

Fête de la Science 2022

Atelier “Dynamiques et bascules environnementales”

V. Baldazzi, L. Mailleret, L. van Oudenhove

6 Octobre 2022

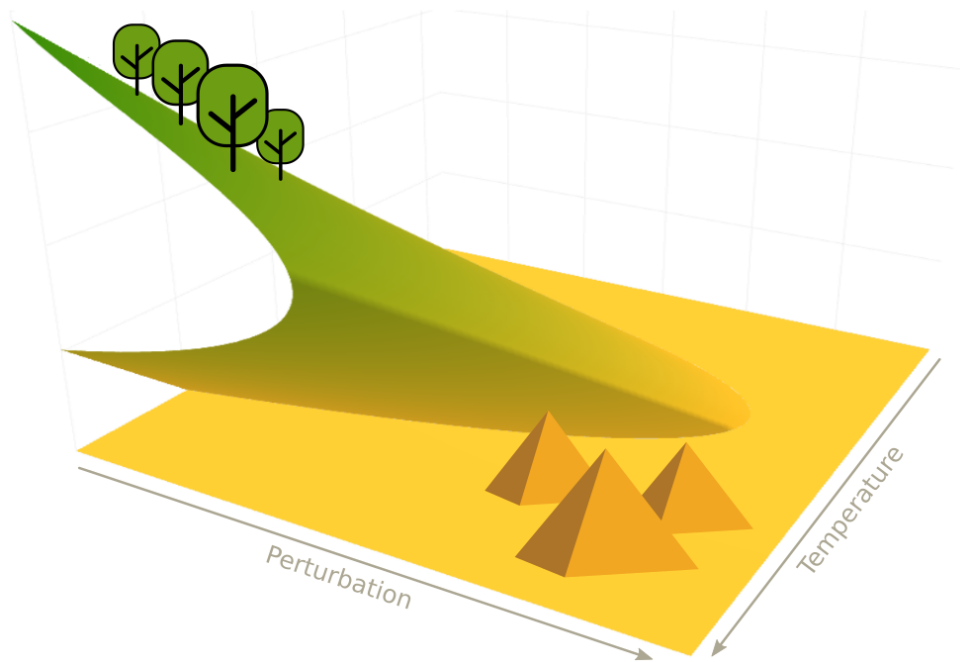


FIGURE: bifurcations dans un modèle de dépérissement de forêts

1 Dépérissement de la forêt

Le modèle proposé par Ritchie et al. (Nature, 2021) décrit la dynamique d'une forêt selon des variations de la température et des perturbations extérieures pouvant être liées à l'action humaine (e.g. déforestation). La variation de la proportion de la couverture végétale par unité de temps, $\frac{dv}{dt}$, s'écrit :

$$\frac{dv}{dt} = g(.)v(1 - v) - \gamma v,$$

où

- v est la proportion de végétation dans l'environnement
- $g(.)$ le taux de croissance de la végétation
- γ un taux de déforestation

Le taux de croissance $g(.)$ est une fonction de la température locale T :

$$g(T) = g_0 \left[1 - \left(\frac{T - T_{opt}}{\beta} \right)^2 \right].$$

Comme illustré en Fig. 1, $g(.)$ présente un maximum $g = g_0$ à la température T_{opt} . Le taux de croissance est donc une fonction croissante de la température pour $T < T_{opt}$ et décroissante au delà ; un taux de croissance négatif implique une mortalité additionnelle pour les arbres. β est un paramètre caractérisant la sensibilité de $g(.)$ à la température locale. Les valeurs de g_0 , T_{opt} et β sont à considérer comme des caractéristiques de la forêt considérée, suivant les espèces présentes et leur physiologie ; les valeurs de paramètres choisies sont illustratives, dans des valeurs proches de celles attendues pour des forêts tropicales (Ritchie et al. 2021).

Par ailleurs, la température de l'environnement est influencée par la présence de végétation et décroît de façon linéaire avec la proportion de végétation dans l'environnement (Fig. 1) :

$$T = T_f + a(1 - v).$$

La température de l'environnement est maximale lorsqu'il n'y a pas de végétation ($v = 0$) et diminue jusqu'à $T = T_f$ quand $v = 1$ (100% de forêt). Le paramètre a définit la pente de la droite i.e. la sensibilité de la température à la présence de la végétation.

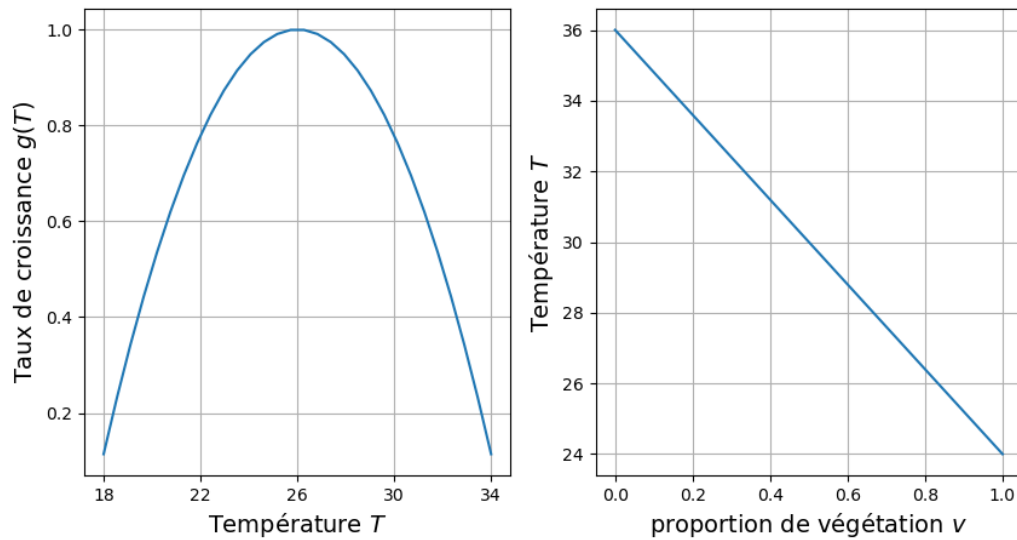


FIGURE 1: Gauche : taux de croissance de la végétation en fonction de la température locale T . Le taux de croissance présente un maximum $g = g_0$ à la température T_{opt} . Ici, $T_{opt} = 26$ °C, $g_0 = 1.\text{an}^{-1}$; $\beta = 8.5$ °C. Droite : Dépendance de la température locale T par rapport à la couverture végétale v . T_f indique la température minimale de l'environnement, lorsque le sol est entièrement couvert de végétation ($v = 1$). Ici $T_f = 24$ °C et $a = 12$ °C.

Simulations en autonomie

Scannez ce QR-code pour accéder à notre application de simulation (smartphone requis avec accès à internet)



Pour démarrer, fixons $T_f = 24$ °C et le taux de déforestation à sa valeur minimale ($\gamma = 0.1.\text{an}^{-1}$).

Effet des conditions initiales

1. Observer l'évolution du système et son équilibre en variant la proportion de végétation initiale :

- Combien d'états d'équilibre présente le système ?
- Que se passe-t-il pour de faibles proportions de couverture végétale initiale ?
- Quel est la couverture végétale initiale minimale nécessaire au maintien de la forêt ?

Effet de la déforestation

2. Observer l'évolution du système lorsque le taux de déforestation γ augmente :
 - Comment varie la couverture végétale à l'équilibre ?
 - Comment varie la couverture végétale minimale permettant le maintien de la forêt ?
 - Que se passe-t-il pour des taux de déforestation élevés ?

Effet de la température

Lorsque le climat de la planète est plus chaud, la température locale, donc son minimum T_f , augmente aussi.

3. Observer l'évolution du système pour une valeur de taux de déforestation minimale ($\gamma = 0.1$) et pour $T_f = 20\text{ °C}$
 - Combien le système a-t-il d'équilibres ?
 - Quel est l'effet d'une température plus chaude sur le système ?
 - A partir de quelle température T_f observe-t-on une possible transition vers la désertification ?
 - Que se passe-t-il pour $T_f = 30\text{ °C}$?
4. Observer l'influence d'une augmentation du taux de déforestation γ
 - Quel est l'effet combiné de températures plus chaudes et de la déforestation ?
 - Pour $T_f = 24\text{ °C}$, quel est le taux de déforestation maximal que la forêt peut supporter, sans s'orienter vers la désertification ?

Simulations en groupe

Nous allons finir tous ensemble l'étude de ce modèle, en abordant successivement :

- le diagramme de bifurcation par rapport au taux de déforestation γ
- le diagramme de bifurcation par rapport à la température locale à l'ombre T_f
- l'influence de variations d'un paramètre sur le diagramme de bifurcation lié à l'autre paramètre

Finalement, nous supposons que la température de l'environnement T_f augmente au cours du temps, et simulerons l'influence d'un réchauffement climatique sur une forêt initialement en pleine santé.

Simulations complètes

Les simulations seront projetées au mur, et peuvent aussi être étudiées sur vos terminaux en suivant le QR-code suivant :



2 La Technique de l'Insecte Stérile

La Technique de l'Insecte Stérile (TIS) est une méthode de contrôle de ravageurs qui repose sur l'introduction dans l'environnement d'individus mâles de l'espèce cible, préalablement stérilisés dans des biofabriques. Les accouplements de ces mâles avec les femelles sauvages ne produisent pas de descendance, ce qui diminue le taux de croissance de la population et permet théoriquement de ramener la population à des niveaux acceptables.

Les modèles de TIS décrivent ainsi les variations au cours du temps du nombre de ravageurs femelles et mâles (sauvages). Ces variations sont directement influencées par le nombre de mâles stériles introduits dans l'environnement, puisque seuls les accouplements entre femelles et mâles sauvages génèrent de nouveaux individus.

Un modèle simple s'écrit (Bliman et al. 2019) :

$$\begin{cases} \frac{df}{dt} = r(1-p)f \frac{m}{m+m_s} c(f) - \mu f, \\ \frac{dm}{dt} = r p f \frac{m}{m+m_s} c(f) - \mu m, \end{cases}$$

où f et m représentent les densités des individus femelles et mâles (sauvages) ; m_s représente la densité de mâles stériles, supposée constante par simplicité. r est le nombre moyen de descendants par femelle accouplée, p la proportion de mâles dans la descendance et μ le taux de mortalité de l'espèce. $c(f)$ est une fonction qui vaut 1 lorsque $f = 0$ et est décroissante de f ; elle représente la compétition entre les femelles pour accéder aux sites de pontes (Fig. 2).

Les accouplements sont considérés non limitants et au hasard, si bien qu'en l'absence de mâles stériles ($m_s = 0$), les femelles sauvages pondent des oeufs à un taux r , pondéré par la compétition entre femelles. La vitesse de reproduction est donc : $r f c(f)$.

En présence de mâles stériles ($m_s > 0$), seuls les accouplements avec des mâles sauvages, en proportion $\frac{m}{m+m_s}$, produisent des descendants (Fig. 2). La vitesse de reproduction est donc : $r f \frac{m}{m+m_s} c(f)$.

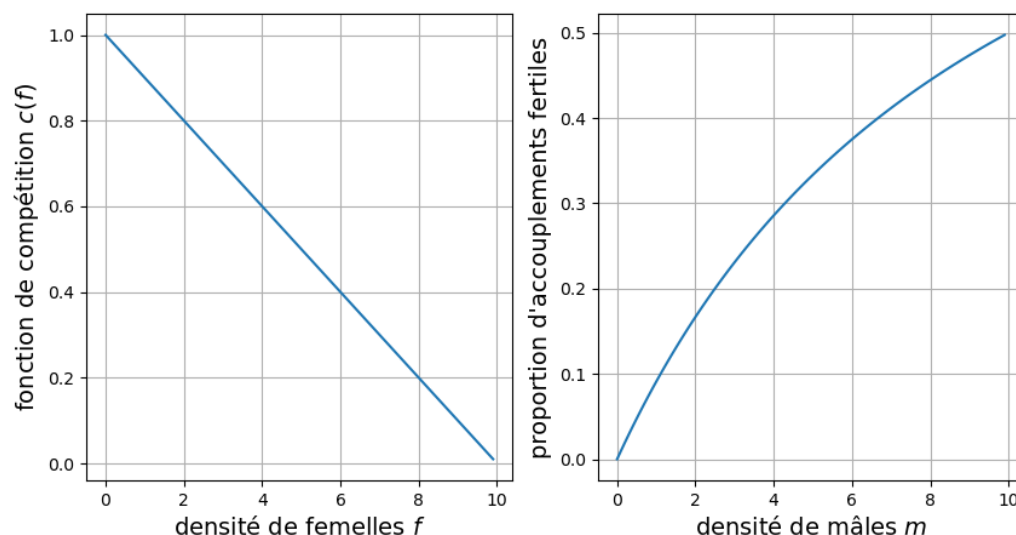


FIGURE 2: Gauche : Fonction de compétition entre femelles pour l'accès aux sites de pontes en fonction de la densité de femelles sauvages. Droite : probabilité d'accouplement fertile en fonction de la densité de mâles sauvages.

Simulations

Comme dans la seconde partie de l'étude sur le dépérissement des forêts, les simulations seront projetées au mur et étudiées en groupe. L'application peut aussi s'exécuter sur vos terminaux via le QR-code suivant :



Références

- Bliman P.A., Cardona-Salgado D., Dumont Y. and Vasilieva O. Implementation of control strategies for sterile insect techniques. *Mathematical Biosciences*, Vol. 314, pp. 43-60, 2019.
- Ritchie P.D.L., Clarke J.J., Cox P.M. and Huntingford C. Overshooting tipping point thresholds in a changing climate. *Nature*, Vol. 592, pp. 517-523, 2021.

Remerciements

Les applications tournent sur <https://www.streamlit.io/> grace aux ressources renforcées gracieusement accordées par : <https://www.snowflake.com/>.