



Poplar/CAPSIS :

**un simulateur de croissance des plantations peuplier en futaie
basé sur des modèles GADA, inter-régionaux et sensibles au climat à l'échelle de l'arbre**

S. M. Heshmatol Vaezin,

Alain Bouvet, Alain Berthelot, Francois de Coligny, Priscilla Cailly et Marin Chaumet



Plan

- 1. Problematique/Objectif**
- 2. Structure du simulateur et l'approche GADA**
- 3- Données**
- 4- Integration dans Capsis/simulations**
- 5- Perspective**

1. Problématique/Objectif

❑ Forêts de plantation

- ✓ s'accroît depuis 1990 à un taux annuel moyen de 1,84 % (FAO, 2016)
- ✓ représentent 7 % de la surface boisée et 33.4 % de la production mondiale du bois rond industriel (Zhang et al., 2020)

un rôle croissant dans la production et dans l'atténuation du changement climatique

❑ **Peuplier: une des espèces à la croissance la plus rapide, largement répandue et d'une importance clé en Amérique du Nord, en Europe, en Inde et en Chine.**

❑ **Il représente**

- ✓ ≈ 7% des plantations forestières à l'échelle mondiale (FAO, 2020)
- ✓ ≈ 8% des plantations forestières en EU-28 (Pra and Pettenella, 2019; Sotirov, 2017)

IPC à la FAO depuis 1959 (38 États membres)

1. Problématique/Objectif

□ Peuplier en France

- ✓ Planté par plus de 190 000 propriétaires forestiers privés (CNPF)
- ✓ S'étend sur 250 000 ha dans toutes les régions françaises (2^{ème} pays après la Chine)
- ✓ Première essence feuillue de plantation (IGN, 2017)
- ✓ Deuxième essence feuillue en termes de volume annuel de récolte bois d'œuvre, **1.5 Mm³** (Memento FCBA, 2023)

1. Problématique/Objectif

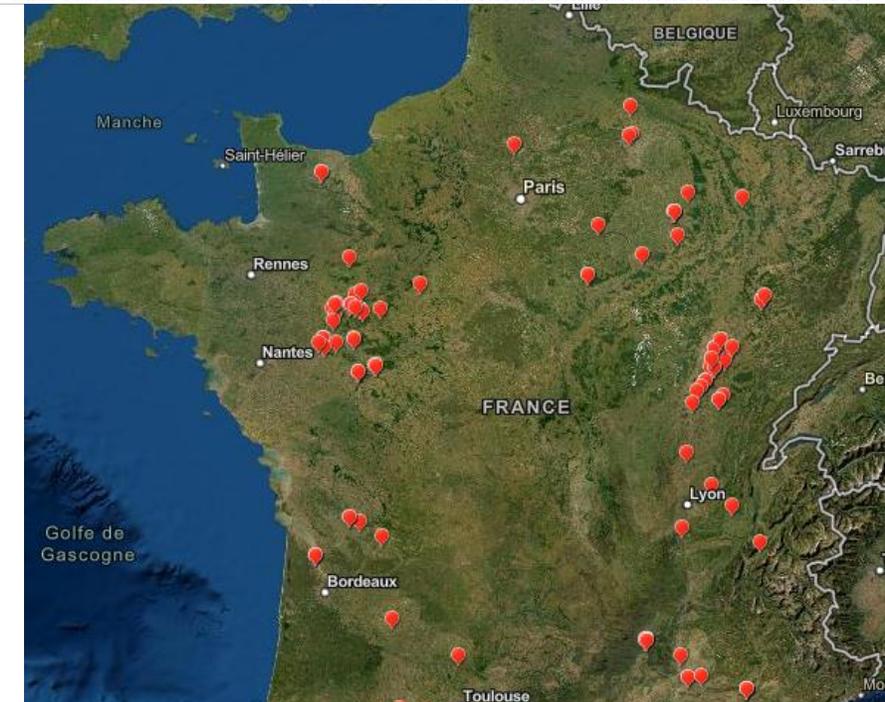
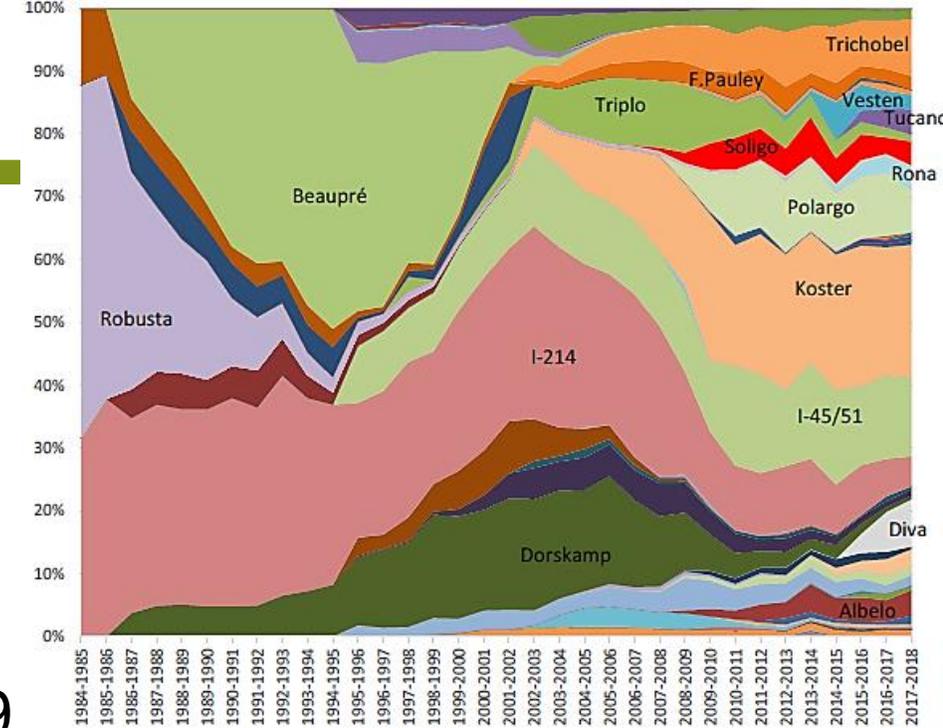
□ Le Peuplier

- une essence exigeante avec une centaine de clones (IRSTEA, 2019)
- soumis a une évolution permanente dans le temps;
- Réparties géographiquement ;
- Peu de modèle de croissance (Berthelot et al., 2019).

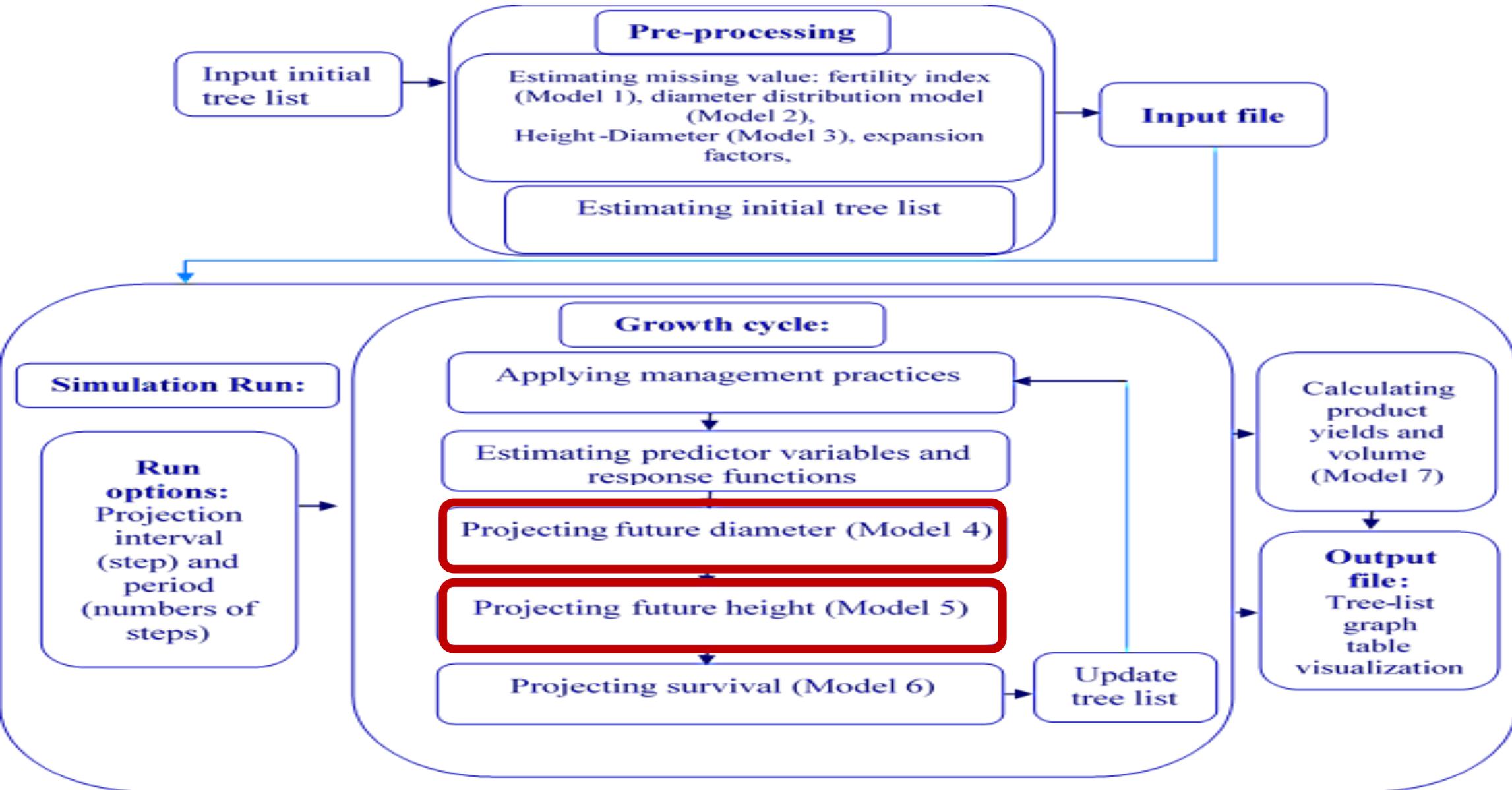
□ Objectif :

simulateur interrégional de croissance peuplier

- Tous clones confondus
- Sensible au climat
- Fonctions de réponses aux activités de gestion
- Données disponibles en gestion
- Module « poplar » dans CAPSIS



2. Structure du simulateur et l'approche GADA



2. Structure du simulateur et l'approche GADA

- ✓ **Modèles de type statistique (sensible au climat)**
- ✓ **Indépendants des distances**
- ✓ **Individu-centré**
- ✓ **A l'échelle de la placette**

2. Structure du simulateur et l'approche GADA

□ **Modèle de base le plus adapté** (Sghaier et al., 2019)

(1) Chapman-Richards or Bertalanffy-Richards

(2) Korf (Lundqvist-Matern)

(3) Hossfeld

(4) Weibull

2. Structure du simulateur et l'approche GADA

❑ Approche des différences algébriques généralisées "GADA" de Cieszewski et Bailey (2000), [Cité 342 fois](#) dont 5 fois depuis 2024.

❑ Modèles dérivés par GADA (M1, M2..M9)

Forme générale

Reconnus pour ces propriétés intéressantes :

$$Y_t = f (Y_0, t_0, t, P)$$

forme de différence ou de projection

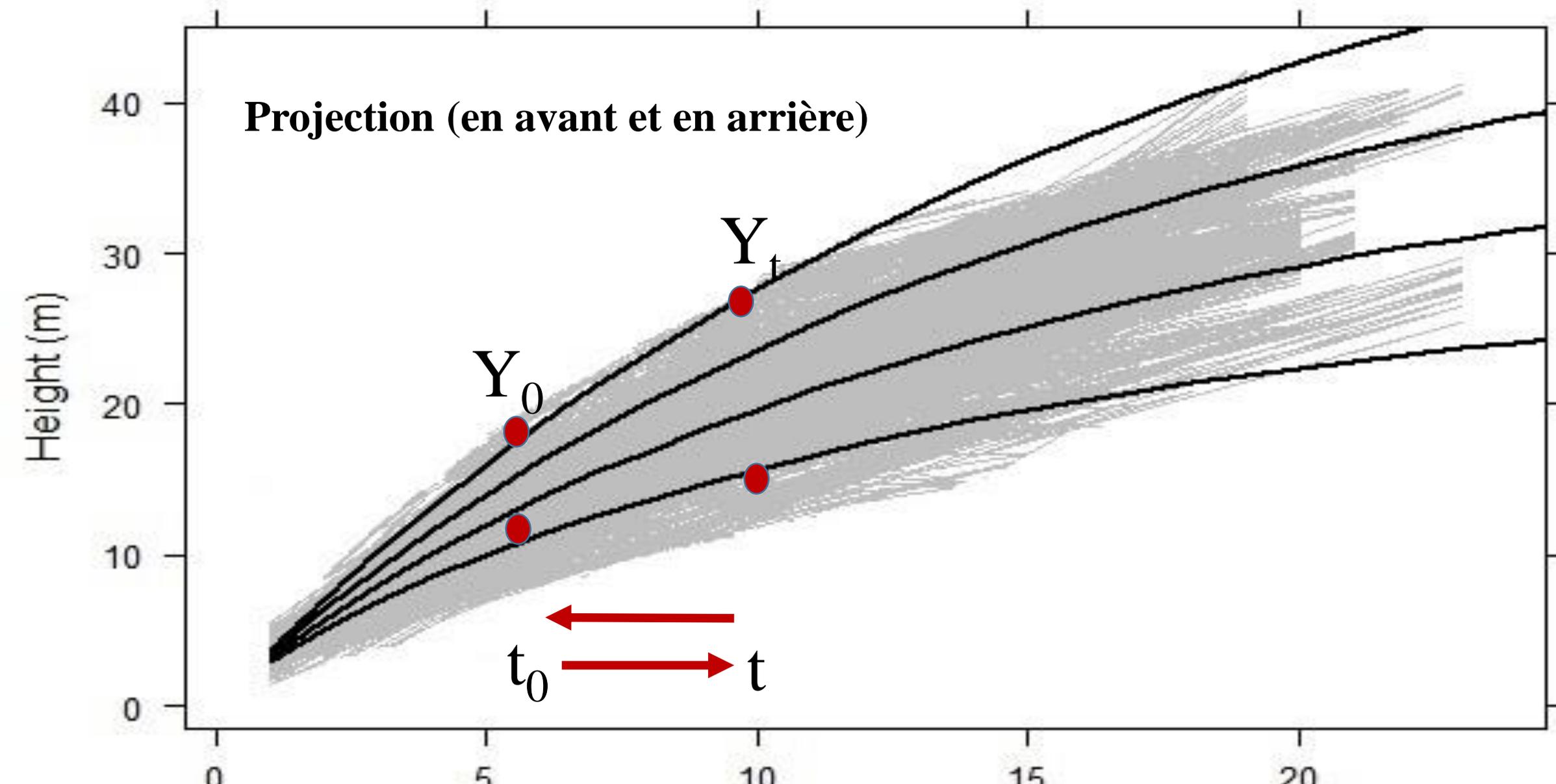
✓ parcimonieux et très précis (erreur relative faible, sans tendances significatives dans les erreurs résiduelles), surtout à courte terme

✓ Compatible avec les données de re-mesure ;

✓ polymorphes avec de multiples asymptotes ;

✓ Dynamiques.

Bertalanffy-Richards GADA - Nested Iterative Procedure



2. Structure du simulateur et l'approche GADA

□ GADA est devenu un standard pour le développement des modèles de croissance empiriques

(Diéguez-Aranda et al. 2005; Anta et al. 2006; Castedo-Dorado et al. 2007a; Cieszewski et al. 2007; Martín-Benito et al. 2008; Nord-Larsen et al. 2009; Sharma et al. 2011; Tahar et al. 2012; Lee, 2018)

2. Structure du simulateur et l'approche GADA

□ Modèle Bertalanffy-Richards

$$Y = a_1 (1 - \exp(-a_2 t))^{a_3}$$

- ✓ Les paramètres a_1 et a_3 sont définis comme des fonctions de la fertilité et de la sylviculture (X), qui est une variable inobservable (Cieszewski and Bailey, 2000).

$$a_3 = b_2 + \frac{b_3}{X}$$

$$a_1 = \exp(-X)$$

- ✓ En remplaçant les paramètres développés dans le modèle de base à l'âge t_0 , on peut calculer cette variable inobservable, X_0 , en terme de condition initiale (Y_0, t_0)

$$X_0 = \frac{1}{2} \left((\ln Y_0 - b_2 L_0) \pm \sqrt{(\ln Y_0 - b_2 L_0)^2 - 4b_3 L_0} \right)$$

avec $L_0 = \ln(1 - \exp(-b_1 t_0))$

2. Echelle, méthode d'estimation et structure des modèles

- En remplaçant X_0 dans le modèle de base à l'âge t , on obtient le modèle dynamique (M4) ci-dessous :

$$Y = Y_0 \left(\frac{1 - \exp(-b_1 t)}{1 - \exp(-b_1 t_0)} \right)^{\left(b_2 + \frac{b_3}{X_0}\right)}$$

$$X_0 = \frac{1}{2} \left((\ln Y_0 - b_2 L_0) \pm \sqrt{(\ln Y_0 - b_2 L_0)^2 - 4b_3 L_0} \right)$$

avec $L_0 = \ln(1 - \exp(-b_1 t_0))$

- Modèles mathématiquement robustes et biologiquement réalistes
- Dépendant fonctions de base et paramètres développés: Modèles GADA (M1, M2..M9)

2. Echelle, méthode d'estimation et structure des modèles

□ Approche GADA renforcées

- Développant le paramètre b_3 du modèle en fonction du climat, de l'espacement moyen entre les arbres à l'âge de mesure, de la Rectangularité de l'espacement et du type de sol (sol alluvial à peuplier (changement soutenu = type 2))
- Fonctions de réponse additive (forme de différence) aux modalités de gestion (Mason and Milne, 1999) à effet temporaire = type 1
 - ✓ e.g., Type de plant (plançon d'un an , plançon de deux ans, bouture)
 - ✓ e.g., Mode de plantation (Tarière, godet sur pelle mécanique, 1 = oui, dent de sous-solage)

2. Echelle, méthode d'estimation et structure des modèles

□ Methode d'estimation

$$y_t = f(t, t_0, y_0, \beta)$$

(1) Âge de référence spécifique (Base-age specific)

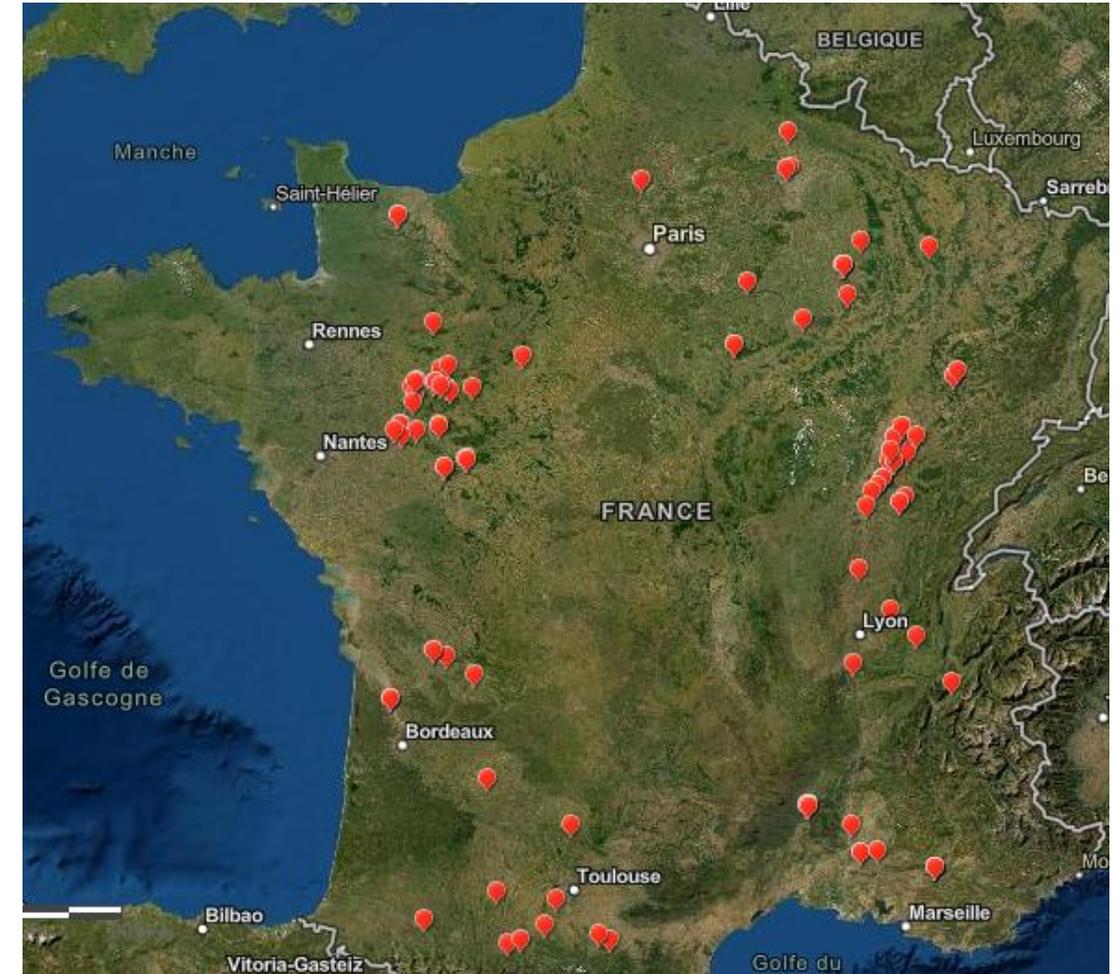
(2) Indépendantes de l'âge de référence (Base-age invariant; 30% plus performant)

- Dummy variable method

- Nested iterative procedure

3. Données utilisées

- **124 sites, 1966 parcelles unitaires (PU), 760 placettes**
- **314806 observations à l'échelle d'arbre**
- **Réparties géographiquement**
- **Système de production : Futaies**
- **Densité de 200 a 7500 tiges/ha (futaies)**
 - 204/ha pour la moitié des PU
 - De 156 à 625/ha pour la majorité
 - Quelques TCR (1500 à 3500 / ha)
 - Quelques TTCR (7500 / ha)
 - Moyenne : 445.6
- **Clones**
 - 6 clones → 60% des PU
 - 80 clones
- **Différents traitements culturaux et sylvicoles**



3. Données utilisées

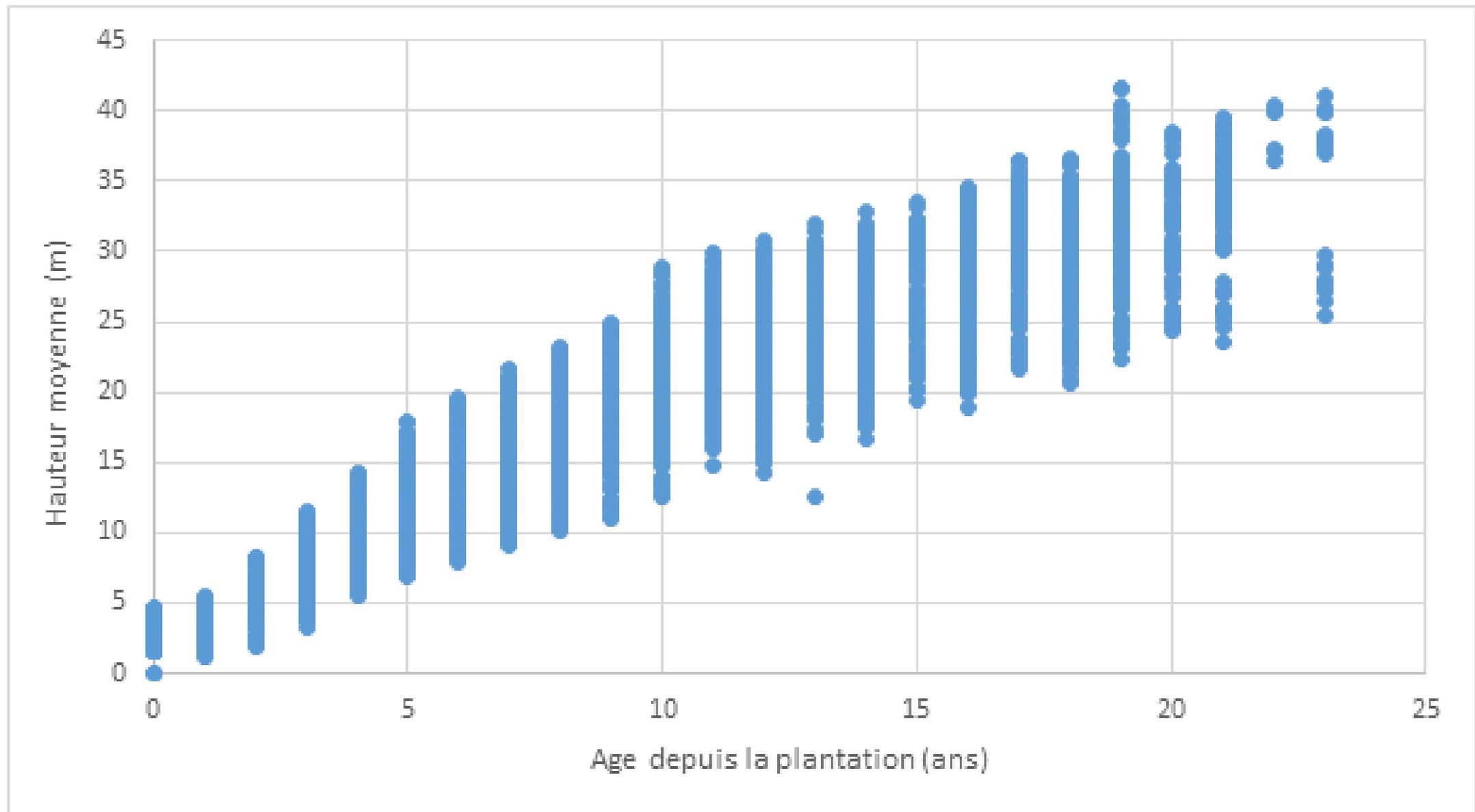
Divisées en deux jeux de Données

Données de Calibration: **156480 Obs**

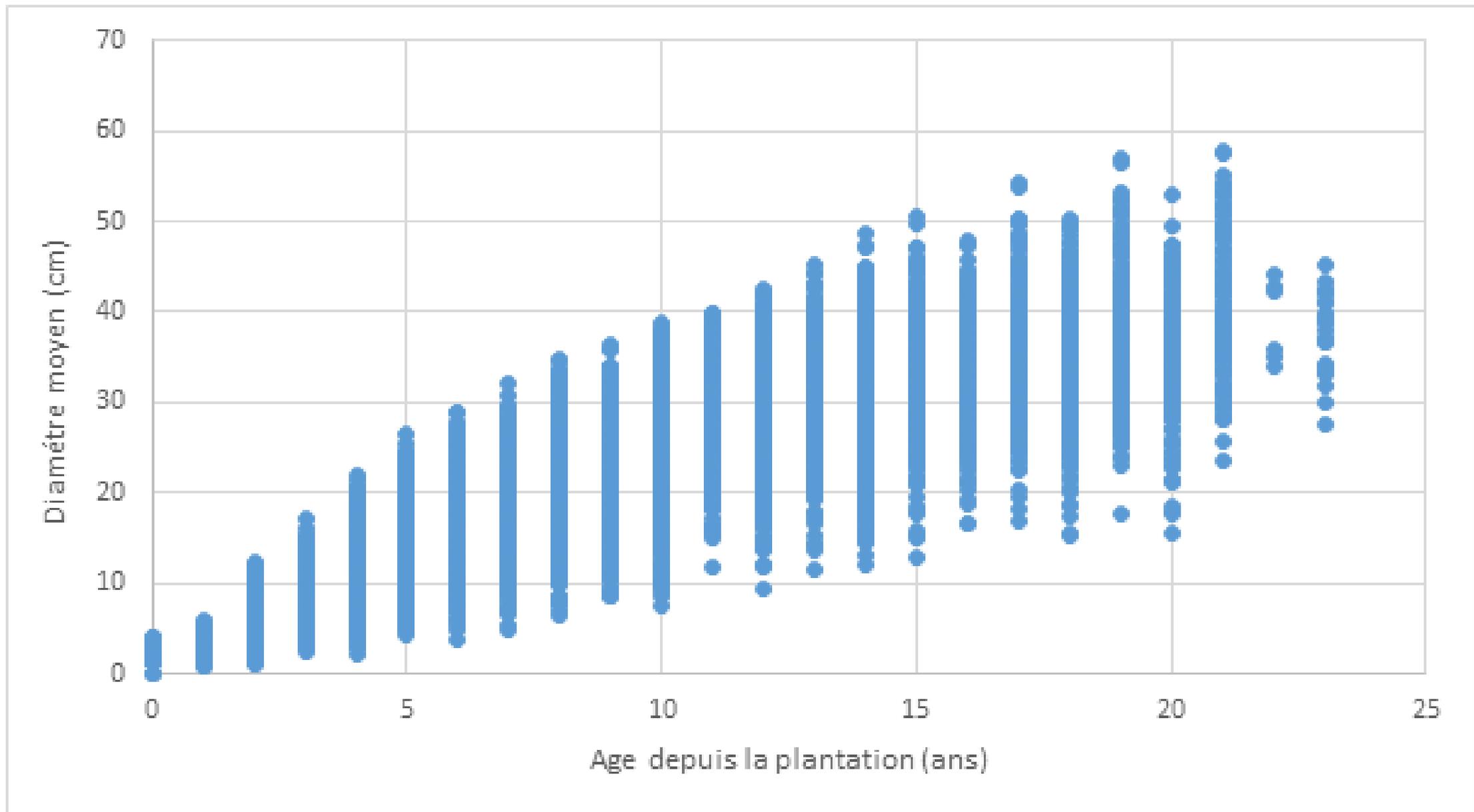
**62 Essais,
418 Placettes
(en moyenne 725 m²)
13599 Arbres**

Variables	Moyen	Min	Max	N d'arbres	N moyen de mesures	N d'Obs
Âges de mesure (depuis plantation)	9.8	0	24	13599	11.5	156480
Diamètre (DBH) cm	19.7	0.32	63.7	13599	11.5	156480
Hauteur dominante m	13.3	0.8	43	453	10.8	4879

3. Données utilisées



3. Données utilisées



4- Integration dans Capsis

☐ Hauteur dominante

- Meilleur indicateur de fertilité
- H100
- H159
- H moyen
- H20%
- H100 20%

Meilleur Modèle de base

Bertalanffy-Richards

Modèle dynamique: GADA M4

$$\mathbf{M4: } Hdom_t = Hdom_0 \left(\frac{1 - \exp(-b_1 t)}{1 - \exp(-b_1 t_0)} \right)^{\left(b_2 + \frac{b_3}{X_0} \right)}$$

$$b_1 = 0.071447$$

$$b_2 = -3.590962$$

Degrees of freedom : **4862 obs**

☐ Qualité de l'ajustement

- ✓ Racine carrée de la moyenne des erreurs quadratiques (RMSE): 1.09 m
- ✓ Relative Error in predictions (RE%): 7.26 %

4- Intégration dans Capsis

☐ Hauteur dominante

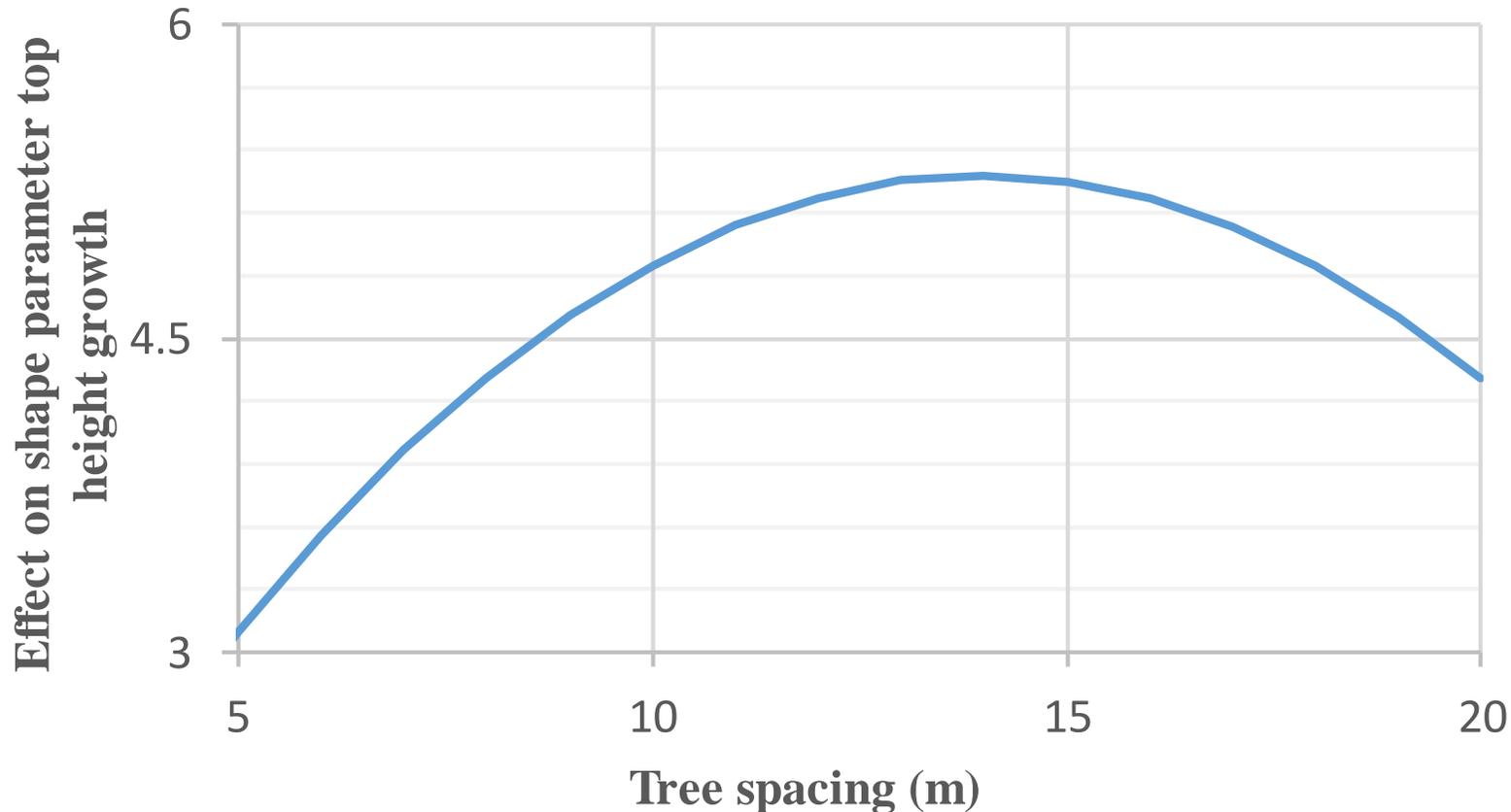
- ✓ **Variables climatiques moyenne sur un horizon de 55 ans (1964-2019):**
- ✓ **SPI_v : standardized precipitation index (-0.05 ± 0.11)**
- ✓ **SSWI_v : standardized Soil wetness index (0.1 ± 0.13)**
- ✓ **Zéro** : conditions météorologiques moyennes observée sur 55 ans
- ✓ **Négatives** : conditions plus sèches
- ✓ **Positif** : conditions plus humides par rapport à la moyenne.

4- Integration dans Capsis

❑ Hauteur dominante

✓ Variables explicites:

✓ Average Tree spacing (m) + with optimum= entre 10 et 14 m = reduce installation phase



4- Integration dans Capsis

Hauteur dominante

Variables explicites :

✓ **Plant type**

✓ **Planting mode**

✓ **Alluvial soils +**

✓ **Rectangularity + (may trigger light competition)**

4- Integration dans Capsis

□ Diameter growth and yield

- Estimation method : BAS

Meilleur Modèle de base

Bertalanffy-Richards

Modèle dynamique: GADA M4

$$dbh_t = dbh_0 \left(\frac{1 - \exp(-b_1 t)}{1 - \exp(-b_1 t_0)} \right)^{\left(b_2 + \frac{b_3}{X_0} \right)}$$

$$b_1 = 0.151$$

$$b_2 = -25.97$$

Degrees of freedom : **143990** Obs

□ Qualité de l'ajustement

✓ Racine carrée de la moyenne des erreurs quadratiques (RMSE): 2.661 cm

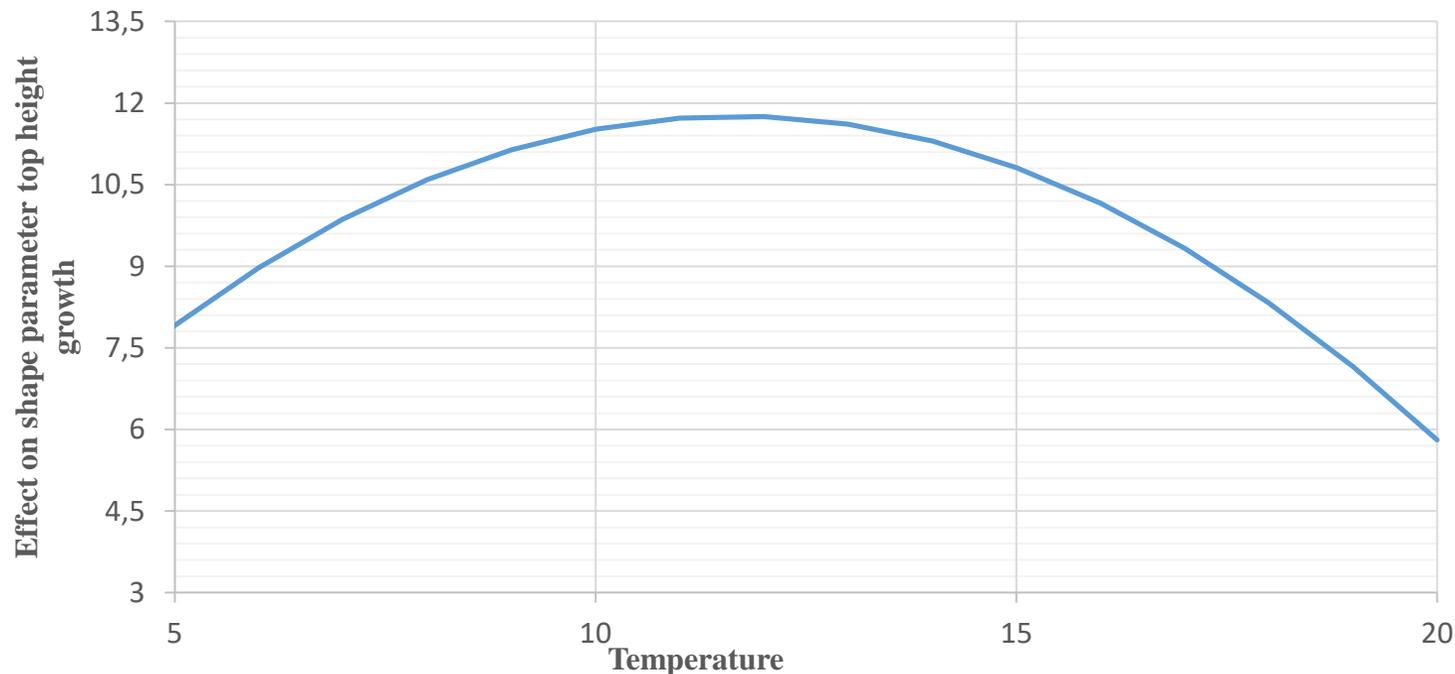
✓ Relative Error in predictions (RE%): 13.51 %

4- Integration dans Capsis

❑ Diameter growth and yield

❑ Variables climatiques moyenne sur un horizon de 55 ans (1964-2019):

✓ Mean Annual Temperature + with optimum= 11.7 and Observed Average =11.66



Fortin et al. 2018

4- Integration dans Capsis

❑ Diameter growth and yield

❑ Variables climatiques moyenne sur un horizon de 55 ans (1964-2019):

SSWIV : standardized Soil wetness index on vegetation season
(0.1 ± 0.13)

Zéro : Conditions météorologiques moyennes observée sur 55 ans

Négatives : Conditions plus sèches

Positif : Conditions plus humides par rapport à la moyenne.

4- Integration dans Capsis

❑ Diameter growth and yield

Variables explicites :

- ✓ Plant type (effect temporaire)
- ✓ Planting mode (effect temporaire)
- ✓ Alluvial soils +
- ✓ Average Tree spacing (m) avec saturation +
- ✓ Rectangularity -
- ✓ Tree vigor +

4- Integration dans Capsis

The screenshot displays the Capsis 4.2.6-15628 software interface. The main window shows a project titled "Projet Poplar [pop] - 597.6 m2 - Tout en mémoire - Type de plants : Plancon sans rac". A dialog box titled "Paramètres de projection" is open, showing the following settings:

- Age depuis la plantation : 20
- Rotation complète (non sélectionné)
- Durée de la rotation (années) : [vide]
- Eclaircie à mi-rotation (pas encore disponible) (non sélectionné)
- Age de projection (années) : [vide]

The background shows a table with 12 rows of data, where the 12th row is highlighted in orange:

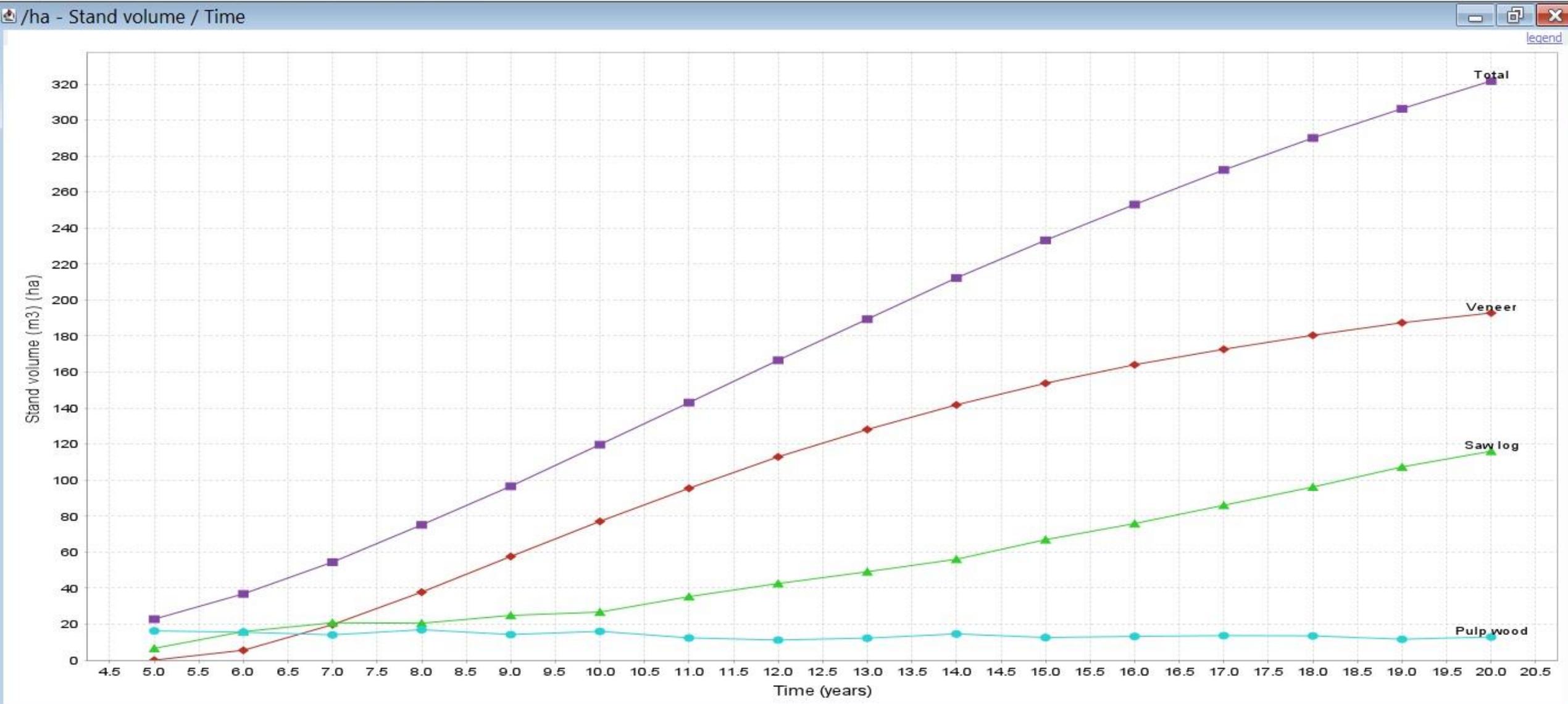
Id	Age	Volume	Rayon	Statut
1	20	50.479	34.997	1 alive
2	20	51.508	35.509	1 alive
3	20	54.04	35.678	1 alive
4	20	56.375	36.522	1 alive
5	20	48.51	35.168	1 alive
6	20	55.187	35.678	1 alive
7	20	65.084	37.523	1 alive
8	20	60.219	36.522	1 alive
9	20	49.48	35.168	1 alive
10	20	45.46	33.44	1 alive
11	20	54.04	36.017	1 alive
12	20	55.187	36.017	1 alive

At the bottom of the main window, the text "PopTree_12 expansionFactor: 16.726" is visible. To the right, a "Profil de tige" window displays a graph of tree height (Hauteur (m)) versus radius (Rayon (cm)). The graph shows a stem profile with various limits and categories:

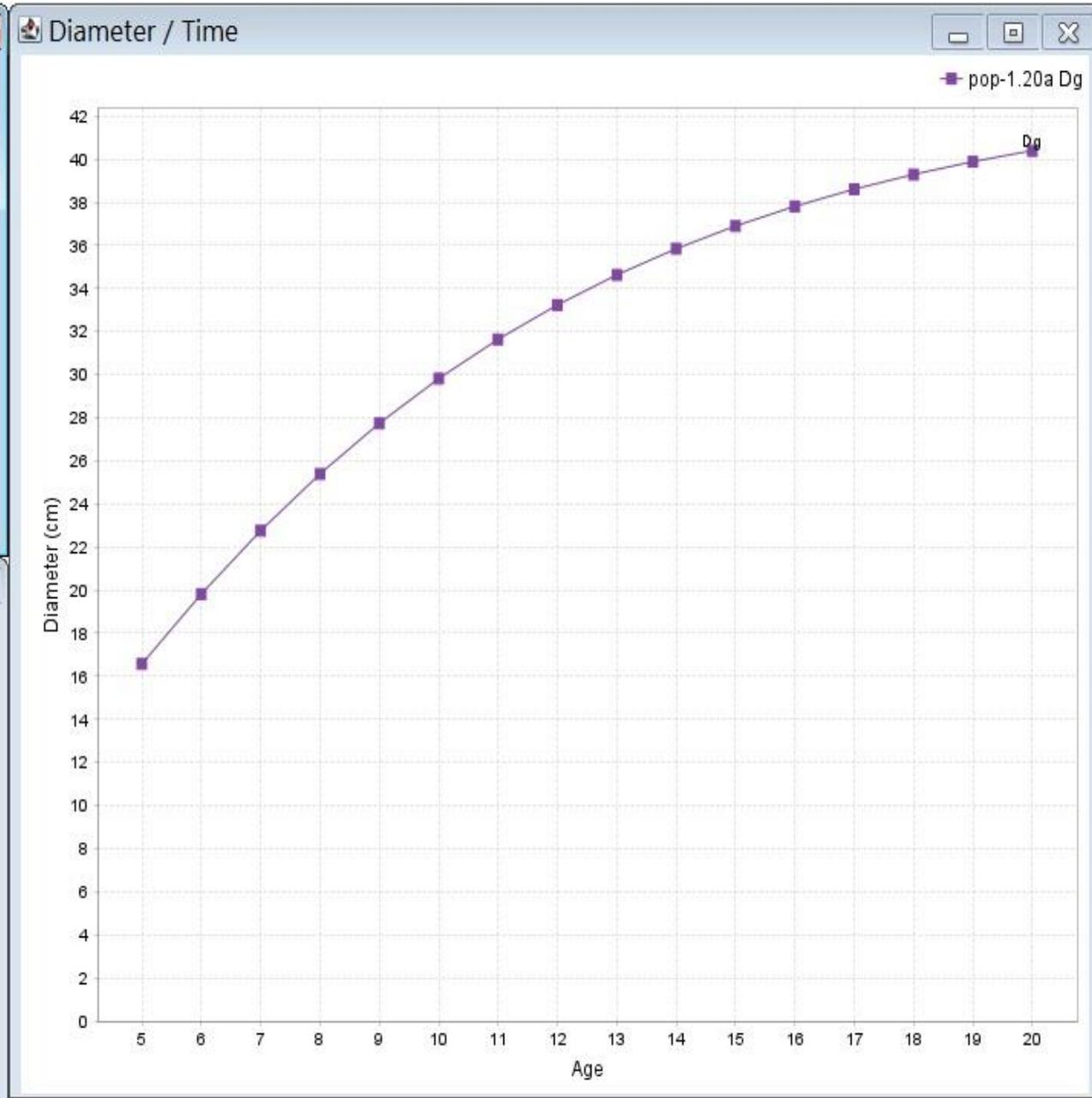
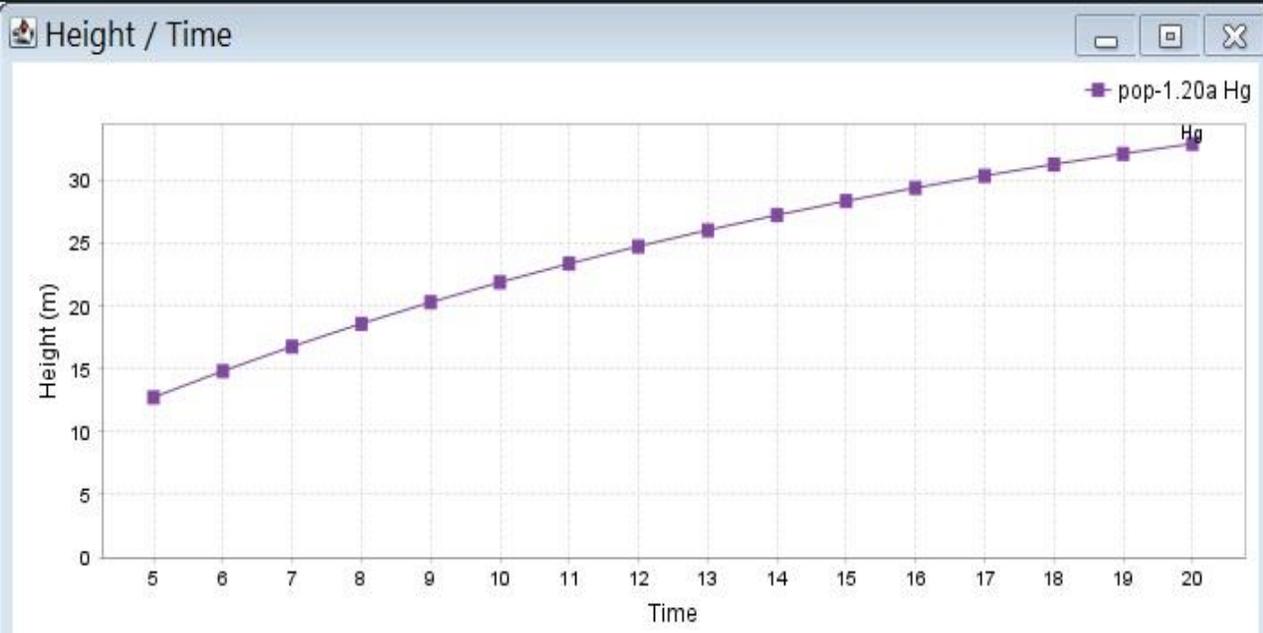
- Bois d'industrie (cyan)
- Bois de sciage (green)
- Déroulage court 2ème catégorie (magenta)
- Déroulage long 2ème catégorie (pink)
- Déroulage court 1ère catégorie (orange)
- Déroulage long 1ère catégorie (red)

Key labels on the graph include "Limite bois d'industrie", "Limite sciage", "Limite déroulage court", "Limite déroulage long", "Limite déroulage 1ère catégorie", "Hauteur 1.3m", and "Hauteur de souche". The x-axis ranges from 0 to 45 cm, and the y-axis ranges from 0 to 36 m.

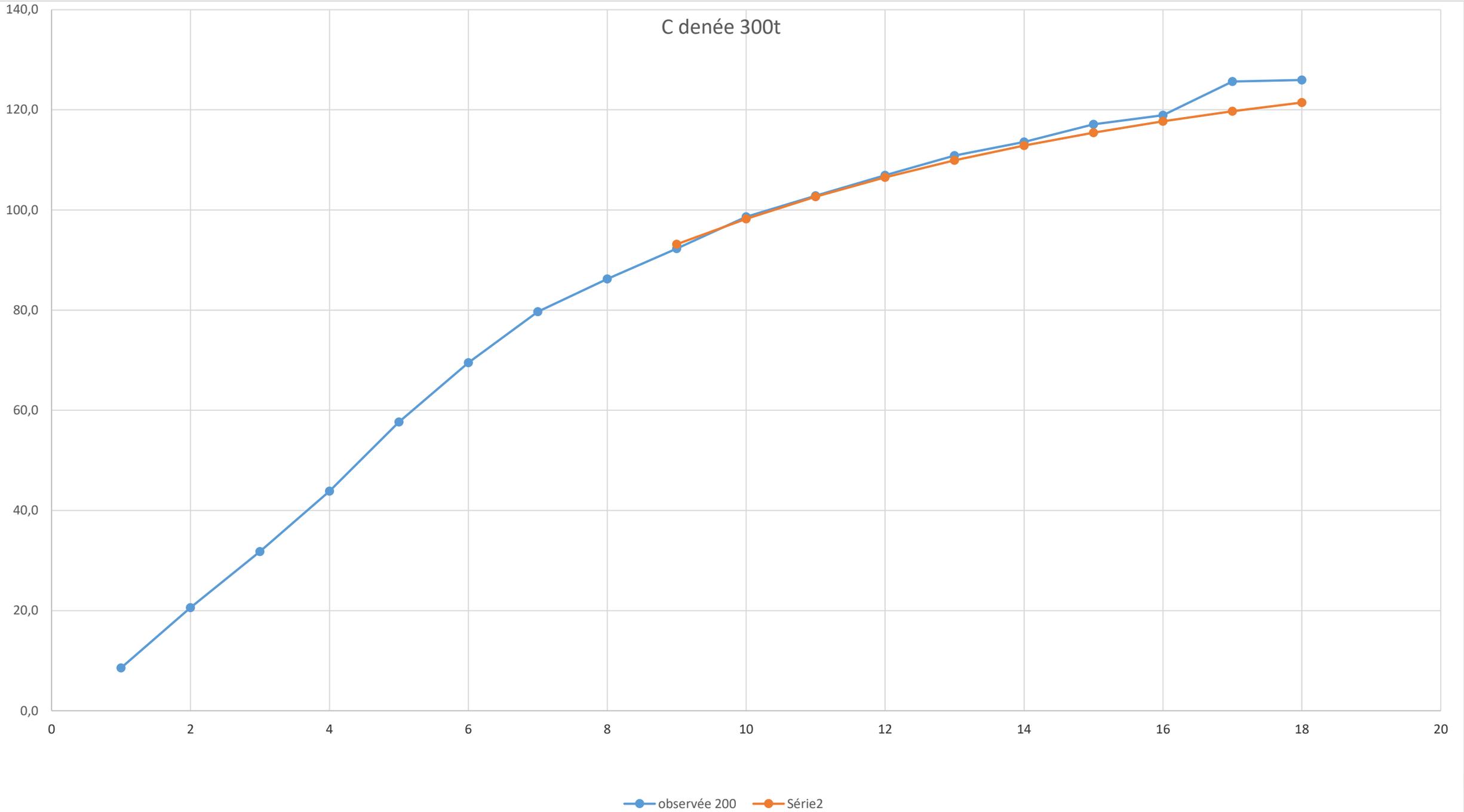
4- Integration dans Capsis



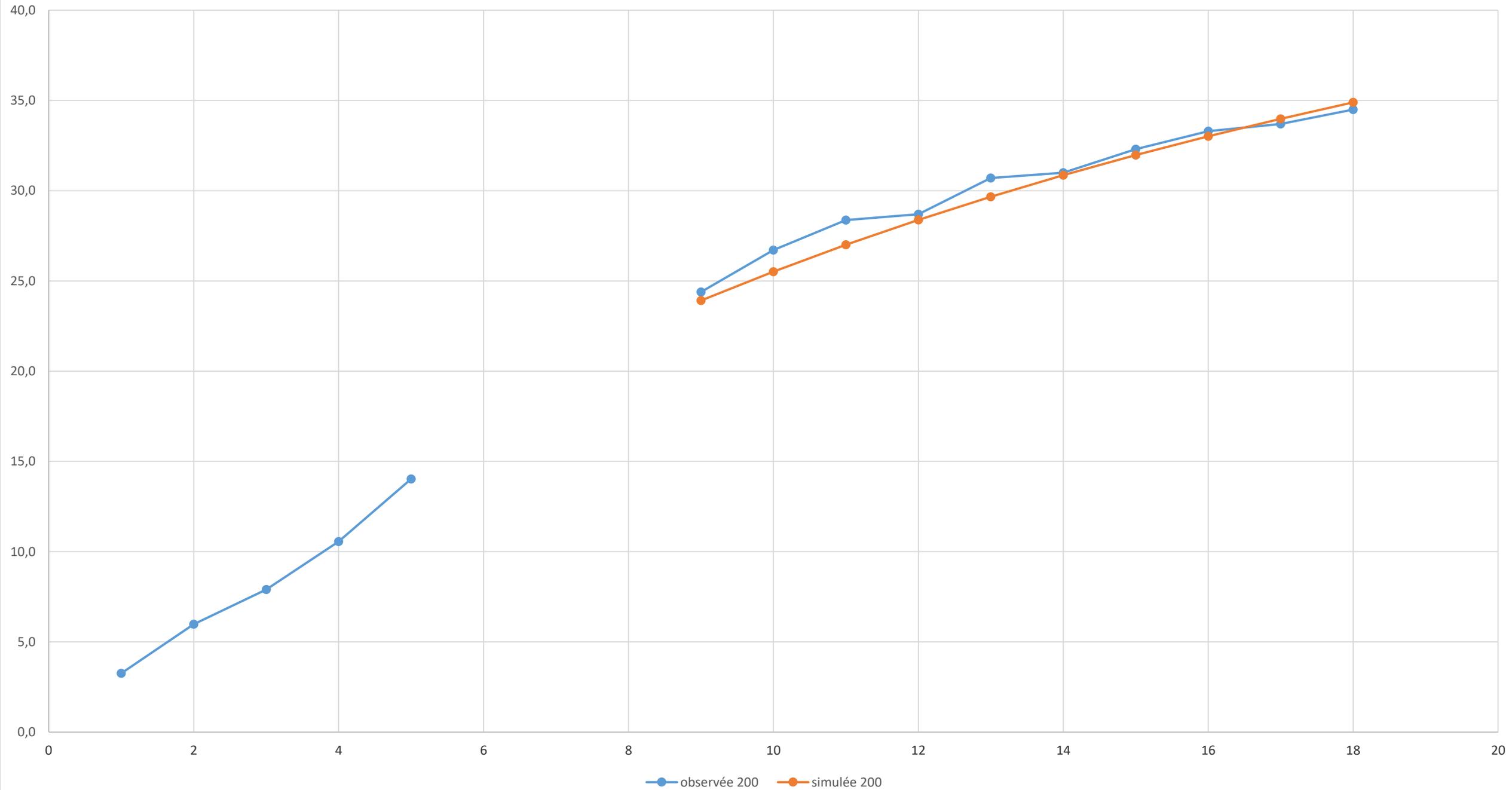
4- Integration dans Capsis



C denée 300t



H denée 300t



5- Perspective

- ✓ **Mise au point (variables climatiques), validation et publication des modèles développés**
- ✓ **Validation avec les données des peuplements en gestion**
- ✓ **Modèles restent à estimer (e.g., croissance en diamètre avec la méthode BAI)**
- ✓ **Développement des modèles économiques peuplier**
- ✓ **Analyse bioéconomique et optimisation des itinéraires sylvicoles**



Merci de votre attention
mheshmat@ut.ac.ir