

**Faisabilité d'un couplage
entre exploitation forestière et centrale thermique
au bois.**

Alors que les interrogations autour des conséquences des fortes augmentations de rejets anthropiques de dioxyde de carbone sont au cœur de l'actualité, et qu'une gestion globale de ces rejets à l'échelle mondiale s'échafaude (protocole de Kyoto qui propose d'en contrebalancer une partie par la mise en place de puits de dioxyde de carbone, en l'occurrence, des plantations), de nombreux travaux sur la photosynthèse montrent une forte corrélation entre la vitesse de fixation du carbone, l'environnement et l'âge des arbres considérés. Contrairement aux forêts âgées, celles exploitées et dont la croissance en masse est entretenue représentent indéniablement des puits de carbone.

En outre, l'utilisation du bois en tant que source d'énergie connaît un développement récent et prometteur, notamment avec l'apparition de centrales thermiques à gazéification de la biomasse telles que celle de Güssing en Autriche.

Aussi peut-il être intéressant de se pencher sur la faisabilité d'un couplage entre une utilisation de bois en tant que combustible, et la formation de bois par fixation de dioxyde de carbone, soit d'une gestion locale des flux de carbones. Il faudrait donc envisager la mise en place d'un cycle du carbone centré sur les rejets anthropiques et leur mise à profit par la croissance végétale. Ceci implique :

- une caractérisation des termes sources et puits, de leurs limites et variations dans le temps et l'espace,
- l'étude de la faisabilité d'une gestion spatiale de ces échanges, la mise en place d'un transport approprié du dioxyde de carbone,
- puis l'intégration des besoins et impératifs de la centrale thermique d'une part, et de l'exploitation forestière d'autre part auxquels le système de transport devra répondre à long terme.

Sommaire :

- I) **Caractérisation des sources et puits de dioxyde de carbone.**
 - A) Caractérisation des besoins et produits de la centrale électrique.
 - B) Caractérisation des besoins et produits de l'exploitation forestière.
 - C) Variation dans le temps de l'absorption de CO₂.
- II) **Caractérisation et modélisation du mode de transport envisagé.**
 - A) Caractérisation physique du transport de CO₂.
 - B) Modélisation du terrain.
 - C) Modélisation du transport du CO₂.
- III) **Modélisation du couplage et intégration des variations.**
 - A) Modélisation de l'exploitation.
 - B) Réponse à une perturbation.
 - C) Bilan énergétique.

I) **Caractérisation des sources et puits de dioxyde de carbone.**

En vue de modéliser le couplage entre une exploitation forestière et une centrale électrique de gazéification de la biomasse, il est nécessaire de caractériser avec précision les productions et rejets, les besoins de la centrale envisagée, et la capacité d'absorption de l'exploitation forestière, ses besoins et sa production.

Les caractéristiques sont susceptibles de varier avec le temps, de connaître une répartition géographique variable, voire de dépendre des apports en dioxyde de carbone.

A) **Caractérisation des besoins et produits de la centrale électrique.**

Le modèle de centrale adopté est celui de Güssing, opérationnelle depuis avril 2002 (23). Cette centrale comprend un système de chauffage urbain d'une puissance de 4,5 MW, et une centrale énergétique d'une puissance de 2 MW. Cette installation fonctionne en continu et consomme 1760 kg de bois par heure. La combustion de charbon de bois dans une chambre de combustion communicant avec le lit de gazéification se déroule à 950°C, apportant l'énergie nécessaire à la gazéification par la vapeur du combustible.

Le gaz est ensuite refroidi de 850°C à 40°C, alimentant le réseau de chauffage urbain de la ville avant d'être filtré et lavé. Les résidus étant recyclés, compressés et brûlés par un moteur à gaz. Le monoxyde de carbone est ensuite éliminé par catalyse. Le flux de gaz est de 4,9 m³ par heures.

On considèrera donc une centrale thermique au bois d'une consommation horaire de 1760 kg et d'une production horaire en mètres cubes de :

H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂ O	N ₂	C ₂ H ₆
1,715 à 1,96	1,78 à 1,25	0,98 à 1,225	0,49	0,294	0,147	0,098

D'après la référence (22), 0.8% en moyenne du méthane et 1.17% de monoxyde de carbone traversent le moteur et le catalyseur. On en déduit un dégagement horaire de 2,4535 à 2,9217 m³ qui sera intégré au modèle sous une forme stochastique, et une production énergétique totale de 6,5 MW.

B) Caractérisation des besoins et produits de l'exploitation forestière.

On modélisera dans un premier temps sommairement cette exploitation, les paramètres topologiques, géographiques et l'influence l'apport de CO₂ seront étudiés plus précisément en fonction du mode de transport envisagé (qui influencera probablement ces données.)

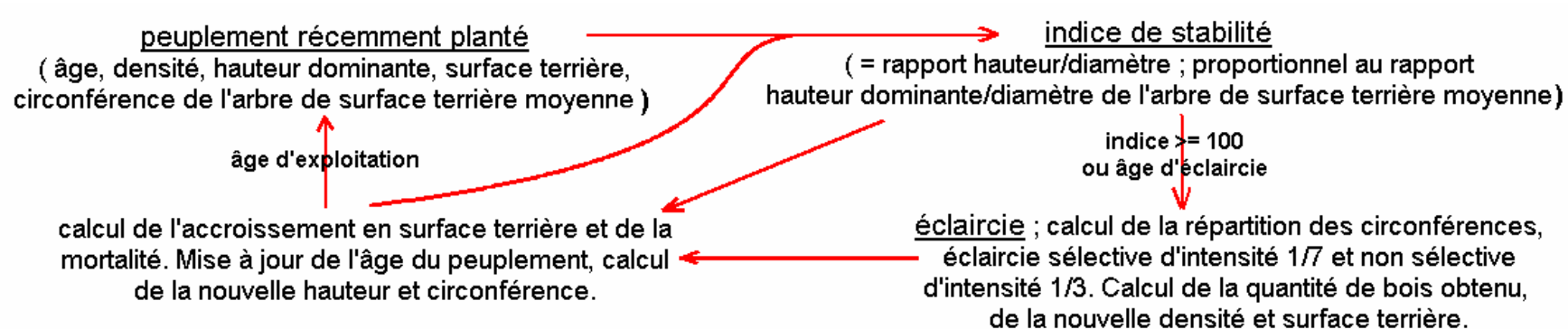
1) Choix du type d'exploitation forestière.

Le type d'exploitation forestière envisagé doit permettre de répondre au mieux aux besoins de la centrale thermique, donc être productif de façon régulière, susceptible d'absorber du dioxyde de carbone sur de longues périodes à l'échelle d'un jour et d'une année. A ces impératifs s'ajoute la complexité de l'exploitation qui devra être suffisamment limitée pour permettre une modélisation rapide sur la base d'un minimum de données. On optera donc pour un peuplement de résineux homogène, exploité en futaie régulière. Au vu de l'abondance de la bibliographie concernant l'épicéa (picea abies) et la présence de parcelles de forêt plantées exclusivement d'épicéa, propice à des mesures au sein de la forêt de Samoussy, dans l'Aisne, on considérera une telle exploitation que l'on s'attachera à modéliser. On considère un peuplement d'épicéa soumis dès l'âge de 15 ans à des éclaircies partiellement sélectives à intervalle régulier. On ajoute à ces éclaircies d'exploitations des éclaircies préventives, intervenant quand l'indice de stabilité du peuplement dépasse le seuil de 100, indiquant un risque de chablis. On favorise ainsi la croissance en largeur des tiges en partant d'un peuplement à densité forte que l'on réduit au fil de la croissance. Une fois qu'un âge propice à l'exploitation est atteint, on réalise une coupe rase pour planter de nouveaux semis et boutures.

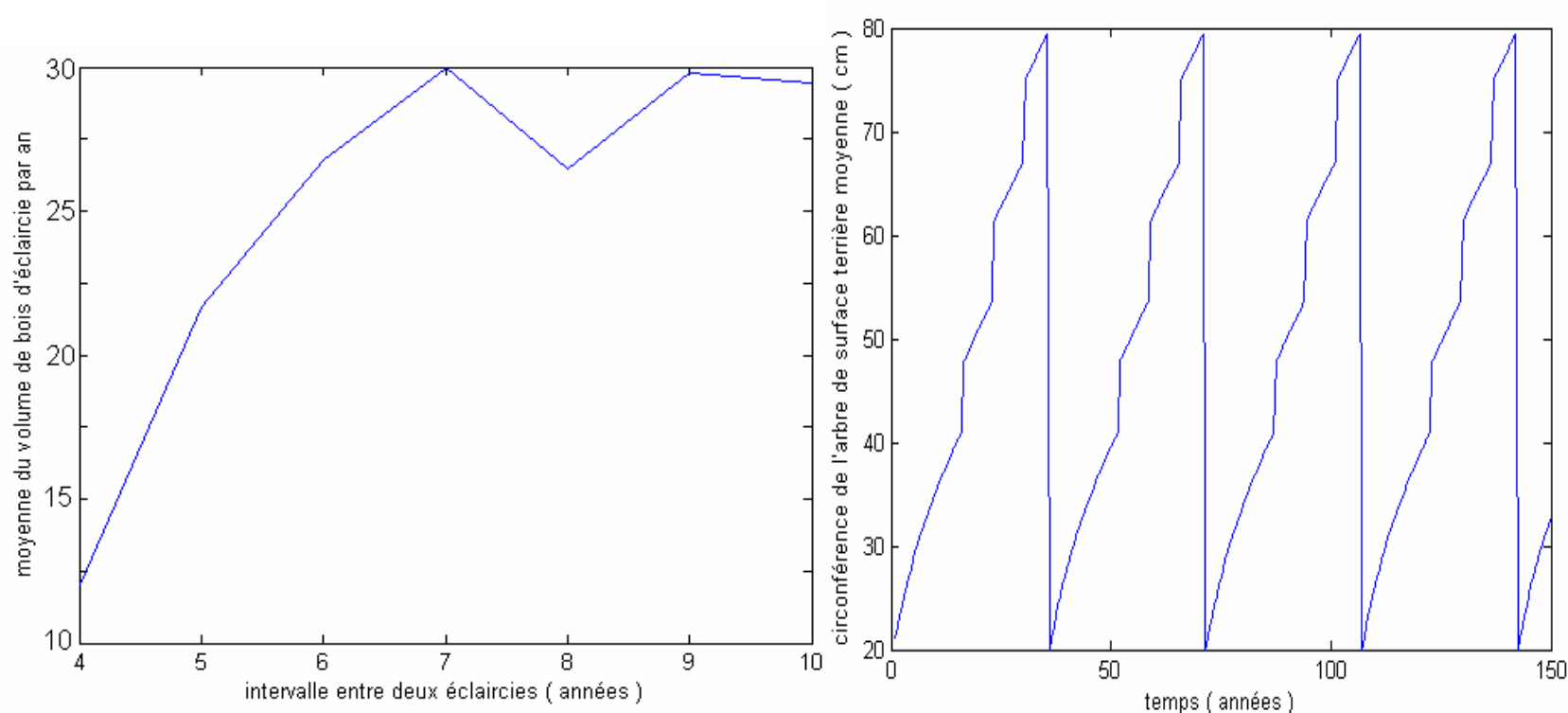
2) Modélisation de l'exploitation forestière.

On se réfère aux modèles de croissances en hauteur et d'accroissement périodique en surface terrière proposés respectivement par l'AFOCEL (1) et la faculté des sciences agronomiques de Gembloux (4).

On exprime donc pour la classe de fertilité choisie la hauteur dominante (m) comme une fonction de l'âge du peuplement, et l'accroissement en surface terrière (m²/ha/an) comme une fonction de l'âge, de la surface terrière, de la circonférence de l'arbre de surface terrière moyenne, et de la hauteur dominante estimée à 50 ans. On construit donc le schéma suivant :



On fait varier les âges d'éclaircie, et on conserve le plan d'éclaircie qui permet d'obtenir le cubage le plus important. On obtient alors les résultats suivants pour un hectare :



On constate que les éclaircies influent bien plus sur la circonférence des tiges que sur leur hauteur ; de plus, l'essentiel de la production provient des coupes à blanc et non des éclaircies préventives. Il convient donc d'optimiser l'entretien du peuplement et de favoriser au maximum sa croissance au détriment de la régularité de la production. On choisit donc un espacement de sept ans entre les éclaircies, ce qui permet une croissance en largeur optimale pour un nombre d'éclaircies maximum. On obtiendrait alors un volume annuel moyen de 35 m³ par hectare dont 5,35 m³ par éclaircie. L'exploitation aura donc une surface de 1200 hectares, soit un carré de 3,350 km de côté.

3) Caractérisation des capacités d'absorption de CO₂.

On souhaite évaluer les limites de la capacité, d'un mètre carré de forêt d'épicéa, à absorber un rejet de CO₂. On place à cette fin un dispositif dégageant du dioxyde de carbone au pied d'un épicéa situé dans la forêt de Samoussy, et un dispositif de mesure indirecte au niveau de sa cime.

La source de CO₂ est en l'occurrence une masse importante de bicarbonate de soude sur laquelle on verse goutte à goutte de l'acide chlorhydrique concentré. On suppose que la réaction de l'acide sur le bicarbonate de soude est totale, et le débit de CO₂ est donc proportionnel au débit d'acide.

La cellule de mesure consiste elle en une quantité de 500 millilitres d'une solution de soude à un pH maintenu à 10 par ajout régulier de soude soumise à une agitation.

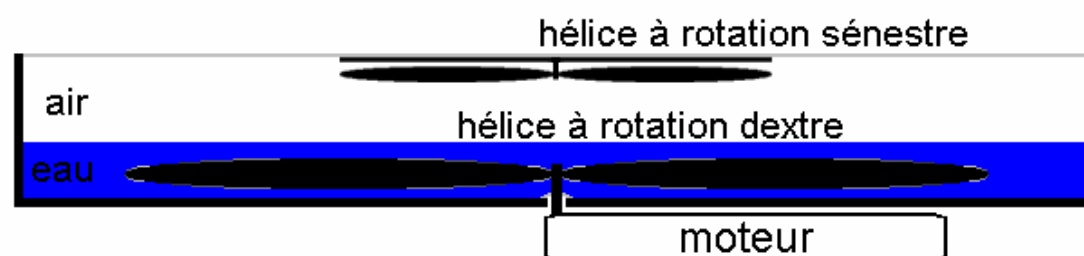
Il s'établit alors un équilibre entre la pression partielle en CO₂ de l'air et la concentration en CO₂ aqueux, d'après la loi de Henry. De plus, le CO₂ étant un diacide est présent dans la solution sous les formes HCO₃⁻ et CO₃²⁻.

On peut écrire la concentration en CO₂ au temps t ainsi (20) :

$$[\text{CO}_2](t) = ([\text{CO}_2]_{\text{initiale}} - [\text{CO}_2]_{\text{équilibre}}) \exp. \left(-\frac{t}{K} \right) + [\text{CO}_2]_{\text{équilibre}}, \text{ le coefficient } K \text{ pouvant s'écrire } \frac{\sqrt{D \cdot s}}{h}$$

avec D le coefficient de diffusion du gaz dans l'eau, h l'épaisseur de la lame d'eau, et s sa vitesse de renouvellement.

La réalisation d'un échange à contre-courant par une agitation de la couche d'eau, et de l'air en sens contraire permet d'optimiser les échanges gazeux en divisant par deux le temps de renouvellement des phases en contact. Le dispositif est donc le suivant :



On modélise donc le transfert de gaz comme précédemment. Les résultats obtenus sont comparés à des mesures de concentrations en CO₂ relevées par le dosage d'une solution laissée en milieu fermé dans une atmosphère à 600ppm (+/- 5ppm) pour trouver des résultats relativement semblables (l'écart maximum mesuré entre les résultats du modèle et des dosages est de 7,5%).

On utilise donc le modèle présenté pour évaluer les flux gazeux générés. On considère au vu des résultats que 15 minutes suffisent pour atteindre la concentration à l'équilibre.

On augmente donc progressivement le débit de CO₂ de jour, jusqu'à mesurer une augmentation de la pression partielle en CO₂ au niveau de la cime supérieure à celle obtenue de nuit. On trouve alors une capacité d'absorption limite d'un excès de 105 mL à 10 heures, 115 mL à midi, et 6 mL à 16 heures durant le mois de février. Il faudrait donc limiter le rejet de CO₂ par mètre carré à ces différentes valeurs.

C) Variation dans le temps de l'absorption de CO₂.

1) Etude des variations au cours d'un nycthémère.

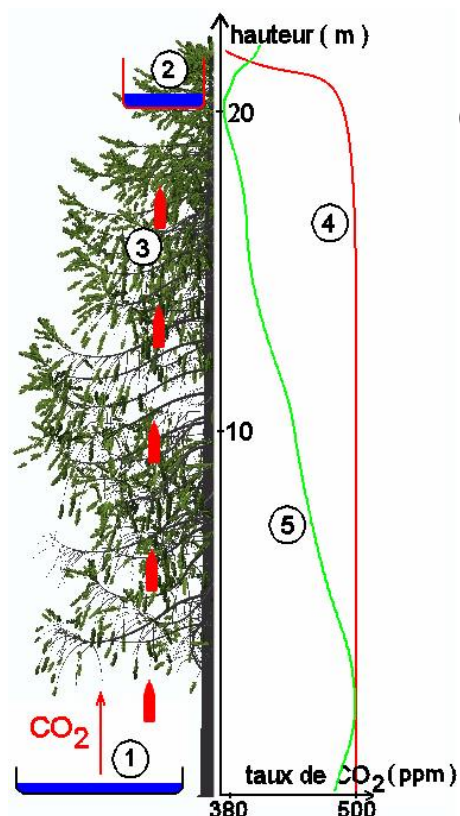
On adapte le protocole précédent pour mesurer l'absorption de CO₂ au cours du temps.

A cette fin, on modifie le dispositif de mesure afin d'en faire une source de CO₂ ; on utilise un volume de 3 litres de solution à pH 12, enrichie en CO₂ dissout.

On fixe dans un premier temps la concentration de dioxyde de carbone à un équivalent de 380ppm, ce qui permet de compenser la différence de pression partielle mesurée entre le jour et la nuit, et la perte de CO₂ par diffusion.

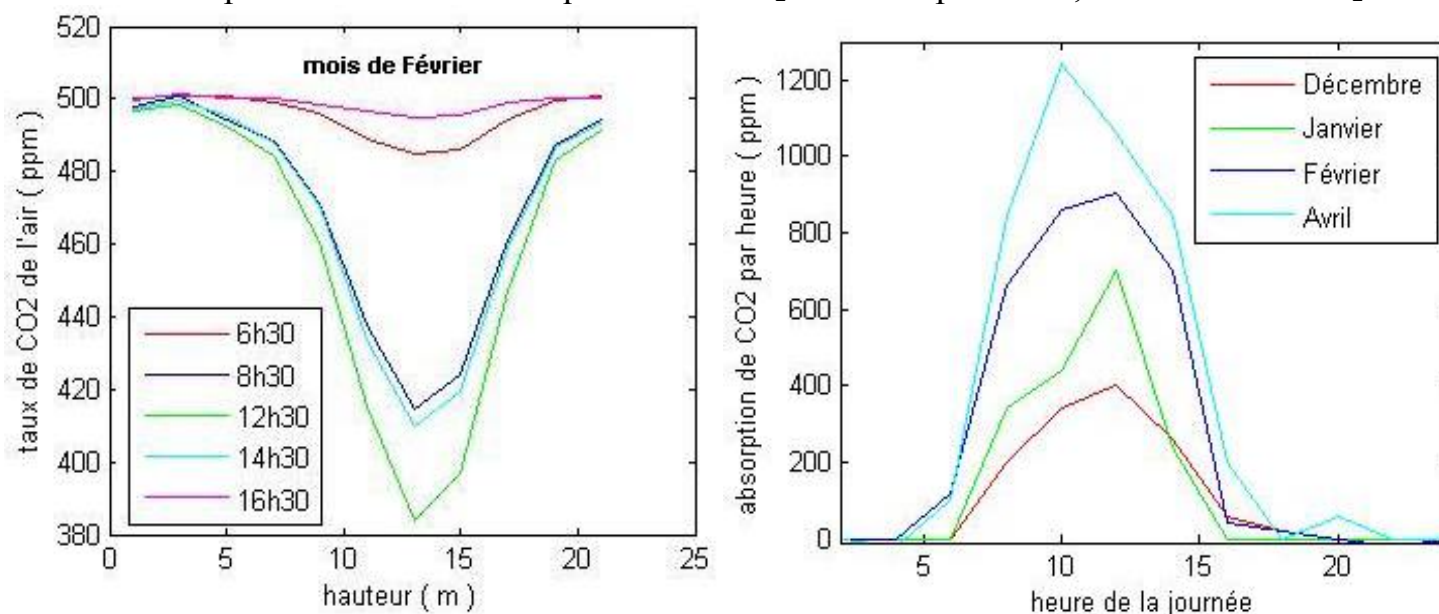
On augmente cette concentration deux heures avant la mesure pour atteindre 500ppm, et on quantifie la diminution de la pression partielle en fonction du temps, à laquelle on soustrait celle observée à minuit à -12°C, en Décembre.

Le montage réalisé est le suivant :



- (1) est une source de CO_2 tendant à porter le taux de l'air environnant à 500 ppm avec agitation d'abord, puis à 380 ppm sans agitation.
- (2) est une seconde source identique à la première
- (3) est un puit de CO_2 , c'est à dire une solution de pH 10, agitée, dont la concentration en CO_2 est fonction de la pression partielle.
- (4) représente le profil du taux de CO_2 de l'air durant le fonctionnement des sources calibrées à 500 ppm, soit sa valeur en fonction de l'altitude. Il est relevé par les dosages de prélèvements de solution des puits.
- (5) représente le profil du taux de CO_2 de l'air durant le fonctionnement des sources calibrées à 380 ppm.

On en déduit par un calcul d'aire la quantité de CO_2 absorbée par heure, soit le flux de CO_2 .



Il apparaît que ce flux peut être considéré comme nul de 18 heures à 5 heures, et qu'il connaît ensuite une augmentation, jusqu'à atteindre une valeur maximum vers midi, avant de diminuer jusqu'à s'annuler. Il y a donc succession d'une phase d'absorption et d'une phase sans absorption, voire de dégagement. Il serait donc intéressant pour minimiser les pertes de dioxyde de carbone de limiter son transport en fonction de ces résultats pour l'adapter à cette périodicité.

2) Etude des variations au cours d'une année.

On observe de même une variation à l'échelle de l'année, qu'on peut mettre en relation avec l'évolution des températures et de l'ensoleillement. En effet, une diminution considérable de l'absorption de dioxyde de carbone accompagne les baisses de températures, alors qu'une augmentation de température s'accompagne d'une augmentation de l'absorption. On supposera donc l'existence d'une périodicité telle que les variations observées représenteraient une demie période.

3) Etude de l'influence d'un apport de CO_2 .

A ces variations naturelles viendrait s'ajouter une variation anthropique, soit un apport de CO_2 . De plus, les mesures précédentes, réalisées dans une atmosphère enrichie en dioxyde de carbone ne sont réellement exploitables que s'il s'avère que cette modification a une incidence négligeable, ou quantifiable. On mesure donc les flux de CO_2 pour un taux imposé de 400ppm jour, et nuit, et pour un taux de mesure à 600ppm. On observe alors une augmentation de l'absorption de CO_2 de l'ordre de 17% à l'échelle de 72 heures durant le mois d'avril, sans pouvoir valider cette mesure trop coûteuse en dioxyde de carbone pour être réitérée. On se penche donc sur des modèles cinétiques de la photosynthèse (5). Cette dernière peut être respectivement limitée par la réaction de carboxylation, ou par la régénération de la rubisco. Dans le premier cas, on écrit :

$$A_v = V_{\text{cmax}} \frac{(C_i - \Gamma^*)}{(C_i + K_c(1 + \frac{pO_2}{K_o}))} - R_d \text{ avec } V_{\text{cmax}} \text{ la vitesse maximum de carboxylation et } R_d \text{ le taux de respiration}$$

foliaire ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), C_i la concentration intracellulaire en CO_2 , Γ^* le point de compensation, K_c et K_o les constantes de Michaelis pour le CO_2 et l' O_2 , rendant compte respectivement de la réaction de carboxylation,

et de la photo-respiration. On dérive A par rapport à C_i , et on trouve : $V_{\text{cmax}} \frac{\Gamma^* + K_c(1 + \frac{pO_2}{K_o})}{(C_i + K_c(1 + \frac{pO_2}{K_o}))^2} > 0$. Donc

l'absorption de CO_2 augmente avec C_i , qui est directement liée à $p\text{CO}_2$. On trouve un résultat semblable dans le cas d'une cinétique déterminée par la régénération de la rubisco. Le tracé du rapport de la vitesse d'absorption de CO_2 à la concentration $C+dC$ sur celle à C en fonction de dC et de la température donne d'après ce modèle l'influence d'un apport en CO_2 . On constate une augmentation moyenne de l'ordre de 4% sur un an, résultat pouvant cependant être remis en cause à long terme par une variation de la conductance stomatique.

L'absorption de CO_2 varie donc dans le temps de façon périodique ; il faut donc envisager d'adapter l'apport aux capacités d'absorption. De plus, cet apport doit être réparti d'une façon la plus homogène possible sur la surface boisée considérée.

II) Caractérisation et modélisation du mode de transport envisagé.

On ne peut bien entendu pas envisager un transport par un système de canalisation étant donné la surface à desservir, et la nécessité d'un stockage important, le tout pour un coût de mise en pace et d'entretien minimum. Il paraît de même hasardeux d'acheminer le dioxyde de carbone sous forme gazeuse, par voie aérienne, ce qui aurait vraisemblablement pour effet d'augmenter les pertes à l'échelle de l'exploitation.

Reste donc la possibilité d'un transport souterrain sous forme dissoute, et la mise à profit de structures susceptibles de guider, de stocker, de ralentir ou accélérer localement le CO_2 .

On se placera donc au niveau d'un site à structure géologique et hydrodynamique simple et accessible, présentant des possibilités d'acheminement comme de stockage. On choisit un bassin versant présentant une succession de nappes phréatiques sableuses du Thanétien et de l'Yprésien.

A) Caractérisation physique du transport de CO_2 .

Ce transport est un flux multiphasé en milieux hétérogène. Il faut donc décrire chaque phase, et identifier les éventuelles relations de l'une à l'autre (10).

1) Flux d'eau au sein d'un sol.

Le dioxyde de carbone étant soluble, l'existence d'une relation étroite entre les flux de ce dernier, et l'hydrodynamique du terrain est probable. On décrit donc le comportement d'une phase aqueuse en milieux poreux. Les flux d'eau en milieu poreux seront décrits par les débits, que la loi de Darcy permet de calculer.

Cette dernière exprime le débit volumique par unité de surface sous la forme suivante : $\vec{Q} = - \frac{K}{\eta} \text{grad}(C)$

avec K le tenseur de perméabilité du sol (m^2), η la viscosité du fluide (Pl), et $C = P - \rho g z$ la charge (bar). De plus, la perméabilité effective dépend du taux d'humidité de la roche. On choisit pour exprimer cette

dépendance le modèle de Van Genuchten (13) : $K(\theta) = K_s \sqrt{S_e} (1 - (1 - \sqrt[m]{S_e})^m)^2$ avec K_s la perméabilité à saturation, et $S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$ le quotient du taux d'eau déplacée par le taux d'eau déplaçable.

2) Flux de soluté au sein d'un sol.

Un soluté au sein d'une solution en mouvement est diffusé de zones concentrées vers des zones moins concentrées, et est dispersé, c'est-à-dire entraîné, par le flux du solvant.

On rend compte de la somme de ces deux flux dans la forme différentielle suivante : (en projection sur l'axe des x) : $\frac{\partial C}{\partial t} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} + D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ (10) avec $\vec{v} = \frac{\vec{Q}}{n_e}$, la vitesse de l'eau dans les pores et $D = D_o \frac{\varepsilon^{2,5}}{n_e V}$, soit le coefficient de diffusion dans l'air multiplié par une puissance du volume d'air divisé par le volume de porosité (14).

3) Flux de gaz au sein d'un sol.

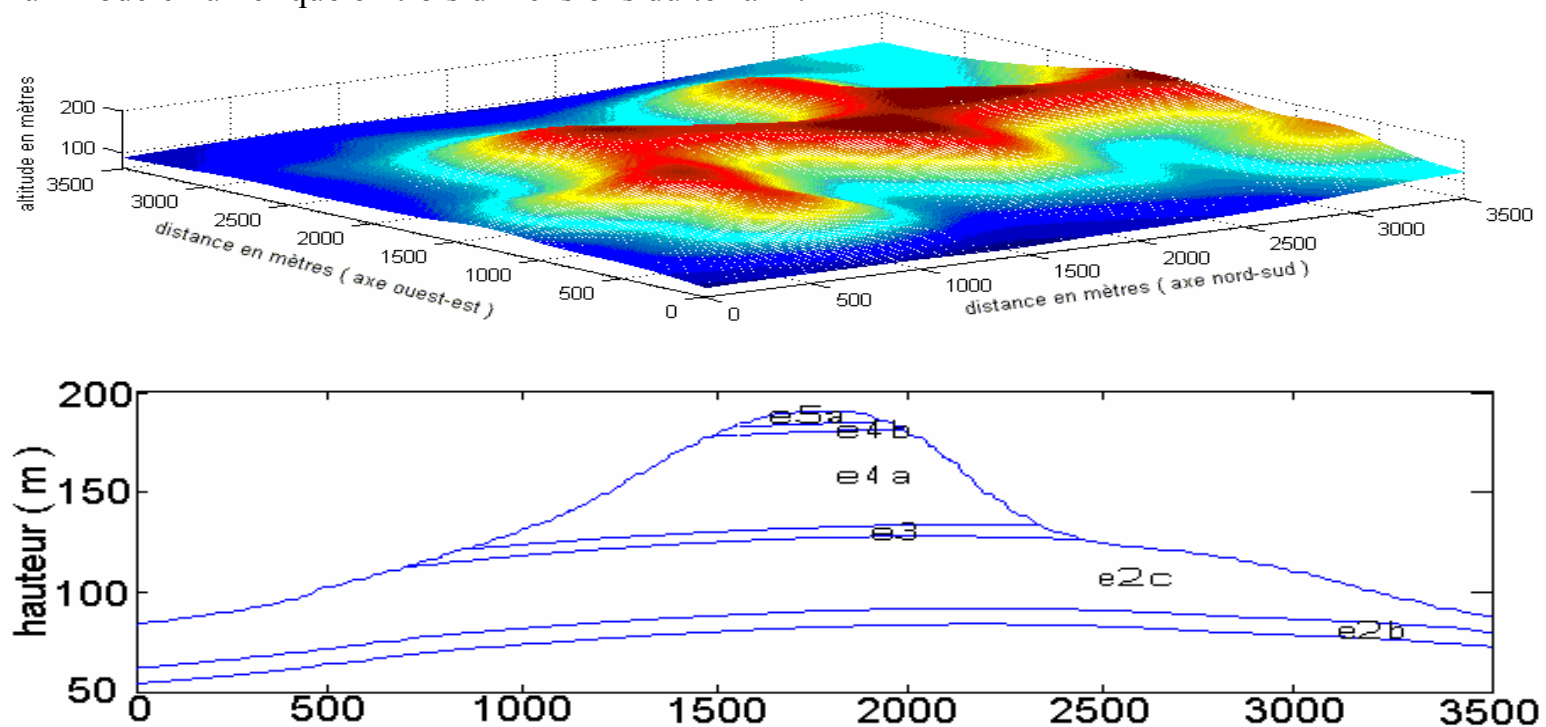
On utilise pour les gaz une écriture généralisée de la loi de Darcy, soit : $\vec{Q} = -\frac{K}{\eta} \vec{\text{grad}}(P - \rho g z)$ avec η la viscosité du gaz (Pl). On utilise pour exprimer K le modèle de Corey : $K(\theta) = K_s S_e^n$ avec S_e similaire à la saturation effective écrite précédemment (références 15 à 19 pour les propriétés du CO_2). De plus, le gaz est susceptible de se dissoudre, ou de se dégazer. On décrit ces phénomènes à l'aide de la loi de Henry : $[\text{CO}_2]_{\text{eq}} = p\text{CO}_2 \phi(P) K(P)$ avec ϕ la fugacité du gaz, et K un coefficient. On obtient donc un système de formes différentielles qu'on est incapable de résoudre de façon analytique. Il est donc nécessaire de se rapporter au terrain, et d'y appliquer une méthode d'étude différente.

A) Modélisation du terrain.

La non linéarité des équations qui décrivent les phénomènes étudiés rend difficile toute modélisation analogique du fait de l'impossibilité d'une réduction d'échelle simple. On a donc recours à une modélisation numérique, soit la résolution par discrétisation du système de formes différentielles.

1) Modélisation de la structure du terrain.

Cette modélisation de la topographie et de la géologie du terrain est réalisée à l'aide d'un programme Matlab capable de lire un set de cartes géologiques et topographiques puis de renvoyer des matrices correspondant à des surfaces passant au plus près de points de repères, ayant les pentages appropriés, les profondeurs données en certains points par des forages. L'utilisateur peut ensuite associer à chaque couche géologique des caractéristiques mesurées (perméabilité à saturation, porosité et masse volumique) et obtenir un modèle numérique en trois dimensions du terrain :



On observe ici une superposition de 4 nappes phréatiques en coupe est-ouest, l'une d'entre elle, plus profonde et de très fort volume, non représentée.

Les perméabilités sont mesurées localement par des tests de percolation, la densité, la porosité totale et résiduelle par pesées de prélèvements.

2) Discrétisation.

On discrétise les relations précédemment énoncées. A cette fin, le terrain est subdivisé en 5.10^5 nœuds représentant des volumes cubiques. On veut substituer à l'étude de formes différentielles par trop complexes un schéma itératif ou l'on modélise des flux continus par des flux ponctuels nombreux.

Les dérivées partielles sont donc approchées par différences finies comme suit (10) :

$$\frac{\partial C}{\partial t} \cong \frac{\Delta C}{\Delta t} = \frac{C_{x,t} - C_{x,t-\Delta t}}{\Delta t}, \quad \frac{\partial C}{\partial x} \bigg|_x \cong \frac{C|_{x+\Delta x} - C|_{x-\Delta x}}{2\Delta x} \text{ et :}$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \cong \frac{\frac{\partial C}{\partial x} \big|_{x+\Delta x/2} - \frac{\partial C}{\partial x} \big|_{x-\Delta x/2}}{\Delta x} \cong \frac{\frac{C|_{x+\Delta x} - C|_x}{\Delta x} - \frac{C|_x - C|_{x-\Delta x}}{\Delta x}}{\Delta x} \cong \frac{C|_{x+\Delta x} - 2C|_x + C|_{x-\Delta x}}{\Delta x^2}$$

On peut alors calculer les flux d'eau, de soluté et de gaz à chaque nœud pour chaque cycle.

Cependant, la conservation de la masse doit être respectée à chaque nœud, aussi le pas de temps doit-il être choisi en fonction des débits et valeurs aux nœuds. Donc, plus les débits sont importants, plus il faut faire d'itérations pour modéliser un même intervalle de temps.

On diminue donc les débits par le recours à un maillage dynamique, se resserrant ou se dilatant selon qu'une zone nécessite un entre-nœud plus ou moins court.

3) Validation du modèle.

A défaut de valider le modèle par l'étude d'un transport de CO_2 concrètement difficilement réalisable et quantifiable à petite échelle, on l'utilise dans la modélisation d'un transport de nitrates au sein du bassin versant suite à une forte pluie peu après un épandage d'engrais sur un champ surplombant l'ensemble. On peut suivre concrètement ces ions nitrates par une série de dosage d'eau trouvée en aval dans des puits ou sources. Le dosage étant particulièrement imprécis, on s'attache à suivre la progression d'un front d'une concentration dépassant un seuil fixé.

On constate que l'ordre d'apparition du front aux différents points de mesure est parfaitement respecté, cependant le modèle numérique sous-estime le temps d'attente d'un facteur de l'ordre de 4% maximum pour les puits des terrains Yprésiens, et de l'ordre de 6% maximum pour les sources et puits des terrains du Thanétien, ce facteur semblant croître avec la distance à la source de nitrate, et avec la hauteur de couches d'argile traversées, témoignant probablement de phénomènes d'adsorption ou de réactions, négligées à tort, utilisant les nitrates au sein des couches superficielles.

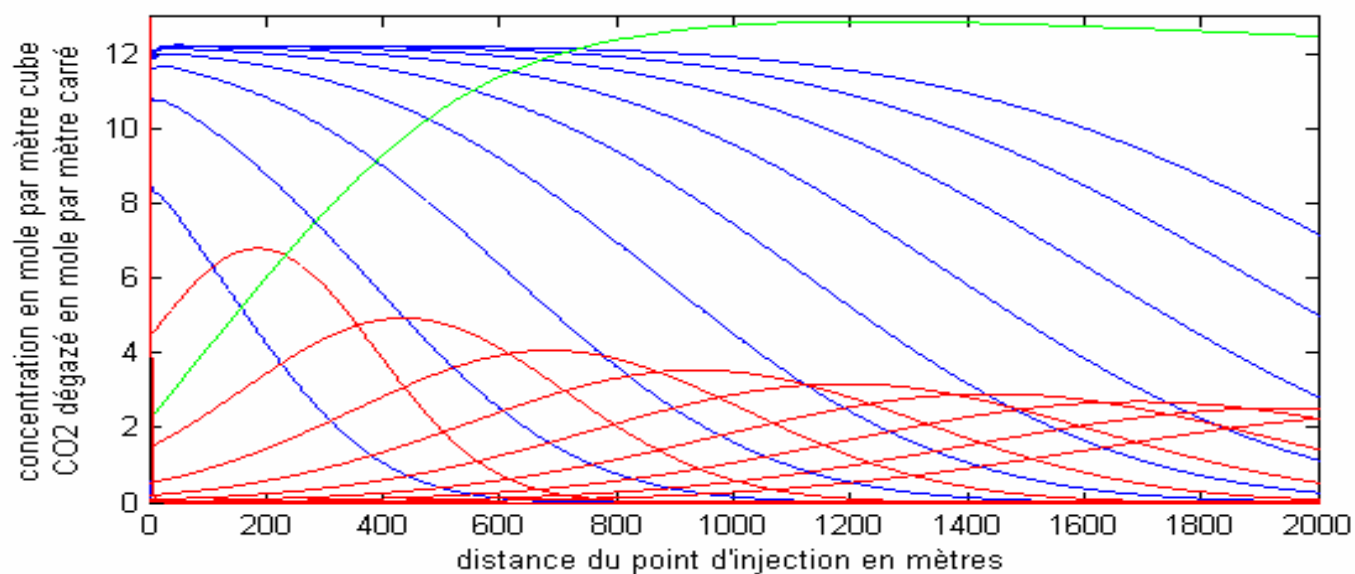
On valide ensuite la prise en compte du dégazage en milieux poreux par un dosage indirect du CO_2 de solutions en présence de sable et d'argile.

A) Modélisation du transport du CO_2 .

Les bases de la modélisation numérique étant maintenant posées, on simule sur ce système une pluviométrie intégrant les valeurs mensuelles de 2001 à 2003 de façon stochastique, en l'occurrence par l'utilisation d'une loi de Poisson, et une injection de CO_2 à hauteur de 2,4535 à 2,9217 m^3 par heure simulée à l'aide d'une loi uniforme. On simule une injection prolongée en différents points pour s'intéresser aux régimes transitoire ainsi qu'au régime permanent sur la totalité du terrain. La présence de trois niveaux de nappes exploitables offre deux possibilités ; celle d'injecter du dioxyde de carbone au niveau de la nappe la plus inférieure, soit celle des argiles de Vaux sous Laon, ou celle d'en injecter à différents niveaux pour moduler plus précisément les dégagements de CO_2 .

1) Injection de dioxyde de carbone dans la nappe inférieure.

On peut envisager d'injecter le CO_2 sous forme dissoute au sein de la nappe phréatique, ou sous forme gazeuse sous le mur de la nappe. Modélisons séparément ces deux possibilités. L'injection a lieu dans chacun des cas aux points les plus hauts des limites de la couche utilisée. On obtient dans le cas d'une injection au sein de la nappe sous forme dissoute, sur le segment [AB] :



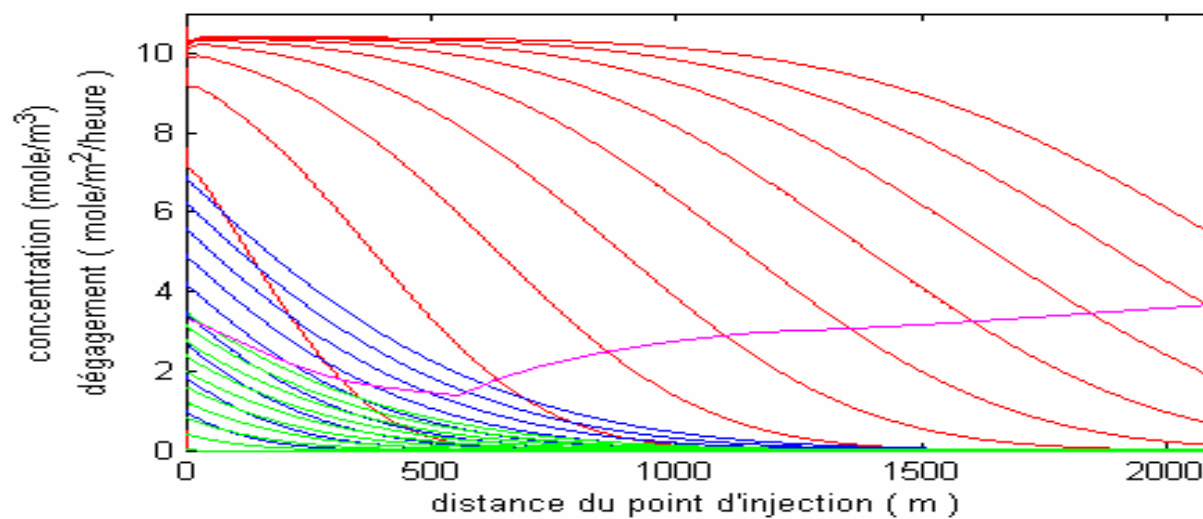
le tracé rouge représentant les concentrations à des intervalles de temps d'une heure suite à une injection ponctuelle, et le tracé bleu lors d'une injection continue. Le régime permanent apparaît pour $t = 9$ heures sur les 600 premiers mètres. Le tracé vert représente le dégagement de CO_2 au niveau du sol 6 heures après le début de l'injection. Le dégagement semble considérablement diminué par la présence des couches argileuses supérieures.

2) Injection de dioxyde de carbone dans chaque nappe phréatique.

On tente donc de remédier à l'insuffisance du dégazage dans les zones où les deux couches argileuses supérieures sont présentes en injectant du CO_2 aux trois niveaux.

Un réseau neuronal sommaire ajuste les quantités relatives injectées pour chaque nappe de façon à obtenir un dégagement le plus homogène possible au niveau de la surface.

On obtient les résultats suivants avec en rouge, les concentrations dans la nappe inférieure, en bleu, dans la nappe moyenne, et en vert, dans la nappe supérieure. Le tracé violet représente le dégazage de CO_2 au niveau du sol après 5 heures.



On obtient donc un flux relativement homogène dans l'espace, et mettant 2 heures avant d'atteindre 15% de sa valeur maximale, et 4 heures 30 pour atteindre cette dernière sur l'ensemble du terrain. On a donc un temps de mise en place du dégagement gazeux de CO₂ de 2 heures 30, l'interruption du flux donnant à 3% de différence près les mêmes profils de variations que ceux de la mise en place. On peut donc par ce système adapter les flux de dioxyde de carbone aux variations circadiennes de l'absorption par les végétaux. Il faut cependant à cette fin envisager un mode de stockage des rejets de la centrale thermique.

3) Mise au point d'un système de stockage du CO₂.

On envisage d'exploiter la géométrie des murs des nappes en vue de stocker un excédent de dioxyde de carbone sous forme gazeuse. On simule une injection de rejets gazeux au niveau de la face inférieure des trois murs de nappes et on utilise cette quantité de CO₂ comme un traceur qu'on suit au cours du temps. La capacité de stockage théorique est comprise entre 10⁶ et 10⁸ mètres cubes.

On effectue un premier test avec un volume total de 5000 m³, intégralement stocké sous la couche des argiles de Vaux-sous-Laon, puis on réitère l'opération avec des volumes croissants. Pour les volumes inférieurs à 12000 m³, le pourcentage de CO₂ non absorbé par jour décroît de façon quasiment linéaire de 7% à 3% sur deux mois. Ce pourcentage diminue globalement de 0.8 si l'on tient compte des deux murs supérieurs. Ce mode de stockage permettrait donc de limiter efficacement les pertes de CO₂ durant la nuit mais se révèle insuffisant à l'échelle d'une saison, ne pouvant donc jouer en hiver qu'un rôle de tampon, limitant le dégagement de CO₂ journalier à 145% de la capacité d'absorption journalière en décembre. De plus, il n'est alors plus modulable à l'échelle de la journée.

L'utilisation de nappes phréatiques est donc envisageable en tant que moyen de transport des rejets de dioxyde de carbone, malgré des imperfections majeures, particulièrement durant l'hiver : la gestion des flux de carbone nécessitera alors un système de modulation supplémentaire. Il reste à exploiter ces capacités, et à intégrer les variations circadiennes de l'absorption de CO₂ dans le système de modulation des rejets anthropiques.

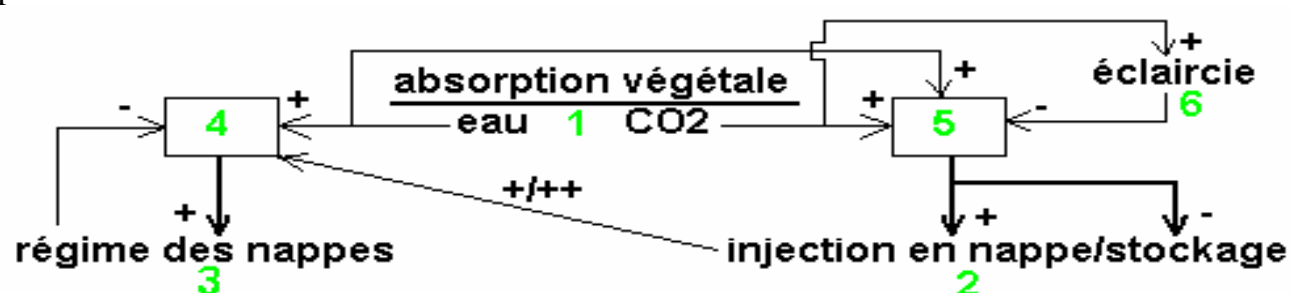
III) Modélisation du couplage et intégration des variations.

On utilisera à cette fin un système adaptant les différents paramètres aux besoins évalués, soit un réseau neuronal sommaire.

A) Modélisation de l'exploitation.

1) Adaptation des différents paramètres au cours du temps.

On se penche maintenant sur le système entier, soit l'exploitation forestière, le système de transport du CO₂, et la centrale thermique. Les paramètres à ajuster sont les quantités d'eau et de CO₂ injectée, et les paramètres à considérer sont les dégagements de CO₂ en surface, la capacité d'absorption en eau et en CO₂ des peuplements forestiers. On réalise donc le réseau neuronal suivant :

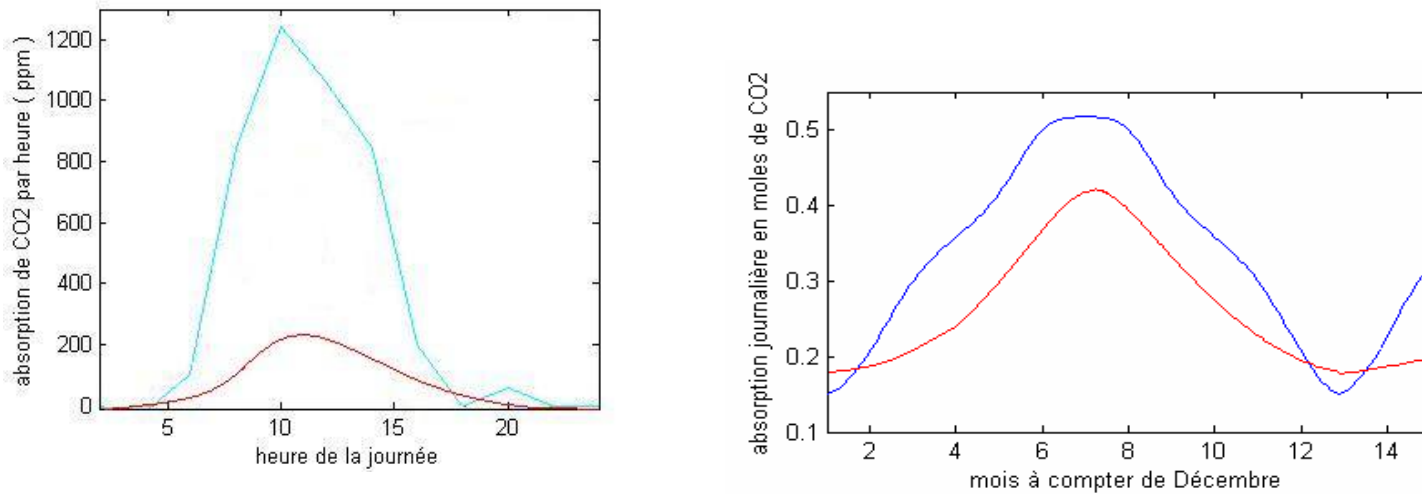


Les groupes de neurones 1, 2, 3 et 6 sont des neurones récepteurs, qui informent les groupes 4, 5 et 7 de modifications à intégrer. Ainsi, un éloignement de valeurs d'index au temps t provoque une action sur un paramètre de l'exploitation de façon à atténuer la différence aux temps $t+1$ et suivants. En outre, les différents

systèmes sont reliés de façon cohérente. Ce système permet donc de régler les quantités d'eau et de CO₂ injectées de façon à se rapprocher d'un optimum.

2) Fonctionnement du modèle sur un jour.

On fait fonctionner le modèle obtenu sur un cycle circadien complet avec des données correspondant au mois d'avril :



En bleu : absorption de CO₂ par heure pour un jour à gauche, et absorption potentielle d'un excès de CO₂ par jour, par mètre carré, en moles à droite. Les courbes rouges représentent le dégagement de CO₂ par mètre carré au niveau du sol, respectivement par heure et par jour, en mole.

3) Fonctionnement du modèle sur un an.

De même, mais à une échelle mensuelle, en supposant que les valeurs de l'absorption de CO₂ des mois de mars, juin, juillet, août, septembre, octobre et novembre peuvent être extrapolées à l'aide de celles des mois étudiés ; confère graphique précédent.

On observe, conformément aux remarques faites à ce propos un excès de dégagement gazeux sur les mois de novembre, décembre et janvier.

Le fonctionnement de l'exploitation est à l'exception de cette perte optimale selon le modèle numérique.

B) Réponse à une perturbation.

Une telle exploitation est soumise à des risques naturels, tels que le risque de chablis, d'incendies, ou tout simplement de dysfonctionnement de la gestion. Il importe donc d'y apporter les bases d'une flexibilité suffisante pour développer une réponse à une perturbation.

1) Mise en place d'une réponse à court terme.

Un réseau neuronal responsable de la gestion du système a déjà été mis en place.

On en élabore donc une nouvelle version capable de lancer une réaction importante à court terme et de proportionner cette dernière à l'ampleur de la perturbation.

On réduit donc la taille des groupes de neurones pour en optimiser le fonctionnement. Pour ce faire, on assigne non plus un doublet de neurones à chaque parcelle, mais l'ensemble des parcelles touchées par une perturbation donnée à un doublet de neurones.

Ainsi, la gestion de la perturbation, et des répercussions de la réaction sera échelonnée dans le temps et prise en charge par des neurones différents, ce qui permet un suivi globalement peu précis, mais rapide.

De plus, la pondération de l'action de chaque neurone est fonction de l'importance relative de la perturbation.

2) Mise en place d'une réponse à long terme.

Une réponse à long terme peut être mise en place, notamment par une action sur le régime des nappes phréatiques, et sur les peuplements forestiers.

Cette réponse n'est pas envisagée dans le cadre du modèle faute de données sur les suites à long terme d'une perturbation au sein d'un écosystème forestier.

C) Bilan énergétique.

Comparons le mode de transport choisi avec une simple dispersion aérienne : les pertes de CO₂ modélisées sur un an sont, au niveau de l'exploitation avec le modèle envisagé, de 12%. Celles modélisées avec un taux de 350 ppm le jour, et 380 la nuit à 25 mètres d'altitude, et avec un vent d'orientation quelconque et d'une vitesse de 20km/h sont de l'ordre de 75%. De plus, l'augmentation de la fixation de carbone suite aux rejets de CO₂ serait à l'année de l'ordre de 4% d'après le modèle de photosynthèse ébauché précédemment. L'observation des variations des hauteurs et circonférences d'épicéas d'une même parcelle selon l'éloignement d'une autoroute montre que la proximité d'une source régulière et durable de CO₂ favorise la croissance, donc le rendement des machines d'exploitation forestière. On peut donc s'attendre, pour autant que cette augmentation de l'absorption soit durable, et compense le coût d'injection du CO₂, à une augmentation de la rentabilité de l'exploitation forestière.

Il est donc possible, d'après ce modèle numérique, de mettre en place un couplage entre une exploitation forestière d'épicéas, et une centrale électrique au bois par la mise à profit d'une structure géologique favorable à un transport souterrain. Cependant, l'intérêt d'une telle exploitation reste incertain étant donné la difficulté de s'assurer du fait que les phénomènes biologiques exploités soient durables et n'aient pas de répercussions négatives à long terme. L'aspect sylvicole mérite également d'être approfondi, tant à propos des conséquences sur le sol, la santé des peuplements d'une telle exploitation que de la compatibilité entre l'exploitation forestière et les modifications du régime des nappes phréatiques envisagées.

De plus, les modèles utilisés sont tous sans exceptions des approximations et le modèle numérique ainsi construit n'a pas de valeur prédictive sûre.

Il n'en reste pas moins un possible outils de décision, et la base possible d'un nouveau modèle plus précis et complet, dont une validation analogique sérieuse et précise permettrait d'évaluer le degré de précision pour en faire un outil intéressant. On ne peut donc pas à l'issue de ce travail affirmer qu'un tel type d'exploitation est possible et rentable, mais il en ressort des indices d'un intérêt sur le plan écologique, une augmentation de l'efficacité de forêts en tant que puits de carbone étant envisageables.

Bibliographie :

- 1) *Pour une sylviculture dynamique de l'épicéa commun*, AFOCEL
- 2) *Transpiration of mature stands of spruce (Picea abies (L.) Karst.) as estimated by the tree-trunk heat balance method* J. CERMAK & J. KUCERA
- 3) *Un modèle de gestion informatisé pour les plantations d'épicéa commun en Ardenne belge*, Les cahiers forestiers de Gembloux
- 4) *Biometeorology, ESPM 129*, polycopiés de cours de Dennis Baldocchi, Ecosystem Science Division Department of Environmental Science, Policy and Management, University of California, Berkeley
- 5) *gross primary productivity in duke forest: modeling synthesis of co2 experiment and eddy-flux data*, Ecological Applications, 11(1), 2001, pp. 239-25 2001 by the Ecological Society of America
- 6) *Tree response to rising CO₂*, R.J. Norby et al.
- 7) Météo France, centre départemental de l'Aisne (aérodrome de Saint Quentin Roupy), contacté par téléphone (au 03 23 50 81 81) puis par Internet (cdm02@meteo.fr).
- 8) Carte géologique obtenue sur : <http://infoterre.brgm.fr/>
- 9) *The Handbook of groundwater Engineering*
- 10) *A fast algorithm for the estimation of the equivalent hydraulic conductivity of heterogeneous media*, WATER RESOURCES RESEARCH, volume 36, numéro 12, pages 3567 à 3580, décembre 2000
- 11) *Comparaison entre différentes formulations de conductivité équivalente en milieu poreux non saturé*, publication de B. Belfort, F. Lehmann et Ph. Ackerer.
- 12) *Improved Prediction of Unsaturated Hydraulic Conductivity with the Mualem-van Genuchten Model*, Marcel G. Schaap et Feike J. Leij
- 15) *Predicting the Gas Diffusion Coefficient in Repacked Soil: Water-Induced Linear Reduction Model*, P. Moldrup, T. Olesen, J. Gamst, P. Schjønning, T. Yamaguchi, et D. E. Rolston
- 16) *The transport properties of Carbon dioxide*, V. Vesovic et W.A. Wakeham
- 17) *The solubility of carbon dioxide in water at low pressure*, Carroll, Slupsky et Mather
- 18) *A new equation of state for Carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100 K at pressures up to 800 Mpa*, R. Span et W. Wagner
- 19) *The viscosity of Carbon dioxide*, A. Fenghour et W.A. Wakeham
- 20) Karsten Pruess, communication personnelle.
- 21) *Modelling and Simulation of CO₂ Release in Multiple-Effect Distillers for Seawater Desalination*, chapitre 3, Aiman Eid Al-Rawajfeh
- 20) *Capture par adsorption de CO₂ dans des gaz de centrales thermiques et leur injection en puits de pétrole*, D. Tondeur (http://energie.insa-lyon.fr/rapport/PRI/PRI_10-1.pdf).
- 21) *CO emissions from gas engines operating on biomass producer gas*, Jesper Ahrenfeldt, Torben Kvist Jensen, Ulrik Henriksen, Jesper Schramm and Benny Gøbel, Biomass Gasification Group, Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark
- 22) *Dossier cogénération*, Thomas Elsenbruch, Bois énergie N°1/2003.