

Daisyworld — un modèle simple de bio-régulation climatique

L'algorithme MATLAB se trouve page 7.

Imaginé et popularisé par J. Lovelock pour supporter sa théorie Gaïa¹ (selon laquelle la Terre est "un système physiologique dynamique qui inclut la biosphère et maintient notre planète depuis plus de trois milliards d'années, en harmonie avec la vie"), Daisyworld constitue une simulation certes très schématique mais néanmoins performante pour démontrer qu'une régulation climatique peut émerger de processus non-téléologiques, à savoir : une compétition inter-spécifique entre deux espèces de pâquerettes, blanche et noire, et une influence *en retour* des paramètres climatiques sur la compétition.

On supposera dans ce modèle simplifié un milieu bio-physique plan symbolisé par une matrice de dimensions $m \times n$. Ce biotope est soumis au rayonnement solaire, lequel varie sur l'échelle de temps considérée (10 Ma) d'une puissance de 550 à 1850 $W \cdot m^{-2}$. On supposera les facteurs trophiques optimaux pour le développement des pâquerettes, et on négligera tous les paramètres atmosphériques et terrestres qui pourraient intervenir dans la dynamique climatique (nuages, gaz à effet de serre etc.) pour ne retenir que la dynamique : température — rayonnement solaire — compétition inter-pâquerettes. L'espèce noire à faible albedo sera considérée comme un quasi corps noir (ie. le rayonnement électromagnétique qu'elle ré-émet ne dépend que de la température) qui absorbe l'énergie incidente et la ré-émet sous forme de chaleur selon la loi de Stefan-Boltzmann.

$$F_e = e \cdot \sigma \cdot S \cdot T^4$$

F_e : taux du flux énergétique en W ,

e : émissivité de l'objet, qu'on prendra ici égale à 1 pour les pâquerettes noires (adimensionnel),

σ : constante de Stefan-Boltzmann (adimensionnel),

S : surface de l'objet en m^2 ,

T : température en K .

L'espèce noire affectionne par ailleurs les faibles températures. L'espèce blanche à fort albedo réfléchit la quasi totalité des rayons incidents, si bien qu'elle participe au refroidissement du biotope. L'espèce blanche affectionne les hautes températures. Ce comportement différentiel vis-à-vis du rayonnement incident, et la résistance différentielle aux températures sont à la base des boucles de rétroaction comme l'illustrent les schémas en p. 2.

La dynamique des populations suit le modèle de Verhulst, qu'on adapte ici sous sa forme séquentielle (à temps "presque" discret, le modèle fait classiquement intervenir deux équations différentielles couplées pour les deux populations). Par exemple, pour l'espèce blanche, soit F la fraction occupée par toutes les pâquerettes blanches dans le milieu. Alors :

$$F(t+1) - F(t) = F(t) \times (a \cdot F_1(t) - m)$$

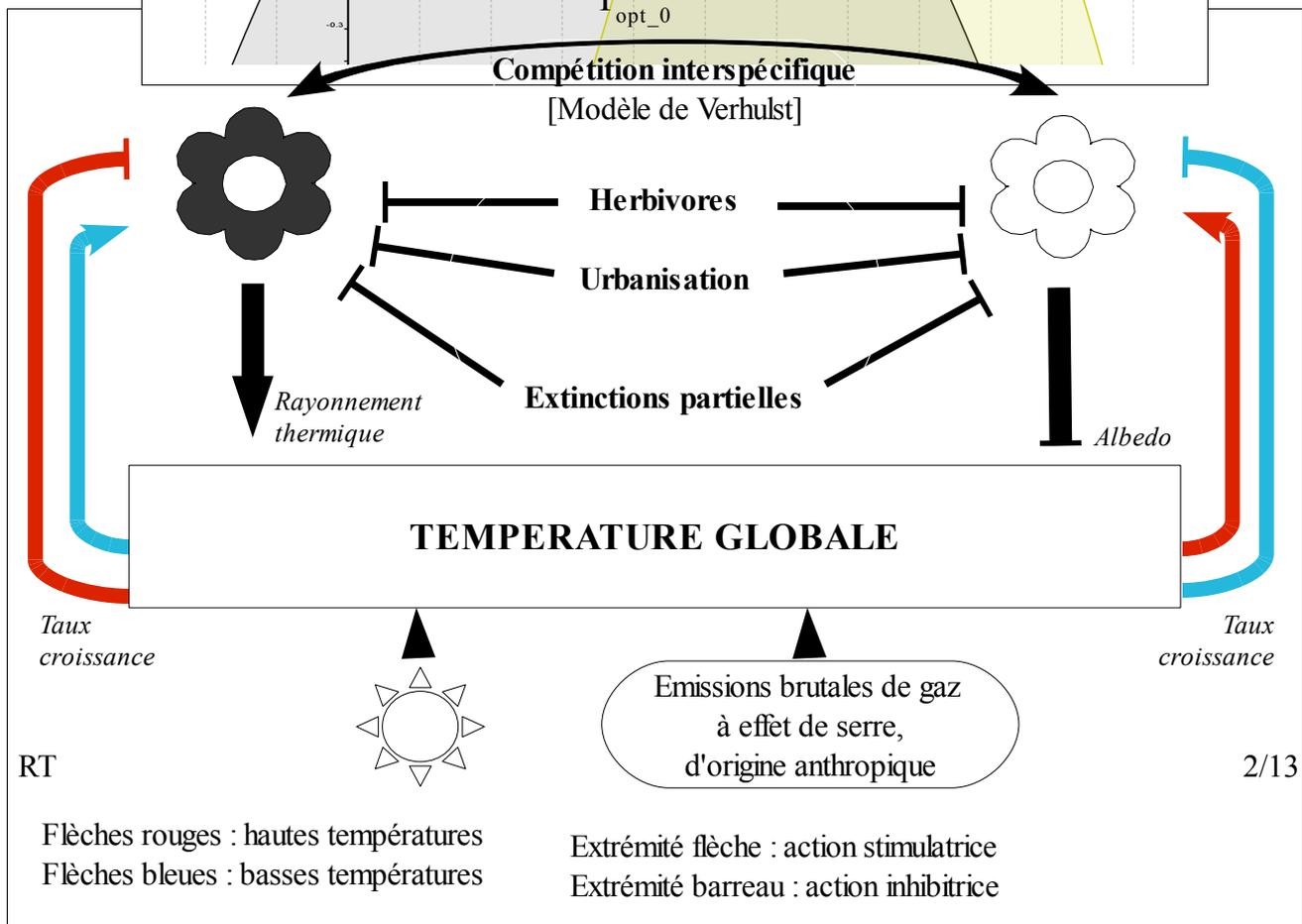
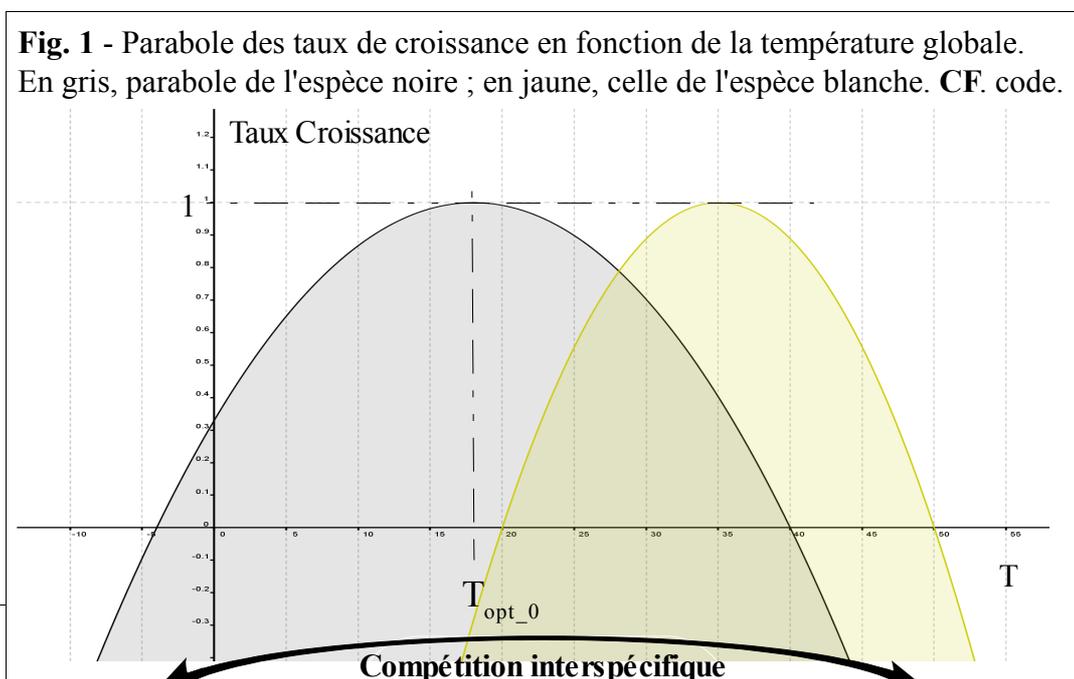
Avec a : taux de croissance, m : taux de mort, $F_1(t)$ fraction de surface *libre* à l'instant t .

La répartition des éléments (terre nue, fleurs blanches, fleurs noires, activités humaines) à la surface du milieu est aléatoire, pour chaque tour (on utilise un algorithme de percolation). On a préféré ce mode de répartition non-continu vu les contraintes de temps imposées (un tour équivaut à un millier d'années, donc entre chaque tour, on peut aisément imaginer combien le "paysage" peut se transformer).

Ce projet vise à développer le modèle initial de Daisyworld en montrant plus particulièrement le rôle joué par des perturbations externes : (1) présence et développement d'une population

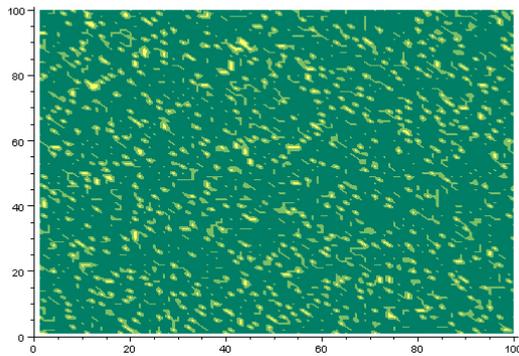
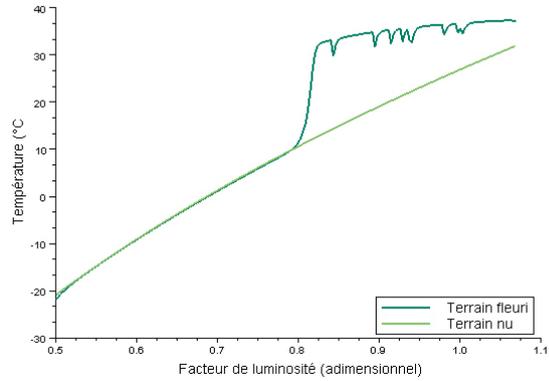
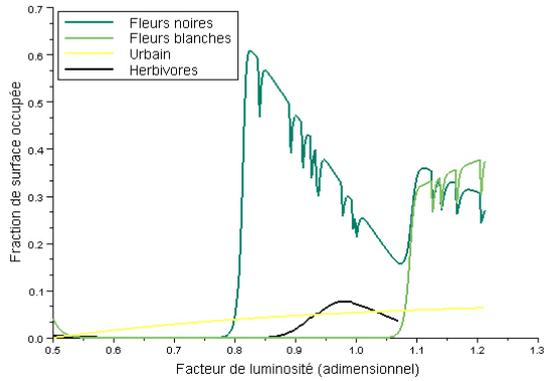
d'herbivores ; et des perturbations d'origine anthropiques, comme (2) colonisation du biotope par des surfaces urbaines impropres au développement des pâquerettes, et (3) émission brutale de dioxyde de carbone (qui convertit l'énergie réfléchiée par les fleurs blanches en énergie thermique). L'objectif étant d'évaluer la "résilience" du système soumis à ce type de perturbations externes, outre celui de confirmer l'émergence d'une auto-organisation régulatrice par une compétition interspécifique. Ce modèle, très simple dans son principe, mériterait de plus amples développements et un perfectionnement de son adéquation au réel afin de rendre plus valide l'évaluation de l'influence des paramètres considérés : une multiplication des espèces végétales avec une gradation des albedos, la prise en compte des températures locales (plutôt que de travailler sur la température moyenne) avec une répartition en groupes végétaux continus, le fractionnement des groupes végétaux en espaces bien délimités et l'évolution spatiale suivant un algorithme "automate cellulaire".

[¹] Capra Fritjof. 2003. *La Toile de la Vie*



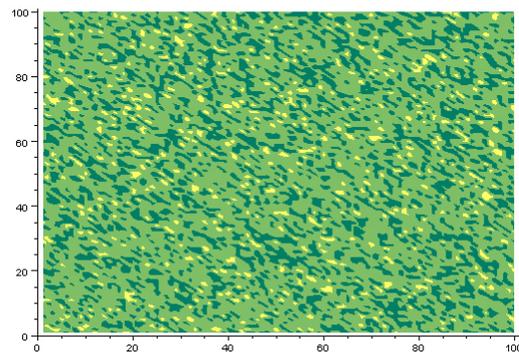
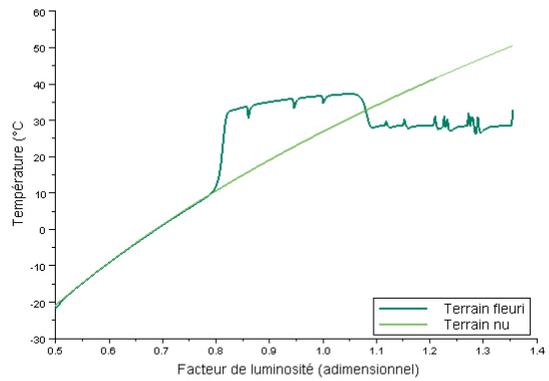
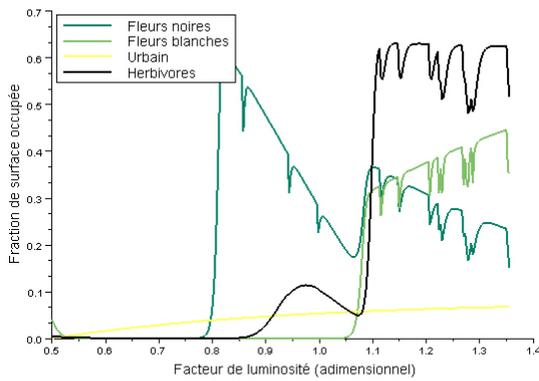
Pour répondre aux objectifs du projet, nous nous contenterons de faire varier les paramètres notés (1), (2) et (3) en page 1.

Modèle "standard"



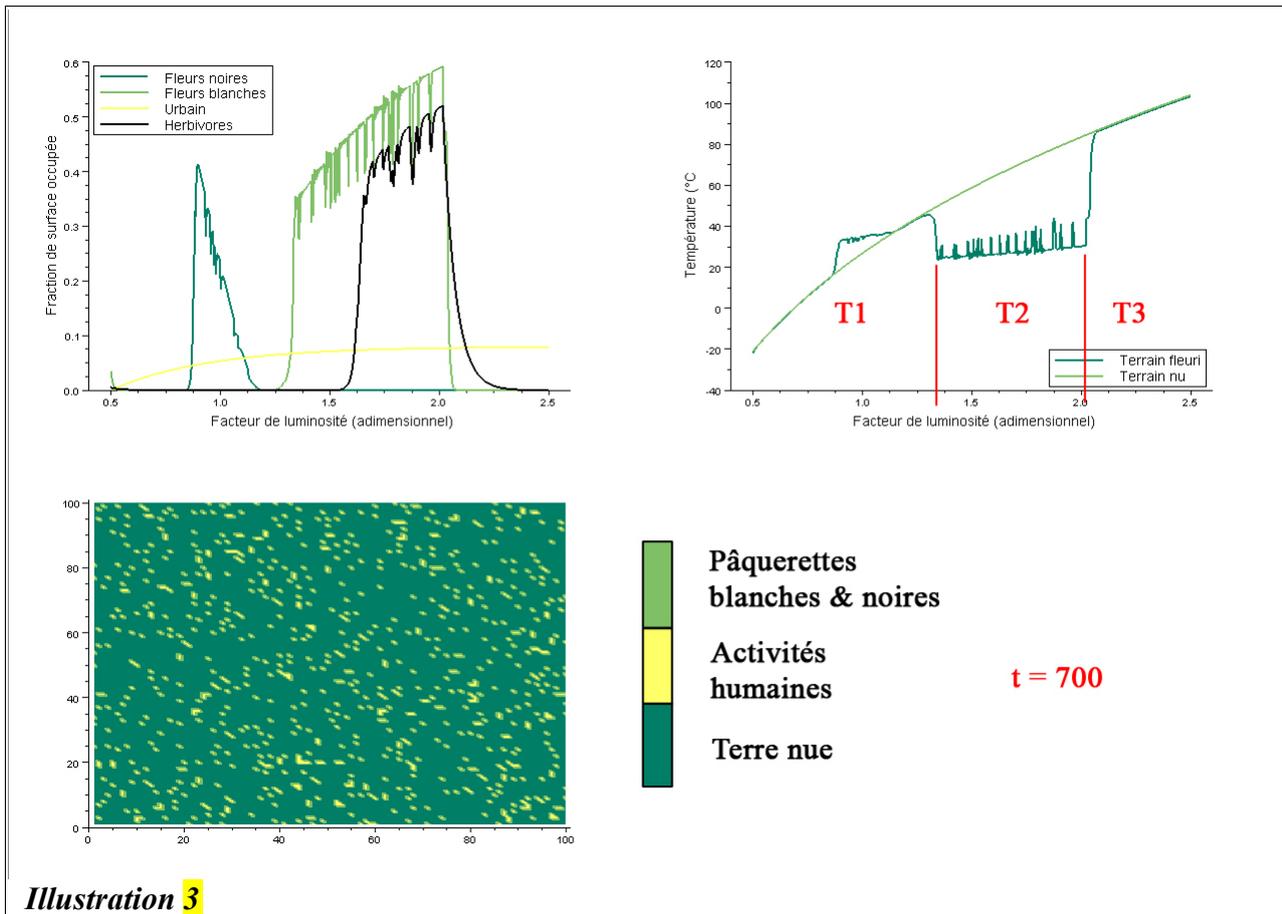
**Pâquerettes
blanches & noires**
**Activités
humaines**
Terre nue

t = 200



**Pâquerettes
blanches & noires**
**Activités
humaines**
Terre nue

t = 400



Conclusion.

On relèvera trois tendances remarquables :

T1. La température est d'abord exclusivement déterminée par l'augmentation du flux lumineux incident. Lorsque $T = T_{germination}^{noires}$ les premières pâquerettes noires apparaissent et participent à la hausse des températures, installant progressivement un climat propice au développement des pâquerettes blanches, avant de flétrir dès que $T = T_{mort}^{noires}$ (cf. graphique de gauche).

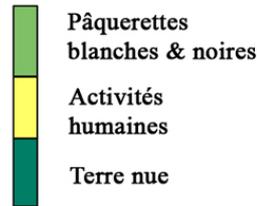
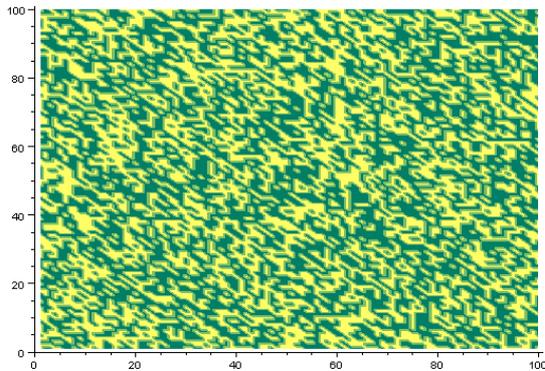
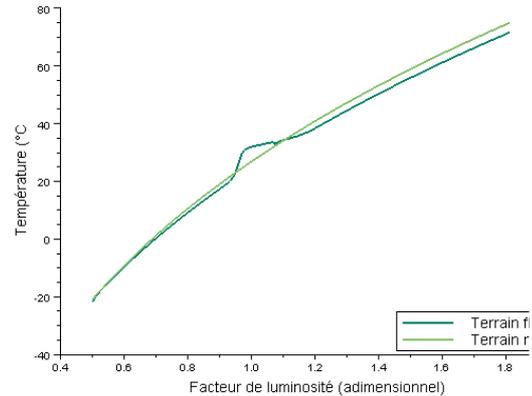
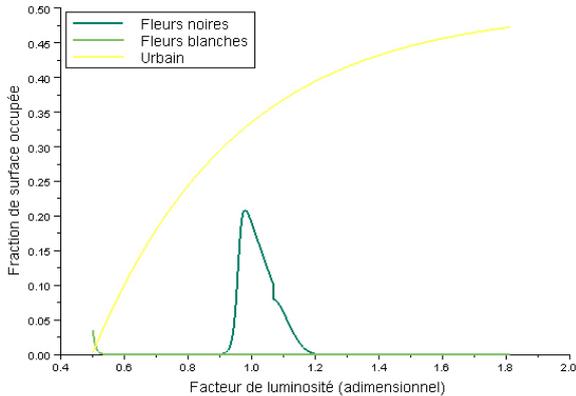
T2. Période d'homéostasie, les deux populations suivent dans une dynamique qui maintient une température moyenne relativement constante, alors que l'influx lumineux poursuit sa hausse. Les pics périodiques sont dus aux éliminations artificielles infligées ($t_2 \approx 1,2$).

T3. Au-delà d'une température seuil, le système n'est plus résilient, toutes les populations se sont éteintes (cf. graphique de gauche) et la température croît pour être à nouveau exclusivement déterminée par la hausse du flux lumineux incident (courbe vert clair).

Variations sur le paramètre d'urbanisation

Pour la courbe témoin, cf. la figure juste au-dessus ($p_{max}=0,08$)
 Pour la signification du paramètre, cf. code

Ici, $p_{max}=0,2$; les autres paramètres sont standards.

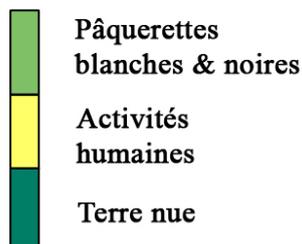
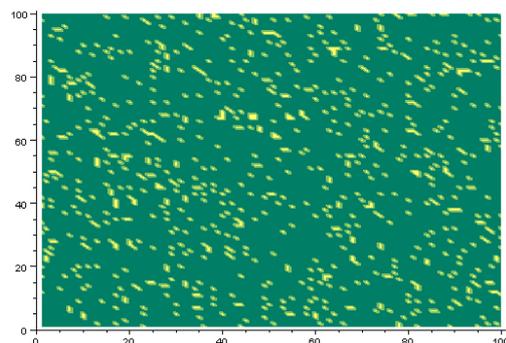
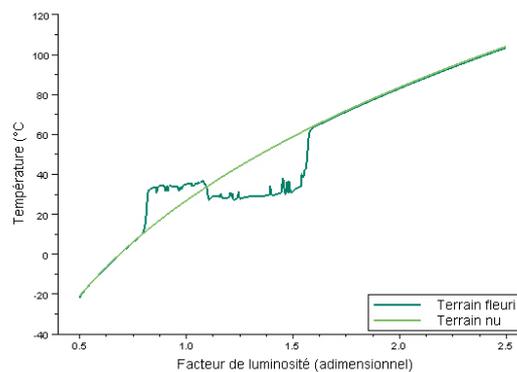
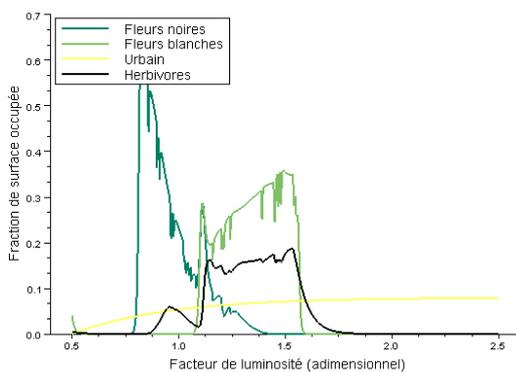


Conclusion. Lorsque la surface urbanisée dépasse les 20%, la régulation n'a pas lieu. ($t_2=0$)

Variations sur le paramètre "herbivores"

Pour la courbe témoin, cf. la figure 3 ($TauxConso_H=0.01$)

Ici, $TauxConso_H=0.01$, les autres paramètres sont standards.

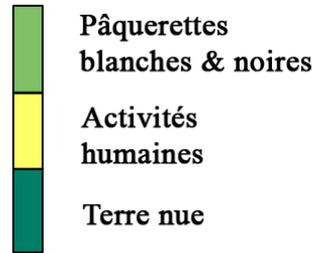
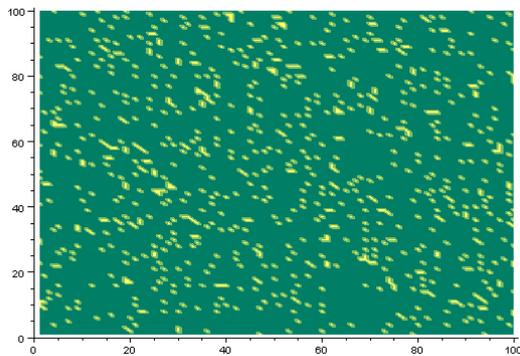
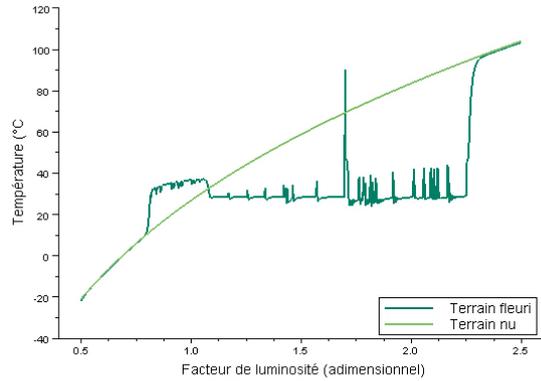
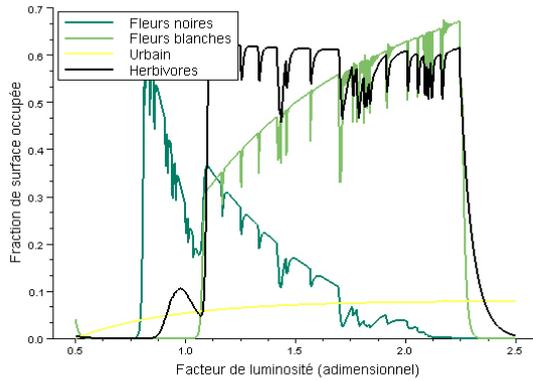


Ccl. Réduction sensible de la période T2. La présence d'herbivores défavorise l'auto-régulation climatique.

Variations sur le paramètre "émissions de CO2 d'origine anthropique"

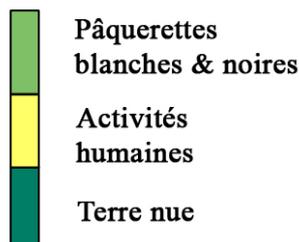
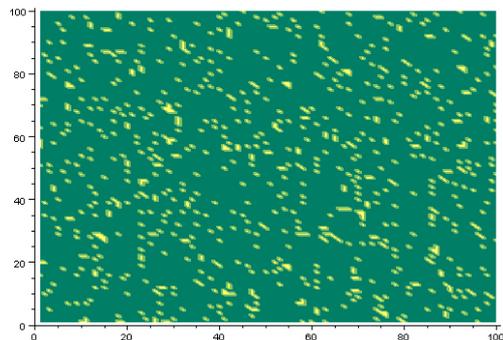
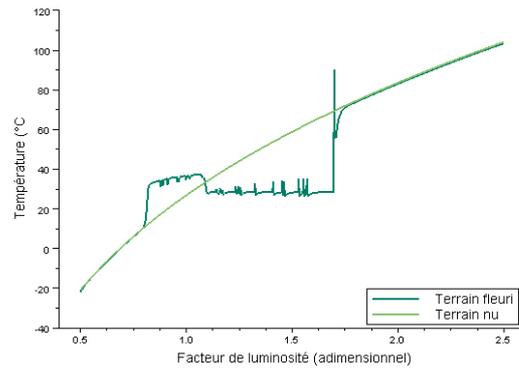
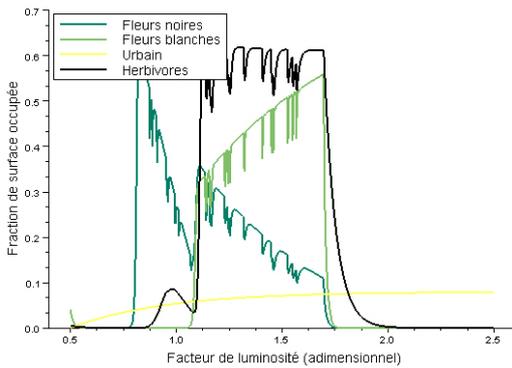
Pour la courbe témoin, cf. la figure 3 (N_ToursHommes=0)

N_ToursHommes=1, les autres paramètres sont standards :



Ccl. Un cycle d'émissions laisse le système résilient. L'auto-régulation se poursuit.

N_ToursHommes=3, les autres paramètres sont standards :



Ccl. Au-delà de trois cycles, le système n'est plus résilient. Perte de la stabilité en T2.

last.sci

```
function []=last()
// Fonction principale

// Code-couleur :
// 0 : Terrain nu
// 1 : Fleurs noires
// 2 : Fleurs blanches
// 3 : Activités humaines

///// Définition de la surface terrestre
m=100; n=100; // Dimensions de la matrice
MAP=1*zeros(m,n); // Matrice-terrain
Limt=700; // Limite de temps : chaque tour correspond à une période de
1.5 millions d'années.
albedo_0=0.5; // Albedo spécifique au sol nu
albedo_1=0.25; // Albedo spécifique aux pâquerettes noires
albedo_2=0.90; // Albedo spécifique aux pâquerettes blanches
albedo_3=0.54; // Albedo spécifique aux couvertures urbaines (activités
anthropiques)
Tgerm=[-4,20,0]; // Températures de germination : [pâquerettes noires,
pâquerettes noires, herbivores]
Tmort=[40,50,45]; // Températures de flétrissement des espèces noires et
blanches, respectivement.
N=0; // Nombre d'éléments de couche atmosphérique CF.
"effet_de_serre.sci" pour la signification de la variable.

///// Paramètres écologiques
// Pâquerettes
N1=500; // Nombre de pâquerettes noires
N2=500; // Nombre de pâquerettes blanches
p_1=N1/(m*n); // Probabilité (percolation) qu'un élément de la matrice
soit occupé par une pâquerette blanche
p_2=N2/(m*n); // Probabilité (percolation) qu'un élément de la matrice
soit occupé par une pâquerette blanche
p_0=1-p_1-p_2; // Probabilité (percolation) qu'un élément de la matrice
reste nu
p0=(p_1+p_2)/4; // Probabilité initiale pour un élément de matrice d'être
"urbanisé"
pmax=0.08; // Probabilité d'urbanisation maximale
TauxMort_Ini=0.2; // Taux de mortalité initial (commun aux deux espèces)
TauxMort_Max=0.4; // Taux de mortalité maximal
t_ext=ceil(50*rand()+30); // Période des extinctions partielles des
populations de pâquerettes
TExt=60; // Période d'extinction : plus T est petit, plus la fréquence
des extinctions est grande.
// Herbivores
Nherbi=50; // Quantité initiale d'herbivores
Fh=Nherbi/(m*n); // Fraction occupée par les herbivores (INDEPENDANTE des
autres fractions, on suppose les herbivores placés au-dessus des fleurs).
// La fraction "Herbivores" est comme superposée aux fractions "Terre
Nue" et "Pâquerettes". On ne tient pas compte de l'albedo des herbivores.
TauxConso_H=0.01; // Taux de consommation des pâquerettes
TauxMortH=0.05; // Taux de mortalité de l'espèce herbivore
deff('y=TauxCroisH_Fr(F1,F2)', 'y=exp(F1+F2)-1'); // Composante de la
```

```

fonction "Taux de croissance" des herbivores, dépendante de la fraction
en pâquerettes.
    // Hommes
N_ToursHommes=3; // Nombre de tours pendant lesquels on constate une
activité humaine émettrice de gaz à effet de serre
deff('y=pcol(t)', 'y=pmax*(1-(1-p0)^(t/4))'); // Fonction logistique qui
détermine la probabilité de colonisation humaine. Fonction croissance du
temps, atteint un maximum pmax

///// Paramètres graphiques
Tcine=50; // Période temporelle de rafraîchissement des graphes

///// Distribution des différentes facettes (pâquerettes, terre nue...)
MAP=distribution(MAP,m,n,p_0,p_1,p_2);

///// Paramètres énergétiques
FluxSolaire=917; // Flux solaire, constant, exprimé en W.m^-2
FacteurLum=linspace(0.5,2.5,Limt); // Facteur de luminosité, varie comme
une fonction croissante de l'âge du Soleil
deff('y=Erecue(x)', 'y=x*FluxSolaire'); // où x=FacteurLum
deff('y=Ereflechie(x)', 'y=Erecue*x'); // où x=taux_albedo
Erecue=FacteurLum(1)*FluxSolaire; // Energie lumineuse reçue par le
terrain
Ereflechie=Erecue*albedo_1; // Energie lumineuse réfléchie par albedo
Eabsorbee=Erecue-Ereflechie; // Energie lumineuse absorbée par les
pâquerettes à petit albedo (considérées comme des quasi corps noirs, ie.
pour lesquels le rayonnement
// électromagnétique ne dépend que de la température)
deff('y=Eabsorbee(a,b)', 'y=a*FluxSolaire*(1-b)'); // où : a=FacteurLum ;
b=taux_albedo
sigma=5.669*10^-8; // Le calcul de la température fera intervenir la loi
de Stefan-Boltzmann qui donne l'énergie totale
// du rayonnement thermique fourni par les pâquerettes à petit albedo.
Ici, sigma est la constante de Stefan-Boltzmann exprimée en W.m^-2.K^-4

F1=p_1; // Fraction de surface occupée par les pâquerettes noires
F2=p_2; // Fraction de surface occupée par les pâquerettes blanches
FR=[]; // Vecteur qui concatène les fractions noires à chaque tour de
boucle
FR2=[]; // Vecteur qui concatène les fractions blanches à chaque tour de
boucle
FR3=[]; // Vecteur qui concatène les fractions blanches à chaque tour de
boucle
FR4=[]; // Vecteur qui concatène les températures à chaque tour de
boucle, en présence des pâquerettes
SF=[]; // Vecteur qui concatène les températures à chaque tour de boucle,
en l'absence de toute pâquerette
FH=[]; // Vecteur qui concatène les fractions d'herbivores, à chaque tour
de boucle

for t=1:Limt

    p=pcol(t); // p correspond aussi à la fraction de terrain occupé par
les activités anthropiques (impropres au développement des fleurs)
    Erecue=FacteurLum(t)*FluxSolaire;
    Fnu=1-F1-F2-p; // Fraction de terrain nu

```

```

// Calcul de l'albedo total du terrain, fonction linéaire des albédos
des éléments et de leur proportion
Atot=Fnu*albedo_0+F1*albedo_1+F2*albedo_2+p*albedo_3;

// Calcul de la température selon la loi de Stefan-Boltzmann
T=-273+(Erecue*((1-Atot)/sigma))^(1/4);

//// En cas de fort dégagement anthropique de CO2
if N_ToursHommes~0 & round(Limt*60/100)<=t &
(round(Limt*60/100)+N_ToursHommes-1)>=t
[T,N]=effet_de_serre(T,N);
disp('là')
end

// Calcul des paramètres de renouvellement des populations de
pâquerettes
a=1;
taux=taux_croissance(a,T,Tmort,Tgerm) // Calcul du taux de croissance
de l'espèce noire, fonction de la température locale
a1=taux;
a=2;
taux=taux_croissance(a,T,Tmort,Tgerm) // Calcul du taux de croissance
de l'espèce blanche, fonction de la température locale
a2=taux;

// Calcul des paramètres de destruction des populations de pâquerettes
TauxMort_P=TauxMort_Ini;
if modulo(t,ceil(TExt*rand()))==0
// Extinctions périodiques et partielles des pâquerettes (on joue sur
le taux de mortalité, fonction logistique)
TauxMort_P=TauxMort_Max*(1-(1-TauxMort_Ini)^t);
end

// Dynamique des populations : modèle de Verhulst en temps discret
(plutôt que d'utiliser une équation différentielle, on utilise une suite)
// Nouvelle_fraction = Ancienne_fraction + DELTA_fraction
// où : DELTA_fraction = Ancienne_fraction *
( DELTA_fraction_développée_sur_terrain_libre - Fraction_morte )
F1=F1+F1*(a1*Fnu-TauxMort_P-TauxConso_H*Fh); // Population noire
F2=F2+F2*(a2*Fnu-TauxMort_P-TauxConso_H*Fh); // Population blanche
Fnu=1-F1-F2;

// Dynamique de la population herbivore
a=3;
TauxCroisH_1=taux_croissance(a,T,Tmort,Tgerm); // Composante du taux de
croissance dépendant de la température
TauxCroisH=TauxCroisH_1*TauxCroisH_Fr(F1,F2); // Composante dépendant
de la fraction en nourriture
Fh=Fh+Fh*(TauxCroisH*(1-Fh-Fnu)-TauxMortH); // Evolution de la
population, modèle de Verhulst en temps discret
// Fh_nouvelle = Fh_ancienne * Fh_ancienne ( TauxCroissance * Fraction
de nourriture - TauxMortalite)
// On considère en effet le renouvellement des populations comme

```

```

directement dépendant de la proportion en nourriture.
// Concaténation des vecteurs (intérêt graphique)
FR=[FR,F1];
FR2=[FR2,F2];
FR3=[FR3,T];
FR4=[FR4,p];
FH=[FH,Fh];
SF=[SF,(Erecue*((1-albedo_0)/sigma))^(1/4)-273];

// Dessin des graphes tous les t-multiples de Tcine
if modulo(t,Tcine)==0

    subplot(221)
    plot2d(FacteurLum(1:t),FR,style=1);
    e1=gce();
    e1.children.thickness=2;
    h1=e1.children
    plot2d(FacteurLum(1:t),FR2,style=2);
    e2=gce();
    e2.children.thickness=2;
    h2=e2.children
    plot2d(FacteurLum(1:t),FR4,style=3);
    e3=gce();
    e3.children.thickness=2;
    h3=e3.children;

    plot2d(FacteurLum(1:t),FH,style=4);
    e4=gce();
    e4.children.thickness=2;
    h4=e4.children;

    c1=captions([h1,h2,h3,h4],['Fleurs noires';'Fleurs
blanches';'Urbain';'Herbivores'],'in_upper_left');
    c1.font_size=3;
    a1=gca();
    a1.x_label.text="Facteur de luminosité (adimensionnel)";
    a1.x_label.font_size=3;
    a1.y_label.text="Fraction de surface occupée";
    a1.y_label.font_size=3;

    subplot(222)
    plot2d(FacteurLum(1:t),FR3,style=1);
    e4=gce();
    e4.children.thickness=2;
    h4=e4.children;
    plot2d(FacteurLum(1:t),SF,style=2);
    e5=gce();
    e5.children.thickness=2;
    h5=e5.children;
    c2=captions([h4,h5],['Terrain fleuri','Terrain
nu'],'in_lower_right');
    a2=gca();
    a2.x_label.text="Facteur de luminosité (adimensionnel)";
    a2.x_label.font_size=3;
    a2.y_label.text="Température (°C)";

```

```

    a2.y_label.font_size=3;
    c2.font_size=3;
end

// Représentation du terrain effectuée tous les t-multiples de Tcine
if modulo(t,Tcine)==0
    subplot(223)
    MAP=perco(F1,F2,p,MAP,m,n);
    xset("colormap",summercolormap(3));
    Sgrayplot(1:m,1:n,MAP,rect=[0,0,m+1,n+1]);
end

end

endfunction

```

effet_de_serre.sci

```

function [T,N]=effet_de_serre(T,N)
// Fonction qui, à chaque variable , renvoie

// Le modèle Daisyworld standard qu'on a envisagé exclue toute
implication de phénomènes météorologiques et atmosphériques.
// Ici, pour évaluer l'influence d'une émission anthropique de gaz à
effet de serre, on se place nécessairement dans un modèle
// d'atmosphère, volontairement très simplifié. On considère pour cela
l'atmosphère comme une succession concentrique de couches sphériques
// d'épaisseur "infinitésimale" dz.
// Vu l'épaisseur moyenne de l'atmosphère (800 km) on prendra pour
cette étude dz=1 km. L'atmosphère standard comporte une masse de 750 Gt
de
// CO2, gaz à effet de serre ici exclusivement pris en compte.
// On suppose une densité particulière en CO2 homogène à travers toute
l'épaisseur d'atmosphère, d'où l'hypothèse que toute variation
// de l'apport en CO2 interviendra exclusivement sur l'épaisseur totale
de l'atmosphère, via l'addition d'éléments de couche supplémentaires.
// En considérant une émission anthropique nette de l'ordre de 0.1
Gt(CO2)/an,
// Par règle de trois, l'émission de CO2 contribue à épaissir
l'atmosphère de : 1 km chaque année.
// Sur une période de temps de 1.5 millions d'années, certes excessive
vis à vis de la réalité, mais valable pour ce modèle,
// l'atmosphère se voit épaissie, donc, (en considérant les dégagements
sur 1500 ans) de 100 éléments de couche de gaz à effet de serre.

// Dans le modèle absorption/ré-émission infrarouge des molécules de
CO2, on interprète les directions aléatoires du rayonnement
// ré-émis comme orientées soit vers l'espace (à proportion de 50%)
soit vers la surface terrestre (à proportion de 50%).
// Pour une atmosphère à UNE couche, la puissance rayonnée au final par
la surface terrestre sera donc le double de celle
// rayonnée en l'absence d'atmosphère (puisqu'on y adjoint les 50% de
ré-émission par la couche atmosphérique de l'énergie solaire).

```

```

// La puissance du rayonnement terrestre est, comme précédemment, donné
par la formule de Stefan-Boltzman : P=sigma*T^4
// Avec sigma, constante de Stefan-Boltzman = 5.67*10^-8 J.s-1.m2.K4

// Puissance du rayonnement sans atmosphère (surface terrestre à
température T(0) : P=s*T(0)^4
// Puissance - - avec atmosphère à N couches (surface terrestre à
température T(t) : P=(N+1)*s*T(t)^4
// En effet, chaque couche additionnée somme le facteur de puissance
d'une unité (il s'agit d'une récurrence sur N,
// qu'on vérifie avec la condition initiale vue précédemment).
// Par simplification, T(t)=(N+1)^(1/4)*T(0)
// De même, avec une atmosphère à (N+n) couches, après un tour de
boucle (t) : T(t+1)=(N+n+1)^(1/4)*T(0)

// D'où : T(t+1)=(1+n/(N+1))^(1/4)*T(t)

T=(1+100/(N+1))^(1/4)*T
N=N+100;

endfunction

```

distribution.sci

```

function [MAP]=distribution(MAP,m,n,p_0,p_1,p_2)
// Distribution des différentes surfaces par la méthode de percolation
théorique.
// On détermine par voie probabiliste la valeur attribuée à chaque case
matricielle.
// Au niveau de la matrice globale, il y aura approximativement
équivalence entre le nombre de cases
// de valeur i (où i=1 ie. correspond à "pâquerette blanche", par
exemple) et la probabilité (= fraction de surface) correspondant.
for i=1:m
  for j=1:n
    A=rand();
    if A>0 & A<p_0
      MAP(i,j)=0;
    elseif A>p_0 & A<p_1+p_0
      MAP(i,j)=1;
    elseif A>p_0+p_1 & A<1
      MAP(i,j)=2;
    end
  end
end
end

endfunction

```

taux_croissance.sci

```
function [taux]=taux_croissance(a,T,Tmort,Tgerm)

taux=0;
if T<=Tmort(a) & T>=Tgerm(a) // Si la température est comprise entre les
limites de survie de l'espèce
    taux=-4/(Tmort(a)-Tgerm(a))^2*(T-Tgerm(a))*(T-Tmort(a)) // Alors on
détermine le taux de croissance, fonction parabole de la température,
avec pour
    // racines, la température de germination et celle de déshydratation.
else
    taux=0; // Si la température dépasse les capacités de résistance de
l'espèce, le taux de croissance est nul.
end

endfunction
```