

Statistical mechanics as a tool to understand the role of energy in the economy

Henri Benisty & Hervé Bercegol

IOGS/Lab Charles Fabry (Palaiseau) & CEA SPEC (Gif)

Why is economic growth so popular?

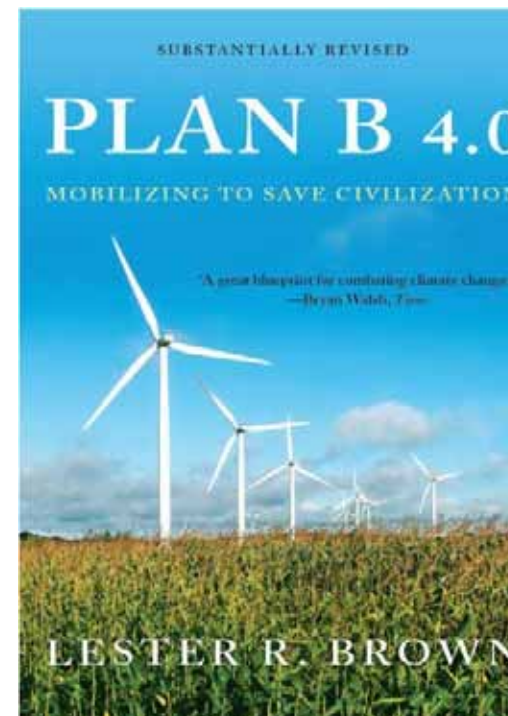
5



by [Ugo Bardi](#), originally published by [Cassandra's legacy](#) | NOV 26, 2011



When the new Italian Prime Minister, [Mr. Mario Monti](#), gave his [acceptance speech](#) to the Senate, a few days ago, he used 28 times the term "growth" and not even once terms such as "natural resources" or "energy". He is not alone in neglecting the physical basis of the world's economy: the chorus of economic pundits everywhere in the world is all revolving around this magic word, "growth". But why? What is that makes this single parameter so special and so beloved?



Lester R. Brown

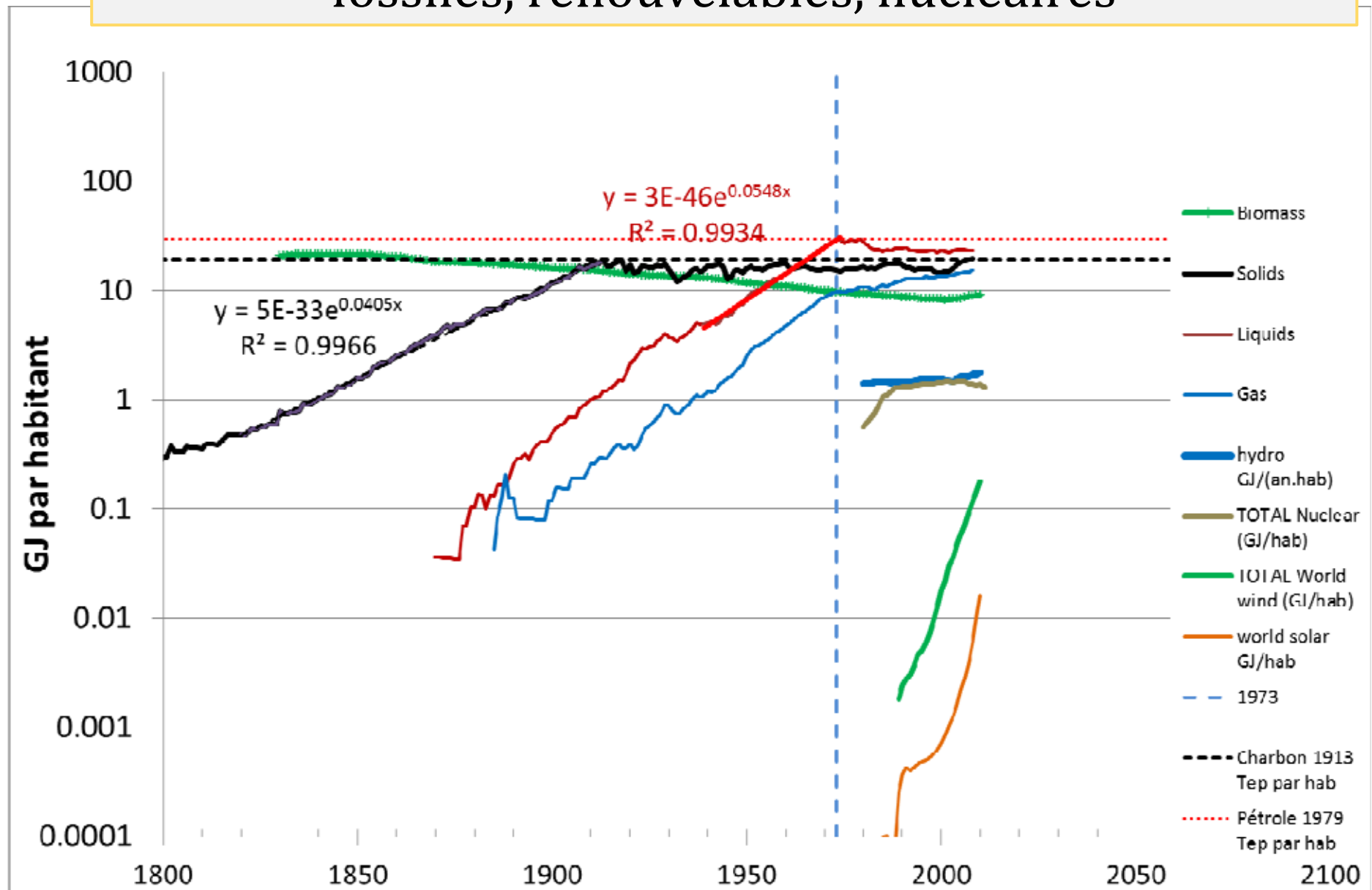
BASCULEMENT
BASCULE

***I – Population, énergie, économie
(Hervé Bercegol)***

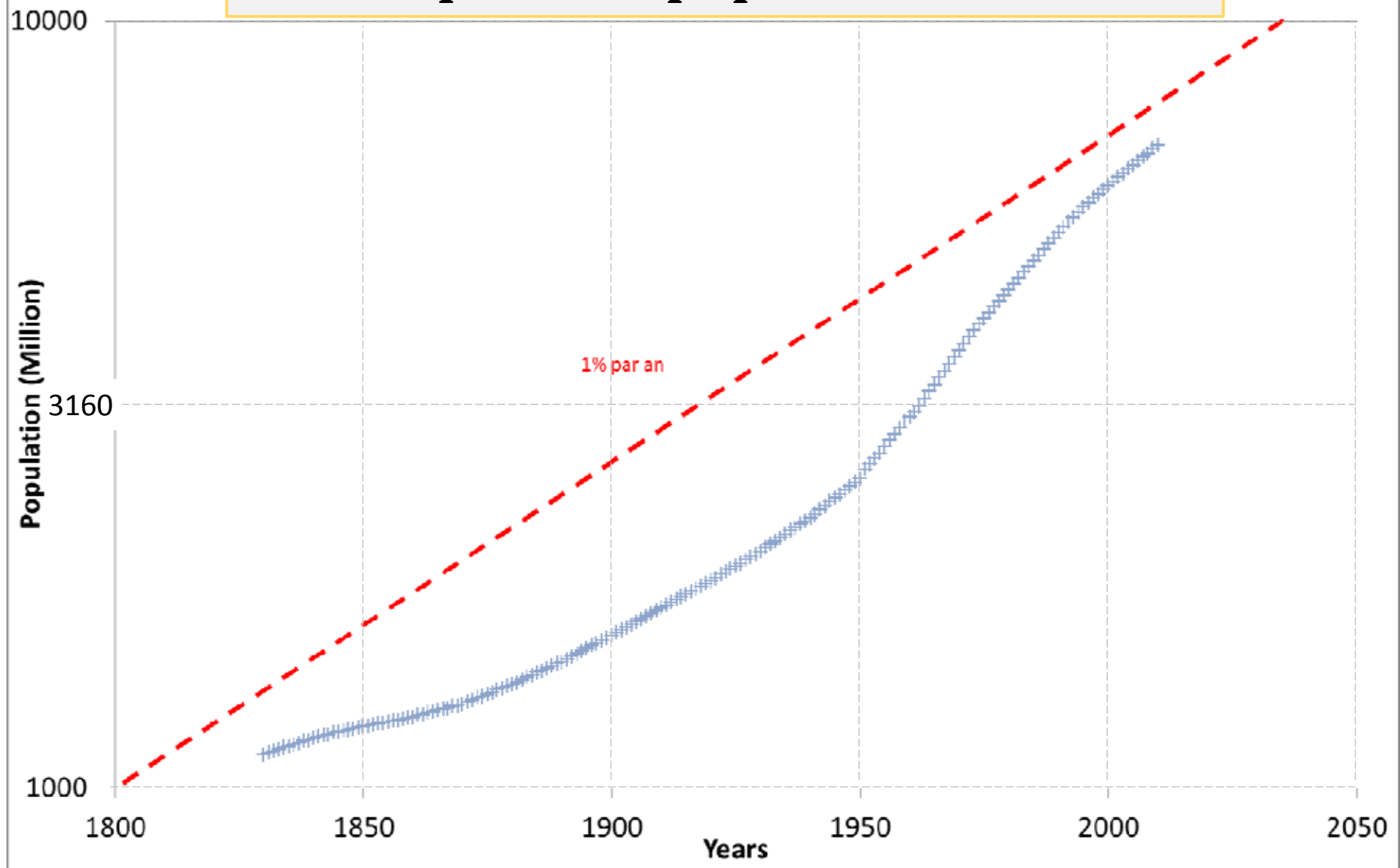
***II - Dynamiques inégalitaires des modèles multi-agents :
Apprendre à lier "ressources minières" et "énergie" ?
(Henri Benisty)***

***I – Population, énergie, économie
(Hervé Bercegol)***

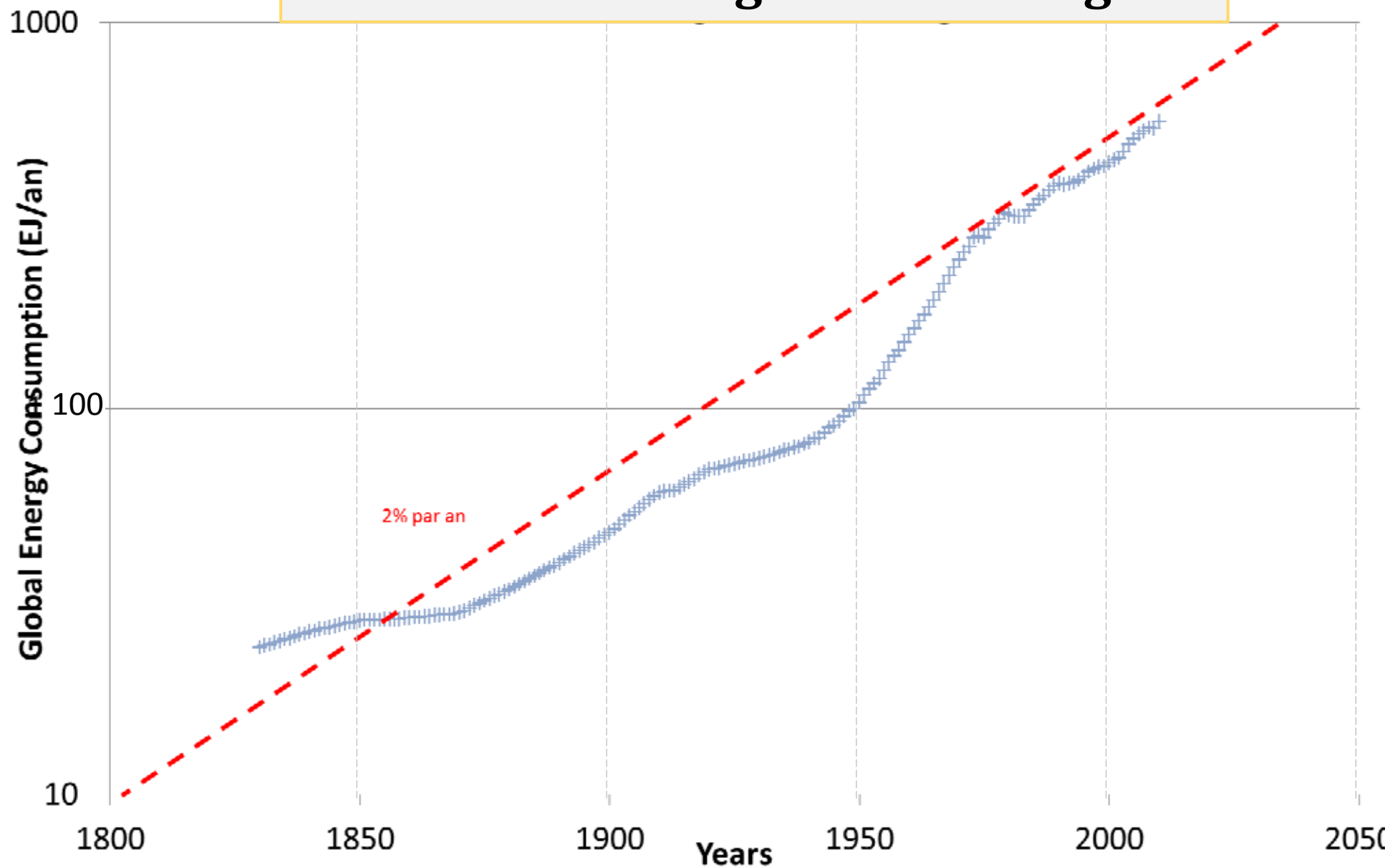
Comparaison des différentes sources d'énergie: fossiles, renouvelables, nucléaires



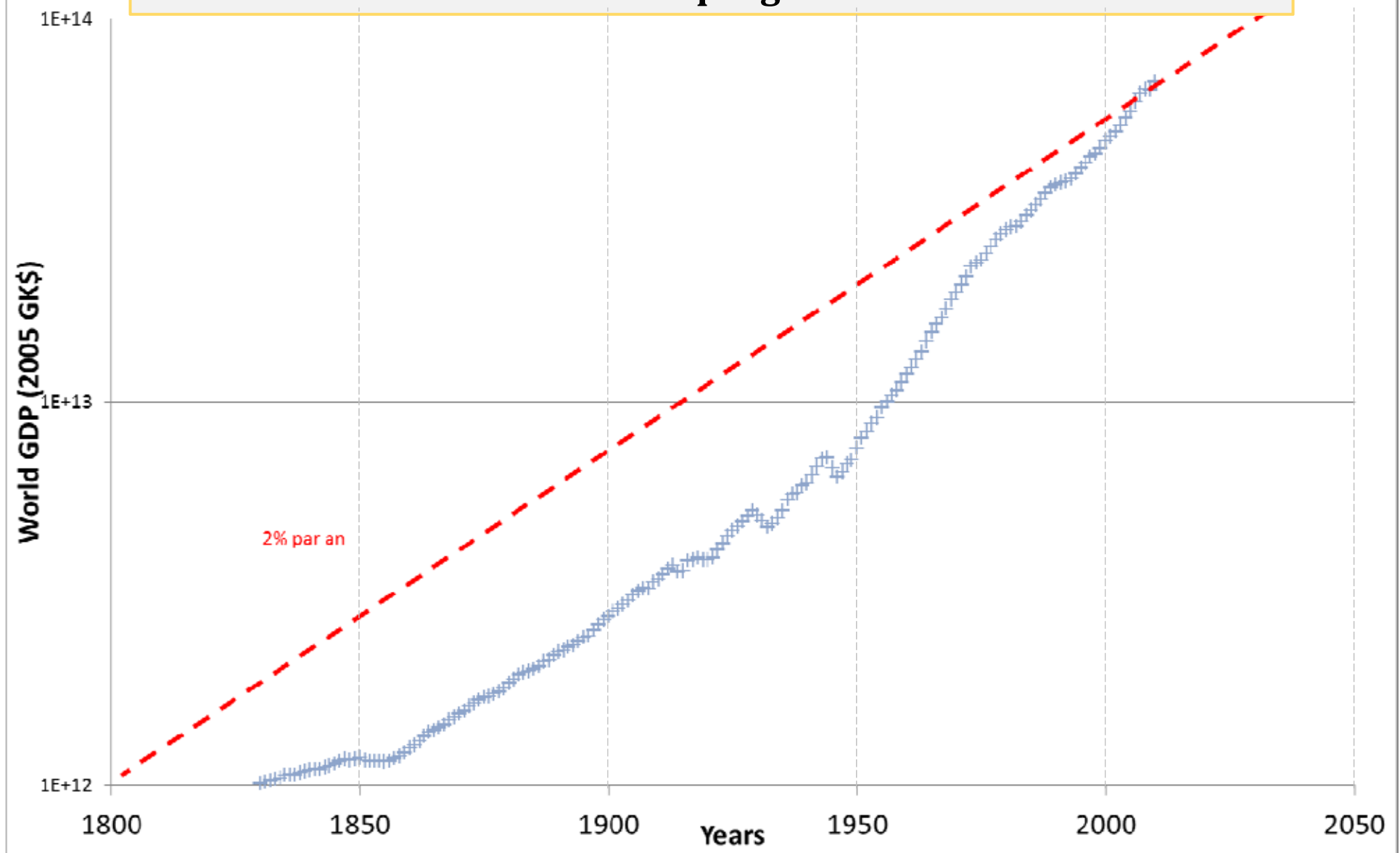
Historique de la population mondiale



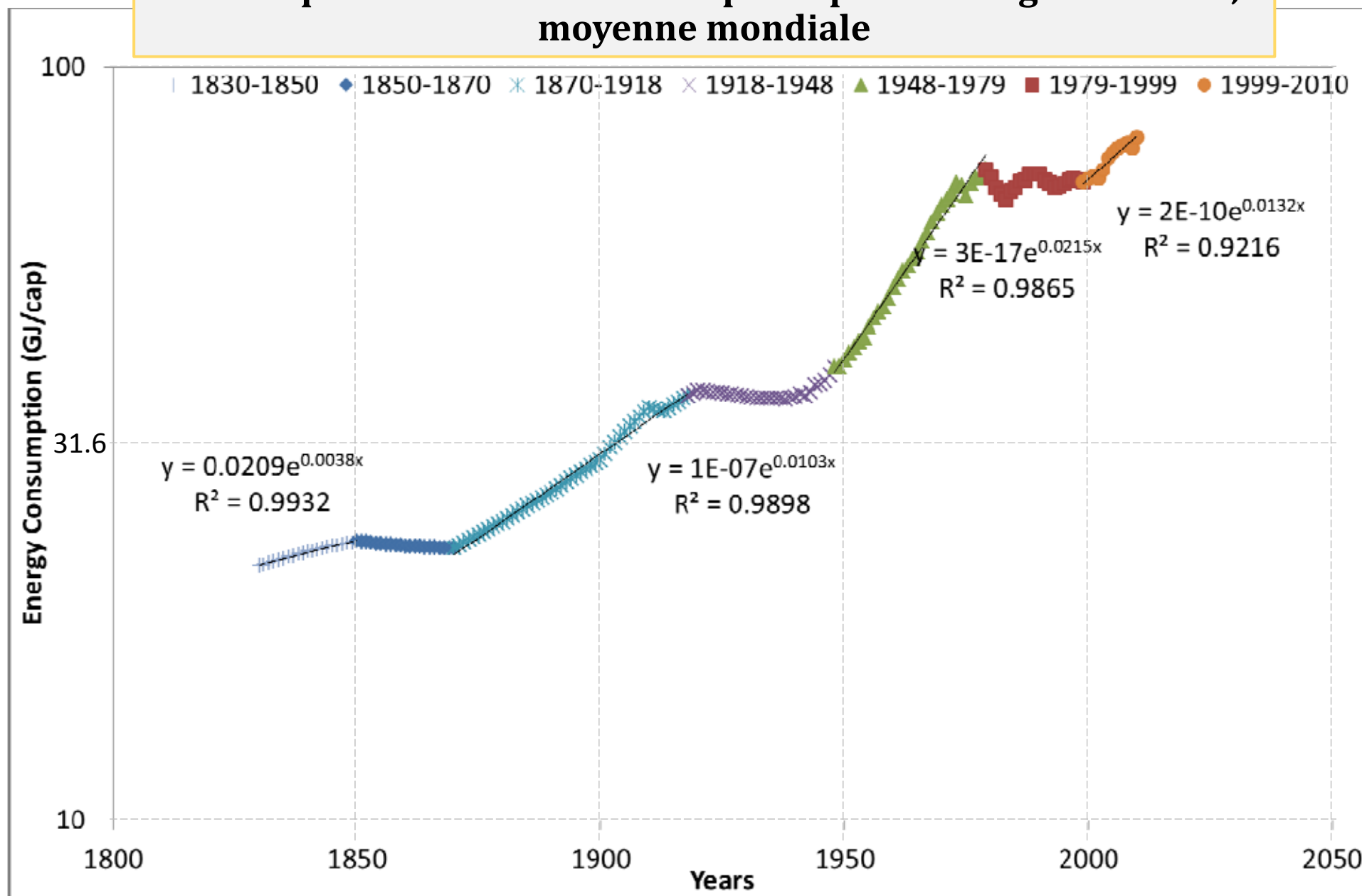
Consommation globale d'énergie



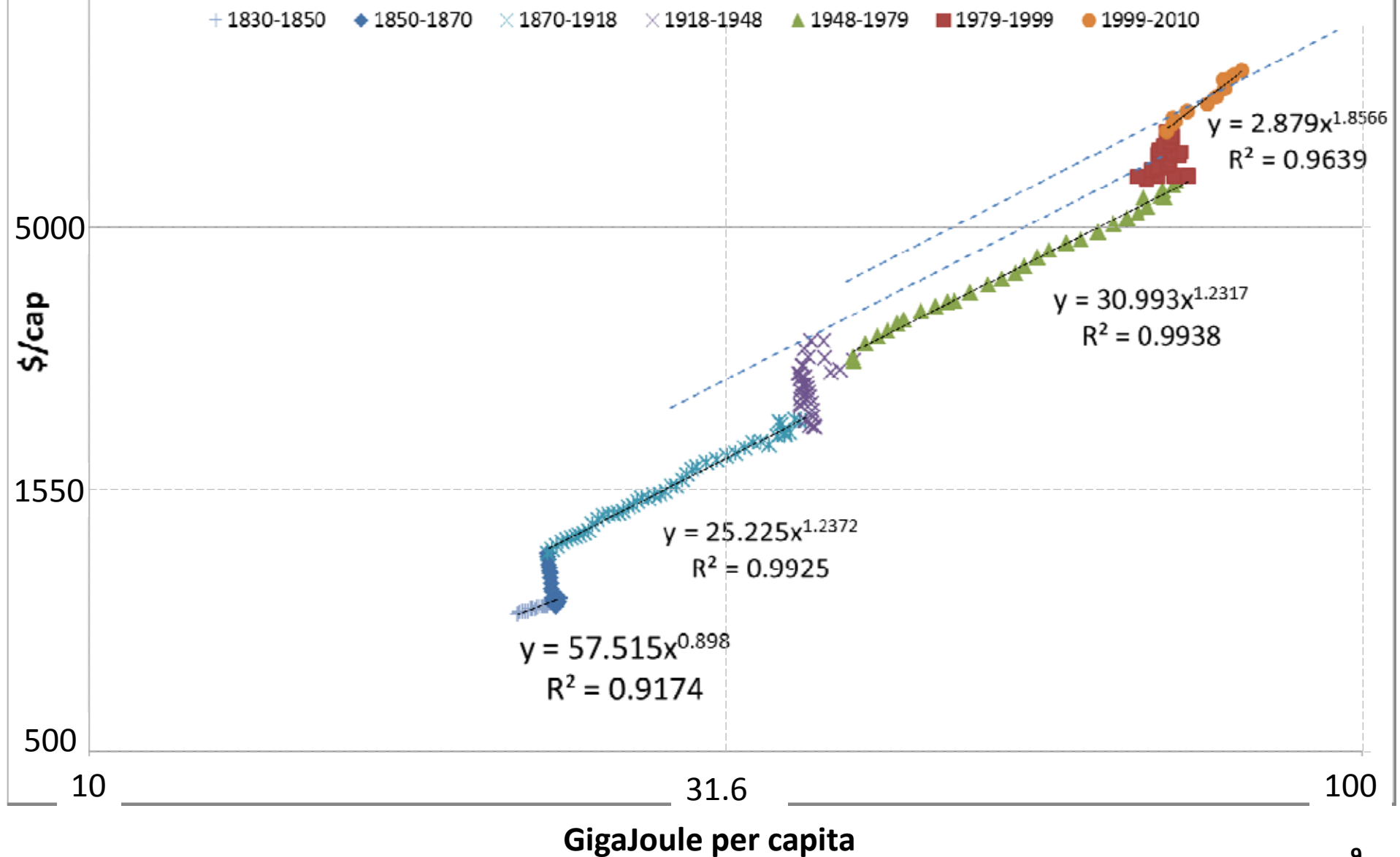
Historique de la production (i.e. des échanges) économique globale



Historique de la consommation per capita d'énergie annuelle, moyenne mondiale



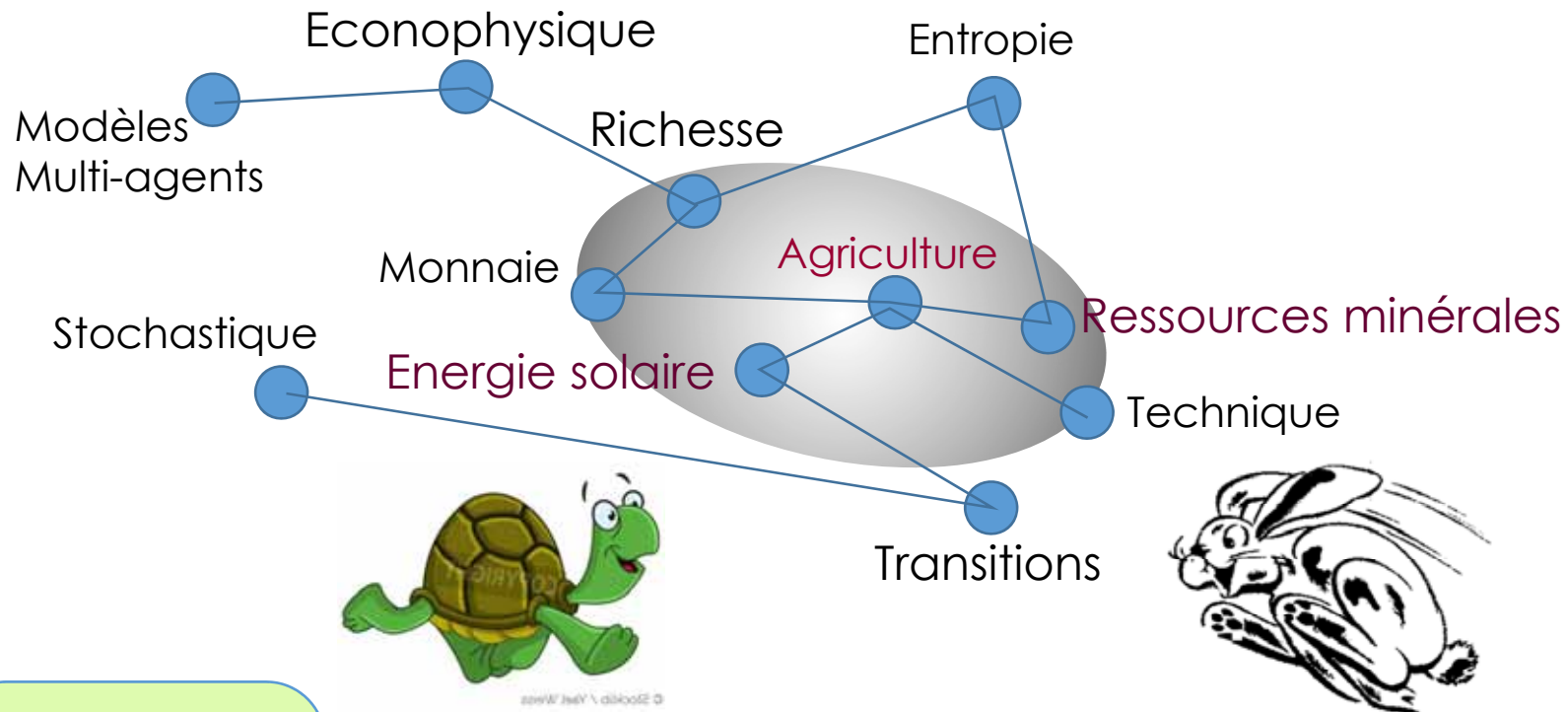
Revenu annuel moyen *per capita* vs. Énergie consommée annuellement *per capita*



II - Dynamiques inégalitaires des modèles multi-agents : Apprendre à lier "ressources minières" et "énergie" ?

Henri Benisty & Hervé Bercegol

IOGS/Lab Charles Fabry (Palaiseau) & CEA SPEC (Gif)



Remerciements à

C. Goupil
L. Valentin
M. Arnoux
P. Chatzimpiros
B. Dubrulle
F. Graner
R. Lehoucq

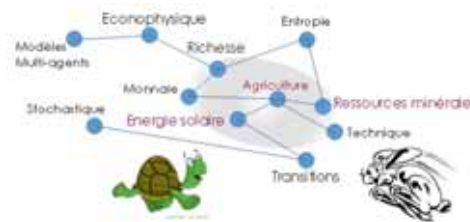
Agents , Société

Energie / biens

Essais « vidéo »

Dynamiques inégalitaires des modèles multi-agents : Y-a-t-il un lièvre "ressources minières" et une tortue "énergie" ?

0 ■ Motivations



Liens nouveaux ?

1 ■ Agents & sociétés

- Stylisation comme outil (Robert Axtell et al.)

2 ■ Énergie/Produits

- Additif vs. multiplicatif (éconophysiciens)
- Équilibre vs. Hors d'équilibre
- Emergence {richesse, monnaie, technique, inégalités... & ÉnergieS}

3 ■ Efforts de vidéastes amateurs

- Agriculture comme bonification
- Sel et Olives (énergie/ressource minérale)
 - 1 agent, 1D
 - qqs agents, 2D



"ressources minières", "énergie" ... agriculture !

- **Problématique :**

Energie et flux monétaires : quels liens ?

Agriculture = capture énergie solaire

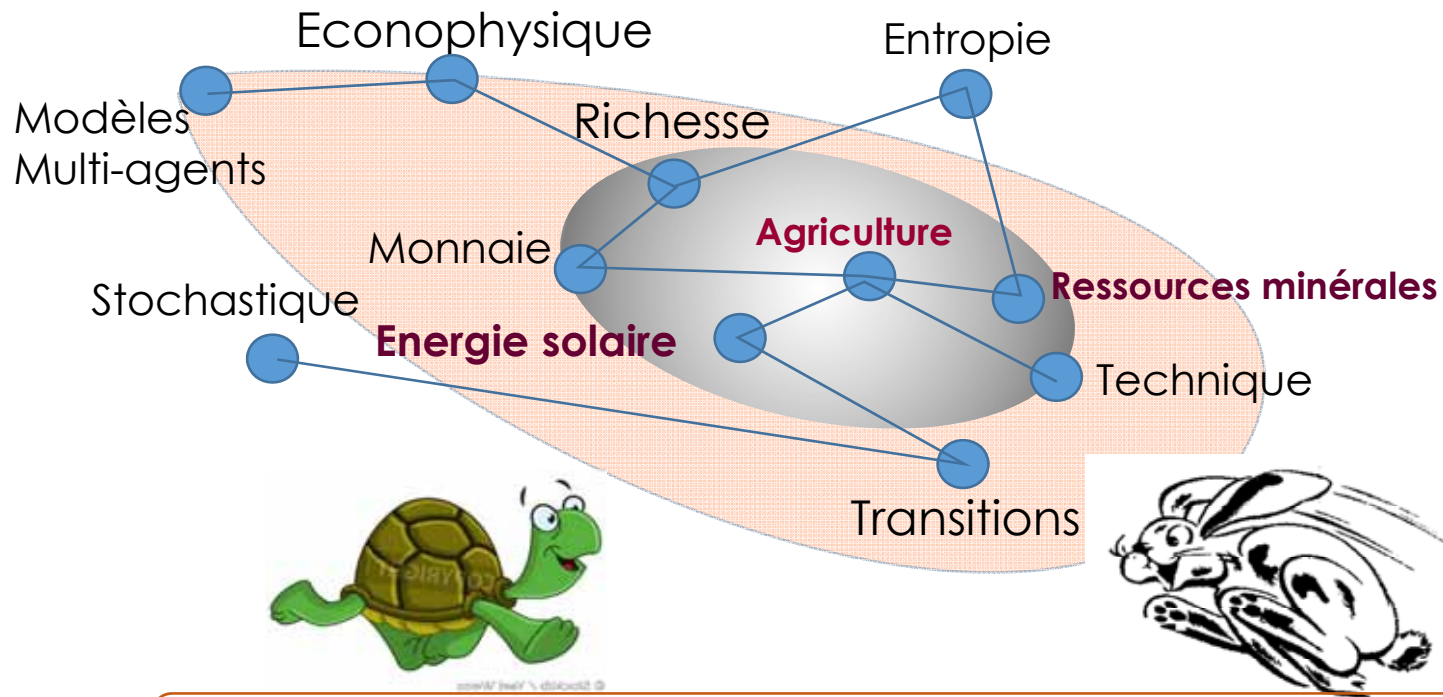
phys
« projections »...
éco

Travail + Apport Minéral+ Energie → stock(s) + flux

Population & Technique ⇄[?] *Richesse Monnaie ...ou pas*

- **plutôt « trop » de liens ...**

Trop de liens → élaguer les idées ?



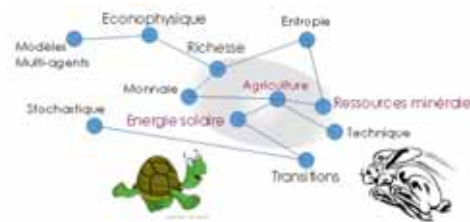
Travail + Apport Minéral+ Energie → stock(s) + flux

Population & Technique ⇄ ? Richeesse
Monnaie ...ou pas

- Aller pêcher les idées par des Simulations/Stylisations

***Dynamiques inégalitaires des modèles multi-agents :
Y-a-t-il un lièvre "ressources minières" et une tortue "énergie" ?***

0 ■ Motivations



Liens nouveaux ?

1 ■ Agents & sociétés

- Stylisation comme outil (Robert Axtell et al.)

2 ■ Énergie/Produits

- Additif vs. multiplicatif (éconophysiciens)
- Équilibre vs. Hors d'équilibre
- Emergence {richesse, monnaie, technique, inégalités... & ÉnergieS}

3 ■ Efforts de vidéaste amateurs

- Agriculture comme bonification
- Sel et Olives (énergie/ressource)
 - 1 agent, 1D
 - qqs agent, 2D



Les travaux autour de Robert L. Axtell /archéologie

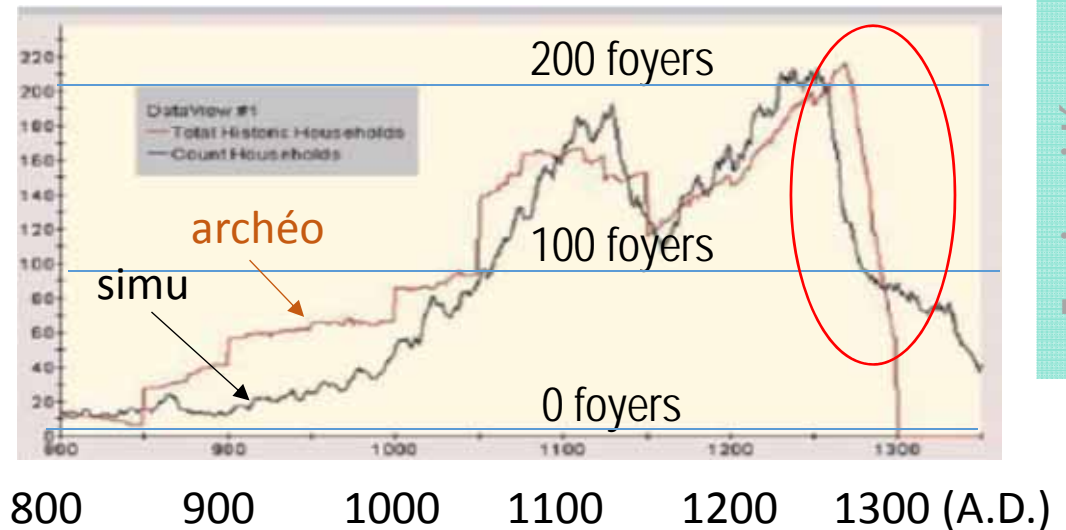
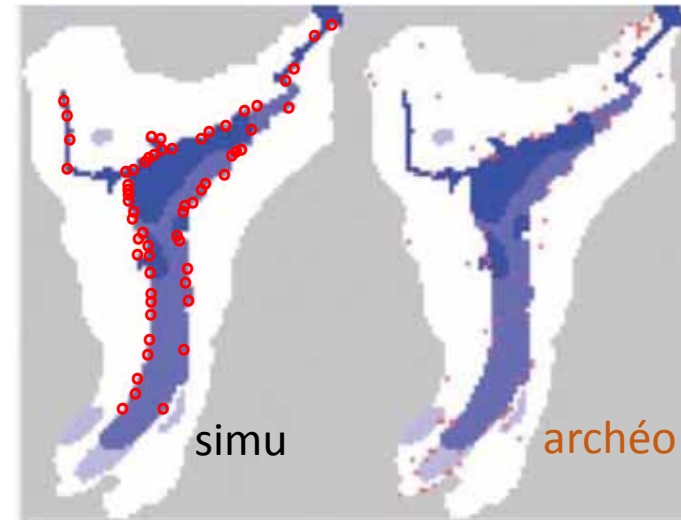
• Anasazi in Long House Valley (PNAS 2002, Axtell et al.)



PNAS May 14, 2002 vol. 99 suppl. 3 7275-7279

Minimum death age	30
Maximum death age	36
Minimum age, end of fertility	30
Maximum age, end of fertility	32
Minimum fission probability	0.125
Maximum fission probability	0.125
Average harvest	0.6
Harvest variance	0.4

Nutritional need per Individual 800 kg

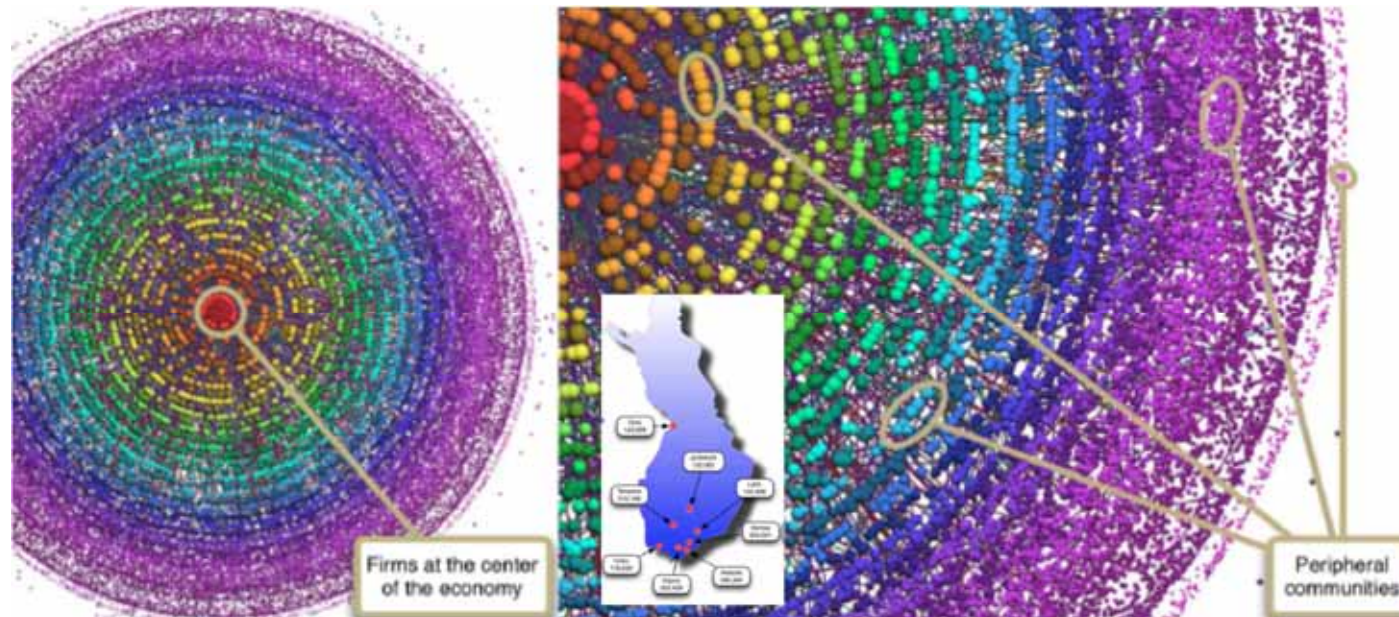


Les travaux autour de Robert L. Axtell / Emplois et firmes (*Finlande, US*)

Employment Growth through Labor Flow Networks

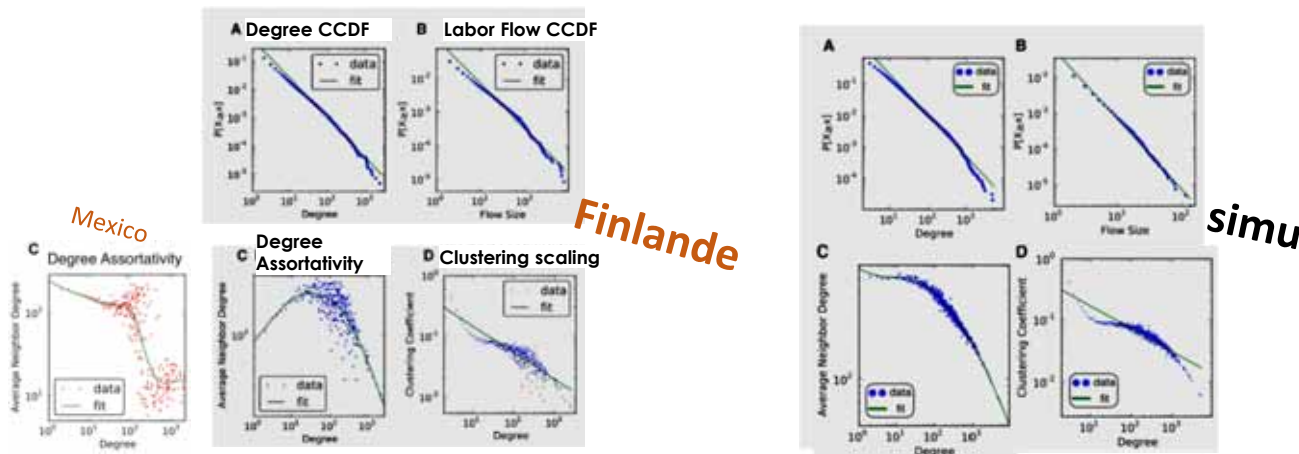
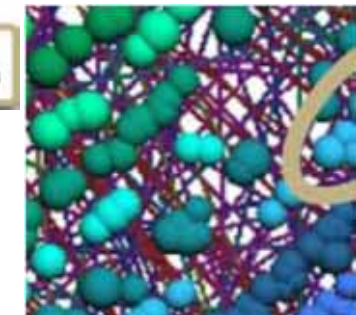
Omar A. Guerrero, Robert L. Axtell

PloS One May 2013 | Volume 8 | Issue 5 | e60808



300 000 firmes

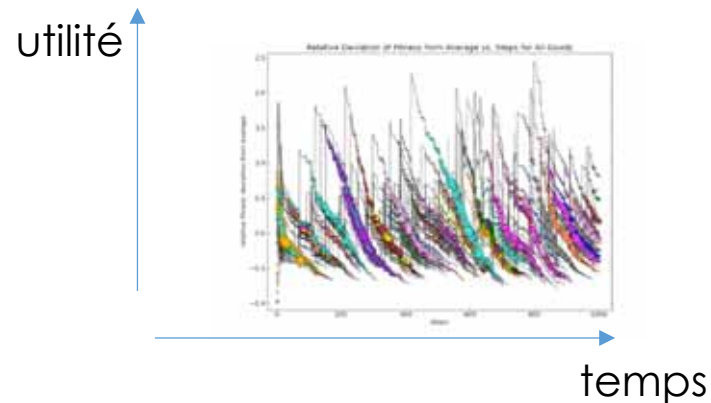
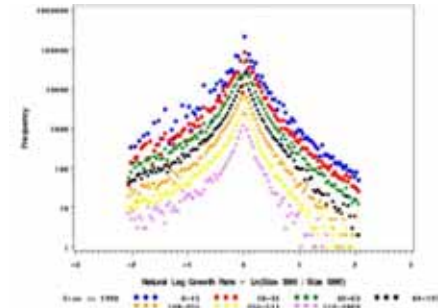
- Les employés changent vers des voisines connues (connection réseau limitée...)
- Les grosses firmes payent plus à l'entrée mais moins après etc.



→ Batteries de distributions significatives
(Compl. Cumul. Distr. Func.)

Les travaux autour de Robert L. Axtell / tendances

- Confirmation de ces tendances sur un modèle "US full" (120M employés, 6M firmes)
- Confirmation de 10 à 20 « stylized facts » (exposants des distributions Pareto/Zipf, ...)
- Avec des règles « simples » → faits « émergents »
- Hors d'équilibre ~~NASH~~
(aspect « universels » de la croissance ...)
- Applicable aux choix politiques/techniques
(incitations en situation complexe, croissance intersectorielle
p ex: choix T départ retraite
- Applicable aux « signaux civilisationnels »
émergences d'innovations

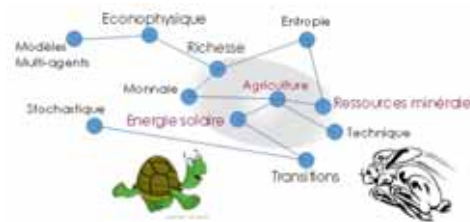


Competitive Innovation and the
Emergence of Technological Epochs
Heraeus Seminar #401 in Bad Honnef,



***Dynamiques inégalitaires des modèles multi-agents :
Y-a-t-il un lièvre "ressources minières" et une tortue "énergie" ?***

0 □ Motivations



Liens nouveaux ?

1 □ Agents & sociétés

- Stylisation comme outil (Robert Axtell)

2 □ Énergie/Produits

- Additif vs. multiplicatif (éconophysiciens)
- Équilibre vs. Hors d'équilibre
- Emergence {richesse, monnaie, technique, inégalités... & ÉnergieS}

3 □ Efforts de vidéaste amateurs

- Agriculture comme bonification
- Sel et Olives (énergie/ressource)
 - 1 agent, 1D
 - qqs agent, 2D



Energies / biens / inégalités

• Additif vs. multiplicatif

(éconophysiciens)

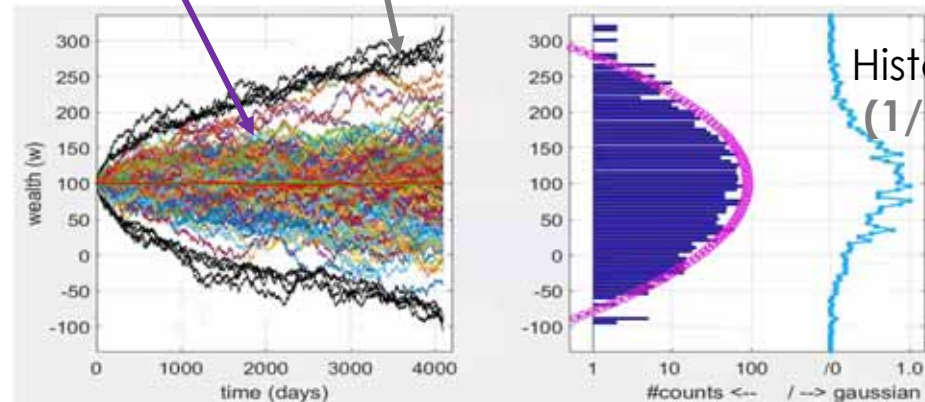
• Additif

1024
marches
aléatoires

- $X_0=100$,
- Aléa = ± 1 /jour

Sélection 1 sur 8

Les 5 extrêmes (top)



• Multiplicatif : ce n'est ~ « que » l'exponentielle de ces marches

- Aléa:
[$\times 1.01$ / $\times 0.99$] / jour

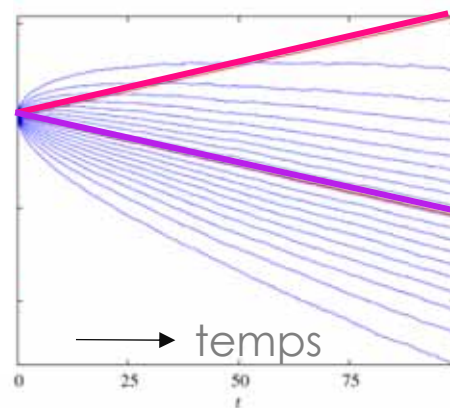
$$1.01 \times 0.99 = 0.9999 < 1$$

100 000

1 000

10

0.1



$$\langle w_j(t) \rangle \nearrow$$

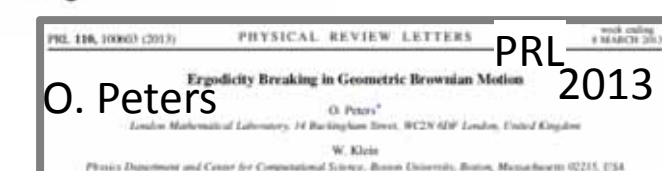
0.95

0.75

$$1000 \exp(\langle w' \rangle t)$$

$$\exp(\langle \ln w_j(t) \rangle) \searrow$$

0.25 pourcentiles



→ Moyenne d'ensemble non stationnaire
(diverge) → Non-ergodicité

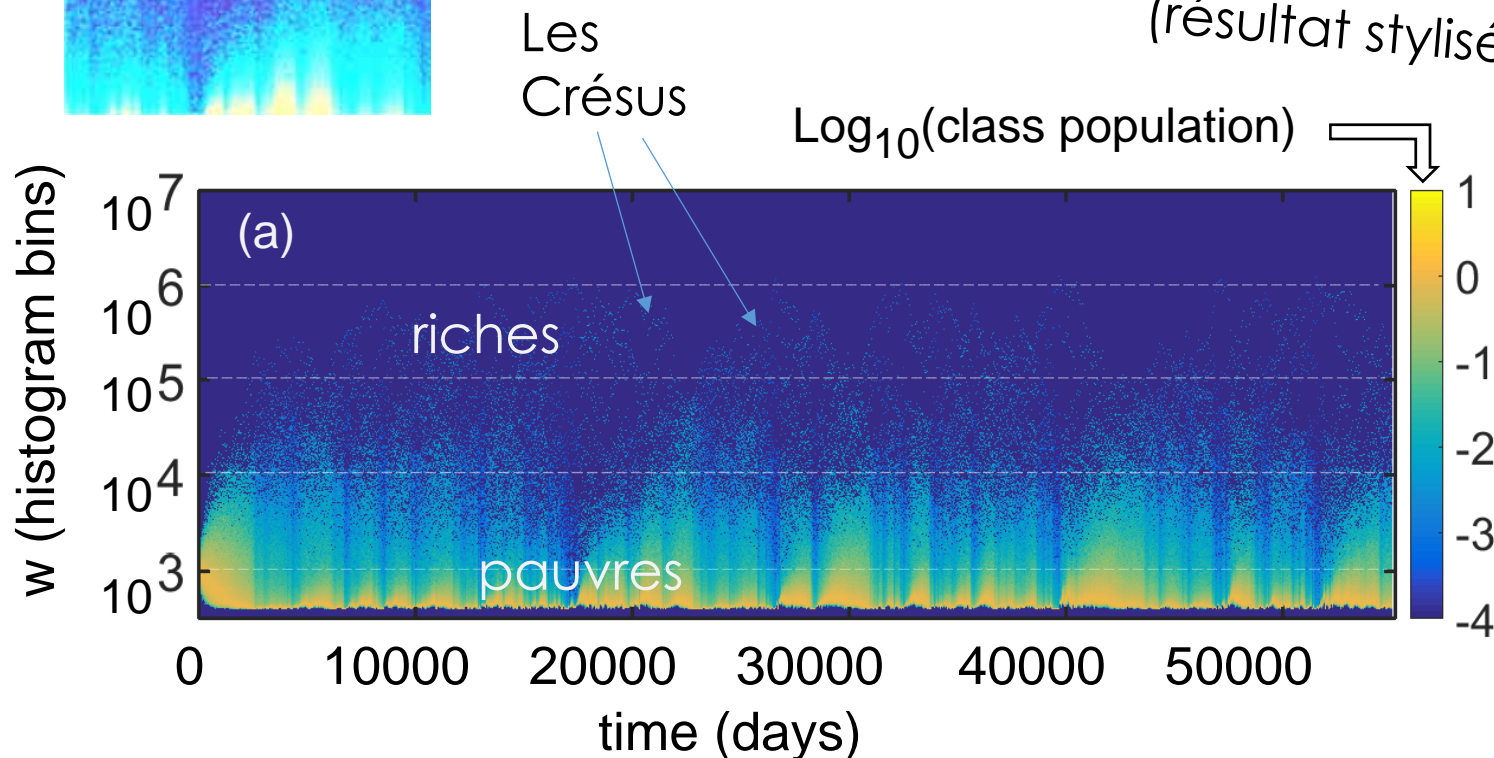
Modèle d'inégalité sans choc exogène (HB 2016-2017, Phys Rev E)

• Equilibre vs. Hors d'équilibre

PHYSICAL REVIEW E 95, 052307 (2017)
 Simple wealth distribution model causing inequality-induced crisis without external shock
 Henri Benisty



« the tail wags the dog »
 (résultat stylisé)

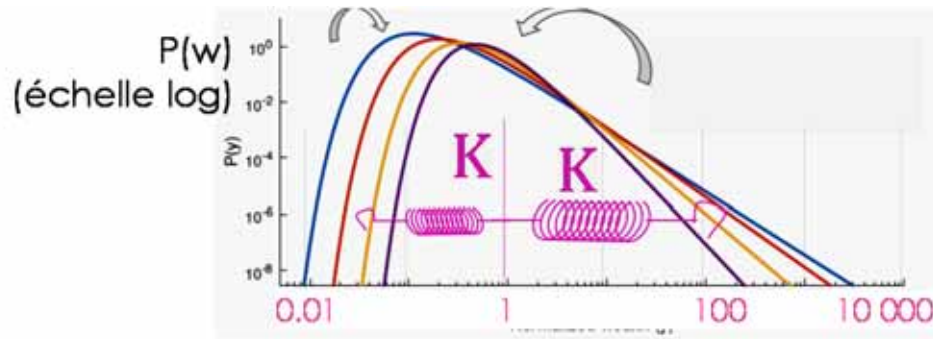


Des bases

Maths/Physique

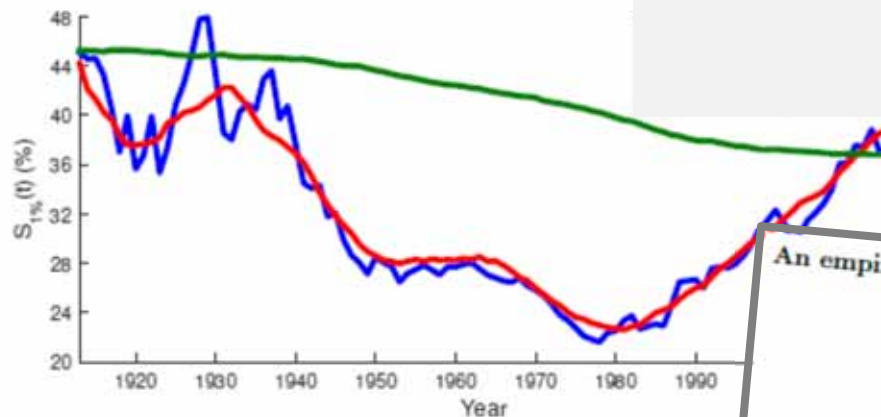
Histoire/éco

Echec de l'hypothèse ergodique pour le cas de la redistribution aux USA



La redistribution doit « compresser » la répartition, on peut inférer d'une distribution donnée soumise à cette compression la part des 1%

$\langle w \rangle$ normalisée
(échelle log)



Richesse des 1% dans un modèle ayant la une réallocation inférée comme ci-dessus : **ne colle pas du tout aux data !**

(un peu trop abstrait mais fondamental ...)

An empirical test of the ergodic hypothesis: wealth distributions in the United States

Yonatan Berman*
School of Physics and Astronomy, Tel-Aviv University, Tel-Aviv, Israel

Ole Peters†
London Mathematical Laboratory, 14 Buckingham Street, London WC2N 6DF, UK and
Santa Fe Institute, 1399 Hyde Park Road, Santa Fe, NM 87501, USA

Alexander Adamou‡
London Mathematical Laboratory, 14 Buckingham Street, London WC2N 6DF, UK
(Dated: January 30, 2017)

Richesse + Énergie + quoi ?

- Emergence {richesse, monnaie, technique, inégalités... & EnergieS}

- Emergence à 1 param
{crises dans « **richesse** »}

- Emergence à 2 param
{crises dans **richesse & énergie** }



L'éconophysique a entretenu
une confusion sémantique richesse/énergie
(thermodynamique)

- Emergence à 3 param
{crises dans
richesseS & énergie & monnaie }

- Aspect spatial/ressources
- Aspect renouvelable/extractible

Notre approche

• Emergence {richesse, monnaie, technique, inégalités... & Energie\$}

• • • Simulation spatiale + ressources d'abord

- renouvelables ... agriculture = énergie solaire bonifiée
- non renouvelables = mine (sel,...)

Archéo sel Monnaie salaire

• • • Interaction des facteurs = bonification

- seuil de population → agriculture vs chasseurs-cueilleurs
- minéral + agriculture → richesse stockable

• • • Emergence de la monnaie ?

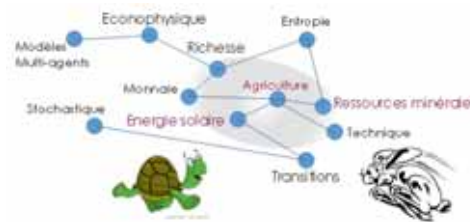
- Autres seuils : complexité du réseau, intertemporalités
- Mais 'proxy' d'une monnaie = ressource
(métal, sel, ... (cauris ?))

• • • On n'en est pas beaucoup plus loin conceptuellement ! (mais il faut démarrer quelque part !)

« écono-territorial » ? « Proie-prédateur » (Lotka-Volterra) spatial ?

***Dynamiques inégales des modèles multi-agents :
Y-a-t-il un lièvre "ressources minières" et une tortue "énergie" ?***

0 ■ Motivations



Liens nouveaux ?

1 ■ Agents & sociétés

- Stylisation comme outil (Robert Axtell et al.)

2 ■ Energie/Produits

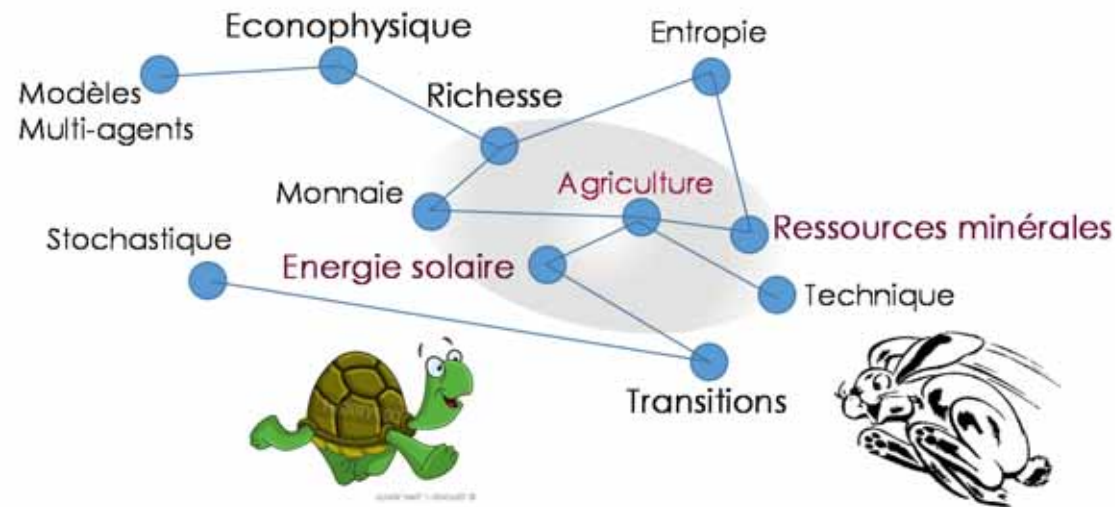
- Additif vs. multiplicatif (éconophysiciens)
- Equilibre vs. Hors d'équilibre
- Emergence {richesse, monnaie, technique, inégalités... & EnergieS}

3 ■ Efforts de vidéastes amateurs

- Agriculture comme bonification
- Sel et Olives (énergie/ressource)
 - 1 agent, 1D
 - qqs agent, 2D



***Dynamiques inégales des modèles multi-agents :
Y-a-t-il un lièvre "ressources minières" et une tortue "énergie" ?***











- **premières impressions liées à la stylisation :**
(au fond, les simulations servent à engendrer ces 'impressions')

- • **Agriculture (énergie solaire):**
une pratique de temps court mais une « tortue » de l'économie
Tributaire des fluctuations de population
- • **Ressources minières :**
une apparence d'infini mais un « lièvre » de l'économie (← technique)
Amplification de l'extraction à toute phase de croissance,
Pas de frein efficace avant épuisement

Simulation de chasseurs cueilleurs → agriculteurs

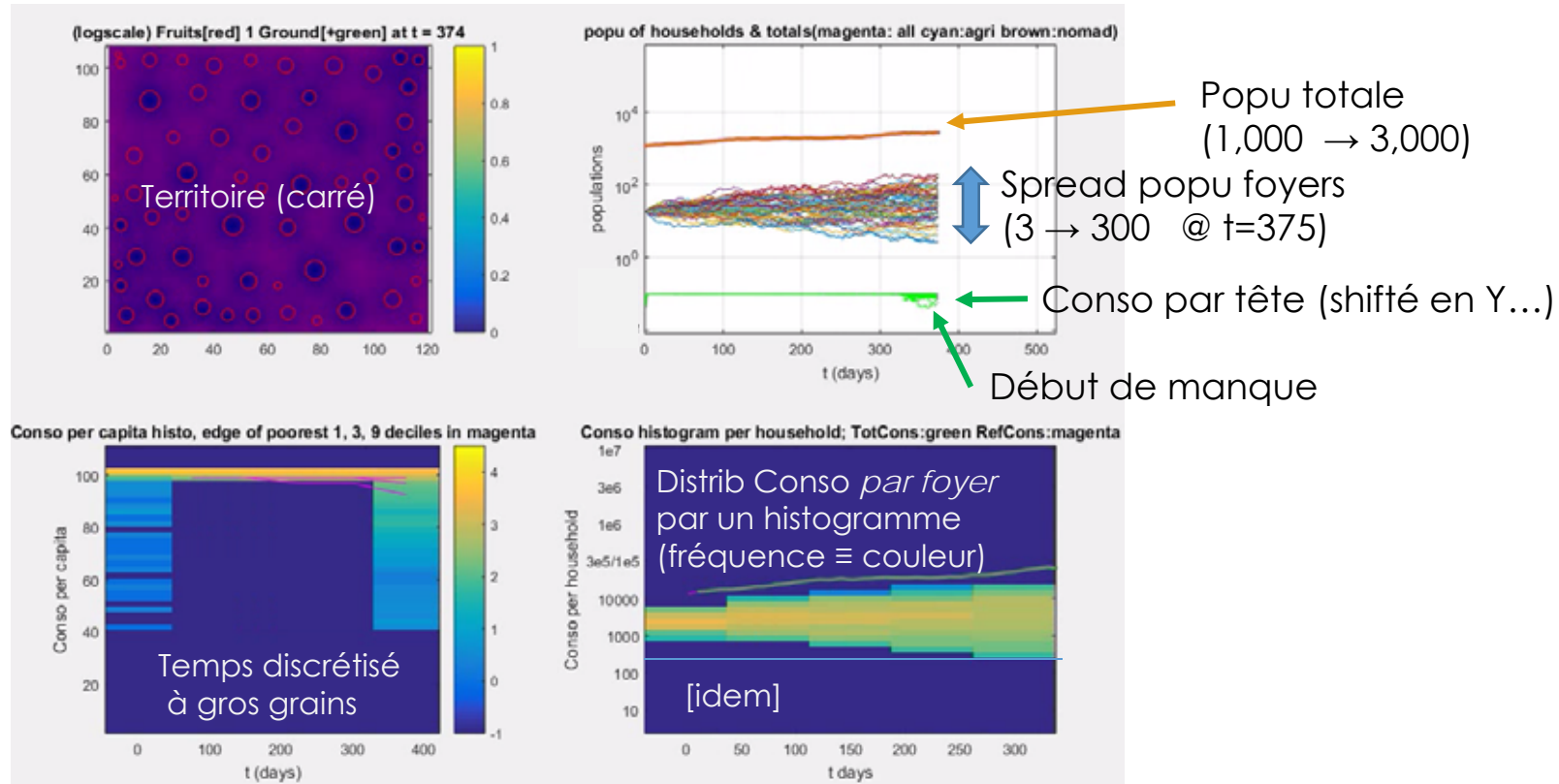
•• Hypothèses principales

- 'Modélisation' par foyers mobiles (x_j, y_j) 
- 'Landscape' de ressource solaire 
- 'Consommation' du produit local (E solaire convertie) 
- Migration suivant gradient sur ce qu'il reste 
- Seuil de population pour « bonifier le sol » (cultiver → devenir Agric) 
- Répulsions entre foyers (+ entre agriculteurs et chasseurs-cueilleurs) 
- Bruit = variation stochastique de la population de chaque foyer ! 
- Statut réversible (C.Cueil. \leftrightarrow Agric.) 

→
temps, espace

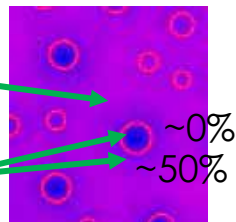
Simulation de chasseurs cueilleurs → agriculteurs (1/3)

○ Chasseur-Cueilleur

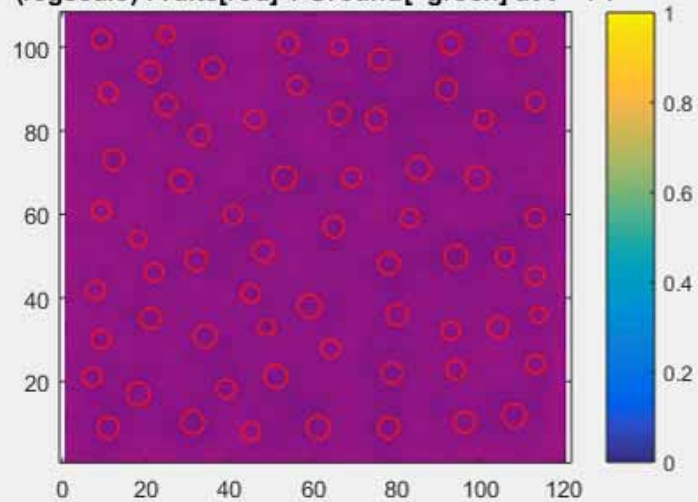


Ressource > 80%

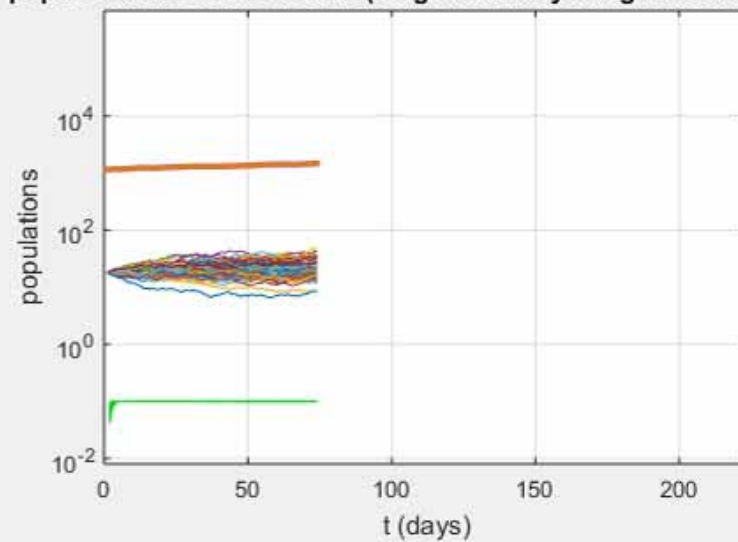
Déplétion



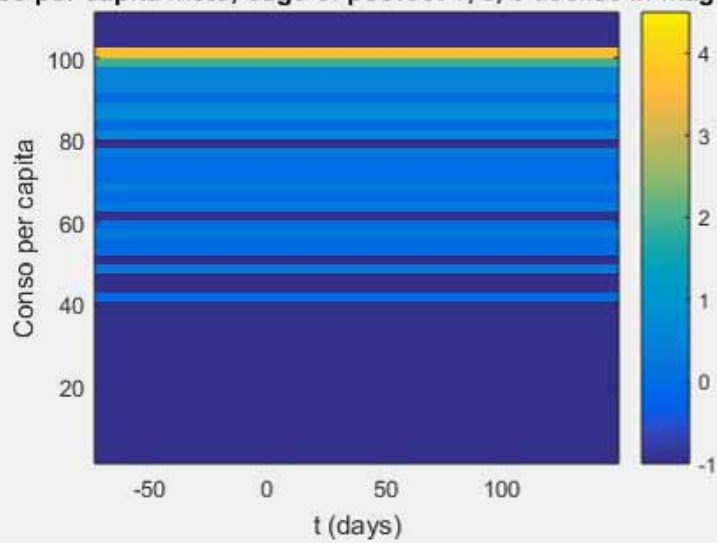
(logscale) Fruits[red] 1 Ground[+green] at t = 74



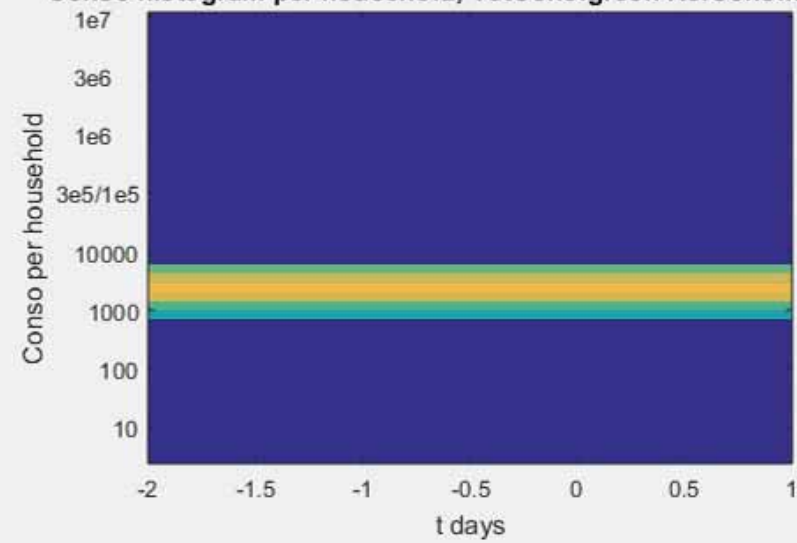
popu of households & totals(magenta: all cyan:agri brown:nomad)



Conso per capita histo, edge of poorest 1, 3, 9 deciles in magenta

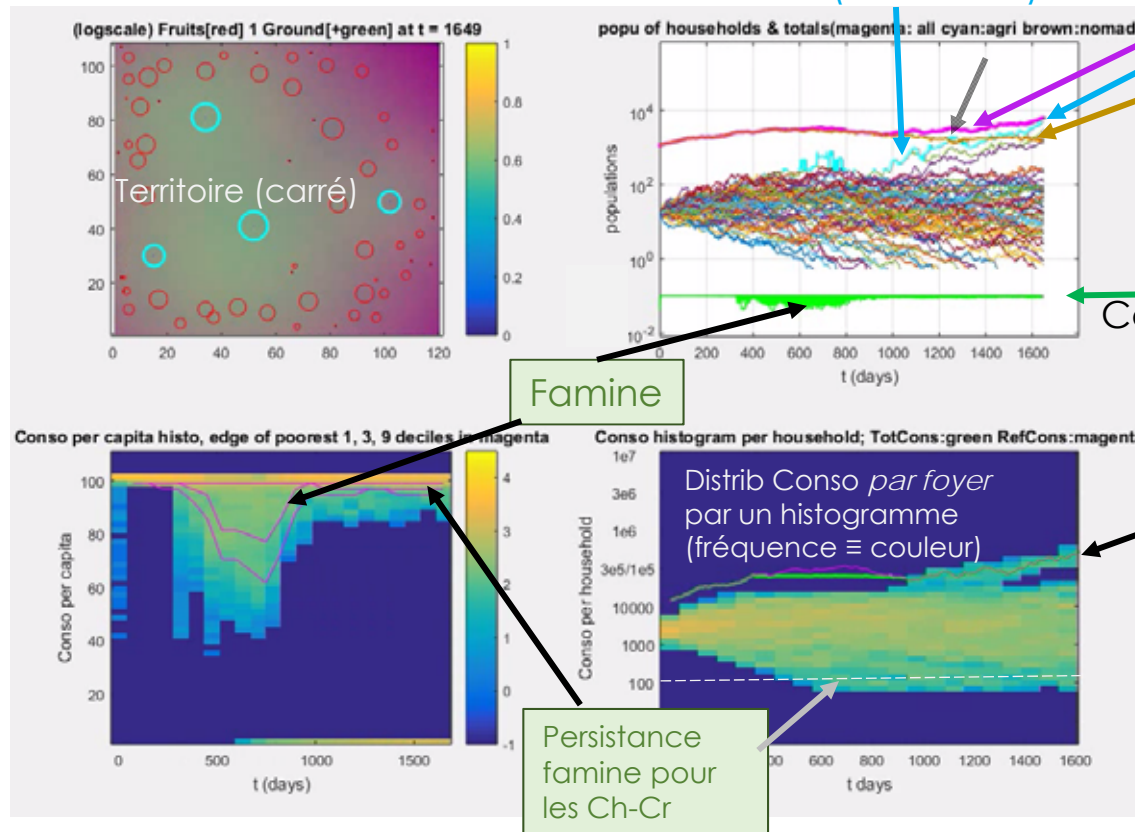


Conso histogram per household; TotCons:green RefCons:magenta



Simulation de chasseurs cueilleurs → agriculteurs (2/3)

- Agriculteur
- Chasseur-Cueilleur



Popu agric.
(en hausse)

Popu totale
Popu agric.
Popu nomade
(fraction en baisse)
MAIS SE MAINTIENT LONGTEMPS

Conso par tête (shifté en Y...)

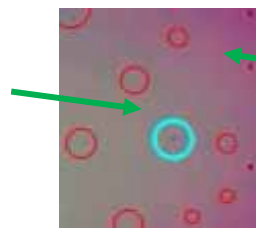
Famine

Urbi

NB1 : la tendance de chaque foyer est fonction de sa conso moyenne (décroit si famine)

NB2 : La bonification s'éteint mais assez lentement

Zone bonifiée
(ajout « verdâtre »)
(prod augmente)



Non bonifié
(Parme/bleu)

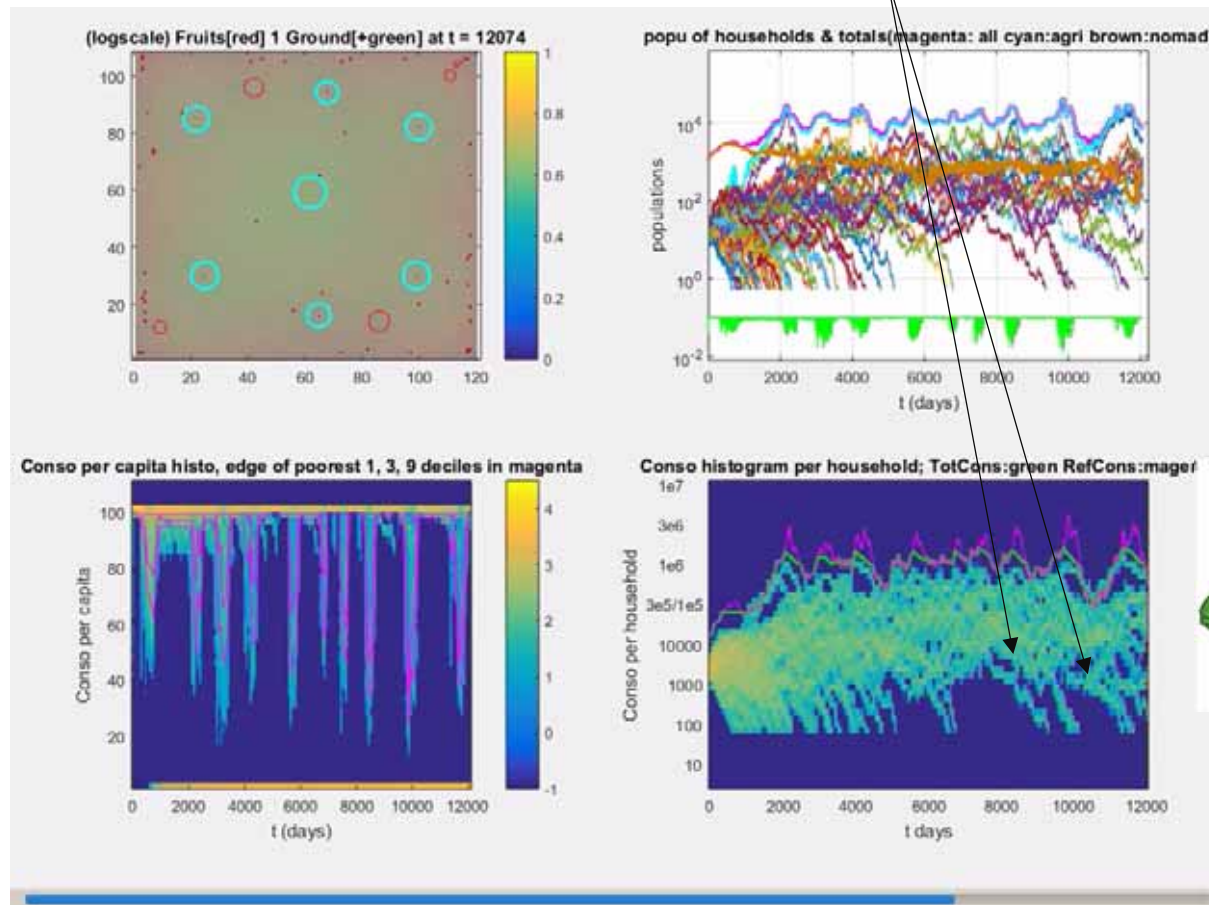
Transition néolithique
...accélérée...



Simulation de chasseurs cueilleurs → agriculteurs (3/3)

Sans choc exogène :

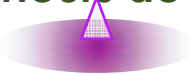

- Limitation par les ressources, contraintes spatiales
- Crises successives
- Ecrémage **lent** (# foyers diminue : « mort Ch-Cu »)

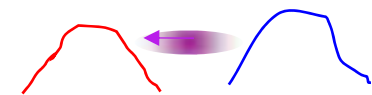
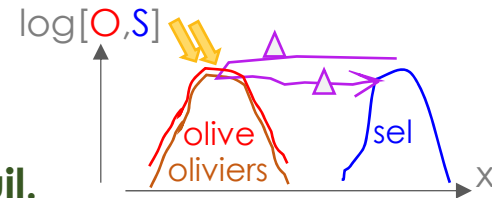


Film 2

Simulation « d'olives et de sel » (1/5)

•• Hypothèses principales

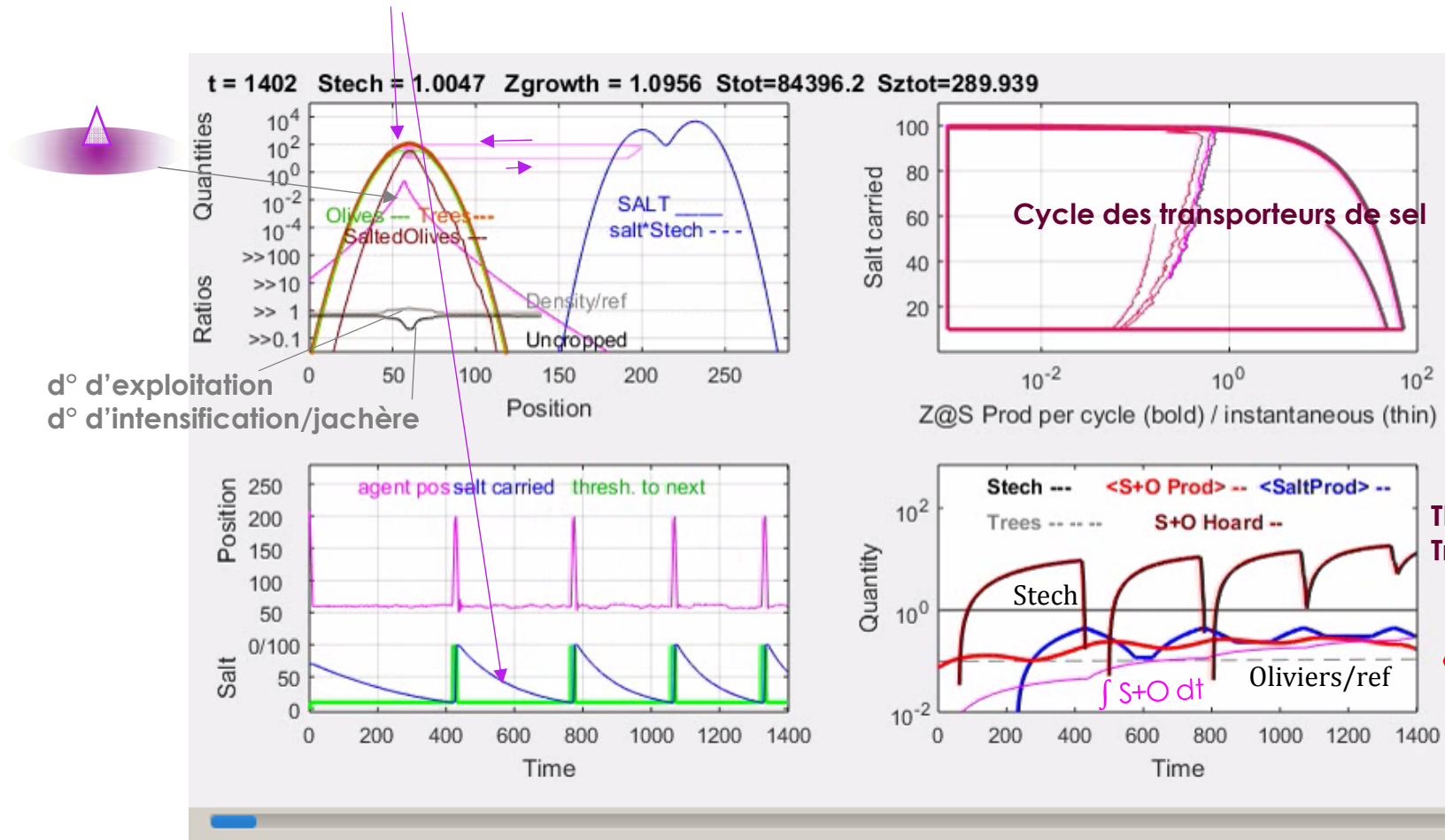
- 'Modélisation' par agents bistables transporteurs de sel (xs_j, ys_j)  Mais agent un peu délocalisé ~ nuage 
- 'Landscape' de ressources **solaire (olive)** et **minière (sel)**
+oliviers
- Conversion (**Sel+Olive** → **Conserve**) , ~thésaurisée jqà seuil.
c'est un produit qui paye les agents.
- Pas d'agents cultivateurs' (échange lié directement à prod)
- Guidage par un gradient (nécessite « la queue des exponentielles»)
- **Evolution oliviers** : jachère si peu exploité, **sur-culture** si **exploité ++**
- **Evolution extraction « sel »** (facteur 'Stech') ou ~pas (films 'Tech' ou 'LoTech'):
Vitesse d'extraction peut augmenter [$\times Stech$] grâce à technique
mais *Stech* augmente ssi retour à la mine rapide
(**extraction** limitante, **vente** non limitante).
→ Aspect multiplicatif !



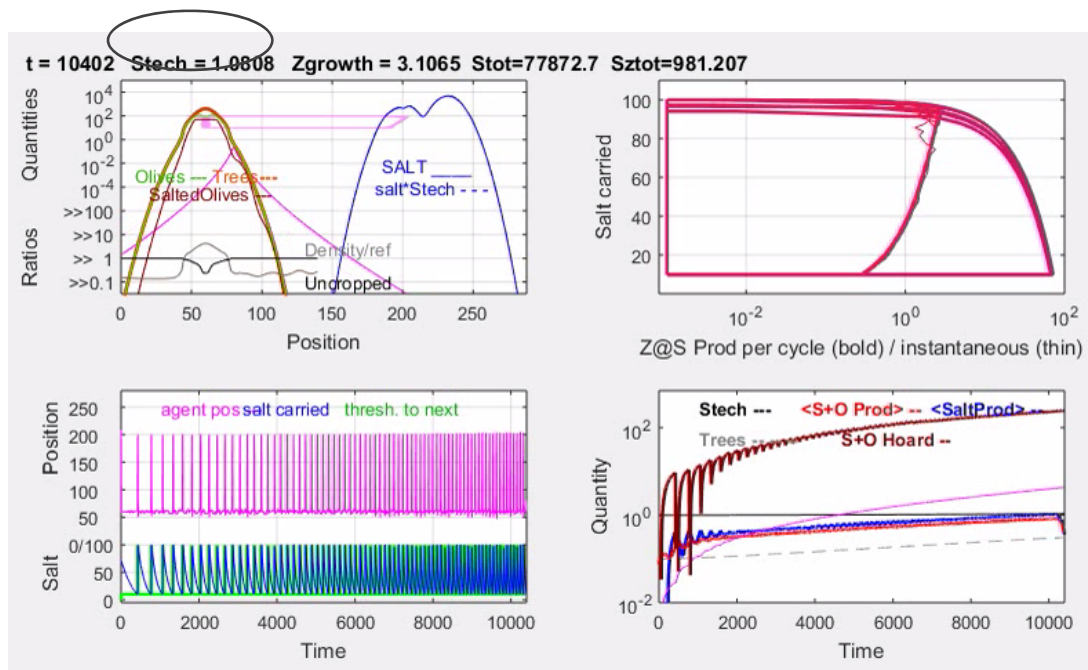
Simulation « d'olives et de sel » (2/5)

D'abord à UNE dim.
(peu d'aléa).

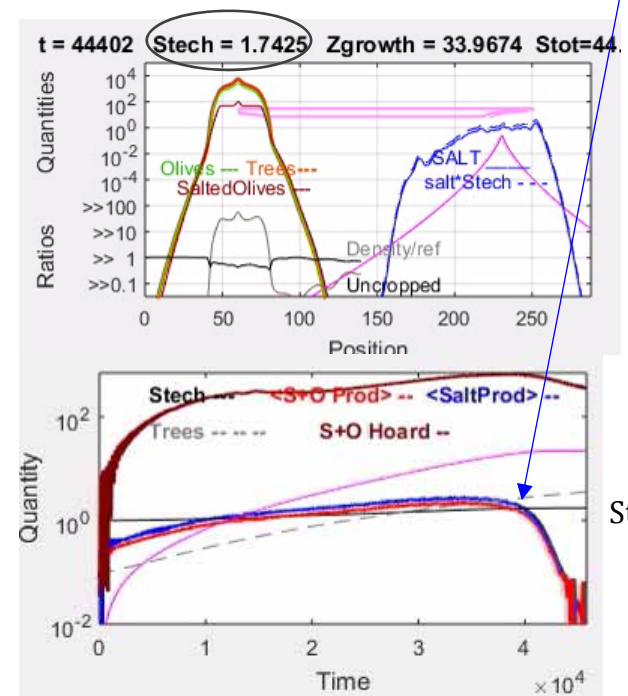
Au début : Vente limitante



Simulation « d'olives et de sel » (3/5) 'Low tech'

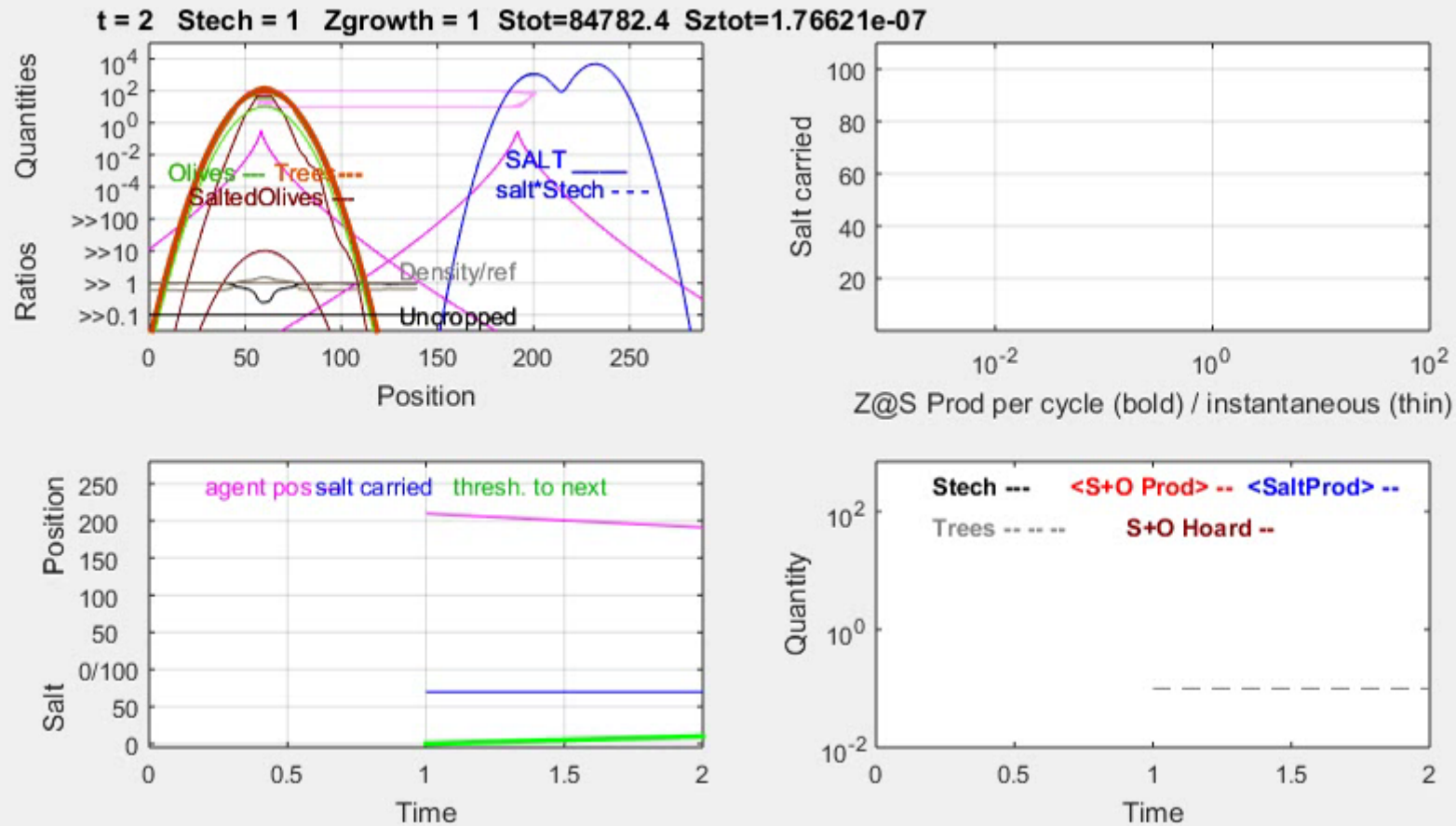
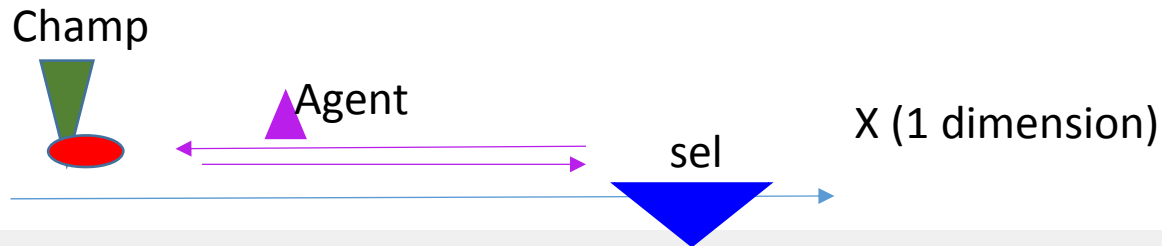


Falaise de Sénèque pas trop raide

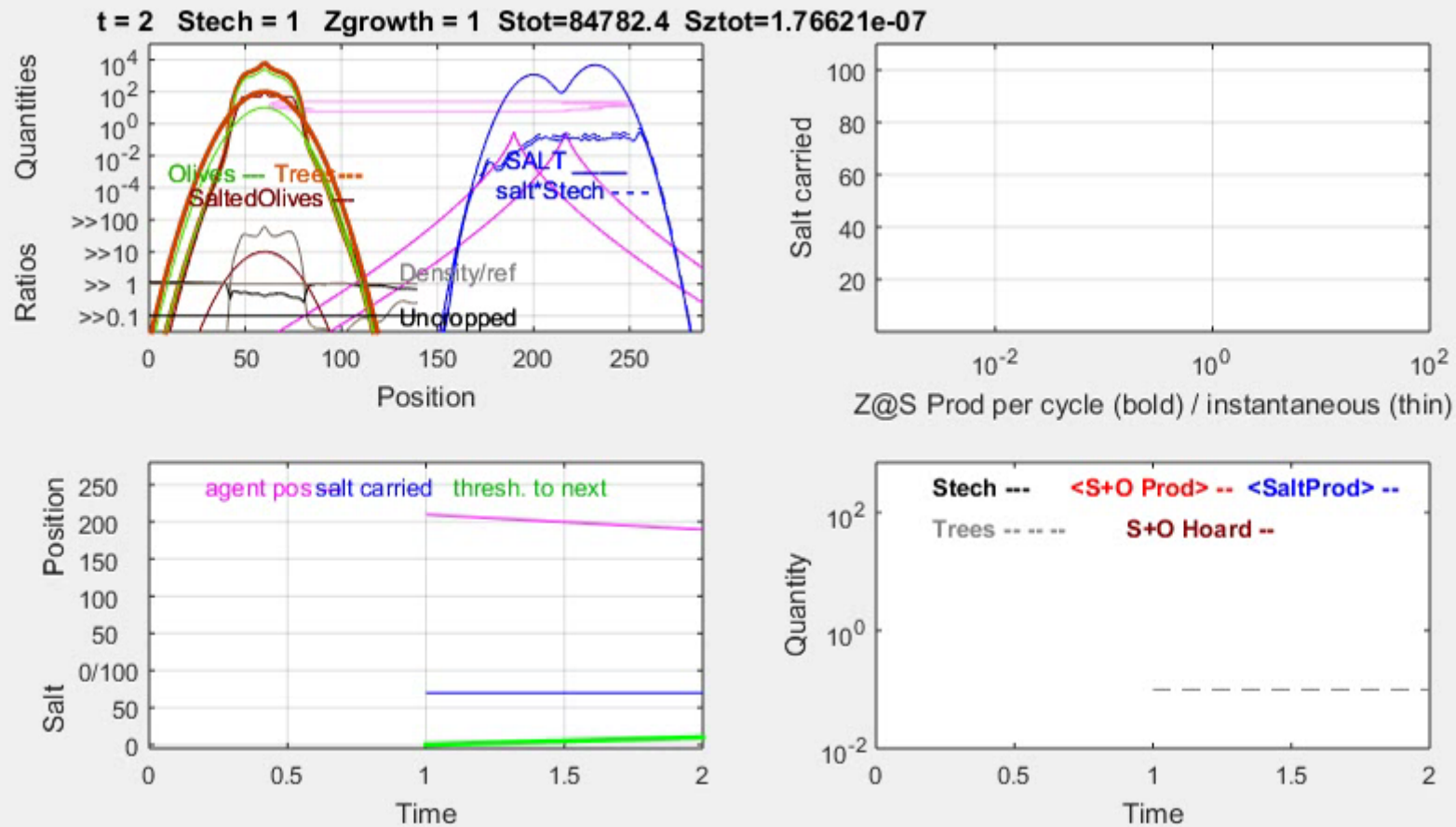


Stech < 2

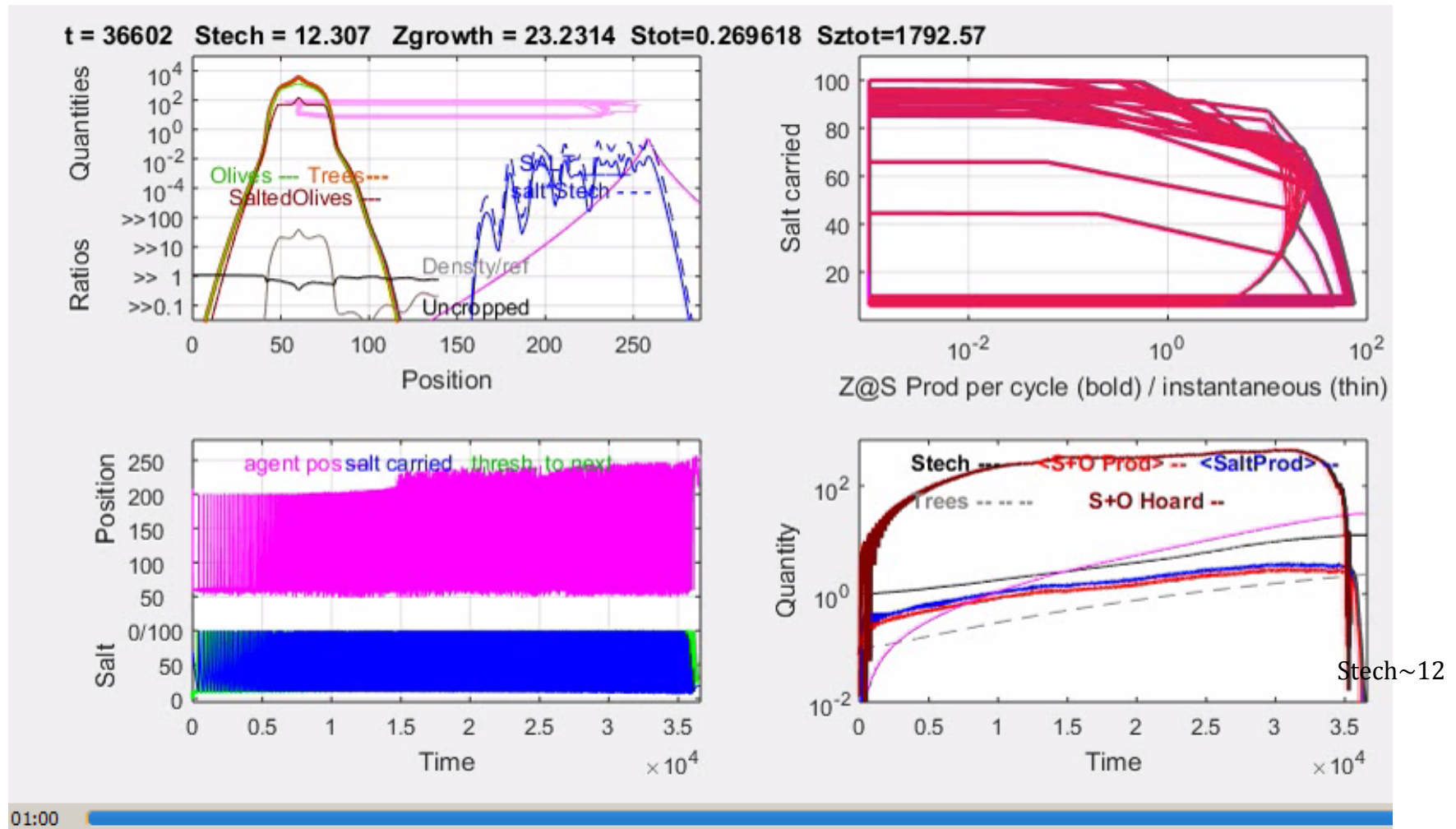
Film 2



Film 3

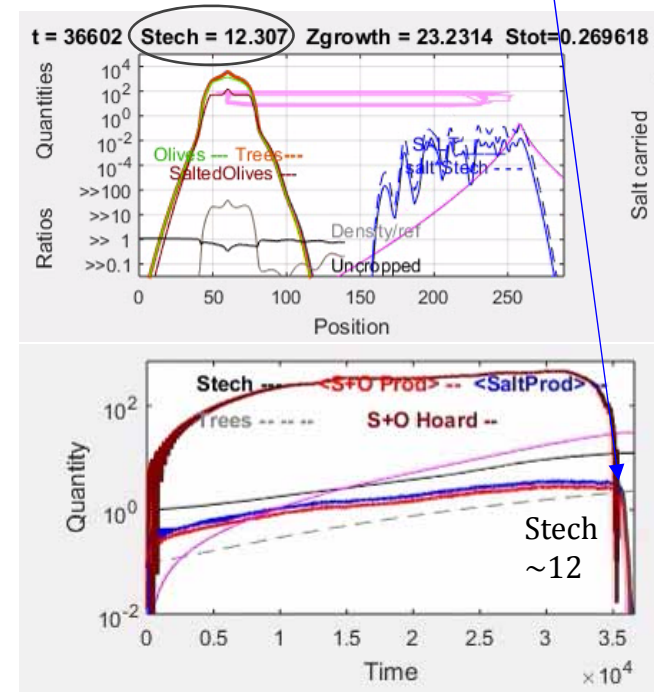
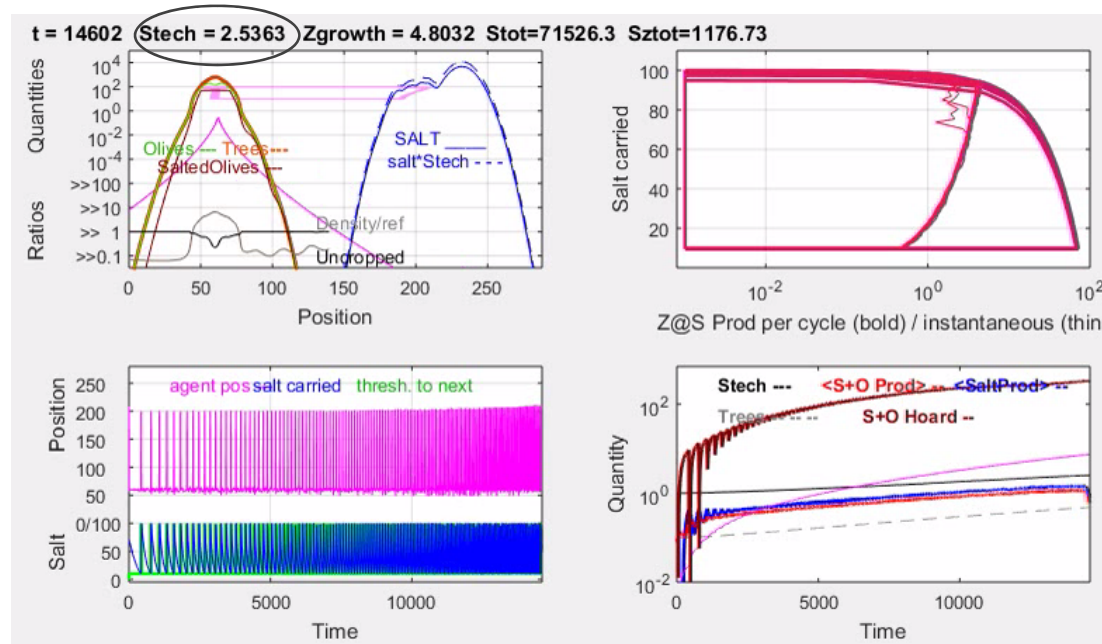


Film 3 (image fixe)

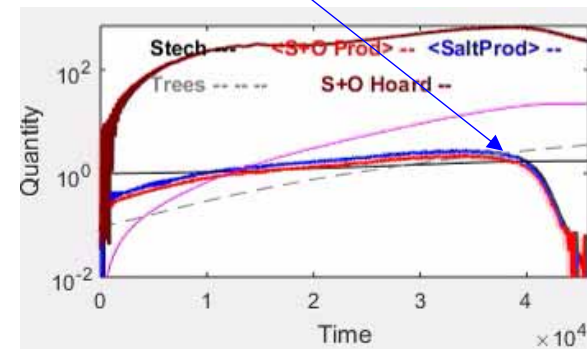
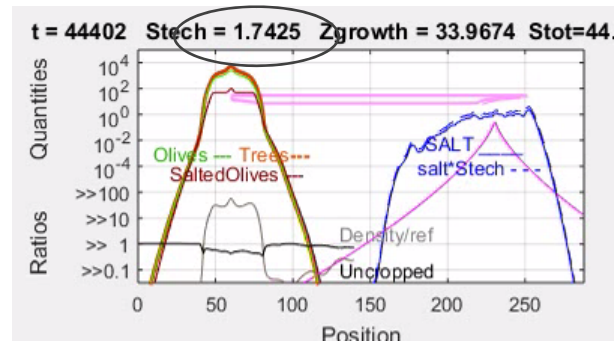


Simulation « d'olives et de sel » (4/5) 'Tech vs. Low Tech'

('Tech') Falaise de Sénèque très raide !



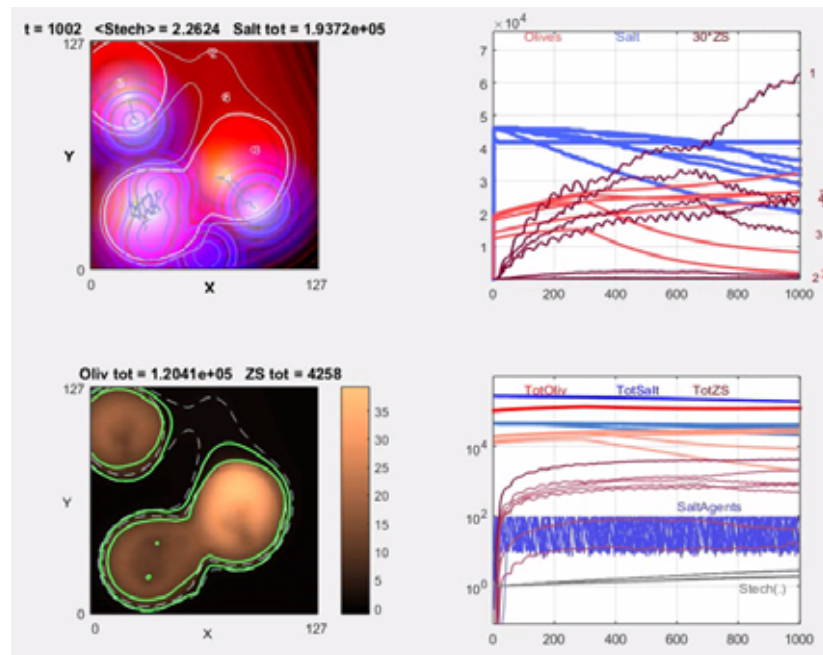
('Low Tech') : Falaise de Sénèque pas trop raide



Simulation « d'olives et de sel » (5/5) Cas 2D

- Transporteurs multiples
chacun sa technique
- Champs d'oliviers multiples
- Mines de sel multiples

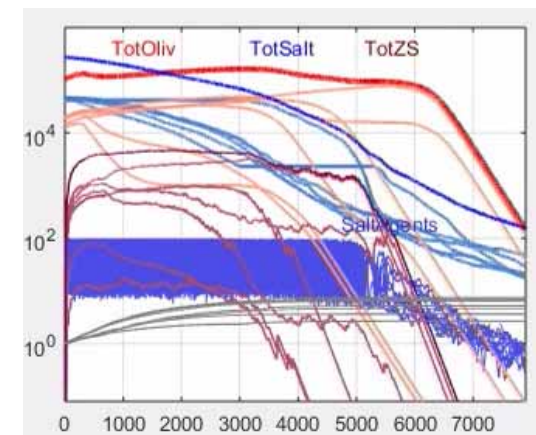
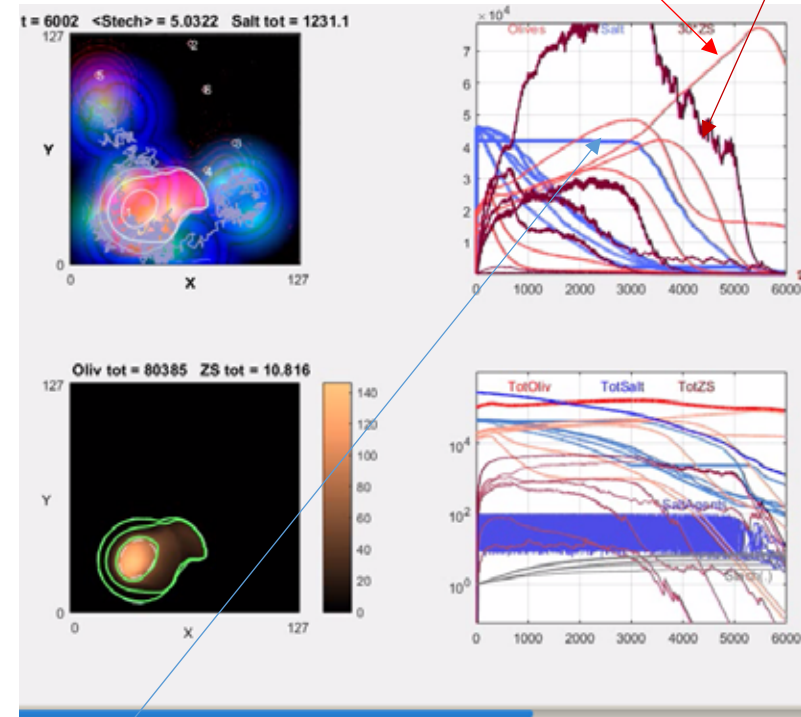
(et pas vraiment tous les ingrédients « 1D »)



par ex : Mines à l'écart
exploitées en dernier

Inertie des
plantations

Prod qui chute
avec ressaut



CONCLUSION

- premières impressions liées à la stylisation :

- La dynamique de l'agriculture « solaire » reste lente



- « Lenteur » liée à l'interaction avec les agents

- compétition chasse-cueillette
 - fluctuations des agents
 - > ? Démographie réelle/ morbidité etc. ?
 - > ? Migrations inter-foyers/inter-fermes ?
 - (cf. « la ferme hérite du fils » ou pas ?)

- « Rapidité » des dynamiques extractives
(progrès technique « rationalisé »)



- transition du facteur limitant (vente → extraction),
→ alimente progrès technique
 - Thésaurisation : minéral ou pas ?

- Condition pour monnaie ?

- Thésaurisation minéral direct (pas « Olive + sel »)
 - Multiplicité des interactions (nécessitant d'arbitrer entre stocks)
 - Sans doute pas nécessaire avant une échelle supérieure
(peuples en interaction forte, guerre [cf. D. Graeber] ou autre)