

“Croissance et effondrement ?

Emmanuel Prados

INRIA / LJK

Équipe STEEP

Juin 2015

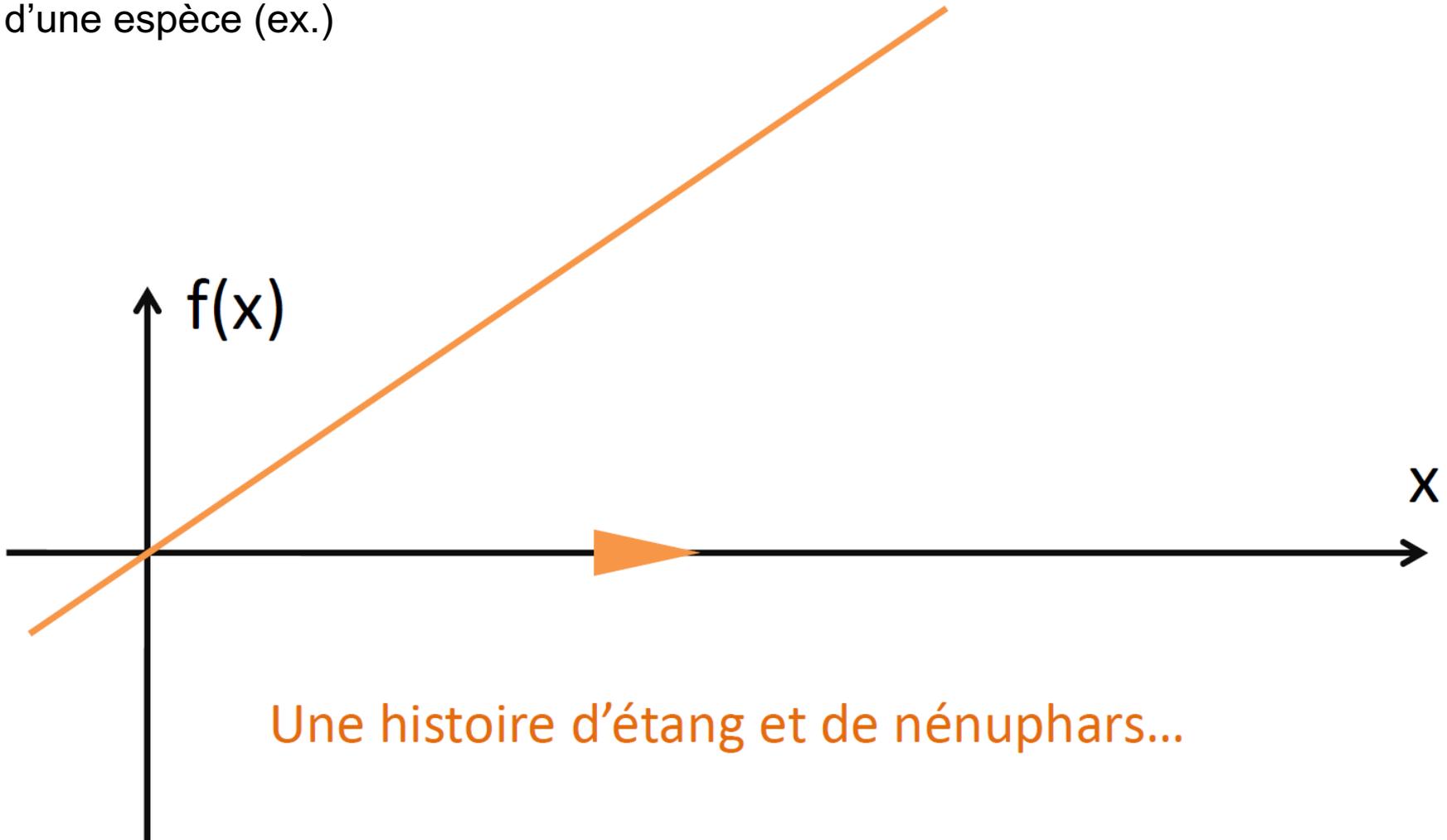
Un peu de math pour commencer!

- Modèles dynamiques
 - en dimension 1
 - en dimension 2
 - Pour un écosystème entier...

1. Linéaire

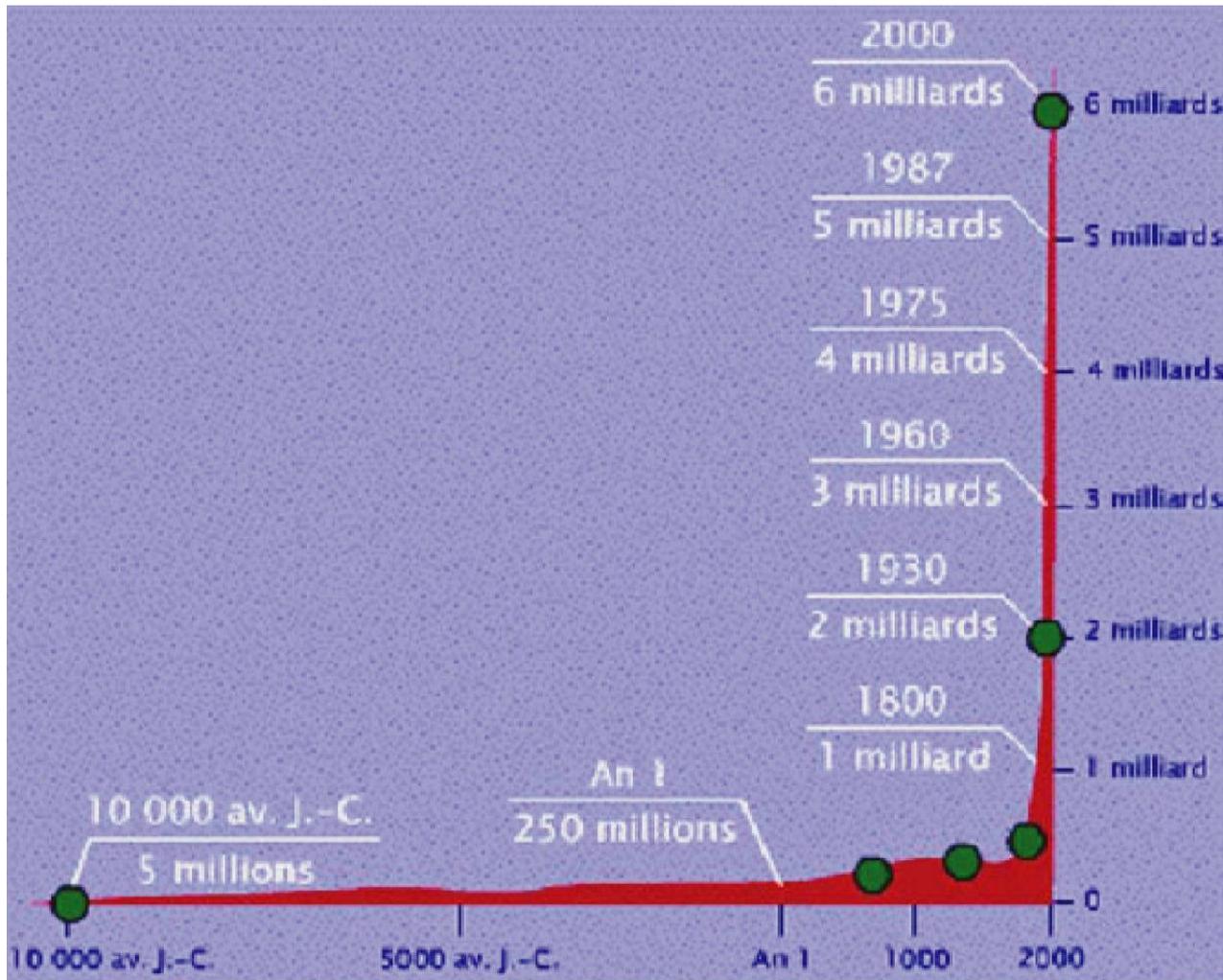
$x(t)$ = nombre d'individu
d'une espèce (ex.)

$$dx/dt = f(x)$$



Une histoire d'étang et de nénuphars...

Population mondiale depuis 10 000 ans

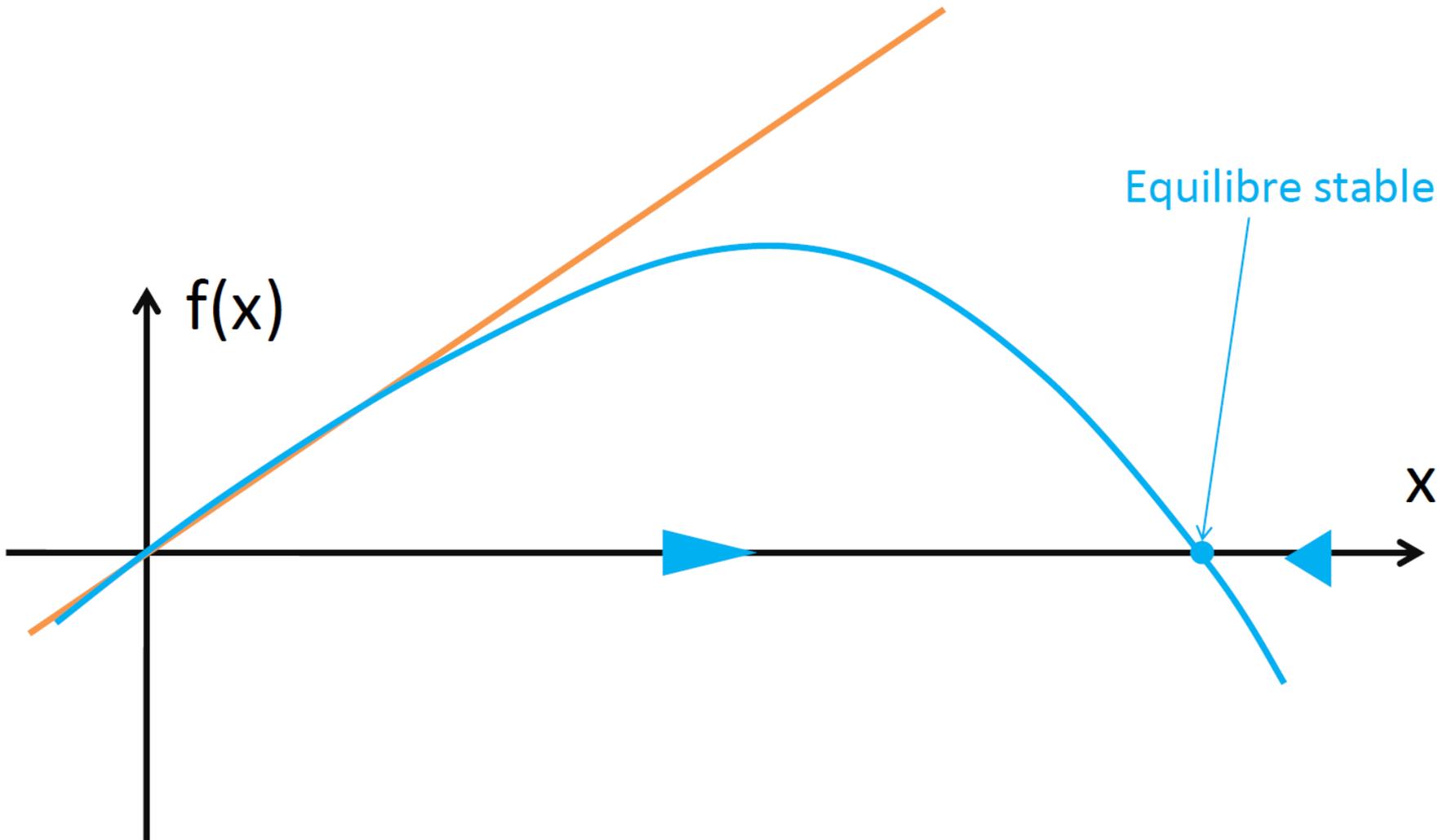


Source : Musée de l'Homme

1. Linéaire

2. = 1 + ressources limitées

$$dx/dt = f(x)$$

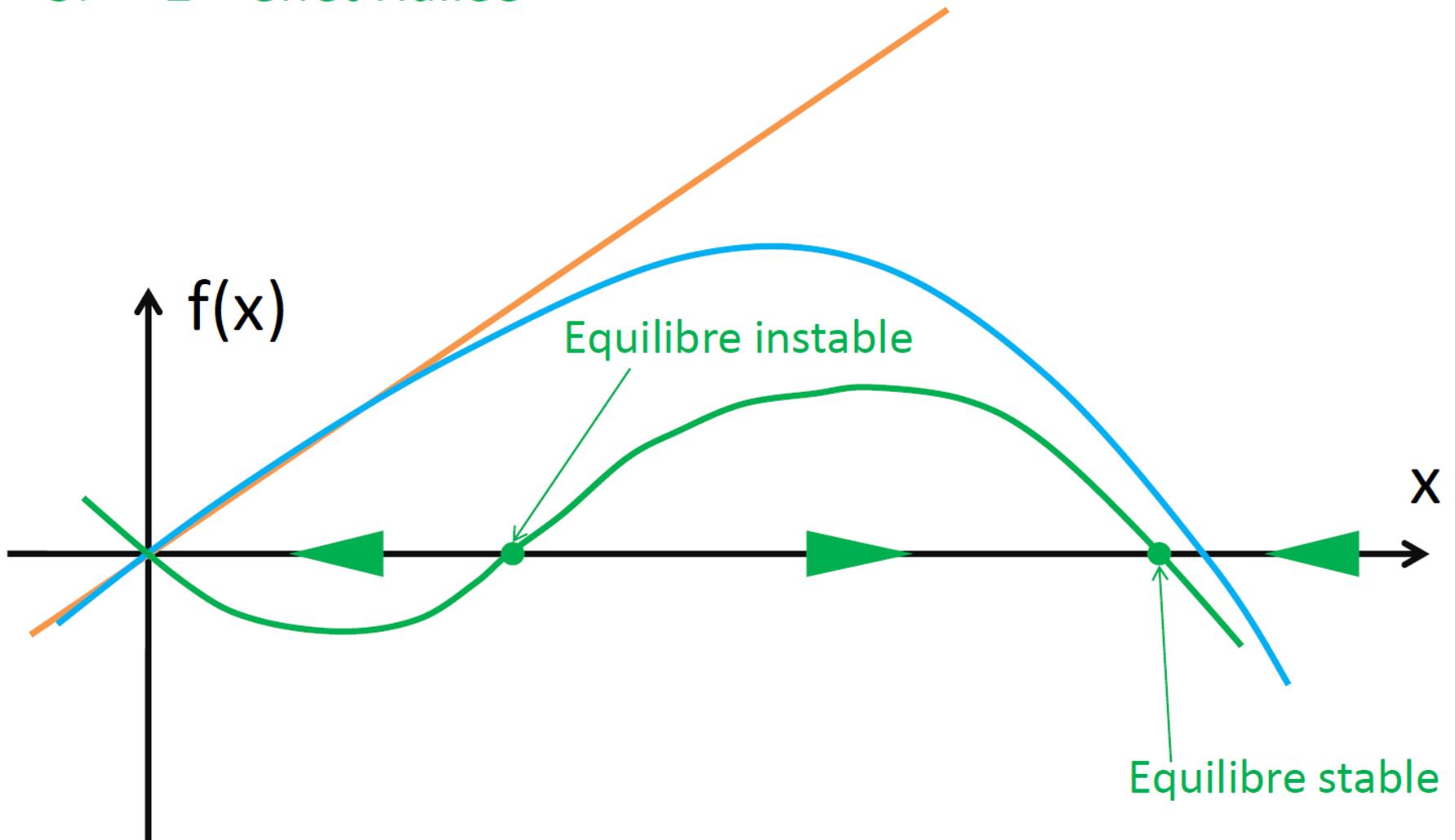


1. Linéaire

2. = 1 + ressources limitées

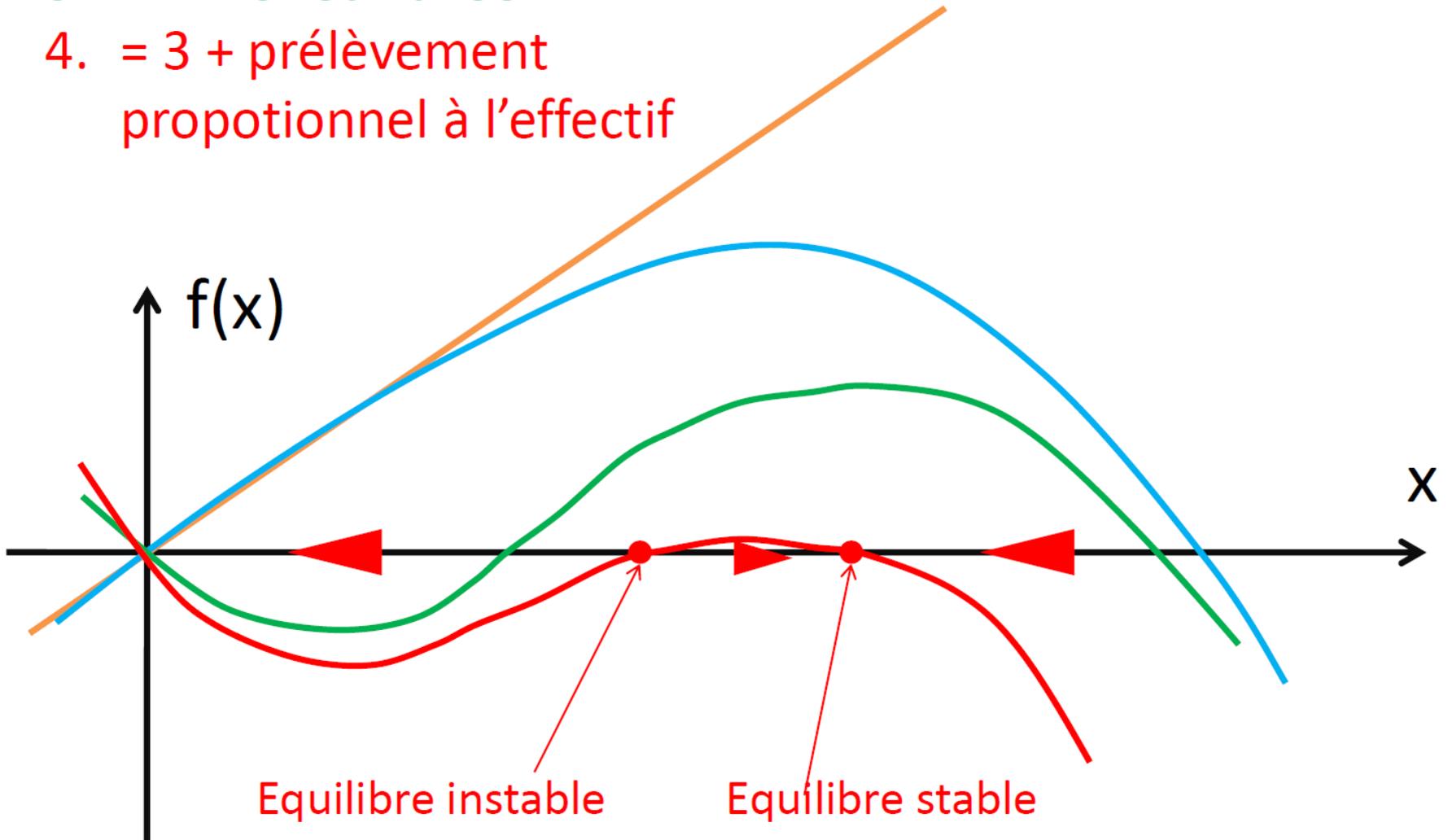
3. = 2 + effet Hallee

$$dx/dt = f(x)$$



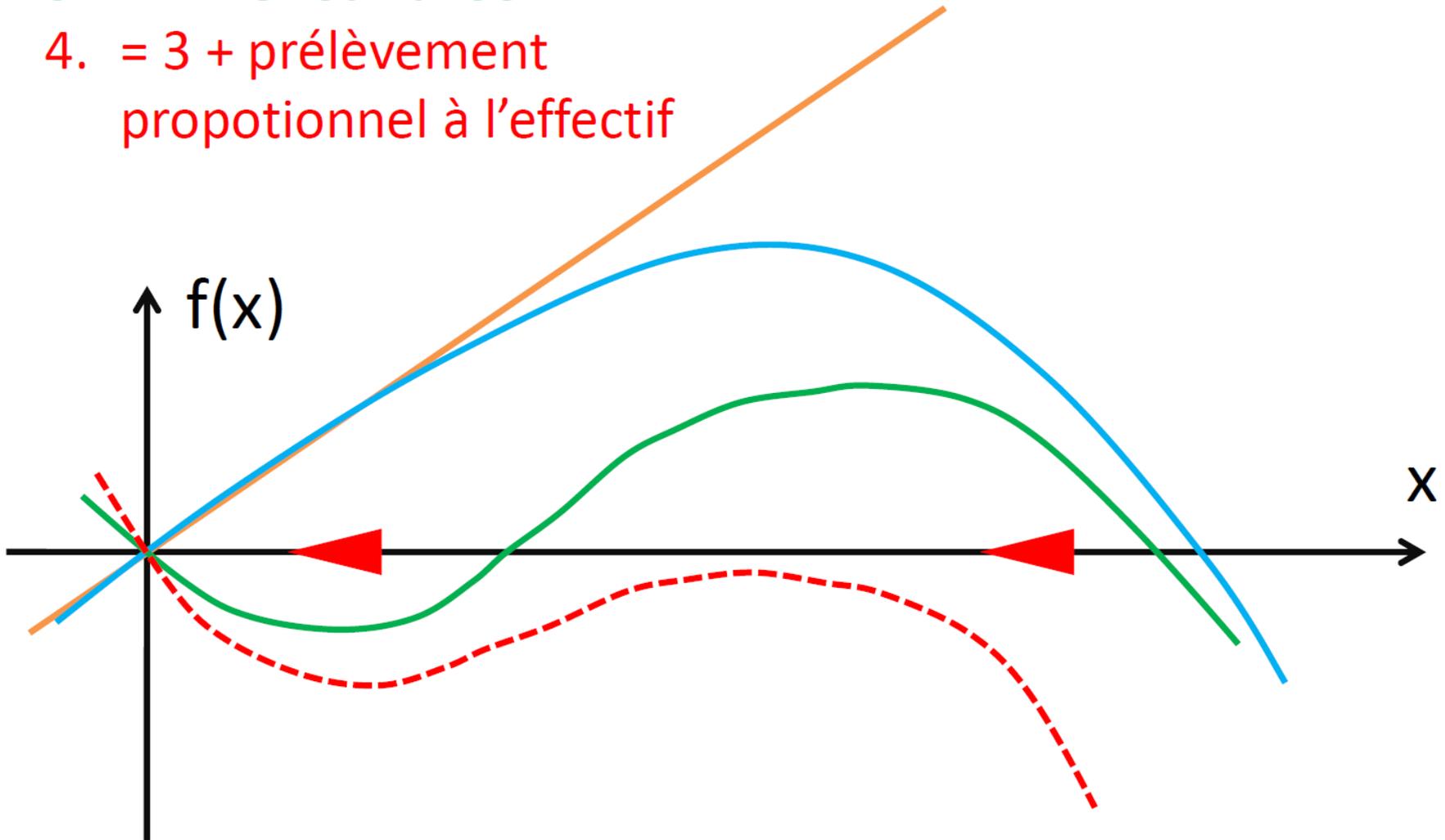
1. Linéaire
2. = 1 + ressources limitées
3. = 2 + effet Hallee
4. = 3 + prélèvement proportionnel à l'effectif

$$dx/dt = f(x)$$

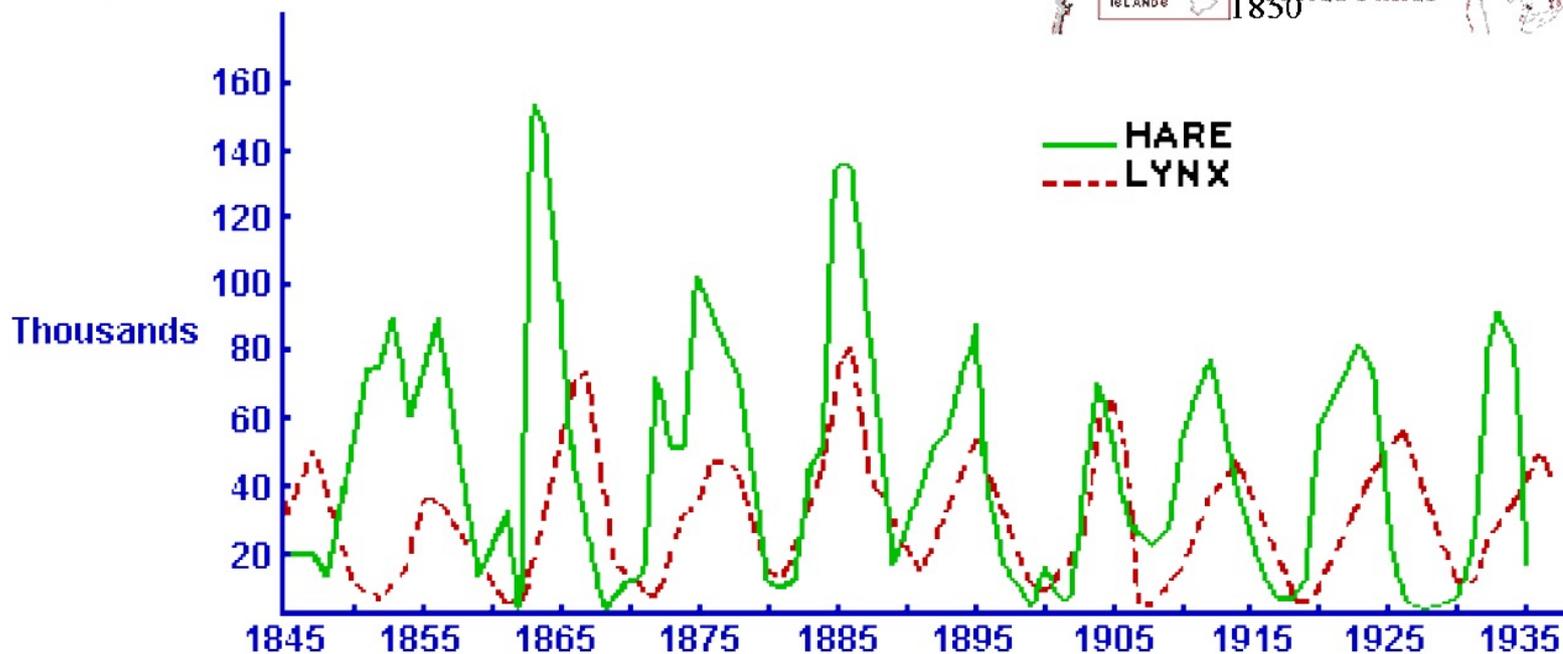
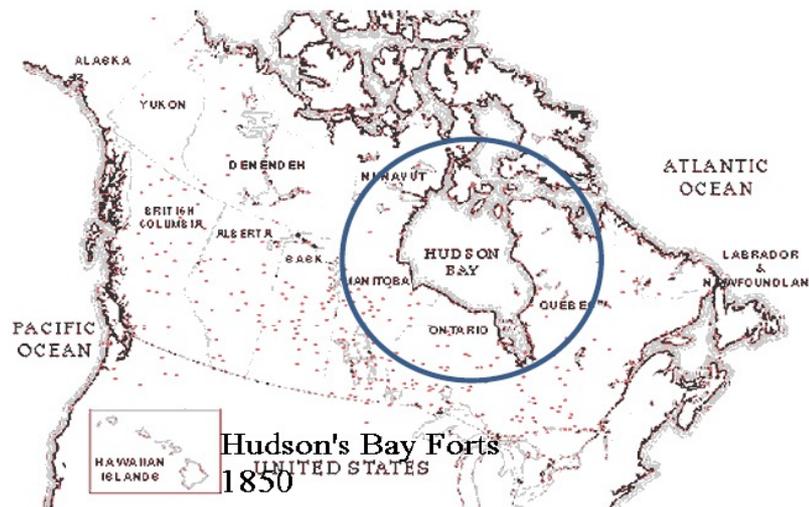


1. Linéaire
2. = 1 + ressources limitées
3. = 2 + effet Hallee
4. = 3 + prélèvement
propotionnel à l'effectif

$$dx/dt = f(x)$$

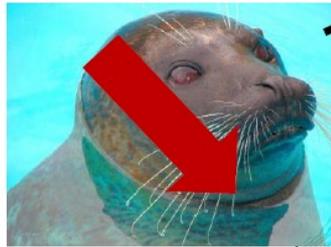
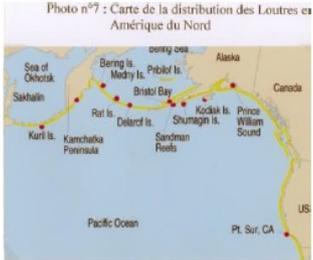


Systemes proie - prédateur



Oscillations plus ou moins régulières, période 9 à 10 ans, grande amplitude

Chaînes trophiques

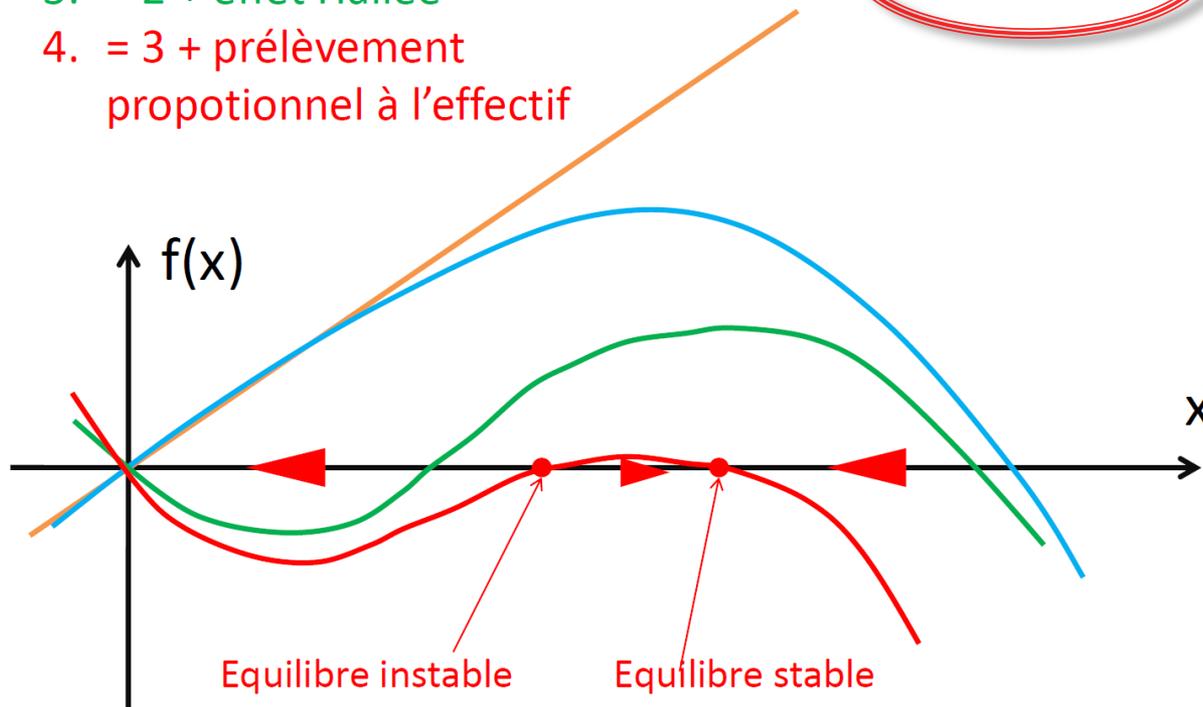


Source : Estes, J., M. Tinker, T. Williams, D. Doak. 1998. Killer whale predation on sea otters linking oceanic and nearshore ecosystems. *Science*, 282: 473-476

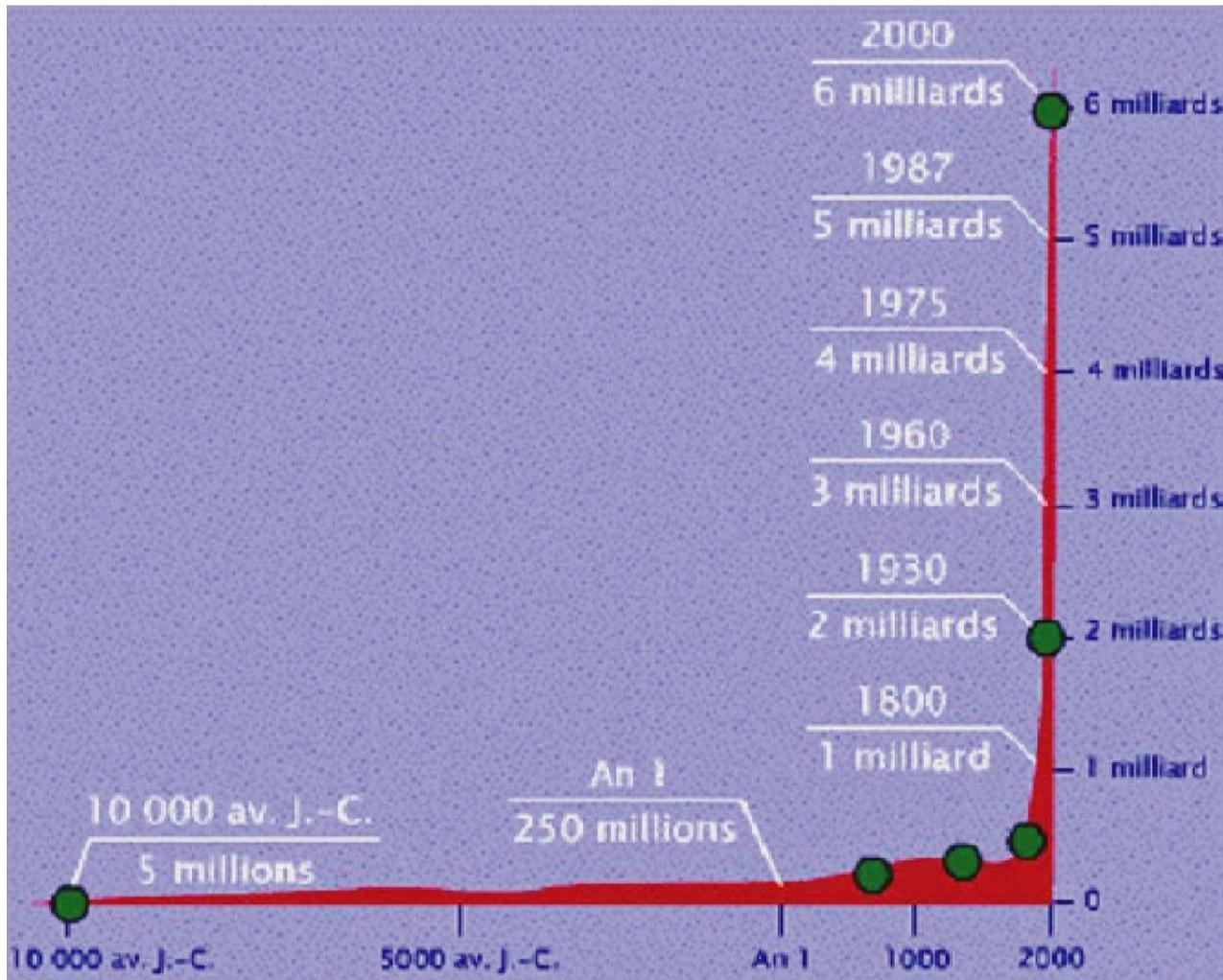
Croissance!

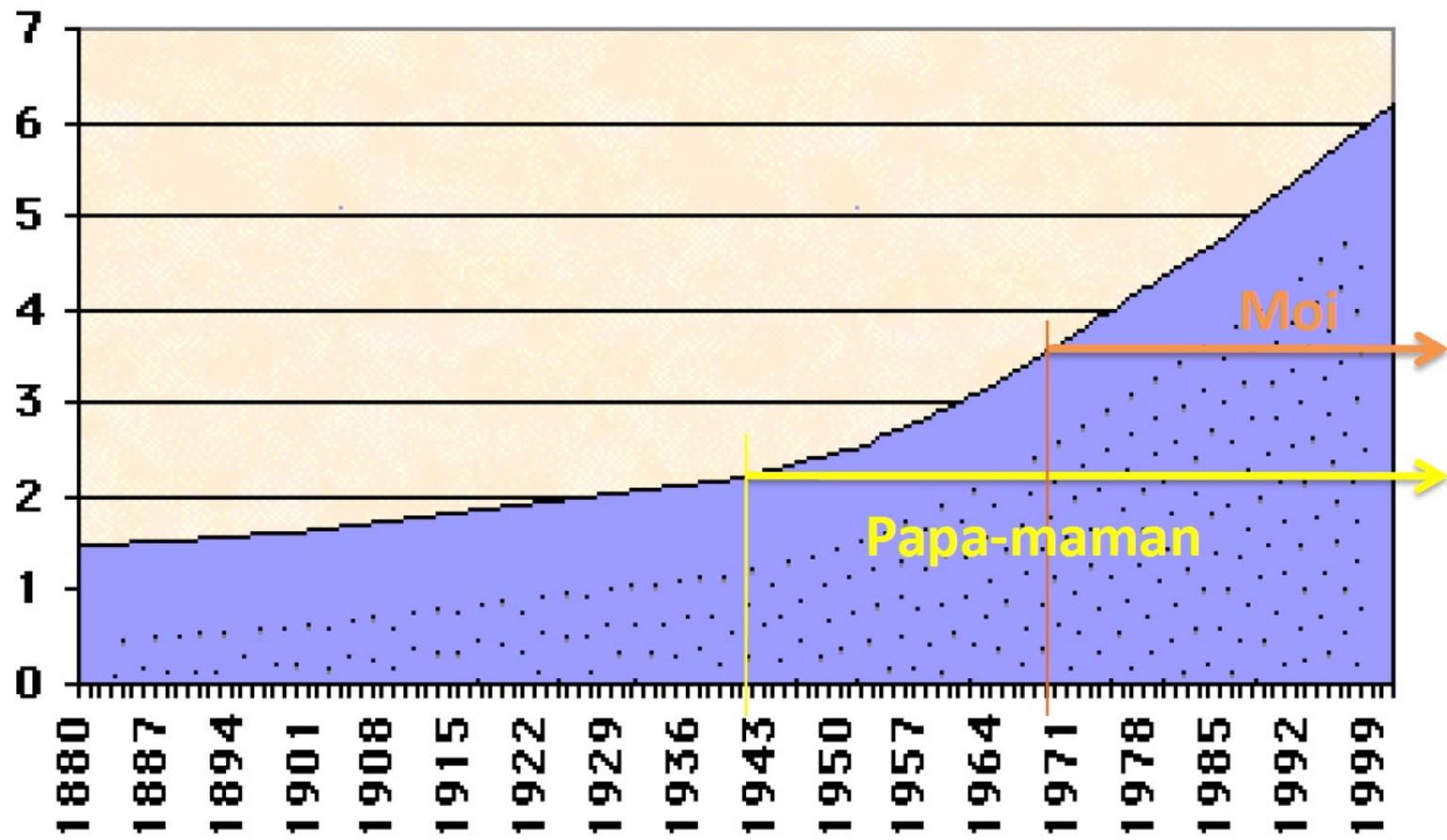
1. Linéaire
2. = 1 + ressources limitées
3. = 2 + effet Hallee
4. = 3 + prélèvement proportionnel à l'effectif

$$\frac{dx}{dt} = f(x)$$



Revenons à nos problèmes!

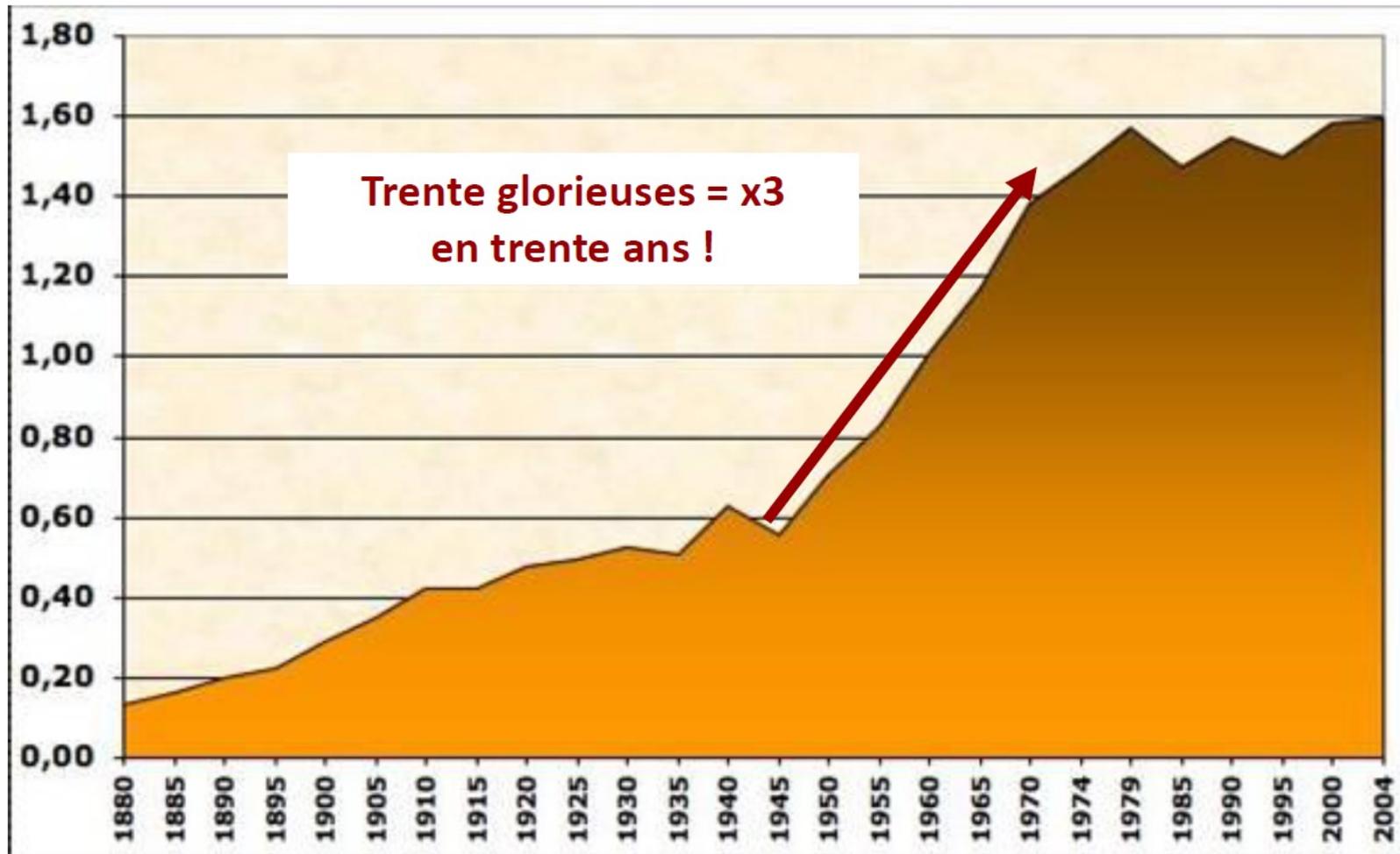




Population mondiale depuis 1880. Source : Musée de l'Homme

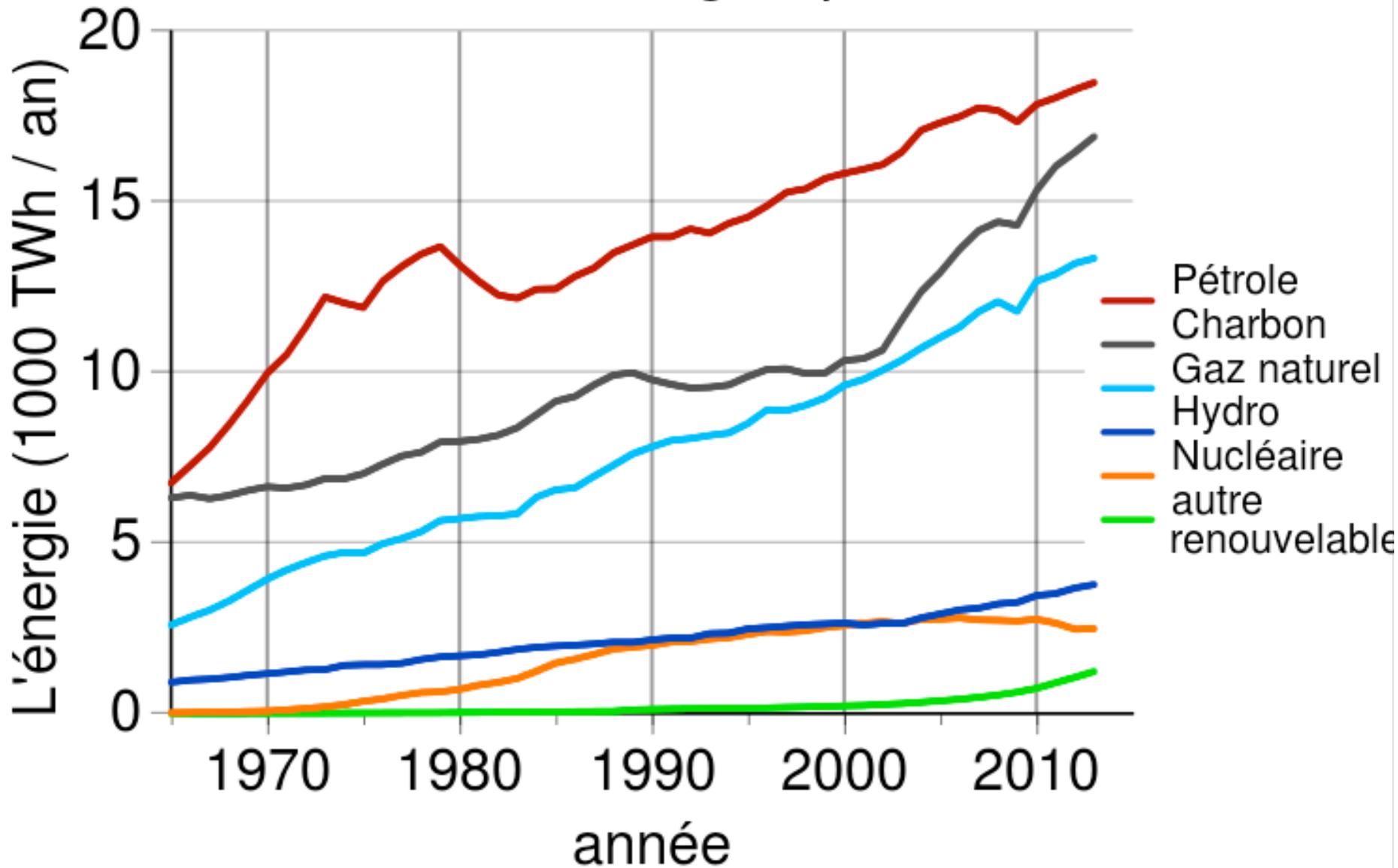
Consommation d'énergie

Tep

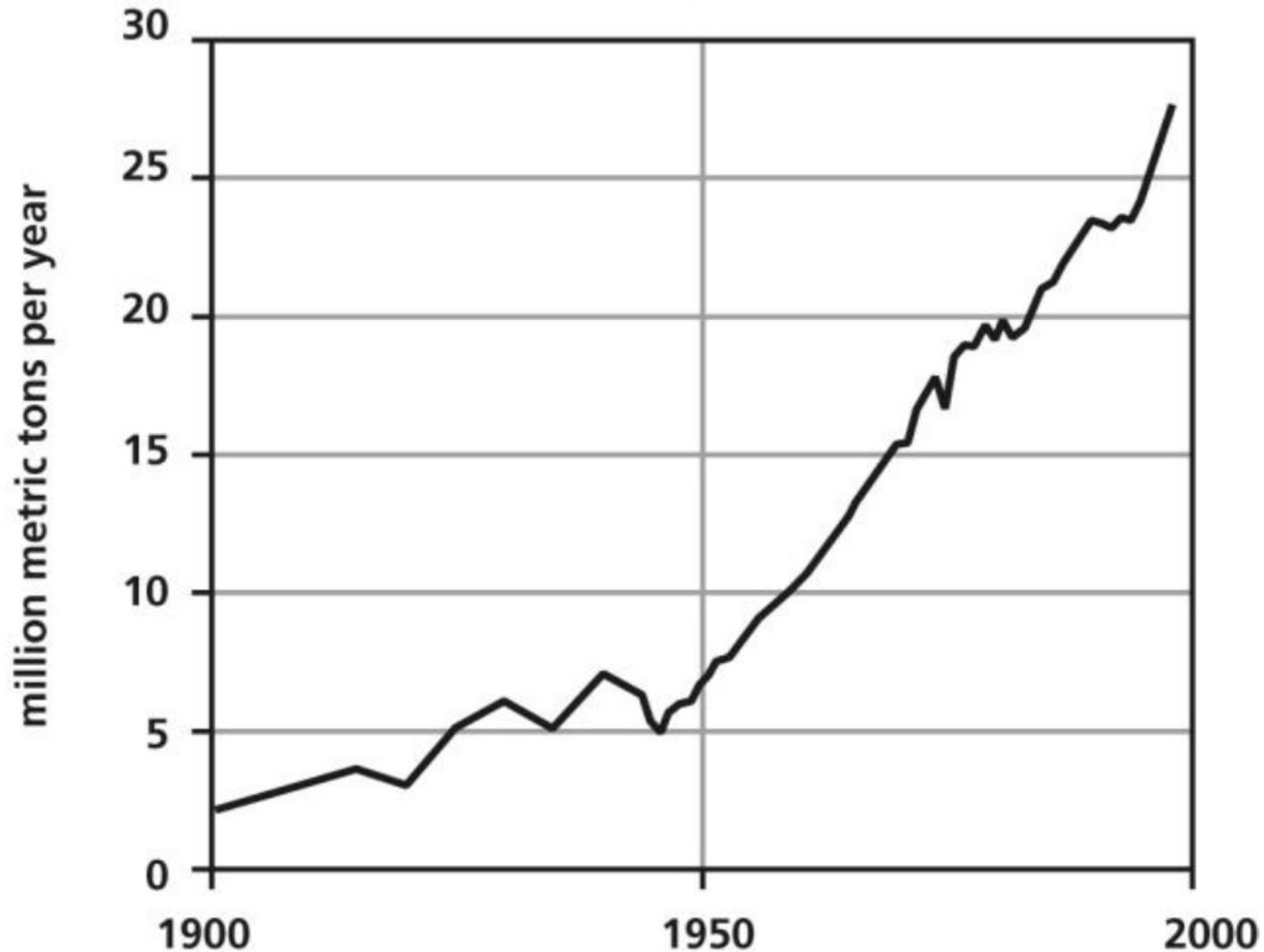


Consommation mondiale d'énergie primaire (hors biomasse) ...
x 7 en un siècle
... par personne !

Consommation énergétique mondiale

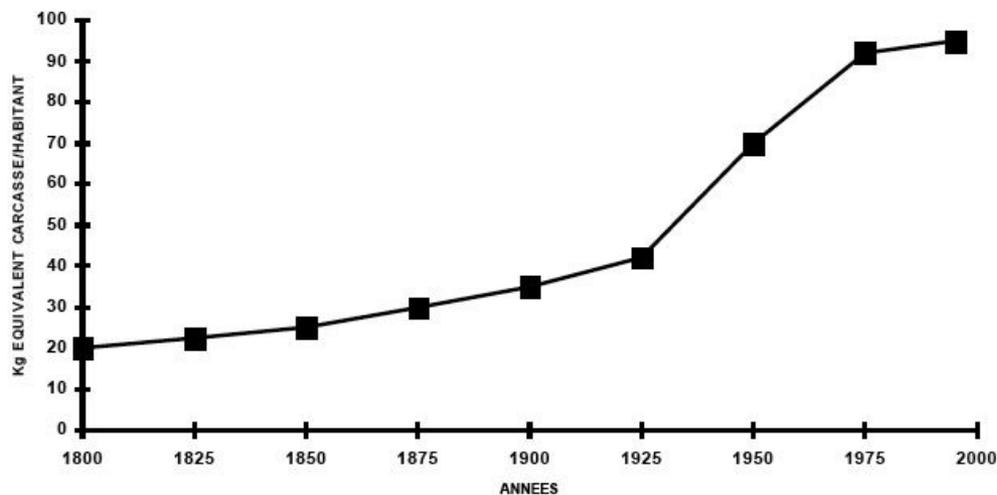


Métaux : toujours plus !



Consommation globale de cuivre + plomb + zinc + fer + nickel
x 10 à x 15

Consommation de viande : toujours plus !



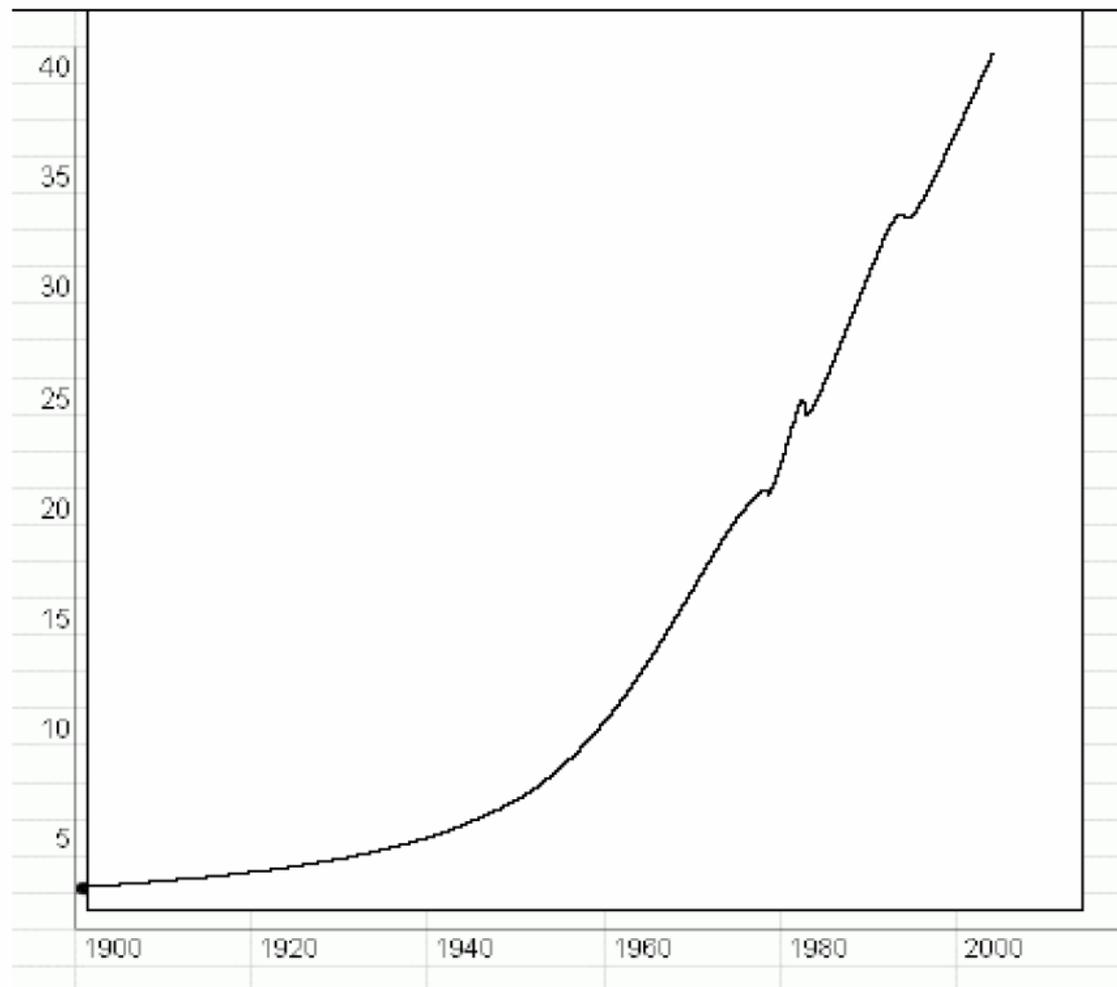
France : **x 5** en deux siècles
(source : Bernard Sauvans, INRA)



Monde : **x 2** en cinquante ans
(source : World Resource Institute)

... par personne !

Croissance économique depuis un siècle



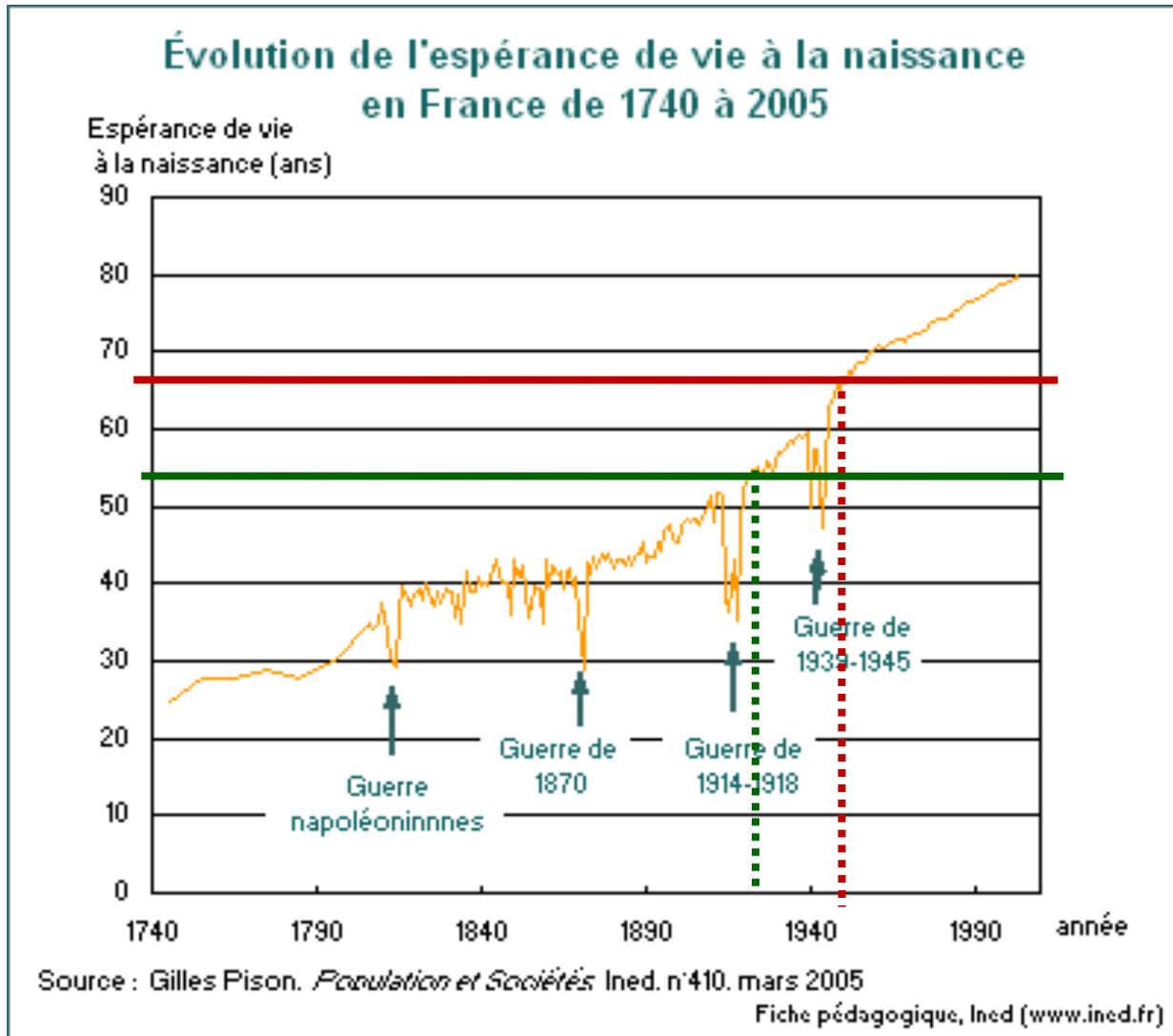
PIB mondial de 1900 à 2000

(reconstitution, car le PIB date de l'après-guerre), en dollars de 1990

x 20 environ

Source : Maddison, 1995

Espérance de vie...



(source : INED)

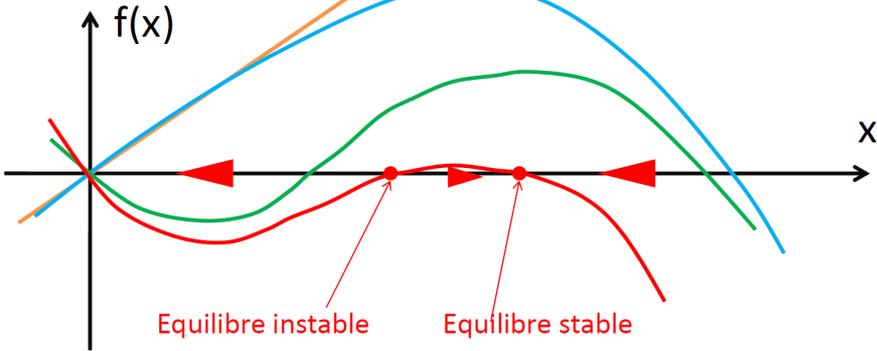
Espérance de vie aujourd'hui : **Monde : 67,3 ans**

- 1. Linéaire
- 2. = 1 + ressources limitées
- 3. = 2 + effet Hallee
- 4. = 3 + prélèvement proportionnel à l'effectif

$$dx/dt = f(x)$$

Que se passe t-il quand les stocks sont épuisés ?

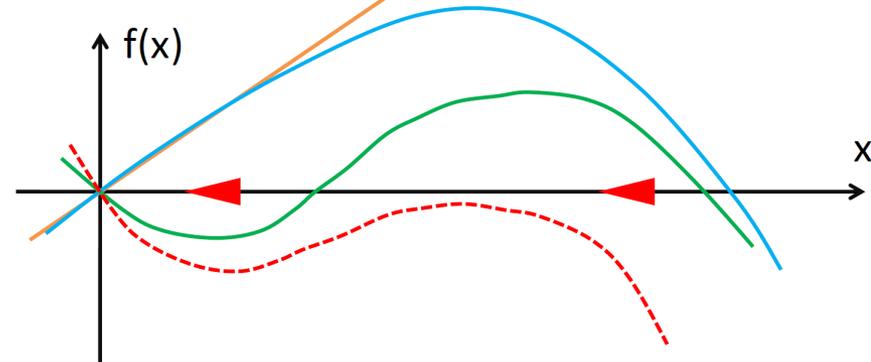
???



L'épuisement du stock de ressources

- 1. Linéaire
- 2. = 1 + ressources limitées
- 3. = 2 + effet Hallee
- 4. = 3 + prélèvement proportionnel à l'effectif

$$dx/dt = f(x)$$



Un stock naturel déjà bien entamé!

Rappel:

- Baisse des nappes phréatiques
- Erosion des sols
- Élévation des températures (climat dérégulé)

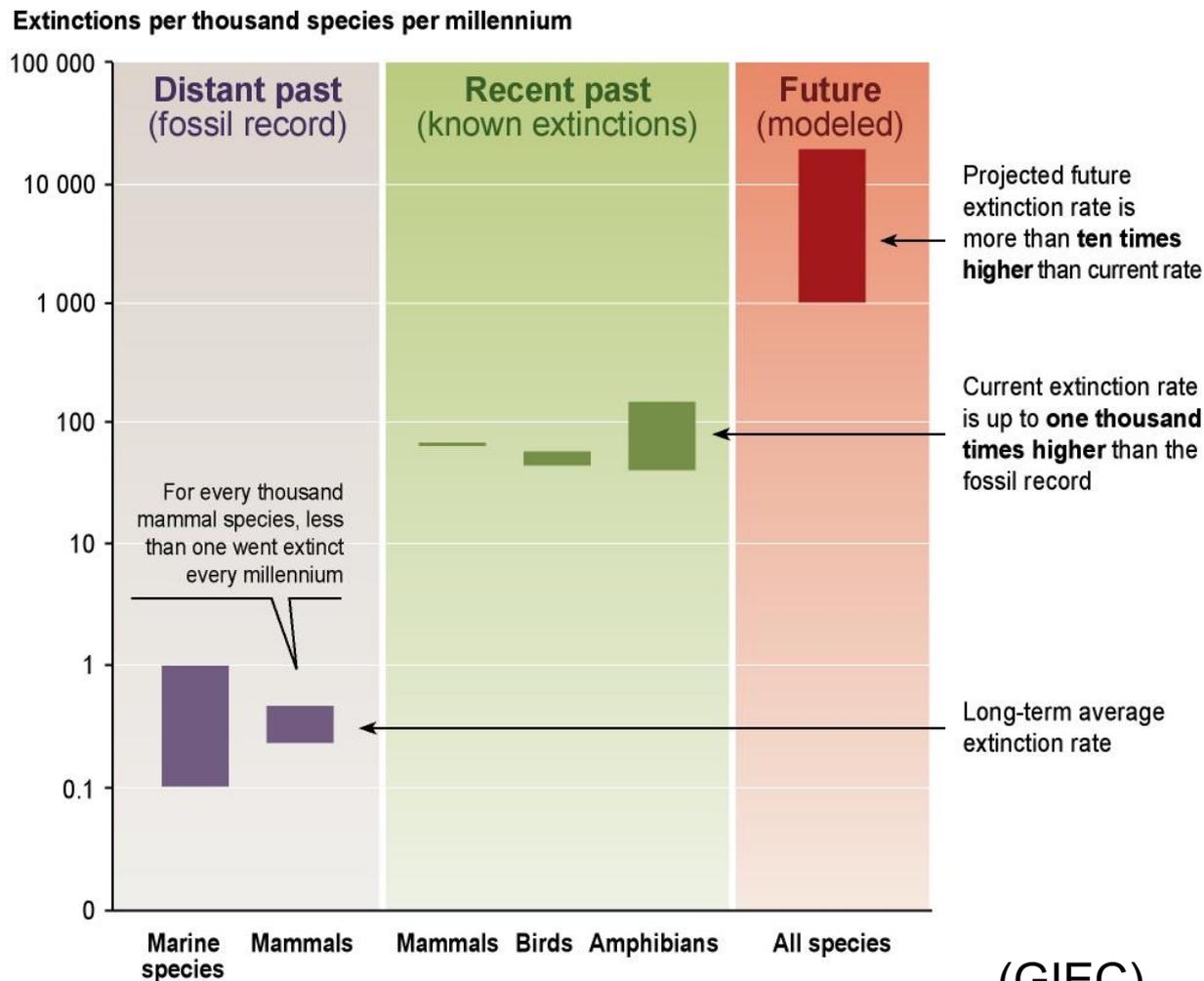
.... Mais bien plus encore !!!!!!!

Biodiversité : la 6^{ème} grande extinction

- Rythme actuel d'extinction des espèces :
17 000 à 100 000 par an
= 2 à 10 par heure
(= entre 100 et 1000 fois plus que la moyenne naturelle à long terme)

- Liste rouge de l'UICN :
mammifères : 1 sur 4
oiseaux : 1 sur 8
amphibiens : 1 sur 3

- 20% de toutes les espèces vivantes pourraient avoir disparu en 2030



Source: Millennium Ecosystem Assessment

Une mer sans poissons

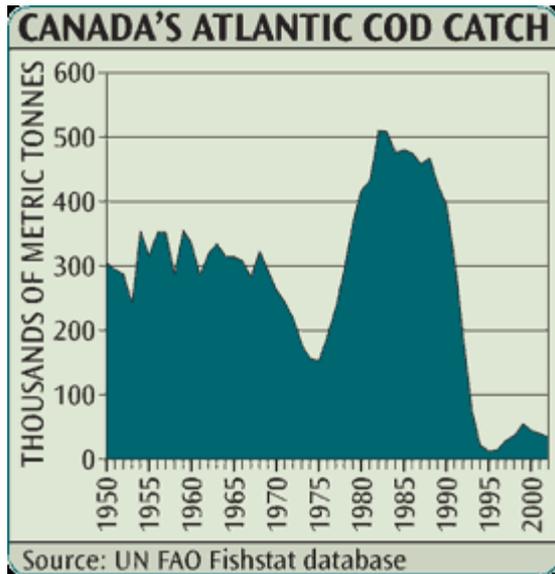
Prises

Biomasse

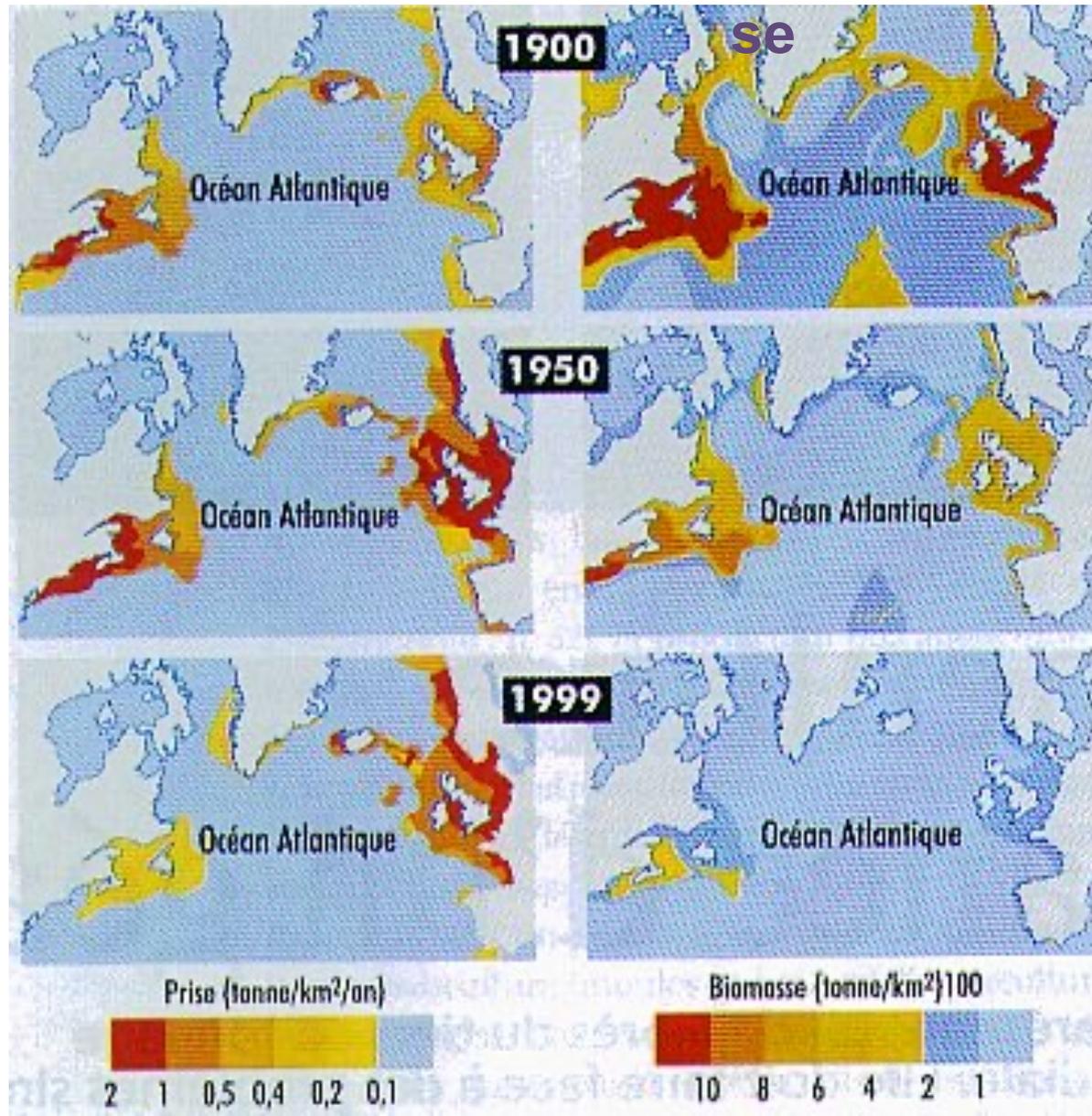
Prises et biomasse de poissons

Niveau trophique > 3,5
(reconstitué à partir de 23 modèles de réseaux trophiques

La Recherche, juillet 2002)

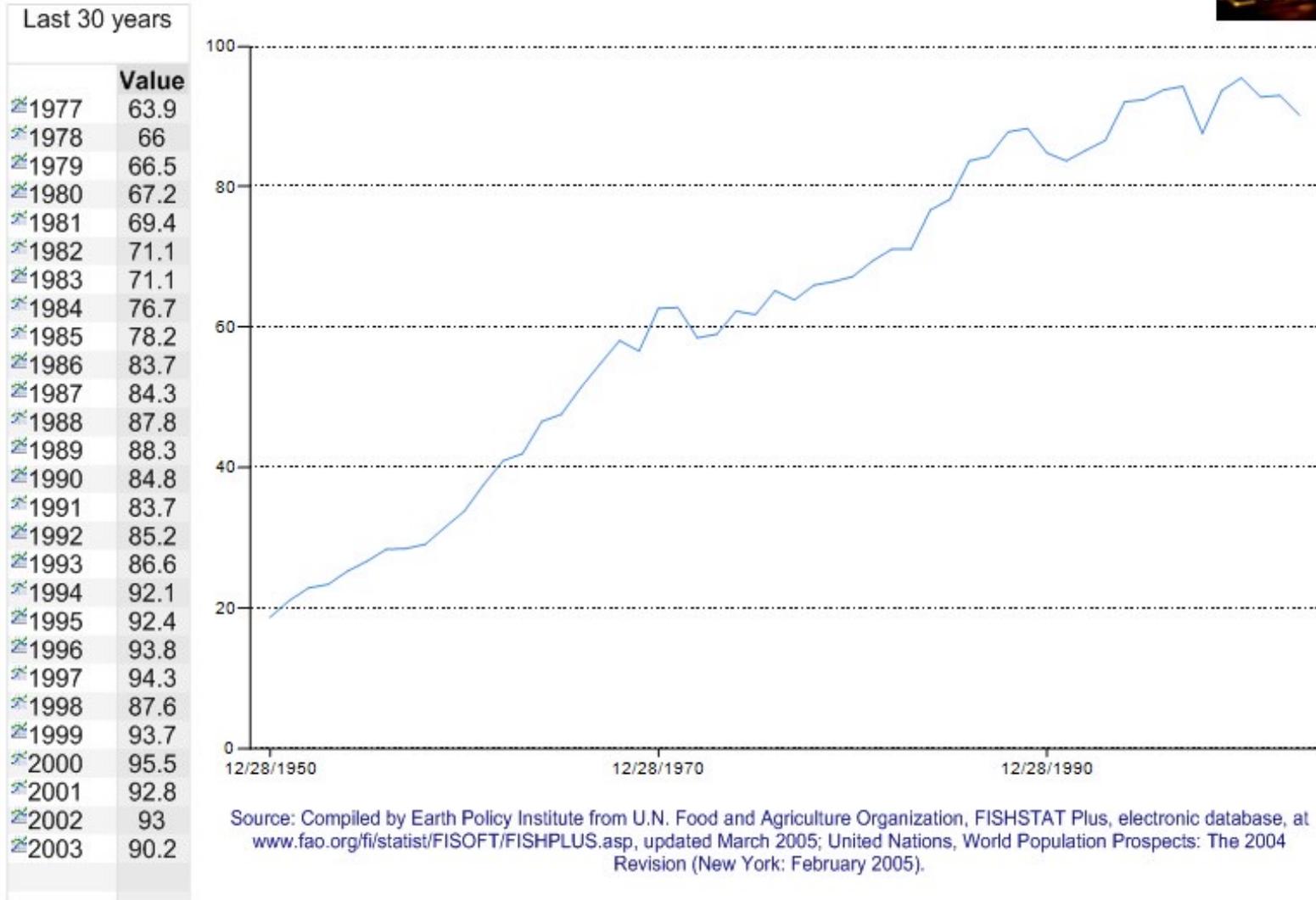


Prises, morue atlantique, Canada



Stagnation des prises de pêche

Fish catch 1950-2003 (Million tons)



Source : Earth policy institute / Alternative planétaire

Minerais



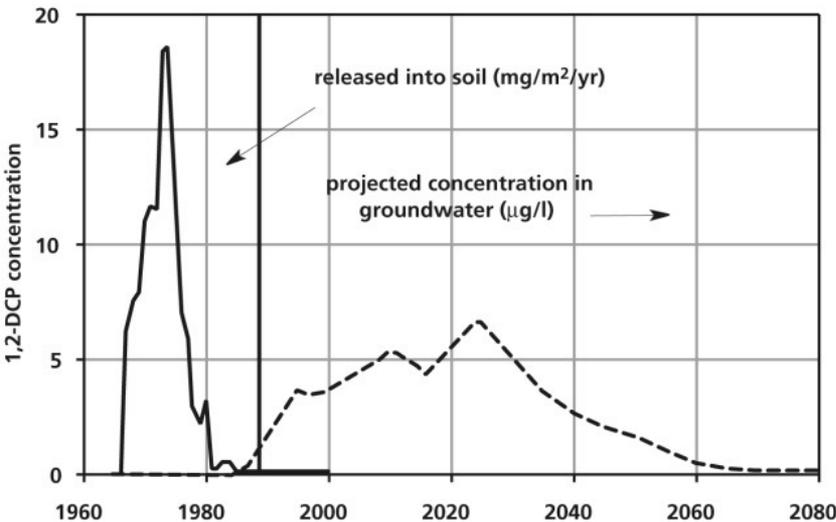
Evolution de la **teneur en cuivre des minerais** exploités aux Etats-Unis
(source : U.S. Bureau of Mines ; USGS)

Au Canada, les navires transportant des déchets contenant plus de **50 parties par million de PCB** doivent demander une autorisation spéciale.

Certains bélougas contiennent plus de **500 parties par million de PCB**

Polluants organiques persistants

Polychlorobiphényles, DDT, métaux lourds, ...



Lente percolation des polluants dans les eaux souterraines

Quantité de PCB en Europe (dans des transformateurs) : **200 000 tonnes**



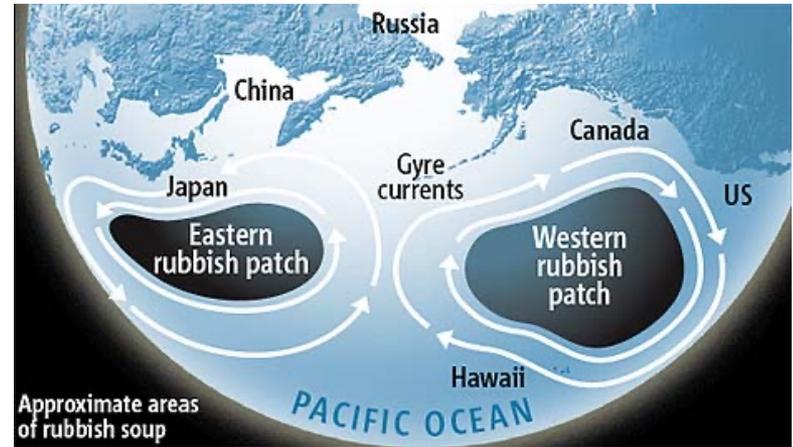
**Déchets toxiques
dangereux**

St Laurent, Canada

Une mer de plastique

Durée de vie des déchets plastiques : environ 500 ans

Vecteurs d'intoxication (fixent DDT, PCB)



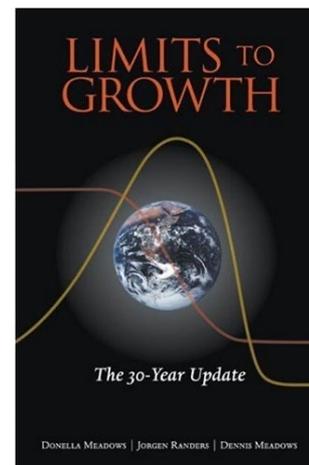
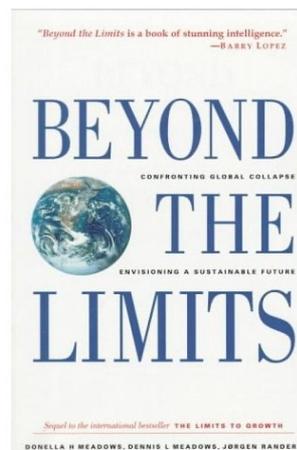
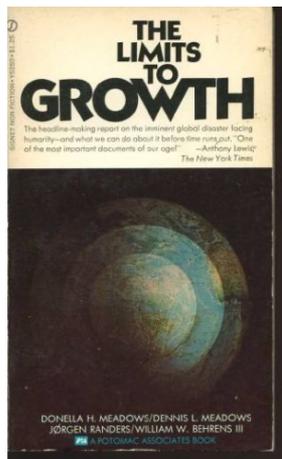
Source : Charles James Moore (Algalita Marine Research Foundation), Environmental Research 108 (2008) 131–139



Laysan albatross chick, Kure Atoll, 2002, photo: Cynthia Vanderlip, AMRF

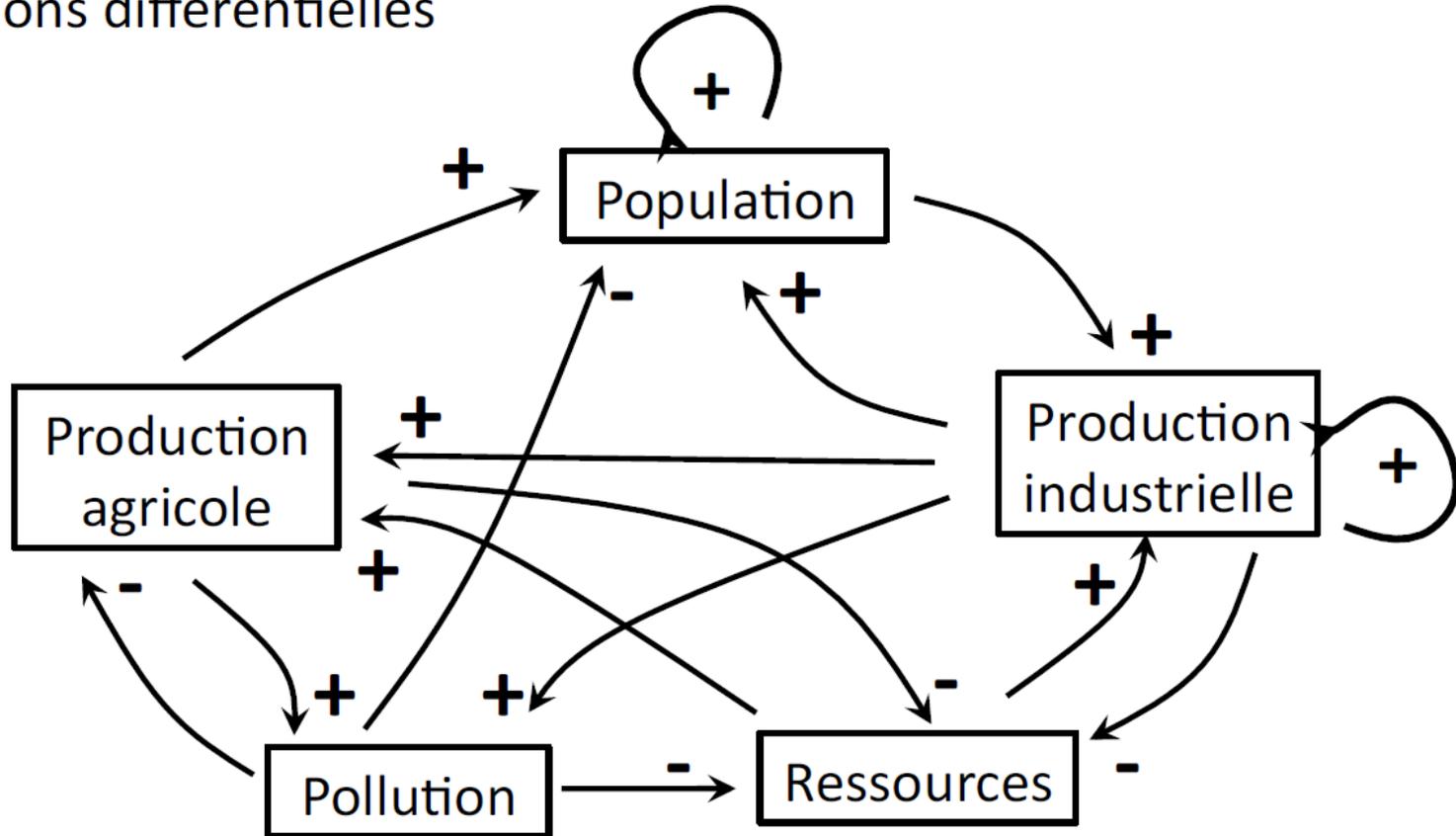
Le rapport du club de Rome, ou rapport « Meadows »

- **8 avril 1968** : création du « Club de Rome »
- Objectif : réfléchir aux « grands problèmes du monde », notamment l'interaction entre l'économie et l'environnement
- **1970** : Jay Forrester, MIT, modèle « World 1 »
- **1972** : Sortie de « Limits to growth », mise en œuvre du modèle « World 3 », sous la direction de Dennis Meadows, improprement traduit en français par : « Halte à la croissance ! »
- **1992** : « Beyond the limits »
- **2004** : « Limits to growth, the 30-year update »

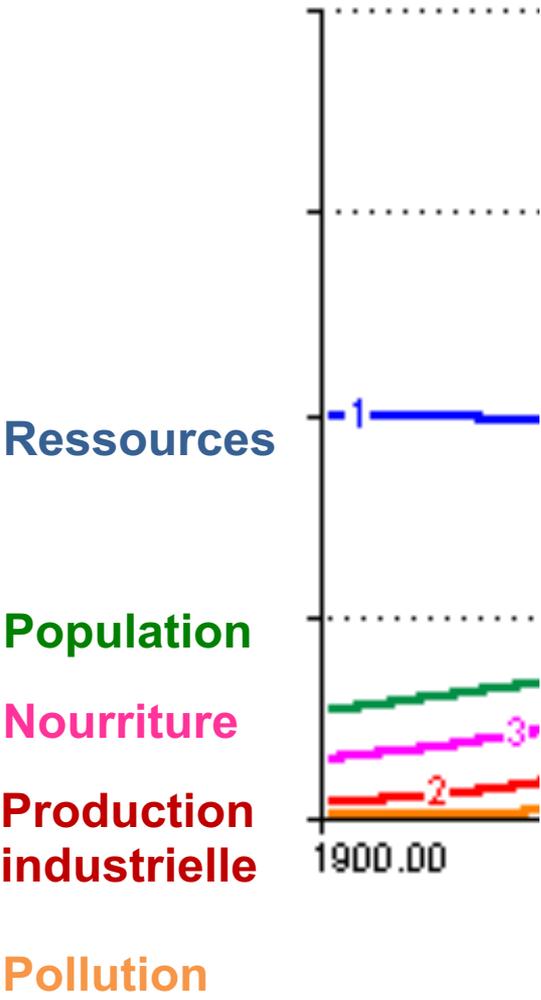


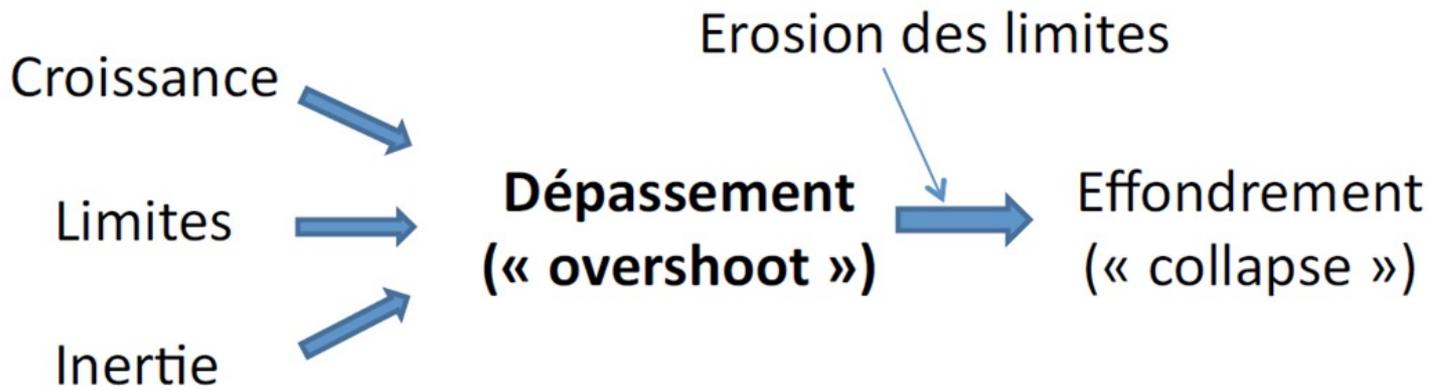
Les modèles « World » (1,2,3)

Modèles « intégrés » économie-environnement
Equations différentielles

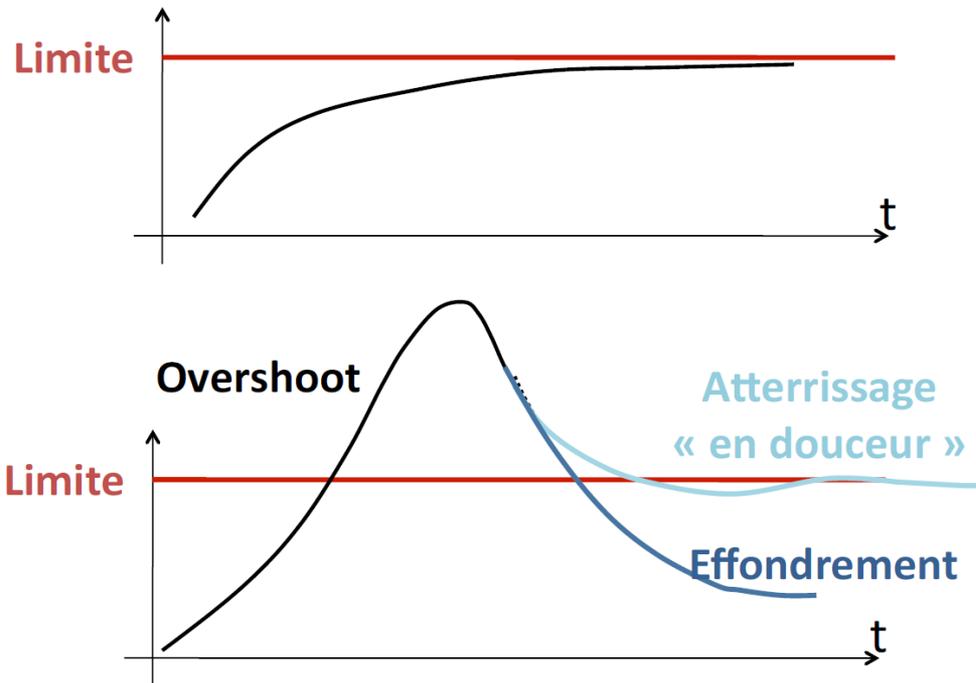


Scénario 1 (scénario de référence)





Confrontations à une limite



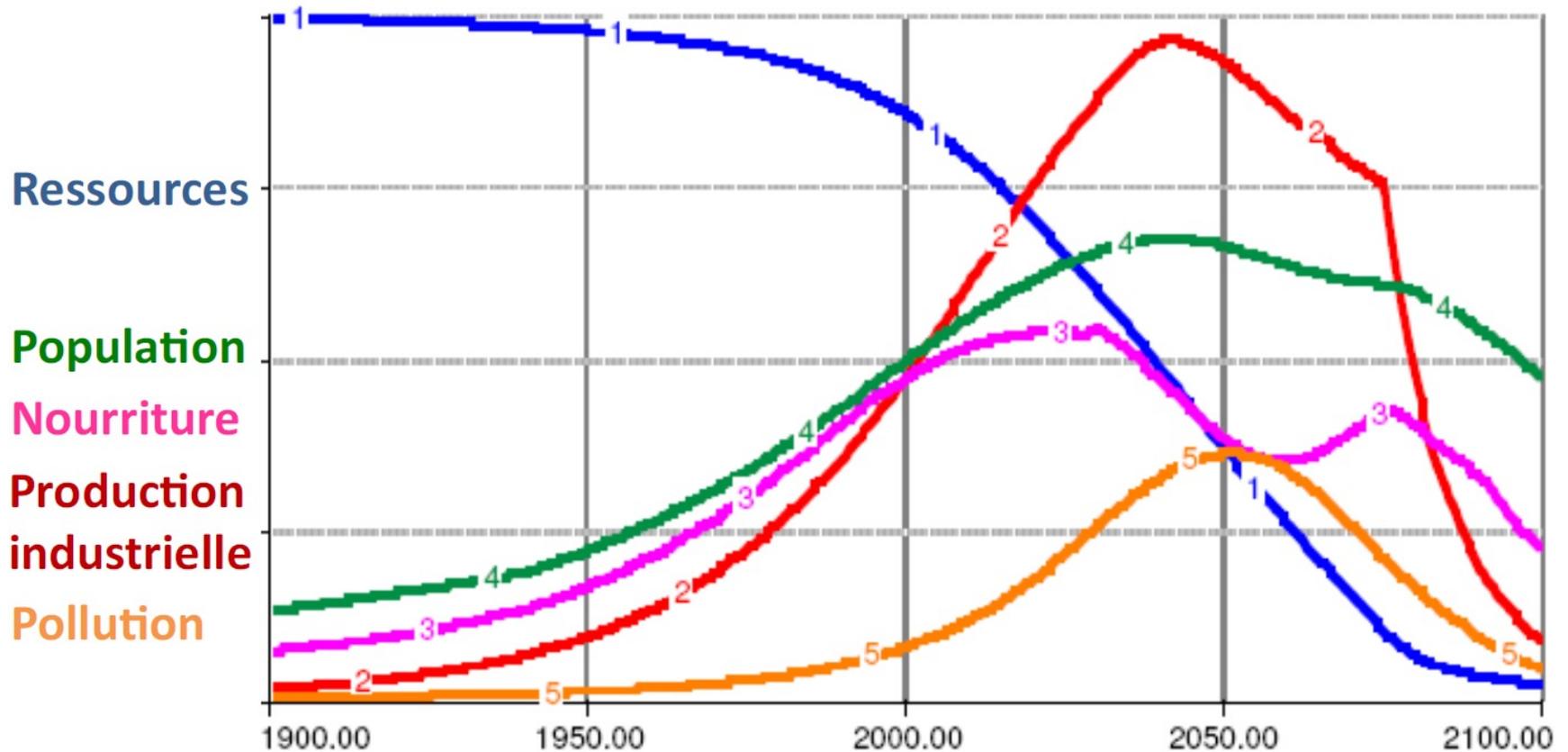
Scénario 3

Ressources non renouvelables abondantes

+

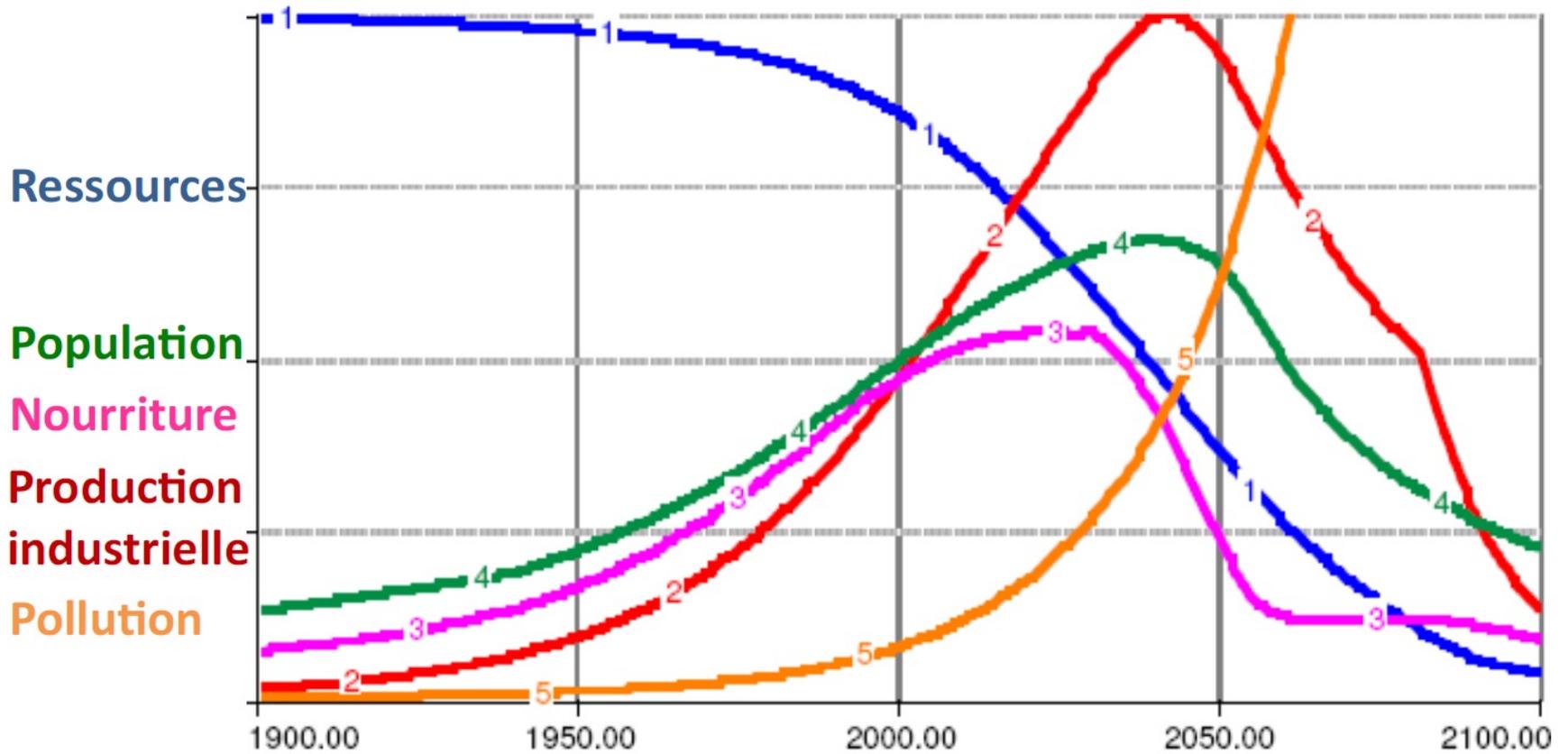
Développement de technologies de contrôle de la pollution

Crise alimentaire



Scénario 2

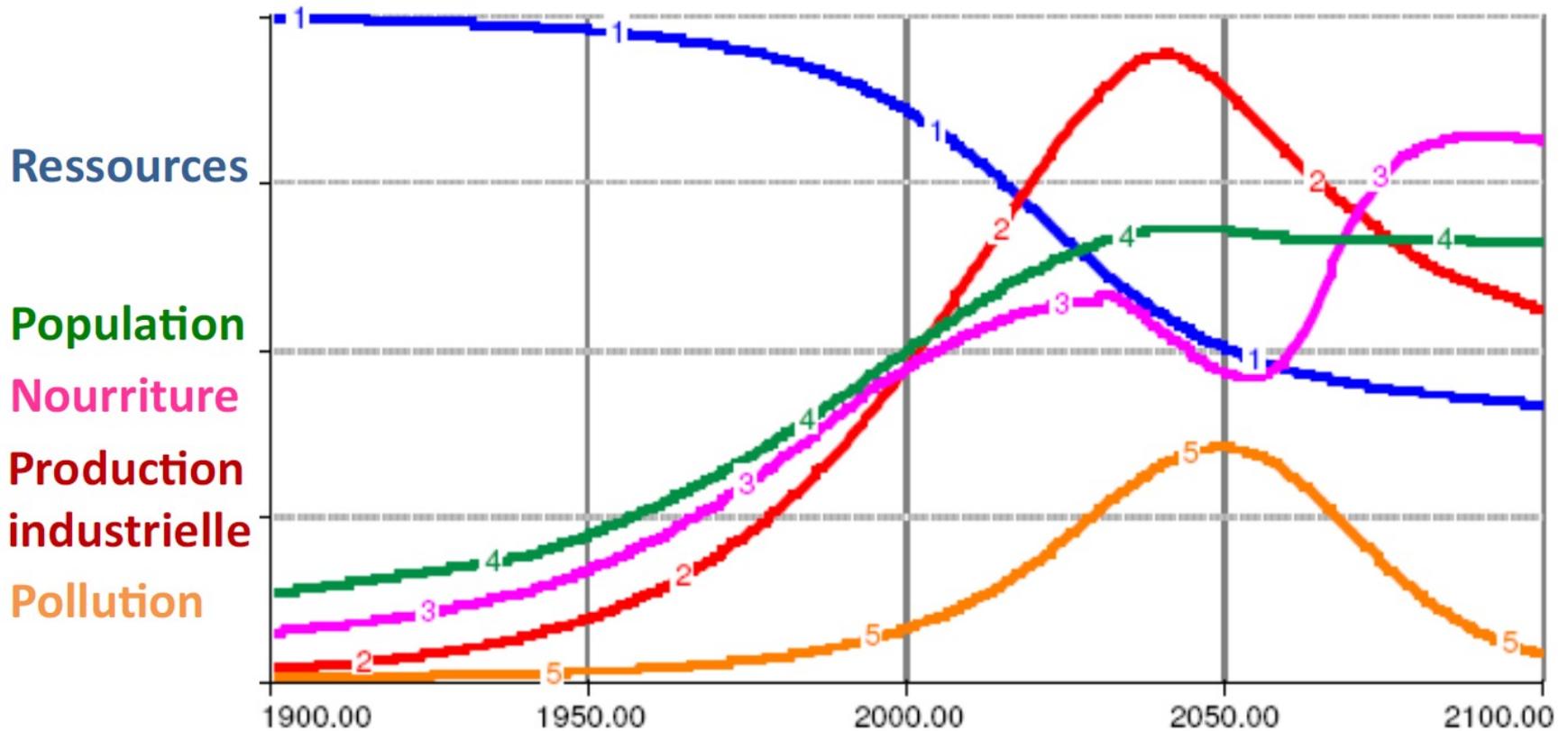
Ressources non renouvelables abondantes
Crise de pollution globale



Scénario 6

Ressources non renouvelables abondantes +
Développement de technologies de contrôle de la pollution, d'amélioration
des rendements agricoles, de protection des sols, et d'efficacité d'utilisation
des ressources

Crise des coûts des technologies développées



Conclusion du rapport Meadows

Un effondrement de la civilisation industrielle sera difficile à éviter

Effondrement =

- diminution de la production industrielle
- diminution de la production agricole
- diminution de la population

... au cours du 21^{ème} siècle

Dépassement de charge / effondrement : les cerfs du plateau du Kaibab



Cerf-Mulet

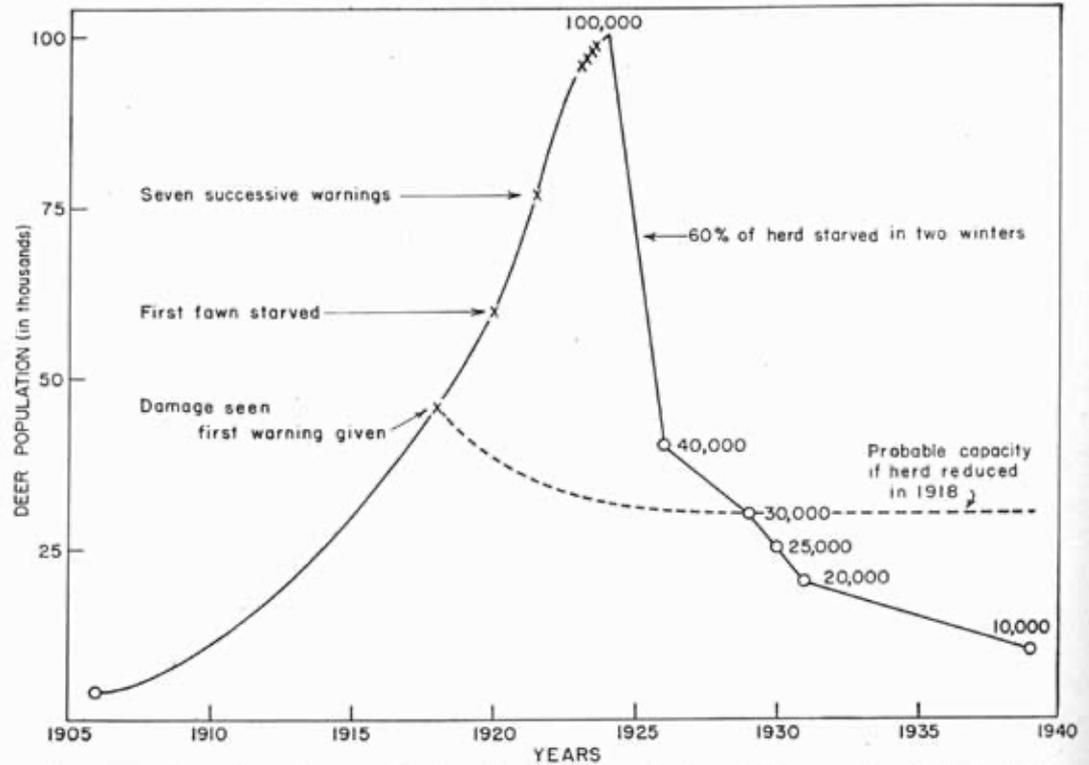


Fig. 252. The effect of removal of predators on populations of deer on the Kaibab plateau in Arizona (727,000 acres). Six hundred pumas were removed in 1907–1917, 74 in 1918–1923, and 142 in 1924–1939. Eleven wolves were removed in 1907–1923 and were exterminated by 1926. Three thousand coyotes were removed in 1907–1923 and 4388 in 1923–1939. (Redrawn from Leopold.)



Plateau du Kaibab



Puma

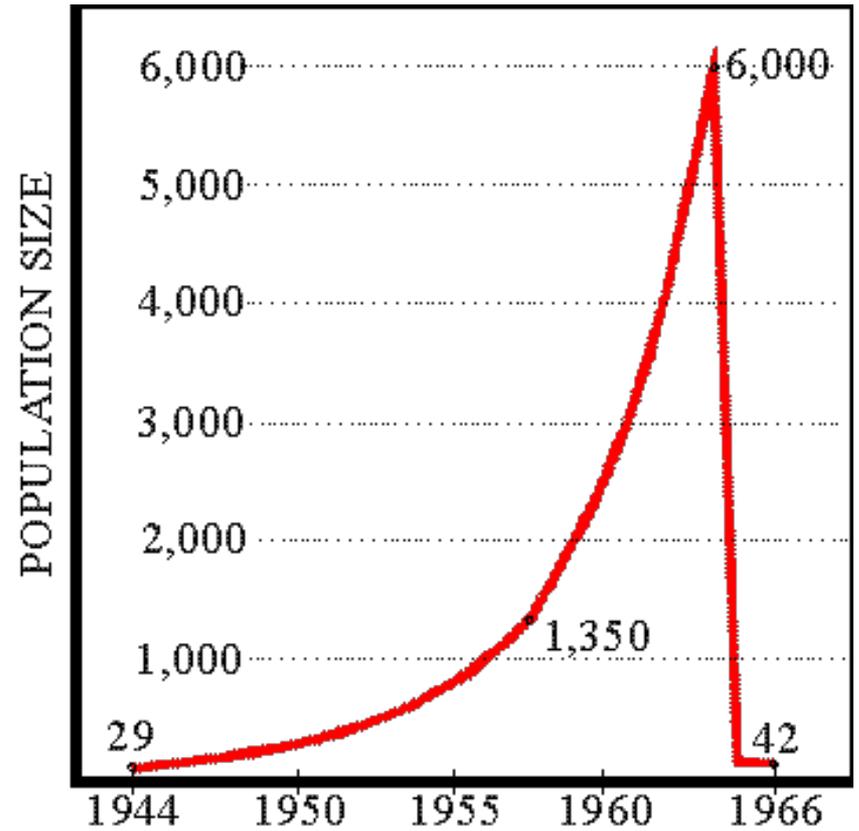


Loup



Coyotte

Les rennes de l'île de Saint-Mathieu



Assumed population of the St. Matthew Island reindeer Herd. Actual counts are indicated on the population curve.

Source : THE INTRODUCTION, INCREASE, AND CRASH OF REINDEER ON ST. MATTHEW ISLAND By David R. Klein Alaska Cooperative Wildlife Research Unit, University of Alaska, College

Iles de Pâques



1722 : premiers européens débarquent sur l'île de Pâques

- terre pauvre, pas d'arbre, pas d'arbustes de plus de 3 mètres
- peu de ressources alimentaires
- pas d'animal comestible (sauf rat et quelques poulets)
- embarcations des insulaires : petites pirogues peu étanches



Iles de Pâque



Etudes botaniques ont montré l'existence passée d'une forêt riche à la végétation luxuriante

Palmiers (tronc jusqu'à deux mètres de diamètre, hauteur jusqu'à 30m)

Au moins 6 espèces d'oiseaux terrestres indigènes (aujourd'hui aucun), au moins 25 espèces d'oiseaux de mer en période de nidification (site le plus riche de tout le pacifique)

Effondrement de l'île de Pâques

- Vers l'an 900 : colonisation de l'île de Pâques par des polynésiens
- Déforestation totalement achevée vers 1600
- Perte de ressources alimentaires sauvages : fruits sauvages comestibles, noix, sève de palmier (-> vin, miel, sucre), oiseaux
- Pénurie de ressources halieutiques (plus de possibilité de pêcher en haute mer le marsouin, qui représente 30% des ossements retrouvés dans les dépotoirs anciens, le thon)
- Seule ressource alimentaire animale sauvage restante : le rat
- Perte de matériaux : bois pour la construction de logements, de pirogues, pour fabriquer des harpons, feuilles de palmier (toits, voiles, paniers), écorces (cordes, étoffes), bois de chauffe, plumes des oiseaux
- Erosion des sols (pluie, vent), dessiccation, lessivage des nutriments
- Famine, chute démographique (diminution d'environ 70% de la population)
- Chaos politique (renversement du pouvoir en place par chefs militaires), conflits (destruction des statues, pointes de lances), famine (statues de personnages affamés), cannibalisme (récits de cannibalisme dans la tradition orale, os humains retrouvés dans les détrit)
- 1620 : érection des derniers moai(le plus grand, le Paro, un des derniers)
- L'effondrement a suivi de très près l'apogée démographique, culturel, l'érection des plus grandes statues (disparition de 70% de la population)

Effondrement de l'île de Pâques

Mayas



Effondrement des mayas

- Début de la civilisation «classique» vers 250 après JC
- Augmentation exponentielle (monuments, bâtiments), jusqu'à une apogée au 8^{ème} siècle après JC.
- Fin 8^{ème} siècle –début 9^{ème} siècle : effondrement (dernière date figurant sur un monument en 909 après JC) (en fait de multiples effondrements sur une période plus étendue)
- Signes de maladies et de malnutrition sur les ossements humains retrouvés

Causes :

1. Croissance démographique (Malthus)
2. Déforestation puis épuisement et érosion des sols, sécheresse due à la déforestation
3. Conflits pour les ressources (maximum juste avant l'effondrement)
4. Sécheresse sans territoire de repli disponible
5. Manque de clairvoyance des dirigeants mayas

Indiens Anasazis

Sud-ouest des Etats-Unis :
effondrements de nombreuses
civilisations entre 1000 et 1500 après JC
(3600 sites archéologiques)

Environnements fragiles :

- pluviosité faible
- sols fragiles
- arbres poussent lentement



Chaco canyon : plus hauts bâtiments
d'Amérique du nord jusqu'en 1880
(construction des gratte-ciels de
Chicago)



Effondrement des Anasazis

- Apparition vers 600 après JC
- Effondrement à partir de 1120 et disparition entre 1150 et 1200 après JC
- Tentatives de canalisation de l'eau aboutit à la création d'arroyos (petits canyons), baisse de la nappe phréatique
- Déforestation
- Sécheresse 1130-1180 (élément déclencheur, mais pas la cause profonde)

Sumériens



4500 av JC : naissance de la civilisation de Sumer

Culture de l'épeautre (variété de blé), irrigation, civilisation « hydraulique », premières villes, première écriture (cunéiforme)



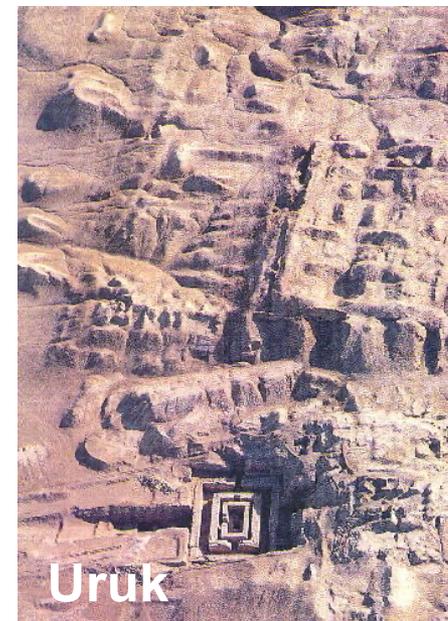
Croissant « fertile »

Irrigation a causé un enrichissement progressif des sols en sel (remontée des eaux de la nappe phréatique)

Pénurie de ressources alimentaires

Civilisation disparue vers 2000 av JC

Le croissant fertile aujourd'hui : quelques sites archéologiques sumériens



Effondrement des sumériens

Irrigation a causé un enrichissement progressif des sols en sel (remontée des eaux de la nappe phréatique)

Pénurie de ressources alimentaires

Civilisation disparue vers 2000 av JC

Autres effondrements

- Vikings (Groenland)
- Empire Khmer d'AnkorVat (Extrême Orient)
- Grèce mycénienne des Achéens (Europe)
- Crète minoenne
- Harrapande la vallée de l'Indus (Inde)

Le développement durable, c'est (au moins) ça

1. Ne pas utiliser une **ressource renouvelable** plus vite qu'elle ne se renouvelle
2. Ne pas utiliser une **ressource non renouvelable** plus vite qu'on ne peut la remplacer par une ressource renouvelable
3. Ne pas rejeter plus dans **l'environnement** que ce qu'il peut absorber (sans être sensiblement perturbé)

Quelques références

- **J. Diamond**: *Effondrement, 2006* [*Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed*]
- **Meadows** et al. : Les Limites à la croissance (dans un monde fini), 2012 [*Limits to Growth: The 30-Year Update*]
- Le site de J.-M. **Jancovici** : www.manicore.com
- Joseph A.Tainter: L'Effondrement des Societes Complexes, 2013
- **MERCI à Emmanuel Risler!!!**