



MODÉLISATION DE LA NICHE ÉCOLOGIQUE : DIMENSIONS FONCTIONNELLE ET EVOLUTIVE

ISABELLE CHUINE

CENTRE D'ÉCOLOGIE FONCTIONNELLE ET EVOLUTIVE

isabelle.chuine@cefe.cnrs.fr

Plan

Chapitre 1 - Contexte et concepts

Chapitre 2 - Les modèles de niche fondamentale basés sur les processus (biologique)

1. Principe et exemples
2. Construction
3. Ajustement et Validation
4. Projections
5. Complexification des modèles : où s'arrêter ?

Chapitre 3 - De la niche potentielle à la niche réalisée

Les modèles de niche fondamentale basés sur les processus

Objectif

Comprendre les adaptations du vivant aux contraintes physiques de l'environnement et in fine la répartition géographique des espèces

Principe

Simuler le fonctionnement biologique en fonction des conditions du milieu (les valeurs des traits et processus biologiques simulés varient avec les conditions du milieu)

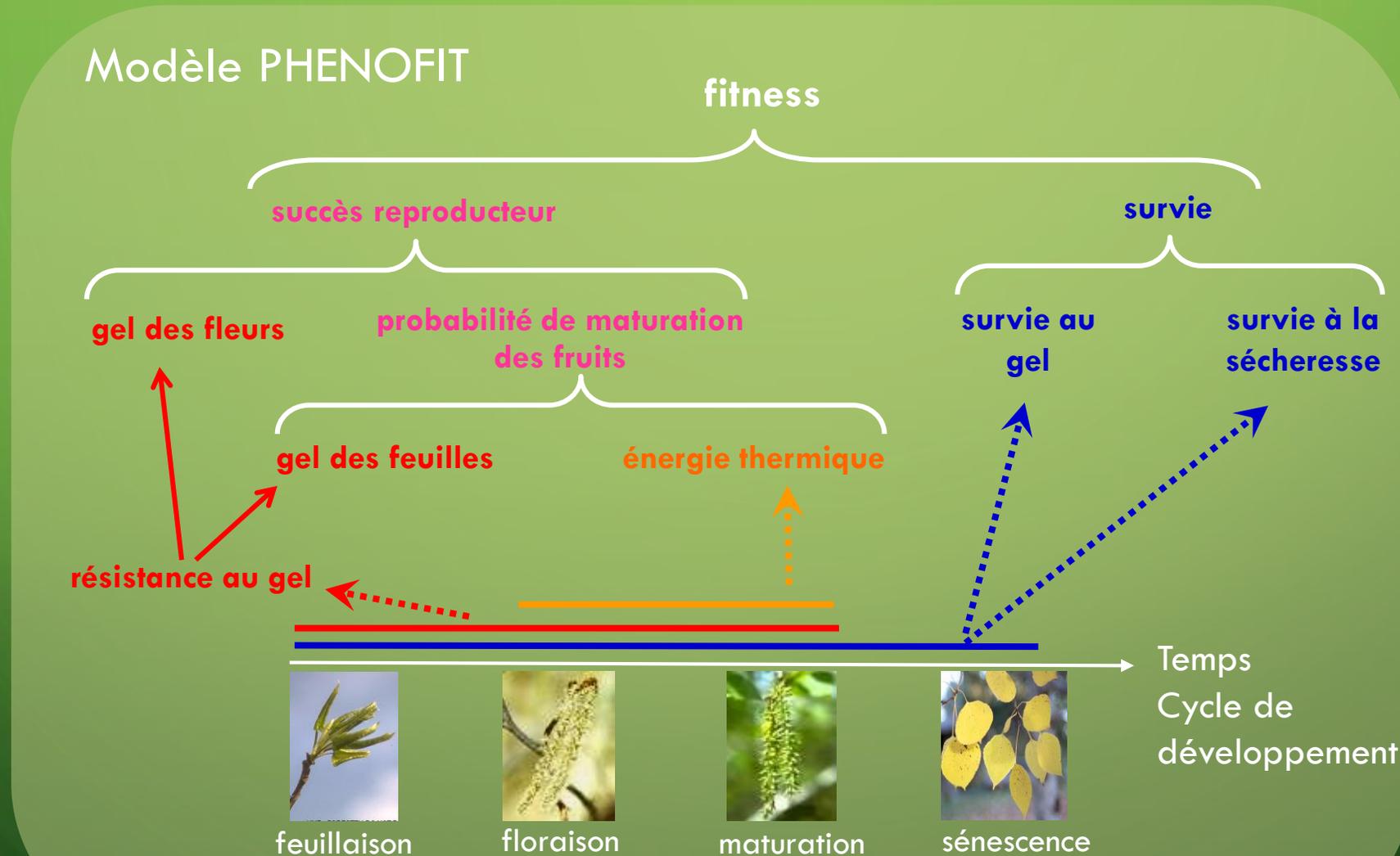
Avantages

Modèles robustes (reste à démontrer) et explicatifs

Inconvénients

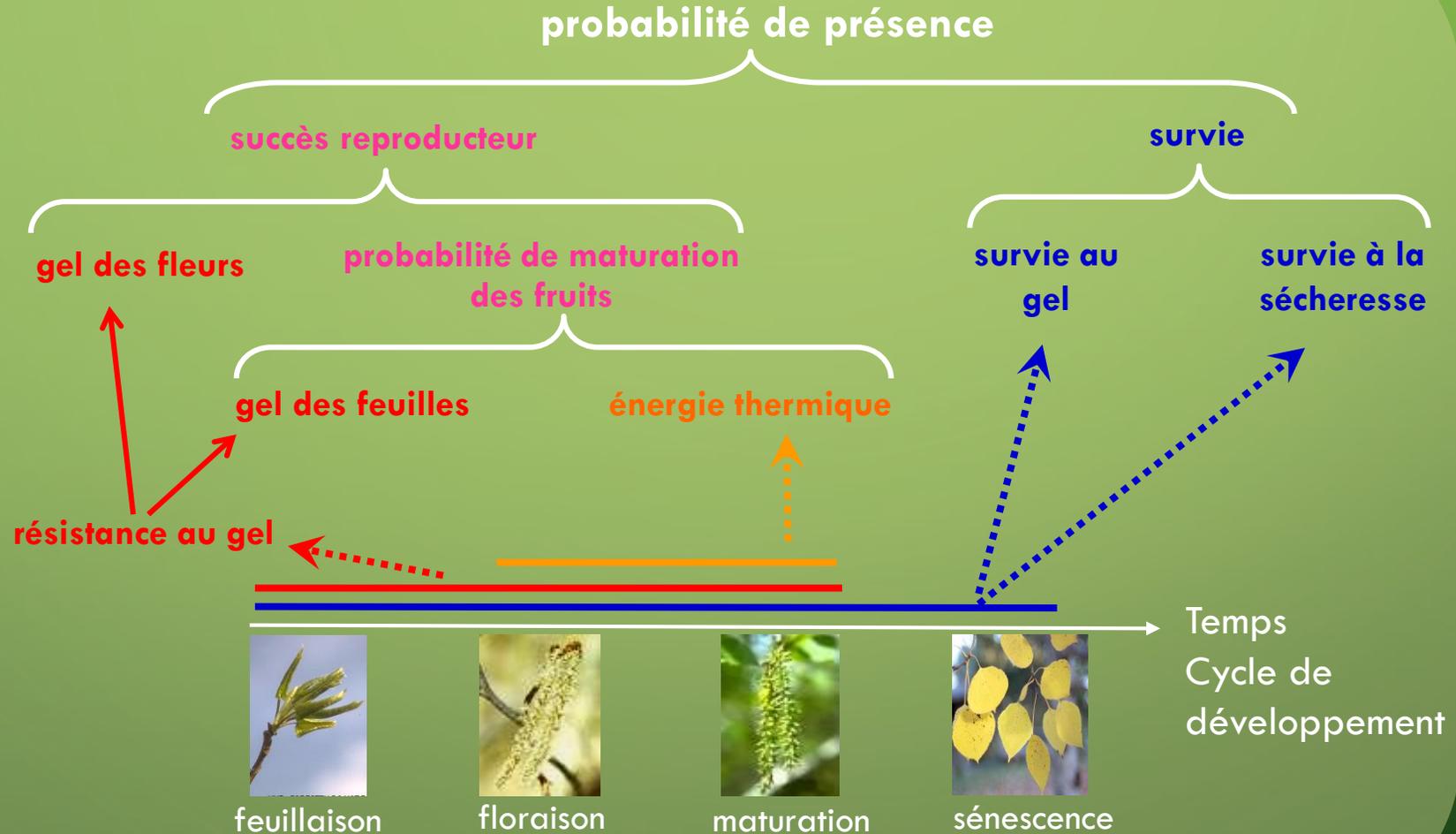
Très long à développer, demande beaucoup de connaissances et de données sur la biologie des espèces

Exemples de modèles de niche basés sur les processus



Exemples de modèles de niche basés sur les processus

Modèle PHENOFIT

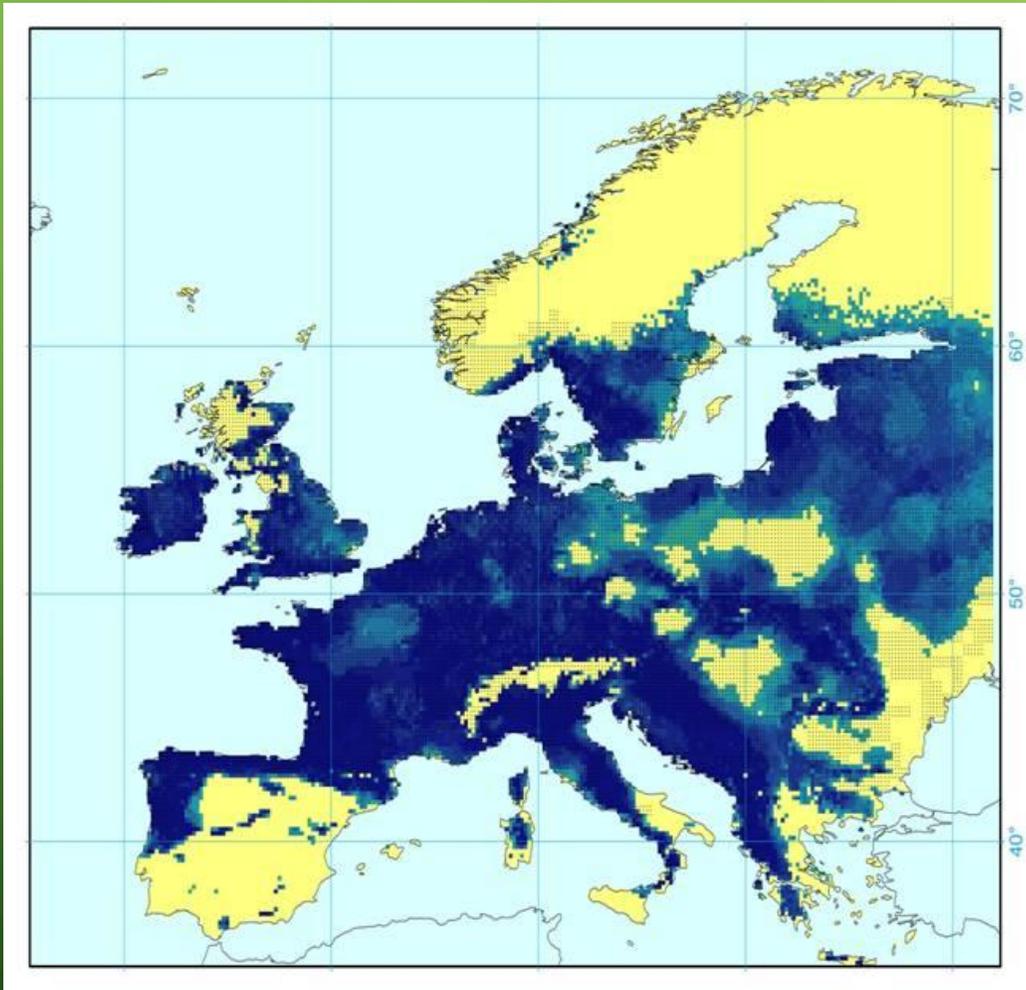


+ Météo journalière (températures, précipitation, humidité relative, vitesse du vent, rayonnement global)

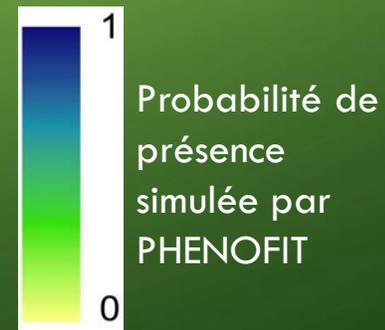
+ propriétés du sol (profondeur et composition)

Exemples de modèles de niche basés sur les processus

Probabilité de présence du chêne pédonculé selon PHENOFIT



Répartition selon
Atlas Flora



Exemples de modèles de niche basés sur les processus

Modèle BIOSIM



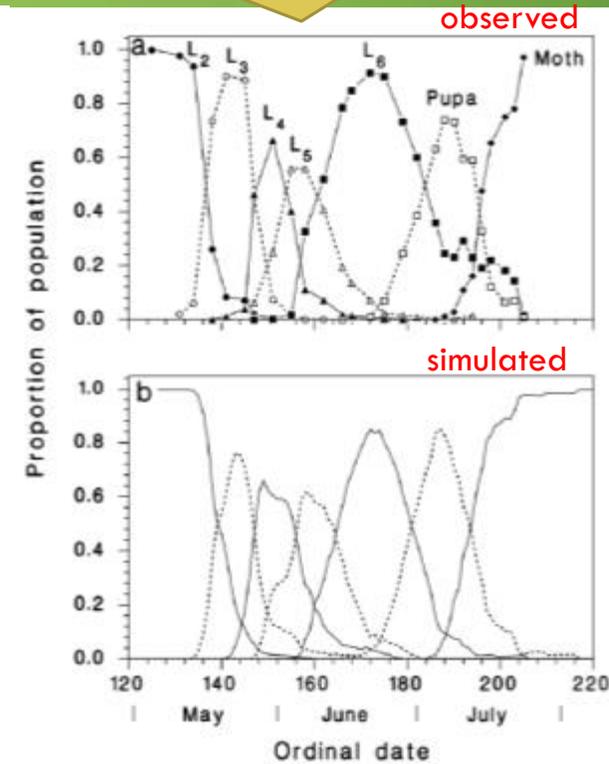
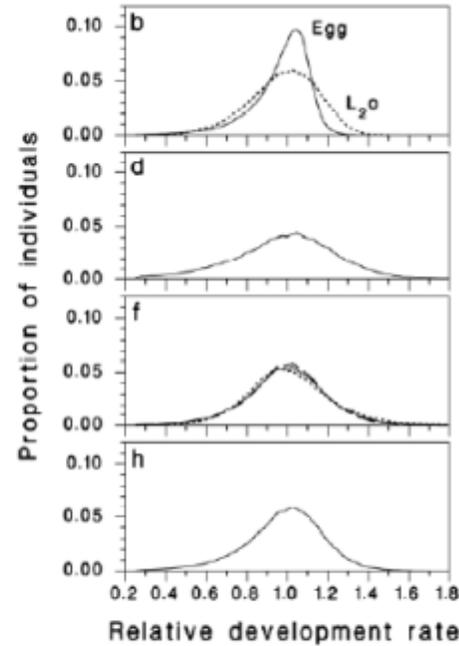
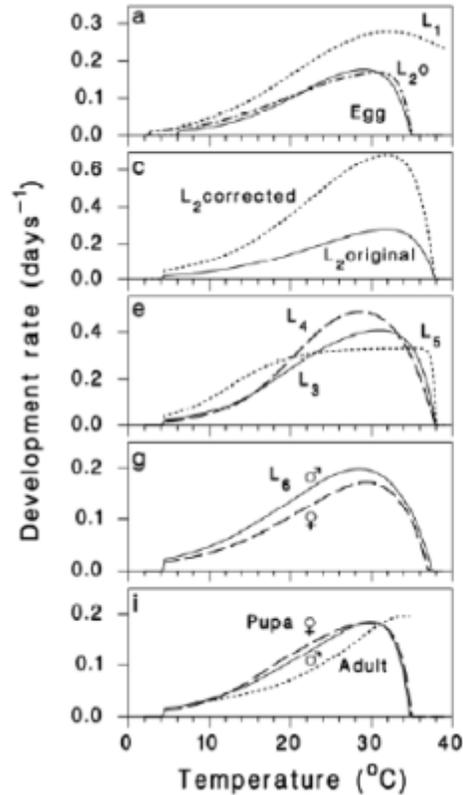
Phénologie

Survie et fécondité

Dynamique de population



Gipsy moth



Exemples de modèles de niche basés sur les processus

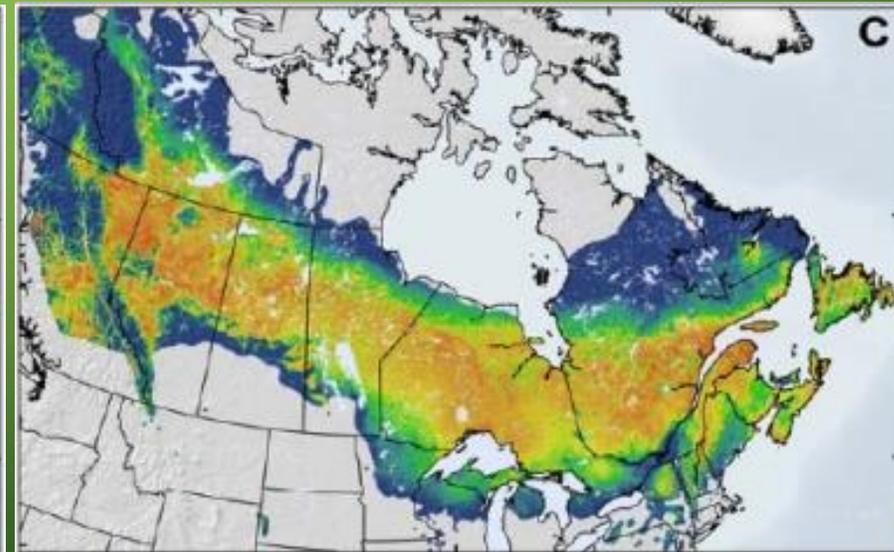
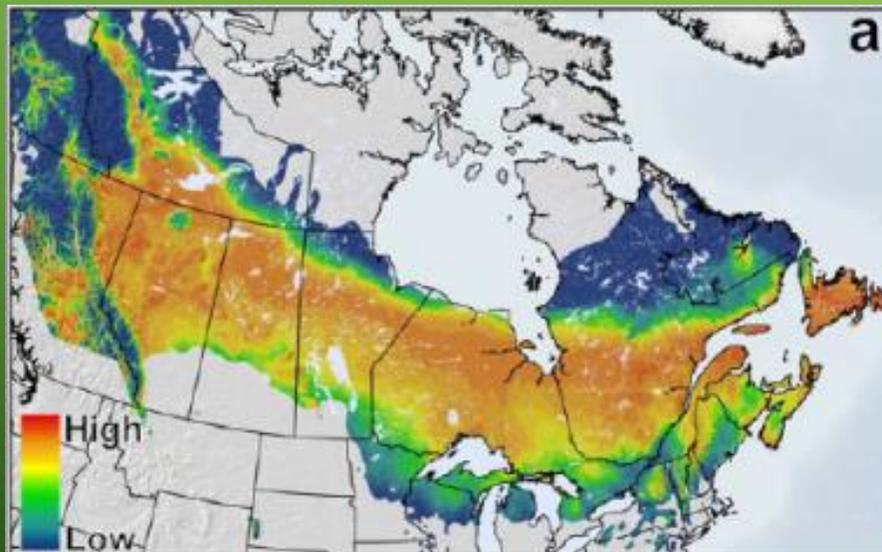


Modèle BIOSIM

Gipsy moth potential distribution

Climate

Climate + host presence



Exemples de modèles de niche basés sur les processus

Modèle Niche Mapper

- Bilan d'énergie, de masse et d'eau en fonction de la thermorégulation et du coût métabolique d'activité (Porter & Mitchell 2006)

Exemple : *Petauroides volans* (opposum)

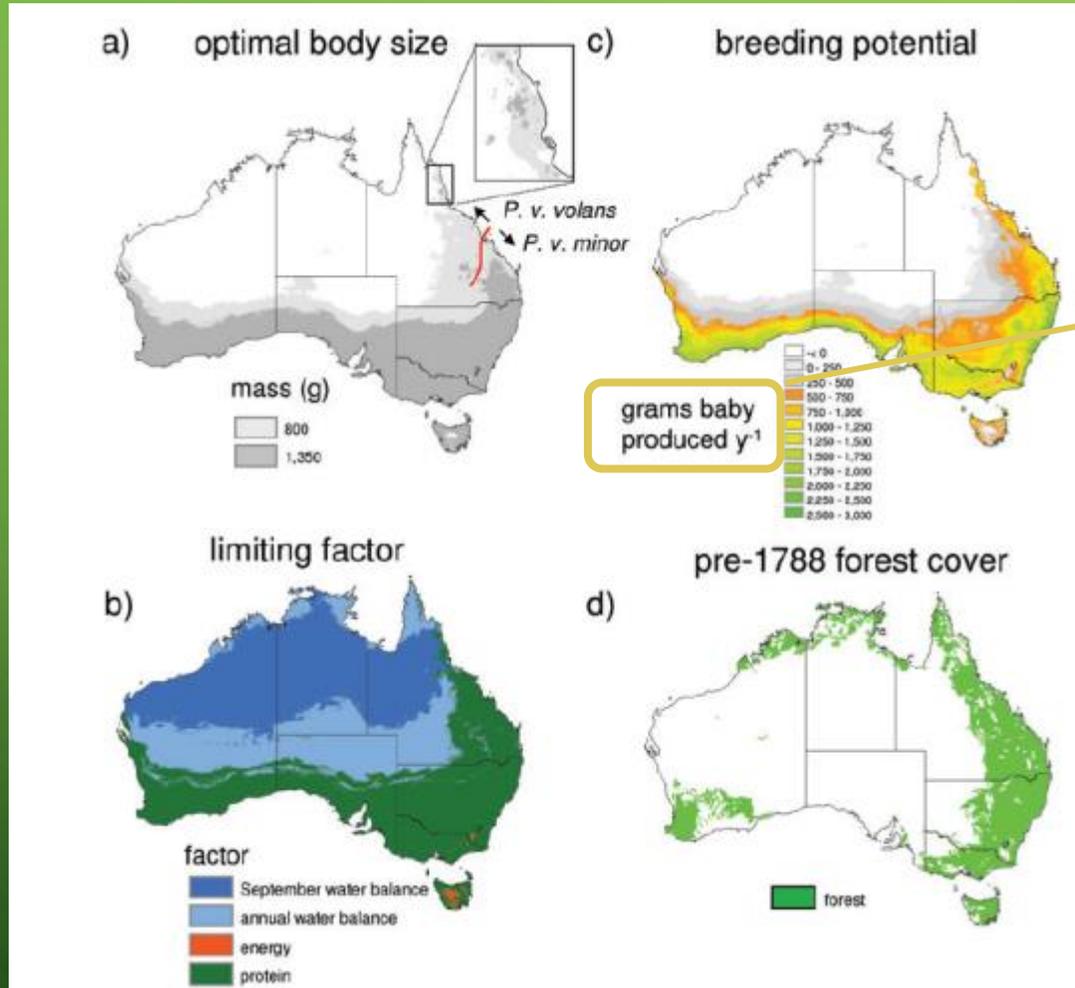
Model parameters:

- Fur properties (density, depth, ...)
- Mass
- Shape
- Body temperature
- Flesh thermal conductivity
- Oxygen extraction efficiency
- Nest properties
- Food properties
- Digestive system (feeding rate, digestive efficiency, ...)
- Metabolism (basal metabolic rate, heat increment, ..)
- Milk composition and growth efficiency



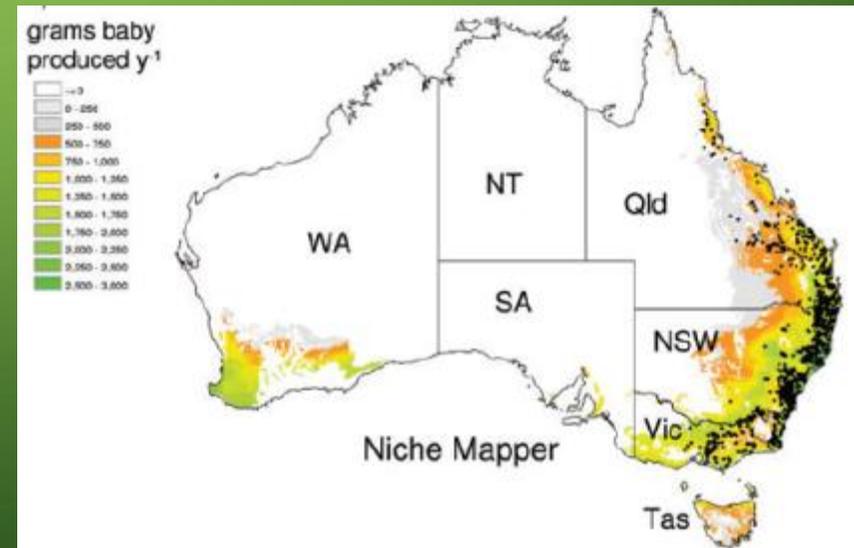
Petauroides volans

Exemples de modèles de niche basés sur les processus



Modèle Niche Mapper

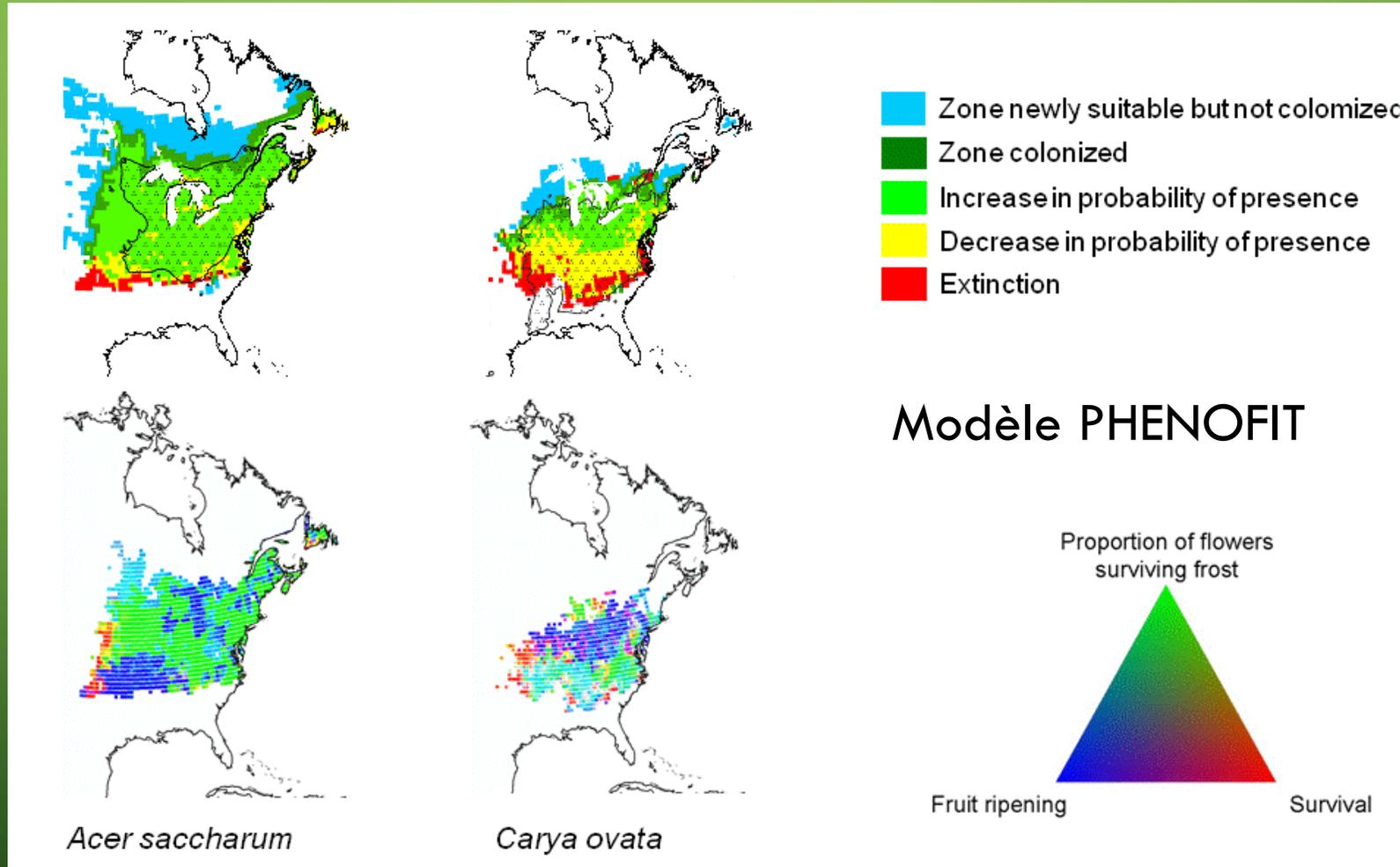
Positive water & energy balance is converted to milk itself converted to grams of offspring that can be fed



Pouvoir explicatif des modèles basés sur les processus

Changement
de répartition
prévu pour
2100

Processus
limitant le plus
la fitness



Construction des modèles basés sur les processus

Modèle PHENOFIT

probabilité de présence

succès reproducteur

survie

gel des fleurs

probabilité de maturation
des fruits

survie au
gel

survie à la
sécheresse

gel des feuilles

énergie thermique

résistance au gel

Temps
Cycle de
développement

Ajustement des paramètres des
modèles phénologiques

Données
pédologiques &
météorologiques

↑

+ Données
phénologiques



feuillaison



floraison

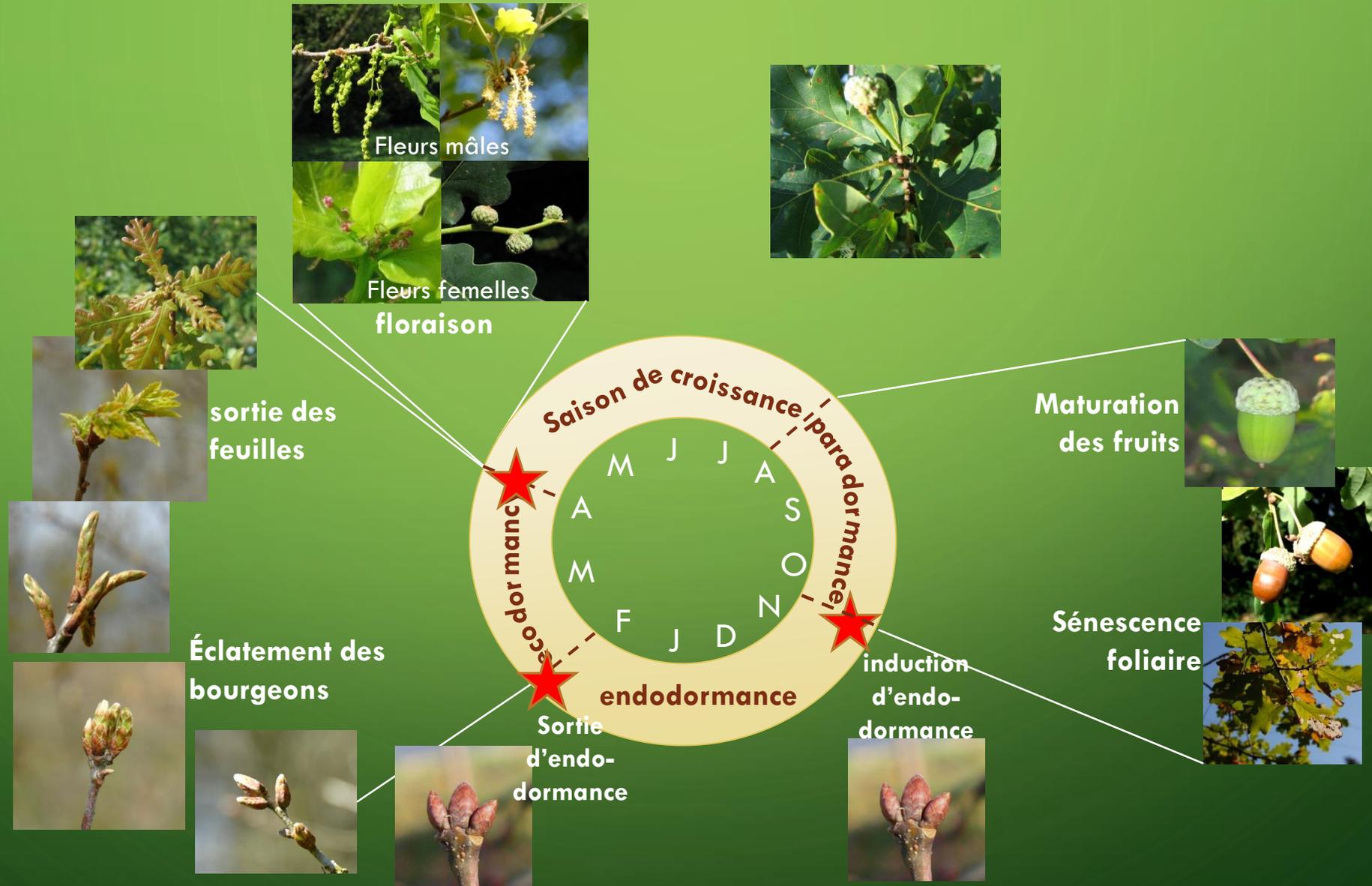


maturation



sénescence

Sélection des variables et processus biologiques essentiels



Déterminisme environnemental des processus

Rameaux
de vigne
en
chambre
de culture

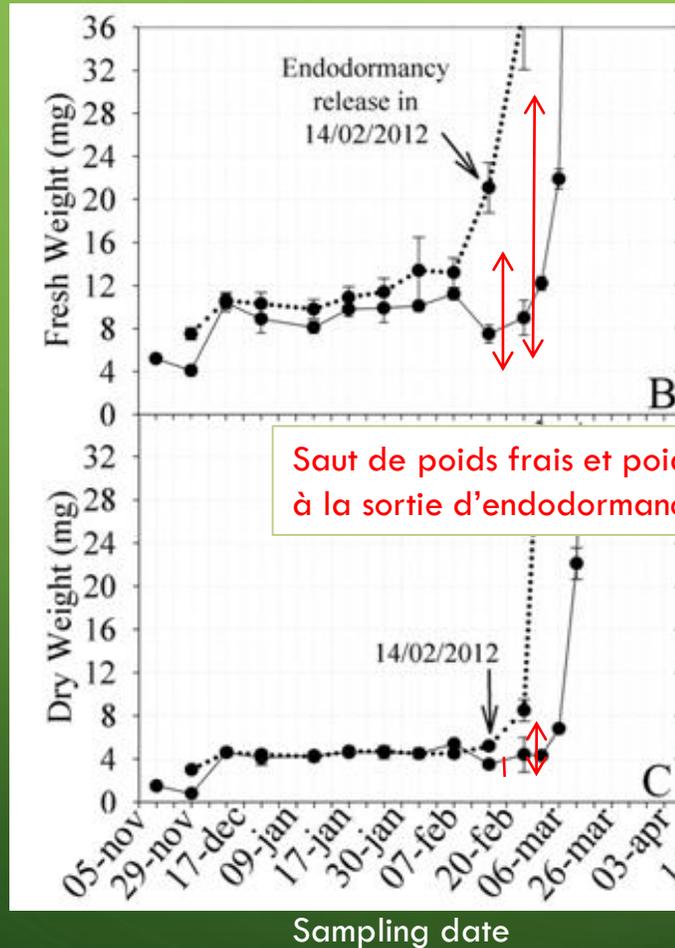


Date de récolte (temps passé à 20°C après récolte)



Experimentation
en conditions
contrôlées pour
élucider le
déterminisme
environnemental
des processus

Déterminisme environnemental des processus



Saut de poids frais et poids sec à la sortie d'endormance

Apple flower buds

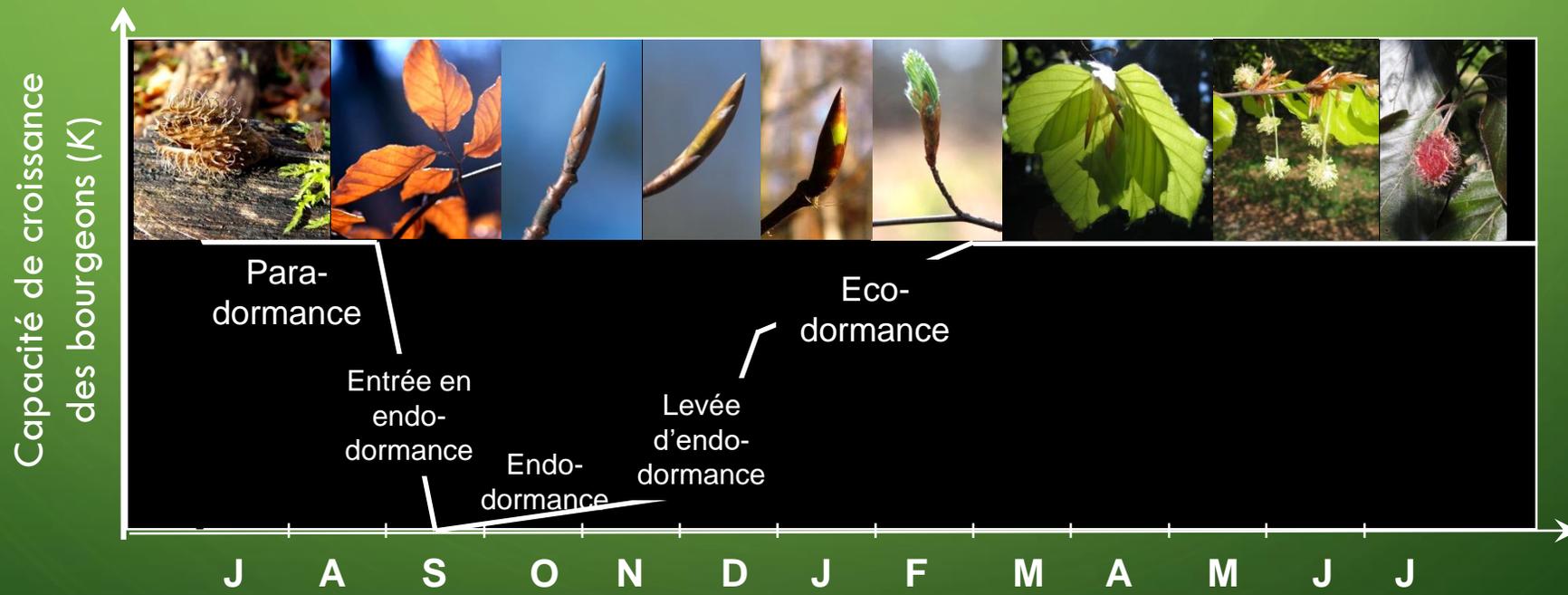


Déterminer la date de sortie d'endormance par les test Tabuenca

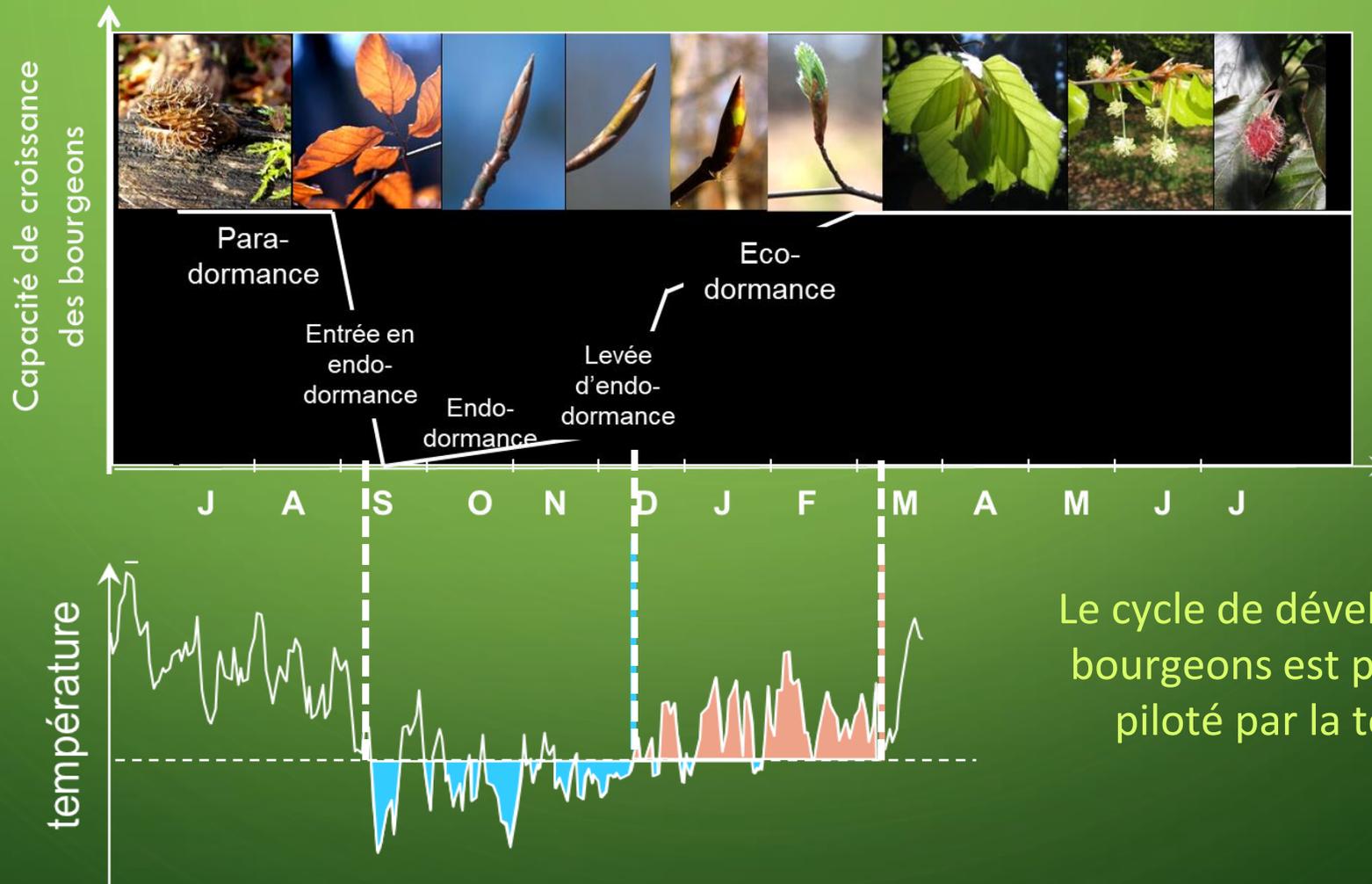
➤ pesée des méristèmes floraux

Déterminisme environnemental des processus

Exemple : cycle de développement des bourgeons



Déterminisme environnemental des processus



Le cycle de développement des bourgeons est principalement piloté par la température

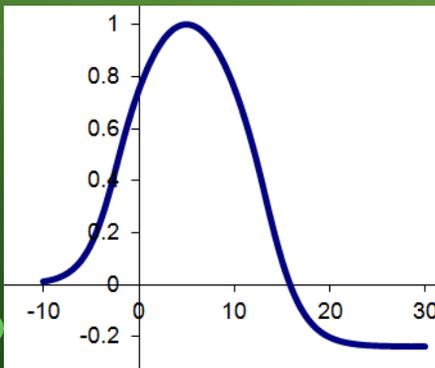
Déterminisme environnemental des processus

Relation entre développement des bourgeons et température

S_c état de développement des bourgeons pendant l'endormance
 S_f état de développement des bourgeons pendant l'ecdormance

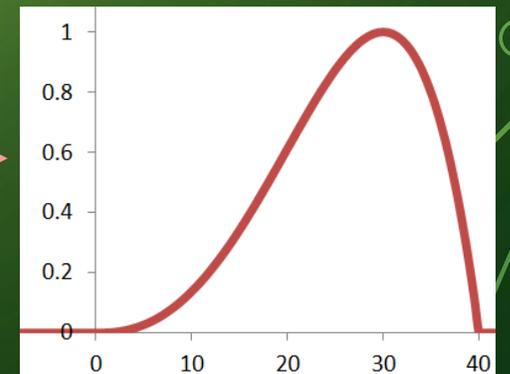


Réponse à la température pendant l'endormance $R_c(t)$



$$S_c(t) = \sum R_c(t)$$

Réponse à la température de la croissance cellulaire $R_f(t)$



$$S_f(t) = \sum K(S_c(t)) \cdot R_f(t)$$

Déterminisme environnemental des processus

Relation entre les phases de développement

$$S_f(t) = \sum K(S_c(t)) \cdot R_f(t)$$

Sequential

$$K(t) = 0 \text{ si } S_c < C^*$$

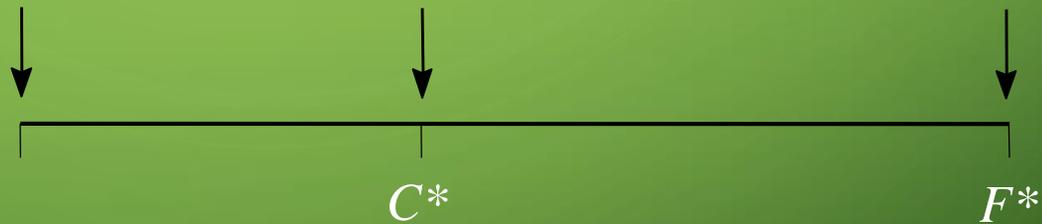
$$= 1 \text{ si non}$$

Parallel

$$K(S_c(t)) = 0 \text{ si } S_c < C^*$$

$$>0 \text{ si non}$$

onset of
endodormancy onset of
ecodormancy bud break



C^*

F^*

C^*

C_{tot}

F^*

— endodormance
- - - ecodormance

Construction des modèles basés sur les processus

Modèle PHENOFIT

probabilité de présence

succès reproducteur

survie

gel des fleurs

probabilité de maturation
des fruits

survie au
gel

survie à la
sécheresse

gel des feuilles

énergie thermique

résistance au gel



Ajustement des paramètres des
modèles de résistance au gel

Données
pédologiques &
météorologiques

Données de résistance
au gel des différents
organes



feuillaison



floraison



maturation



sénescence

Temps
Cycle de
développement

Construction des modèles basés sur les processus

Déterminisme de la résistance au gel

Facteurs :

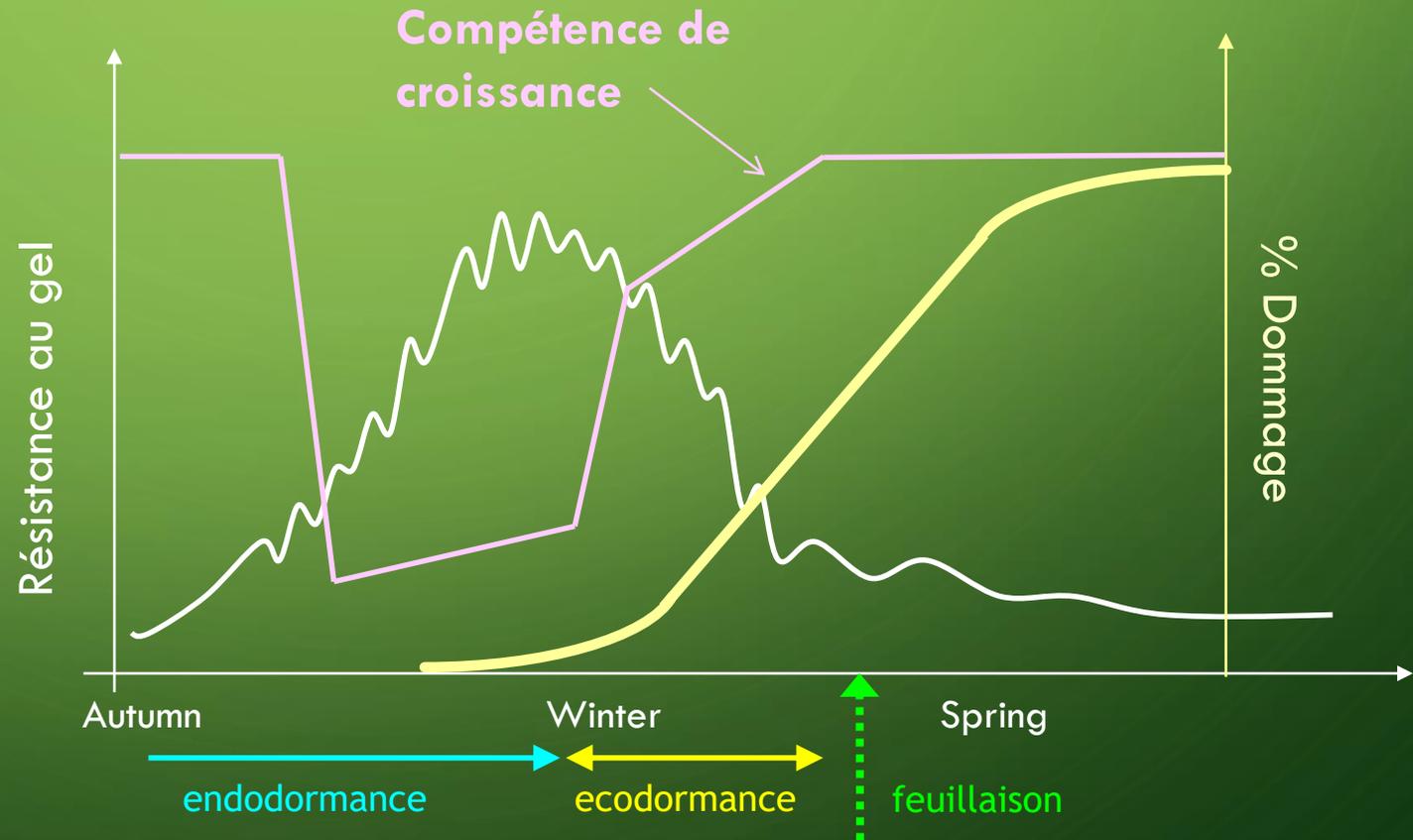
Température

Photoperiode

Humidity

Nutrients

Compétence de croissance



Construction des modèles basés sur les processus

Formalisme de la résistance au gel

$$D_t = \frac{1}{1 - e^{B(t) [R(t) - T(t)]}}$$

$$B(t) = a b e^{c R(t)}$$

$$R(t) = R_{\min} C_R(t) [\Delta R_T(t) \Delta R_P(t)]$$

D , indice de dommage

T , température

NL , « night length »

R , résistance (LT50)

C_R , capacité de croissance

température

$$\Delta R_T(t) = R_{T_{\max}} \left(1 - R_{T_{\max}} \frac{T(t) - T_2}{T_1 - T_2} \right) \text{ si } T_2 \leq T(t) \leq T_1$$

$$\Delta R_T(t) = 0 \text{ si } T(t) > T_1$$

$$\Delta R_T(t) = R_{T_{\max}} \text{ si } T(t) < T_2$$

photopériode

$$\Delta R_P(t) = R_{P_{\max}} \frac{NL(t) - NL_2}{NL_2 - NL_1} \text{ si } NL_1 \leq NL(t) \leq NL_2$$

$$\Delta R_P(t) = 0 \text{ si } NL(t) > NL_1$$

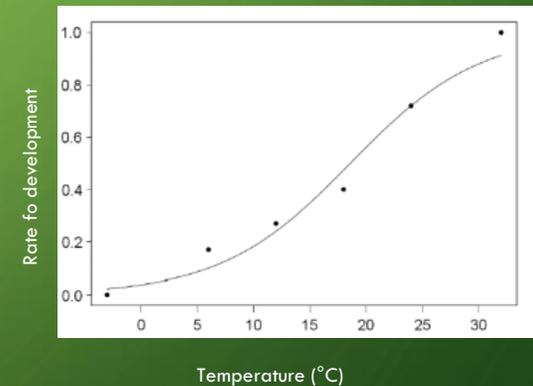
$$\Delta R_P(t) = R_{P_{\max}} \text{ si } NL(t) < NL_2$$

Ajustement des modèles basés sur les processus

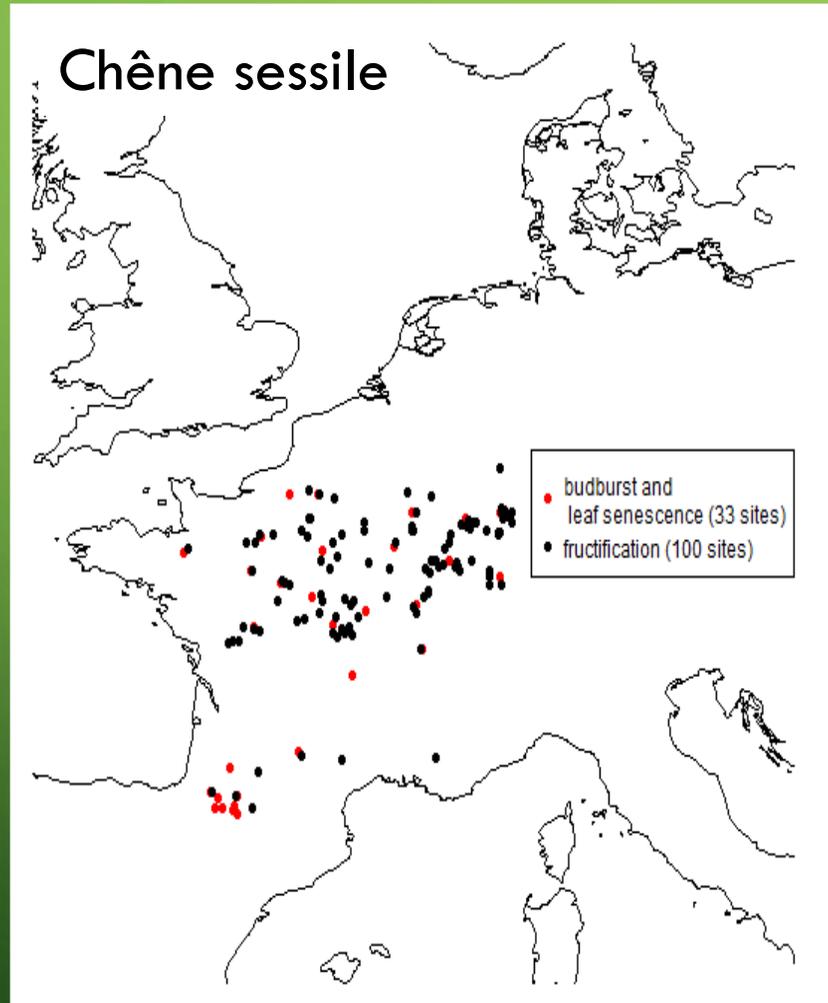
Beaucoup de paramètres à estimer.

Deux options (souvent combinées) :

1. Estimation des valeurs des paramètres par mesures expérimentales (ex: courbe de réponse à la température de l'élongation cellulaire)
2. Inférence statistique des valeurs des paramètres à l'aide de jeux de données collectés *in natura* ou en labo (optimisation de moindres carrés, méthodes bayésiennes, etc...)



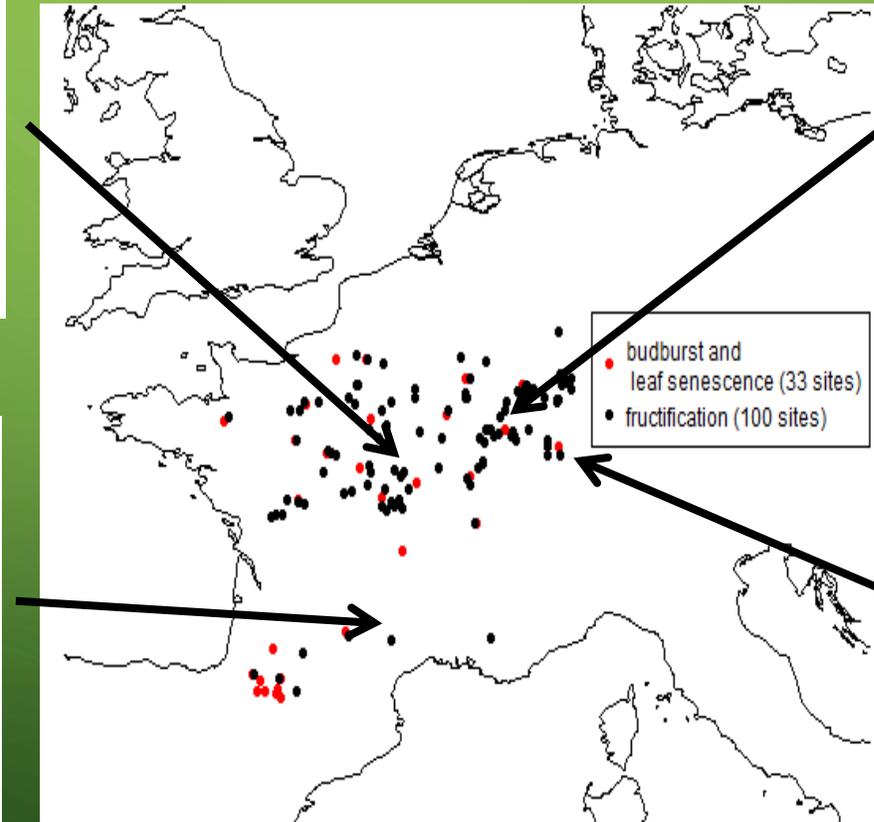
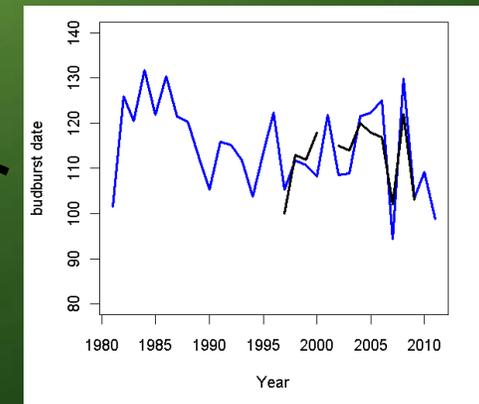
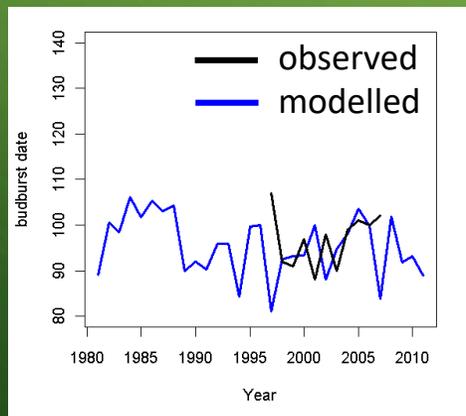
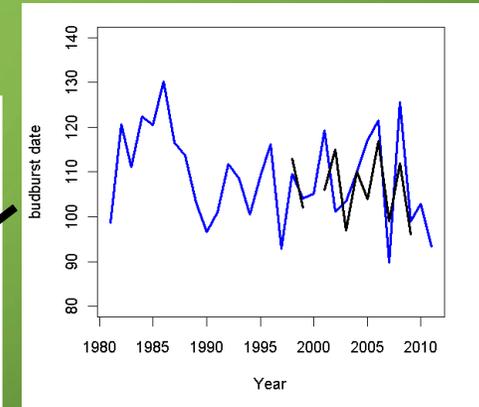
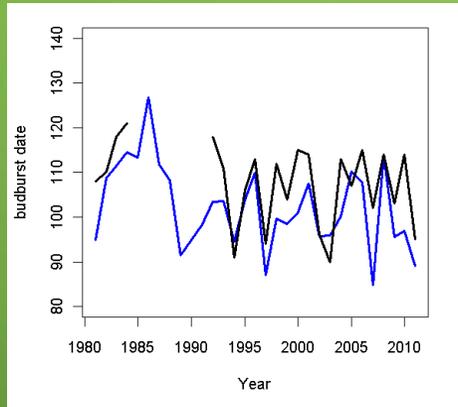
Ajustement des modèles basés sur les processus



Exemple : Données
phénologiques
disponibles pour
paramétrer les
modèles
phénologiques pour le
chêne sessile

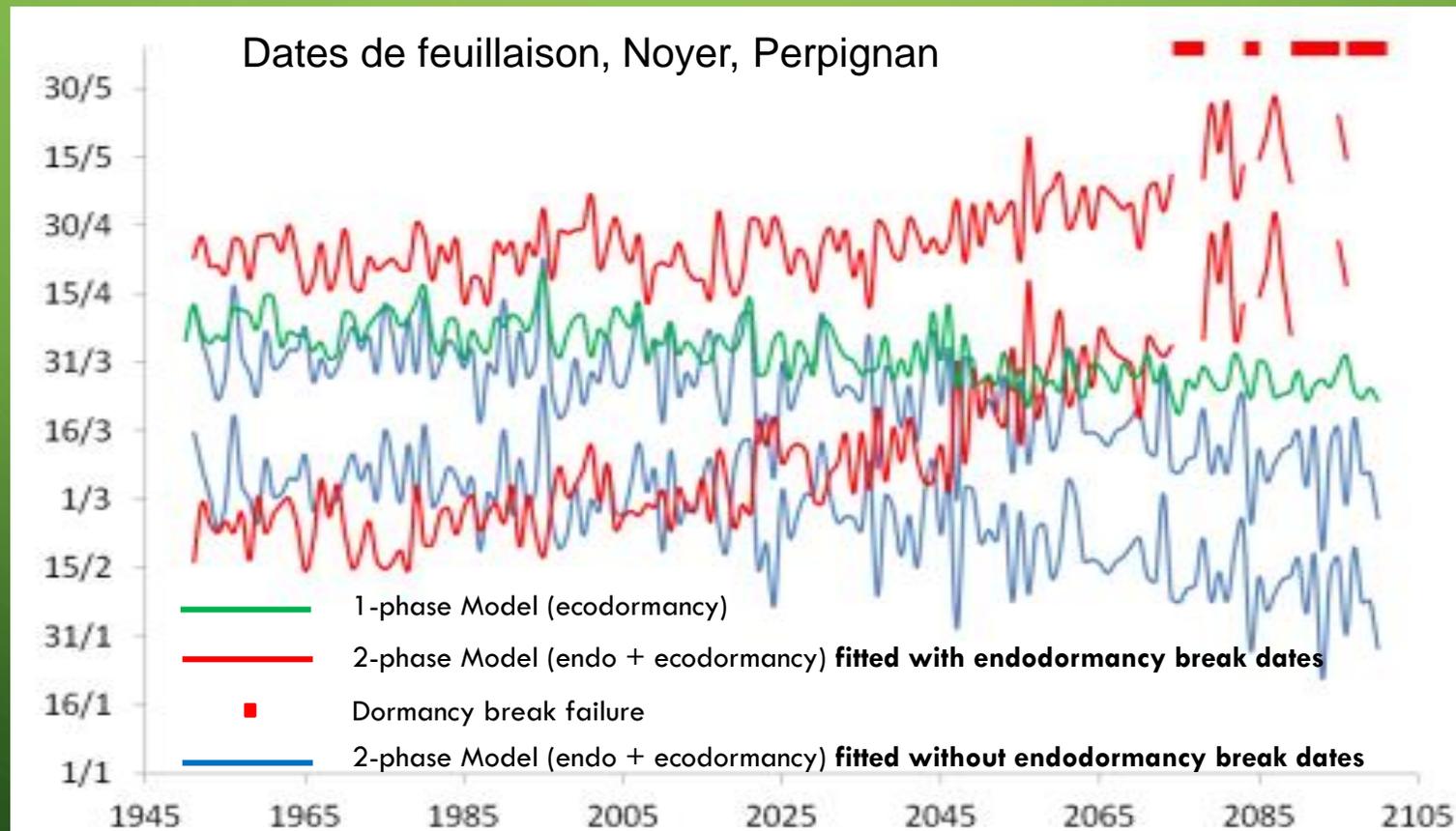
Ajustement des modèles basés sur les processus

Exemple : ajustement par inférence statistique des modèles de dates de feuillaison du chêne



Ajustement des modèles basés sur les processus

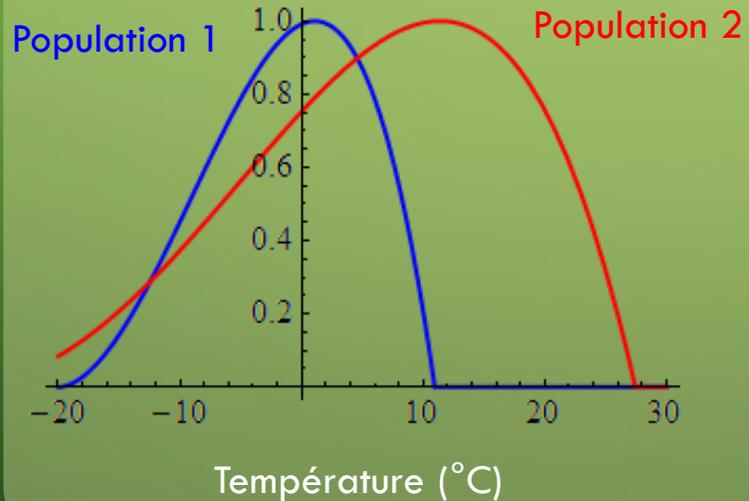
Problèmes : 1. Limites de l'inférence statistique



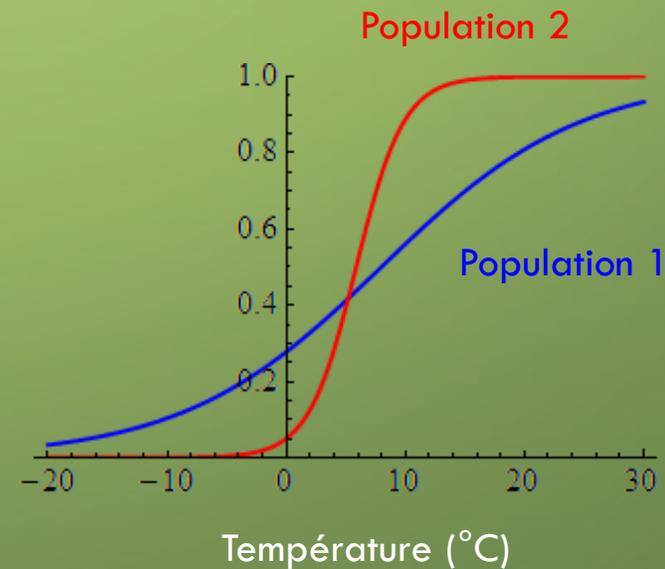
Ajustement des modèles basés sur les processus

Problèmes : 2. Comment prendre en compte l'adaptation locale ?

Fonction de réponse à la température
(endodormance)



Fonction de réponse à la température
(ecodormance)



Ajustement des modèles basés sur les processus

Problèmes : 2. Comment prendre en compte l'adaptation locale ?

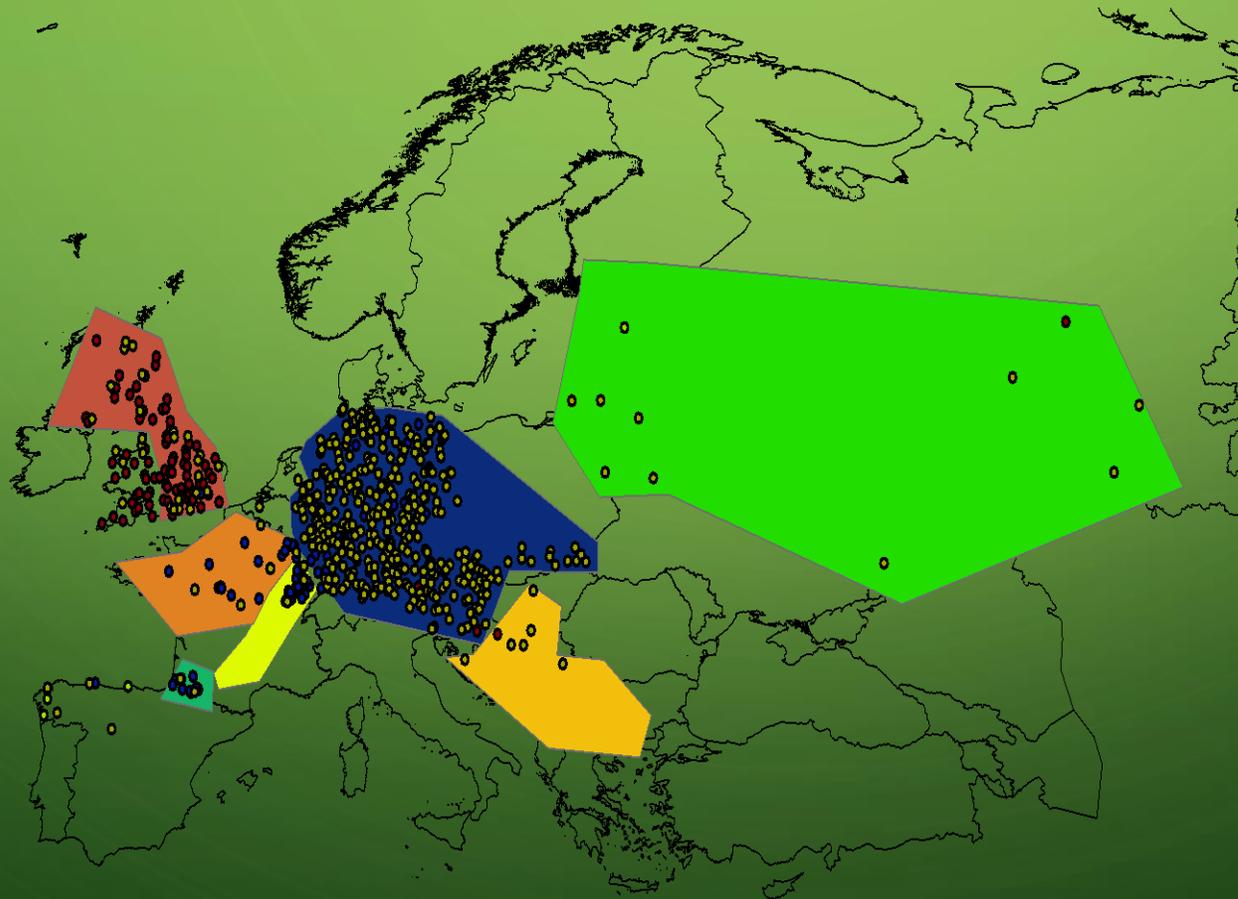


Exemple : données disponibles de dates de feuillaison du chêne pédonculé



Ajustement des modèles basés sur les processus

Problèmes : 2. Comment prendre en compte l'adaptation locale ?

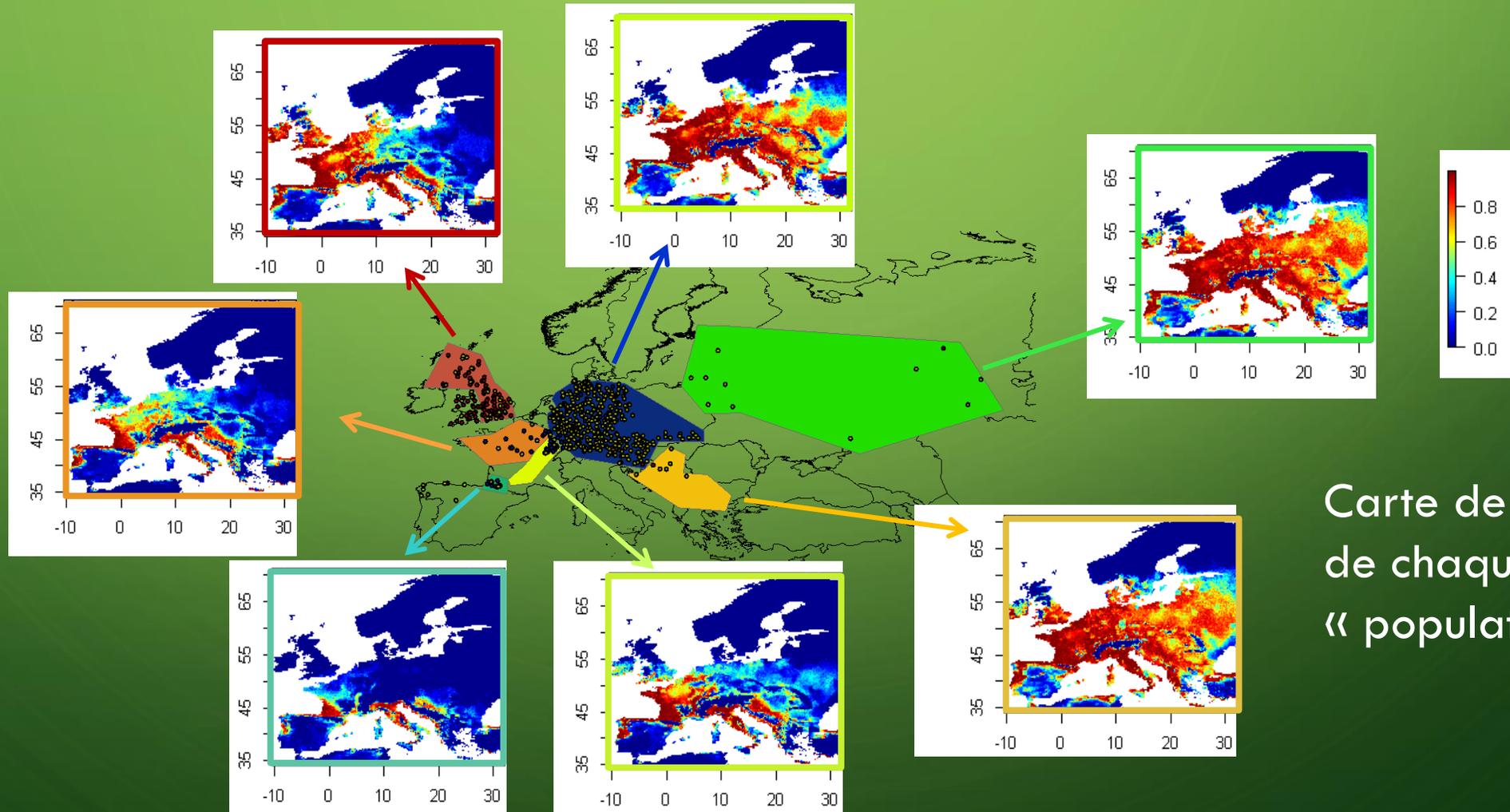


Définition de
“populations”
géographiques



Ajustement des modèles basés sur les processus

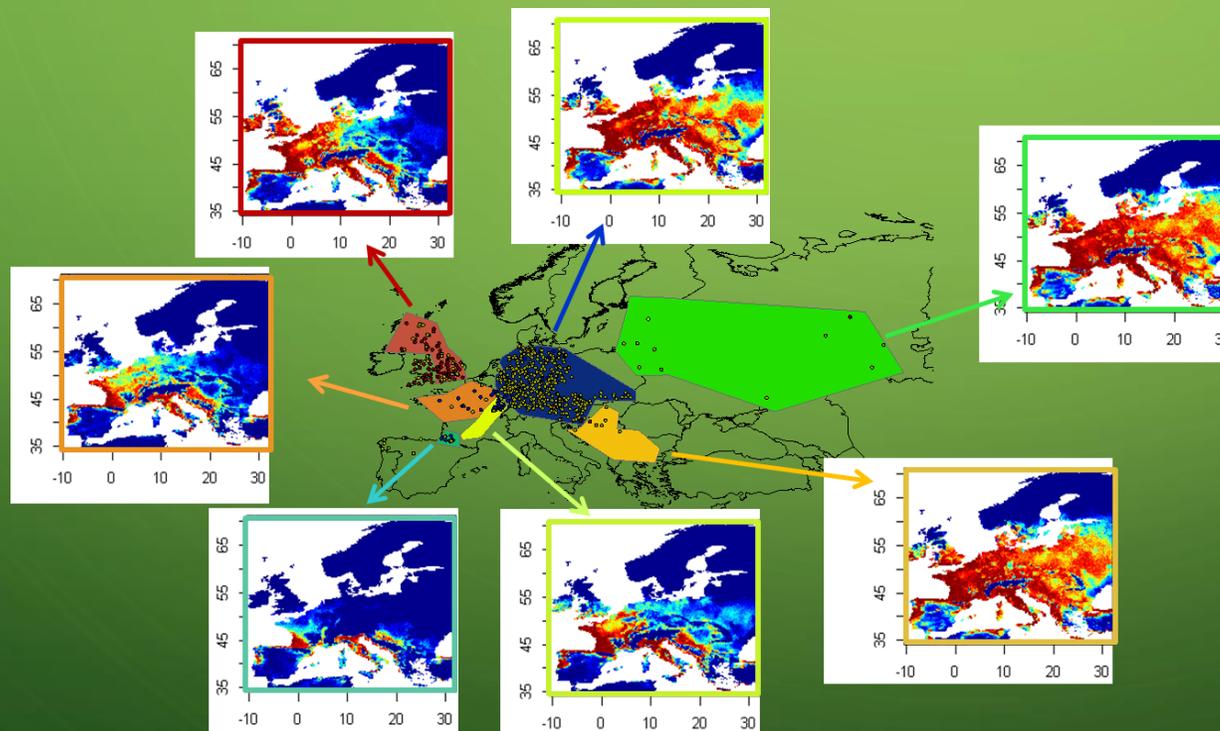
Problèmes : 2. Comment prendre en compte l'adaptation locale ?



Carte de fitness
de chaque
« population »

Ajustement des modèles basés sur les processus

Problèmes : 2. Comment prendre en compte l'adaptation locale ?



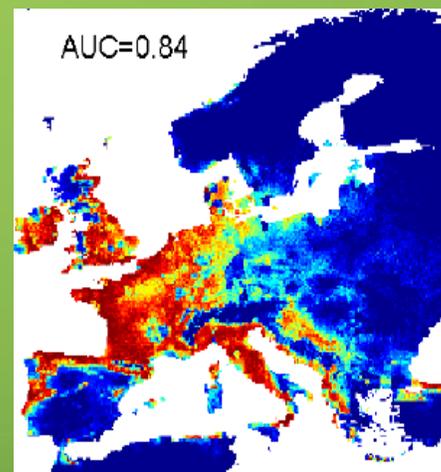
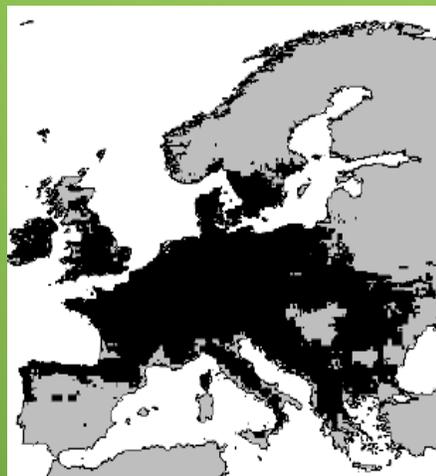
Pas très satisfaisant
mais comment faire
quand on ne connaît
pas les patrons de
variation de
l'adaptation locale ?

Validation des modèles

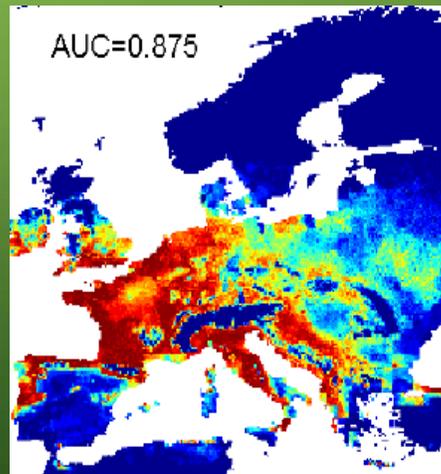
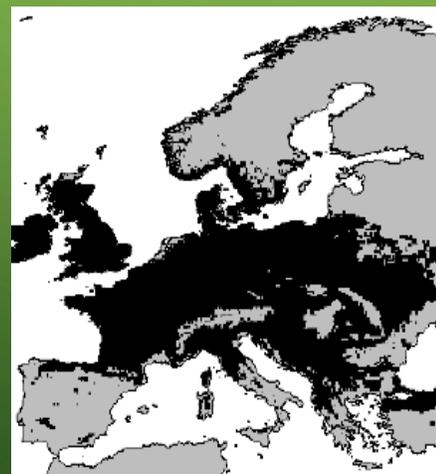
Aire observée
présence / **absence**

Fitness simulée
par PHENOFIT

hêtre



chêne sessile



Projections dans le futur

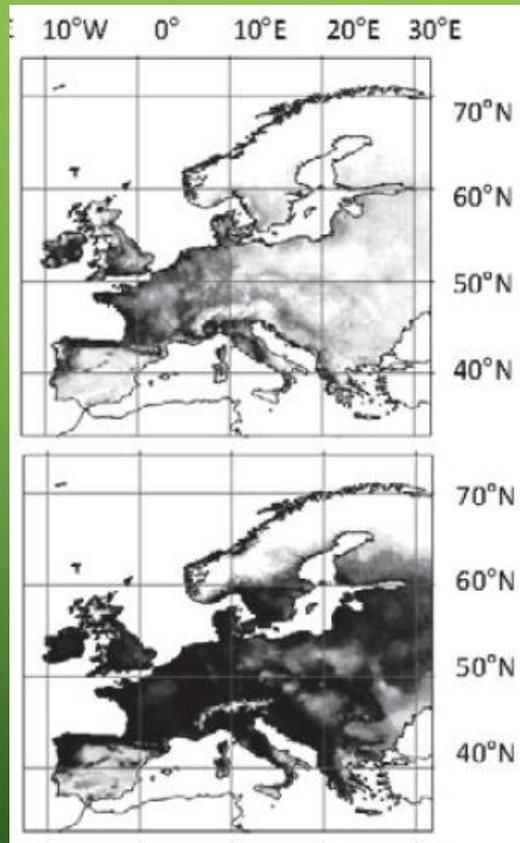
Fagus sylvatica



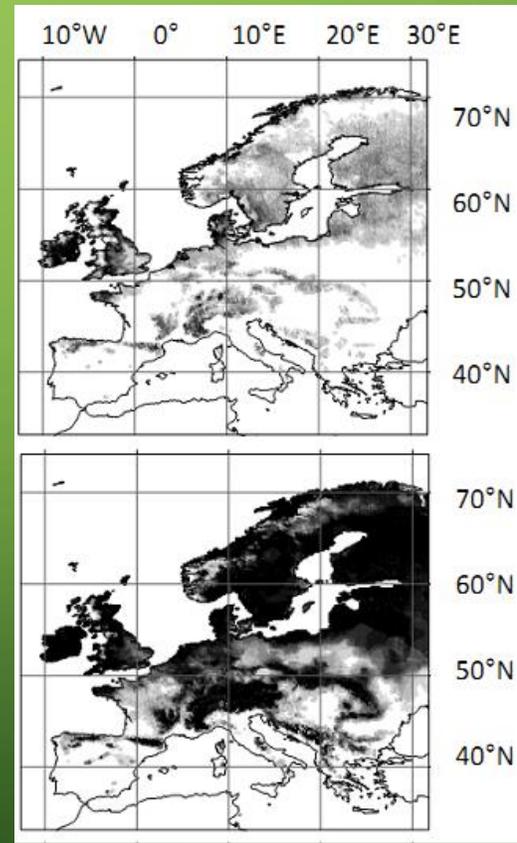
Quercus robur



2000

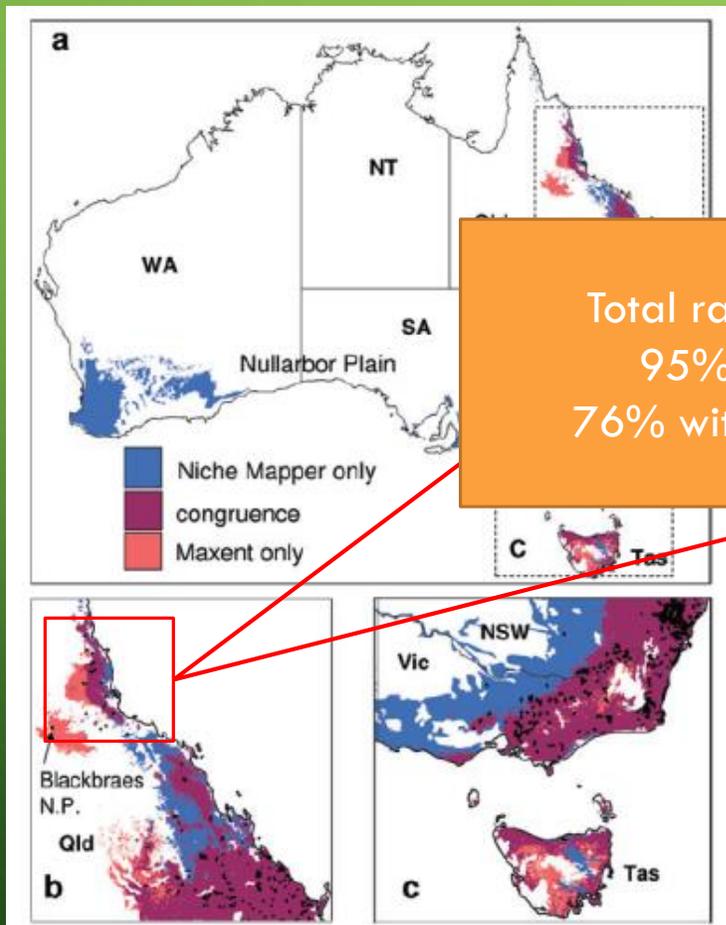


2100 (A1Fi ~+4°C)

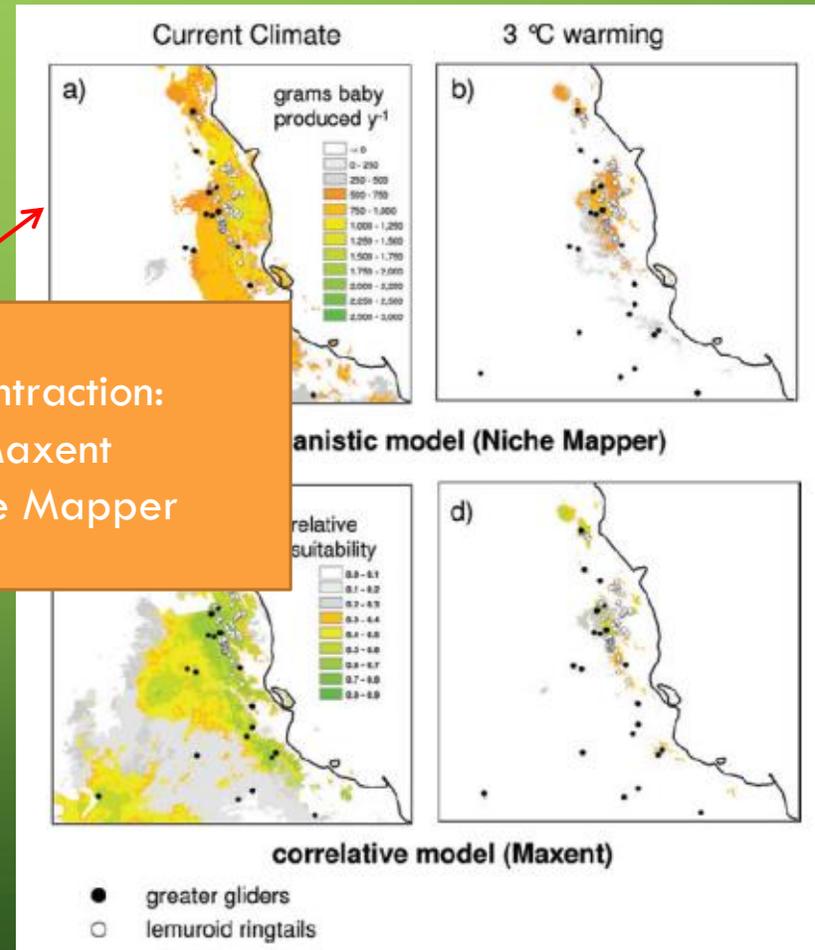


Comparaison des modèles corrélatifs et basés sur les processus

Niche Mapper vs Maxent

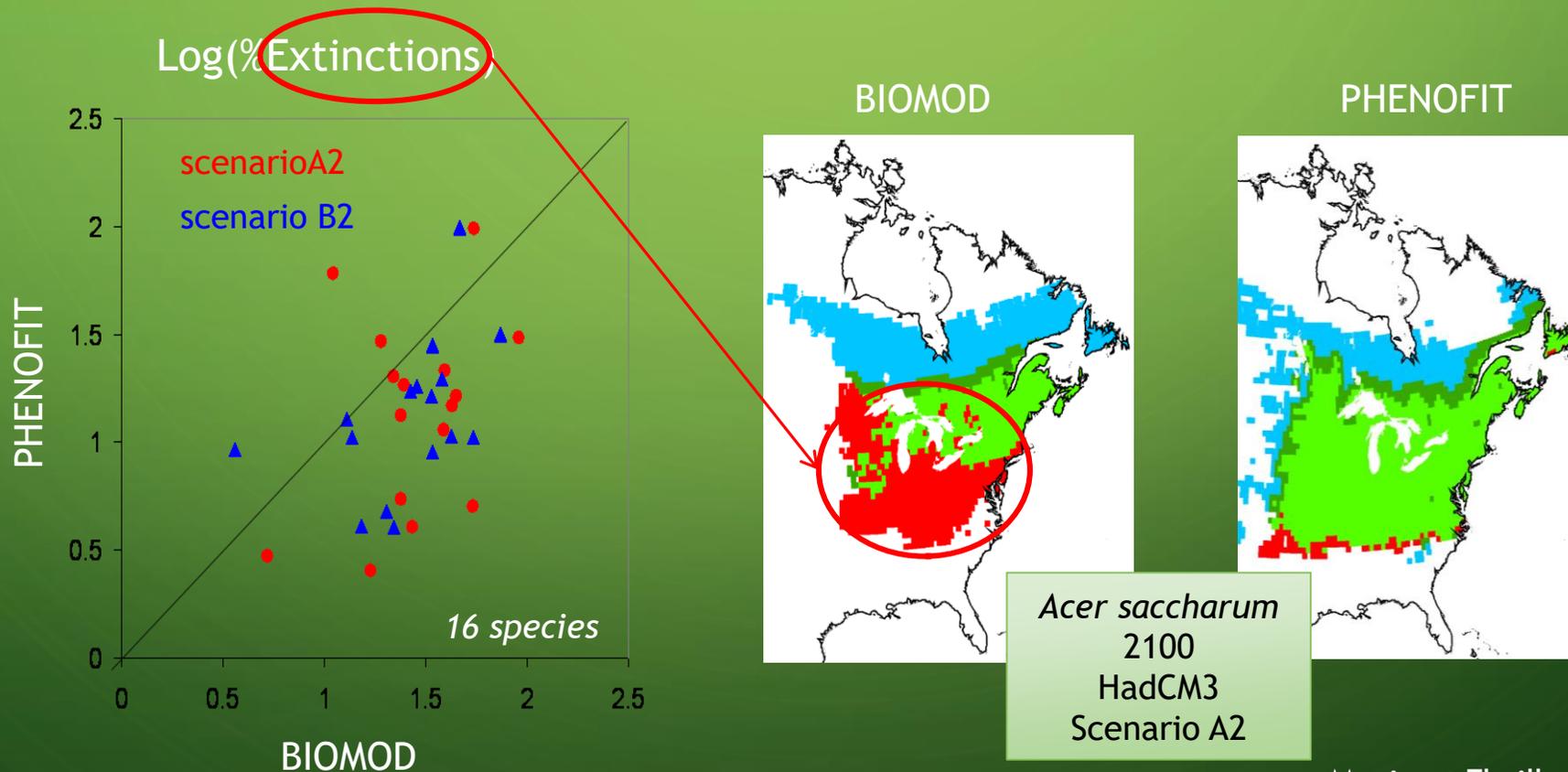


Total range contraction:
95% with Maxent
76% with Niche Mapper



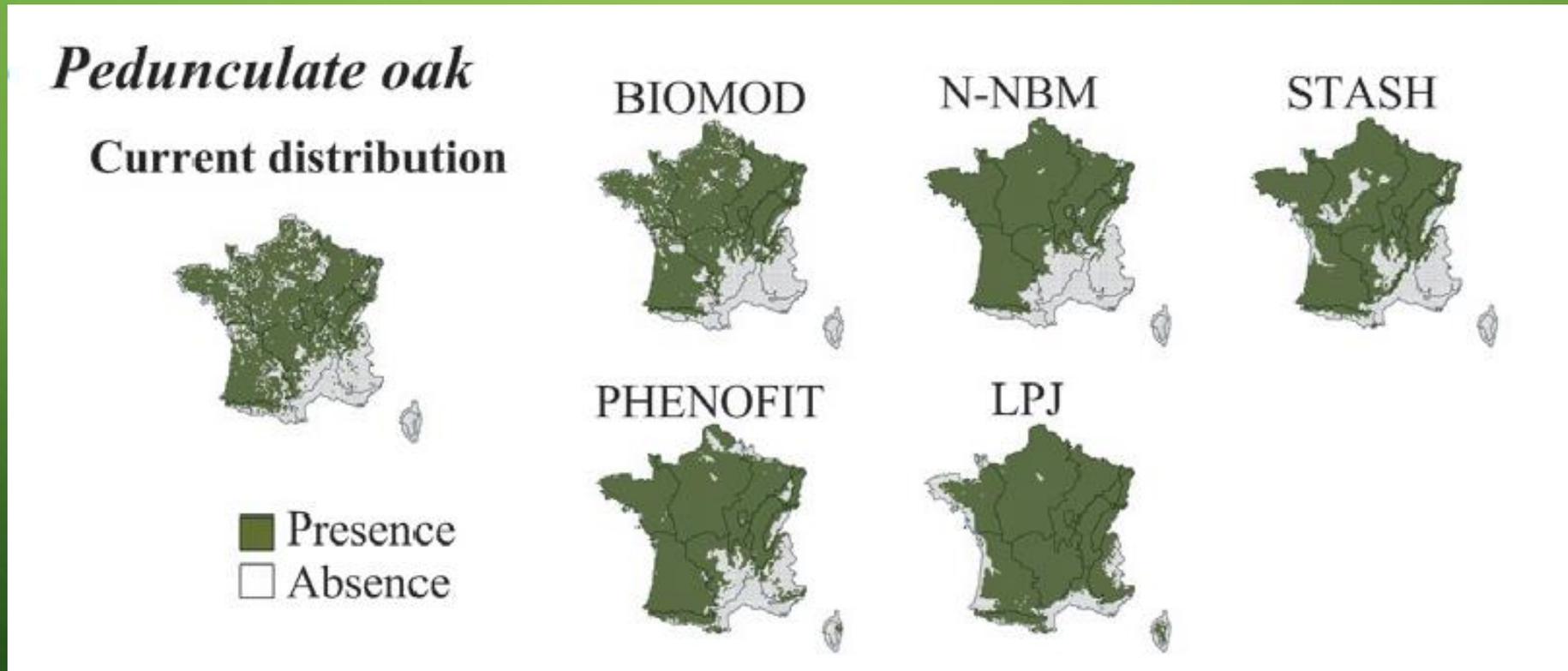
Comparaison des modèles corrélatifs et basés sur les processus

PHENOFIT vs BIOMOD



Comparaison des modèles corrélatifs et basés sur les processus

Répartition potentielle du chêne pédonculé



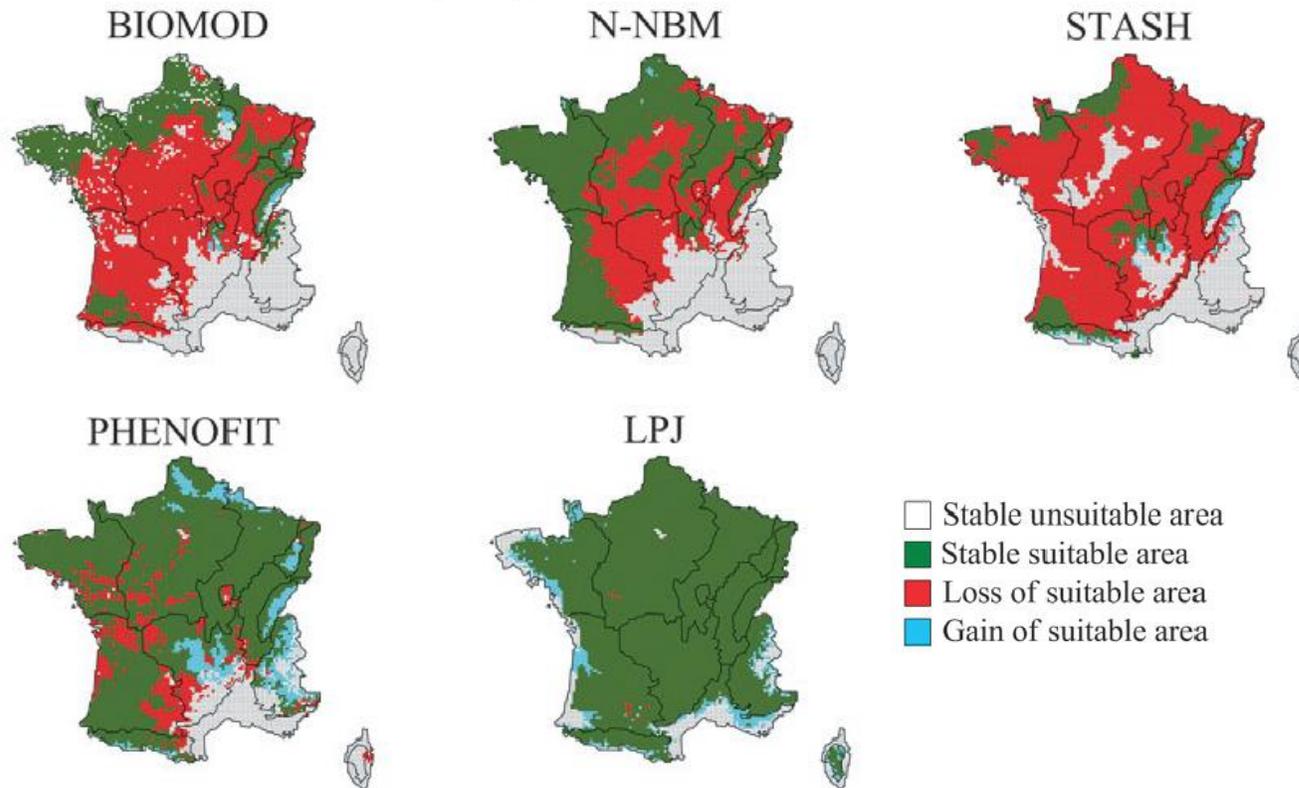
Modèles
corrélatifs

Modèles
processus

Comparaison des modèles corrélatifs et basés sur les processus

Répartition potentielle du chêne pédonculé

Predicted future distribution (2055)



Modèles
corrélatifs

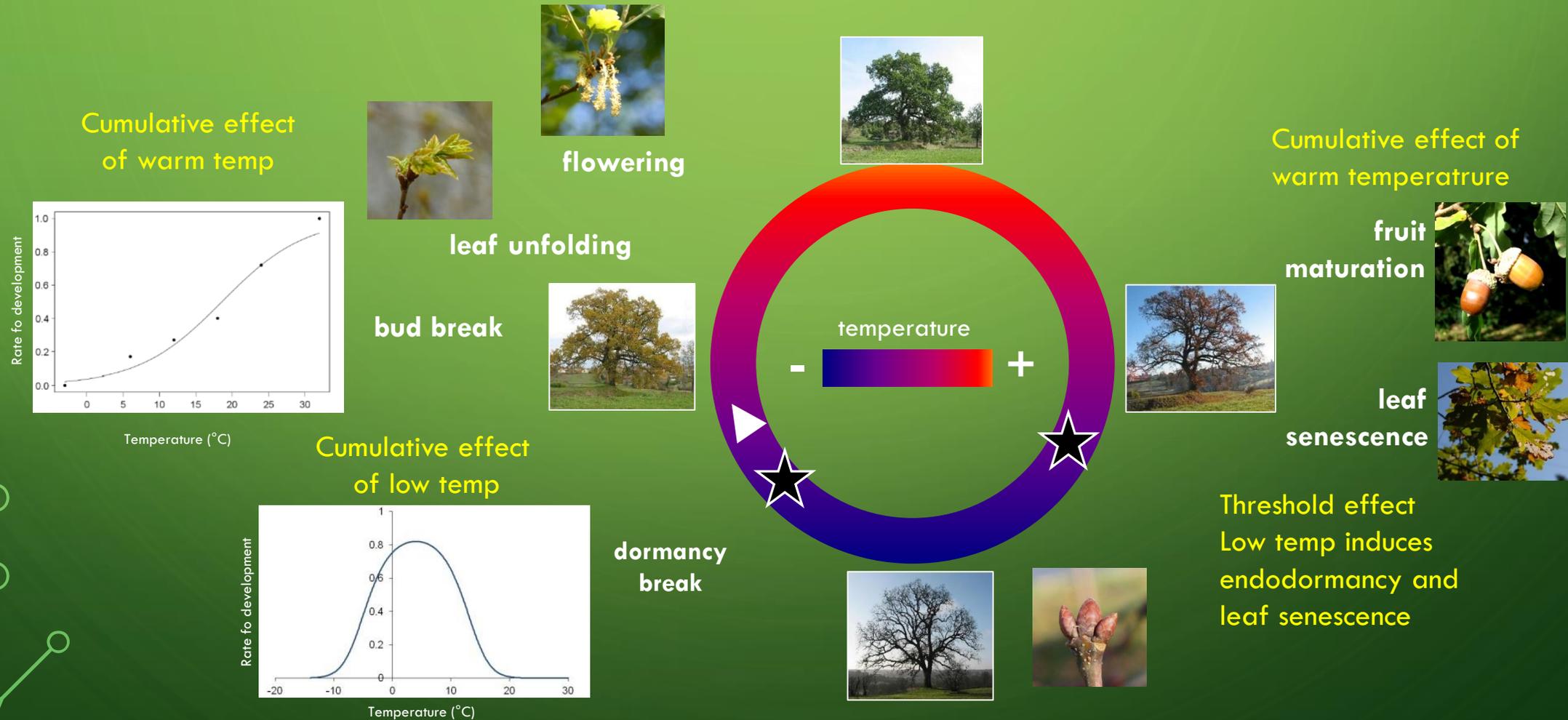
Modèles
processus

Comparaison des modèles corrélatifs et basés sur les processus

- Les modèles donnent des prédictions similaires en conditions climatiques historiques mais divergentes en conditions futures
- Les modèles corrélatifs semblent plus sensibles au changement climatique
- Pourquoi ? Quels modèles sont les fiables ? (Questions en suspend...)

Où s'arrêter dans la description des processus ?

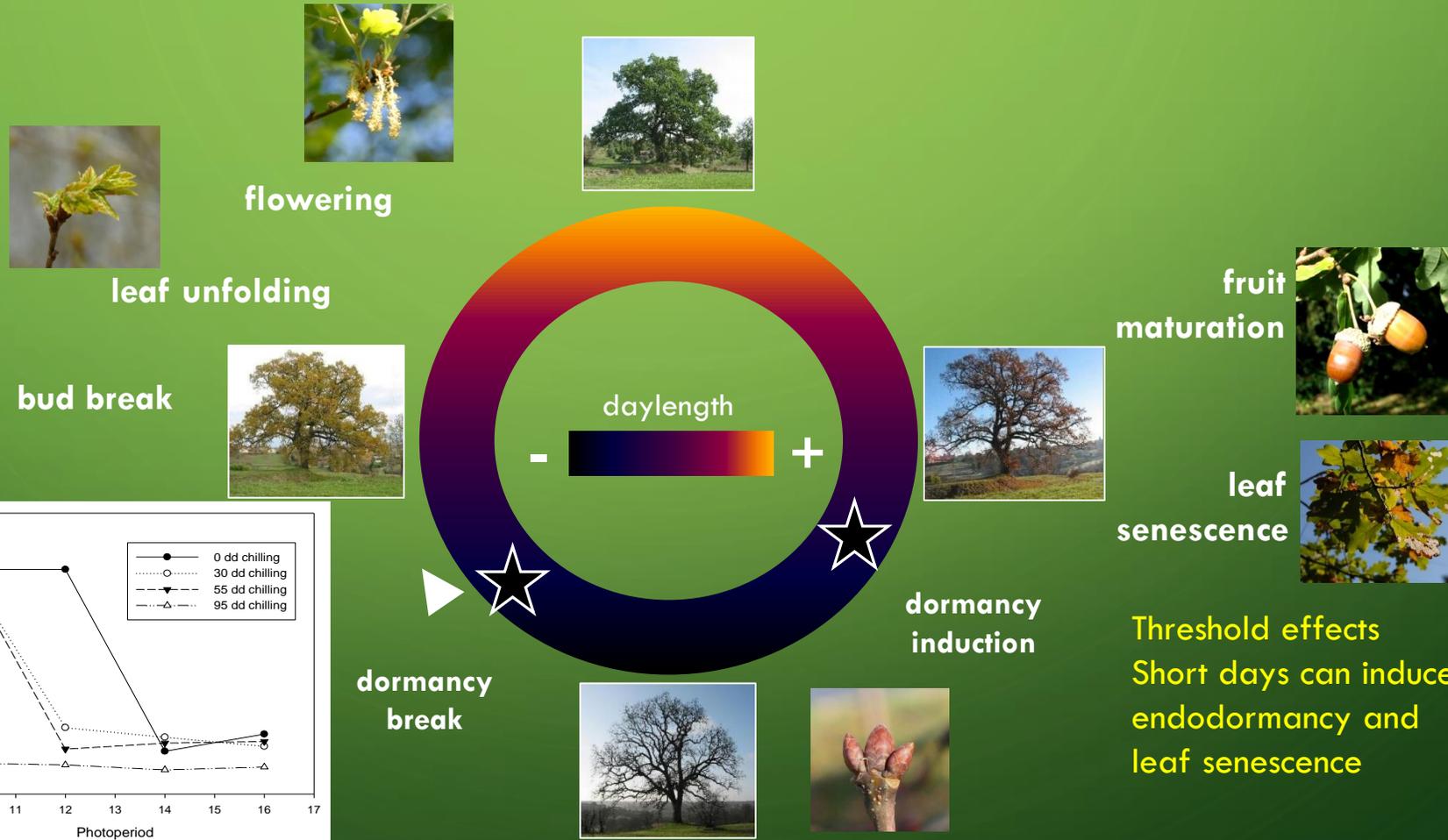
Effet de la température sur le cycle annuel de développement



Où s'arrêter dans la description des processus ?

Effet de la durée du jour sur le cycle annuel de développement

Long days can compensate for insufficient chilling temperature



Threshold effects
Short days can induce endodormancy and leaf senescence

Où s'arrêter dans la description des processus ?

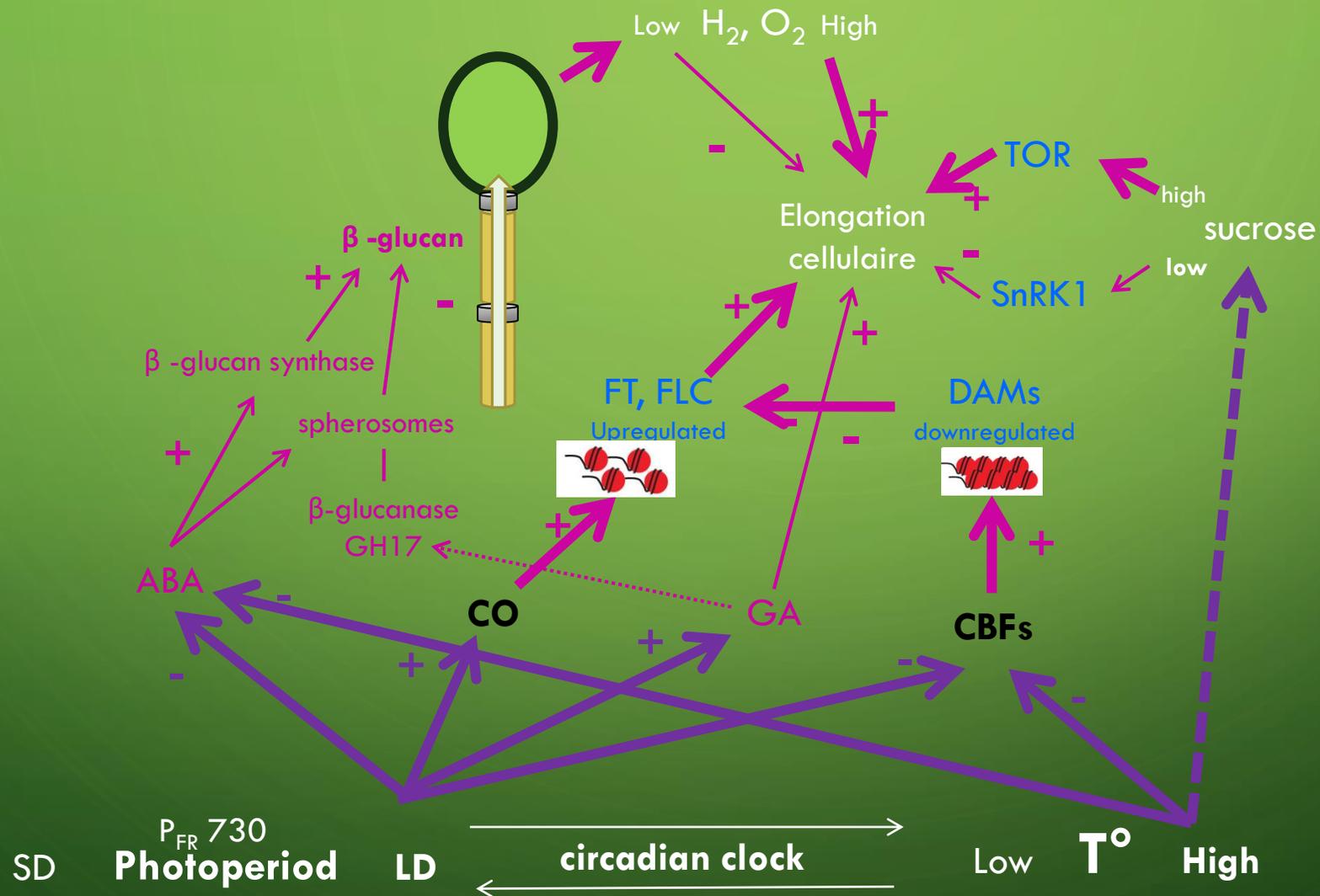
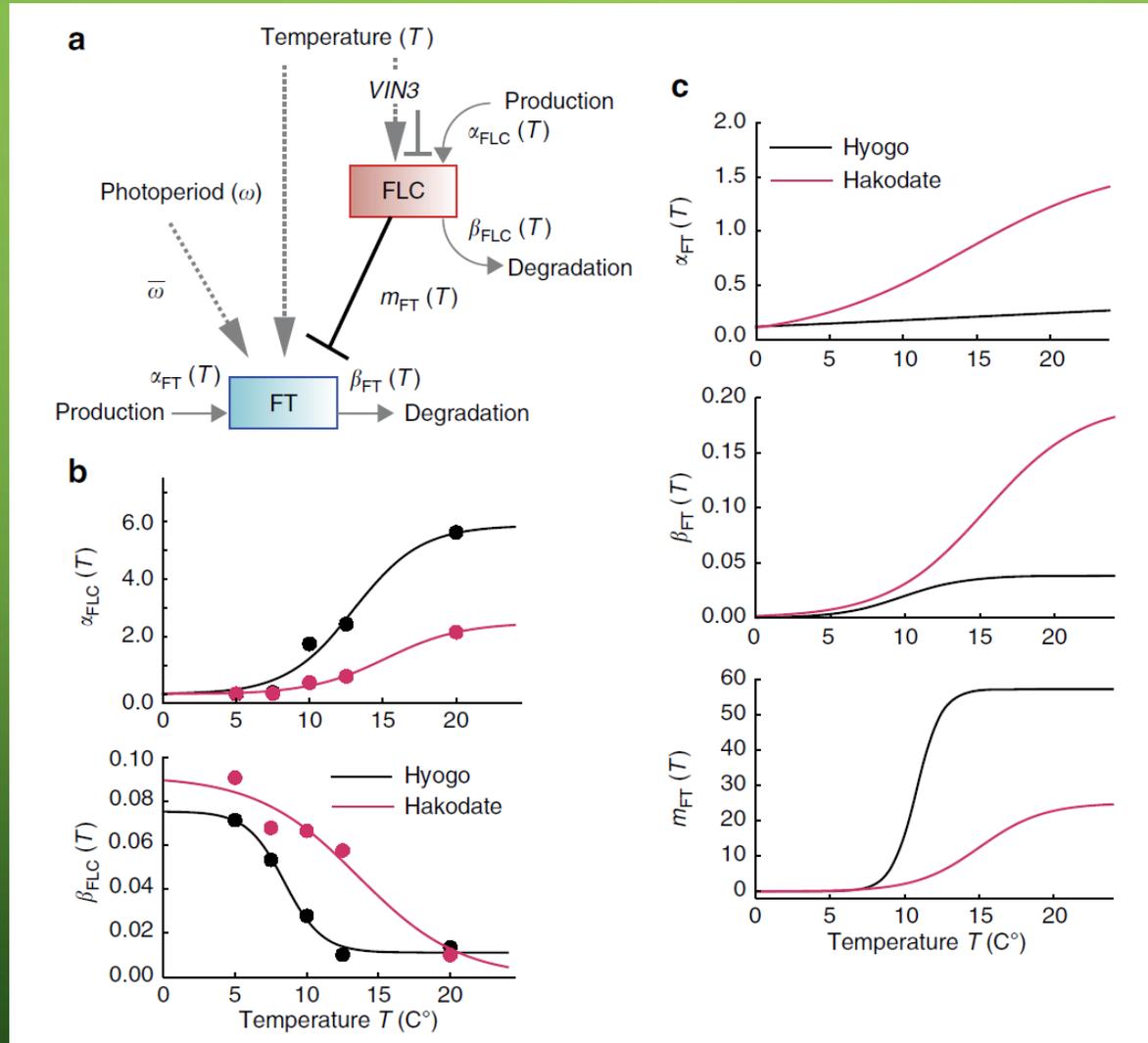


Schéma de régulation de l'activité cellulaire

- ABA: Abscisic Acid
- GA: Gibberellic Acid
- CO: Constans protein (unstable in LD)
- CBF: C-repeat binding Factors
- DAM: Dormancy-associated MADS-box genes
- FLC, Flowering Locus C; FT, Flowering Locus T
- SnRK1: protein kinase pathway
- TOR: Target of rapamycin kinase pathway

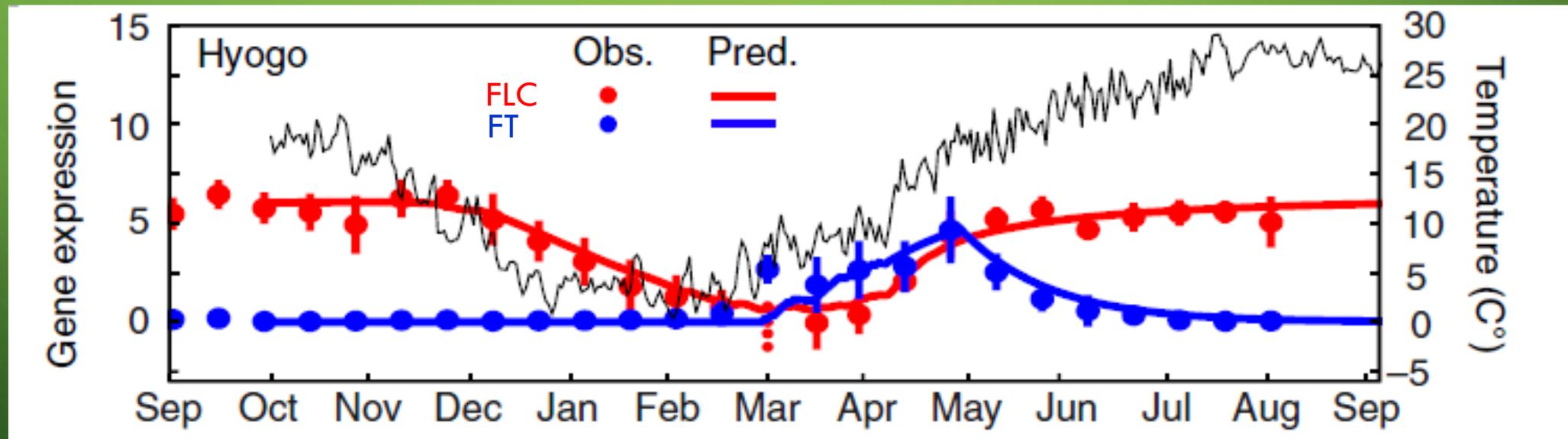
Où s'arrêter dans la description des processus ?



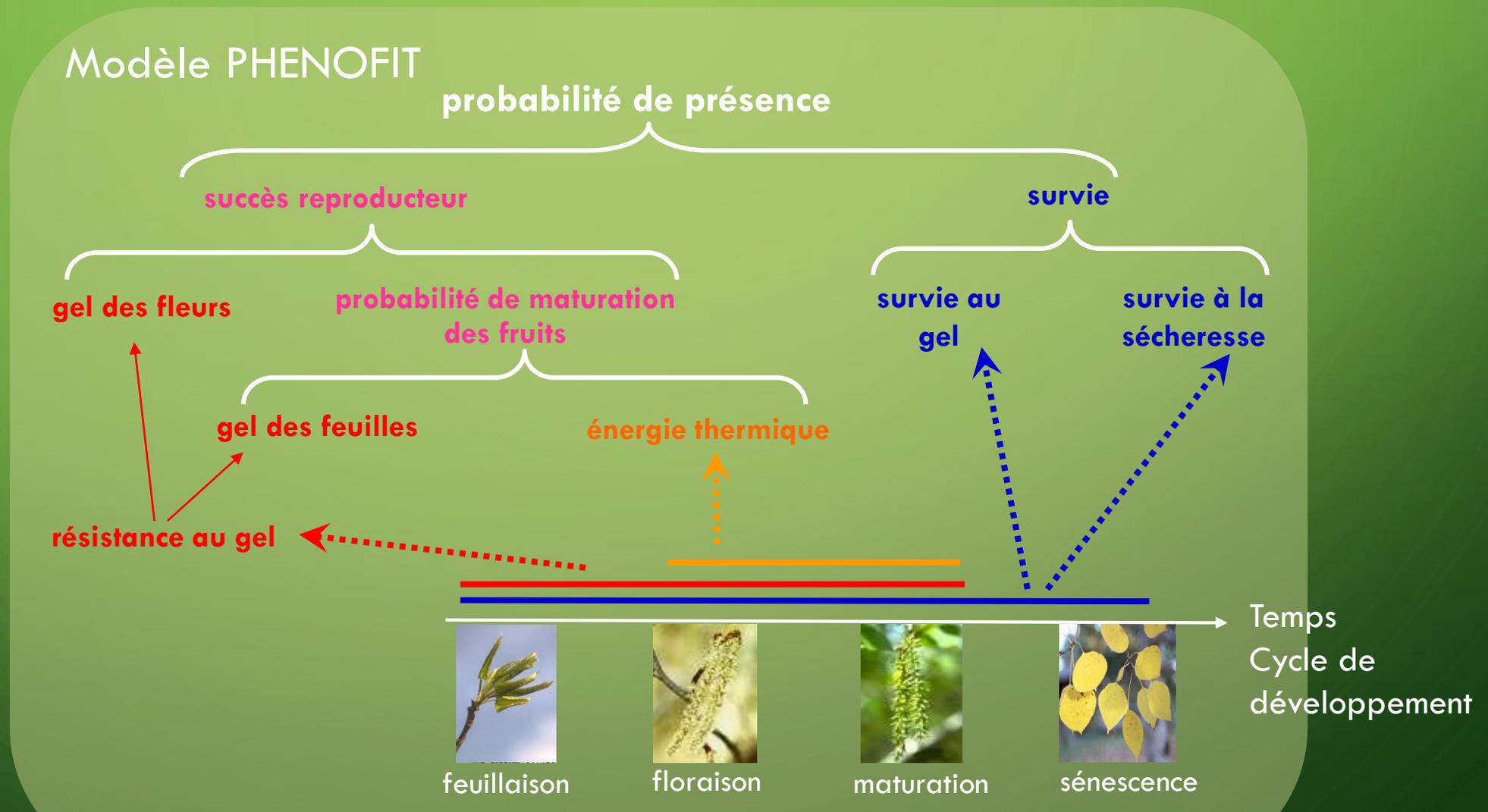
Modélisation de la dynamique de régulation des gènes impliqués dans la date de floraison chez *Arabidopsis thaliana*

Où s'arrêter dans la description des processus ?

Simulation en conditions réelles de la dynamique d'expression des gènes impliqués dans la date de floraison chez *Arabidopsis thaliana*

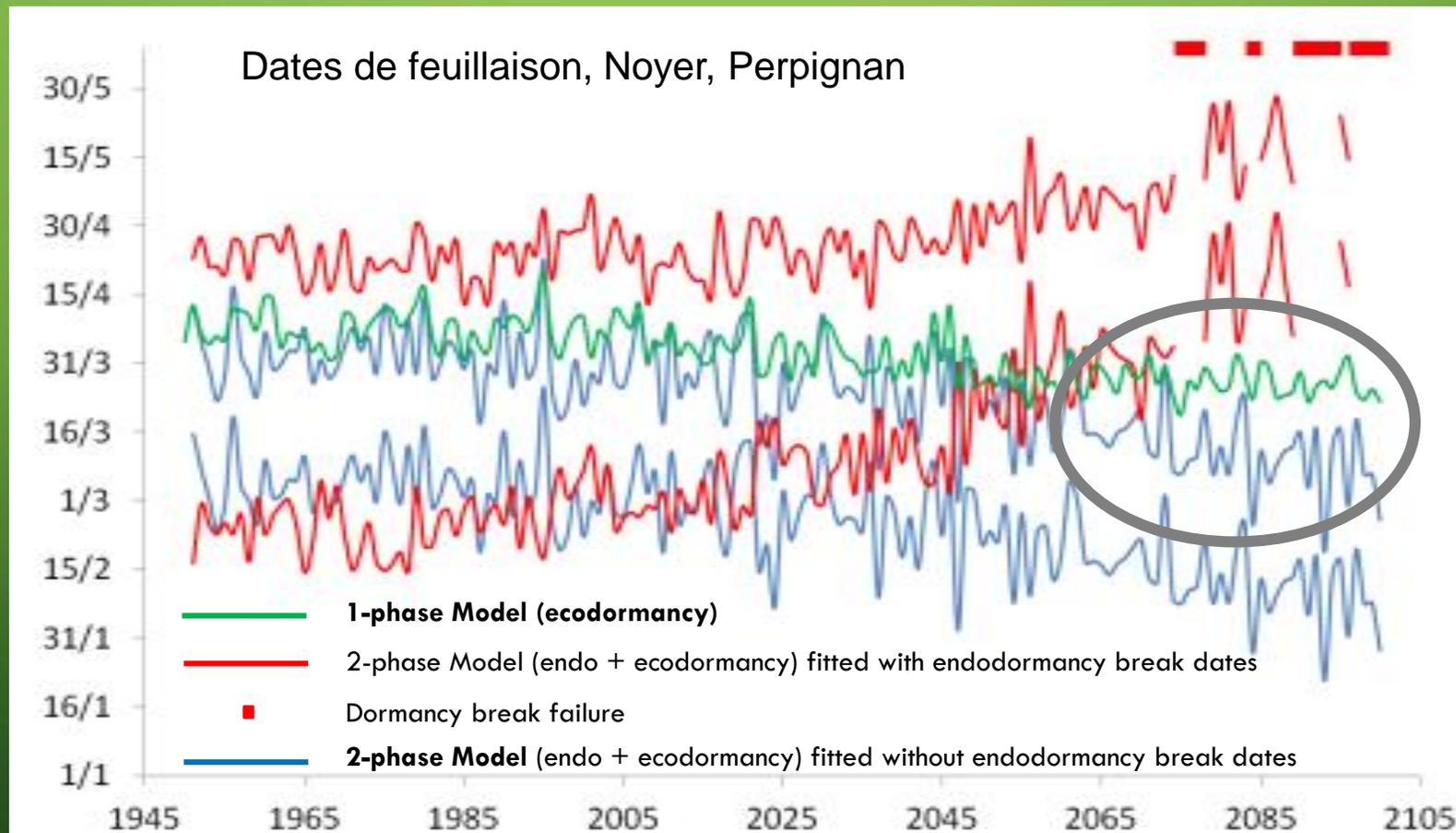


Où s'arrêter dans la description des processus ?



Où s'arrêter dans la description des processus ?

Des processus peuvent se révéler importants en conditions climatiques futures seulement



The image features a dark green gradient background with white circuit-like lines in the corners. These lines consist of straight paths that branch out and terminate in small circles, resembling a stylized PCB or network diagram. The lines are located in the top-left, top-right, bottom-left, and bottom-right corners.

MERCI DE VOTRE ATTENTION

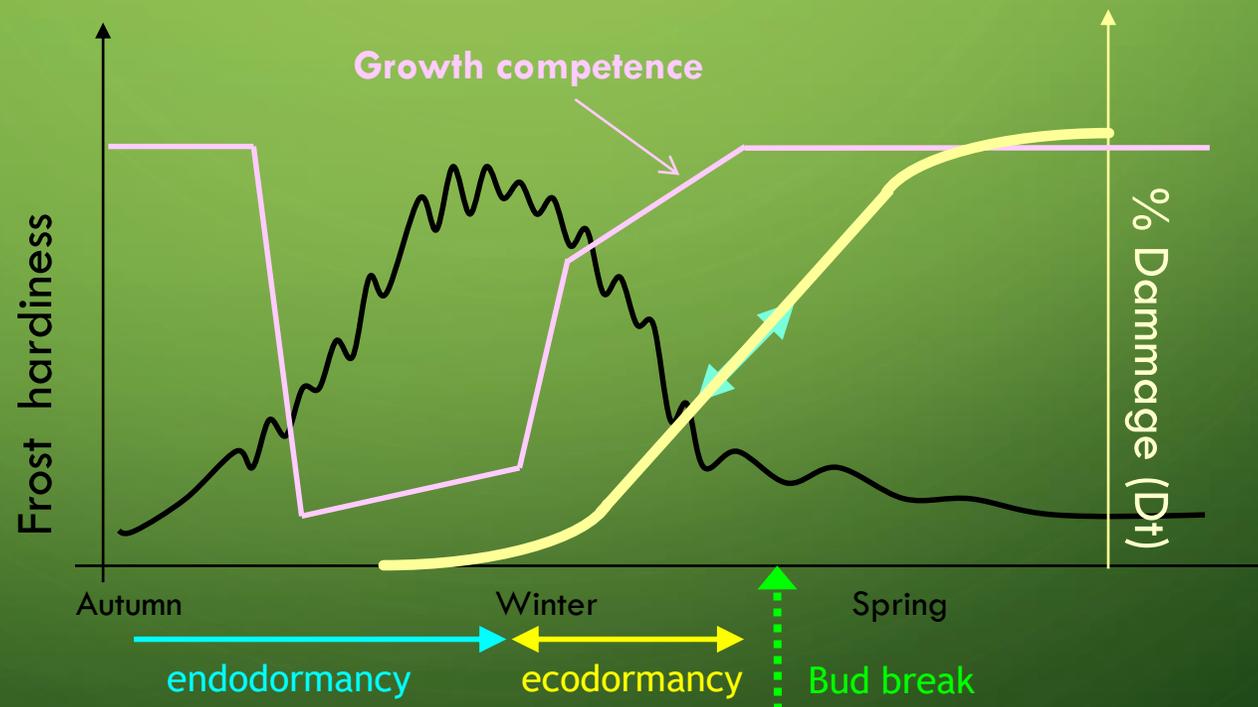
Modèle de dommage de gel

(Leinonen et al. 1995, 1996)

D , indice de dommage
 T , température
 NL , « night length »
 R , résistance (LT50)
 C_R , capacité de croissance

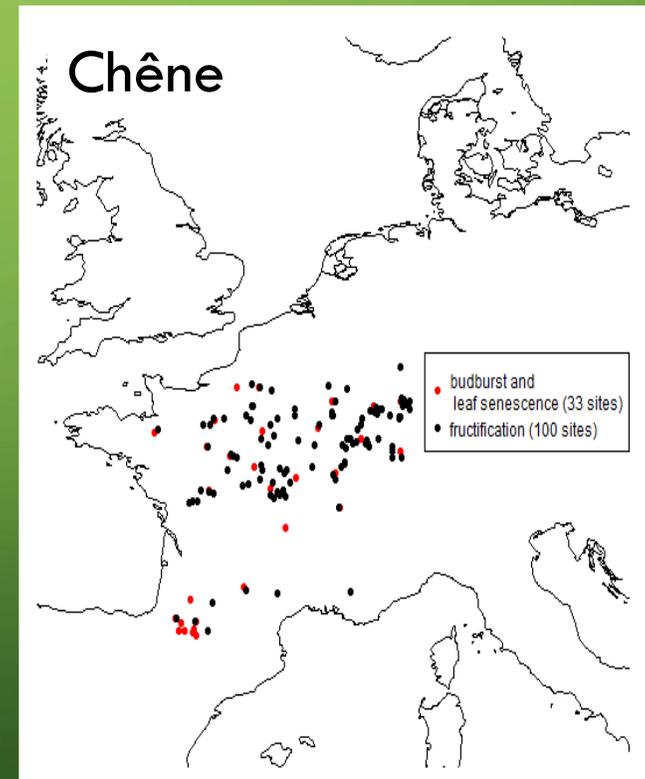
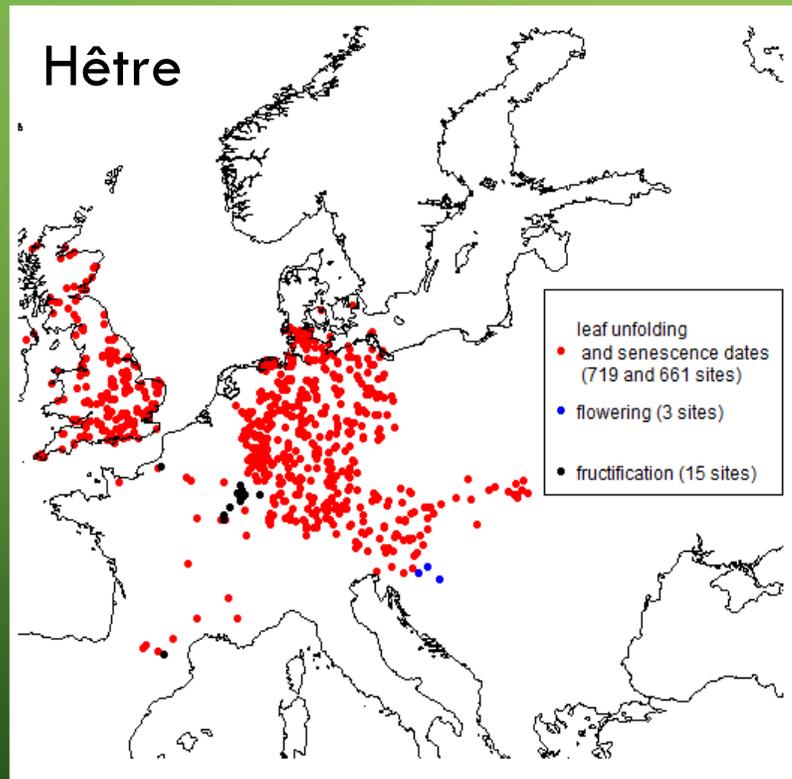
$$D_t = \frac{1}{1 + e^{B(t) [R(t) - T(t)]}}$$

$$B(t) = a b e^{c R(t)}$$



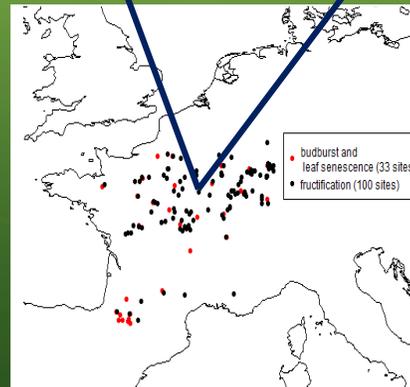
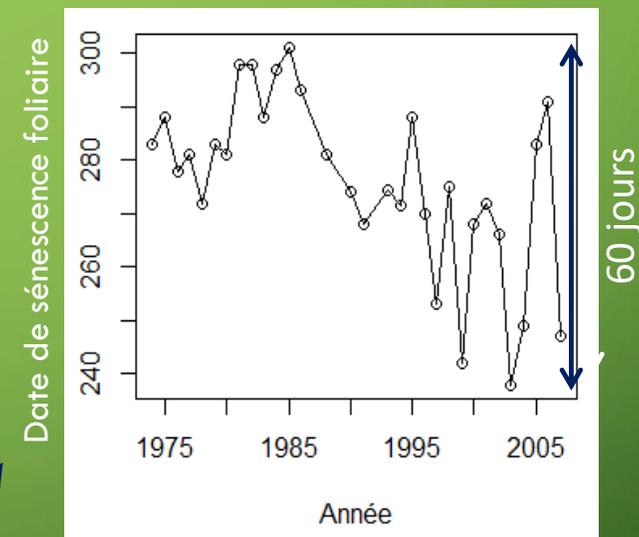
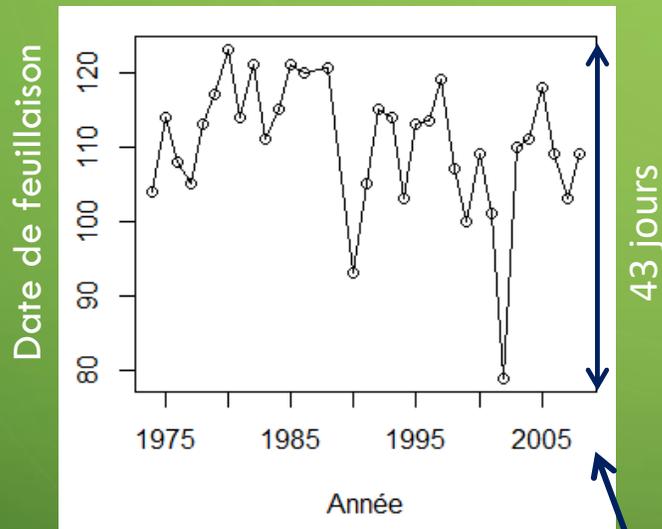
Ajustement des modèles basés sur les processus

Exemple : Données phénologiques disponibles pour paramétrer les modèles phénologiques



Ajustement des modèles basés sur les processus

Exemple : Chêne sessile, dates de feuillaison et senescence foliaire



Comparaison des modèles corrélatifs et basés sur les processus

Probabilité de présence en 2050 vs présent

