivalentes pour la lumière calculée pour les modalités **L<sub>50 inc</sub>** sont respectivement 76,31cm pour l'équation sur le paramètre  $\alpha$  et 75,45 cm pour l'équations sur le paramètre  $\beta$ . Pour la suite du processus, nous considérerons donc la distance pour la modalité **L<sub>50 inc</sub>** de 50cm pour tous les résultats liés au REW et de 75cm pour tous les résultats liés à la quantité de Lumière.

### III.3.1.2. Résultats

Le modèle de lumière a montré de bonnes performances générales. Pour nous affranchir de la trop grande corrélation entre les paramètres et éviter les *minima* locaux lors de la convergence du modèle, nous avons choisi de fixer le paramètre k dans l'équation. Les estimations pour les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  sont significatifs (Cf. Table 25).

Modalités	$\alpha$	Lux	
		$\beta$	K
HE	0,6496413 ***	1,9244275 ***	0,989443
L <sub>1</sub> <i>af</i>	0,4727282 ***	1,3657944 ***	
L <sub>1</sub> <i>sf</i>	0,5026277 ***	1,4557389 ***	
L <sub>50</sub> <i>dro</i>	0,3506984 ***	0,9925891 ***	
L <sub>50</sub> <i>inc</i>	0,5781867 ***	1,6940169 ***	
TEM	0,2986998 ***	0,7495814 ***	

Table 25. Estimations des paramètres du modèle de lumière prédisant la Quantité de Lumière en fonction du jour de végétation (Cf. Équation 14). Les étoiles indiquent les valeurs  $p$  : \*\*\* :  $p < 0,001$  ; \*\* :  $p < 0,01$  ; \* :  $p < 0,05$ .

Nous pouvons observer, à travers les projections des estimations des paramètres alpha et beta, une forte relation avec la distance du plant à la fougère (variable exprimée en cm) (Cf. Figure 42 et Figure 43). L'ajustement de modèles linéaires pour ces deux paramètres en fonction de la distance a donné de très bonnes performances avec des  $R^2$  de 0,9711 et 0,9676 respectivement et des estimations des pentes et des interceptes significatifs (Cf. Table 26).

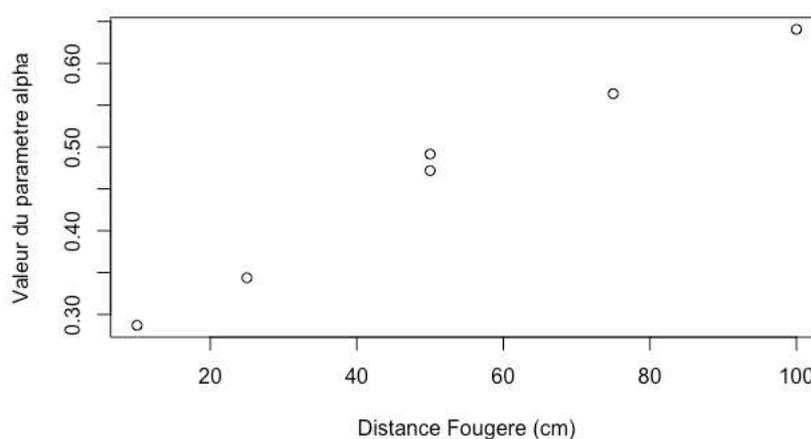


Figure 42. Valeurs du paramètre  $\alpha$  issues de la modélisation de la lumière en fonction de la distance à la fougère.

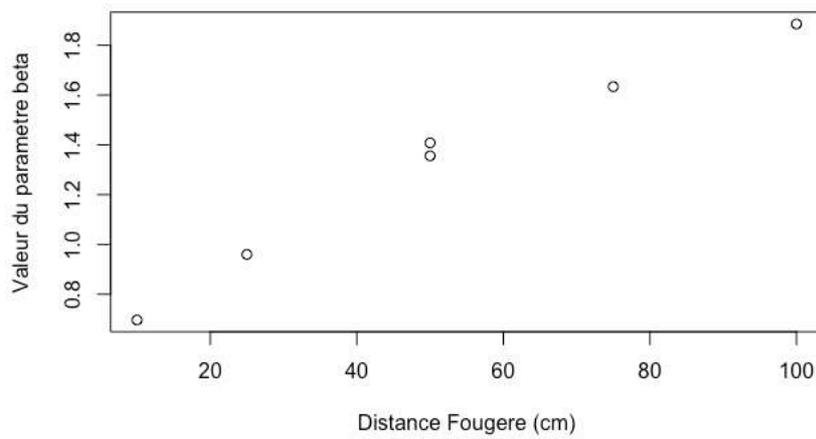


Figure 43. Valeurs du paramètre  $\beta$  issues de la modélisation de la lumière en fonction de la distance à la fougère.

	Pente	Intercepte	R <sup>2</sup>
Paramètre $\alpha$	0,0040250 ***	0,2674745 ***	0,9711
Paramètre $\beta$	0,013151 ***	0,684240 ***	0,9676

Table 26. Estimations des pentes et des interceptes pour les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  en fonction de la distance à la fougère (cm) issues du modèle de lumière. Les étoiles indiquent les valeurs  $p$  : \*\*\* :  $p < 0,001$  ; \*\* :  $p < 0,01$  ; \* :  $p < 0,05$ .

### III.3.2. Modèle d'eau

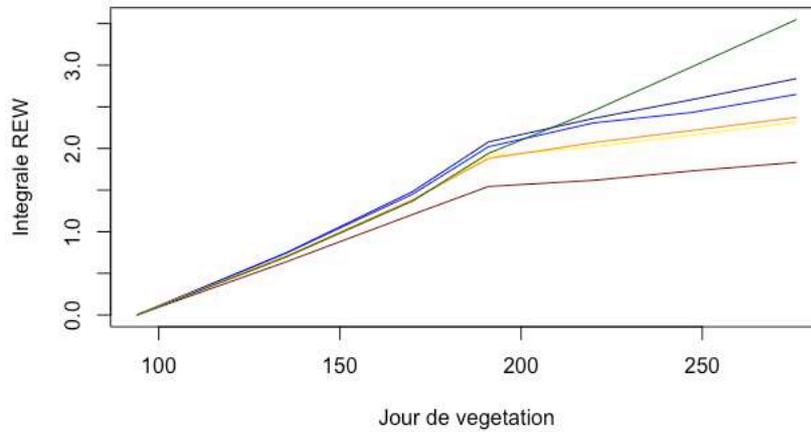


Figure 44. Somme REW en fonction du temps sur le site expérimental. La courbe verte représente notre herbicide sans concurrence, la courbe jaune représente la modalité 50cm piquets inclinés, la courbe bleu clair représente notre modalité 1m sans filets, la courbe bleu sombre représente notre modalité 1m avec filets, la courbe orange représente notre modalité 50cm piquets droits et la courbe rouge représente notre modalité témoin.

Le modèle d'eau a montré de bonnes performances générales. Pour nous affranchir de la trop grande corrélation entre les paramètres et éviter les minima locaux lors de la convergence du modèle, nous avons choisi de fixer le paramètre  $\gamma$  dans l'équation. Les estimations pour les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  sont significatifs (Cf. Table 27).

Modalités	$\alpha$	Aqua	
		$\beta$	$\gamma$
HE	0,0000143 ***	0,0254807 ***	-2,4387184
L <sub>1</sub> <i>af</i>	0,0000375 ***	0,0296599 ***	
L <sub>1</sub> <i>sf</i>	0,0000396 ***	0,0295635 ***	
L <sub>50</sub> <i>dro</i>	0,0000472 ***	0,0306965 ***	
L <sub>50</sub> <i>inc</i>	0,0000477 ***	0,0305547 ***	
TEM	0,0000551 ***	0,0307099 ***	

Table 27. Estimations des paramètres du modèle d'eau prédisant la somme de REW en fonction du jour de végétation (Cf. Équation 15). Les étoiles indiquent les valeurs  $p$  : \*\*\* :  $p < 0,001$  ; \*\* :  $p < 0,01$  ; \* :  $p < 0,05$ .

Nous pouvons observer, à travers les projections des estimations des paramètres A et B, une forte relation avec la distance du plant à la fougère (variable exprimée en cm) (Cf. Figure 45 et Figure 46). L'ajustement d'un modèle linéaire pour le paramètre  $\alpha$  et d'un modèle polynomial pour le paramètre  $\beta$  ont donné de très bonnes performances avec des  $R^2$  de 0,9902 et 0,9979 (Cf. Table 28).

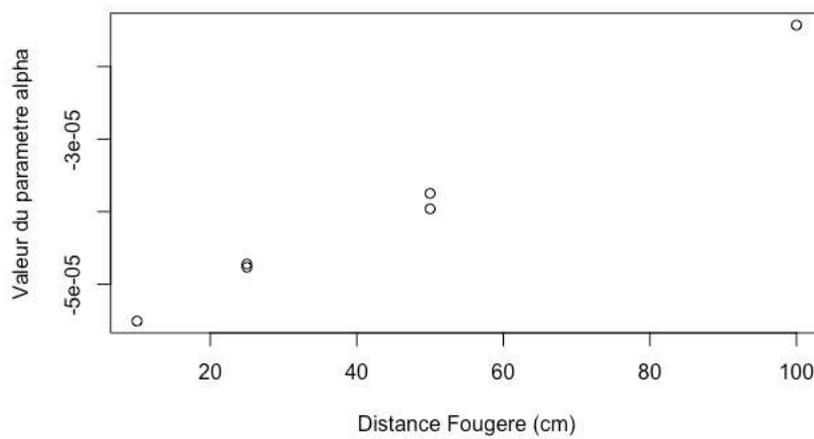


Figure 45. Valeurs du paramètre  $\alpha$  issues de la modélisation du REW en fonction de la distance à la fougère.

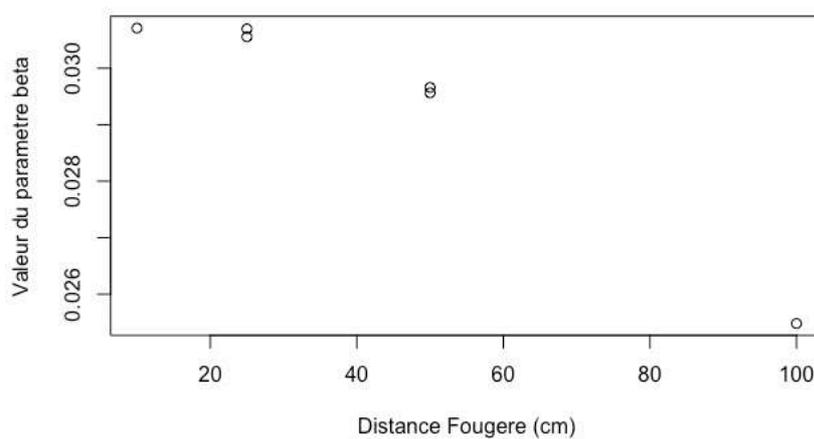


Figure 46. Valeurs du paramètre  $\beta$  issues de la modélisation du REW en fonction de la distance à la fougère.

	Pente	Intercepte	R <sup>2</sup>	
Paramètre $\alpha$	4,432e-7 ***	-5,943e-5 ***	0,9902	
	A	B	C	R <sup>2</sup>
Paramètre $\beta$	-6,144e-7 ***	8,79E-06	3,074e-2 ***	0,9979

Table 28. Au-dessus, estimations de la pente et de l'intercepte pour le paramètre  $\alpha$  en fonction de la distance à la fougère (cm) issues du modèle d'eau. En-dessous, estimation des paramètres de l'équation polynomiale de paramètre  $\beta$  issu du modèle d'eau en fonction de la distance à la fougère en cm. Les étoiles indiquent les valeurs p : \*\*\* :  $p < 0,001$  ; \*\* :  $p < 0,01$  ; \* :  $p < 0,05$ .

### III.3.3. Résultats du modèle composé

L'ajustement des paramètres de notre modèle étendu a montré une bonne convergence sur l'ensemble des ajustements pour les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  (Cf. Table 29).

Modalités	Modèle étendu	
	AIC 6478,402	BIC 6565,87
	$\alpha$	$\beta$
HE	0,002243 ***	5,673109 ***
L <sub>1</sub> <i>af</i>	0,481760 ***	2,086141 ***
L <sub>1</sub> <i>sf</i>	0,071653 ***	3,820167 ***
L <sub>50</sub> <i>dro</i>	0,384364 ***	2,382591 ***
L <sub>50</sub> <i>inc</i>	0,105486 ***	2,756773 ***
TEM	1,002177 ***	1,330766 ***

Table 29. Estimations des paramètres du modèle étendu de la croissance en volume par rapport à la Quantité de Lumière sur la saison de végétation (Cf. Équation 8). Les étoiles indiquent les valeurs p : \*\*\* :  $p < 0,001$  ; \*\* :  $p < 0,01$  ; \* :  $p < 0,05$ .

Dans l'ensemble, les prédictions réalisées par Monte-Carlo en fin de saison de végétation de notre modèle étendu sont cohérentes avec les données observées dans notre jeu de données 2018 (Cf. Table 30 et Figure 47). En effet, que l'on considère une prédiction générale pour l'ensemble des arbres du site ou que l'on regarde plus spécifiquement modalité par modalité, nous observons que les prédictions sont très proches des moyennes observées et

que les écarts de confiance donnés par le modèle sont dans la gamme de la variabilité observée sur nos données.

Modalités	Modèle étendu			Jeu de données 2018		
	Inf	Pred	Sup	Inf	Moy	Sup
HE	32,80	40,56	49,42	25,38	44,29	71,86
L <sub>1</sub> <i>af</i>	8,61	11,04	13,89	7,95	12,72	17,62
L <sub>1</sub> <i>sf</i>	12,69	15,62	20,24	8,15	19,74	35,71
L <sub>50</sub> <i>dro</i>	5,45	7,35	10,26	4,23	9,69	15,65
L <sub>50</sub> <i>inc</i>	6,81	9,27	11,65	5,23	12,78	22,15
TEM	4,49	6,38	8,86	4,95	7,94	10,77
Prédiction générale	5,25	20,29	46,93	5,18	23,26	63,15

Table 30. Comparaison des prédictions du modèle étendu de volume (cm<sup>3</sup>) pour les différentes modalités et pour le volume général en fin de saison de végétation par rapport au jeu de données (moyennes et intervalles de confiance de 0,95).

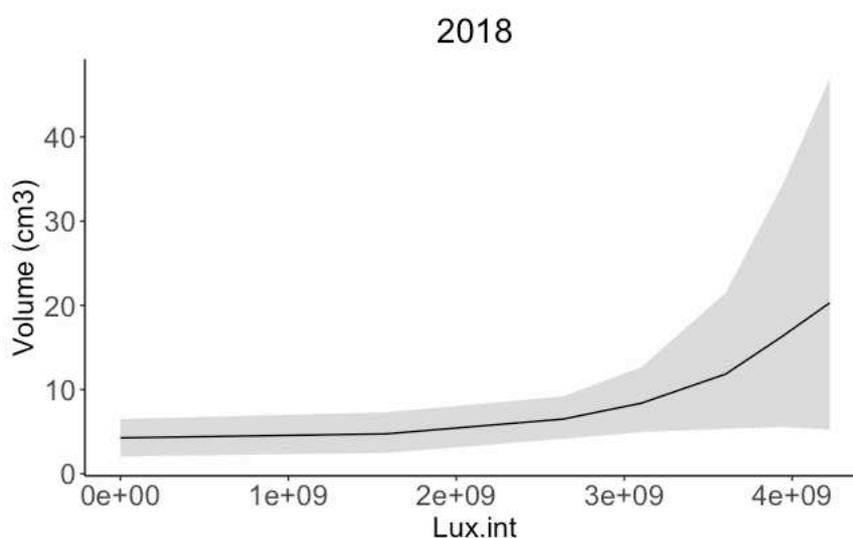


Figure 47. Prédiction du modèle étendu du volume général en fonction de la quantité de Lumière (Lux.int en  $\mu\text{mol.m}^{-2}$ ) sur le site expérimental de Fontaine d'Olive. Les valeurs prédites et intervalles de confiance à 95% obtenus par Monte-Carlo.

La Figure 48 et la Figure 49 nous montrent des prédictions de notre modèle étendu tout à fait comparables à celles du modèle de croissance. Nous pouvons constater une variabilité plus restreinte pour chaque modalité, ce qui était attendu, puisque chaque semis s'est vu attribuer un profil type en fonction de la distance de ce dernier avec la fougère. Le jeu de

données du modèle étendu n'a donc pas la variabilité pour les ressources que peut montrer le jeu de données pour le modèle de croissance.

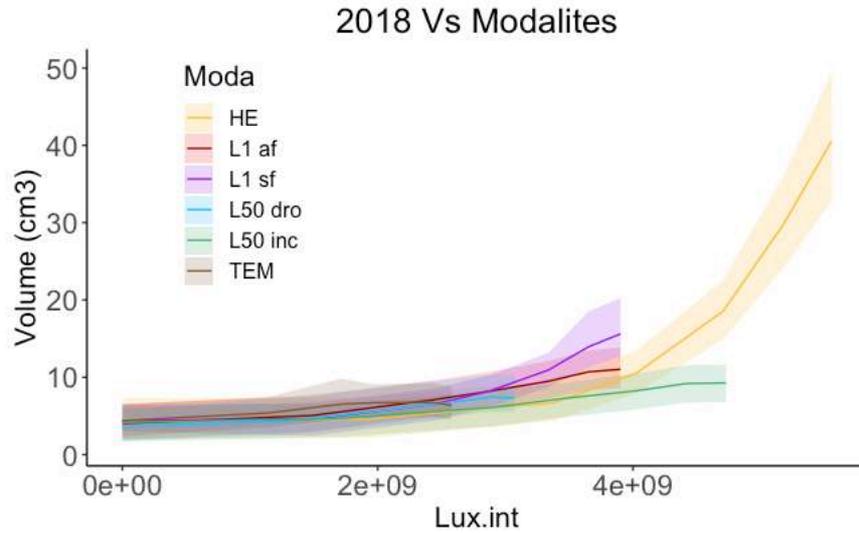


Figure 48. Prédiction du modèle étendu du volume général en fonction de la quantité de Lumière ( $Lux.int$  en  $\mu mol.m^{-2}$ ) par modalité sur le site expérimental de Fontaine d'Olive. Les valeurs prédites et intervalles de confiance à 95% obtenus par Monte-Carlo.

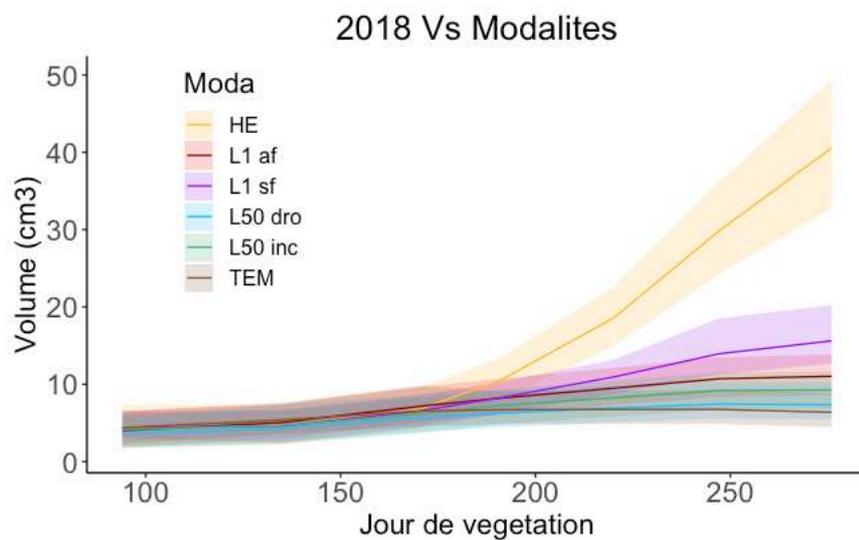


Figure 49. Prédiction du modèle étendu du volume général en fonction du jour de végétation par modalité sur le site expérimental de Fontaine d'Olive. Les valeurs prédites et intervalles de confiance à 95% obtenus par Monte-Carlo.

## III.4. Influence de la compétition

### III.4.1. Influence de la compétition sur la lumière

L'extrapolation de notre modèle de lumière nous montre une relation linéaire entre la distance du semis vis-à-vis de la fougère et la perte sur la Quantité de Lumière en fin de saison de végétation (Cf. Figure 50). La Table 31 nous montre par exemple que, pour une distance de 50cm du semis par rapport à la fougère, nous pouvons observer une perte d'à peu près 30% de la Quantité de Lumière totale en fin de saison de végétation.

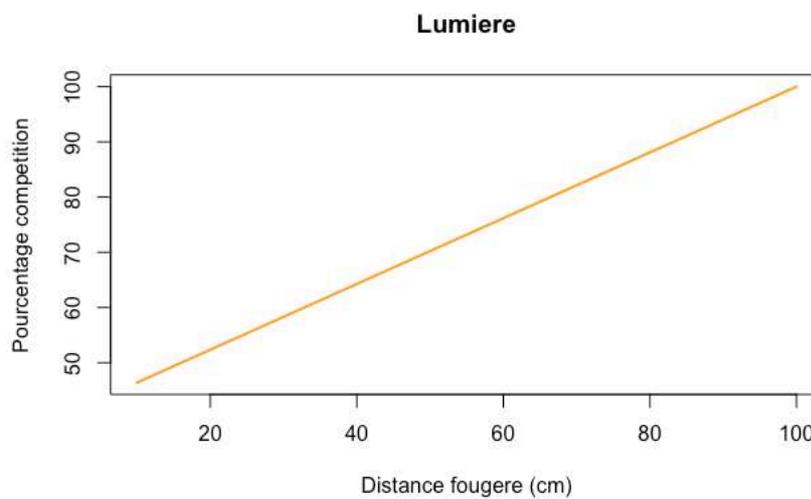


Figure 50. Pourcentage de perte de la Quantité de Lumière totale en fin de saison de végétation en fonction de la distance à la fougère aigle en cm.

Distance (cm)	% Lumière	Distance (cm)	% Lumière
10	46,40	60	76,18
15	49,38	65	79,15
20	52,35	70	82,13
25	55,33	75	85,11
30	58,31	80	88,09
35	61,29	85	91,07
40	64,27	90	94,04
45	67,24	95	97,02
50	70,22	100	100
55	73,20		

Table 31. Pourcentage de perte de la somme totale de lumière en fin de saison de végétation en fonction de la distance du plant vis à vis de la fougère.

### III.4.2. Influence de la compétition sur l'eau

L'extrapolation de notre modèle d'eau nous montre une relation asymptotique entre la distance du semis vis-à-vis de la fougère et la perte sur la somme de REW en fin de saison de végétation (Cf. Figure 51). La Table 32 nous montre par exemple que, pour une distance de 50cm du semis par rapport à la fougère, nous pouvons observer une perte d'à peu près 16% de la Quantité de Lumière totale en fin de saison de végétation.

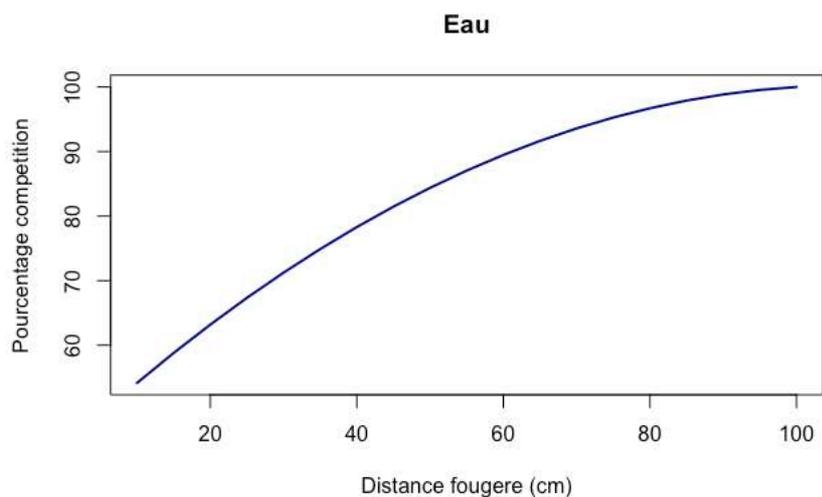


Figure 51. Pourcentage de perte de la somme REW totale en fin de saison de végétation en fonction de la distance à la fougère aigle en cm.

Distance (cm)	% REW	Distance (cm)	% REW
10	54,15	60	89,48
15	58,79	65	91,65
20	63,18	70	93,59
25	67,33	75	95,27
30	71,23	80	96,71
35	74,89	85	97,90
40	78,30	90	98,85
45	81,46	95	99,55
50	84,38	100	100
55	87,05		

Table 32. Pourcentage de perte de la somme totale de REW en fin de saison de végétation en fonction de la distance du plant vis à vis de la fougère.

### III.4.3. Influence de la compétition sur la croissance

Nous pouvons constater, avec la Figure 52, un fort impact de la compétition sur le volume final en fin de saison de végétation. La Figure 53 nous montre une forte inflexion des courbes pour les modalités avec différents niveaux de compétition au moment où la fougère

commence à se développer sur le site (Cf. Figure 32). Cette compétition se traduit par une forte réduction du volume final. En effet, considérant notre exemple d'un plant à 50cm de la fougère aigle, nous avons pu observer dans les sections précédentes une perte de l'ordre de 30% de la quantité de Lumière totale et 16% de la somme de REW totale qui se traduisent par une perte de volume final en fin de saison de végétation de l'ordre de 60% du volume final (Cf. Table 33).

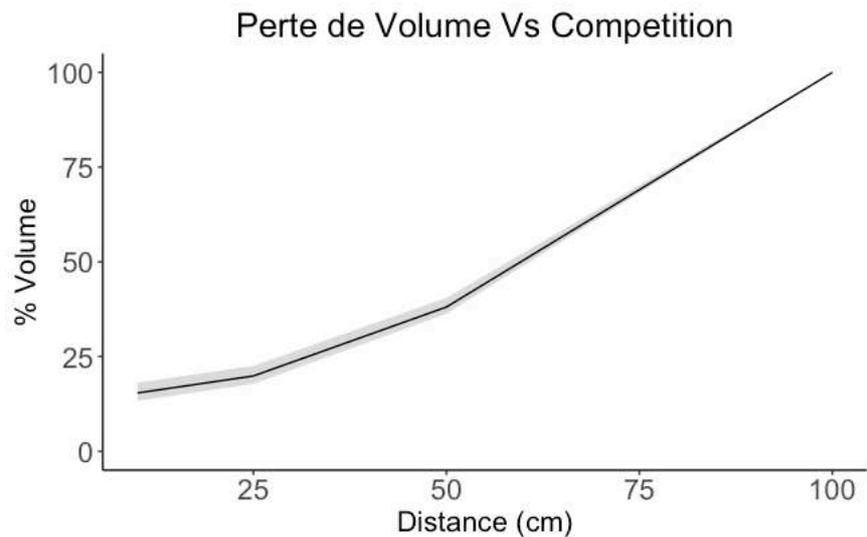


Figure 52. Pourcentage de perte de volume en fin de saison de végétation en fonction de la distance à la fougère aigle en cm.

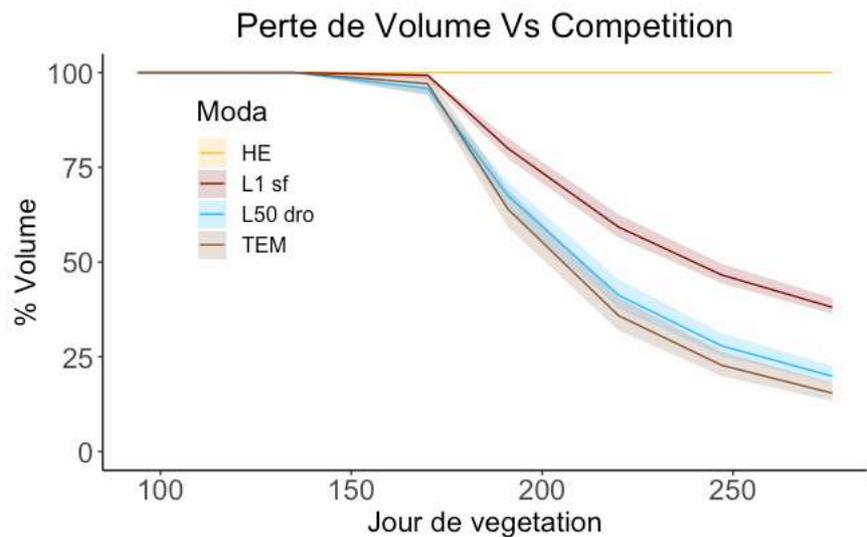


Figure 53. Perte de volume au cours de la saison de végétation pour quatre modalités. HE = herbicide, distance à la fougère 100cm ; L1 sf = L1 sans filet, distance à la fougère 50cm ; L50 dro= L50 piquets droits, distance à la fougère 25cm et TEM=témoin, distance à la fougère 10cm.

Distance (cm)	% Volume
100	100,00%
50	41,52%
25	23,95%
10	21,30%

Table 33. Perte de volume en fin de saison de végétation en fonction de la distance du semis vis-à-vis de la fougère.

### III.5. Projection du modèle de croissance sur 2018 et 2019

Projeté sur les années 2018 et 2019, le modèle ayant montré la meilleure performance est le modèle de lumière pondéré par le réducteur d'humidité (Cf. Table 34).

	AIC	BIC
Modèle lumière	33 213,66	33 314,58
Modèle lumière + réducteur d'humidité	33 189,09	33 290,01
Modèle lumière + réducteur d'humidité + réducteur de température	33 384,35	33 485,27

Table 34. Performances statistiques des différents modèles initiaux en fonction de l'intégration des réducteurs d'humidité et de température.

L'ajustement des paramètres de notre modèle de croissance a montré une bonne convergence sur l'ensemble des ajustements pour les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  (Cf. Table 35).

Modalités	Modèle de croissance	
	AIC 33 189,09	BIC 33 290,01
	$\alpha$	$\beta$
HE	0,3905951 ***	2,8311812 ***
L <sub>1</sub> <i>af</i>	0,6416745 ***	2,5485714 ***
L <sub>1</sub> <i>sf</i>	1,2856762 ***	2,3003646 ***
L <sub>50</sub> <i>dro</i>	0,8336210 ***	2,6705548 ***
L <sub>50</sub> <i>inc</i>	0,3262107 ***	2,6732079 ***
TEM	0,5347093 *	2,4175701 ***

Table 35. Estimations des paramètres du modèle de croissance de la croissance en volume par rapport à la Quantité de Lumière sur la saison de végétation (Cf. Équation 8). Les étoiles indiquent les valeurs  $p$  : \*\*\* :  $p < 0,001$  ; \*\* :  $p < 0,01$  ; \* :  $p < 0,05$ .

Dans l'ensemble, les prédictions réalisées par Monte-Carlo en fin de saison de végétation de notre modèle de croissance sont cohérentes avec les données observées dans notre jeu de données 2019 (Cf. Table 36 et Figure 54). En effet, que l'on considère une prédiction générale pour l'ensemble des arbres du site ou que l'on regarde plus spécifiquement modalité par modalité, nous observons que les prédictions sont très proches des moyennes observées et que les écarts de confiance donnés par le modèle sont dans la gamme de la variabilité observée sur nos données.

Modalités	Modèle de croissance			Jeu de données 2019		
	Inf	Pred	Sup	Inf	Moy	Sup
HE	247,26	423,05	653,06	239,50	427,58	638,40
L <sub>1</sub> af	69,27	126,56	222,08	44,51	135,40	246,99
L <sub>1</sub> sf	106,71	174,73	264,01	70,57	186,72	328,10
L <sub>50</sub> dro	43,79	69,18	105,67	11,26	76,24	157,67
L <sub>50</sub> inc	56,28	111,69	184,51	28,46	120,73	243,03
TEM	8,12	17,15	24,49	7,24	18,44	35,22
Prédiction générale	14,20	206,33	577,51	10,13	212,70	604,12

Table 36. Comparaison des prédictions du modèle de croissance de volume (cm<sup>3</sup>) pour les différentes modalités et pour le volume général en fin de saison de végétation par rapport au jeu de données (moyennes et intervalles de confiance de 0,95).

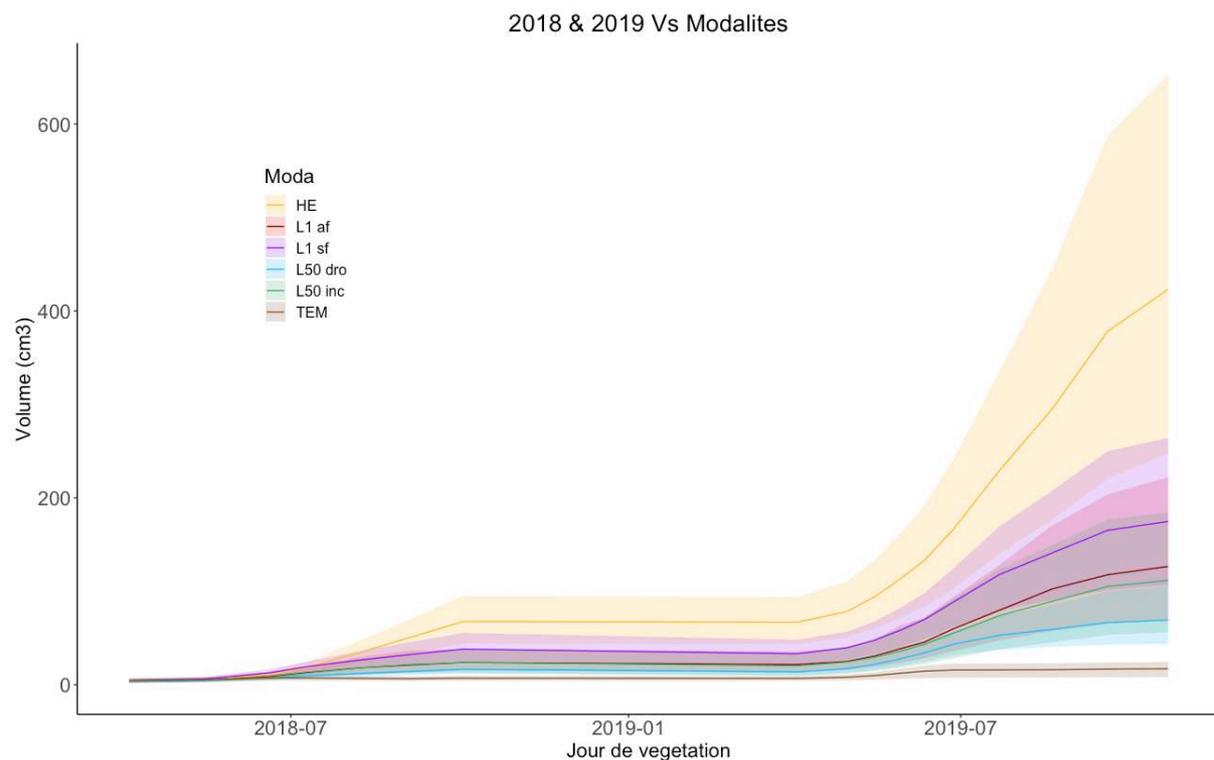


Figure 54. Prédiction du modèle de croissance du volume général sur deux saisons de végétation en fonction du jour de végétation par modalité sur le site expérimental de Fontaine d'Olive. Les valeurs prédites et intervalles de confiance à 95% obtenus par Monte-Carlo.

## IV. Discussion

### IV.1. Problématique et originalité du travail

Dans les plantations, les opérations sylvicoles effectuées dans les jeunes stades ont pour but de maximiser la production et la survie des semis en libérant le plant de contraintes telles que la compétition. En zone ouverte après une coupe à blanc, la végétation compétitrice comme la fougère aigle colonise rapidement l'espace (Tilman 1988; Ricard et Messier 1996; Gaudio et al. 2008) et consomme une part importante des ressources du milieu (Shropshire et al. 2001). La compréhension des processus de compétition pour les ressources d'eau et de lumière nécessite de décorréliser les deux compétitions afin d'en isoler les effets.

**Le travail présenté dans cette partie s'inscrit dans une démarche globale d'étude de la période juvénile. Cette période, encore mal connue des modélisateurs, doit prendre en compte un grand nombre de paramètres tels que la compétition ou la préparation du site pour prédire avec fiabilité la croissance et la production. Les changements apportés grâce au contrôle de la végétation concurrente nécessitent des modèles qui y sont sensibles et, dans une certaine mesure, représentent les processus impliqués dans les réponses des cultures à ces changements (Mason et al. 2007).** D'ordinaire, les modèles physiologiques, qui pourraient être utilisés pour représenter ces processus, sont complexes (Mcmurtrie et Wolf 1983) et exigent généralement que les utilisateurs spécifient de nombreux coefficients et fournissent des mesures locales de variables qui peuvent être difficiles ou coûteuses à obtenir (Mason et al. 2007). De plus, leurs structures récursives ont tendance à magnifier les erreurs. Cette surcomplexité des modèles physiologiques d'une part et l'insuffisance des modèles phénoménologique traditionnels pour représenter les effets de la gestion des sites d'autre part (Mason et al. 1997; Mason 2004) ont conduit au développement de modèles « hybrides ».

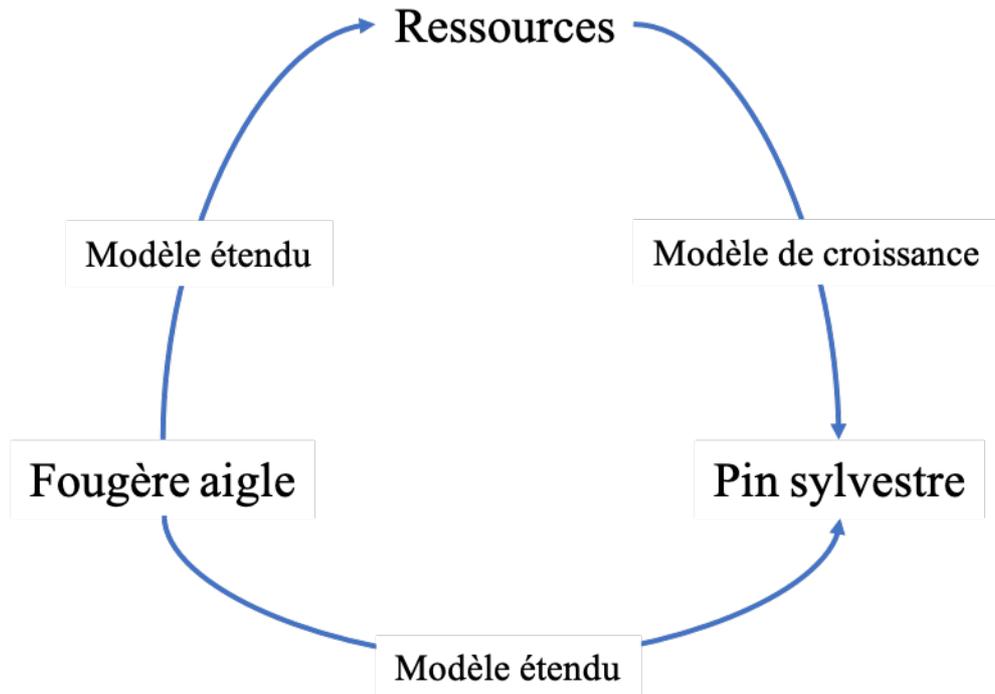


Figure 55. Schéma des différentes interactions pour le modèle de croissance et le modèle étendu.

La problématique des interactions positives ou négatives entre la végétation compétitrice et les jeunes arbres n'est pas nouvelle (Ouden 1997; Norberg et al. 2001; Hancock et al. 2005; Brooker et al. 2006; Picon-Cochard et al. 2006). Toutefois, ce travail présente la double originalité de proposer un modèle hybride de croissance simple qui ne nécessite qu'un faible nombre de paramètres. De plus, il présente également l'avantage de donner, à travers un second modèle étendu et vis-à-vis d'une mesure facile à récolter pour le gestionnaire une quantification précise de l'impact de la compétition de la fougère sur la croissance du pin sylvestre (Figure 55). En effet, le but ici n'est pas d'affecter un indice de compétition lié à la présence plus ou moins prononcée de la végétation compétitrice comme cela est souvent fait dans ce genre de modèles (Richardson et al. 1999; Watt et al. 2003b, 2004, 2007; Kimberley et Richardson 2004; Mason et al. 2007) mais bien d'estimer la part de ressources consommée par la fougère. Par ailleurs, la variable de distance du plant vis-à-vis de la compétition est souvent au cœur des préparations du sol, mécaniques en particulier, qui vont offrir une certaine largeur de couloir pour la ligne de plantation après le passage d'outils spécifiques.

## IV.2. Discussion autour du choc de transplantation

Le choc de transplantation est utilisé pour décrire les effets négatifs sur la croissance et la survie lorsque le matériel élevé en pépinière est planté dans un nouvel environnement (Close et al. 2005) et peut être un obstacle grave pour les efforts de restauration. Un semis en état de choc se caractérise entre autres par un retard de croissance, un brunissement ou une perte d'aiguilles, un arrêt de croissance, voire la mort (Rietveld 1989; Burdett 1990; Struve et Joly 1992; Haase et Rose 1993). Cet état est admis par défaut jusqu'à ce que le semis atteigne un taux de croissance qu'il aurait atteint s'il n'avait pas été transplanté (Mullin 1963). Cette condition de détresse est due à des blessures, à un épuisement et entraîne une altération des fonctions. Par la suite, on assiste à un processus de récupération et à une période d'adaptation à un nouvel environnement (Rietveld 1989).

Les chercheurs ont généralement indiqué que la capacité du système racinaire à absorber l'eau dans un nouveau site est un facteur important (Mullin 1963; Rietveld 1989). En effet, les sites sur lesquels les semis sont transplantés peuvent englober un large éventail de conditions climatiques et édaphiques. Après le repiquage, un plant doit récupérer de tout dommage, rétablir le contact racine-sol et reprendre l'absorption d'eau et de nutriments dans un nouvel environnement (Rietveld 1989; Haase et Rose 1993). Pendant cette période d'ajustement, la plantule continue de transpirer, ce qui entraîne une situation de stress de sécheresse physiologique (Rietveld 1989). Ainsi, la principale cause de choc de transplantation est le déficit hydrique dû à une absorption limitée de l'eau lors de la plantation en raison d'une altération temporaire de la fonction racinaire des plantules ou d'un mauvais contact initial racine-sol (Burdett et al. 1984; Burdett 1990).

Ce phénomène est principalement déclenché par la perte du système racinaire résultant de la récolte à racines nues ou en boule et en jute (Struve 2009). Il a été démontré que les semis avec un plus grand volume racinaire initial ont un potentiel de croissance des racines plus élevé (Carlson 1986), ont tendance à mieux tolérer le choc de transplantation au fil du temps (Haase et Rose 1993), et peuvent avoir des taux de croissance précoce plus rapides (Rose et al. 1991a, 1991b; Jacobs et al. 2005). De plus, la morphologie du système racinaire expliquait en partie le

succès de l'établissement de certaines espèces de feuillus à feuilles caduques (Struve 1990; Jacobs et al. 2005).

Il existe deux types de régénération des racines: l'allongement des extrémités des racines existantes et l'initiation des racines adventives et leur allongement ultérieur (Stone et Schubert 1959). La survie initiale des semis dépend de l'allongement des racines existantes, qui est indépendant de la saison de l'année et se produit chaque fois que l'humidité et la température du sol le permettent. L'établissement dépend de l'initiation et de l'allongement des nouvelles racines, qui se limite principalement à la fin de l'hiver et au début du printemps, même lorsque l'humidité et les températures du sol sont non limitatives (Struve 2009).

La taille des semis a été impliquée comme un facteur important de choc de transplantation dans la mesure où la survie et la croissance ont tendance à augmenter avec la taille des semis (Dobbs 1976; Zaerr et Lavender 1976). Les dommages au système racinaire pendant les procédures de levage et de manipulation peuvent également être un facteur important (Mullin 1963; DeYoe 1986; Tabbush 1986). Les preuves suggèrent que le choc de transplantation peut limiter la productivité des premières plantations (Vyse 1981) et cette croissance lente, combinée à l'état de stress d'un plant choc, peut entraîner un âge de rotation des peuplements plus long et même l'échec de la plantation, en particulier en présence de végétation concurrente (Haase et Rose 1993).

Dans notre expérimentation la question du choc de transplantation est légitime. En effet, le fait que les semis aient été plantés la même année que celle qui est analysée dans cette étude peut soulever un doute sur leur interprétation. La plantation de semis de pin âgés permet d'atténuer cet effet de choc.

Malgré tout, comme nous l'avons vu plus haut, le déficit hydrique peut augmenter cet effet de choc sur les semis. Cet état de fait n'est toutefois pas contraire à notre expérimentation et fait partie intégrante de nos résultats. En effet, le choc de transplantation accentué par le déficit hydrique causé par la végétation concurrente peut se répercuter sur la croissance et la survie. Bien que nous ne soyons pas capables de préciser exactement quelle est la part du choc de transplantation dans ces deux processus, son impact est agrégé dans nos données. Par conséquent, cette situation est représentative des situations auxquelles sont confrontés les

gestionnaires en présence de végétation compétitrice puisque ces résultats traduisent la croissance des semis au bout de la première année de culture.

### IV.3. Résultats dendrométriques.

Les Figure 29 et Figure 30 nous montrent que les croissances en hauteur et en diamètre se font à des moments différents, ce qui est en accord avec la bibliographie (par exemple, Dougherty et al. 1994). Par ailleurs, la Figure 29 montre un impact de la compétition très fort sur le diamètre alors que ce dernier est plus nuancé pour la hauteur. Comme vu précédemment, la compétition pour la lumière montre souvent un effet négatif plus prononcé sur la croissance en diamètre que sur la croissance en hauteur (Jobidon 2000; Picon-Cochard et al. 2006). Nos résultats semblent donc confirmer cette observation.

### IV.4. Modèle de croissance

#### IV.4.1. Choix du modèle

Les analyses des données sur les espèces et les habitats sont une base importante pour notre compréhension de l'écologie des espèces et pour la gestion de l'environnement (Guisan et Zimmermann 2000). Les écologues s'efforcent souvent d'identifier des modèles qui capturent l'essence d'un système complexe, expliquant la distribution observée permettant une prédiction. Pour répondre à cet objectif, la collecte de données le plus souvent observationnelles (c'est-à-dire que la variance de l'ensemble de données n'a pas été générée par une manipulation expérimentale), rend difficile la détermination du ou des facteurs causaux qui expliquent le mieux les réponses observées. De telles situations limitent souvent la possibilité scientifique à décrire le système et à identifier des modèles cohérents avec le phénomène observé (Whittingham et al. 2006).

Récemment, il y a eu une tendance croissante à utiliser le Critère d'Information d'Akaike (AIC) dans la sélection de modèles (Rushton et al. 2004). L'AIC fournit un moyen d'équilibrer les objectifs contradictoires de simplicité et de qualité d'ajustement (Forster et Sober 1994; Johnson et Omland 2004) et aide à identifier le modèle le plus parcimonieux d'un ensemble (Rushton et al. 2004). Bien que la primauté scientifique d'un principe de parcimonie

soit sans fondement clair (Guthery et al. 2005), il arrive généralement que les modèles parcimonieux contiennent également moins de bruit et aient une plus grande robustesse (Ginzburg et Jensen 2004). Pour cette raison, la recherche est généralement orientée vers l'identification d'un modèle relativement parcimonieux qui est en général en accord avec les données observées.

Selon Rushton et al. (2004), la caractéristique la plus évidente de cette approche comparative est qu'elle conduit à l'identification des meilleurs modèles parmi une suite de modèles. Pourtant, selon lui, l'inférence et la prédiction ne doivent pas nécessairement être basées sur le meilleur modèle. En effet, lorsqu'il existe plusieurs bons modèles alternatifs, ceux-ci devraient être utilisés pour l'inférence et la prédiction à l'aide d'approches de moyenne des modèles.

Enfin, et surtout, le choix du meilleur modèle dépend de la structure du système à l'étude (Reineking et Schröder 2006). Cette décision repose sur plusieurs critères et non pas sur l'optimisation d'un unique critère statistique. Par exemple les approches théoriques de l'information (AIC et BIC) ne doivent pas être utilisées sans critique. La connaissance du système étudié permet de formuler des modèles écologiquement significatifs et puissants, cependant de tels modèles pourraient être exclus par une approche purement basée sur la théorie de l'information (Rushton et al. 2004). Par ailleurs, Eberhardt (2003) souligne que la sélection doit également être basée sur des statistiques comme le  $R^2$ , qui fournissent une mesure plus « globale » de la façon dont le bon modèle explique les données. Il soutient également que ce développement *a priori* des modèles n'est pas toujours facile sans une exploration préliminaire des données. Ainsi, la meilleure modélisation dépend des objectifs spécifiques de l'étude.

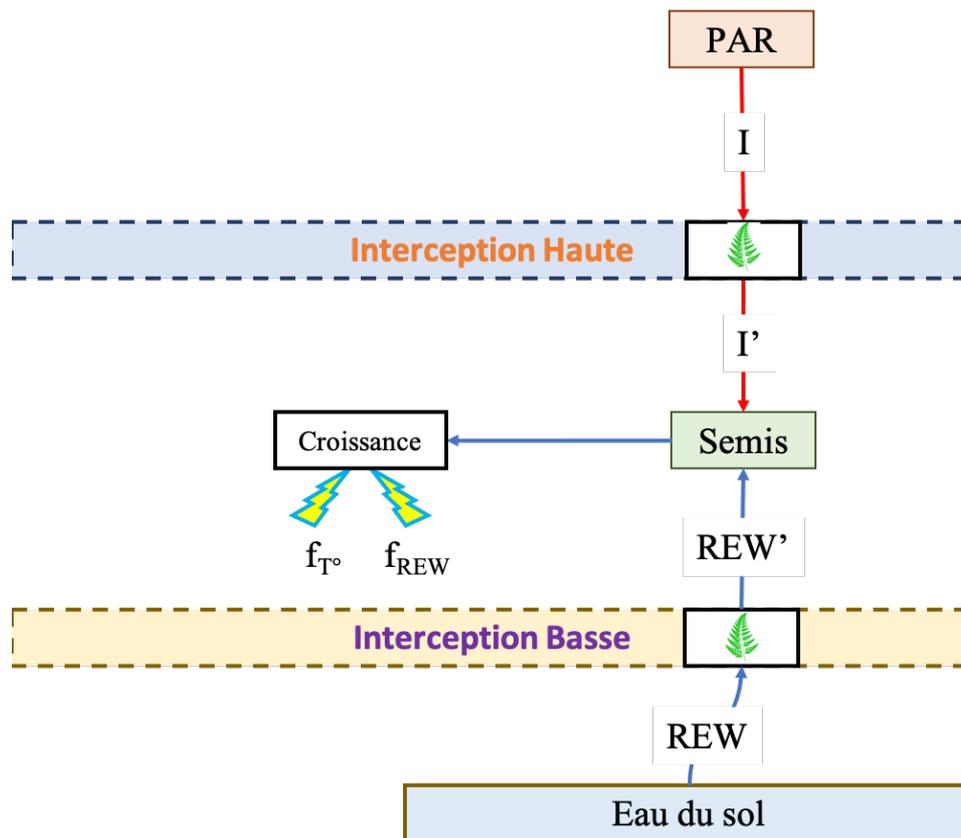


Figure 56. Schéma de la conception pour le modèle de croissance représentant l'interception de la lumière incidente ( $I$ ) et de l'eau du sol ( $REW$ ) par la fougère aigle et l'impact de cette compétition sur la croissance.

Nous sommes ici dans un cas de figure complexe. Pour l'année 2018, le meilleur modèle est très nettement celui sans réducteurs ne nous laissant que peu de place pour l'interprétation sur le choix des modèles. Projeté sur les années 2018 et 2019, le meilleur modèle est celui avec le réducteur d'humidité, également de façon très nette.

Il existe une différence fondamentale entre les deux saisons de végétation 2018 et 2019. En effet, contrairement à ce qui peut être observé en 2018, où les modalités sans compétition (Herbicides) n'étaient pas en déficit hydrique, on remarque qu'en 2019, toutes les modalités sont en déficit au cours de la période. Cette différence peut être la cause du gain d'importance de notre réducteur d'humidité pour la seconde saison de végétation.

Ce constat est par ailleurs renforcé par un autre point. En effet, nous pouvons observer sur les courbes des différentes modalités, présentées en Figure 39, qu'une somme de lumière plus importante ne traduit pas généralement une production de volume plus importante. Si l'on s'attache par exemple au cas de la modalité  $L_{50} inc$ , qui contre nos estimations préalables

possède la seconde meilleure somme de lumière sur la saison de végétation 2018, nous pouvons remarquer que son volume en fin de saison est inférieur en moyenne à la modalité  $L_1 sf$ , qui possède pourtant une somme de lumière moindre. Cela étaye l'hypothèse selon laquelle la seule somme de lumière ne suffit pas à expliquer correctement la croissance au cours de l'année et que d'autres paramètres influencent la croissance. Nous sommes donc face d'une double perspective dont les directions ne sont pas nécessairement incompatibles. Dans un premier cas, la solution serait de multiplier les saisons de végétation pour mettre l'emphase sur les différents réducteurs. Dans le second cas, il faudrait réévaluer le réducteur pour le rendre plus sensible afin qu'il puisse capter une variabilité en plus de celle expliquée par la lumière.

Ce résultat constitue une piste très intéressante car il suggère que le modèle, bien que prometteur, n'est pas tout à fait optimisé. En effet, la mise en évidence de notre réducteur d'humidité avec la deuxième année laisse supposer que ce dernier ne parviendrait à capter de la variabilité qu'avec une année supplémentaire. Dans cette optique, nous pouvons émettre l'hypothèse que le réducteur lié à la température, dont les effets sur la croissance peuvent se répercuter sur de plus longues périodes, ne sera significatif qu'avec des années de végétation supplémentaires.

#### **IV.4.2. Résultats du modèle**

La Figure 39 et la Figure 40 mettent clairement en évidence que les modalités herbicides sans compétition se détachent nettement des autres modalités avec compétition. Sur notre saison de végétation 2018, la différence la plus fondamentale entre les modalités herbicides et les autres est que ces dernières sont les seules à ne quasiment pas être en déficit hydrique sur la saison de végétation 2018 (Cf. Figure 34).

Il est tout à fait concevable que l'eau soit un facteur très limitant sur notre site expérimental, qui possède peu de profondeur de sol (20-25cm). En cela, cette supposition est tout à fait cohérente avec la littérature qui précise que le pin sylvestre met en place une stratégie d'évitement de la sécheresse par une fermeture immédiate des stomates (Irvine et al. 1998). Le fort déficit en eau peut ainsi occasionner un arrêt complet de sa croissance radiale lorsque les conditions sont trop difficiles (Merlin et al. 2015). Cette variable pourrait donc être une cause

probable de ce qui peut être observé sur certaines modalités qui, bénéficiant de fortes sommes de lumière, ne produisent que peu de volume sur la saison de végétation comme c'est le cas pour la modalité *L<sub>50 inc</sub>*.

Le modèle décrit une croissance de type exponentielle à une seule phase. Or, nos données sur les modalités témoin tendent à montrer deux phases bien distinctes sur lesquelles le modèle tente de s'ajuster. Cette forme particulière n'a cependant aucun impact sur la cohérence entre le volume final prédit et celui observé dans les données. Si on considère la Figure 39 et la Figure 40, nous pouvons voir que le modèle présente des courbes qui fluctuent. Avec la Figure 29 et la Figure 30, nous pouvons voir que cette modalité en particulier se caractérise par deux points : en premier, elle dispose d'une croissance en hauteur supérieure à la modalité *L<sub>50 dro</sub>* qui possède pourtant une somme de lumière supérieure tout en ayant une croissance en diamètre inférieure à cette dernière. En second, nous pouvons voir plus précisément sur la Figure 29, la Figure 30 et la Figure 31 que les modalités herbicides rentrent dans une deuxième phase de croissance entre août et septembre.

L'effet positif de la lumière sur le pin sylvestre a été largement démontré, notamment en ce qui concerne le stade semis (Mason 2004). La littérature a déjà mis en avant la stratégie de « shade-avoidance » du Pin sylvestre (Aphalo et al. 1999; De Chantal et al. 2003; Dehlin et al. 2004; Gaudio 2010), qui priorise sa croissance en hauteur pour acquérir potentiellement plus de lumière. En cela, nos observations sur les données de hauteur pour les modalités témoin sont donc cohérentes avec ce que la bibliographie a déjà pu mettre en avant. Par ailleurs, comme le soulignent Jach et Ceulemans (1999), les croissances en hauteur et en diamètre de semis de pin sylvestre débutent mi-avril et terminent respectivement fin mai et mi- août. Cette observation n'est que partiellement vérifiée sur notre site expérimental puisque nous constatons une croissance qui s'étend jusque mi-octobre. Toutefois, sur notre site, la fougère est complètement mature en juin – juillet (Cf. Figure 32) ce qui est confirmé par d'autres observations (par exemple Taylor et al. 2001; Marrs et Watt 2006). En cela, il est cohérent d'observer une seconde phase de croissance une fois que la fougère a fortement décliné sur le site. Par ailleurs, la forte mortalité de ces modalités ainsi que les dégâts mécaniques occasionnés par la chute de la fougère ont généré une diminution du volume moyen au cours de la saison de végétation.

## IV.5. Modèle étendu

### IV.5.1. Influence de la fougère sur la lumière

La Figure 50 met en avant un fort effet de la distance du plant à la fougère. En effet, nous pouvons observer une diminution de la somme de lumière sur la saison de végétation proportionnelle à la distance du semis vis-à-vis de la fougère. La littérature a toujours reconnu le fort impact que peut avoir la fougère sur la disponibilité de cette ressource. En effet, l'aspect morphologique foliaire permet à la fougère aigle de concurrencer efficacement cette ressource (Balandier et al. 2006a). Ainsi, Gaudio (2010) pointait dans son étude que la fougère aigle interceptait une proportion significativement plus élevée de lumière incidente que d'autres espèces herbacées invasives (par exemple *Molinia caerulea* & *Caluna vulgaris*) et qu'une densité aussi faible que 10 morceaux de rhizome par m<sup>2</sup> était suffisante pour produire une couverture presque maximale. D'autre part, Gliessman et Muller (1978) ont signalé que le niveau d'interception de la lumière dans une trouée forestière, caractérisé par une couverture de *Pteridium*, est de 52%. Nos résultats semblent donc cohérents avec la littérature.

Il faut noter cependant que le modèle ne traduit qu'un état de fait pour la saison de végétation 2018. En effet, ce fort impact traduit le rapport de compétition pour la première année de végétation et nous pouvons penser qu'à travers la croissance d'une part et les différentes stratégies d'évitement de l'ombre décrite plus haut d'autre part, ce rapport sera amené à évoluer avec les années pour devenir de plus en plus favorable aux pins.

### IV.5.2. Influence de la fougère sur l'eau

Le fort impact de la fougère aigle sur la ressource en eau est bien documenté. Outre ses besoins physiologiques de base, il est décrit que les effets de cette activité invasive lui sont également attribuables du fait de la perte par transpiration (Pitman et Pitman 1986). Roberts et al. (1980) ont examiné les taux de transpiration de la fougère sous une forêt de pins dans l'Est de l'Angleterre et ont constaté que la fougère représentait 20 à 25% de la transpiration totale (Williams et al. 1987). A cela, il faut ajouter les effets d'interception car il a été relevé que les quantités d'eau interceptées par la canopée de fougère sont importantes (49% Ford et Deans

(1978)) éliminant ainsi de grandes quantités de cette ressource de la phase terrestre du cycle hydrologique. L'ensemble de ces caractères explique les effets parfois considérables de la fougère sur la ressource hydrique disponible, pouvant parfois même réduire l'apport d'eau dans les bassins versants infestés (Williams et al. 1987).

Nos résultats traduisent ces observations, puisque nous pouvons constater avec la Figure 51 que l'impact de la fougère aigle en fonction de sa distance vis-à-vis du semis est non-linéaire et s'accroît au fur et à mesure que la distance diminue. Considérant l'exemple d'une distance de 50cm qui caractérise entre autres nos modalités  $L_1 af$  et  $L_1 sf$  dont les niveaux de compétitions hydriques sont les moins sévères, nous observons grâce à la Table 32 que l'impact sur la somme de REW total est déjà de l'ordre de 16%. Cet impact sur la ressource hydrique est d'autant plus important que, dans notre cas, le sol dispose d'une faible réserve utile. Cette compétition fait clairement la discrimination entre les modalités herbicides, n'étant jamais véritablement en déficit, et les autres modalités qui tombent rapidement en déficit tôt dans la saison de végétation.

#### **IV.5.3. Réponse du pin sylvestre**

La Figure 52, la Figure 53 ainsi que la Table 33 montrent un fort impact de la compétition sur les ressources et sur la croissance des semis de pin sylvestre. Cette relation non linéaire de type asymptotique traduit un impact fort de la compétition pour de faibles distances entre plant et la fougère aigle. La période d'établissement des semis après l'abattage coïncide souvent avec la période de couverture maximale des fougères (Tolhurst et Burgman 1994), qui forment fréquemment un couvert végétal dense et uniforme excluant les autres végétaux (Dolling 1996).

Dans son expérience, Gaudio et al. (2011) a pu observer que *Pteridium* a induit une perte de diamètre des pins sylvestres de 38%. Notre expérimentation a pu mettre en évidence que des semis de pins sylvestres plantés à même la fougère voyaient leur production de volume réduire de 78% au cours de la première saison de végétation. Par ailleurs, ces résultats sont à considérer avec d'autres observations, qui ne sont pas prises en compte par le modèle. En effet, la littérature pointe souvent du doigt le niveau de mortalité élevé observé après 1 an (par

exemple Steijlen et al. 1995; Zackrisson et al. 1995). Après 4 ans, la mortalité était presque complète et cela est également conforme aux résultats de Hörnberg (1995). Nos données corroborent cette affirmation puisque dans les modalités témoin, nous avons pu constater à la fin de la première saison de végétation un taux de mortalité de près de 50%. Par ailleurs, les survivants faisaient face à d'autres contraintes bien spécifiques puisque lors du déclin de la fougère sur le site, la déformation des tiges de fougère avait un fort impact mécanique, couchant ou cassant les semis. Ainsi, en l'absence de traitement, la forte compétition par la fougère jette un sérieux doute sur le potentiel des semis de pins sylvestre à s'établir naturellement.