

Arrostock

Rapport

Projet B00564

Chefs de projet : S. Cavaignac, J. Moreau
Équipe projet : CEMAGREF : J.-C. Mailhol
FCBA : J.-M. de Boissesson, S. Cavaignac, J.-Y. Fraysse,
C. Idiart, J. Moreau, J.-P. Rousseau

10/11/2011

Siège social
10, avenue de Saint-Mandé
75012 Paris
Tél +33 (0)1 40 19 49 19
Fax +33 (0)1 43 40 85 65

Station Nord-Est
60, Route de Bonnencontre
21170 Charrey-sur-Saône
Tél +33 (0)3 80 36 36 20
Fax +33 (0)3 80 36 36 44
www.fcba.fr



SOMMAIRE

1.	INTRODUCTION	4
2.	: Suivi de l'évolution de l'humidité des bois suivant différents processus de stockage ou protocoles de mesures	5
	Mesure par évolution de masse de fagots	5
	2.1.1 Protocole	5
	2.1.2 Résultats	7
	Mesure par évolution de masse de cadres sur remorques	8
	2.1.3 Protocole	8
	2.1.4 Résultats	8
	Mesure par prélèvements sur le dessus des piles	10
	2.1.5 Protocole	10
	2.1.6 Résultats	10
	Mesure par prélèvements sur les faces des billons	11
	2.1.7 Protocole	11
	2.1.8 Résultats	12
3.	Modèle d'évolution de l'humidité	12
	Présentation du modèle	12
	Estimation des paramètres.....	15
	3.1.1 Fonction d'infiltration	15
	3.1.2 Fonction évaporation	17
	Analyse du modèle.....	18
4.	Outil de test de scénarios d'arrosage	19
	Installation.....	20
	Lancer une simulation	20
	4.1.1 Entrer les conditions météo.....	21
	4.1.2 Entrer caractéristiques du site.....	21
	4.1.3 Choisir le scénario d'arrosage.....	23
	4.1.4 Résultats.....	24
5.	Conclusion et perspectives	26
	Enseignements du projet.....	26
	5.1.1 A partir des différentes mesures réalisées	26
	5.1.2 A partir de l'utilisation du modèle	27
	Perspectives	28
6.	Références	28
7.	Annexe 1 : Comptes rendus des comités de pilotage	29

1. INTRODUCTION

En Aquitaine, après la tempête du 24 janvier 2009, la quantité de bois à exploiter et commercialiser était exceptionnellement élevée. Une des options utilisées, pour préserver la qualité des bois chablis sur plusieurs années et étaler ainsi leur usage, est le stockage d'une partie de ces bois par voie humide. Cette méthode présente plusieurs avantages : réalisée à une échelle importante, elle peut permettre d'éviter une trop forte baisse des prix du bois et de limiter les difficultés d'approvisionnement des industries dans les années à venir ; en ce qui concerne le propriétaire, elle permet de vendre les bois dans le futur à des prix plus intéressants que les cours actuels. Cette méthode a déjà été testée avec succès à la fois dans d'autres pays (Kari et Torbjorn Elowsson, 1995 ; Kari et Torbjorn Elowsson, 1997 ; Kari et Torbjorn Elowsson, 1999 et lors de la gestion de précédentes tempêtes en France (Castéra, 2004 ; Moreau et al., 2006)

De nombreux sites de stockage sous aspersion ont donc été mis en place en Aquitaine. Au terme du remplissage des aires le volume de bois stocké devrait être supérieur à 8 millions de m³. Les coûts de fonctionnement d'une aire de stockage ayant été estimés en moyenne à 2 €/tonne/an, la dépense annuelle pour l'ensemble des aires pourrait s'élever à plus de 16 millions d'euros. Il est primordial d'optimiser le fonctionnement des aires de stockage pour limiter les frais de fonctionnement et permettre de pérenniser ces stocks sur le long terme.

Ce projet Arrostock a été créé en partenariat avec des industriels aquitains. Il a pour objectif d'optimiser les quantités d'eau utilisées pour l'arrosage du bois et de réduire ainsi la consommation électrique nécessaire au pompage sachant que 25 % des coûts de fonctionnement d'une aire de stockage sont induits par l'usage de l'électricité.

Pour optimiser les quantités d'eau apportée un modèle, estimant l'humidité du bois stocké en fonction des conditions météorologiques et des conditions d'aspersion, a été établi avec l'appui du Cemagref. La construction de ce modèle est présentée dans la deuxième partie de ce rapport. Il a été ajusté à l'aide des données d'humidité des bois, collectées sur les sites de stockage des partenaires du projet (3 sites équipés de stations météorologiques, 6 sites avec un suivi précis de l'humidité de différentes zones). Les protocoles de collecte de données ainsi que les résultats sont présentés dans la première partie de ce rapport.

Un logiciel permettant d'exploiter ce modèle a été développé en interne. Il permet, en fonction d'hypothèse sur les conditions météorologiques et de consignes d'arrosage (quantité d'eau apportée, durée) d'estimer l'évolution de l'humidité de la partie supérieure et de la partie inférieure d'une pile de bois. Ce logiciel peut aussi, toujours en fonction d'hypothèse sur les conditions météorologiques, établir automatiquement le scénario d'arrosage optimisé pour garantir une humidité minimale dans les bois stockés (présentation en troisième partie du rapport).

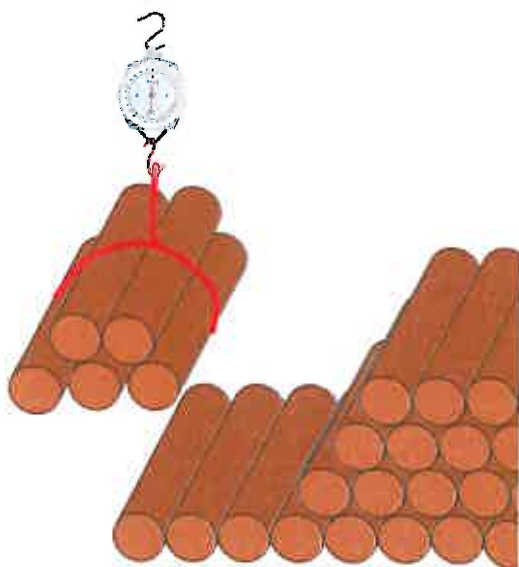
2. Suivi de l'évolution de l'humidité des bois suivant différents processus de stockage ou protocoles de mesures

La collecte de données sur la variation de l'humidité des bois stockés a été réalisée sur 5 sites, suivant différents protocoles. Cela a été réalisé d'une part pour tenir compte au mieux des contraintes techniques des industriels, mais aussi pour disposer de données variées permettant une prise en compte de la variabilité sur les sites de stockage dans l'ajustement du modèle (?). Les 4 protocoles utilisés sont les suivants :

- Mesure de l'évolution masse de fagots et prélèvements d'échantillons en dessus de pile (évolution de l'humidité des bois stockés en haut de pile)
- Mesure de l'évolution masse de remorque et prélèvements en milieu de pile (évolution de l'humidité en milieu de pile pour différents régimes d'arrosage)

Mesure par évolution de masse de fagots

2.1.1 Protocole



Dans cette expérience l'évolution de l'humidité des bois est calculée à partir de l'évolution de la masse de billons. Plusieurs billons sont regroupés et liés entre eux pour former un fagot. Ce fagot est pesé régulièrement à l'aide d'un peson. La description de l'état initial des fagots a été réalisée comme suit :

- mesure des caractéristiques dendrométriques des billons : longueur, diamètre des deux faces, diamètre du duramen aux deux faces,
- mesure de l'humidité initiale : prélèvement à la perceuse d'échantillon de bois de cœur et d'aubier puis mesure de l'humidité par séchage à l'étuve.

Ces données permettent de calculer pour chaque fagot le volume des compartiments « aubier » et « duramen », la masse de bois sec de chacun et la masse d'eau de chacun. Nous constatons une bonne corrélation entre la masse calculée (somme de la masse sèche d'aubier, de la masse sèche de duramen, de l'eau contenue dans l'aubier et de l'eau contenue dans le duramen) et la masse mesurée (voir figure ci-dessous).

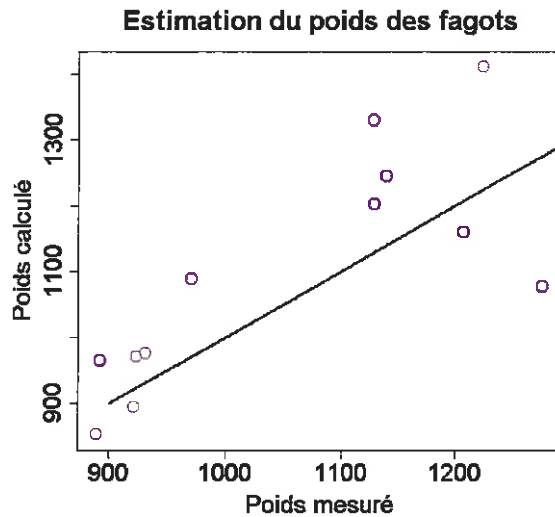


Figure 1 : Corrélation entre le poids mesuré des billons et le poids calculé (somme des masses sèches calculées des différents compartiments et de leur quantité d'eau respective)

En considérant que la variation de masse au cours du temps est principalement liée à la variation d'humidité de l'aubier, il devient alors possible de construire la relation entre l'humidité de l'aubier et la masse du billon. Ainsi chaque pesée de billon ou de fagots nous permettra d'avoir une estimation de l'humidité de l'aubier.

Concomitamment à la mesure de l'évolution de l'humidité, une évaluation des entrées d'eau est réalisée :

- pluviométrie mesurée par une station météo.
- apport de l'arrosage calculé à partir du plan du dispositif d'arrosage.

Une station météorologique installée sur site mesure également les variables destinées à estimer les pertes d'eau (température, vent, rayonnement).

2.1.2 Résultats

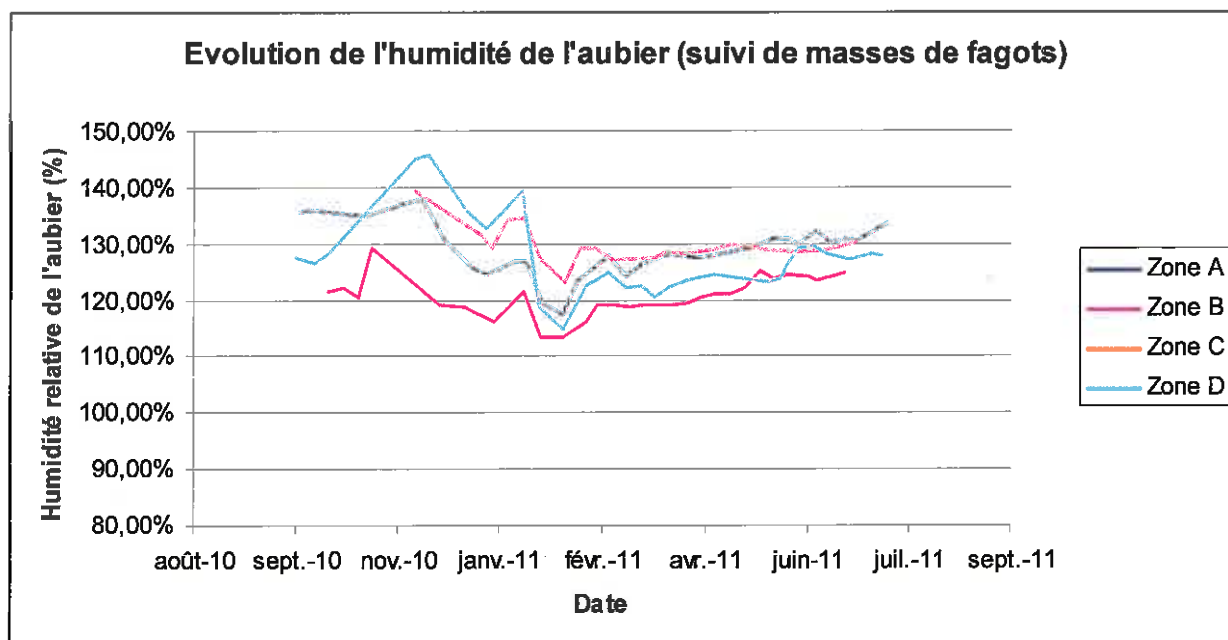


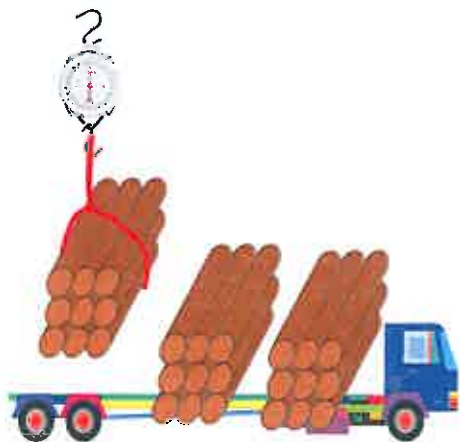
Figure 2 : Évolution de l'humidité de l'aubier évaluée par pesée de fagots.

Une première information à tirer de ces résultats est que la stratégie d'arrosage mise en place est efficace car les fagots, qui représentent la situation la plus défavorable car étant situés sur la couche supérieure des piles de bois, sont tous dans une tendance de conservation voire d'augmentation de leur niveau d'humidité avec un taux d'humidité final très satisfaisant (au dessus de 120%).

Cette expérience montre également que les fagots réagissent rapidement en cas d'arrêt de l'arrosage (arrêts réalisés en décembre et en janvier) et que la reprise en eau se fait généralement en deux temps, à savoir une première phase rapide puis une seconde phase plus progressive. Cette remarque nous amènera à considérer pour le modèle la réserve en eau des billons comme constituée de deux réservoirs : un réservoir d'eau facilement utilisable (RFU) et un réservoir d'eau difficilement utilisable (RDU).

Mesure par évolution de masse de cadres sur remorques

2.1.3 Protocole



Dans cette expérience l'évolution de l'humidité des bois est calculée à partir de l'évolution de la masse de billons regroupés dans des cadres sur des remorques. Les remorques sont placées dans deux contextes d'arrosage différents :

- une première remorque est placée entre deux piles de bois et subit le même arrosage que les piles adjacentes,
- une deuxième remorque est placée alternativement entre les piles de bois (arrosage classique) et en dehors des piles (absence d'arrosage).

Sur chaque remorque trois lots de bois sont analysés :

- un lot de bois frais;
- un lot de bois sec (bois chablis depuis plusieurs mois) ;
- un lot mixte.

La description de l'état initial des fagots a été réalisée comme suit :

- mesure des caractéristiques dendrométriques moyennes des billons : longueur, diamètre des deux faces, diamètre du duramen aux deux faces sur 12,5% des billons;
- mesure de l'humidité initiale : prélèvement à la perceuse d'échantillon de bois de cœur et d'aubier puis mesure de l'humidité par séchage à l'étuve sur les mêmes billons que ceux mesurés précédemment.

2.1.4 Résultats

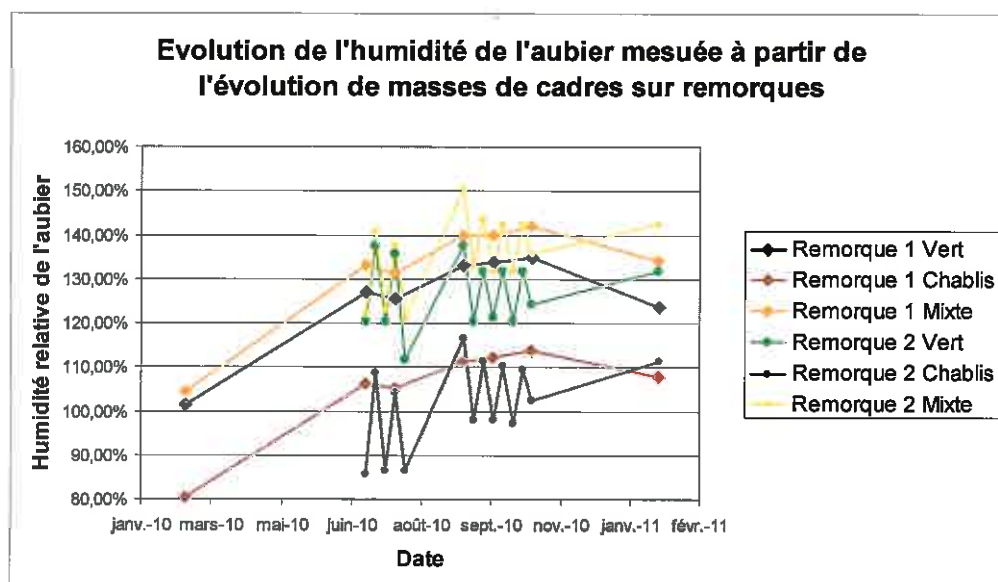


Figure 3 : Évolution de l'humidité de l'aubier évaluée par pesée de cadres sur remorque

Dans cette expérience, si nous nous intéressons à la remorque 1 - laissée continuellement sous le programme d'arrosage - nous constatons également que la stratégie de conservation mise en place permet d'assurer une prise en humidité des bois.

Cette expérience est également riche en enseignements car elle nous montre que, quelle que soit l'origine des bois (bois verts ou bois chablis), la dynamique de perte ou de gain en eau est la même (courbes parallèles).

Les oscillations observées sur la remorque 2 s'expliquent par le fait que cette remorque a été mise successivement une semaine sous arrosage et une semaine en dehors du système d'arrosage. Pour mieux comprendre ce phénomène une expérience complémentaire a été réalisée : l'humidité des cadres a été mesurée avant et après la semaine de séchage par prélèvements à la perceuse puis séchage en étuve.

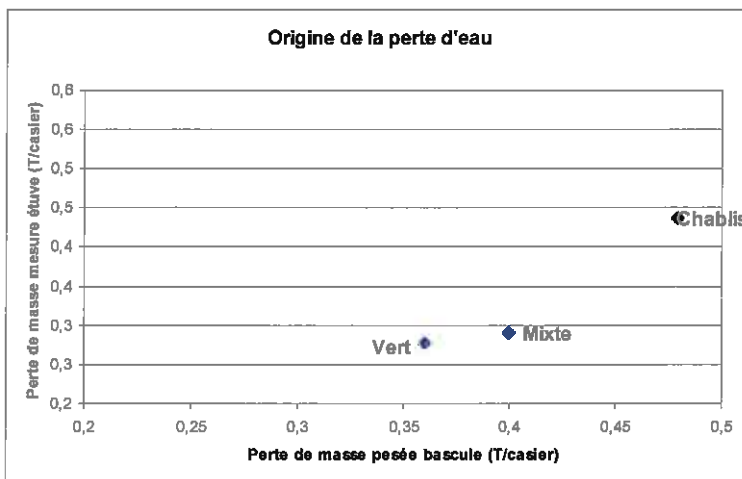


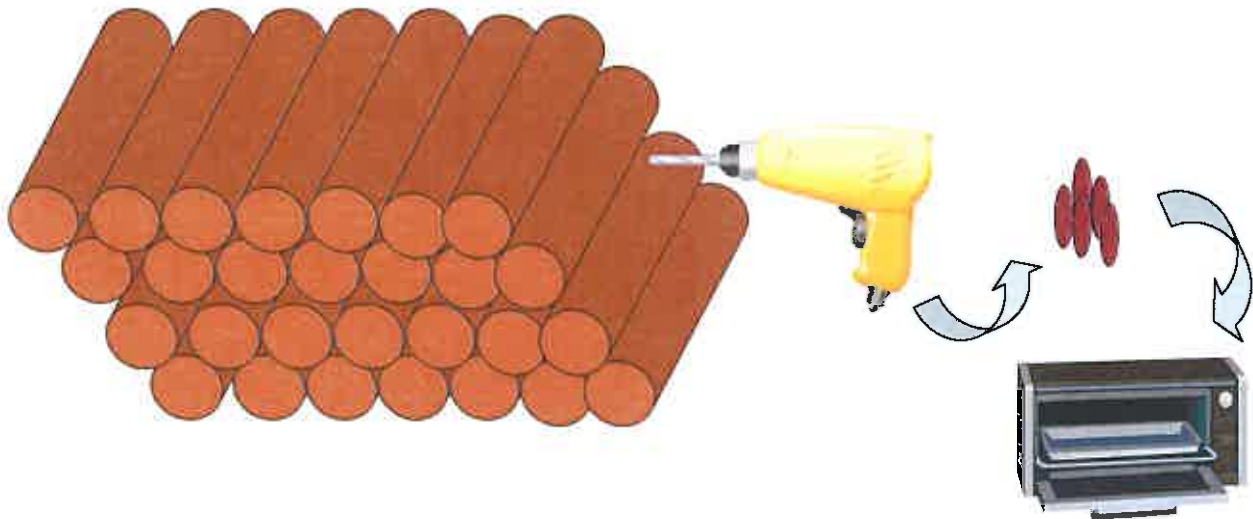
Figure 4 : Comparaison de la perte en eau du bois et de la perte de masse associée

Il ressort de cette analyse qu'en moyenne la perte d'humidité réelle des billons est inférieure à la perte d'humidité estimée par pesage des cadres. Cette différence est d'autant plus importante pour les bois verts et mixtes alors que pour les chablis il y a quasi égalité entre les deux méthodes de mesure. Nous interprétons ce résultat par un effet de l'écorce : cette dernière présente plus d'interstices que le bois nu sans écorce des billons chablis. De l'eau peut donc rester dans ces interstices au moment de la pesée et c'est une eau qui sera rapidement évaporée par la suite. Il est également possible que cette écorce joue un rôle d'éponge qui absorbe et relâche facilement de l'eau amplifiant de la sorte le phénomène de yoyo.

Il est cependant intéressant de constater que sur le temps de l'expérience le niveau moyen d'humidité est resté constant pour les cadres « Vert » et « Mixte » et légèrement décroissant pour le cadre Chablis. Cette observation nous indique qu'une semaine d'interruption de l'arrosage n'est pas top pénalisante en ce qui concerne les pertes d'humidité car l'eau ainsi perdue peut rapidement être regagnée.

Mesure par prélèvements sur le dessus des piles

2.1.5 Protocole



Dans cette expérience des prélèvements de copeaux d'aubier sont réalisés sur la face supérieure des piles de bois. Les copeaux sont collectés puis leur humidité est mesurée par passage à l'étuve.

En fonction des sites plusieurs prélèvements sont réalisés pour tester différentes modalités d'arrosage suivant plusieurs conditions d'état initial des bois.

2.1.6 Résultats

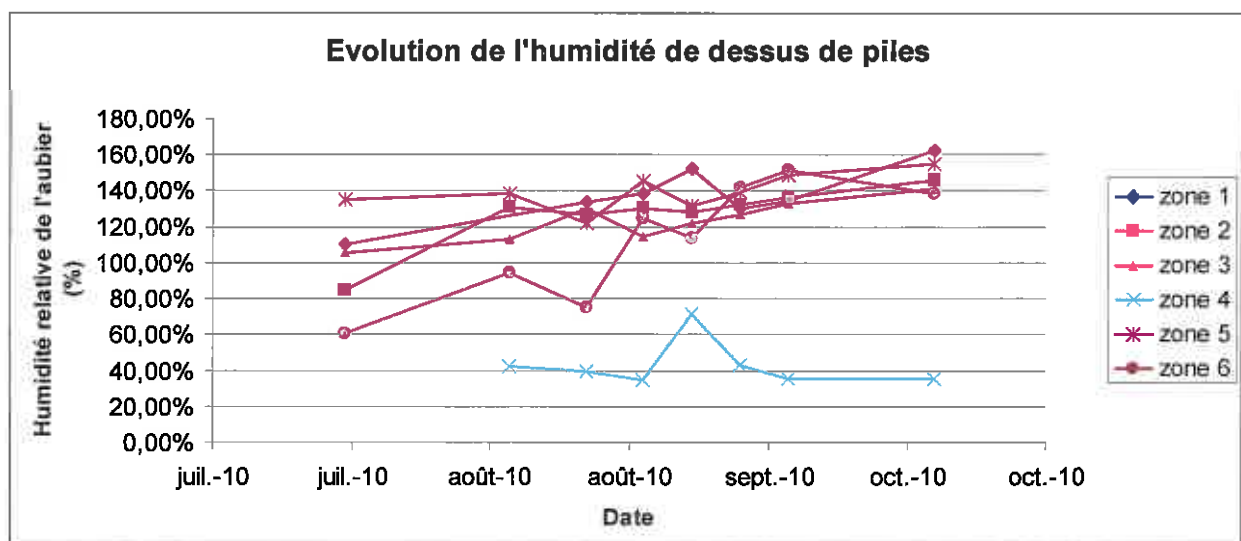


Figure 5 : Comparaison de l'évolution de l'humidité de l'aubier en fonction de l'état initial des bois et du scénario d'arrosage

Nous constatons une fois encore dans cette expérience que la stratégie d'arrosage permet d'augmenter progressivement le niveau d'humidité des billons pour le faire atteindre des niveaux satisfaisants d'humidité. Cette tendance générale est vraie quelque soit la zone étudiée en sachant qu'en fonction des zones, l'origine des bois (verts ou chablis) ainsi que les durées de programme d'arrosage pouvaient varier. La zone 4 correspond à des billons laissés à l'air libre en dehors du site d'arrosage. Leur humidité se stabilise autour de 40%. Le pic correspond à une forte pluie survenue au cours du mois d'août.

Si l'on s'intéresse à présent aux variations plus qu'à la tendance générale, on observe de fortes variations. Ces variations peuvent selon nous être expliquées par les techniques de mesures mises en place pour ces expériences : en effet lors du prélèvement dans le dessus des piles il est délicat de ne prendre que du bois d'aubier. Par ailleurs, l'effet chauffant de la perceuse et l'acheminement des échantillons depuis le site jusqu'à un congélateur puis depuis le congélateur jusqu'à l'étuve peut être également source de perte d'humidité. Signalons enfin qu'il existe une hétérogénéité de l'humidité entre différents billons et au sein même d'un billon (entre le dessus, le dessous, les extrémités et le centre). Nous verrons par la suite que cette forte variabilité du phénomène étudié amenuise la qualité prédictive des modèles.

Mesure par prélèvements sur les faces des billons

2.1.7 Protocole



Le protocole de cette expérience est similaire au précédent. La différence réside dans le fait que cette fois-ci les échantillons sont prélevés sur la face des billons directement dans l'aubier. Ces échantillons permettent donc d'avoir une information de l'humidité au niveau d'une couche inférieure de la pile. La logistique de traitement des échantillons est la même que précédemment et soulève donc les mêmes réserves.

2.1.8 Résultats

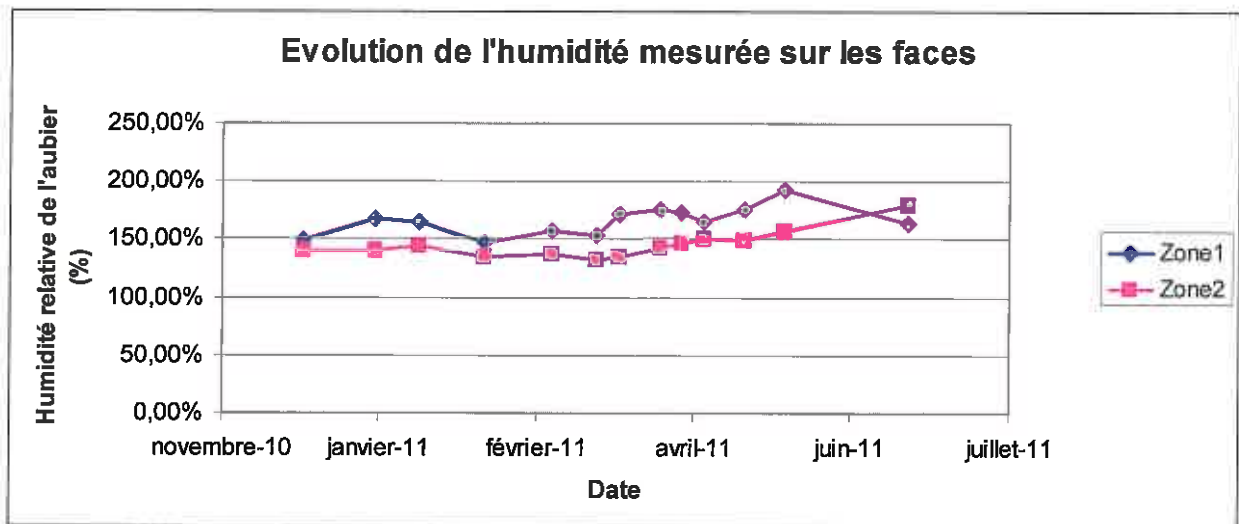


Figure 6 : Comparaison de l'évolution de l'humidité de l'aubier de billons situés en bas de pile

Dans cette quatrième série d'expériences les résultats montrent également une bonne tendance de conservation de l'humidité des billons dans le temps. Il est également possible de constater que lorsqu'on se trouve à un fort taux d'humidité, l'arrosage des piles n'a pour rôle que de conserver ce taux et ne permet pas de continuer à faire augmenter l'humidité des billons (saturation maximale des billons).

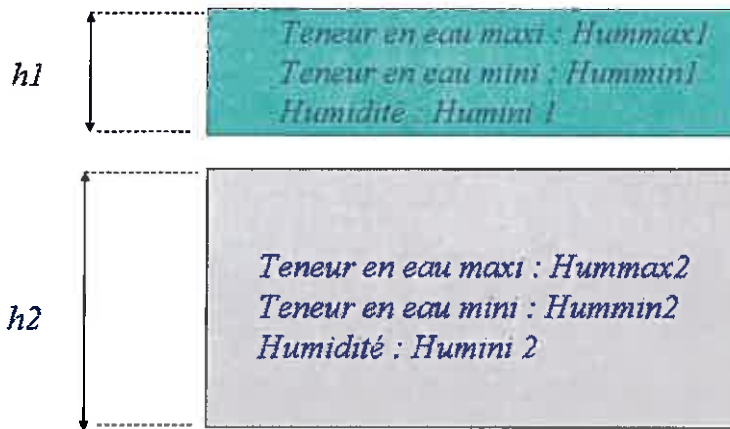
3. Modèle d'évolution de l'humidité

Présentation du modèle

Le modèle est basé sur un bilan entrées/sorties appliqué à l'eau. Le système considéré est une pile de bois. Nous considérons que seul le compartiment « aubier » est capable d'absorber et de rejeter de l'eau et nous faisons l'hypothèse que l'humidité du compartiment « bois de cœur » est constante. Les interstices entre les billons sont considérés comme extérieurs au système. Nous considérons en outre que la pile de bois est composée de deux entités : la couche supérieure et la couche inférieure. La couche supérieure est plus sensible aux événements climatiques et est la première à recevoir l'arrosage et les précipitations qui viennent du dessus. La couche inférieure est dans une atmosphère plus tempérée. Elle reçoit tout de même l'arrosage par les faces et est également alimentée en eau par le ruissellement depuis la couche supérieure.

Chaque couche est caractérisée par les paramètres suivants :

Paramètre	Couche supérieure	Couche inférieure
Hauteur	h1	h2
Humidité initiale	Humini1	Humini2
Humidité maximale	Humax1	Humax2
Humidité minimale	Humin1	Humin2

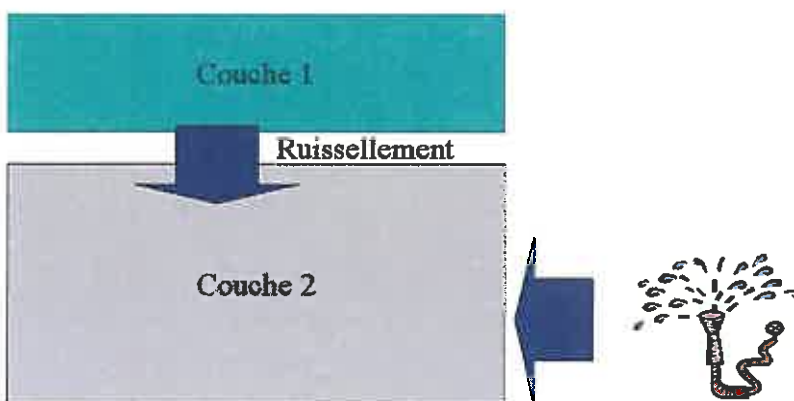


Pour prédire l'évolution de l'humidité, il faut à présent faire le bilan des entrées et sorties d'eau pour chaque compartiment. Connaissant la quantité d'eau initiale il est alors possible de calculer l'humidité de la couche à chaque instant.

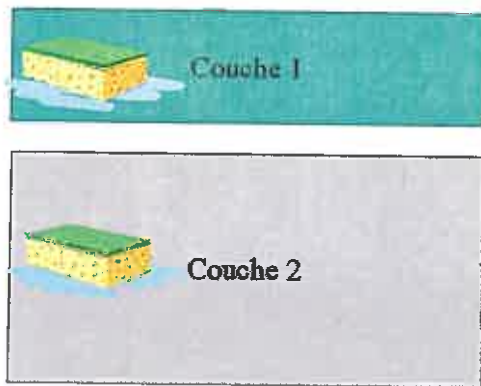
En ce qui concerne la couche 1, les entrées d'eau sont constituées par l'arrosage et la pluie.



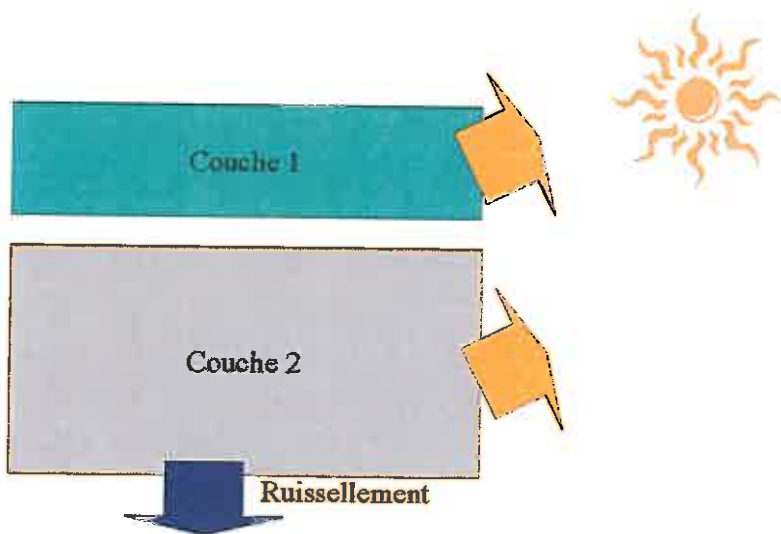
Pour la couche 2, les entrées d'eau sont constituées par l'arrosage au niveau des faces et le ruissellement depuis la couche 1.



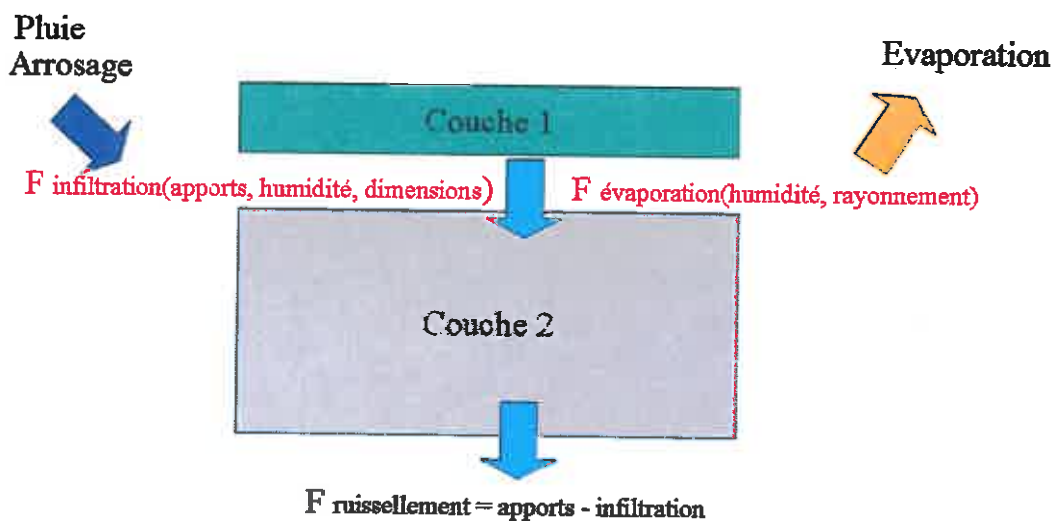
Seule une partie de l'eau qui arrive sur les couches 1 ou 2 est absorbée. L'absorption d'eau est régie par une loi d'infiltration qui dépend de la quantité d'eau apportée et du niveau d'humidité de la couche.



La différence entre l'eau apportée et l'eau infiltrée constitue l'eau de ruissellement. Le ruissellement de la couche 1 alimente la couche 2 et le ruissellement de la couche 2 sort du système. La seconde source de perte d'eau du système est celle liée à l'évaporation qui dépend des conditions atmosphériques.



Le système complet peut ainsi être résumé de la façon suivante :



Une fois les conditions initiales connues, le principal travail consiste donc à expliciter la fonction d'infiltration et la fonction d'évaporation, les autres paramètres étant déduits par différence pour boucler le bilan de matière appliqué à l'eau.

Estimation des paramètres

3.1.1 Fonction d'infiltration

La fonction d'infiltration se base sur un modèle de référence en hydrologie du service de conservation des sols aux États-Unis. Selon cette publication, la forme de la fonction d'infiltration est la suivante :

$$Infiltration = Apports \times \left(1 - \frac{Apports}{Apports + (a \times Déficit)^b} \right)$$

Équation 1 : *Fonction d'infiltration*

L'infiltration (en L/m³) est calculée en fonction des apports (L/m³) et du déficit hydrique (en L/m³). Le déficit hydrique est calculé comme la différence entre la quantité d'eau contenue dans 1m³ de bois à son humidité maximale et celle à son état d'humidité actuelle.

L'estimation de ces paramètres a soulevé un premier problème au cours de ce projet, à savoir comment estimer de façon précise l'humidité des bois. Les différentes méthodes utilisées au cours du projet (voir partie protocole 3.3.1) ont mis en avant une très forte variabilité de la mesure et des résultats différents en fonction des méthodes utilisées. Ce point souligne la nécessité de mettre en place une technique de mesure précise de l'humidité des billons. En attendant cette technique, il est uniquement possible de travailler en relatif, à savoir étudier l'évolution de l'humidité des billons en utilisant toujours la même méthode. C'est pour cette raison que nous avons utilisé, dans le cadre de l'estimation de la fonction d'infiltration, uniquement les données provenant de mesures par évolution de masse des billons.

Afin de calculer plus précisément le déficit de chaque billon, l'asymptote de la fonction de saturation du billon a été estimée. Le déficit hydrique est calculé par la suite comme la différence entre la quantité d'eau maximale contenue dans le billon d'après cette asymptote et l'eau contenu dans le billon.

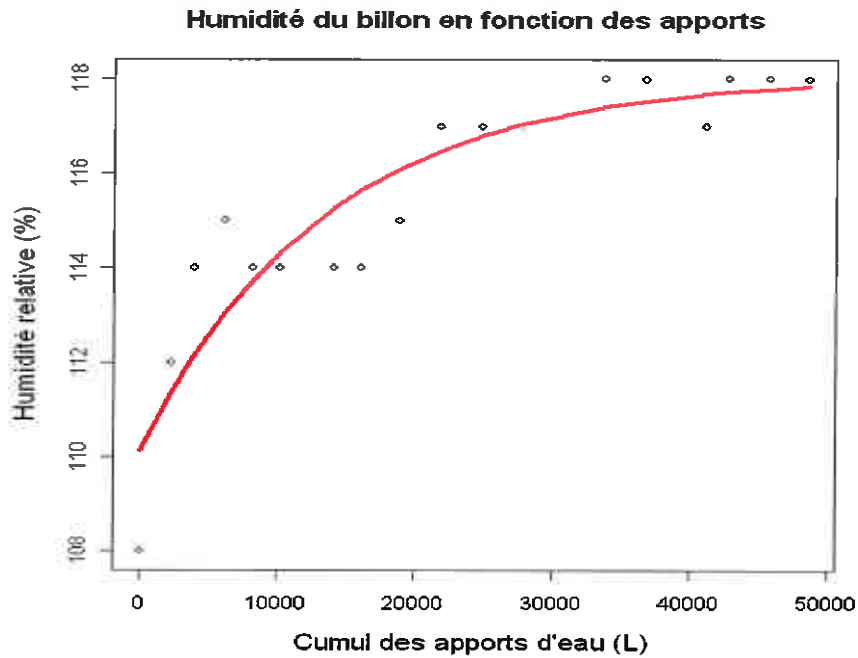


Figure 8 : Calcul de l'asymptote de saturation pour chaque fagot

Ces données permettent d'estimer la fonction d'infiltration. Sur la figure suivante les cercles bleus représentent les données mesurées et les cercles rouges les données simulées. Nous voyons sur ce graphique qu'il existe une très forte variabilité dans le phénomène d'infiltration. La fonction d'infiltration estimée ne nous permet donc que d'avoir une tendance moyenne. Ce travail met en valeur les nécessaires précautions qui seront à prendre dans l'utilisation du modèle ainsi que les pistes d'améliorations nécessaires à ce dernier.

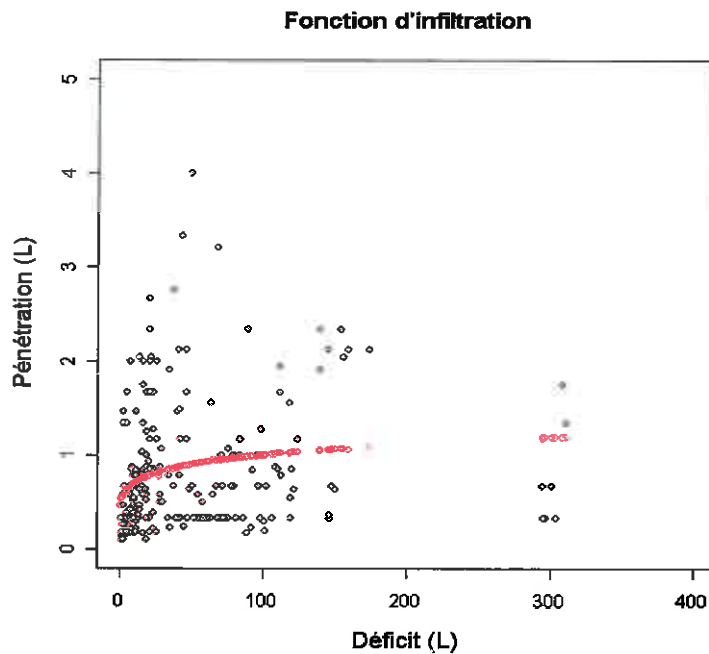


Figure 9 : Estimation de la fonction d'infiltration

3.1.2 Fonction évaporation

L'estimation de l'eau évaporée se fait en deux temps. Dans un premier temps, nous recherchons la quantité d'eau théorique maximale qui pourrait être évaporée en fonction des conditions climatiques et de la quantité d'eau présente dans la couche.

Cependant, l'expérience de la pesée de billons dans les casiers sur la remorque laissés alternativement une semaine sous arrosage et une semaine sans arrosage a montré un fort « effet yoyo ». Ce phénomène nous a amenés à considérer le réservoir eau des billons de la façon suivante :

- une eau facilement mobilisable : cette eau pénètre facilement et s'évapore rapidement.
- une eau difficilement mobilisable.

Le calcul de la quantité d'eau évaporée s'effectue de la façon suivante :

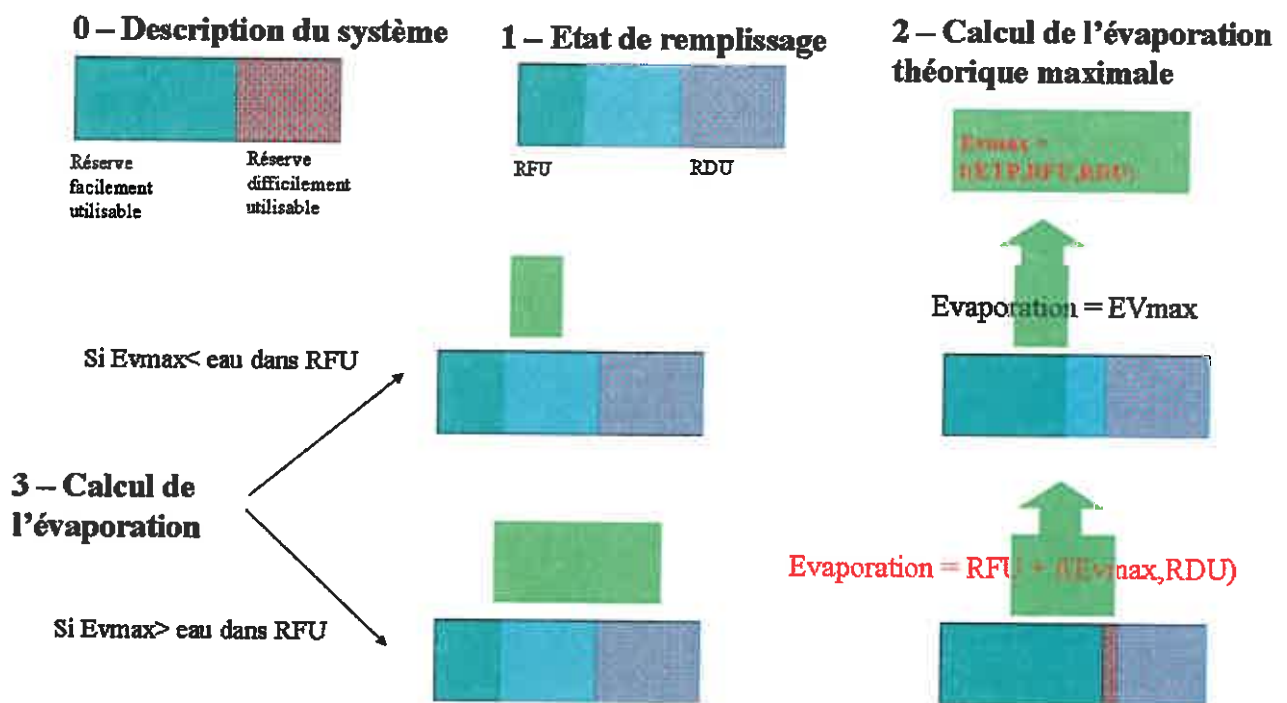


Figure 10 : Fonctionnement des réservoirs eau

Il est donc nécessaire pour décrire complètement ce système de définir deux fonctions (en rouge sur le schéma) : la fonction de calcul de l'évaporation théorique maximale et la fonction d'évaporation de l'eau dans la réserve difficilement utilisable.

Évaporation théorique maximale

$$Evaporation\ maximale = a \times \exp\left(-\frac{RFU + RDU - Eau\ totale}{RFU + RDU}\right) \times ETP$$

Équation 2 : Fonction d'évaporation

Cette fonction a un seul paramètre à estimer : a.

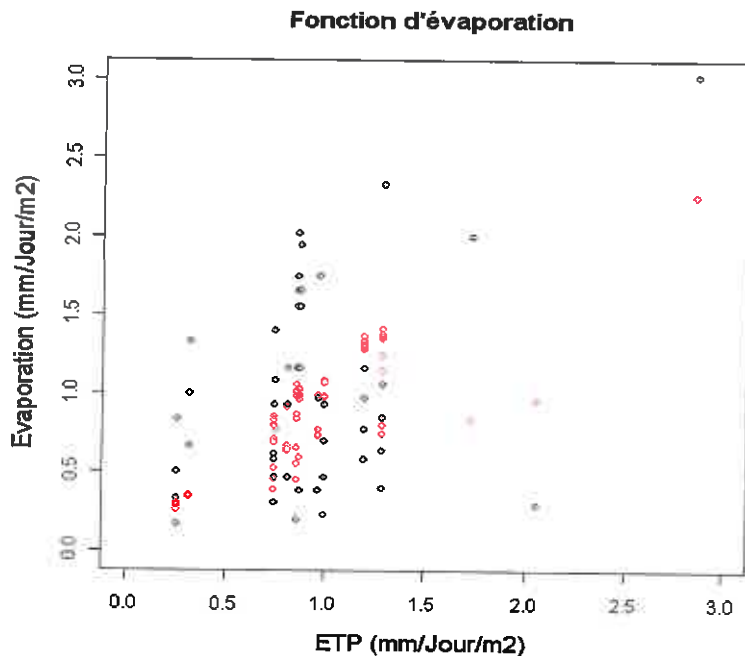


Figure 11 : Estimation de la fonction d'évaporation (valeurs mesurées en bleu, valeurs estimées en rouge)

En bleu figurent les données mesurées et en rouge les données simulées. L'estimation du paramètre a est de 1.15. Ce graphique souligne une fois encore la forte variabilité du phénomène mesuré. Le modèle ne donne donc qu'une tendance moyenne. Nous pouvons également observer sur ce graphique que nous nous situons à des niveaux d'évapotranspiration faibles (l'ETP n'est que de quelques mm par jours). Ceci s'explique par le fait que les périodes d'absence d'arrosage observées avaient lieu au cours de la période hivernale. Un approfondissement de cette analyse avec des mesures d'évaporation des billons en période estivale serait nécessaire pour valider la fonction d'évaporation.

Évaporation de l'eau difficilement utilisable

Dans le cas où l'eau théorique qui doit s'évaporer ne peut être apportée par la réserve facilement utilisable, il faut puiser dans la réserve difficilement utilisable. La première étape est de calculer la différence entre l'eau théoriquement évaporée et celle disponible dans la réserve facilement utilisable. Cette différence constitue l'eau potentielle maximale évaporable. L'eau réellement évaporée est proportionnelle au niveau de remplissage de la réserve difficilement évaporable. Par exemple si cette réserve est à 50% de son niveau maximal, seul 50% de l'eau potentiellement évaporable sera considérée comme réellement évaporée.

Analyse du modèle

Les paramètres ainsi estimés sont utilisés pour analyser le comportement du modèle. Nous avons utilisé les données initiales correspondant à plusieurs fagots suivis selon le protocole 3.1.1. Le graphique suivant permet de comparer les données mesurées et les données simulées.

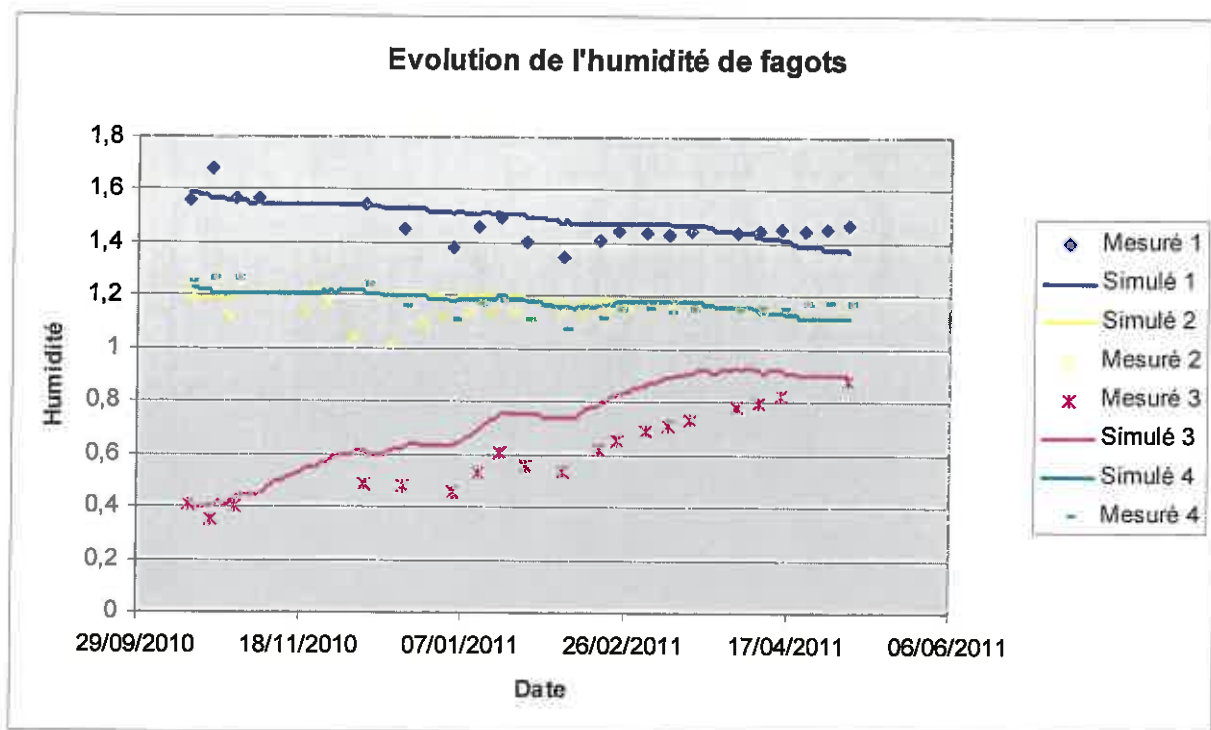


Figure 12 : Comparaison des prédictions du modèle aux valeurs mesurées.

Nous constatons sur ce graphique que le modèle reproduit bien en tendance les évolutions de l'humidité constatées sur les fagots. Il est néanmoins possible de mettre en avant certaines imperfections :

- durant les périodes froides le modèle sous estime les pertes d'eau. Ceci peut s'expliquer par le fait que le modèle d'évaporation dépend directement de l'ETP. Comme c'est un modèle multiplicatif, lorsque cette ETP est quasi nulle, les pertes simulées sont presque nulles également. D'autres formes d'équations pour cette fonction d'évaporation mériteraient d'être testées, mais la qualité et la précision des données disponibles pour réaliser cette estimation ne nous le permettent malheureusement pas.
- durant les périodes chaudes nous observons le phénomène inverse, à savoir une surestimation des pertes d'eau par rapport à la réalité. Cette imperfection du modèle vient du fait que nous nous trouvons pour ces périodes en limite du domaine de validité du modèle d'évaporation comme signalé dans la partie ci-dessus. Ici encore un jeu de données plus complet couvrant la période estivale serait nécessaire pour estimer plus précisément la fonction d'évaporation.
- De façon générale, le modèle présente des variations beaucoup plus lissées que les mesures réelles. Nous avons en effet constaté dans la partie estimation du modèle que les données simulées donnaient la tendance générale, mais que les phénomènes étudiés présentaient généralement une forte variabilité. Il est donc normal que le modèle général ne permette pas de reproduire de façon précise les variations observées.

4. Outil de test de scénarios d'arrosage

Afin de rendre facilement utilisable le modèle d'évolution de l'humidité des piles de bois, nous avons réalisé un outil interactif qui permet à chacun d'effectuer les calculs au plus proche de ses conditions de stockage. Les paragraphes suivants présentent cet outil et en expliquent l'utilisation.

Installation

L'outil étant programmé en Java, il est nécessaire de posséder Java sur son ordinateur. De nombreux programmes actuels utilisent ce langage, donc il est fort probable que vous le possédiez déjà. Si tel n'est pas le cas, le logiciel Arrostock.exe vous proposera de l'installer lors du premier lancement. Vous pouvez également vous rendre sur le site Java (<http://java.com/fr/download>) et installer le JRE (Java Runtime Environnement).

Il suffit ensuite de copier sur votre ordinateur le répertoire de l'application qui doit contenir :

- l'outil d'évaluation de l'évolution de l'humidité (arrostock.exe)
- le répertoire des bibliothèques (lib)

L'outil se lance en cliquant sur l'exécutable.

Lancer une simulation

La simulation d'évolution de l'humidité se fait en trois étapes : entrer les conditions météo, entrer les caractéristiques du site puis choisir un scénario d'arrosage ou de calcul.



4.1.1 Entrer les conditions météo

Année	Mois	Jour	Jour Calendaire	Précipitation	Temp. moyenne	ETP
2 010	10	15	288	1	0	1,66
2 010	10	16	289	0	0	0,86
2 010	10	17	290	0	0	2,06
2 010	10	18	291	0	0	1,76
2 010	10	19	292	0	0	2,15
2 010	10	20	293	0	0	1,82
2 010	10	21	294	0	0	2,34
2 010	10	22	295	9	0	2,1
2 010	10	23	296	26	0	1,71
2 010	10	24	297	1	0	0,41
2 010	10	25	298	0	0	1,93
2 010	10	26	299	0	0	1,66
2 010	10	27	300	0	0	2,11
2 010	10	28	301	10	0	1,12
2 010	10	29	302	12	0	1,39
2 010	10	30	303	9	0	1,92
2 010	10	31	304	0	0	0,03
2 010	11	1	305	2	0	
2 010	11	2	306	1	0	0,27
2 010	11	3	307	0	0	1,11
2 010	11	4	308	0	0	0,82
2 010	11	5	309	0	0	0,38
2 010	11	6	310	17	0	0,47
2 010	11	7	311	27	0	0,79
2 010	11	8	312	17	0	0,49

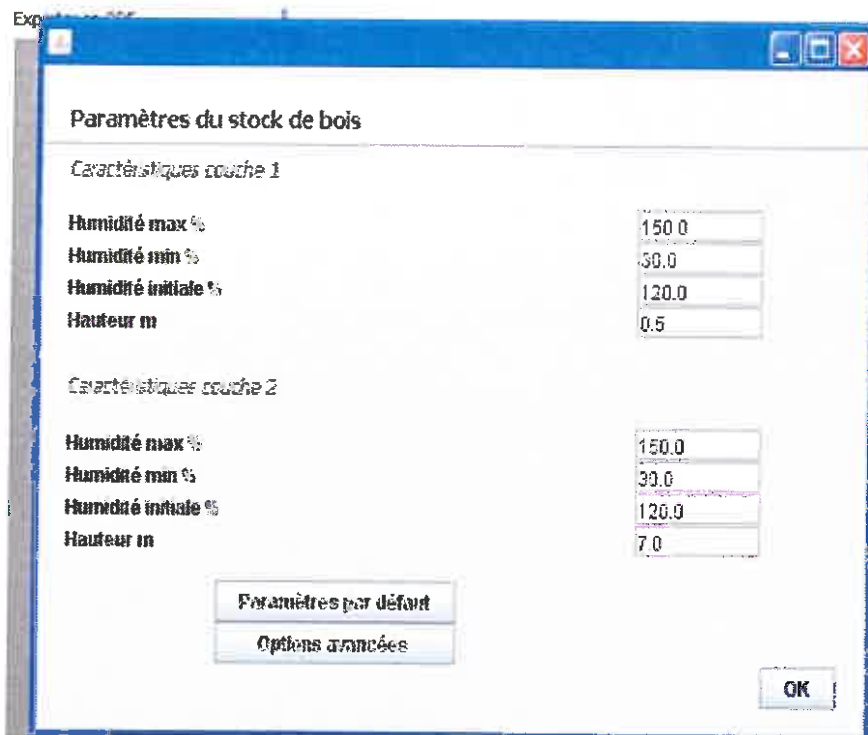
Pour entrer les conditions météo, il faut ouvrir un fichier au format csv (fichier texte dont les séparateurs sont des « ; ») qui contient les informations suivantes : Année ; Mois ; Jour ; Jour calendaire ; Précipitation ; Température ; ETP.

Si l'ETP n'est pas connue, indiquer simplement « 0 » dans votre fichier. Il est en effet possible de la calculer à partir de la température et du jour calendaire en utilisant le bouton « calculer ETP ». Inversement, si vous connaissez l'ETP mais pas la température, vous pouvez laisser le champ température à « 0 » car cette variable n'est utile que pour le calcul de l'ETP.

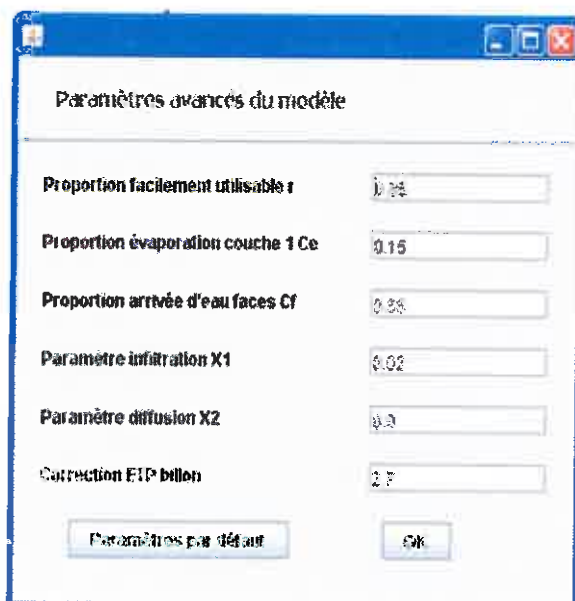
Il est également possible de modifier les cellules du tableau une fois celui-ci chargé.

Une fois les conditions météo correctement remplies, appuyer sur « valider »

4.1.2 Entrer caractéristiques du site



Il faut renseigner ici les caractéristiques des différentes couches. La couche 1 représente la couche supérieure et la couche 2 représente la couche inférieure. Il est possible de revenir aux paramètres par défaut en cliquant sur le bouton « paramètres par défaut ». Enfin, il est également possible de modifier les paramètres du modèle dans les options avancées.



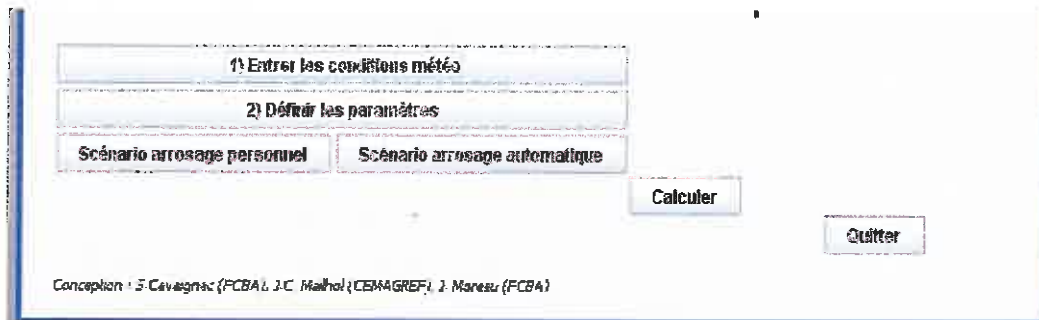
Les options avancées du modèle sont les suivantes :

- la proportion d'eau facilement utilisable correspond à la part de la réserve facilement utilisable (RFU) par rapport à la réserve totale (RFU+RDU). Voir la partie 4.2.2 pour plus de précisions.
- La proportion d'évaporation correspond à la fraction de l'eau évaporée qui provient de la couche 1. Le modèle calcule en effet l'évaporation pour l'ensemble de la pile. Il faut ensuite réaffecter cette évaporation entre les deux couches grâce à ce coefficient.
- La proportion d'eau qui arrive sur les faces est du même esprit que le calcul de l'évaporation. En effet, un volume global d'arrosage est calculé pour l'ensemble de la

pile. Il faut ensuite définir quelle sera la proportion de cet arrosage qui arrive sur la couche 1 (1-Cf) et quelle proportion arrive sur la couche 2 (Cf). Pour mémoire toute la pluie arrive sur la couche 1.

- Le paramètre d'infiltration X1 correspond au paramètre a de l'équation 1 (partie 4.2.1)
- Le paramètre de diffusion X2 correspond à la partie de l'eau qui serait contenue dans les billons et qui ressortirait pour alimenter la couche X2. Nous avons considéré ce phénomène comme négligeable dans notre étude.
- Le paramètre de correction ETP billon correspond au paramètre a de l'équation 2 (partie 4.2.2)

4.1.3 Choisir le scénario d'arrosage



L'utilisateur a le choix entre 2 familles de scénarios d'arrosage : soit il désire tester des scénarios prédéfinis auquel cas cliquer sur « Scénario arrosage personnel », soit il désire que l'ordinateur calcule un scénario. Dans ce dernier cas cliquer sur « scénario arrosage automatique ».

Dans le cas du scénario personnel, le logiciel propose le tableau qui correspond au calendrier des conditions météorologiques. Il est possible de renseigner directement le niveau d'eau apporté par jour (en mm/m²) ou bien indiquer un nombre d'heures d'arrosage et de préciser le débit (en mm/m²/h) et de cliquer sur « calculer ».

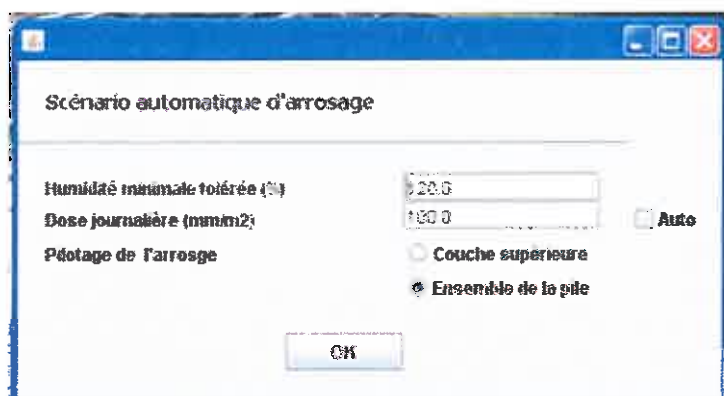
Il faut ensuite cliquer sur « valider » pour enregistrer le scénario d'arrosage.

Année	Mois	Jour	Nb heures	Débit horaire (mm/m ²)/h
2010	10	10	0	0
2010	10	11	0	0
2010	10	12	0	0
2010	10	13	0	0
2010	10	14	0	0
2010	10	15	0	0
2010	10	16	0	0
2010	10	17	0	0
2010	10	18	0	0
2010	10	19	0	0
2010	10	20	0	0
2010	10	21	0	0
2010	10	22	0	0
2010	10	23	0	0
2010	10	24	0	0
2010	10	25	0	0
2010	10	26	0	0
2010	10	27	0	0
2010	10	28	0	0
2010	10	29	0	0
2010	10	30	0	0
2010	10	31	0	0
2010	11	1	0	0
2010	11	2	0	0
2010	11	3	0	0
2010	11	4	0	0
2010	11	5	0	0
2010	11	6	0	0
2010	11	7	0	0
2010	11	8	0	0

L'autre possibilité est de calculer un scénario automatique. L'utilisateur précise une humidité minimale tolérée. Il doit indiquer grâce au bouton radio « pilotage de l'arrosage » si cette tolérance concerne la couche supérieure qui est la plus sensible aux variations de conditions climatiques ou bien l'ensemble de la pile.

Il y a deux possibilités de test :

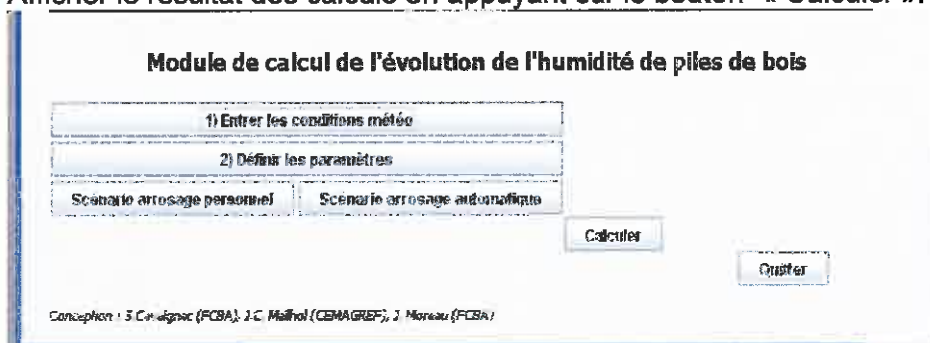
- soit tester quel doit être le nombre de jours d'arrosage avec une dose donnée. Dans ce cas indiquer la dose journalière apportée. Dès que la prévision du modèle descend en dessous de l'humidité minimale tolérée, la dose journalière est apportée et ce aussi longtemps que nécessaire pour retrouver le niveau d'humidité recherché. Il faut pour faire ce calcul indiquer les doses journalières dans la case correspondante.
- l'autre possibilité est de rechercher la dose qui, apportée journalièrement permet de conserver le niveau minimal d'humidité. Il faut pour cela cocher la case « auto ».



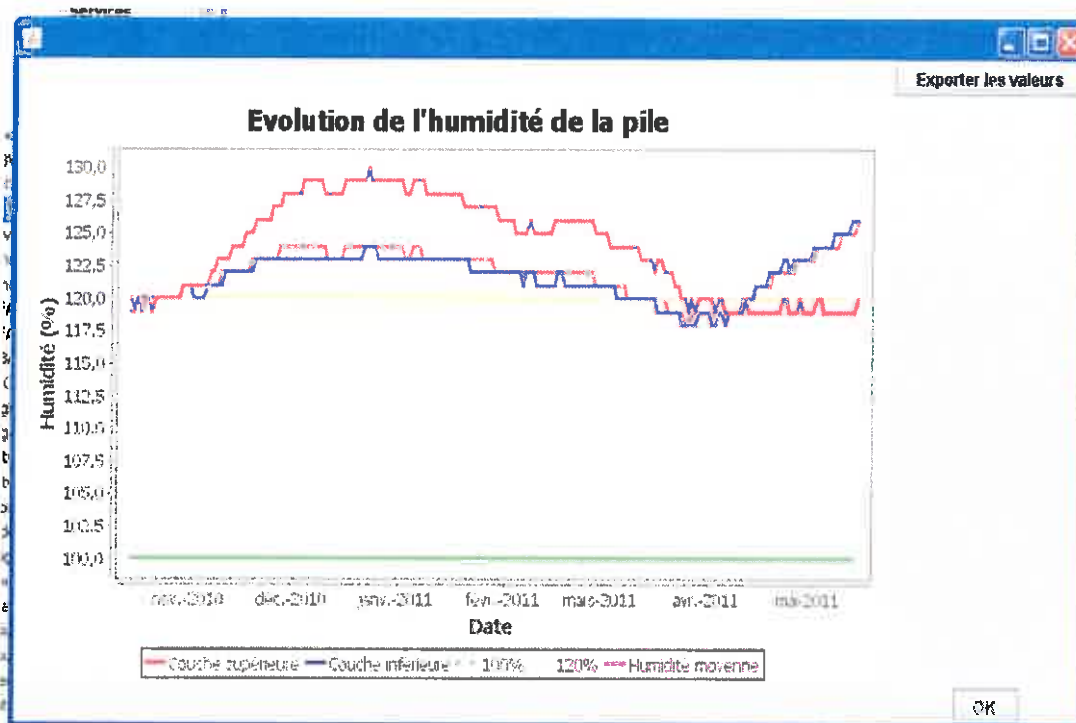
Une fois les choix faits, appuyer sur « OK »

4.1.4 Résultats

Afficher le résultat des calculs en appuyant sur le bouton « Calculer ».



Les courbes d'évolution de l'humidité apparaissent.



Il y a cinq courbes à l'écran :

- deux courbes de référence avec une humidité à 100% (vert) et une humidité à 120 % (jaune)
- trois courbes d'humidité de pile : humidité de la couche supérieure (rouge), humidité de la couche inférieure (bleu) et humidité de la couche moyenne (rose).

Il est possible d'exporter l'ensemble de ces valeurs en appuyant sur le bouton « exporter les valeurs ». Indiquer alors le nom du fichier avec l'extension .csv (pour une lecture dans Excel) ou .txt (pour une lecture dans un éditeur de texte).

En cliquant avec le bouton droit sur le graphique plusieurs options de zoom, d'exportation et d'impression sont possibles.

Voici pour illustration le rendu d'une sortie en png :

Evolution de l'humidité de la pile

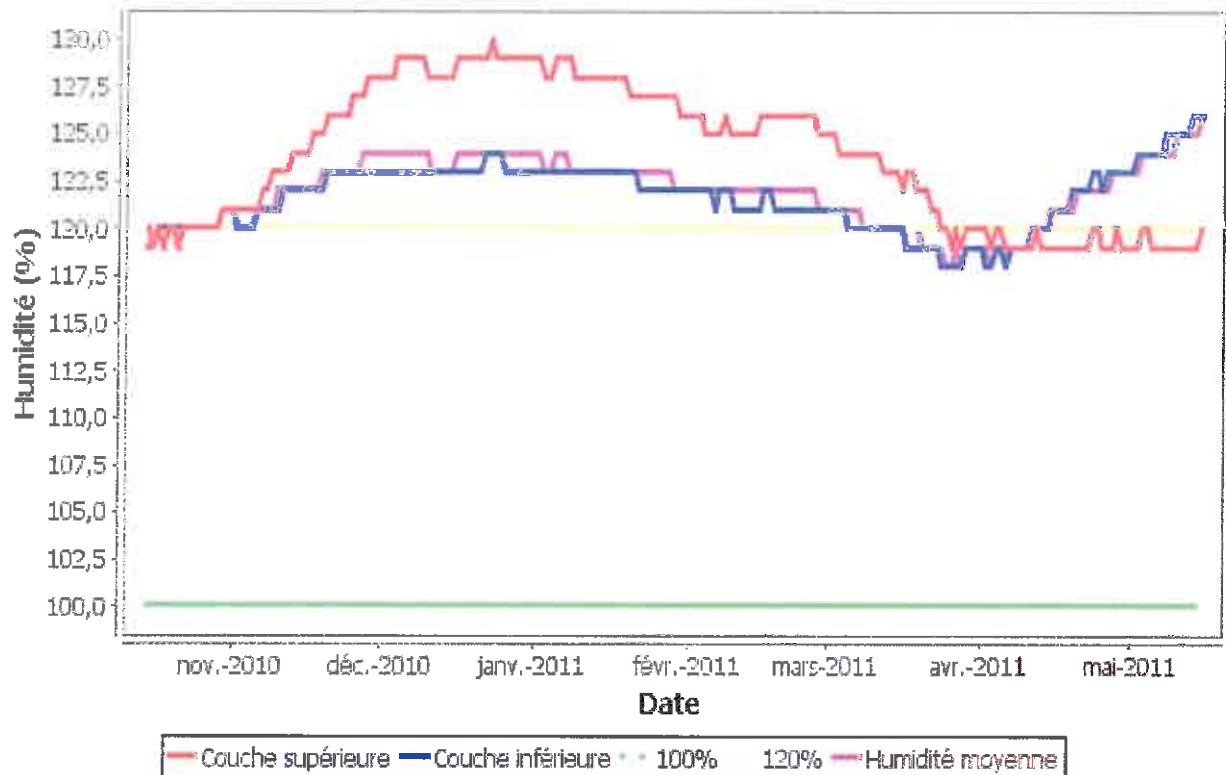


Figure 13 : Illustration des sorties du modèle

5. Conclusion et perspectives

Enseignements du projet

5.1.1 À partir des différentes mesures réalisées

Le suivi de l'évolution de l'humidité durant toute l'année du projet a permis de valider l'efficacité des différents modes d'arrosage. Nous avons en effet pu observer sur l'ensemble des sites une tendance générale à l'augmentation et au maintien du niveau d'humidité des billons.

Il a également été observé que le comportement de l'eau au sein des billons est un phénomène complexe que nous avons dû appréhender en distinguant deux réservoirs : un réservoir d'eau facilement utilisable qui s'évapore et se remplit rapidement et un réservoir d'eau plus difficilement mobilisable. Ce comportement est intéressant à appréhender car il nous indique qu'en cas d'incident sur le système d'arrosage, un délai de plusieurs jours pour des interventions est tout à fait envisageable. En effet, lors de la reprise de l'arrosage les billons retrouveront rapidement leur niveau antérieur d'humidité.

L'expérience avec des bois d'origines différentes sur remorque souligne l'intérêt de conserver l'écorce des bois pour assurer un rôle de tampon dans la régulation de l'humidité.

Enfin il a également été constaté que les bois n'absorbaient pas plus d'eau dans le cas d'un excès d'arrosage. Il est donc plus intéressant d'arroser modérément et régulièrement plutôt que par apports volumineux.

5.1.2 À partir de l'utilisation du modèle

Evolution de l'humidité de l'aubier dans la pile; Dose calculée (mm/m²/j) : 10.0

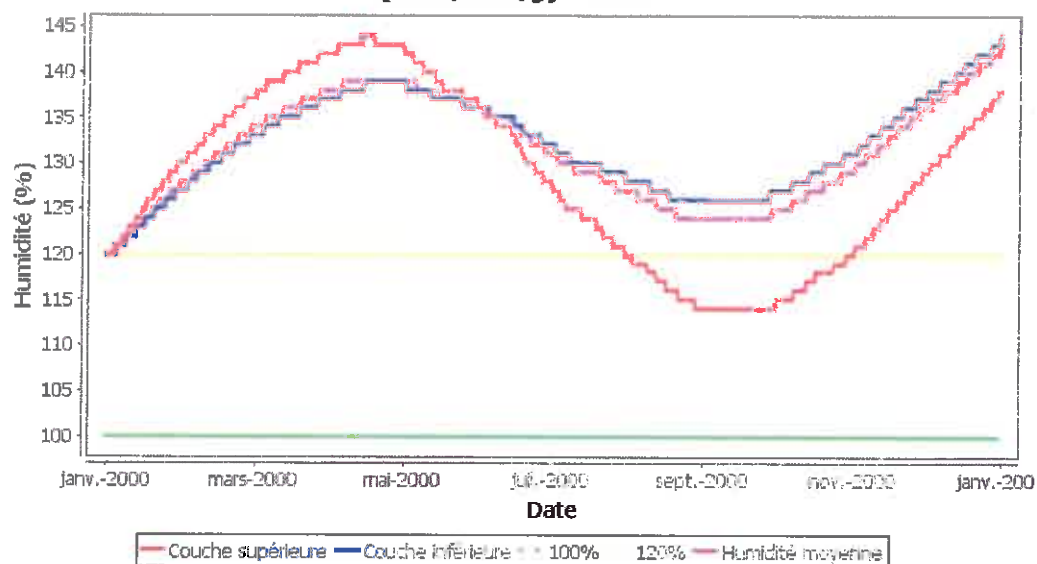


Figure 14 : Calculs du modèle sur un scénario climatique moyen, pilotage par l'humidité moyenne

Evolution de l'humidité de l'aubier dans la pile; Dose calculée (mm/m²/j) : 45.0

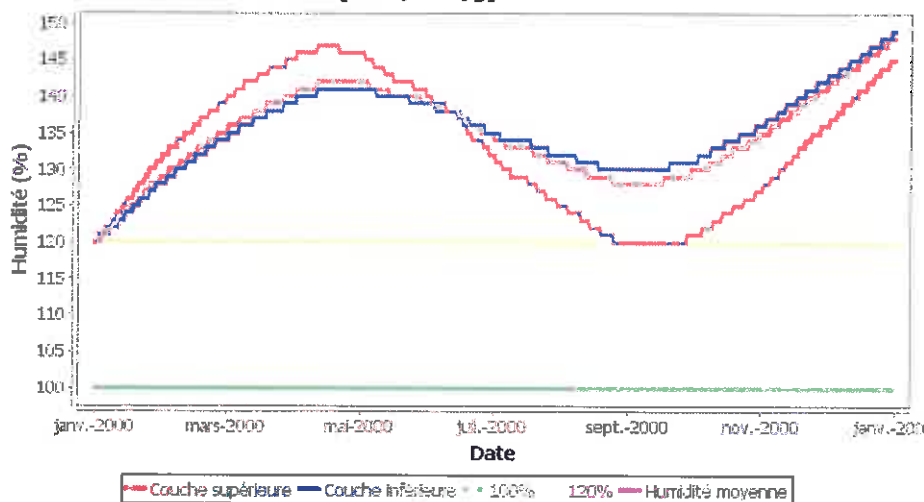


Figure 15 : Calculs du modèle sur un scénario climatique moyen, pilotage par l'humidité de la couche supérieure

Le calcul automatique d'une dose constante au cours du temps montre qu'en fonction de l'objectif de conservation (humidité moyenne de l'ensemble de la pile ou humidité absolue de toute la pile) les doses sont comprises entre 10 et 45 mm/jours ce qui correspond avec les systèmes d'arrosage observés entre 2 et 8 heures d'arrosage par jour.

Il ne s'agit bien sûr pas là d'un système optimisé (il faudrait mettre un peu moins d'eau en hiver et un peu plus en été), mais ce calcul permet de donner des ordres de grandeur de niveaux d'arrosage pertinents.

La structure du modèle utilisée (bilan entrée/sortie) est bien adaptée à l'étude l'évolution de l'humidité du bois stocké en pile.

Perspectives

Ce projet a également permis de mettre en évidence certaines lacunes dans l'étude de l'évolution de l'humidité. La plus importante d'entre elles est le manque d'une technique de mesure précise de l'humidité du bois saturé. Les différentes méthodes employées permettent d'évaluer des niveaux d'humidité et sont plus intéressantes dans le cadre d'un suivi que pour une mesure absolue d'humidité. Or c'est bien ce niveau absolu de 120% qui nous intéresse pour considérer les bois à l'abri des attaques parasitaires. Une mesure directe de l'humidité qui permettrait de s'affranchir de la masse d'eau dans ou sur l'écorce ainsi ou bien du transfert d'échantillons entre le site et le laboratoire serait donc extrêmement intéressante. Les essais d'humidimètres à pointes ou de mesure par infrarouge ne sont malheureusement pas aujourd'hui assez concluants.

Une fois le phénomène étudié correctement mesuré, il sera possible d'envisager des améliorations au modèle actuel. Le modèle d'absorption d'eau par exemple mériterait d'être affiné en tenant compte, comme pour le modèle d'évaporation d'une eau facilement assimilable et d'une eau difficilement assimilable. Ensuite il faudrait se pencher de façon plus précise sur les problèmes de changement d'échelles : les estimations ont en effet été réalisées à l'échelle de lots de billons puis extrapolées au niveau de piles. Il faudrait donc vérifier le comportement du modèle lors de ce changement d'échelle. Enfin, il pourrait être intéressant d'analyser les différences dans le mode d'apport de l'arrosage entre l'apport de l'ensemble de la dose en une seule fois ou bien étalée sur toute la journée. Ce niveau de précision n'est pas atteint. Nous ne connaissons pas non plus les conséquences sur la qualité du bois de phénomènes d'humectation/dessiccation.

6. Références

Castéra P. *Plateforme expérimentale sur la Conservation longue durée du Pin maritime par voie humide*. Pierroton : INRA, 2004.

Kari L., Torbjorn Elowsson. « How to achieve effective wet storage of pine logs (*Pinus sylvestris*) with a minimum amount of water ». *Forest Product Journal*. 1995,. Vol. 45, n°11/12, p. 36-42.

Kari L., Torbjorn Elowsson. « Potential and Measured Evaporation in Saw Timber Piles of *Pinus sylvestris* ». *Scandinavian Journal of Forest Research*. 1997,. n°12, p. 57-64. Disponible sur :

Kari L., Torbjorn Elowsson. « The Effect of Bark Condition, Delivery Time and Climate-adapted Wet Storage on the moisture Content of *Picea abies* (L.) Karst. Pulpwood ». *Scandinavian Journal of Forest Research*. 1999,. n°14, p. 156-163.

Moreau J., Chantre G., Vautherin P., Gorget Y., Ducray P., Leon P. « Wood storage under misting systems ». *Revue Forestière Française*. 2006,. Vol. 58, n°4, p. 377-387.

7. Annexe 1 : Comptes rendus des comités de pilotage

Premier comité

Objet 1er comité de pilotage du projet Arrostock

Date 09/11/2010

Lieu FCBA Bordeaux

Participants A. Bailly (FCBA), G. Bernard (Beynel/PGS), S. Cavaignac (FCBA), L. Cotten (CAFSA), R. Joly (Beynel/PGS), A. Kiffer (ACE Bois), J.-C. Mailhol (CEMAGREF), L. Mevel (SFCDL), A. Pardina (CAFSA), D. Pischedda (ONF), C. Riegel (ECOWOOD), A. Villette (SKCDP)

Excusés B. Lazarini (Région Aquitaine), J. Moreau (FCBA)

Diffusion Participants, financeurs

Rédacteur S. Cavaignac

Rappel du contexte, des objectifs et du calendrier du projet

Contexte

- De nombreux sites de stockage sous aspersion ont été mis en place en Aquitaine.
- Il est important de disposer de connaissances suffisantes sur l'évolution de l'humidité des bois en fonction des conditions de stockage pour en assurer la conservation.
- De plus, les coûts de fonctionnement d'une aire de stockage ont été estimés en moyenne à 2€/tonne/an, au minimum 40% des coûts sont induits par l'usage de l'électricité.
- Il est ainsi primordial d'optimiser le fonctionnement des aires de stockage pour limiter les frais de fonctionnement et permettre de pérenniser ces stocks sur le long terme

Objectifs

- Construire un modèle permettant de prédire l'humidité du bois en fonction des conditions météorologiques et de l'humidité des grumes.
- Élaborer des consignes de gestion de l'arrosage à partir d'un abaque permettant un pilotage manuel et rapidement applicable pour l'optimisation de l'arrosage.

Calendrier

Tâche 100 : Suivi de l'évolution de l'humidité des bois pour différentes modalités, collecte des données

Tâche 110 : Construction des protocoles de suivi de l'évolution de l'humidité des billons stockés

Tâche 120 : Mise en place des suivis et organisation des premiers relevés

Tâche 130 : Mesures d'humidité complémentaires par dessiccation en étuve

Tâche 200 : Synthèse des données, conception du modèle et définition de consignes pilotes de gestion

Tâche 210 : Synthèse des données collectées

Tâche 220 : Construction des modèles

Présentation des résultats recueillis sur les différents sites à date du comité

Chaque site étudié a fait l'objet d'un protocole adapté. Pour chaque site, les protocoles utilisés puis les données recueillies ont été présentés successivement.

L'ensemble de ces informations sont disponibles en annexe 1 (PowerPoint de la présentation).

En synthèse de cette partie, les informations suivantes ont été mises en avant :

- À l'exception de quelques prélèvements qui méritent d'être confirmés, pour les différents sites étudiés, les différentes modalités d'arrosages permettent d'assurer une humidité des billons supérieure à 120%.
- Les résultats confirment une différence nette de comportement entre le bois de cœur et l'aubier.
- Il est possible d'obtenir une bonne évaluation de l'eau présente dans le cœur et dans l'aubier des billons à partir de prélèvements à la perceuse dans ces deux parties, de la mesure de la masse volumique anhydre et de la mesure des dimensions du billon.
- La différence de comportement de prise en eau entre les bois frais et les bois secs est difficile à interpréter dans la mesure où certains résultats peuvent paraître contradictoires :
- Dans le suivi de prise en eau des billons immergés, les billons secs restent à un pourcentage d'humidité bien inférieur aux billons frais.
- Dans le suivi de la prise et de la perte en eau des billons sur remorque alternativement arrosés une semaine puis laissés à l'air libre une semaine, le comportement des billons frais et des billons secs est exactement le même.

Plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer ces phénomènes. Il semblerait tout d'abord que la dynamique de prise en eau soit différente entre bois sec et bois frais. Sur certains stockages il a fallu près d'un an pour que les bois secs atteignent des humidités à plus de 120%. L'expérience d'immersion des billons ayant duré 1 mois, ce temps n'a peut-être pas été suffisant.

- En ce qui concerne le comportement similaire bois sec/bois frais, l'explication pourrait être que les billons pourraient schématiquement être décomposés en deux réservoirs : un réservoir d'eau facilement utilisable et un réservoir d'eau difficilement utilisable. Le réservoir facilement utilisable se remplirait et se viderait de façon plus rapide et ce sont ces variations que l'on observerait dans la deuxième expérience.
- Le suivi de la perte en eau des billons sans arrosage montre une perte rapide à l'échelle de la semaine mais relativement modérée à l'échelle de la journée.
- Il manque d'informations météorologiques à l'échelle du site, notamment la différence de température entre la pile, son environnement proche (entre deux piles) et une station hors de la zone d'arrosage. Les variations de température au niveau pile pourraient être un bon indicateur permettant de piloter l'arrosage : un écart de température tendant à se réduire pourrait signifier une diminution de l'évaporation donc la perte de la plupart de l'eau facilement évaporable et la nécessité de déclencher l'arrosage. Des capteurs ont été disposés par la CAFSA sur certains de leurs sites, les données seront analysées.

FCBA procédera également à l'installation de capteurs météorologiques complémentaires sur les sites pertinents.

- Deux étapes doivent être distinguées dans l'analyse puis la modélisation : la prise en eau puis la conservation de l'humidité. Le projet Arrostock est bien centré sur la deuxième partie, à savoir la conservation de l'humidité au dessus d'un niveau objectif. L'idée est d'établir un modèle permettant de calculer la quantité d'eau nécessaire au maintien d'une humidité acceptable des billons stockés au pas de temps journalier. Les résultats des analyses sur les différents sites seront également interprétés afin de donner des préconisations sur la répartition journalière de cet apport.

Présentation du modèle théorique d'évolution de l'humidité dans les piles de stockage

Présentation des deux modèles d'évolution de l'humidité : un premier à l'échelle du billon et un second à l'échelle de la pile. Ces modèles sont disponibles en annexe 3.

Premières estimations des paramètres du modèle

Le modèle nécessite l'estimation d'un certain nombre de paramètres. Certains d'entre eux pourront être directement estimés par les mesures, pour les autres il s'agira de calibrer le modèle à partir des données recueillies sur les différents sites.

Le modèle fait intervenir deux couches : une couche extérieure et une couche plus interne. Il est nécessaire d'évaluer les hauteurs relatives de ces deux couches qui ont un comportement différent : la première en contact avec l'air connaît une variation d'humidité beaucoup plus importante que la seconde. L'observation de sites arrosés avec un système de type rampe mobile devrait nous permettre de distinguer ces deux couches. Une analyse de la sensibilité du modèle à ce paramètre sera également effectuée.

Pour comparer l'évaporation en eau des billons et l'ETP du gazon, la perte en eau des billons immergés a été mesurée et l'ETP de la journée correspondante a été calculée (voir annexe 3). La question de la surface à prendre en considération dans cette comparaison ETP gazon et évaporation billon a été soulevée. Vu les données recueillies, il semblerait plus opportun de considérer la surface totale de contact entre l'air et les billons plutôt que la simple projection du billon sur le sol.

Ajustement des protocoles de mesure pour les mois suivants

Pour les sites dont la charge de travail le permet, il serait intéressant de poursuivre le protocole de mesure tel qu'il a été défini. L'arrosage étant coupé en hiver, il sera en effet intéressant de mesurer l'évolution de l'humidité au cours de ces mois.

Pour les autres, dans la mesure où les variations d'humidité seront moins importantes qu'au cours des mois d'été, une diminution de la fréquence des mesures peut être envisagée. Cette période plus calme pourra également être l'occasion de récupérer des données manquantes à l'étude.

Une étude des protocoles sera faite au cas par cas pour définir pour chaque site quel sera le protocole de suivi de l'humidité et quels sont les données manquantes pour pouvoir adapter le modèle.

Questions diverses

Certains acteurs du projet ont émis le souhait de faire un suivi de billons déstockés puis sciés. Il pourrait être intéressant de voir comment ces informations pourront alimenter la réflexion présente et l'estimation des paramètres du modèle.

La différence de comportement entre bois secs et bois frais a soulevé le problème du stockage de bois scolytés. Pour l'instant il semblerait que le bois scolyté ne soit pas stocké sous aspersion mais plutôt à sec. Cependant, si certains acteurs venaient à stocker ces bois par aspersion, il serait intéressant de mesurer leur comportement.

Les définitions de l'humidité étaient différentes dans la partie synthèse des mesures (humidité définie comme la masse d'eau sur la masse sèche) et la partie modélisation (humidité définie comme le volume d'eau sur le volume total), une conversion de cette deuxième partie devra être faite.

Dans le même ordre d'idée, il serait bien de présenter l'ensemble des graphiques avec la même grandeur (certains montrant des évolutions d'humidité, d'autres des évolutions de masse). Les données permettant de calculer des évolutions de l'humidité de l'aubier pour les différents sites seront prises afin de répondre à cette remarque.

Prochaine réunion

La prochaine réunion se fera autour du 15 mars pour faire le point sur l'évolution de l'humidité au cours de la période hivernale et préparer le redémarrage de l'arrosage.

Deuxième comité

Objet 2eme comité de pilotage du projet Arrostock

Date 01/04/2011

Lieu FCBA Bordeaux

Participants C. Benestau (SFCDC), G. Bernard (Beynel/PGS), A. Bonnin (DRAAF), S. Cavaignac (FCBA), A. Kiffer (ACE Bois), J.-C. Mailhol (CEMAGREF), L. Mevel (Beynel/PGS), J. Moreau (FCBA), A. Pardina (CAFSA), D. Pischedda (ONF), C. Riegel (ECOWOOD), A. Villette (SKCDP),

Excusés A. Bailly (FCBA), L. Cotten (CAFSA), R. Joly (Beynel/PGS), B. Lazarini (Région Aquitaine), P. Muller (DRAAF),

Diffusion Participants, financeurs

Rédacteur S. Cavaignac, J. Moreau

Le présent compte-rendu reprend la chronologie de l'ordre du jour, à savoir :

- Résultat des mesures au cours de la période hivernale.
- Estimation des paramètres du modèle d'évolution de l'humidité et identification des données manquantes.
- Discussion des évolutions nécessaires ou possibles du modèle.
- Planification des dernières mesures pour compléter et valider le modèle.
- Questions diverses

Résultat des mesures au cours de la période hivernale

Au cours de la période hivernale, les différents acteurs ont réalisé des interruptions d'arrosage de durées variables suivant les sites. Des suivis de l'humidité sur les échantillons suivis dans ces différents sites ont montré une diminution de l'humidité des billons lors des interruptions d'arrosage, mais aussi que les billons qui étaient à un niveau satisfaisant d'humidité avant l'hiver sont restés à un bon niveau (>100%).

Au cours de cette période, les stations météo ont également été installées et nous permettent d'avoir une information plus précise sur les conditions météorologiques locales au niveau du site ainsi que l'humidité et la température au niveau des piles.

Les résultats sont consultables sur les diapositives 3 à 7 de la présentation en annexe du document.

Estimation des paramètres du modèle d'évolution de l'humidité et identification des données manquantes.

Une présentation détaillée du fonctionnement du modèle a été faite (diapositives 8 à 20), ainsi que la présentation de l'estimation des premiers paramètres.

Une comparaison des premières estimations du modèle aux mesures sur la période hivernale a été faite et montre qu'avec ces premières estimations le modèle avec 2 couches est une bonne enveloppe des conditions réelles. Le comportement de la couche inférieure est semblable aux observations, en ce qui concerne la couche supérieure, les observations sont plus variables et sensibles aux variations climatiques que les prévisions du modèle.

Une analyse de la sensibilité du modèle vis-à-vis des différents paramètres sera réalisée afin de savoir quel niveau de précision est nécessaire pour l'estimation des différents paramètres.

Discussion des évolutions nécessaires ou possibles du modèle.

Suite à la remarque de la précédente partie, il a été suggéré qu'une évolution possible du modèle serait de considérer de façon différente l'eau apportée par l'arrosage et celle par précipitation : l'eau d'arrosage doit alimenter à la fois la couche supérieure et la couche inférieure (arrosage dessus de pile + faces) alors que les précipitations n'interviennent que sur la couche supérieure.

Planification des dernières mesures pour compléter et valider le modèle.

Les mesures de la période hivernale ont permis de calibrer le modèle sur des conditions sans arrosage, mais avec une évaporation assez limitée. Il s'agit à présent de compléter nos données de situation de reprise en eau qui arrivent concomitamment à une réaugmentation de l'évaporation. Une campagne de mesure de printemps sera donc réalisée afin d'évaluer la reprise en eau des billons. Les protocoles des mesures seront similaires à ceux des premiers relevés, mais la fréquence sera discutée individuellement en fonction de la dynamique d'évolution de l'humidité constatée.

Dans le cas du suivi de l'humidité des billons sur les remorques, la question suivante liée à la variation de façon très régulière s'est posée : est-ce qu'une part importante de cette variation ne serait pas due à l'eau présente en périphérie des billons (écorce, interstices,...) mais ne reflète finalement pas vraiment la variation réelle de l'humidité à l'intérieur du billon ? Afin de vérifier cette assertion, l'expérience de mettre une remorque sous aspersion puis de la sortir pendant une semaine sera refaite avec une mesure systématique de la masse et de l'humidité par perçage en fin de période d'arrosage et en fin de période à sec.

Questions diverses

- Lors des prélèvements à la perceuse il y a un échauffement du forêt qui peut entraîner une évaporation de l'eau et donc une sous-estimation de l'humidité. Lorsqu'on s'intéresse aux variations cet aspect n'est pas primordial, mais ce biais pose problème lorsqu'on analyse les valeurs des mesures. Lors de suivi réalisé suite à la tempête de 1999 une fonction de correction avait été calculée et pourra à nouveau être appliquée dans ce projet.

- La question du comportement du bois en fonction de sa qualité d'entrée a été posée : est-ce que la prise ou la perte d'eau peut varier en fonction de la qualité ? Il semblerait en effet qu'il y ait des différences en fonction du niveau d'humidité des bois en entrée du stock (bois vert/bois sec) et de son niveau de qualité (densité). Le modèle sera calibré pour un niveau moyen, mais il sera possible de voir les conséquences via différents paramètres que l'utilisateur pourra modifier pour être au plus proche des conditions de son site (niveau maximal d'humidité, vitesse d'infiltration de l'eau dans les billons).

• De nombreuses questions ont été posées sur la stratégie optimale de répartition de l'arrosage au sein de la journée et sur les répartitions nuit/jour. Le projet tel qu'il a été monté travaille au pas de temps journalier, donc il ne sera pas possible de répondre précisément à cette question néanmoins deux éléments de réponses ont été apportés :

- grâce au modèle il sera possible de mesurer les conséquences d'une ou plusieurs journées sans arrosage. Si ces conséquences sont minimales, le mode d'apport de l'eau au cours des 24h est donc assez peu important.
- les connaissances acquises dans le cadre des grandes cultures montrent que l'irrigation la plus optimale est celle réalisée le jour car cela permet de créer des conditions locales plus froides qui diminuent l'évapotranspiration. Néanmoins cette approche optimise la quantité d'eau utilisée mais pas nécessairement le coût.
- Les conséquences de variations fortes d'humidité (si on décide par exemple d'arroser beaucoup une nuit sur deux seulement) à la périphérie des billons de la couche extérieure sont mal connues.

Futures actions

Les mesures de printemps ont été discutées précédemment.

Le dernier comité de pilotage se tiendra entre fin juin et mi-juillet 2011. Il a été discuté du rendu final du projet : il s'agira d'un petit outil simple permettant d'utiliser le modèle et de faire varier les paramètres ainsi que de tester des scénarios d'arrosage. Lors de cette dernière réunion, une formation à cet outil sera réalisée.

Une présentation du travail réalisée dans le cadre du projet Arrostock sera faite sous forme d'article dans une revue scientifique et technique.