

**Une forme hyperbolique générique
pour la prise en compte des facteurs environnementaux**
Recalibration du modèle Salem

Patrick Vallet, LESSEM

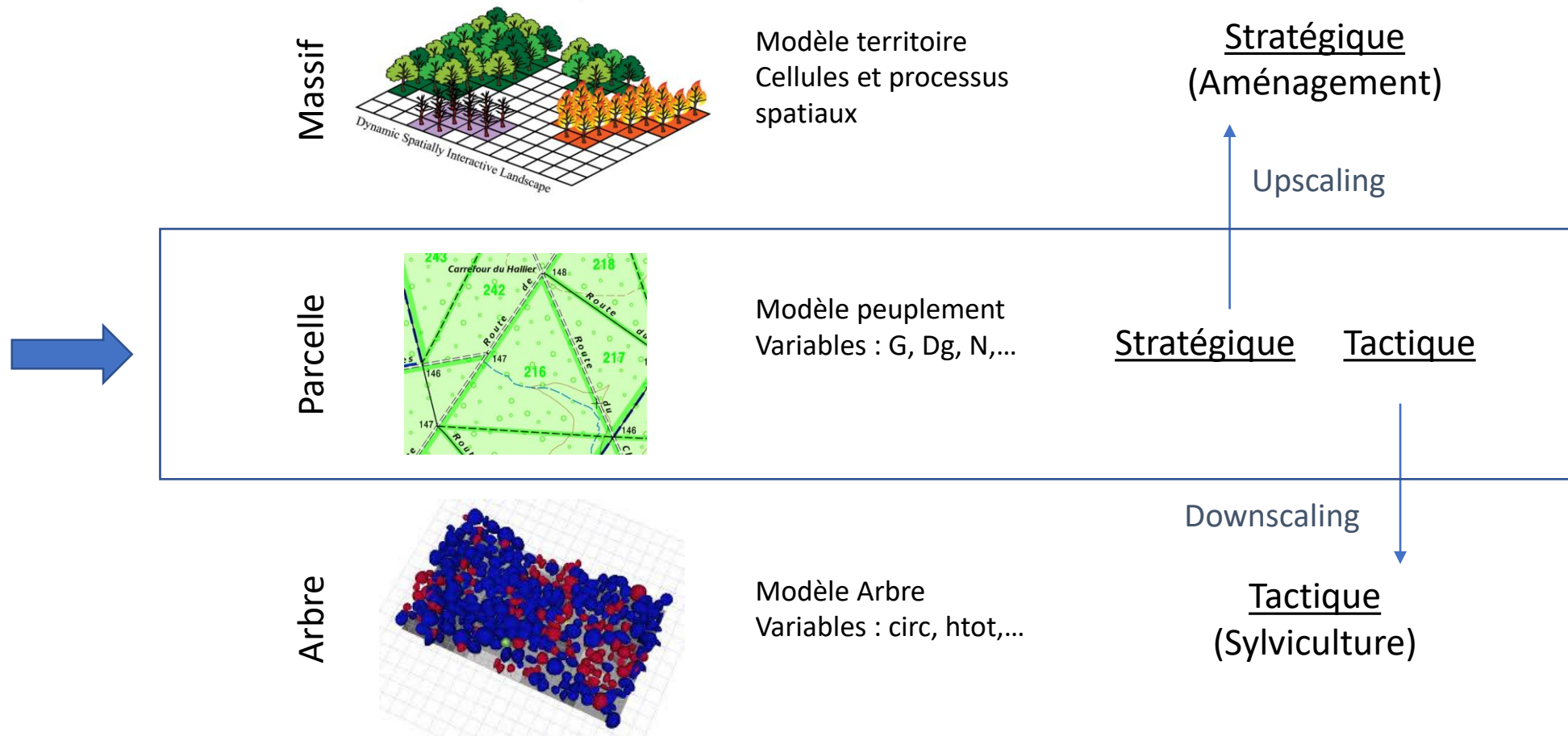
FOREM, Montpellier, 1-3 avril 2025

INRAE

➤ Modèle SALEM

- StAnd LLevel Model

Echelle de modélisation



➤ Modèle SALEM

Calibration sur les données de l'Inventaire Forestier National

- Modèle peuplement : pas de description fine des individus...
- Mais bonne couverture des essences et des conditions environnementales
 - Influence de variables édaphiques (pH, C/N, profondeur, taux de cailloux, etc.)
 - Du climat trentennal (températures mensuelles min, moyenne, max, pluies, etc.)
 - De la topographie, exposition, etc.
- Bonne couverture des facteurs dendrométriques et de gestion
 - Stade de développement
 - Densité du peuplement

➤ Modèle SALEM

Calibration sur les données de l'Inventaire Forestier National

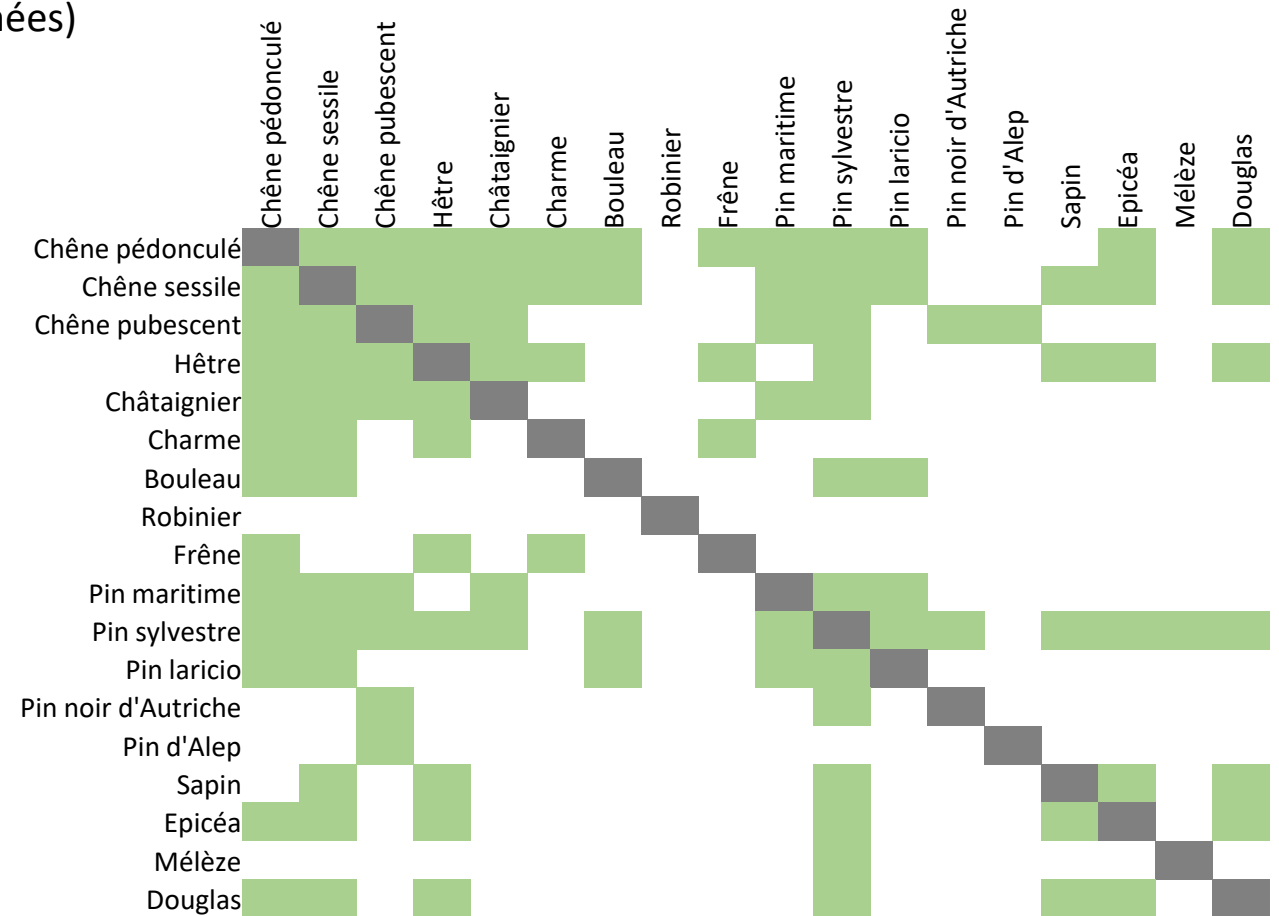
Version antérieure de Salem : campagnes 2006 - 2012 (7 années)

Nouvelle version de Salem : campagnes 2005 – 2022 (18 années)

Peuplements purs : 18 espèces

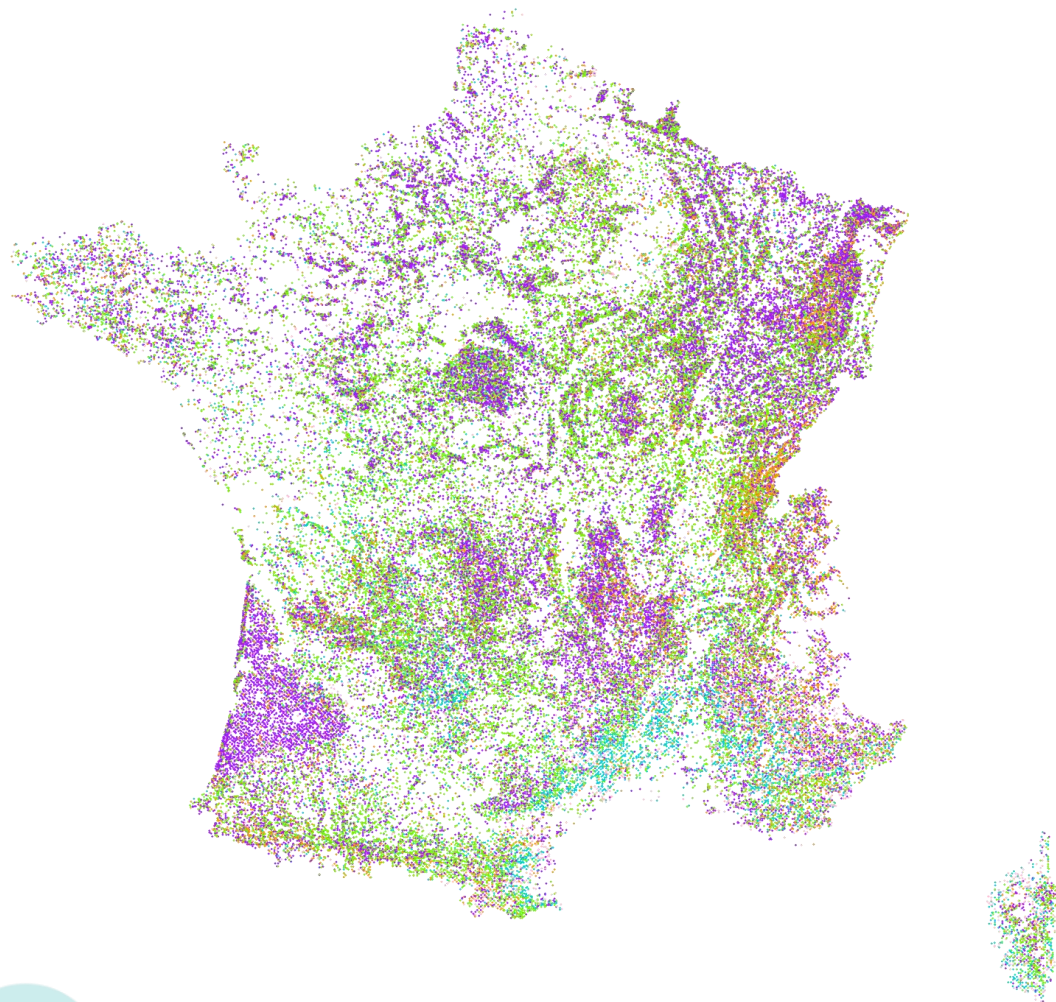
Chêne pédonculé
 Chêne sessile
 Chêne pubescent
 Hêtre
 Châtaignier
 Charme
 Bouleau
 Robinier
 Frêne
 Pin maritime
 Pin sylvestre
 Pin laricio
 Pin noir d'Autriche
 Pin d'Alep
 Sapin
 Epicéa
 Mélèze
 Douglas

Mélanges : 52 couples disponibles



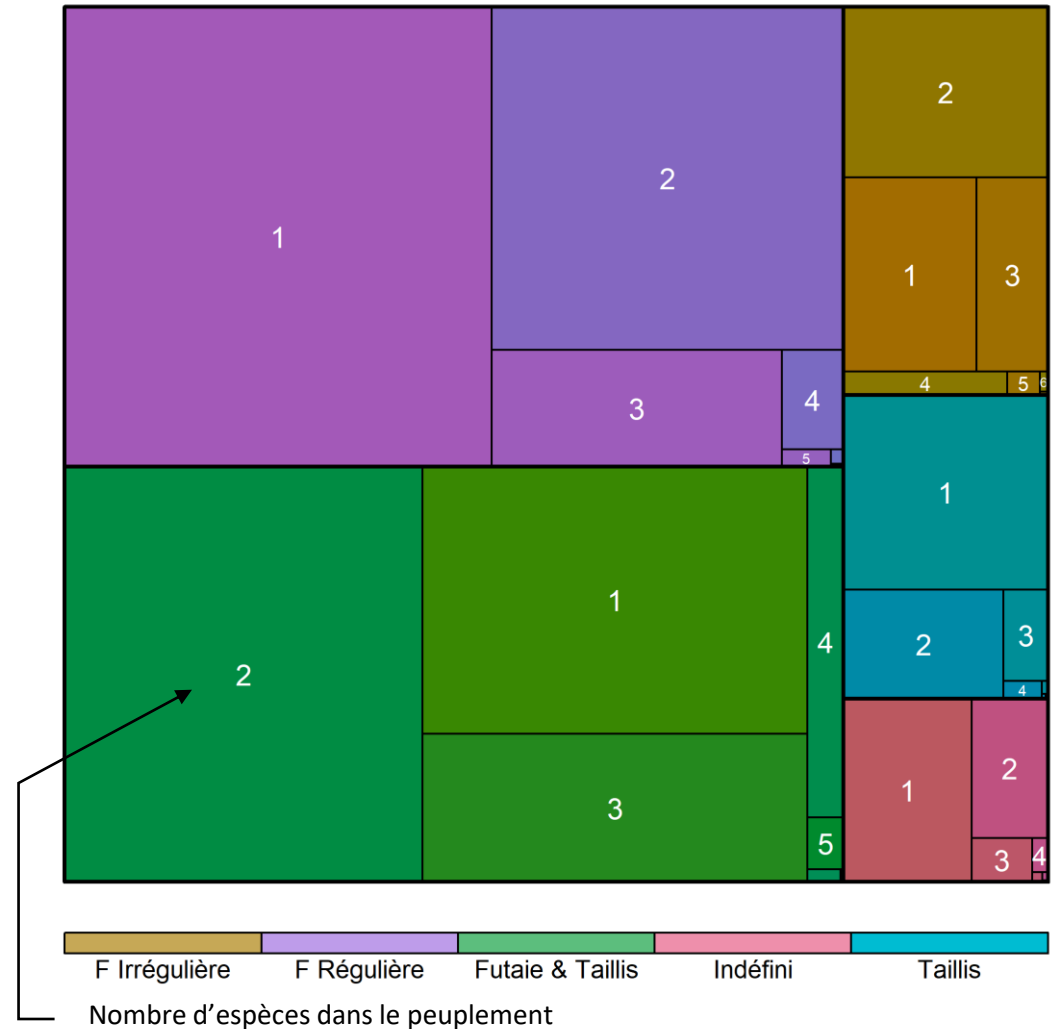
➤ Modèle SALEM

Calibration sur les données de l'Inventaire Forestier National



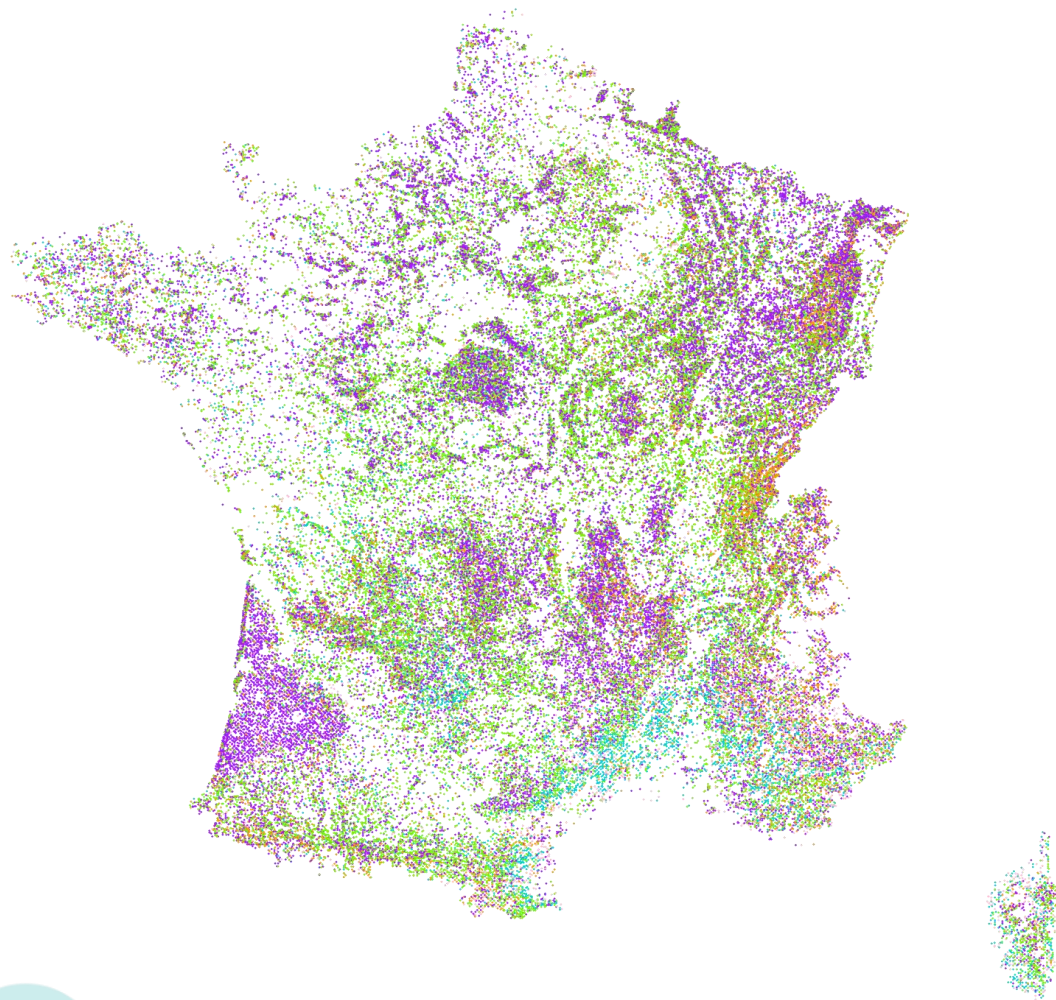
De nombreux besoins de simulation
Quelle validité des modèles en extrapolation ?

Répartition des placettes IFN
selon leur structure et le nombre d'espèces



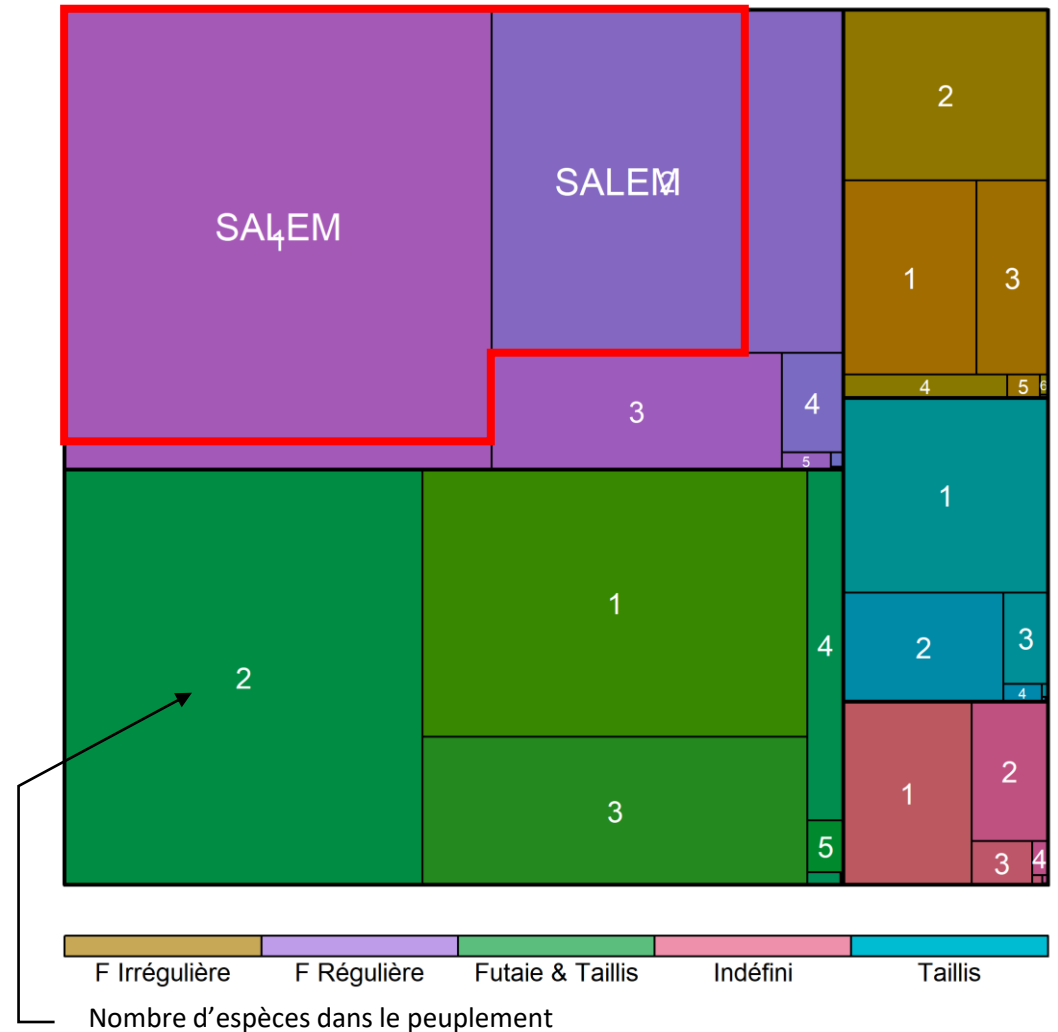
➤ Modèle SALEM

Calibration sur les données de l'Inventaire Forestier National



De nombreux besoins de simulation
Quelle validité des modèles en extrapolation ?

Répartition des placettes IFN
selon leur structure et le nombre d'espèces



➤ Evaluer l'effet du mélange sur les données IFN

- Etape 1: Sélection de sous-jeux de données
 - Sélection de placettes en peuplements purs
 - Sélection de placettes en peuplements mélangés
- Etape 2: Développement d'un modèle de croissance **en peuplement pur**
 - Productivité = f(variables climatiques et édaphiques, stade de dev., sylviculture)
- Etape 3: Effet mélange
 - Modèle appliqué **en peuplement mélangé** → Productivité attendue (témoin)
 - Calcul de l'effet du mélange

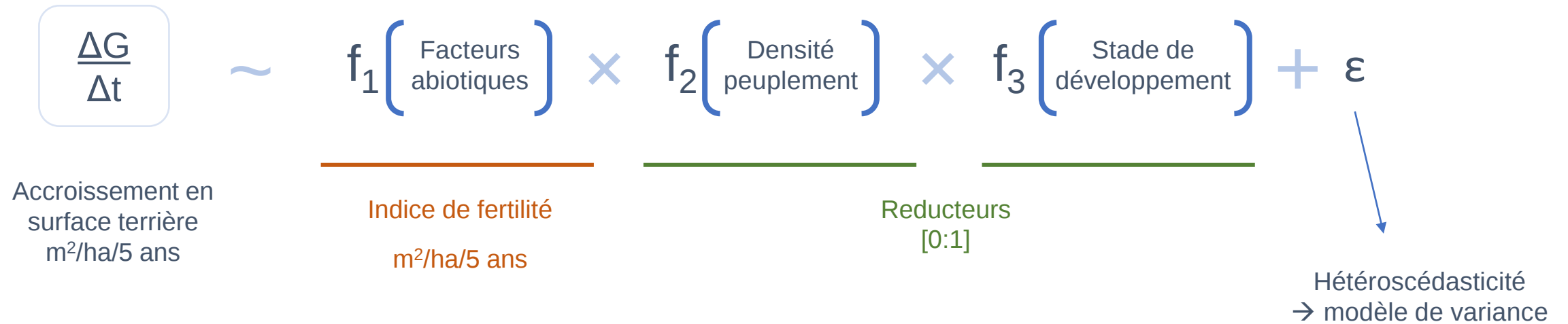
$$\text{Effet du mélange} = \frac{\text{Productivité}_{\text{observée}} - \text{Productivité}_{\text{attendue}}}{\text{Productivité}_{\text{attendue}}}$$



➤ Croissance radiale

Modèle en peuplements purs

- Modèle de type potentiel x réducteurs



➤ Importance d'intégrer les facteurs environnementaux

- Pour éviter les effets confondants
- Pour permettre la prédiction sur les peuplements mélangés

> Croissance radiale

Modèle en peuplements purs

- Objectif de construire des modèles « robustes » : travail sur la forme des équations

Combinaison de variables environnementales, dépendant des espèces

f_1 $\left[\begin{array}{l} \text{Facteurs} \\ \text{abiotiques} \end{array} \right]$

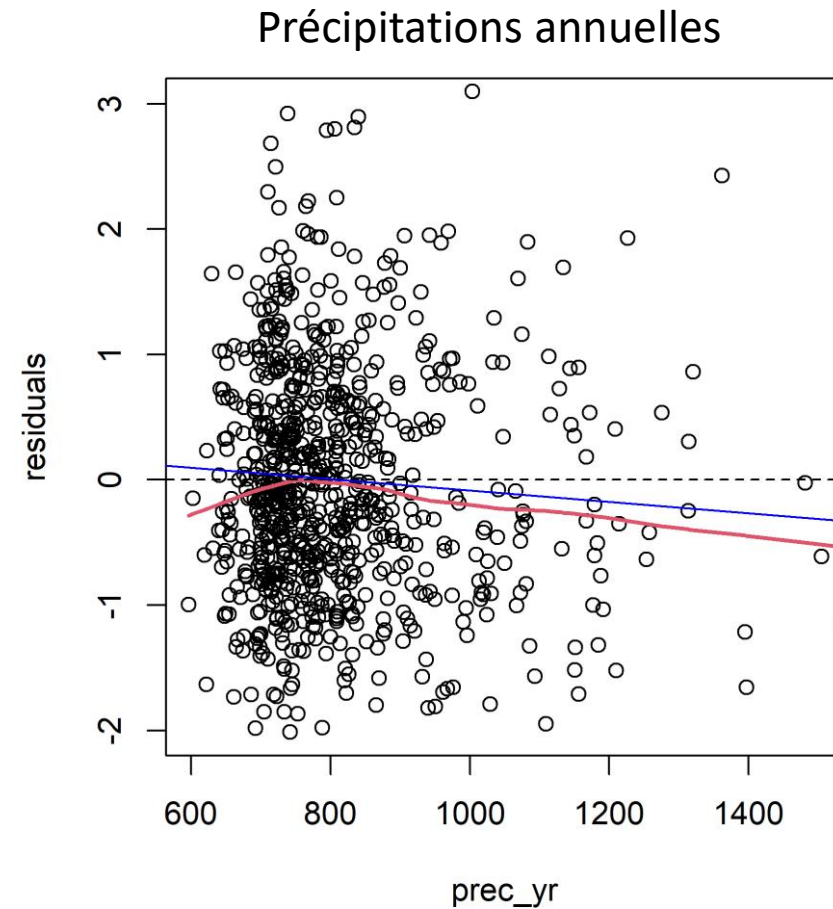
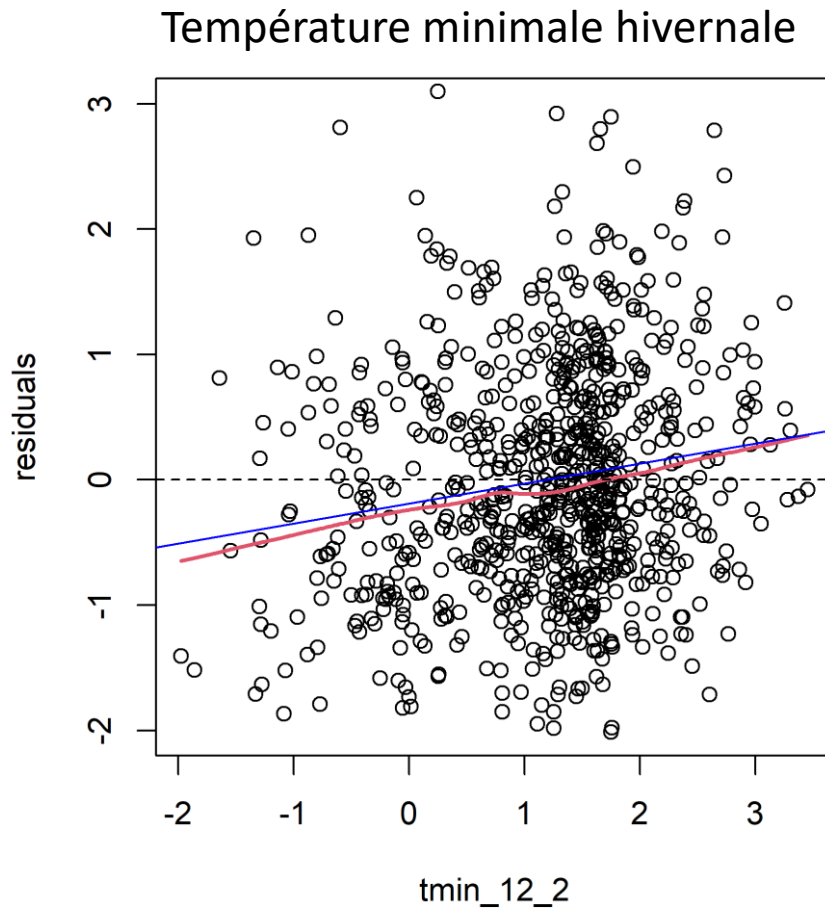
- Variables climatiques
 - Températures :
 - min, moyenne, max
 - Printanière, estivale, hivernale
 - Précipitations
 - Combinaison de ces variables (bilan hydrique, déficit en eau du sol, etc.)
- Variables de sol
 - pH
 - richesse trophique (azote)
 - Roche mère
 - ...
- Variables topographiques
 - Exposition, pente, etc.

→ Réponse pas toujours linéaire de ces différentes variables

➤ Croissance radiale

Modèle en peuplements purs

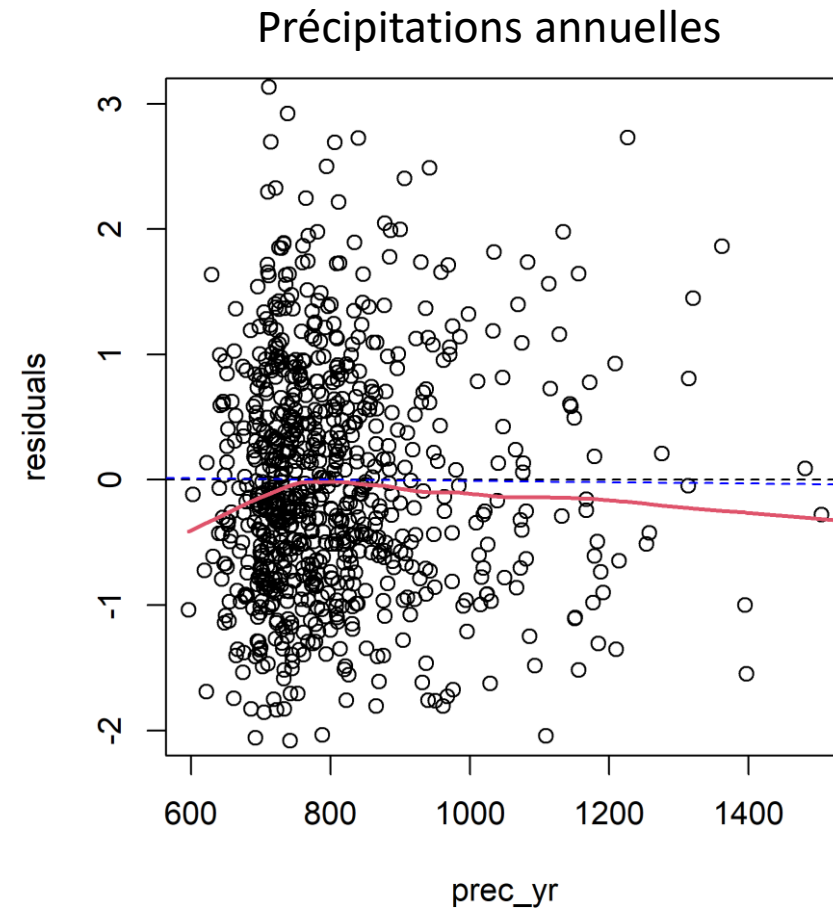
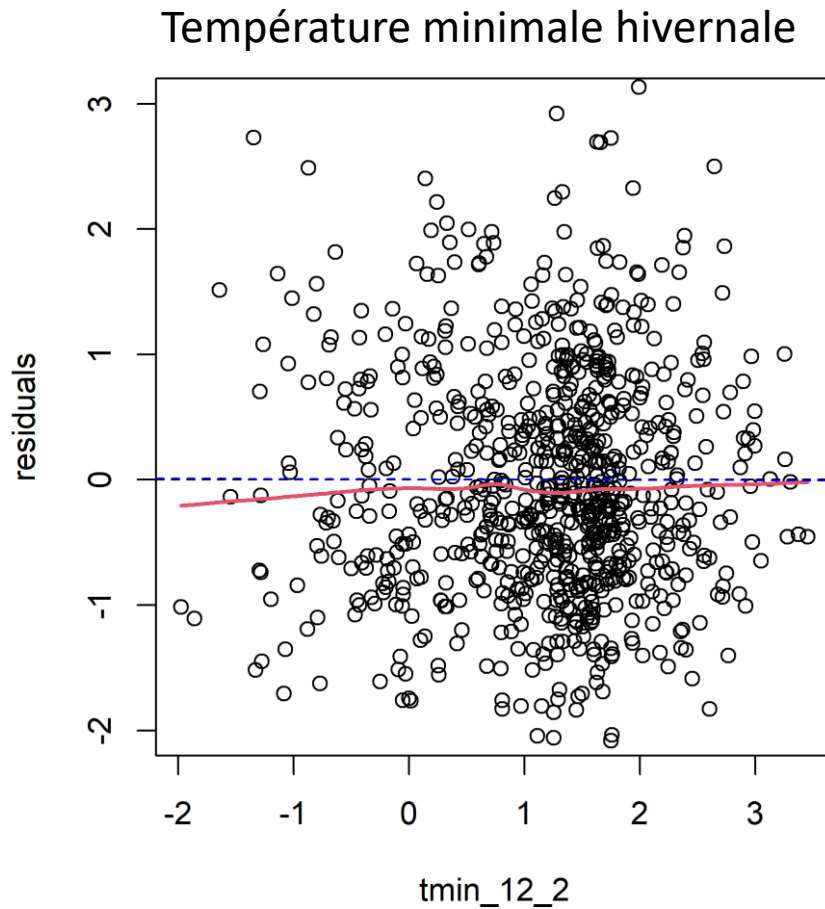
- Exemple chêne sessile : résidu d'un modèle sans prise en compte du climat



➤ Croissance radiale

Modèle en peuplements purs

- Exemple chêne sessile : résidu d'un modèle avec température minimale hivernale

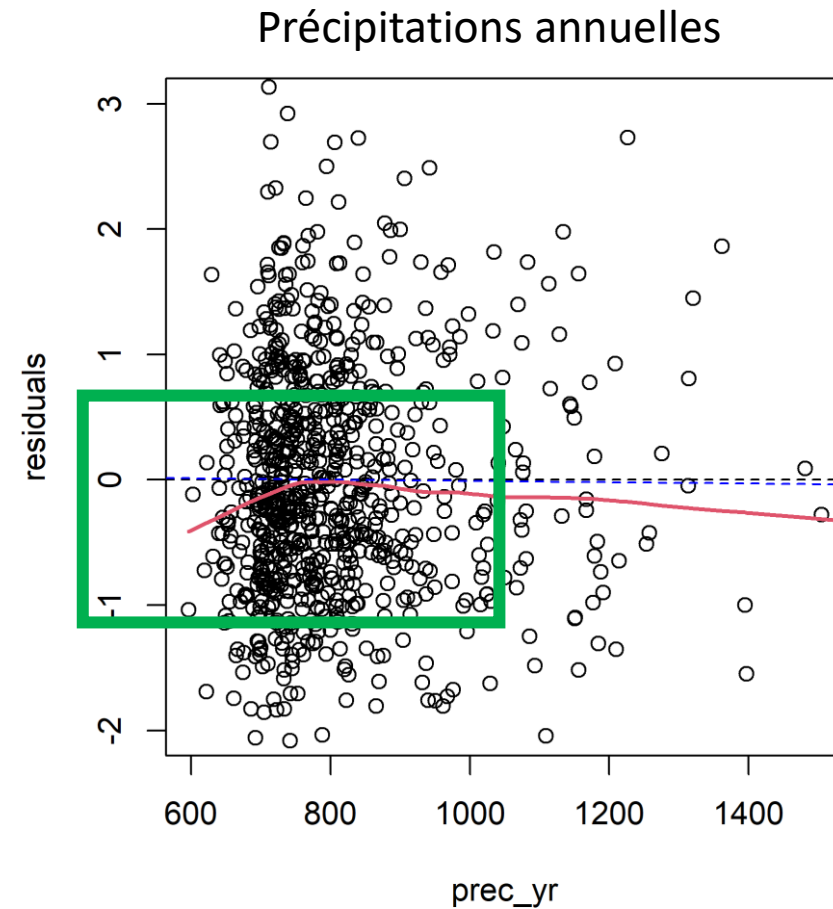
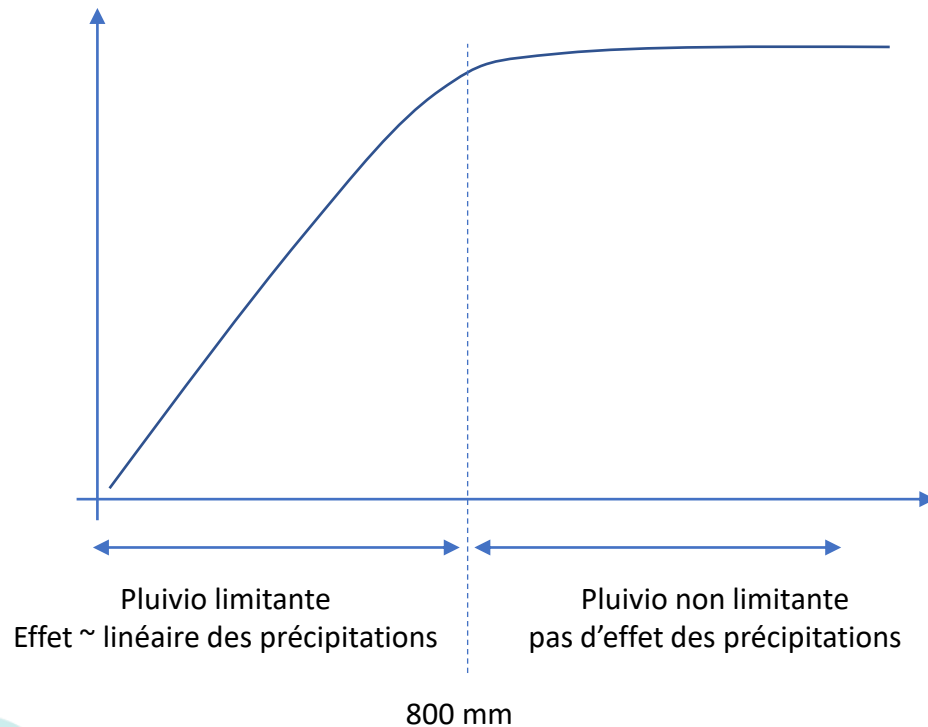


➤ Croissance radiale

Modèle en peuplements purs

- Exemple chêne sessile : résidu d'un modèle avec température minimale hivernale

Influence de la pluviométrie sur la croissance :



➤ Croissance radiale

Modèle en peuplements purs

- Meilleure prise en compte de la réponse au climat
→ développement d'une forme hyperbolique

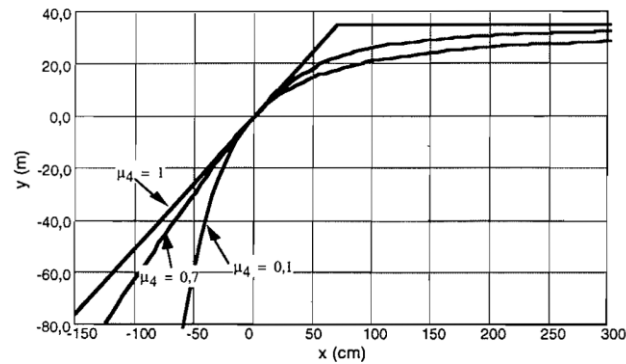
Un modèle hyperbolique pour l'ajustement de faisceaux de courbes hauteur-diamètre

JEAN-FRANÇOIS DHÔTE ET ÉRIC DE HERCÉ

*Laboratoire de recherches en sciences forestières, École nationale du génie rural, des eaux et des forêts –
Institut national de la recherche agronomique, 14, rue Girardet, F-54042 Nancy Cédex, France*

Reçu le 21 septembre 1993

Accepté le 22 mars 1994

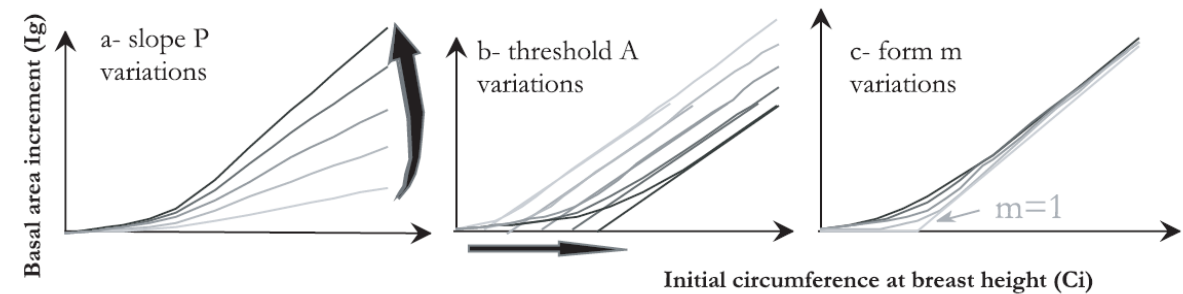


A flexible radial increment model for individual trees in pure even-aged stands

Christine DELEUZE^{a,*}, Olivier PAIN^a, Jean-François DHÔTE^b, Jean-Christophe HERVÉ^b

^a AFOCEL Station territoriale nord-est, route de Bonnencontre, 21170 Charrey-sur-Saône, France

^b Laboratoire d'étude des ressources forêt-bois, UMR INRA-ENGREF 1092, Équipe Dynamique des Systèmes Forestiers, ENGREF, 14 rue Girardet, CS 4216, 54042 Nancy, France



➤ Croissance radiale

Modèle en peuplements purs

- Meilleure prise en compte de la réponse au climat
→ développement d'une forme hyperbolique

$$\text{Hyp } (p, q, u, x_0, y_0) = y_0 + \frac{1}{2} \times \left((p + q)(x - x_0) - (p - q) \sqrt{x^2 - 2x_0x + \left(x_0^2 + \frac{u^2}{d}\right)} \right)$$

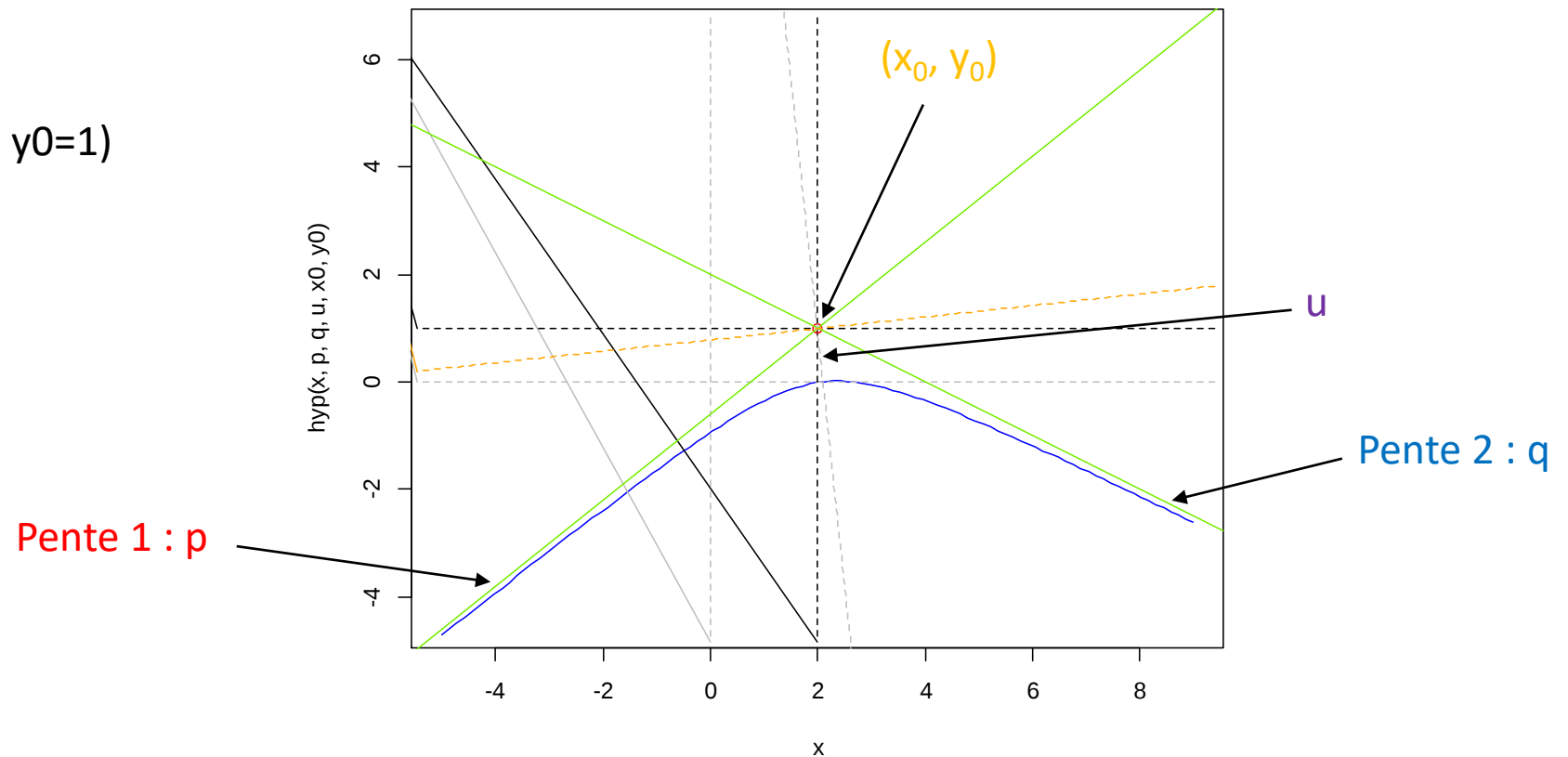
$$\text{Avec } d = \frac{1}{2} \times \left(\sqrt{(1 + p^2) \times (1 + q^2)} - 1 - p \times q \right)$$



➤ Forme hyperbolique

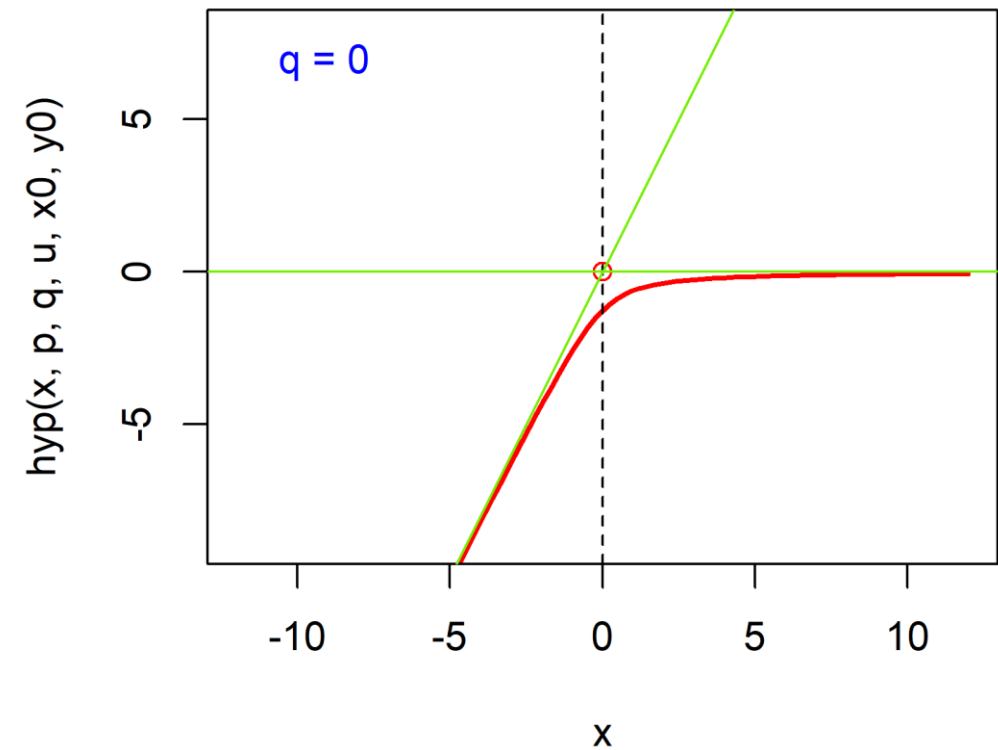
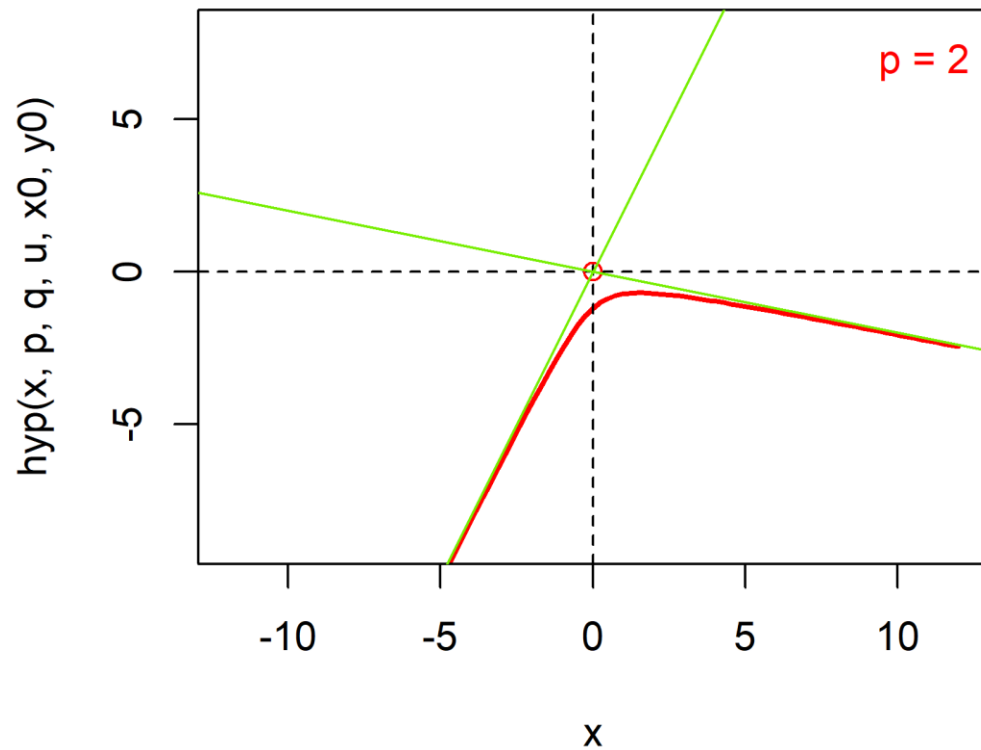
$$\text{Hyp}(\mathbf{p}, \mathbf{q}, \mathbf{u}, \mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0) = y_0 + \frac{1}{2} \times \left((p + q)(x - x_0) - (p - q) \sqrt{x^2 - 2x_0x + \left(x_0^2 + \frac{u^2}{d}\right)} \right)$$

Hyp (p=0.8, q=-0.5, u=1, x0=2, y0=1)



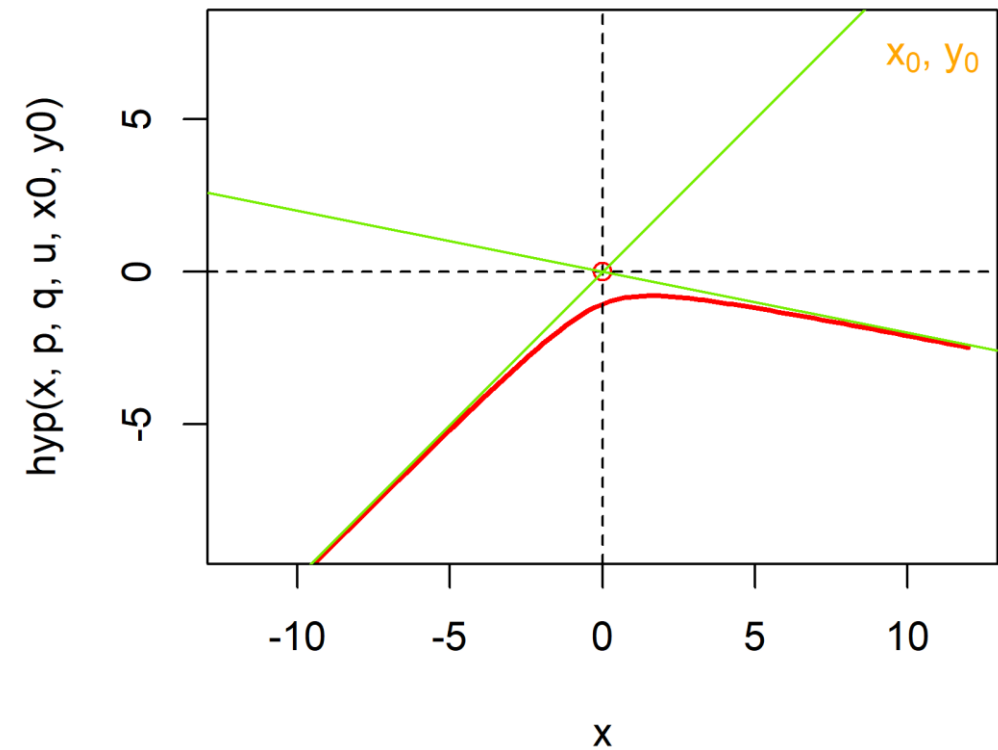
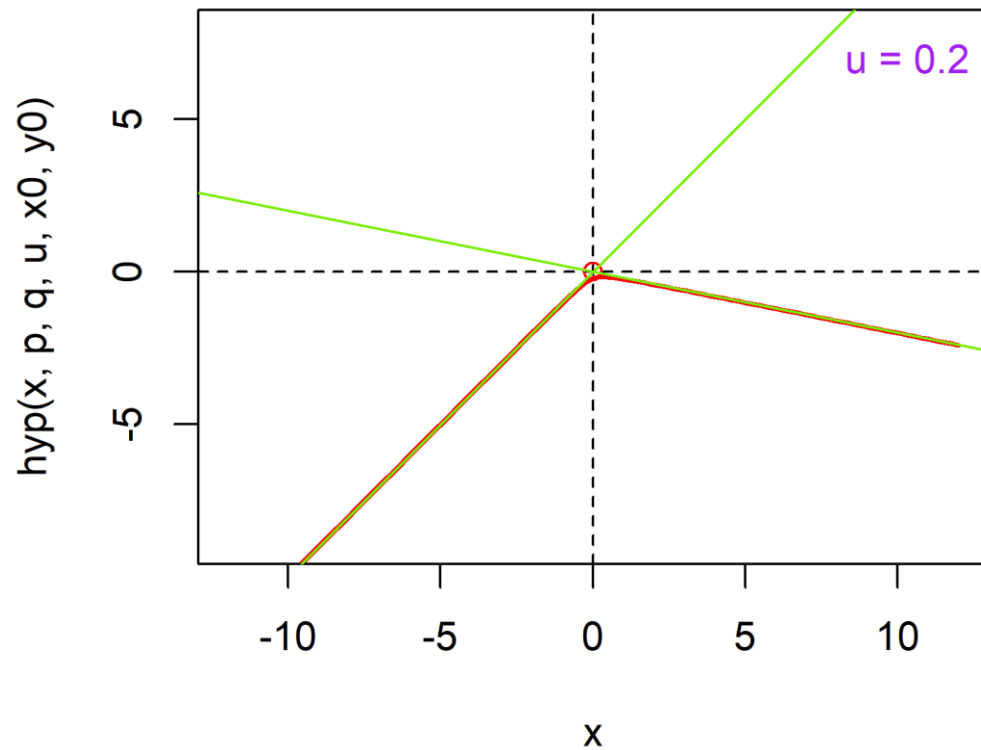
➤ Forme hyperbolique

$$\text{Hyp}(\mathbf{p}, \mathbf{q}, \mathbf{u}, \mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0) = y_0 + \frac{1}{2} \times \left((p + q)(x - x_0) - (p - q) \sqrt{x^2 - 2x_0x + \left(x_0^2 + \frac{u^2}{d}\right)} \right)$$



➤ Forme hyperbolique

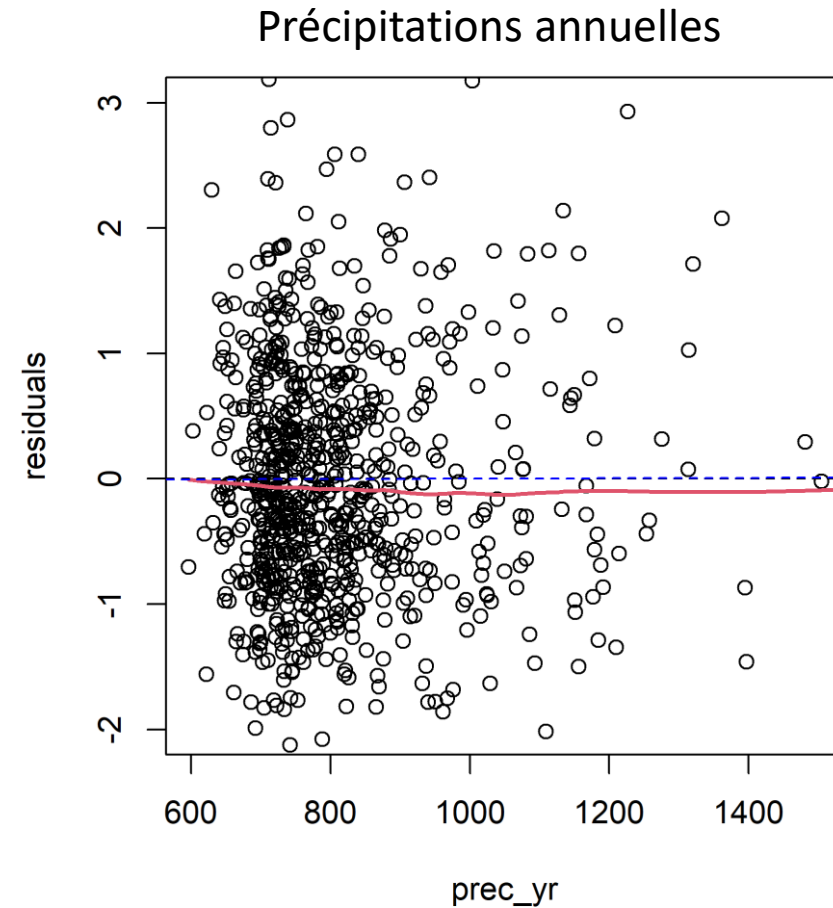
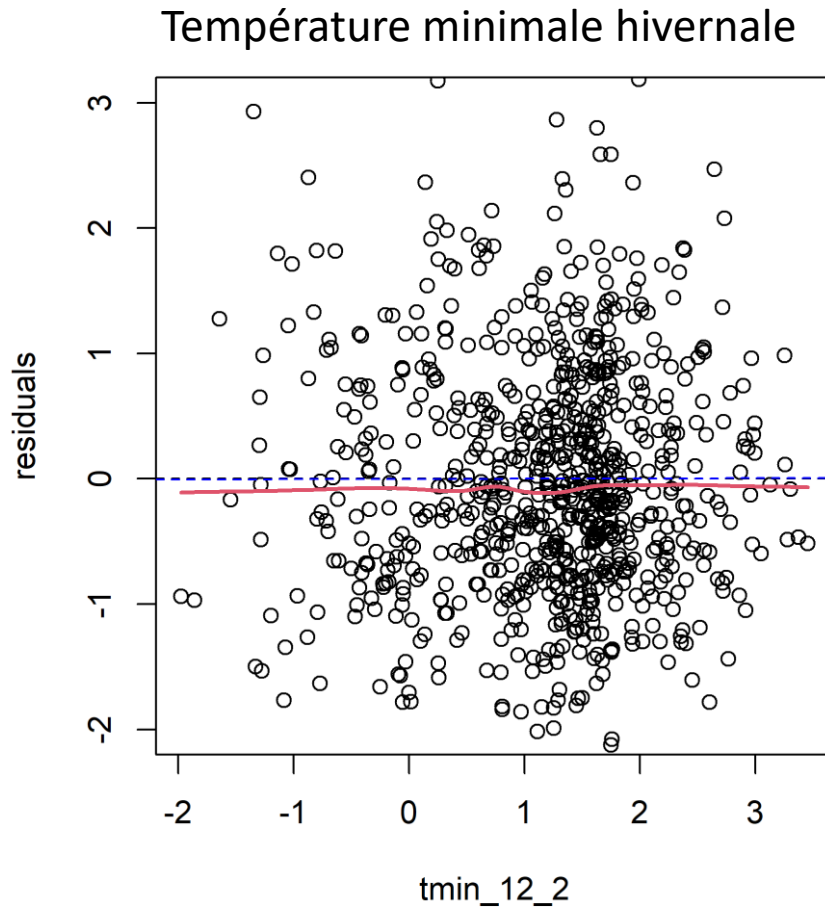
$$\text{Hyp}(\mathbf{p}, \mathbf{q}, \mathbf{u}, \mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0) = y_0 + \frac{1}{2} \times \left((p + q)(x - x_0) - (p - q) \sqrt{x^2 - 2x_0x + \left(x_0^2 + \frac{u^2}{d}\right)} \right)$$



➤ Croissance radiale

Modèle en peuplements purs

- Exemple chêne sessile : résidu d'un modèle avec température minimale hivernale + précipitations (hyp)



➤ En pratique !

Utilisation de la forme hyperbolique

- 5 paramètres... mais 2 peuvent être fixés → plus que 3 paramètres (voire 2)

Hyp (p, q, u, x₀, y₀)

→

Hyp (p, q, u = 0.5, x₀, y₀ = 0)

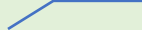
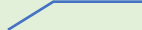
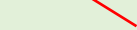
Courbure très peu sensible

Redondant avec l'intercept général

- Très simple d'utilisation
 - Définition une seule fois de la fonction
 - Utilisation directement dans la régression non linéaire (nls par exemple)

> Bilan des effets climatiques

Calibration des peuplements purs

ESSENCE	Nb obs.	Saison de végétation sgdd / tmin hivernale	Pluviométrie Saison de végét. / Annuelle / ...	Contrainte estivale Tmax / bilan hydrique / déficit en eau.
Chêne pédonculé	713			
Chêne sessile	826			
Chêne pubescent	451			
Hêtre	797			
Châtaignier	195			
Charme	89			
Bouleau	65			
Robinier	55			
Frêne	108			
Pin maritime	1459			
Pin sylvestre	985			
Pin laricio	305			
Pin noir d'Autriche	219			
Pin d'Alep	251			
Sapin	326			
Epicéa	659			
Mélèze	166			
Douglas	661			

> Bilan / conclusion

- Salem recalibré
 - Pour 18 essences en peuplement pur
 - Pour 52 couples d'essences en mélange
- Une forme hyperbolique
 - Générique
 - Facile d'utilisation
 - Permet de mieux prendre en compte les conditions climatiques
- Effet du climat
 - Saison de végétation : ++
 - Pluviométrie : +, puis saturation
 - Contraintes estivales : -- à partir d'un certain seuil





Merci pour votre attention