

Développement d'un outil d'aide à la gestion forestière multicritères dans le contexte du changement climatique

Élève:
Loubna Taleb

Tuteurs

Marion Jourdan

Jean Denis Mathias

Jean-Baptiste Pichancourt

Référent ISIMA

Frédéric Renaut

Soutenue le Mardi 02 Juillet 2024

Introduction



- 1.La sécheresse
- 2.Les incendies
- 3.La propagation des parasites et des maladies
- 4.La perte de la biodiversité



- 1.Régulation du climat
2. Production de bois
- 3.Filtration de l'eau



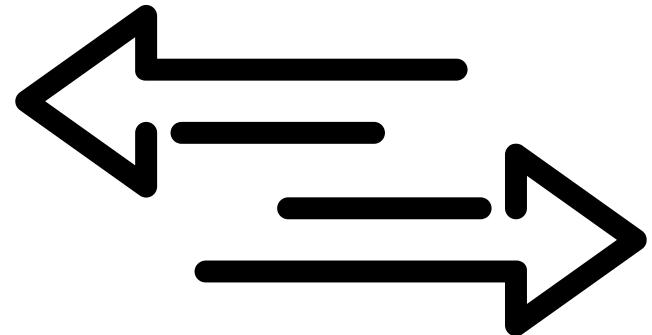
- 1.Gestion durable des forêts
- 2.Utilisation du bois
- 3.Prévention des incendies et des maladies

La théorie du contrôle viable

Aubin et al en 1990

Un modèle mécaniste

Morin et al en 2013



Combinatoire
élevé

Malara et al. En 2023

Algorithme génétique

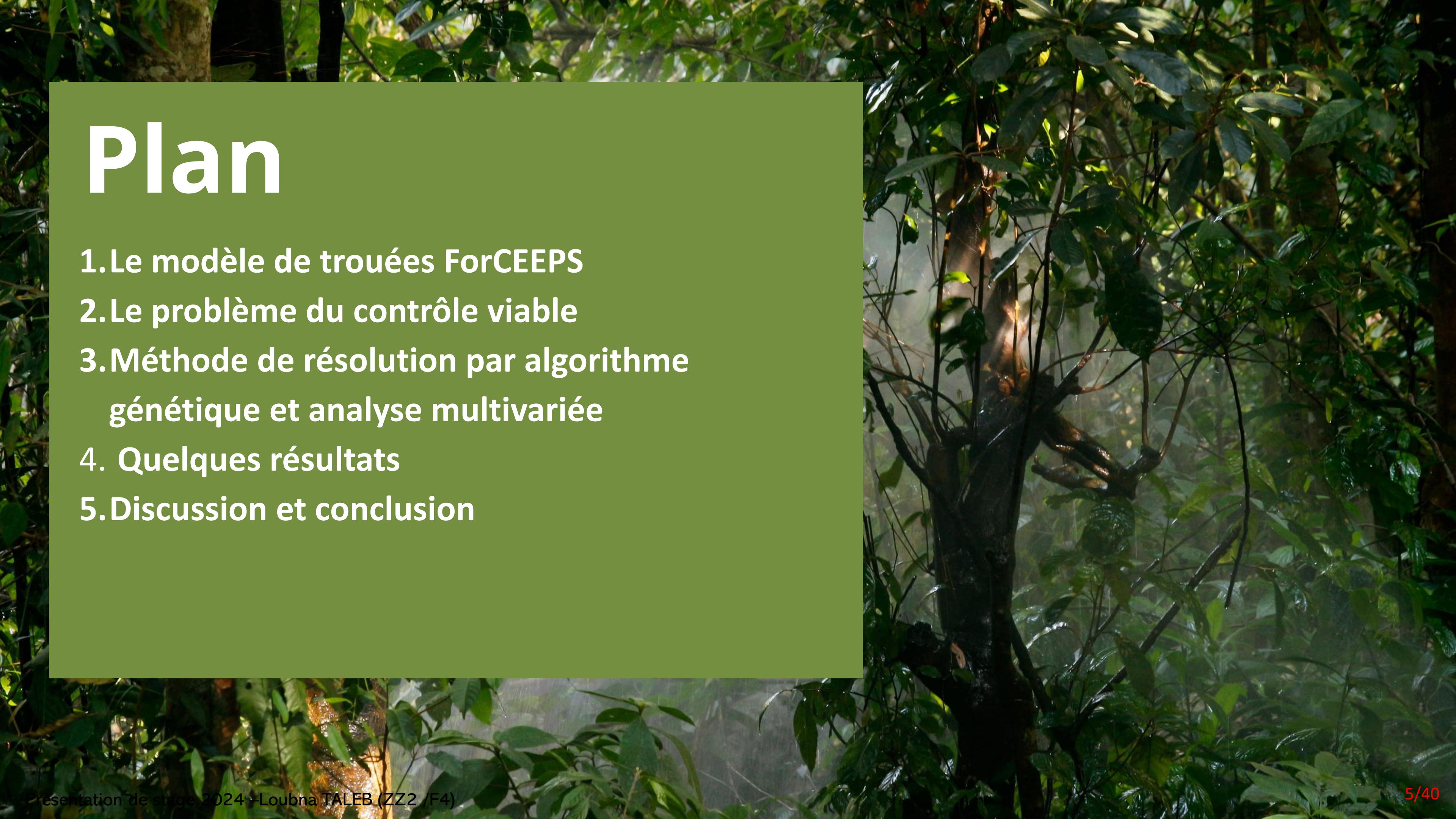
Cherche les *Combinaison viables* {Fréquence,
Quantité & Ordre de coupe des arbres}

Problématique

1. Comment intégrer la combinatoire des espèces dans le contrôle viable ?
2. Comment analyser ces itinéraires sylvicoles sur l'évolution de la forêt et de ses fonctions ?

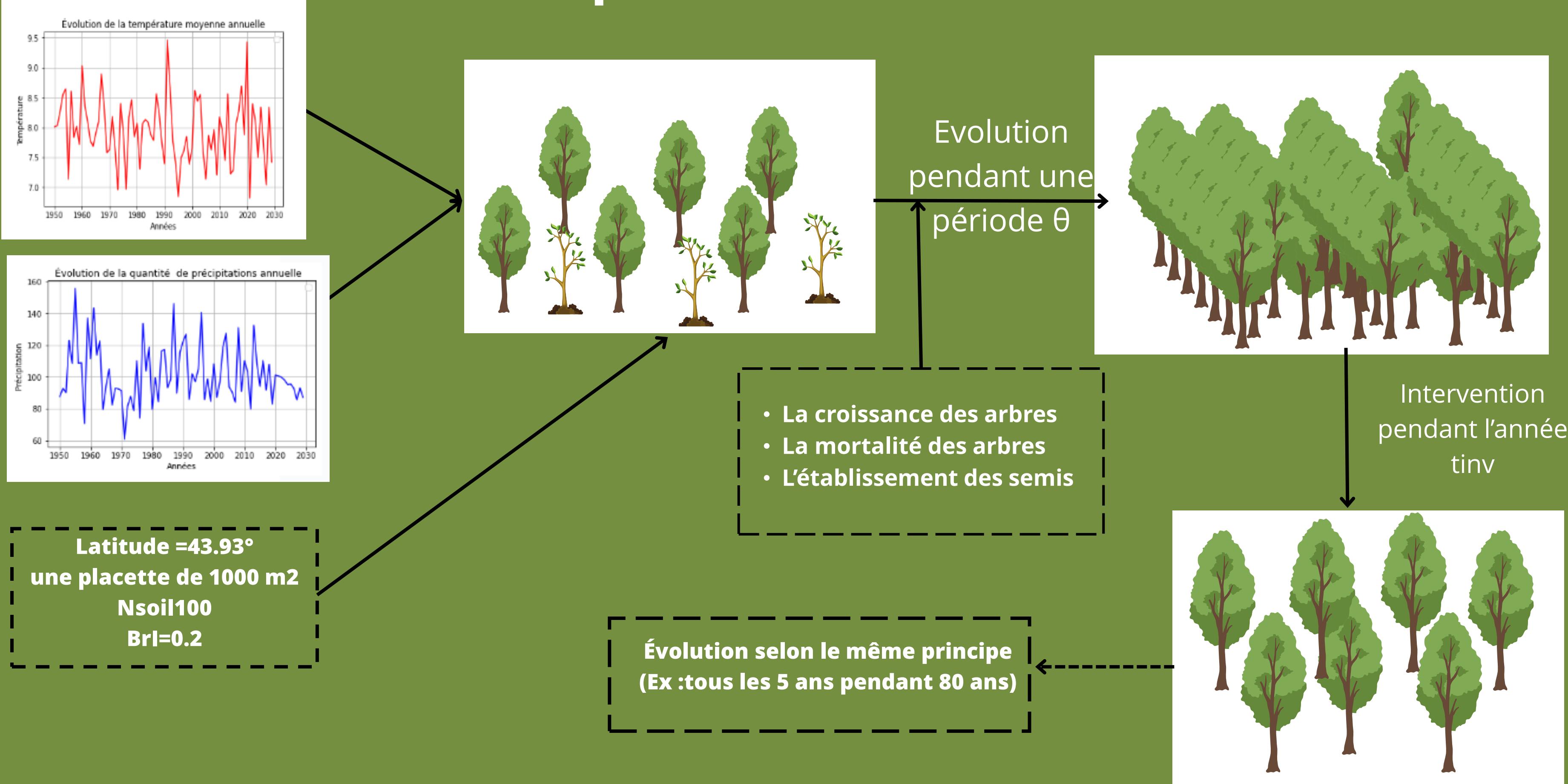
Plan

- 1. Le modèle de trouées ForCEEPS**
- 2. Le problème du contrôle viable**
- 3. Méthode de résolution par algorithme génétique et analyse multivariée**
- 4. Quelques résultats**
- 5. Discussion et conclusion**



Méthodes

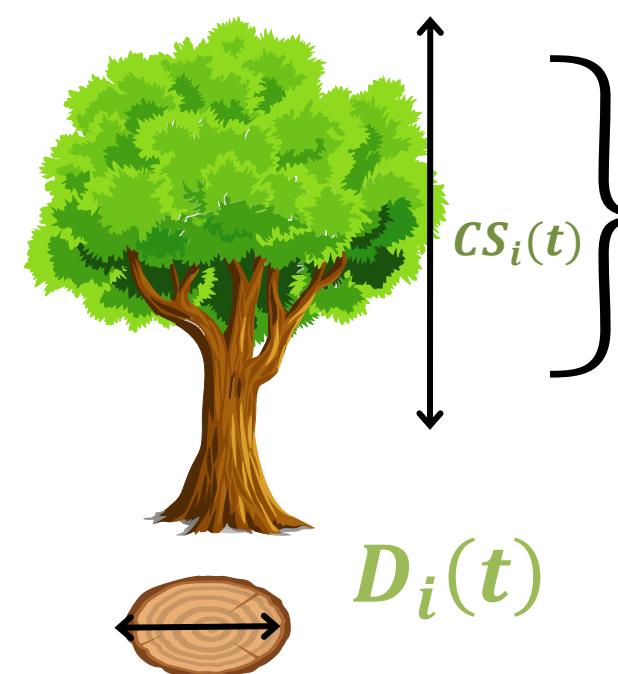
C'est quoi le modèle ForCEEPS?



Problème du contrôle viable.

Problème du contrôle

Système :forêt

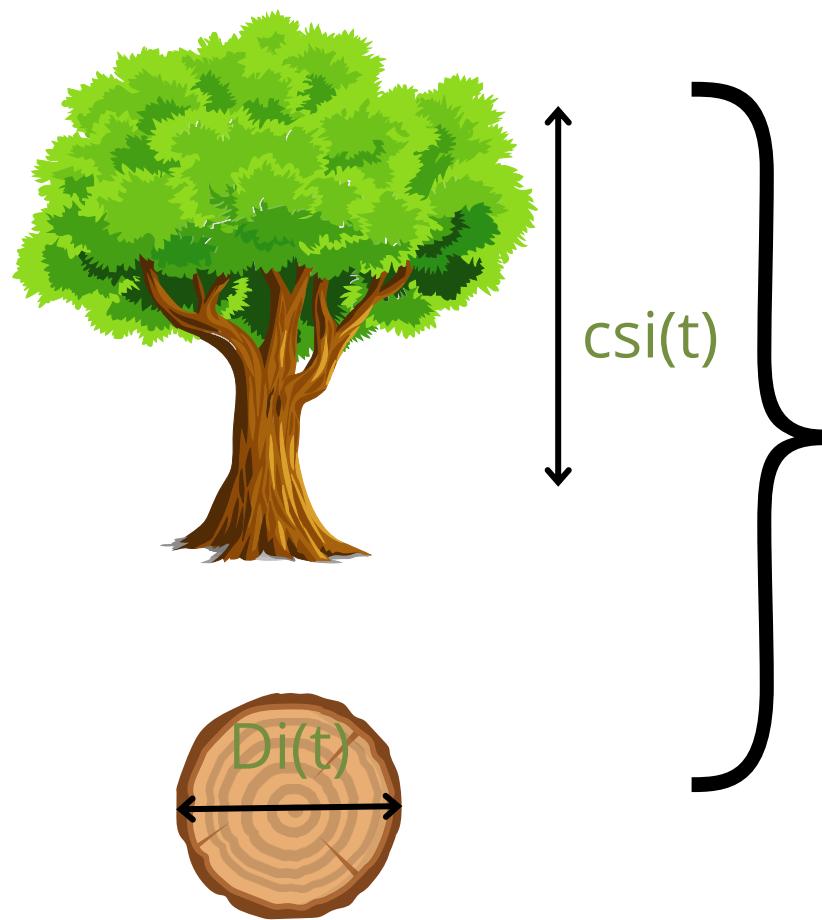


État de la forêt

$x(t) = [D_i(t), cs_i(t)]$ tel que $0 < i < N(t)$, $N(t)$
est le nombre des arbres à t

Où $D_i(t)$ est le diamètre de l'arbre i à une hauteur de 1.3m de la terre
Et $cs_i(t)$ est l'hauteur de l'houppier de l'arbre i pour une année t .





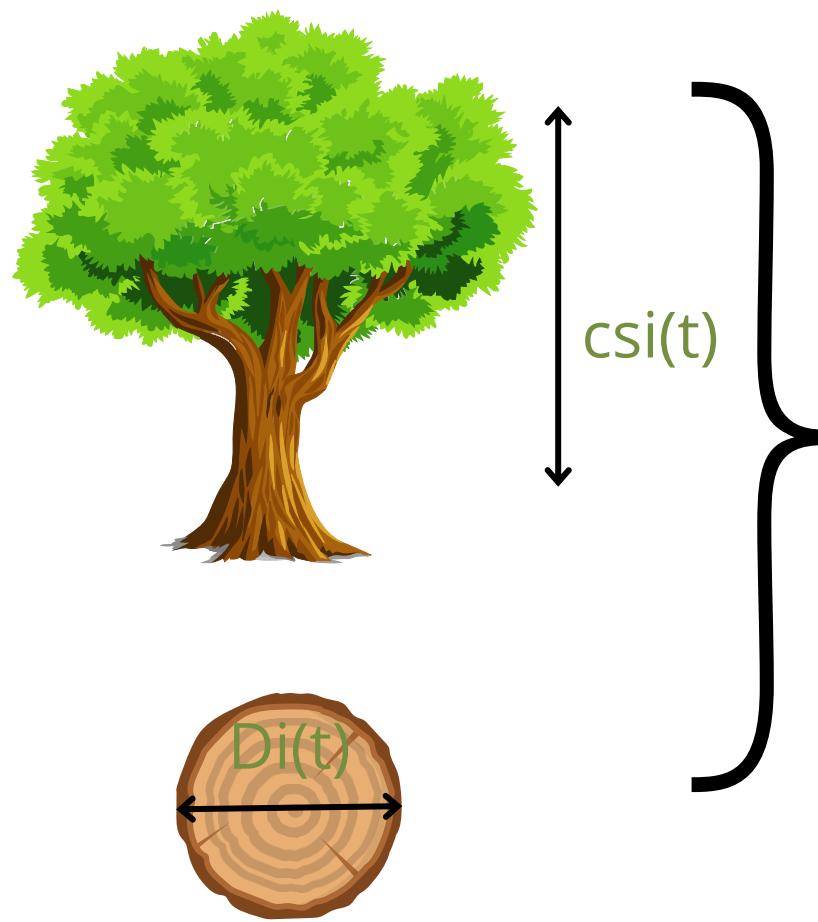
État de la forêt

$x(t) = [D_i(t), csi(t)]$ tel que
 $0 < i < N(t)$, $N(t)$ est le nombre
 des arbres à t

Évolution du système

$$x(t+1) = f(x(t))$$

$f: x(t) \rightarrow x(t+1)$ est la fonction
 d'évolution du système.



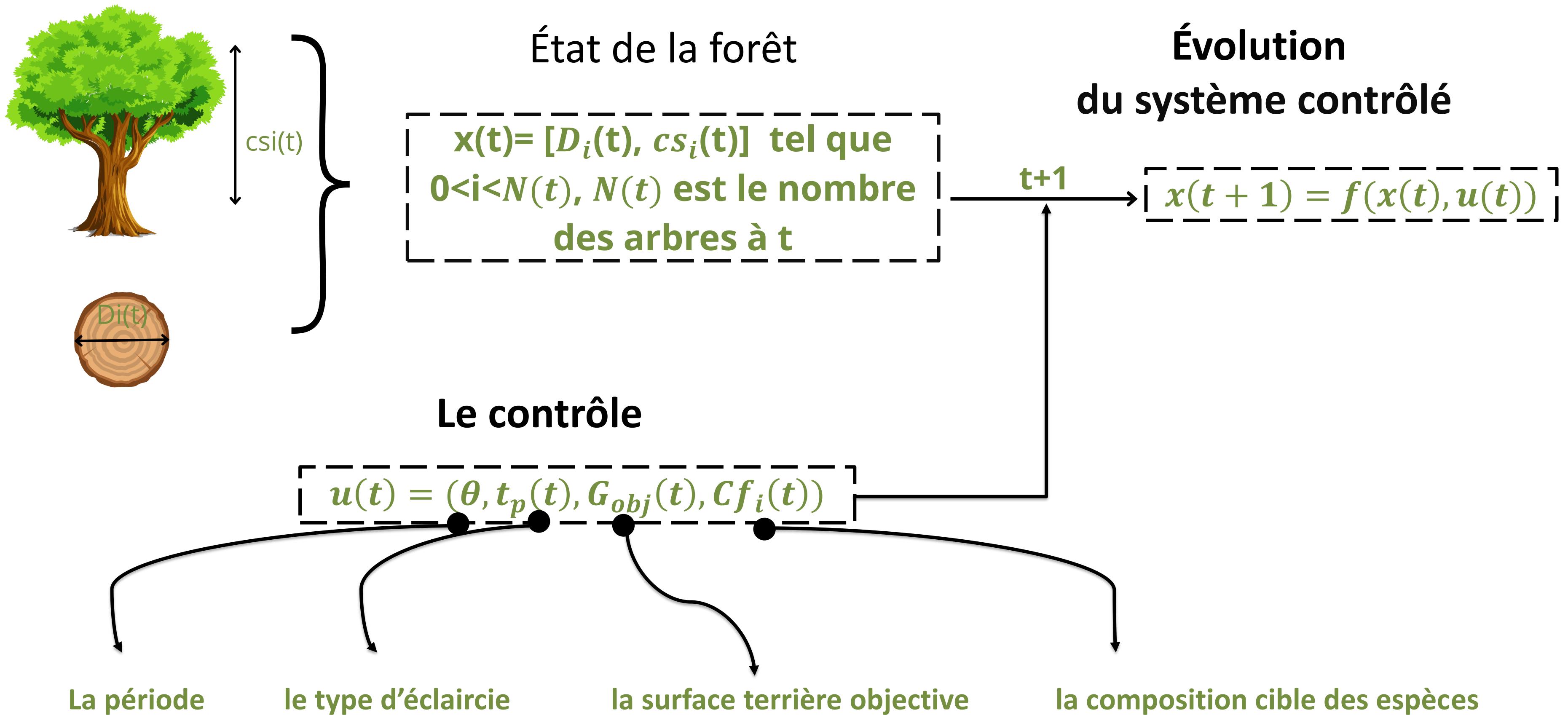
État de la forêt

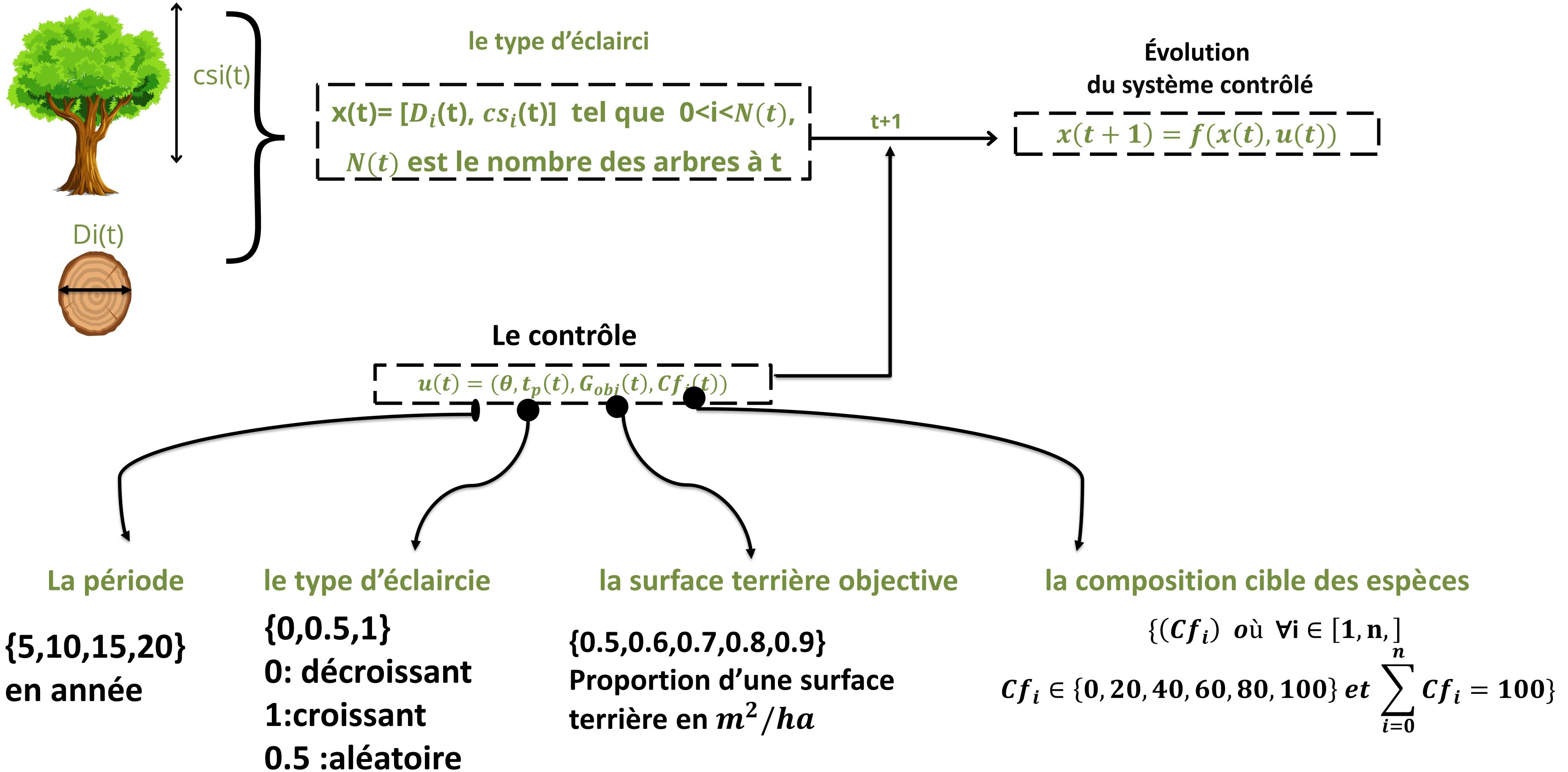
$x(t) = [D_i(t), csi(t)]$ tel que
 $0 < i < N(t)$, $N(t)$ est le nombre
 des arbres à t

Évolution du système contrôlé

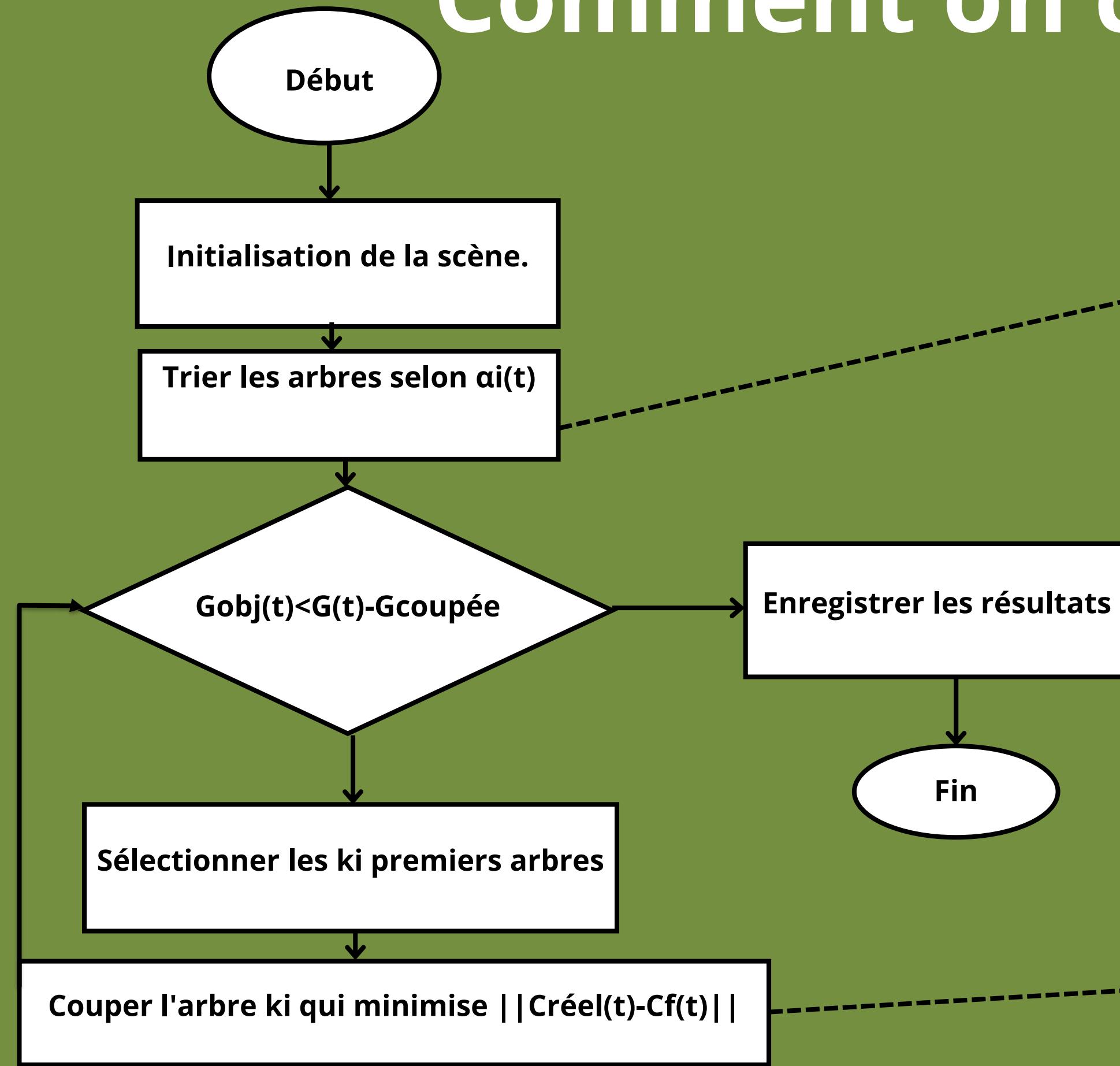
$$x(t+1) = f(x(t), u(t))$$

$f: x(t) \times u(t) \rightarrow x(t+1)$ est la fonction
 d'évolution du système.





Comment on coupe ?

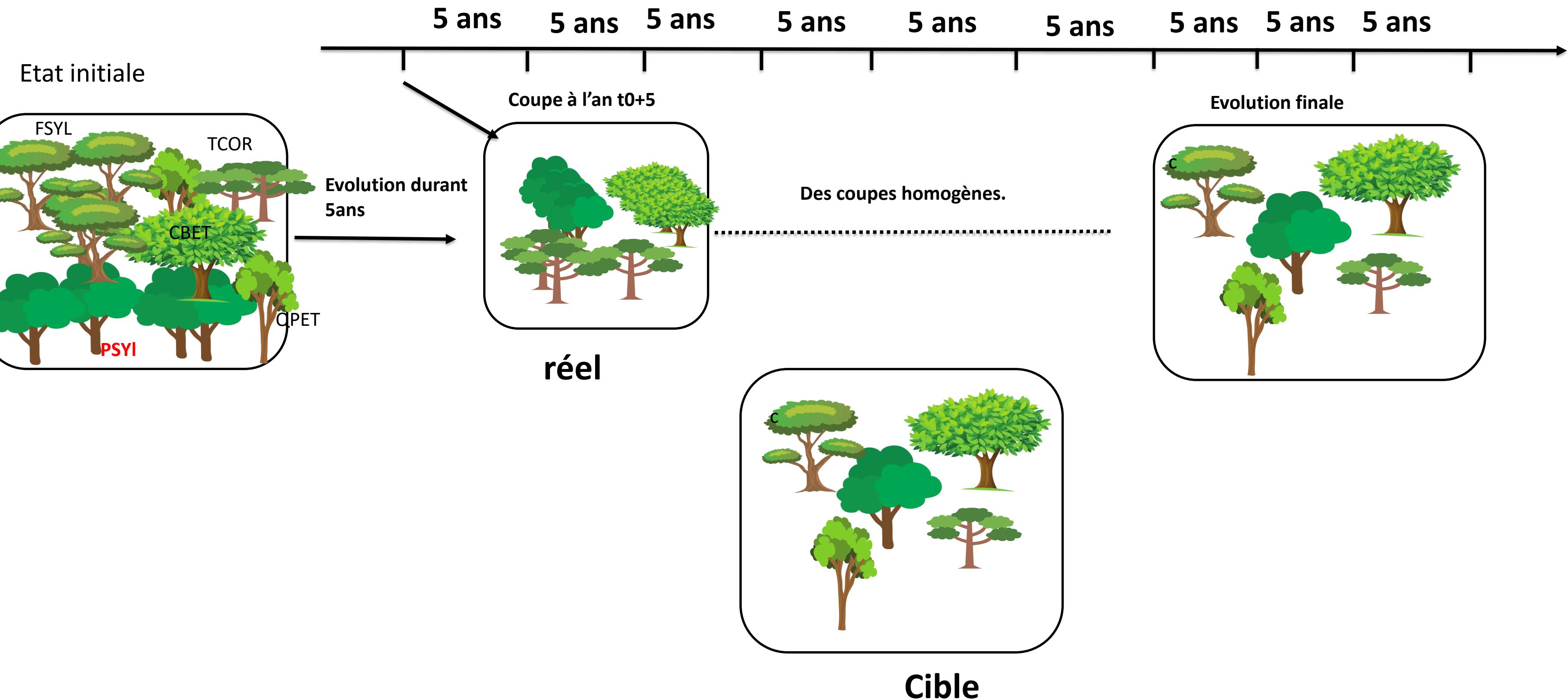


$$\alpha_i(t) = \begin{cases} \frac{1-Ci(t)+C_{max}(t)}{1+C_{max}(t)-C_{min}(t)} & \text{si } tp=0 \\ \frac{1+Ci(t)-C_{min}(t)}{1+C_{max}(t)-C_{min}(t)} & \text{si } tp=1 \\ P_{uni} & \text{si } tp=0,5 \end{cases}$$

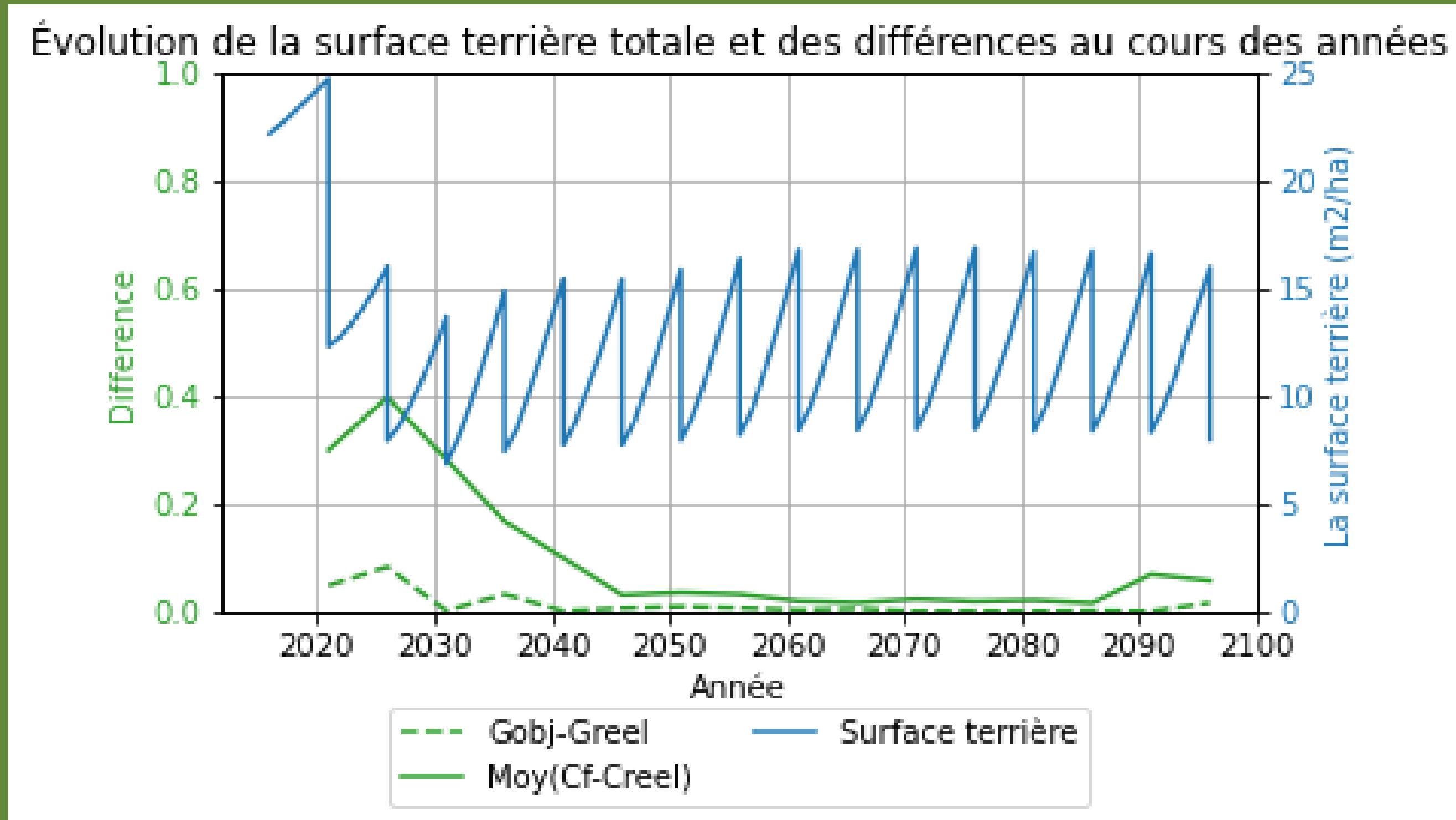
$$||C_{réel}(t) - C_{cible}(t)|| = \sqrt{\sum_{i=1}^n |C_{i,réel}(t) - C_{i,cible}(t)|}$$

où n est le nombre des espèces

Principe de la modélisation de l'intervention

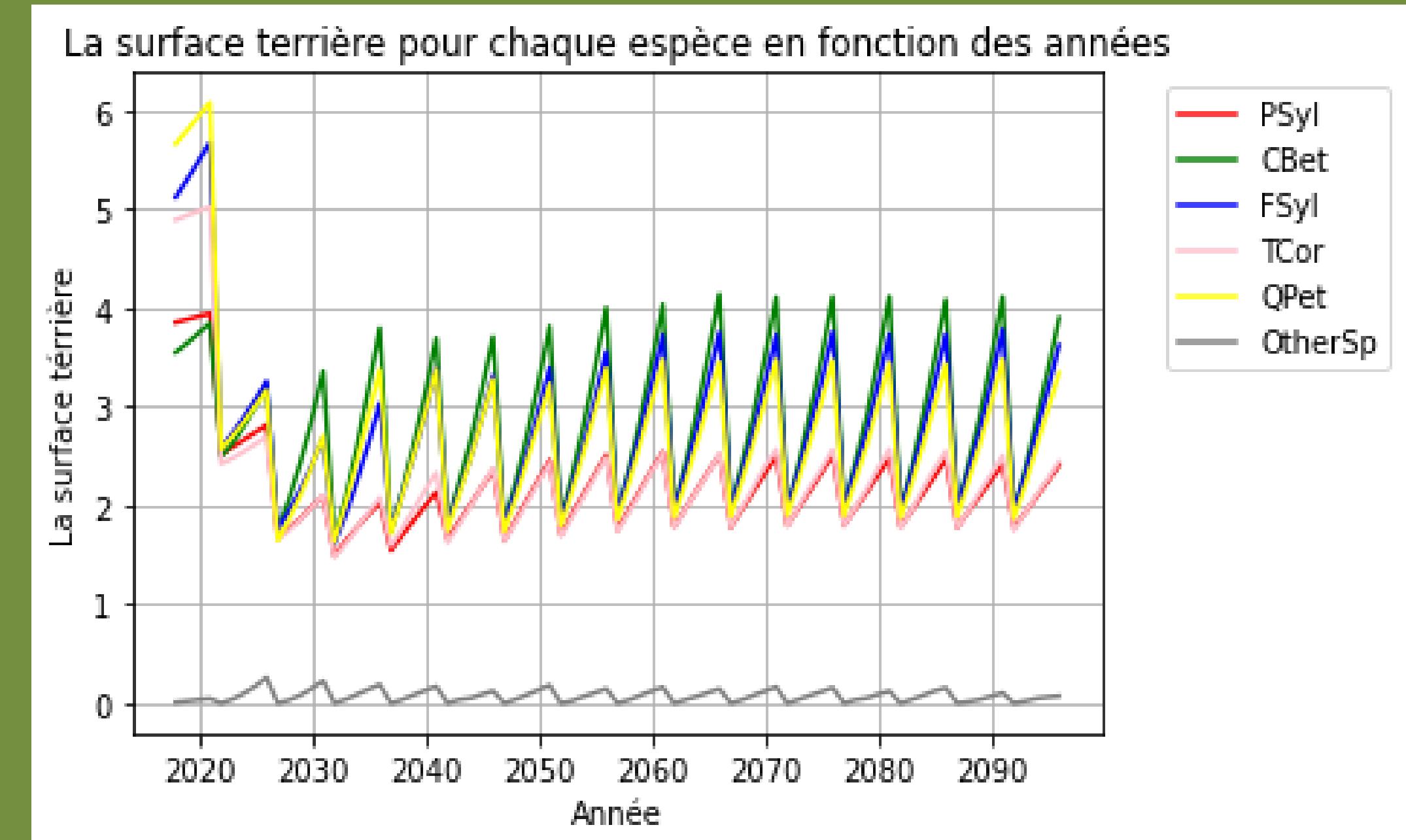


Exemple d'intervention



Analyse des résultats de l'intervention

- On arrive à obtenir la composition des espèces séquentiellement.
- PSyl: l'espèce *Pinus sylvestris*
- CBet : l'espèce *Carpinus betulus*
- FSyl: l'espèce *Fagus sylvatica*
- TCor: l'espèce *Tilia cordata*.
- QPet: l'espèce *Quercus petrea*
- OtherSp : les autres espèces établis lors de la simulation et disparu par la coupe aussi.



Les contraintes économique et écologique (K)

Le bois récolté

$$B_{tot} = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in C(t)} Bi(t) > 3,1 \times \frac{Sp}{10\,000} \times T$$

La surface terrière

$$G(t) = \frac{\pi}{4Su} \sum_{i \in pop(t)} D_i^2(t) \geq 10 \times \frac{Sp}{10\,000}$$

le taux de mortalité

$$\tau_M(t) = \frac{|M(t)|}{|M(t) + pop(t)|}$$
$$m_{\tau_M}(tc) = \frac{1}{5} \sum_{t=tc-5}^{tc} \tau_M(t) \leq 0,25$$

la richesse de biodiversité

$$m_{nbEsp}(tc) = \frac{1}{5} \sum_{t=tc}^{tc} nb_{Esp}(t) \geq 2$$
$$nb_{esp}(t) = \sum_{s \in Esp(t)} \{1 \text{ si } nb_s(t) > 0 \text{ et } 0 \text{ sinon}\}$$

la diversité structurelle verticale

$$Gini(t) = \frac{1}{2nb(t)} \frac{\sum_{i \in pop(t)} \sum_{j \in pop(t)} |Di(t) - Dj(t)|}{\sum_{k \in pop(t)} Dk(t)}$$

$$m_{Gini}(tc) = \frac{1}{5} \sum_{t=tc-5}^{tc} Gini(t) \in [0.25, 0.75]$$

Le problème du contrôle viable

1. L'évolution du système :

$$x(t+1) = f(x(t), u(t))$$

2. Variables de contrôle :

$$u(t) = (\theta_k, t_p(t), G_{obj}(t), C_f(t)) \in U$$

3. Contraintes :

$$K = \{x(t) = \{D_i(t), c_i(t)\} \forall i \in pop(t) \mid respecet\ constraints\ G(t), B_{tot}(t), m_{Gini}(t), m_{esp}(t), m_M(t)\}$$

4. L'ensemble du contrôle viable cherché A:

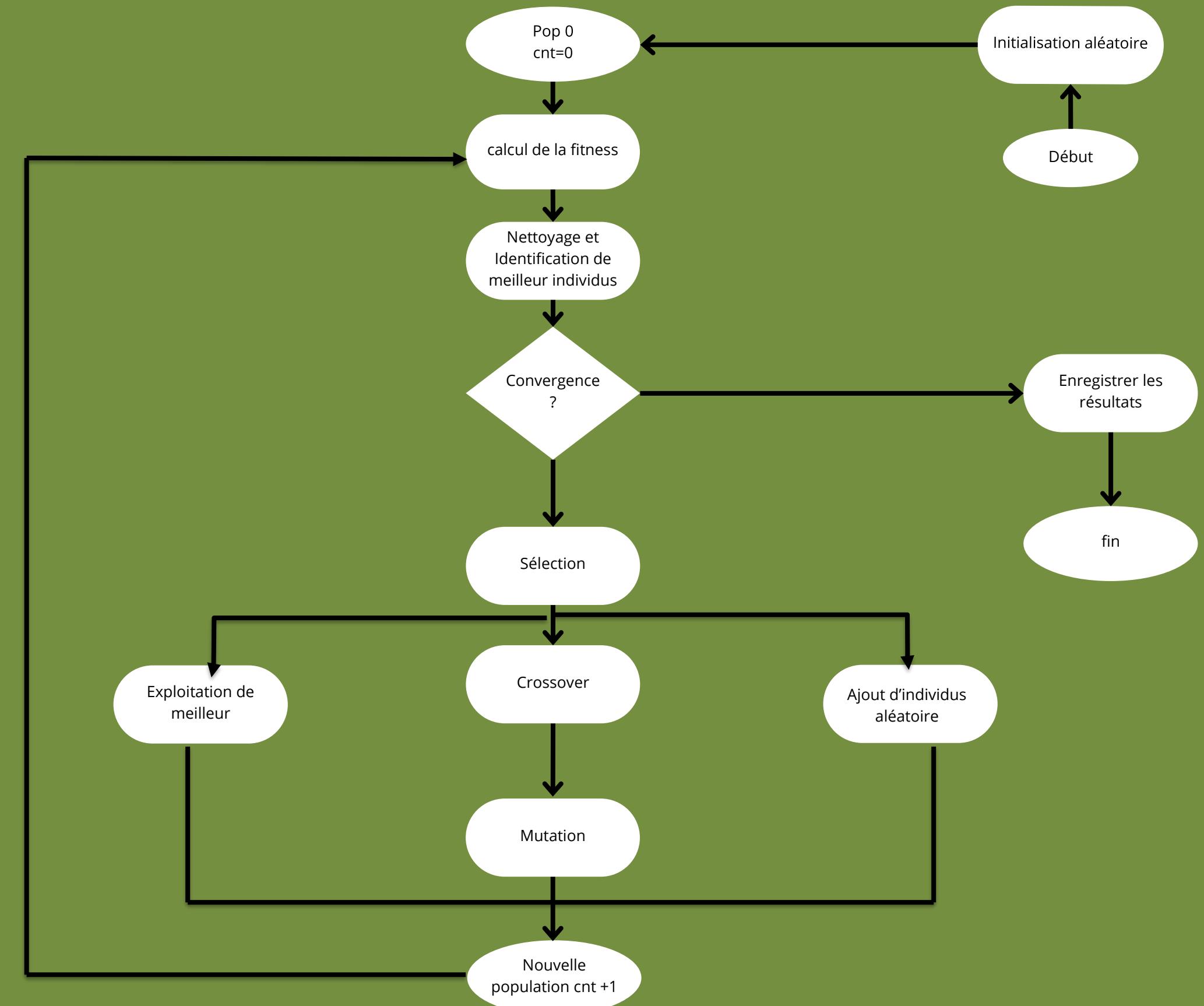
$$Viab_K(u(t)) = \{\exists u(t) \in U \mid x(t+1) = f(x(t), u(t)) \in K \text{ pour tout } t \in [0, T]\}$$

Donc on cherche à trouver A tel que $A \subseteq Viab_K(u(t))$, où A approche que possible de $Viab_K(u(t))$

Méthode de résolution : Algorithme génétique

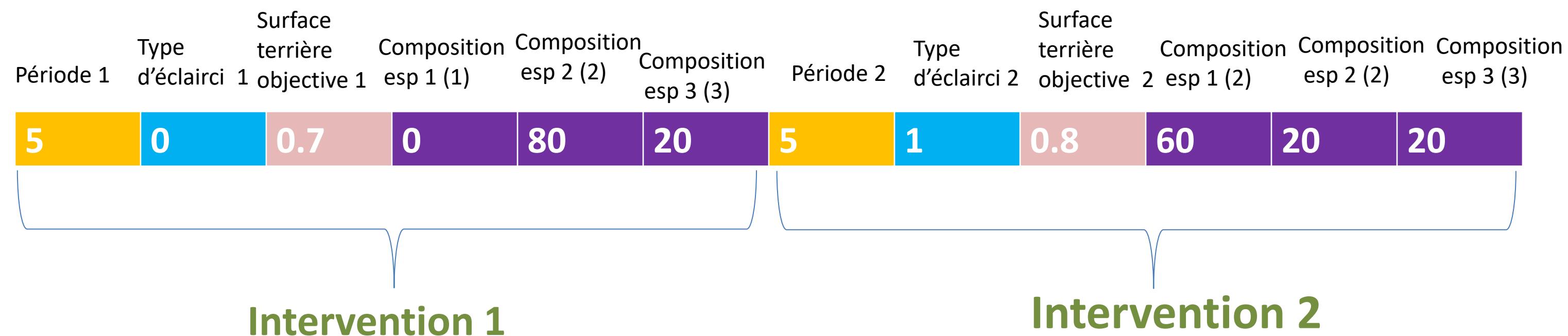
Algorithme génétique

- 1.Une méthode heuristique
- 2.John Holland dans les années 1960 et 1970.
3. processus d'évolution biologique.

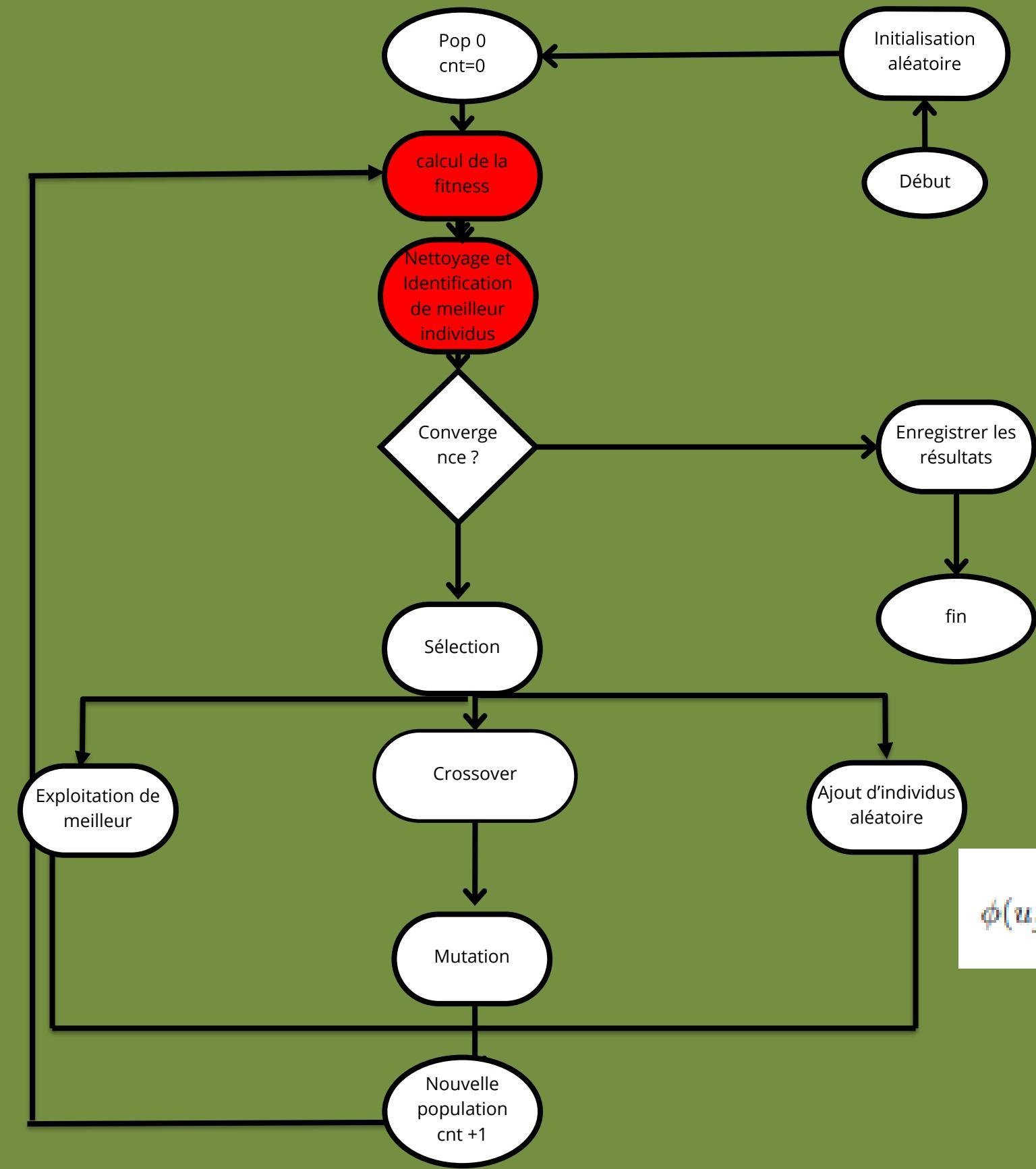


Définition du gènôme pour chaque itinéraire sylvicole.

$$Y^j = (\theta_k^j, tp_k^j, Gobj_k^j, Cf_1^j, Cf_2^j, Cf_3^j)_{k=1,\dots,16}$$



Nettoyage de la population

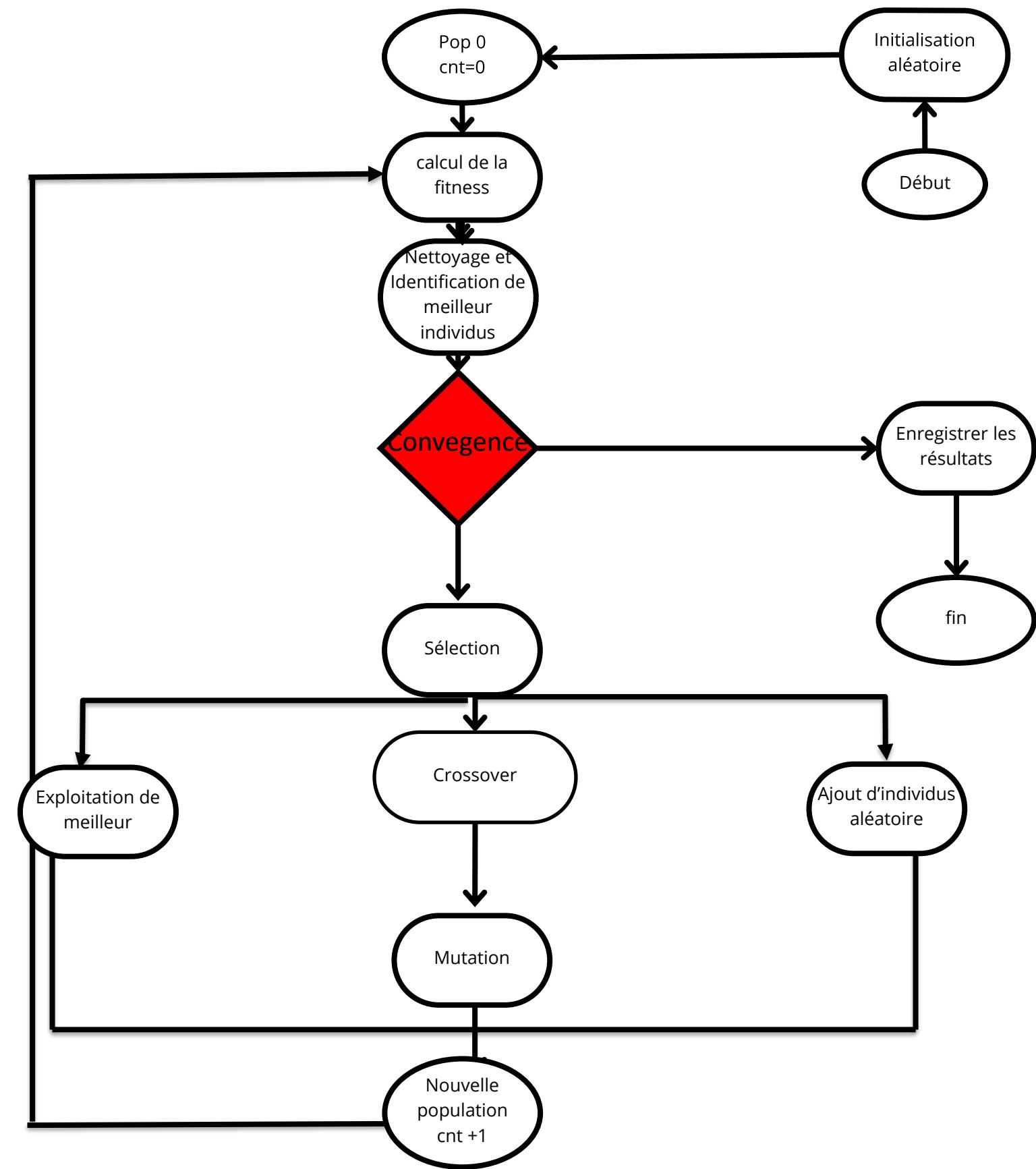


Fitness

$$\Phi(u_j) = \begin{cases} \phi(u_j) & \text{si } u_j \in Viab_K(x_0) \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

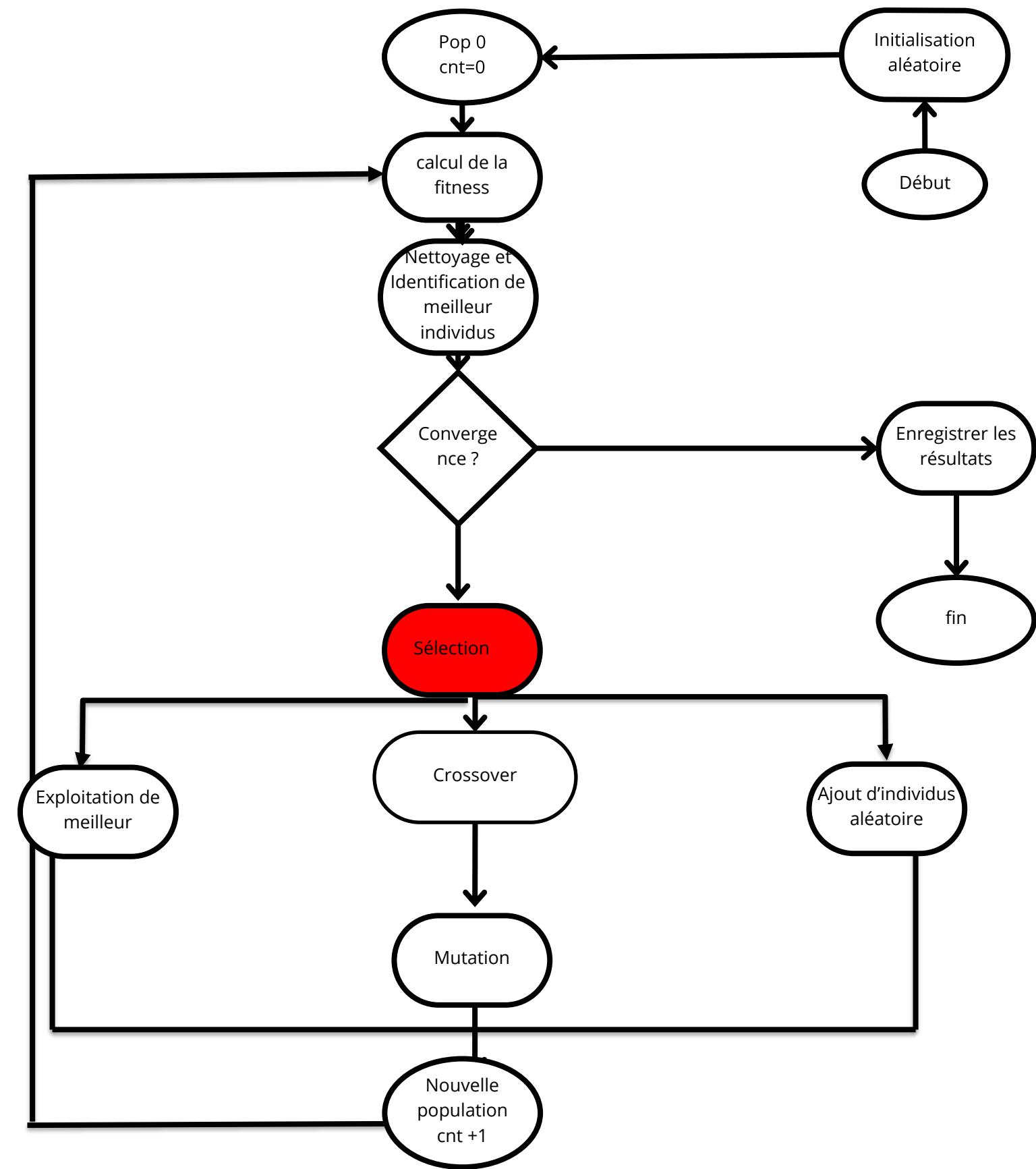
$$\phi(u_j) = \frac{B_p - 3.1}{B_{pmax} - 3.1} + \frac{1}{80} \sum_{t=1}^{80} \left(\frac{G(t) - 10}{G_{max} - 10} \right) + \frac{1}{16} \sum_{t=1}^{16} \frac{|m_{\text{Gini}}(t_c) - 0.5|}{0.5} + \frac{m_{\text{nbEsp}}(t_c) - 2}{\text{nbEsp}_{\max} - 2} + \frac{0.25 - m_{\tau M}(t_c)}{0.25}$$

Cherche à faire converger la fitness



1. **max itération = 10000**
2. **stabilité de la fitness après 5 générations**

Sélection des itinéraires sylvicoles avec la meilleure fitness

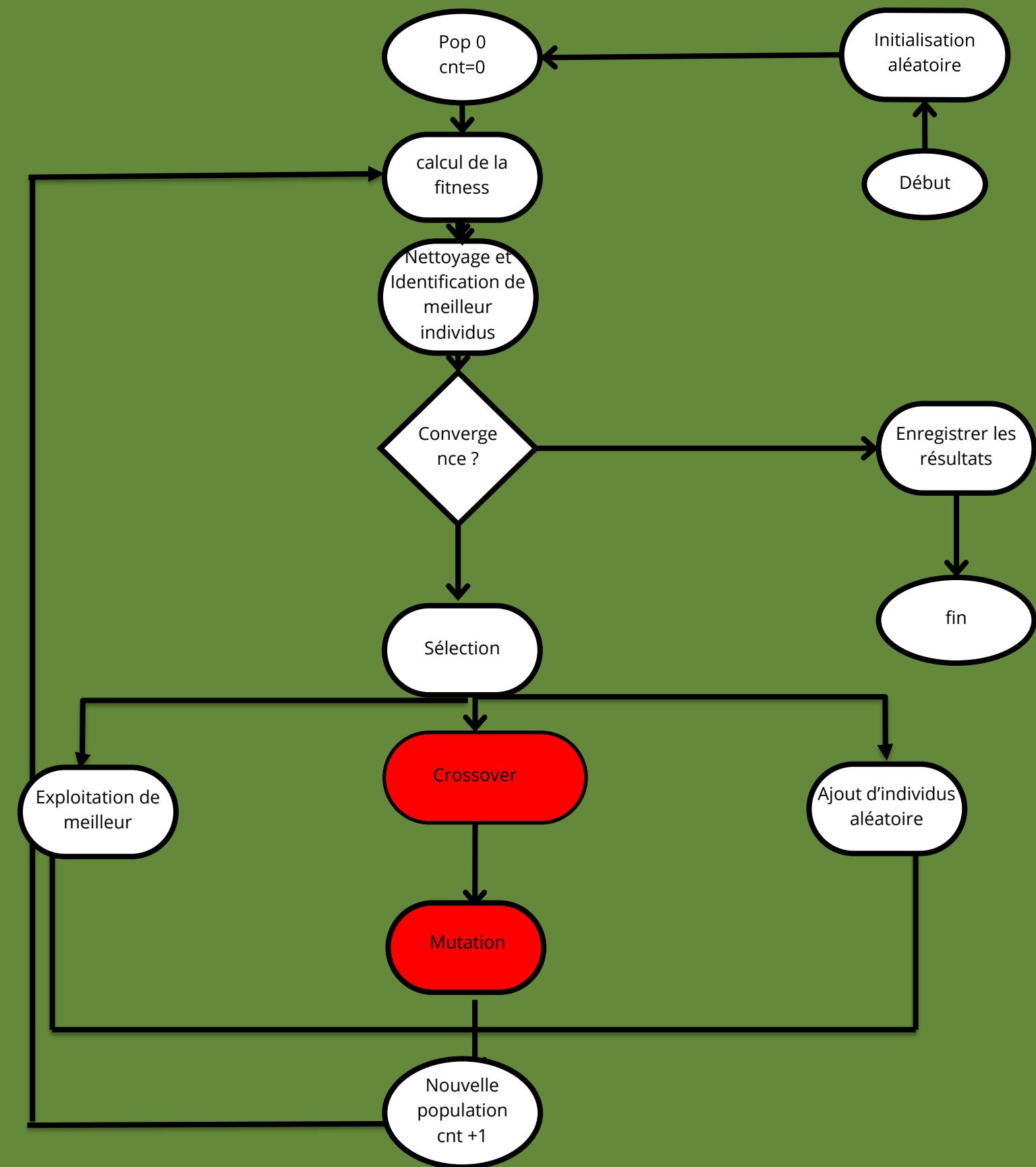


1. n_{save}

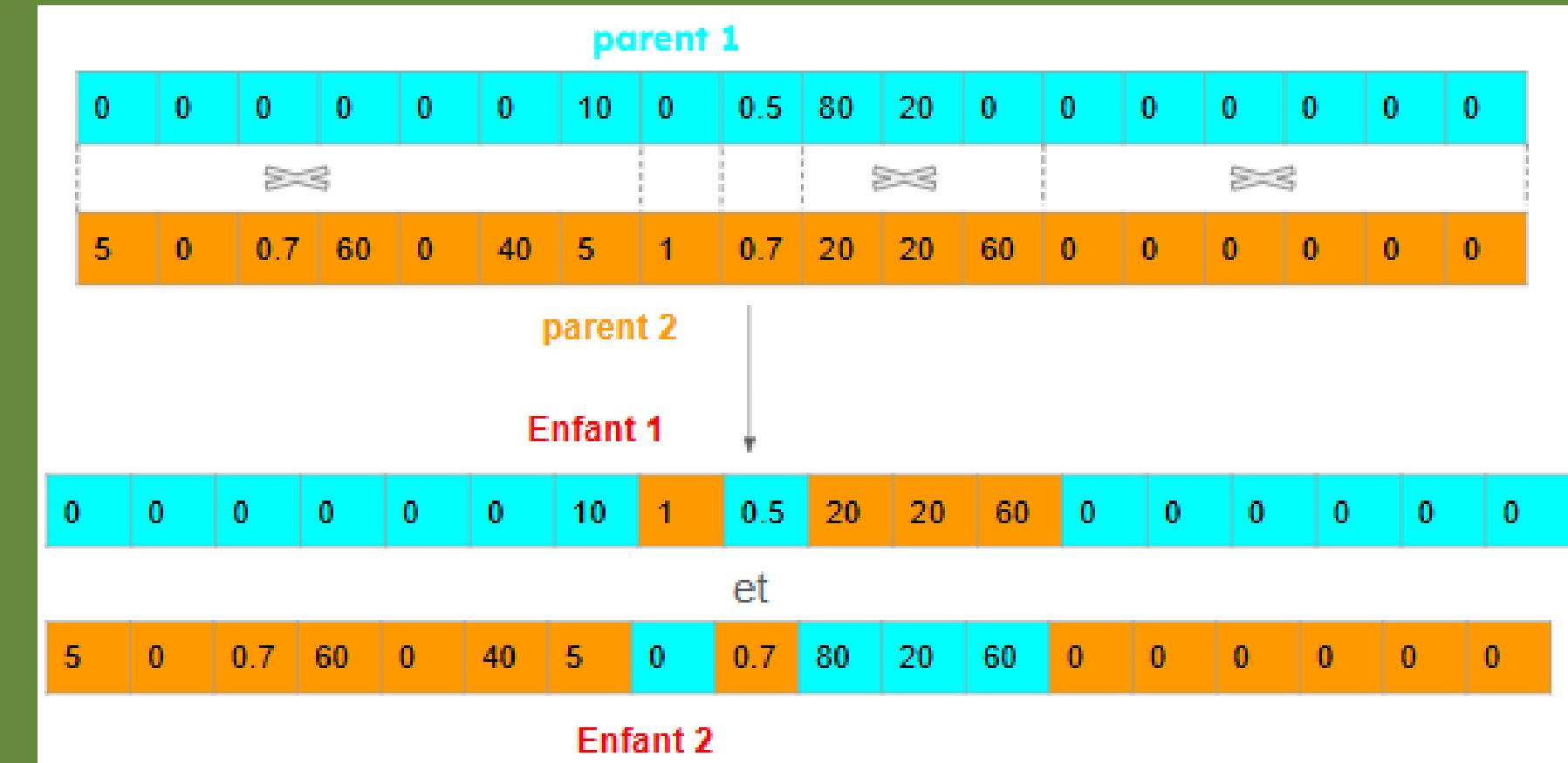
$$2. P_{\text{save_ind}} = \frac{\text{fitness}_{\text{ind}}}{\text{best}_{\text{ind}}}$$



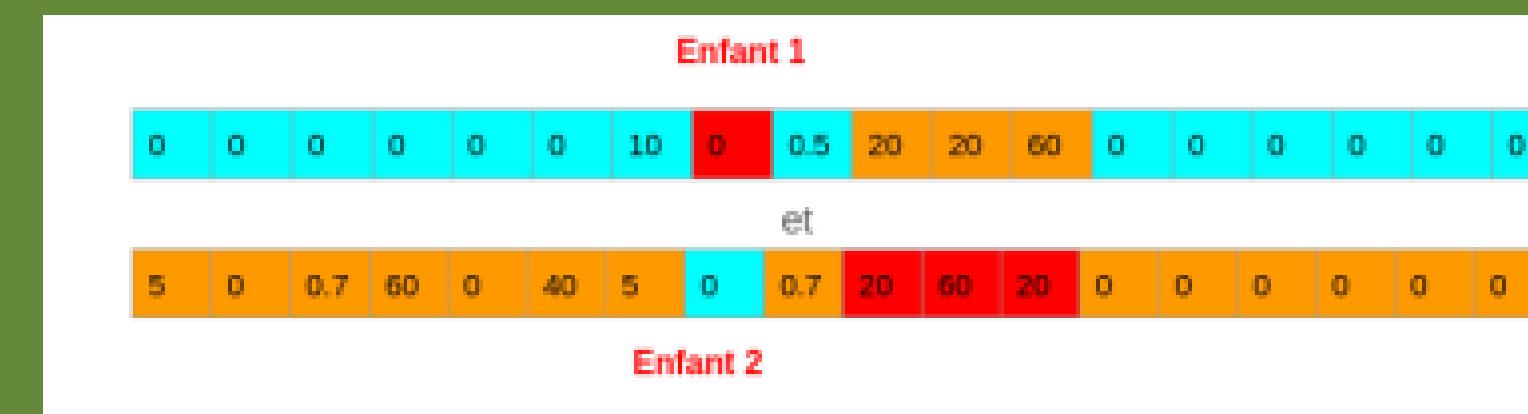
Application de différentes opérations



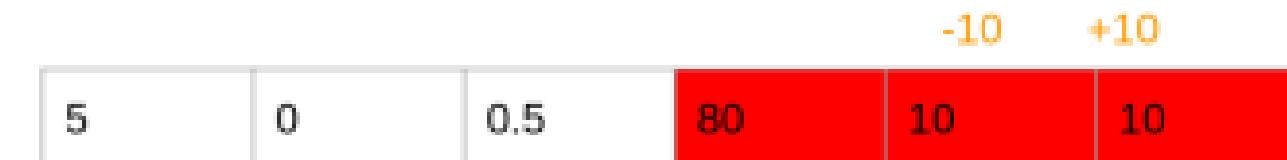
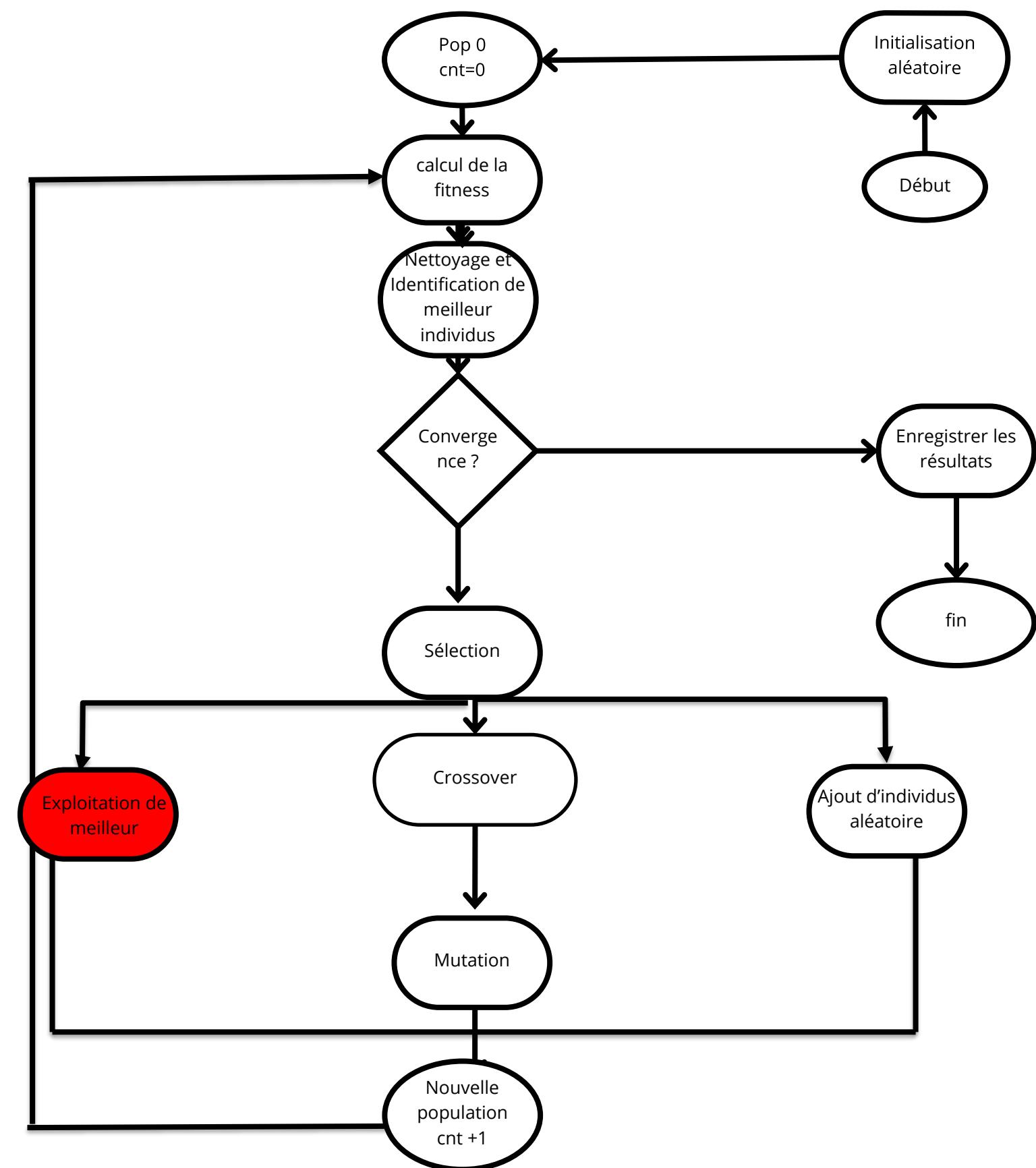
Crossover



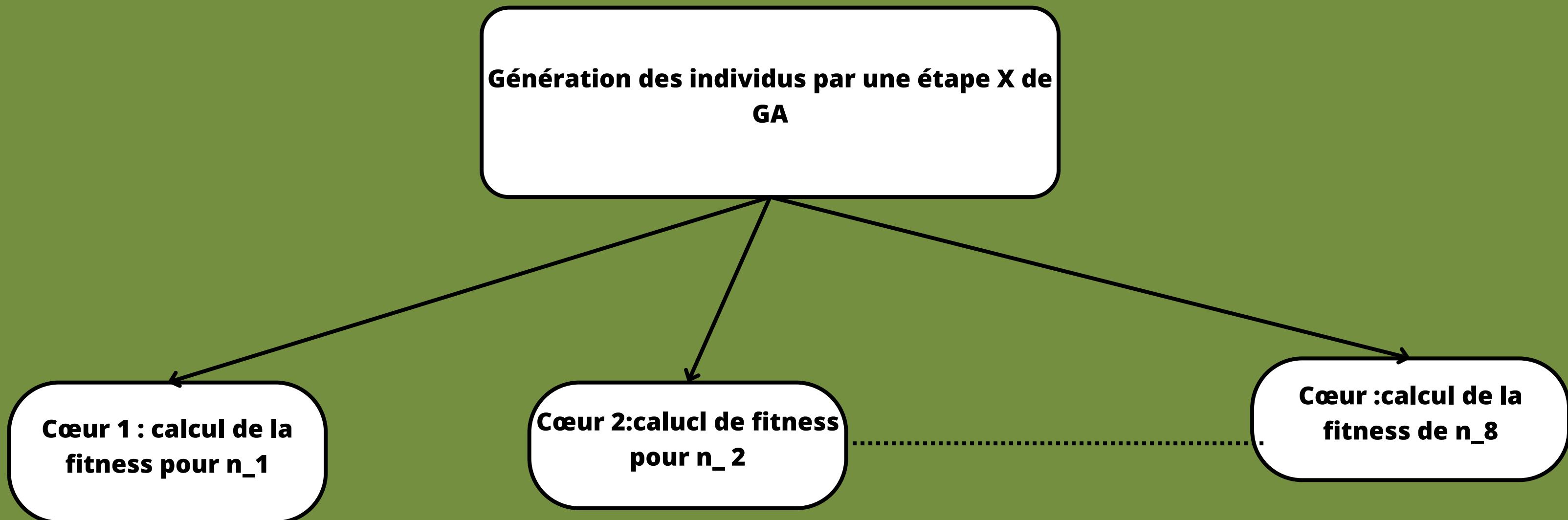
Mutation



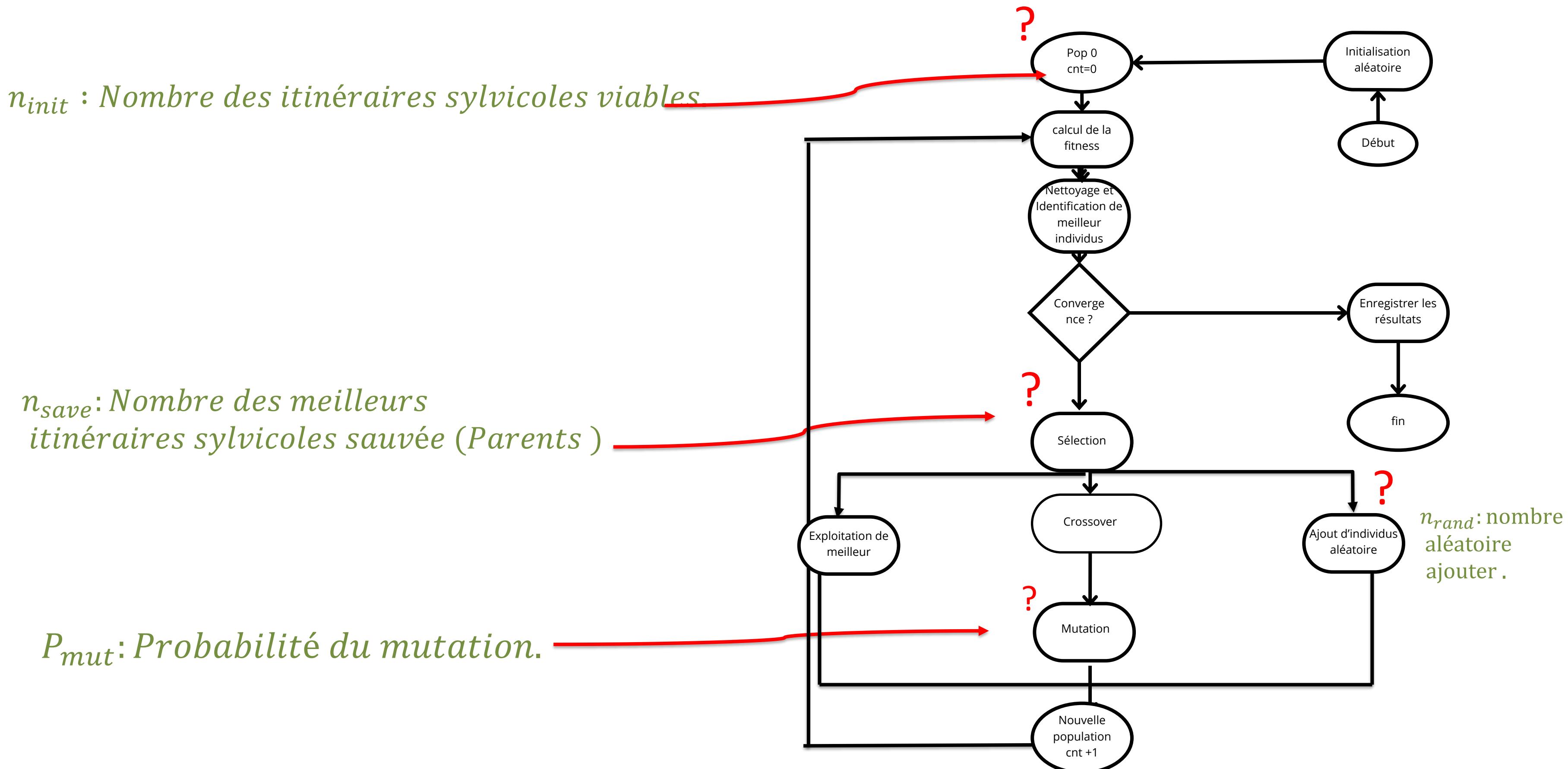
Exploitation du meilleur itinéraire sylvicole



Parallélisation

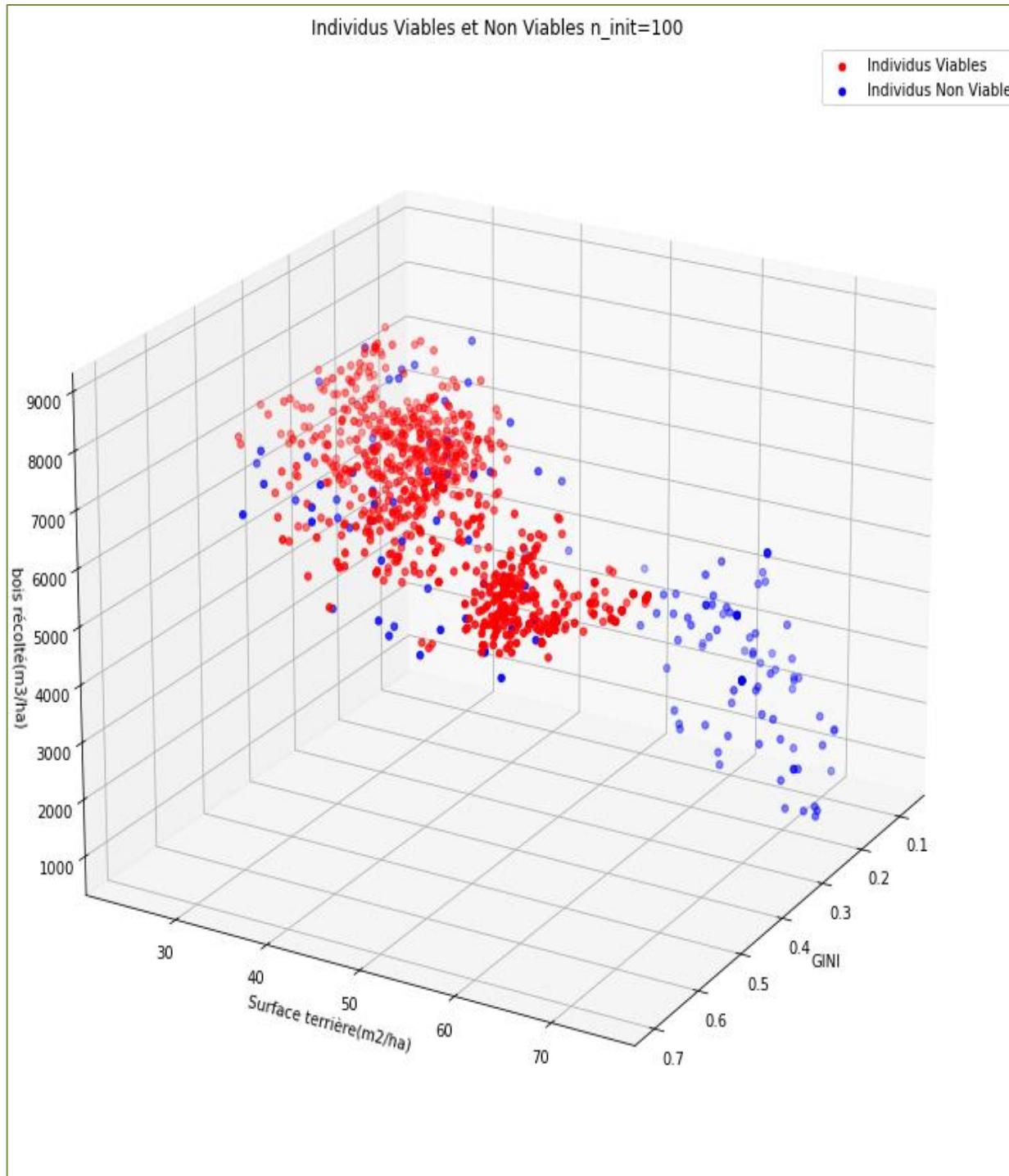


Analyse de sensibilité de GA sur différents paramètres



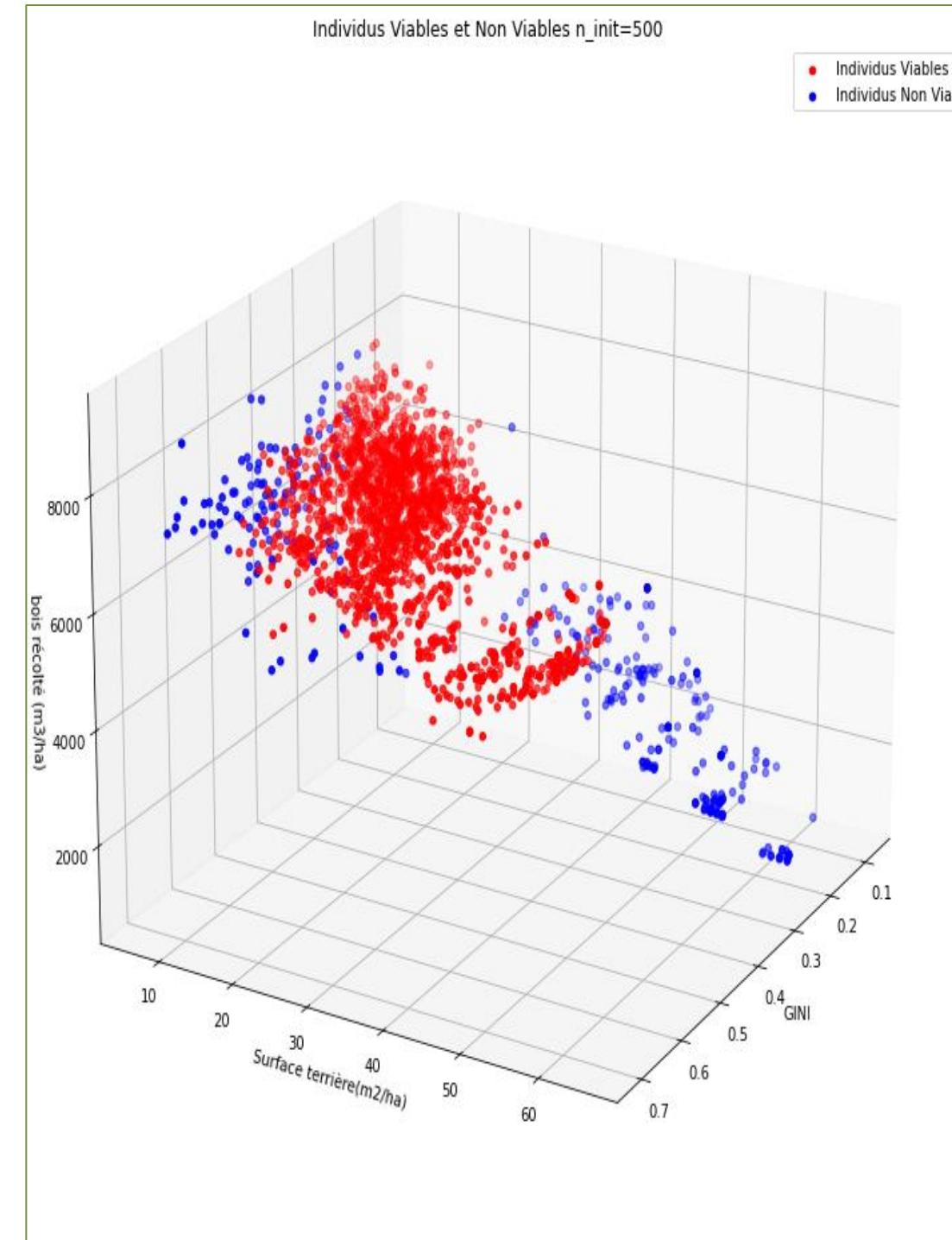
Exemple d'analyse de sensibilité sur n_{int}

Individus Viables et Non Viables $n_{init}=100$



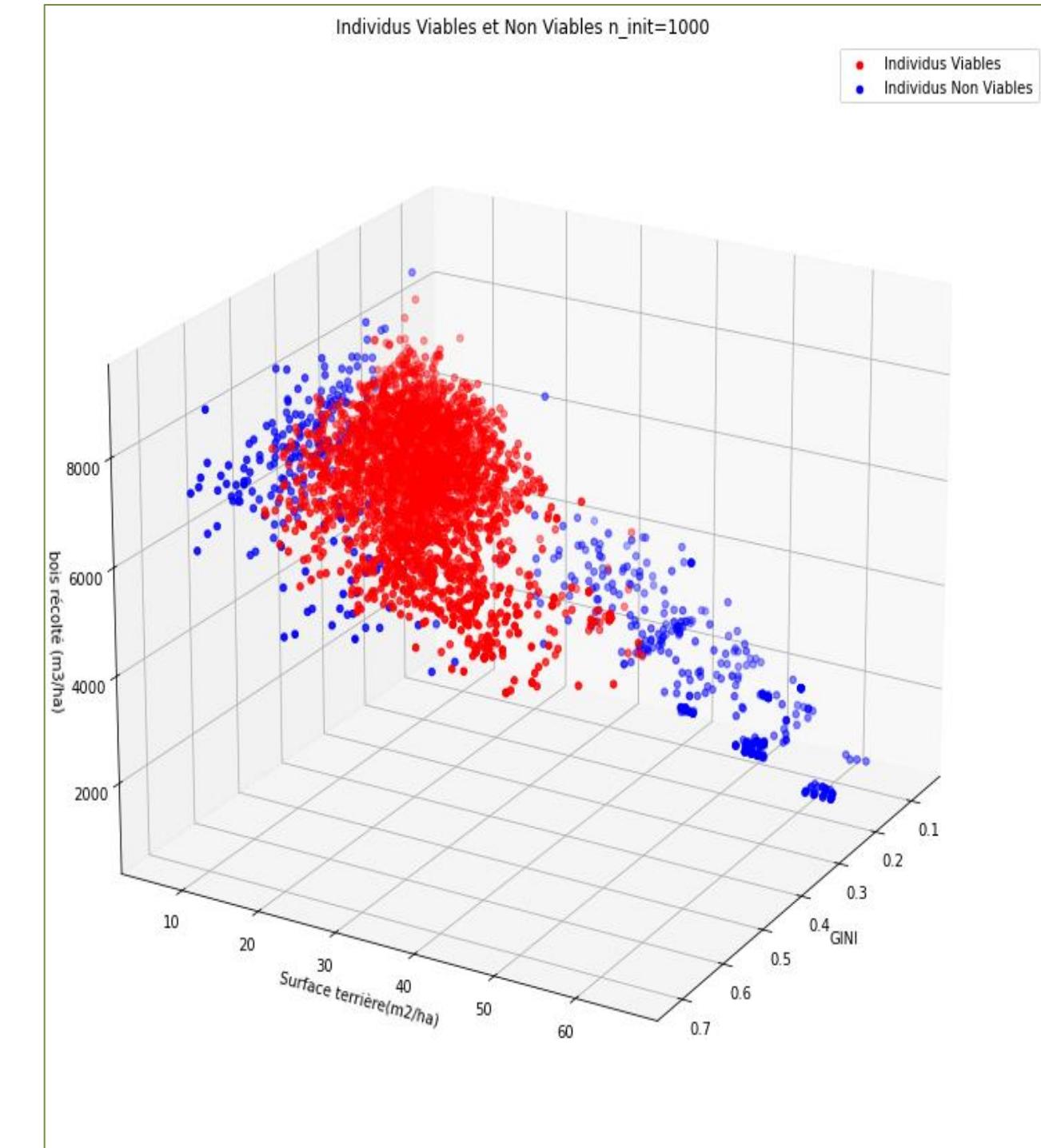
Individus initiale = 100

Individus Viables et Non Viables $n_{init}=500$



Individus initiale = 500

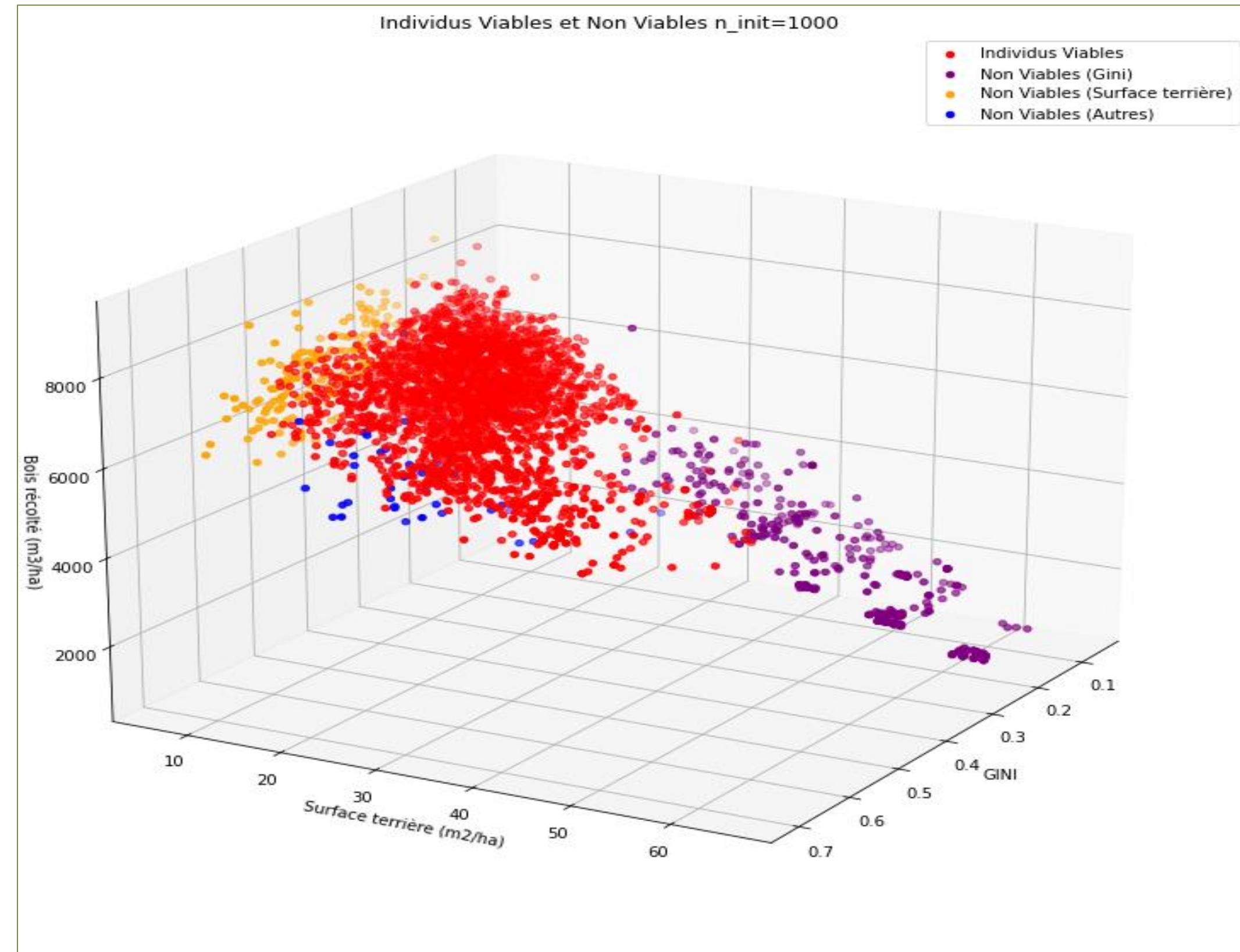
Individus Viables et Non Viables $n_{init}=1000$



Individus initiale = 1000

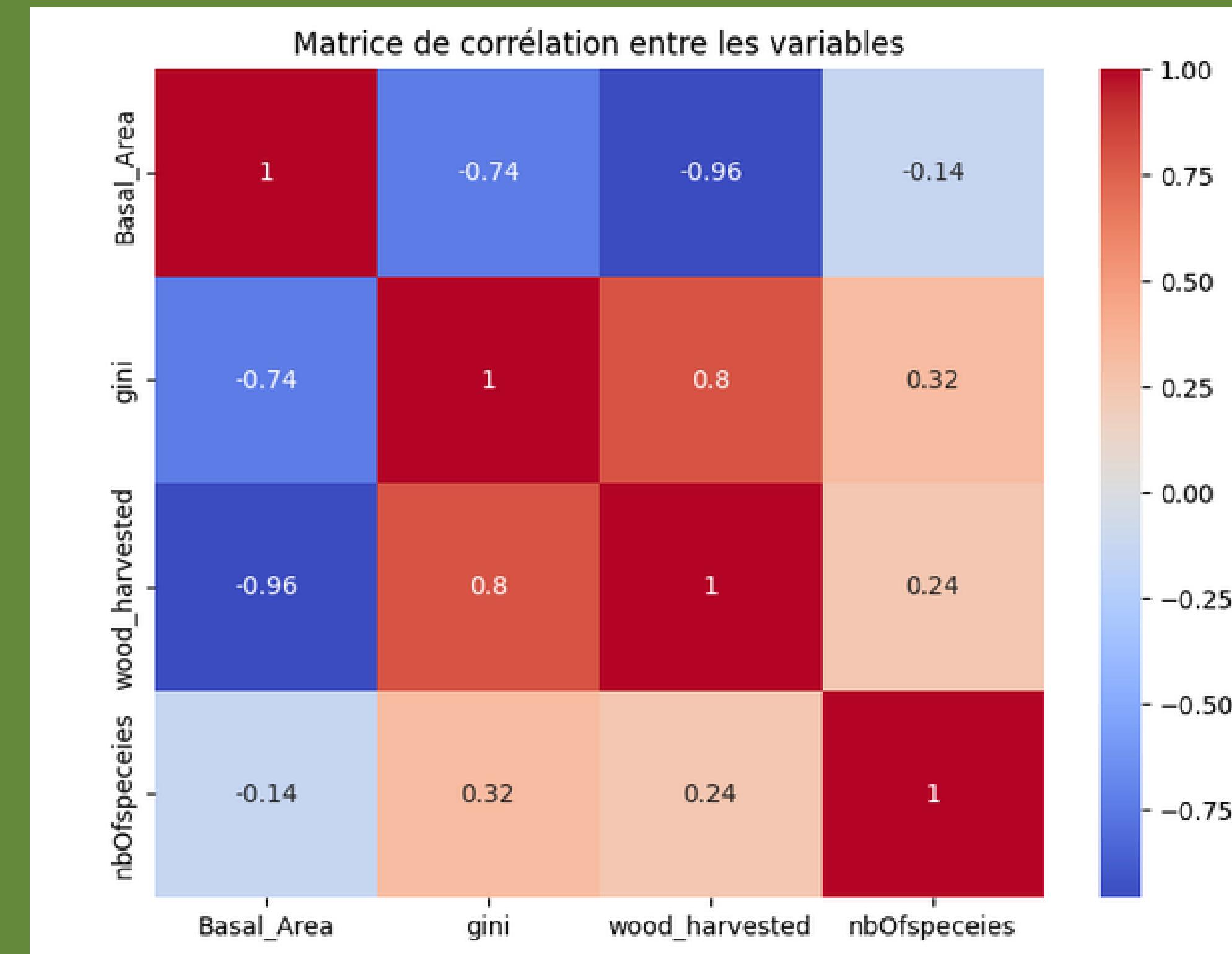
Analyse des résultats

Quel est l'ensemble des solutions viables et non viables?

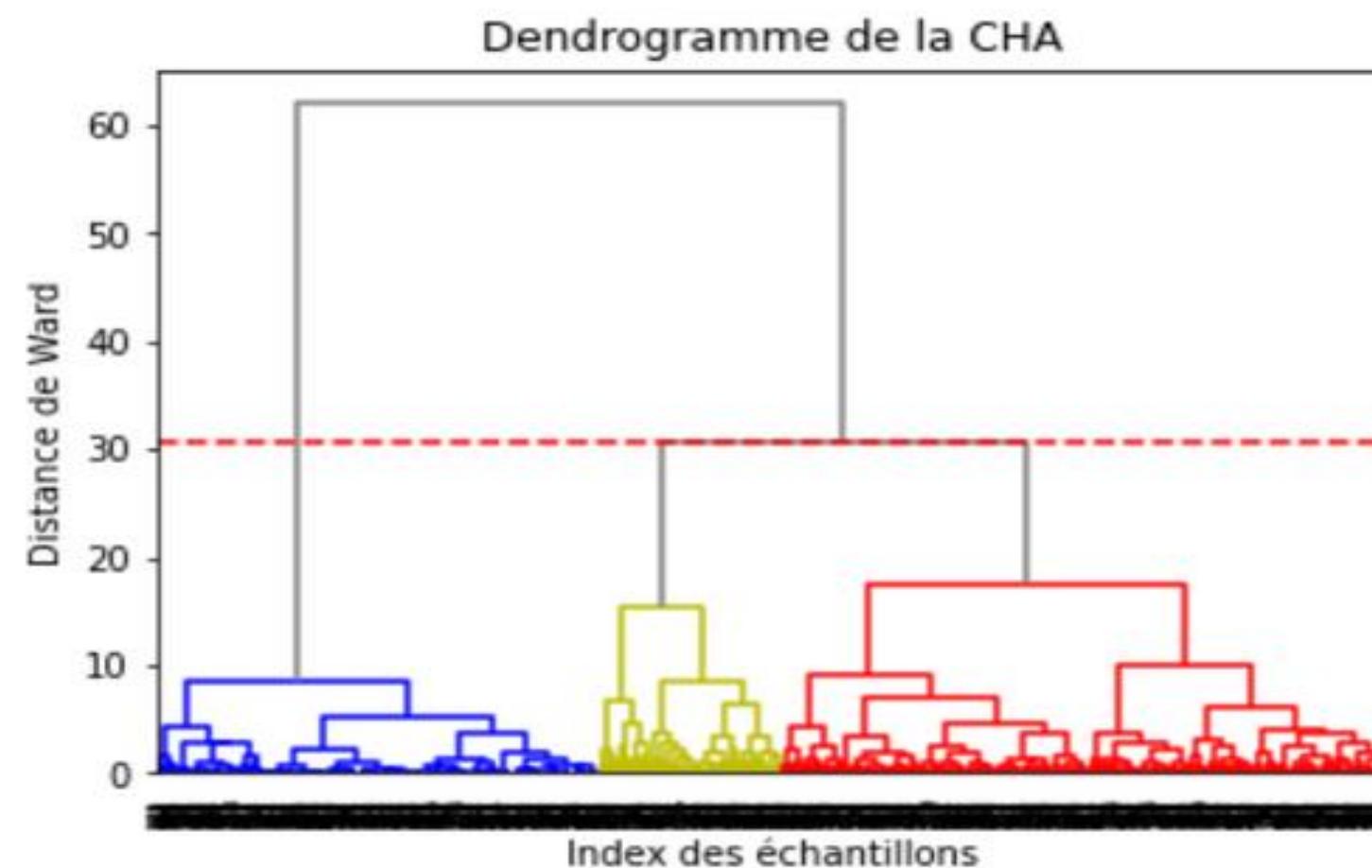


Analyse statistique des itinéraires sylvicoles viables

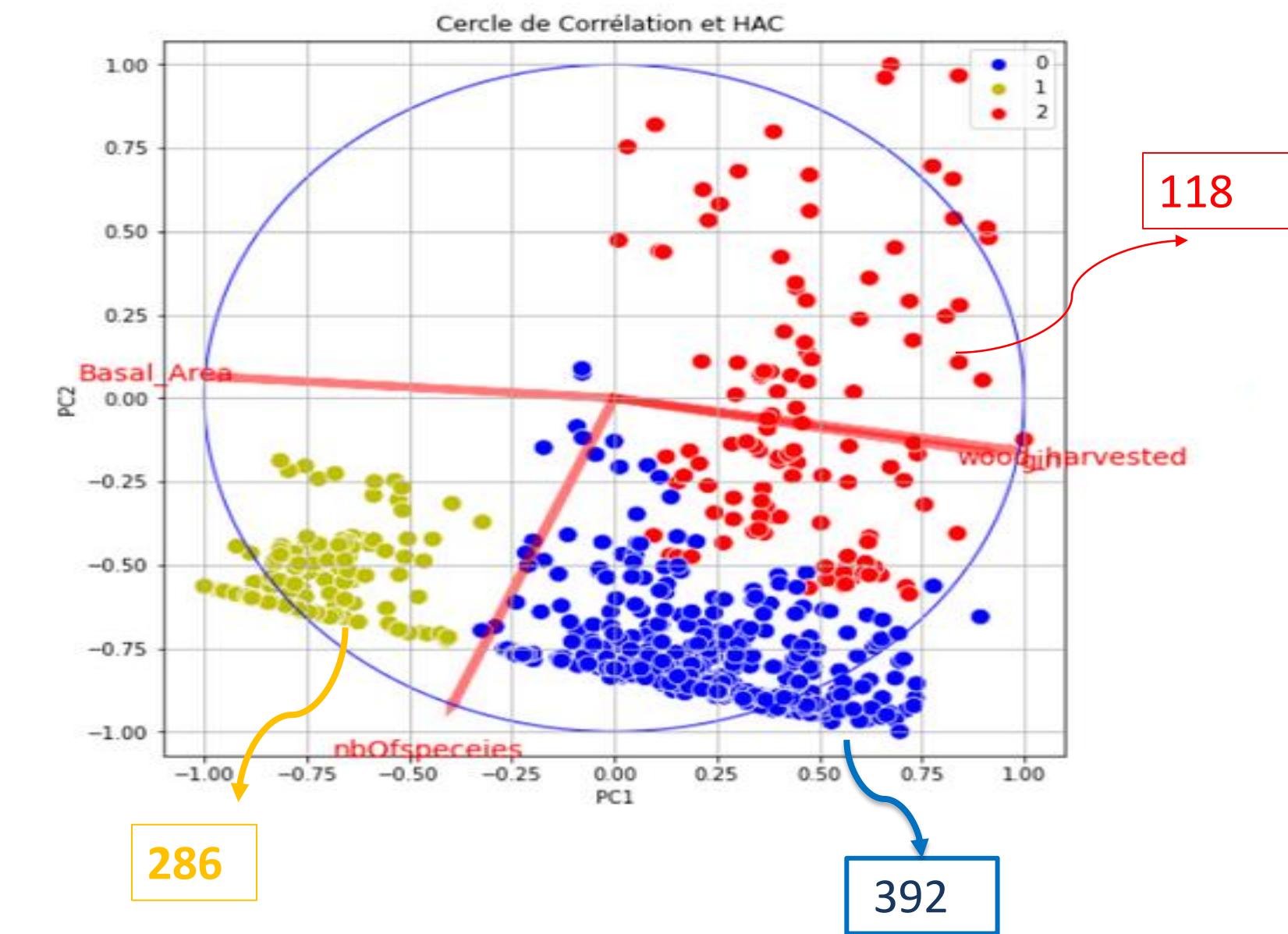
- Corrélation positive entre l'indice de Gini et le bois récolté : la pénétration de la lumière au sol favorise l'établissement des nouveaux semis.
- Corrélation négative entre la surface terrière et (bois récolté, indice de Gini) : une récolte intense diminue la surface terrière de la forêt et vice versa.



Est-ce qu'on peut détecter différentes classes de forêts viables ?

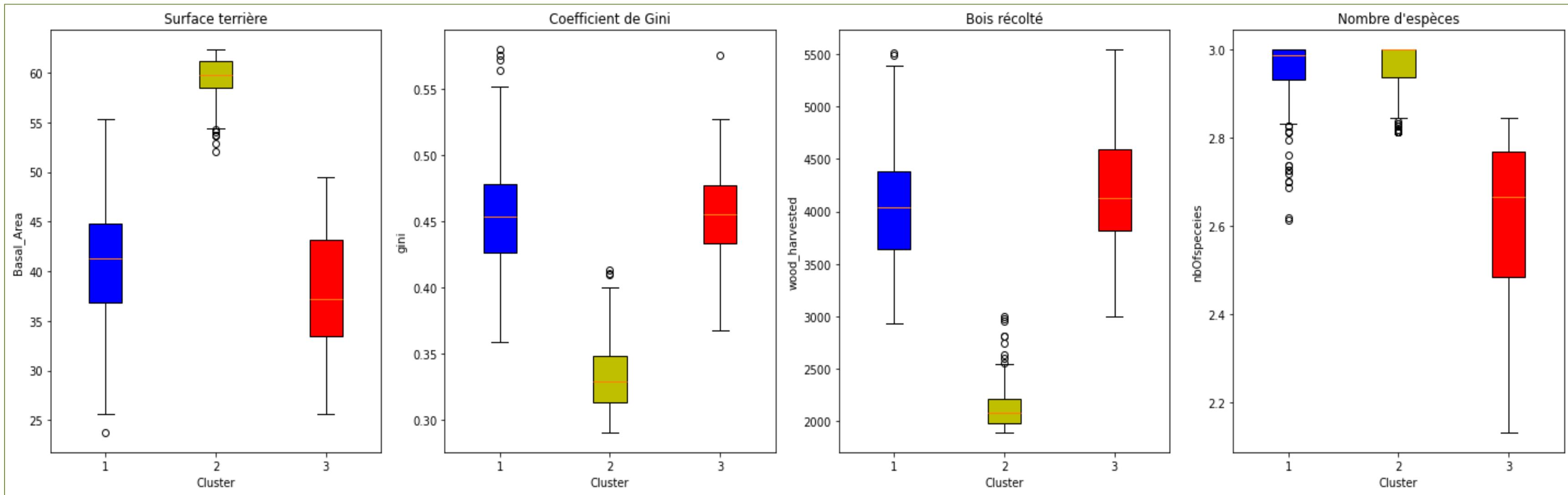


Le choix du nombre des classes



La présentation des itinéraires
sylvicoles en 2D

Caractéristiques des classes de forêt

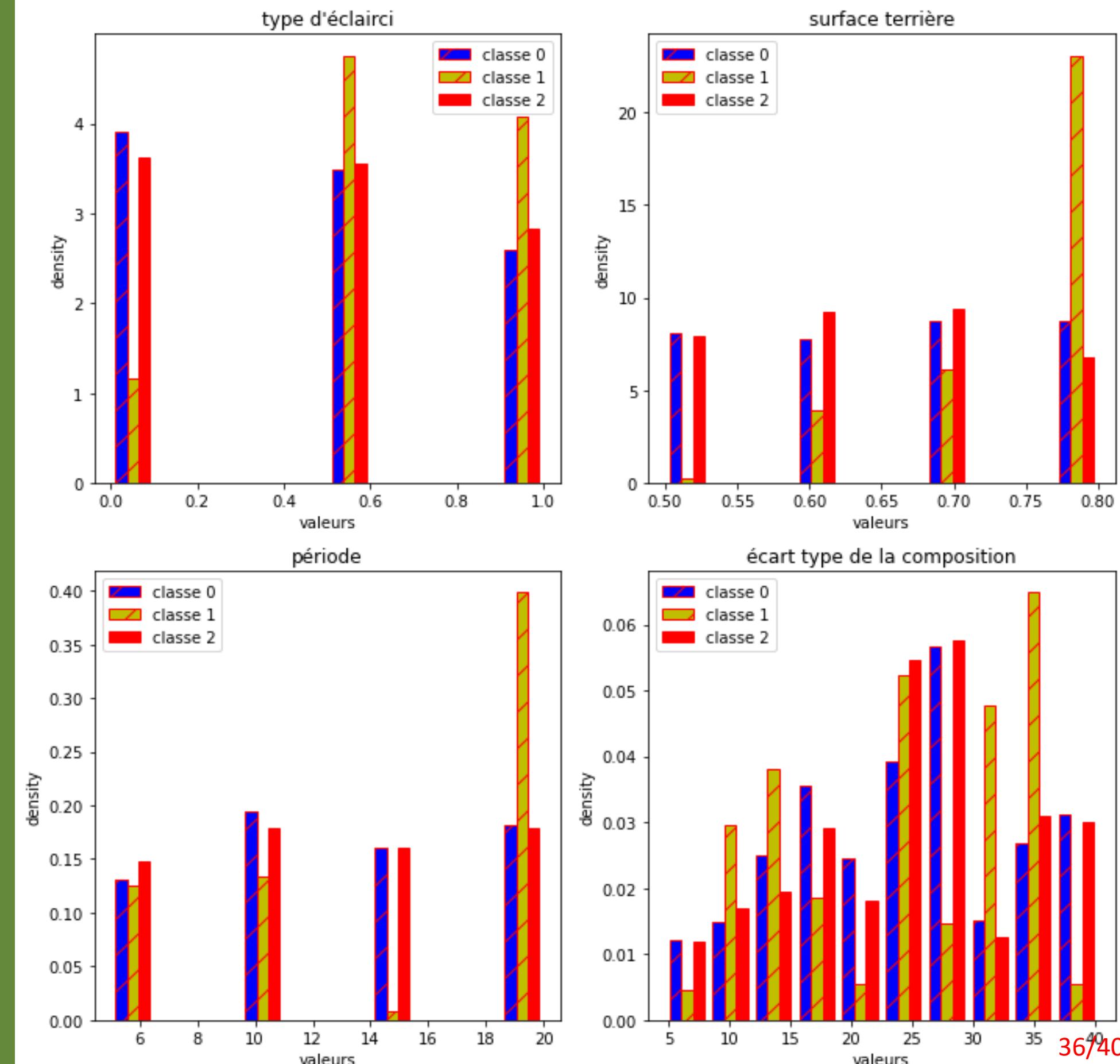


Classe => Corrélation négative entre (le bois récolté ,Gini) et la surface terrière.
Classe et classe même caractéristique sauf par rapport au nombre d'espèces.

Quels contrôles permettent d'obtenir ces forêts ?

Classe : cibler une surface terrière de 80% et une coupe tous les 20 ans (forêts peu exploitées.)

Classe et **Classe :**cibler l'équ répartition des espèces .



Évolution temporelle des caractéristiques de contraintes.

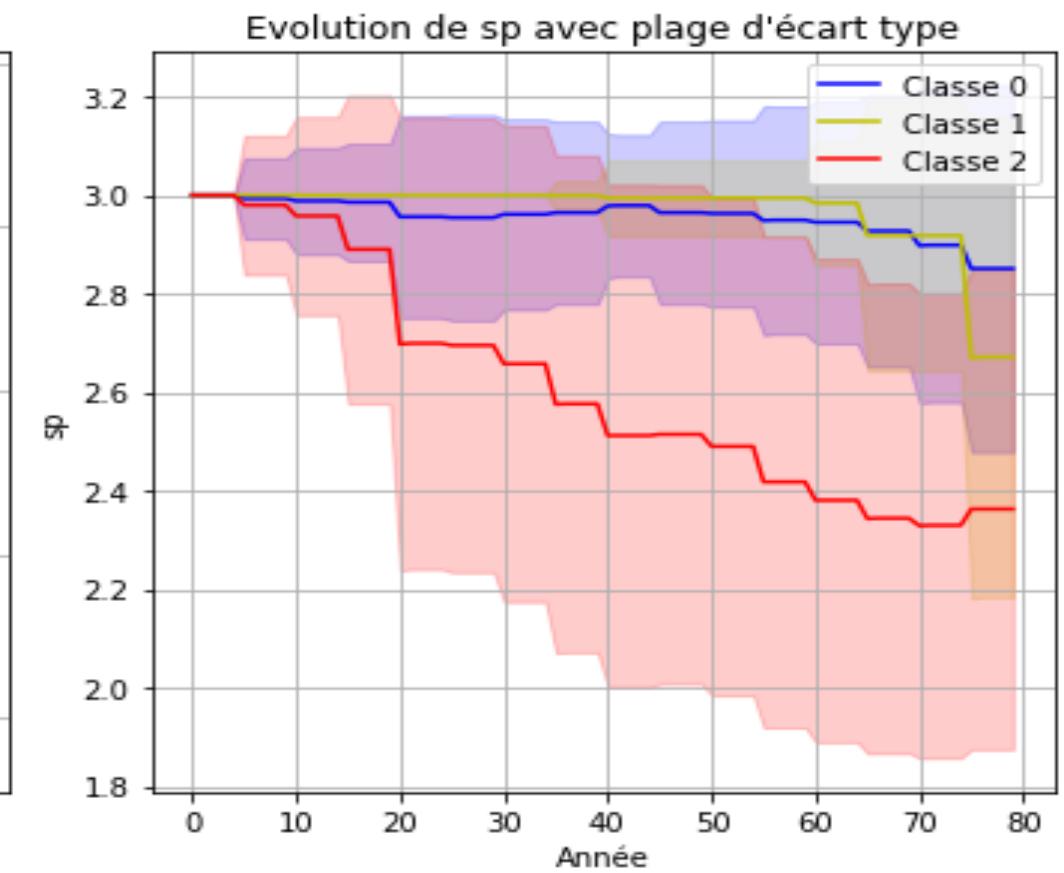
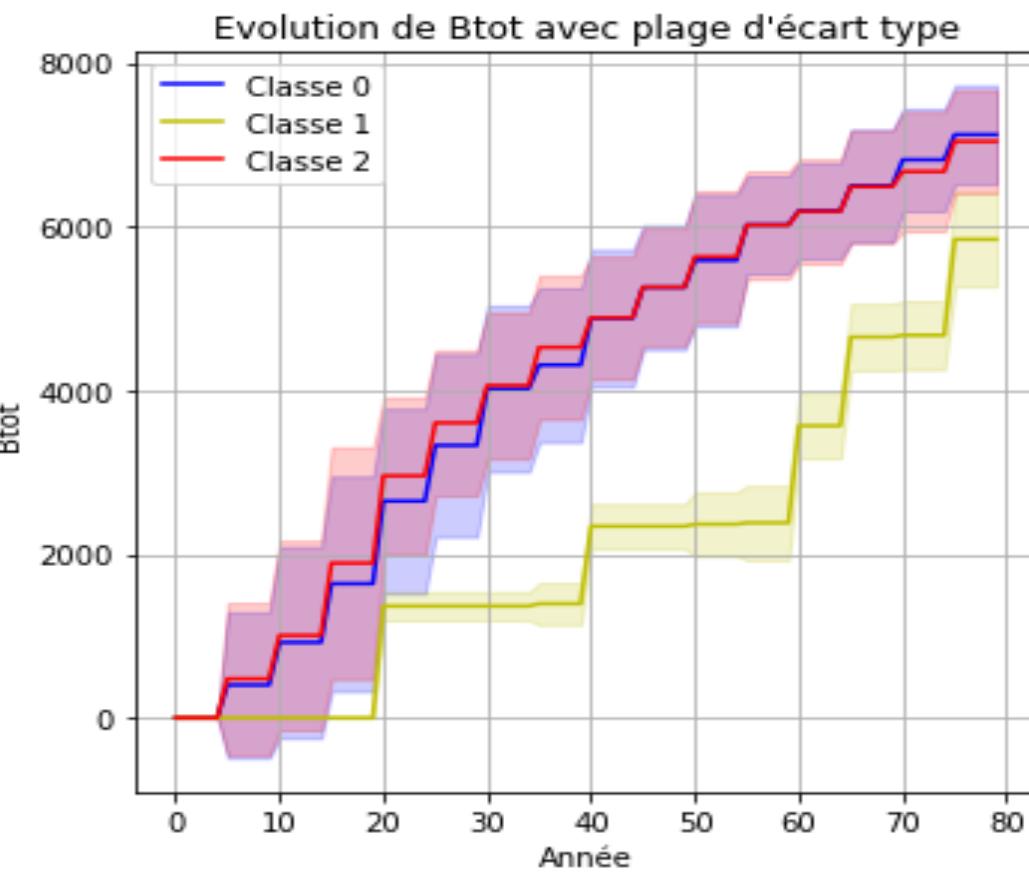
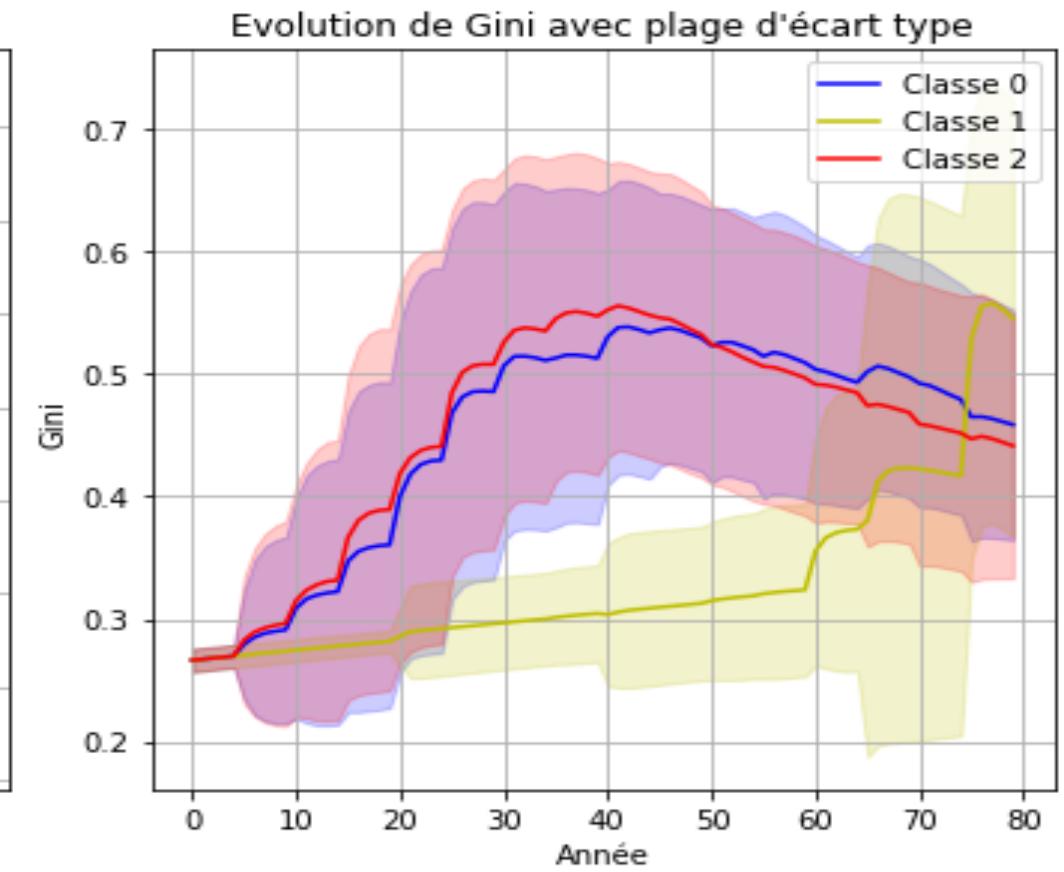
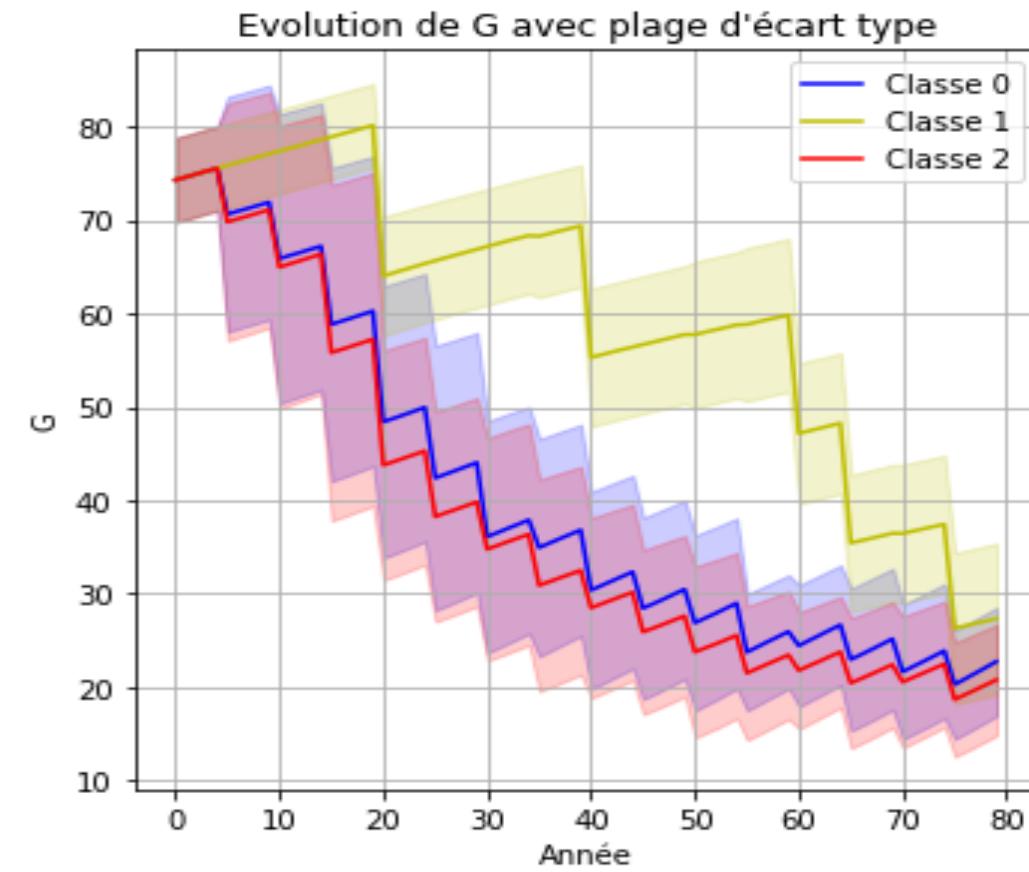
Classe et **Classe** : le nombre d'espèces pour la classe rouge est plus ou moins restreint à 2 espèces.

G : surface terrière restante .

Gini : Coefficient du Gini.

Btot : Bois récolté.

Sp : Nombre des espèces restante.



Discussion

1. La méthode que j'ai développée a fonctionné... sauf :

*Parallélisation (super ordinateur).

2. Analyse de sensibilité plus poussée :

* Scénarios climatiques plus extrêmes.

* Taux de mortalité variés.

* Changer la méthode d'exploitation du meilleur pour GA.

3. Définir la carte de contrôle exacte pour lier l'état des forêts et le contrôle appliqué permettant d'obtenir l'état des forêts ciblées.

Conclusion

1. Objectif du stage :

- Ajouter la dimension de la composition d'espèces au problème du contrôle.
- Analyser les itinéraires sylvicoles.

2. Qu'est-ce que mon stage m'a apporté :

- La méthode de la recherche scientifique.
- Comprendre comment définir un problème de contrôle.
- Comment coupler : modèle écologique × GA × analyses statistiques.
- Apprentissage des questions de gestion forestière (visite du laboratoire de Nancy).

Merci pour votre attention!



Loubna TALEB