

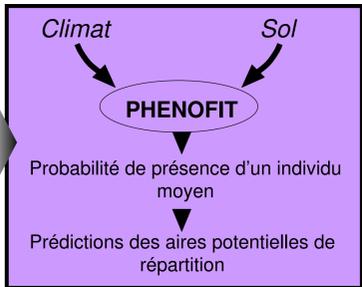
PHENOFIT : un modèle mécaniste pour simuler la répartition d'espèces d'arbres nord-américains

Introduction

Quels sont les facteurs qui délimitent la distribution géographique des espèces, et quels en sont les mécanismes sous-jacents ? Si ces questions fondamentales furent à l'origine de l'écologie et de la biogéographie, elles apparaissent aujourd'hui encore plus cruciales dans le contexte des changements globaux qui affectent la biosphère. Pour expliquer la répartition d'une espèce, il faut d'abord estimer sa répartition potentielle, c'est-à-dire l'ensemble des zones où les individus de l'espèce peuvent survivre et se reproduire sous l'effet des seules contraintes abiotiques. Le climat a été identifié comme la contrainte majeure aux échelles continentale et régionale. La relation entre conditions climatiques et distribution est ainsi à la base de nombreux modèles statistiques (modèles dits "de niche"), qui sont actuellement utilisés pour prédire les répartitions actuelles et futures d'un grand nombre d'espèces. Ce type de modèle est en effet rapide à développer. Cependant, les modèles de niche ne permettent pas d'identifier clairement les processus impliqués dans la répartition des espèces, et les incertitudes quant à leurs prédictions peuvent être très importantes. Ici, nous présentons les résultats de PHENOFIT, un modèle basé sur des processus biologiques, sur la simulation de la répartition actuelle de 15 espèces d'arbres nord-américains des zones tempérée et boréale.

PHENOFIT

PHENOFIT (Chuine et Beaubien 2001) est un modèle mécaniste qui fonctionne à l'échelle de l'espèce. En un lieu donné, caractérisé par ses conditions climatiques et de sol, il permet de calculer une probabilité de présence d'un arbre en estimant la **valeur sélective** d'un individu adulte moyen. Le principe de PHENOFIT est la synchronisation du cycle annuel de développement d'un individu (c'est-à-dire ses événements phénologiques : débournement, floraison, maturation des fruits, sénescence) avec les variations saisonnières du climat. Il simule des aires **potentielles** de répartition car les interactions biotiques ne sont pas prises en compte.



5 Modèle de la simulation de la proportion de fruits matures

La proportion de fruits arrivant à maturité suit une loi normale $N(E_c, \sigma_m)$
 σ_m , écart-type tel que l'écart entre la date de maturation du premier et du dernier fruit soit d'un mois.
 E_c , énergie thermique moyenne calculée dans le modèle 3.
 $I_r = \sum_{t_f}^t \frac{1}{\sigma_m \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t - E_c)^2}{2\sigma_m^2}}$

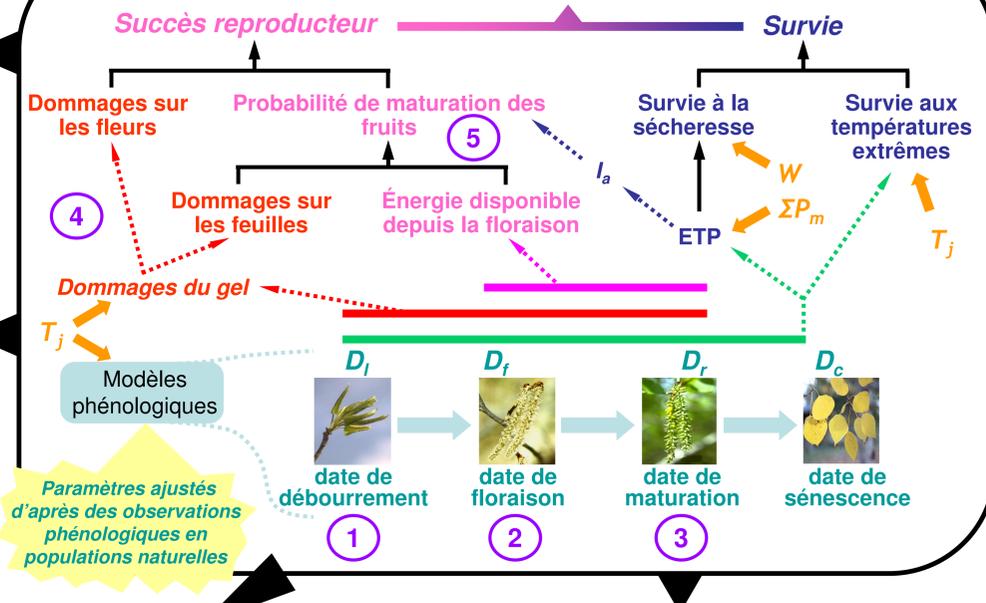
4 Modèle de Leinonen (1996)

La capacité de résistance au gel (R) des organes est fonction de la température, la photopériode et du stade de développement.
 Estimation de la proportion P d'organes endommagés (selon un modèle logistique) :
 $P = \frac{1}{1 + e^{B(R - T_j)}}$
 T_j température minimale journalière
 B pente de la courbe logistique
 $B = a + b \cdot e^{R^2}$

1 2 Modèles de date de débournement et floraison

Ces deux modèles fonctionnent sur le même schéma, seuls les valeurs de paramètres diffèrent.
 (Paramètres : a, b, c, d, e, C*, F*)
 1/ La levée de dormance intervient lorsque l'état de développement S_c atteint un seuil critique C^* :
 $S_c = \sum_{t_0}^t R_c(T_i) = C^*$
 Le stade de développement au temps t pendant la phase de dormance est le cumul des taux de développement journaliers R_c (fonction de la température) :
 $R_c(T_i) = \frac{1}{1 + e^{a(T_i - c) + d(T_i - b)}}$
 2/ Le débournement ou la floraison intervient lorsque le stade de croissance S_f du bourgeon atteint la valeur seuil F^* :
 $S_f = \sum_{t_1}^t R_f(T_i) = F^*$
 Le stade de croissance au temps t pendant la phase de quiescence est le cumul des taux de croissance journaliers R_f (fonction de la température) :
 $R_f(T_i) = \frac{1}{1 + e^{e(T_i - f)}}$

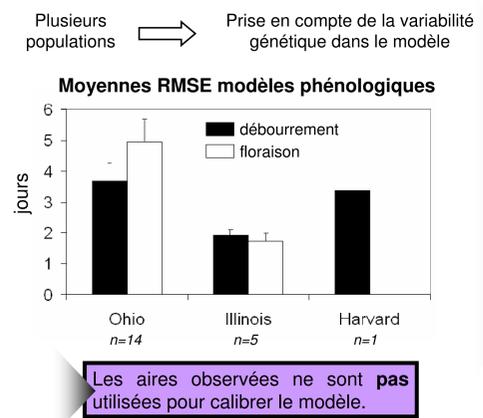
Probabilité de présence



3 Modèle de date de maturation des fruits

La maturation des fruits se fait selon deux phases :
 1/ Élongation cellulaire :
 Taux d'élongation fonction de la température accumulé jusqu'au seuil critique :
 $F_c = \sum_{t_2}^t \frac{1}{d_f + e^{(T_i - p)}}$
 2/ Accumulation des photo-assimilats :
 Taux d'accumulation, fonction de l'activité photosynthétique de la plante mère (P_m) et de sa proportion de feuilles synthétisantes (I_f), et de l'indice hydrique (I_h) :
 $R'_{f_i} = P_m(T_{0,i}, t) I_f \frac{1}{1 + e^{-10(I_i - I_{50})}}$

1/ Validation des modèles phénologiques

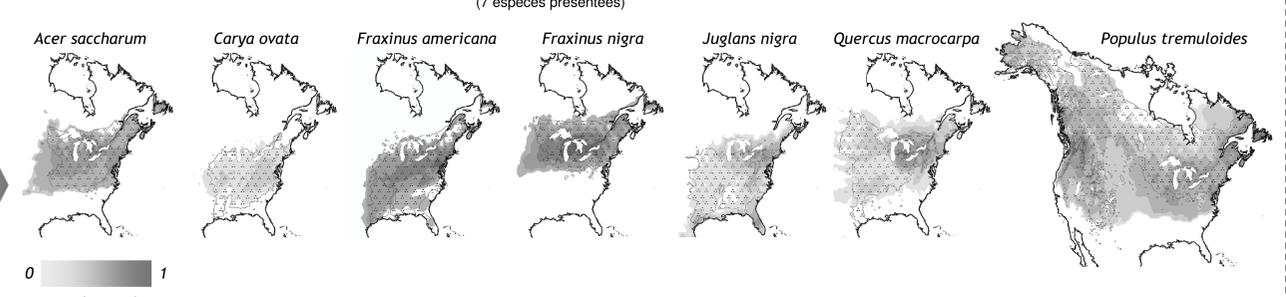


Bilan des simulations

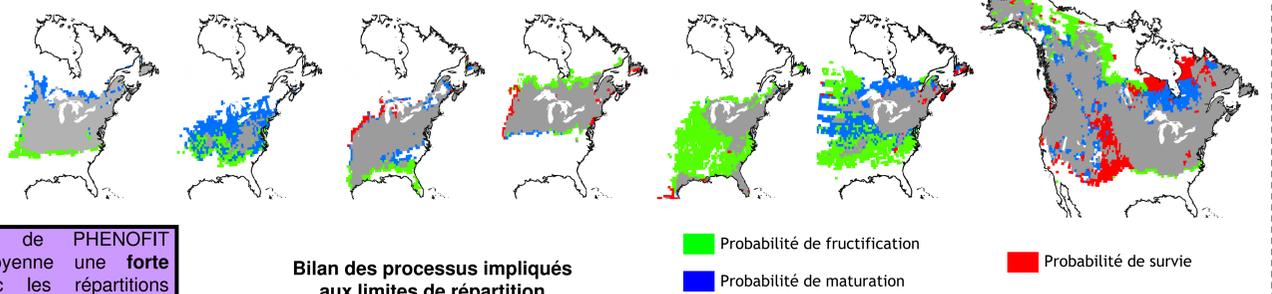
Espèces	AUC	Accord	R/P
<i>Acer saccharinum</i>	0.92	0.90	0.59
<i>Acer saccharum</i>	0.95	0.92	0.59
<i>Aesculus glabra</i>	0.95	0.90	0.39
<i>Carya ovata</i>	0.93	0.82	0.90
<i>Fraxinus americana</i>	0.97	0.83	0.82
<i>Fraxinus nigra</i>	0.98	0.93	0.67
<i>Juglans nigra</i>	0.94	0.93	0.51
<i>Ostrya virginiana</i>	0.87	0.87	0.91
<i>Populus deltoides</i>	0.95	0.81	0.78
<i>Populus tremuloides</i>	0.94	0.89	0.62
<i>Quercus bicolor</i>	0.96	0.85	0.43
<i>Quercus macrocarpa</i>	0.89	0.89	0.47
<i>Salix nigra</i>	0.92	0.68	0.99
<i>Sassafras albidum</i>	0.98	0.99	0.61
<i>Ulmus americana</i>	0.95	0.96	0.74
Moyenne	0.94	0.86	0.67

AUC (Area Under Curve) : indice entre 0 et 1 estimant la performance de la simulation
 Accord : proportion de bonne prédictions des présences
 R/P : rapport entre répartition observée et potentielle (= simulée) (en nombre de pixels)

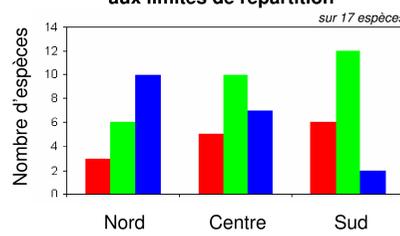
2/ PHENOFIT : Prédictions « actuelles » des aires potentielles



3/ PHENOFIT : Identification des processus limitants



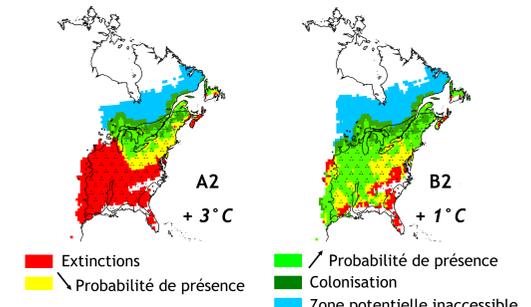
Bilan des processus impliqués aux limites de répartition



Conclusion

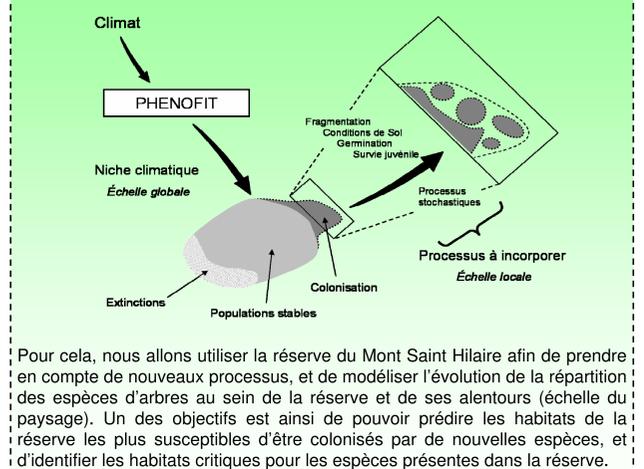
Nos simulations montrent qu'à l'échelle continentale le climat peut expliquer la limitation géographique des espèces. Cette conclusion est valable pour les limites nord de répartition, mais aussi pour les limites sud. Cette étude a également permis de mettre en évidence les processus potentiellement impliqués dans la détermination des limites de répartition.
 Même si le nombre d'espèces pour lequel PHENOFIT est développé reste limité, ces résultats permettent de relativiser les hypothèses fréquemment invoquées décrivant la compétition et/ou la dispersion comme les facteurs principaux dans la délimitation des aires de répartition des arbres à l'échelle continentale. Cependant ces facteurs, ainsi que les perturbations telles que les feux, sont impliqués à des échelles plus fines.
 D'après la prédominance des facteurs climatiques, il apparaît possible d'utiliser PHENOFIT pour établir des **prédictions de changement de répartition** selon différents scénarios climatiques.

Prédictions de la répartition de *Fraxinus americana* selon 2 scénarios climatiques pour la période 2001-2100



La suite...

Mon projet post-doctoral à l'Université McGill avec Martin J. Lechowicz a pour but de développer PHENOFIT à des échelles plus fines qu'actuellement, en prenant donc en compte d'autres facteurs et d'autres processus.



Références

- Chuine, I. and E. Beaubien. 2001. Phenology is a major determinant of temperate tree range. Ecology Letters 4:500-510.
 Morin X., and I. Chuine. 2005. Sensitivity analysis of the tree distribution model PHENOFIT to climatic input characteristics: implications for climate impact assessment. Global Change Biology 11:1493-1503.
 Morin X., C. Augsburger and I. Chuine. In Press. Process-based modeling of tree species' distributions. What limits temperate tree species' range boundaries? Ecology.