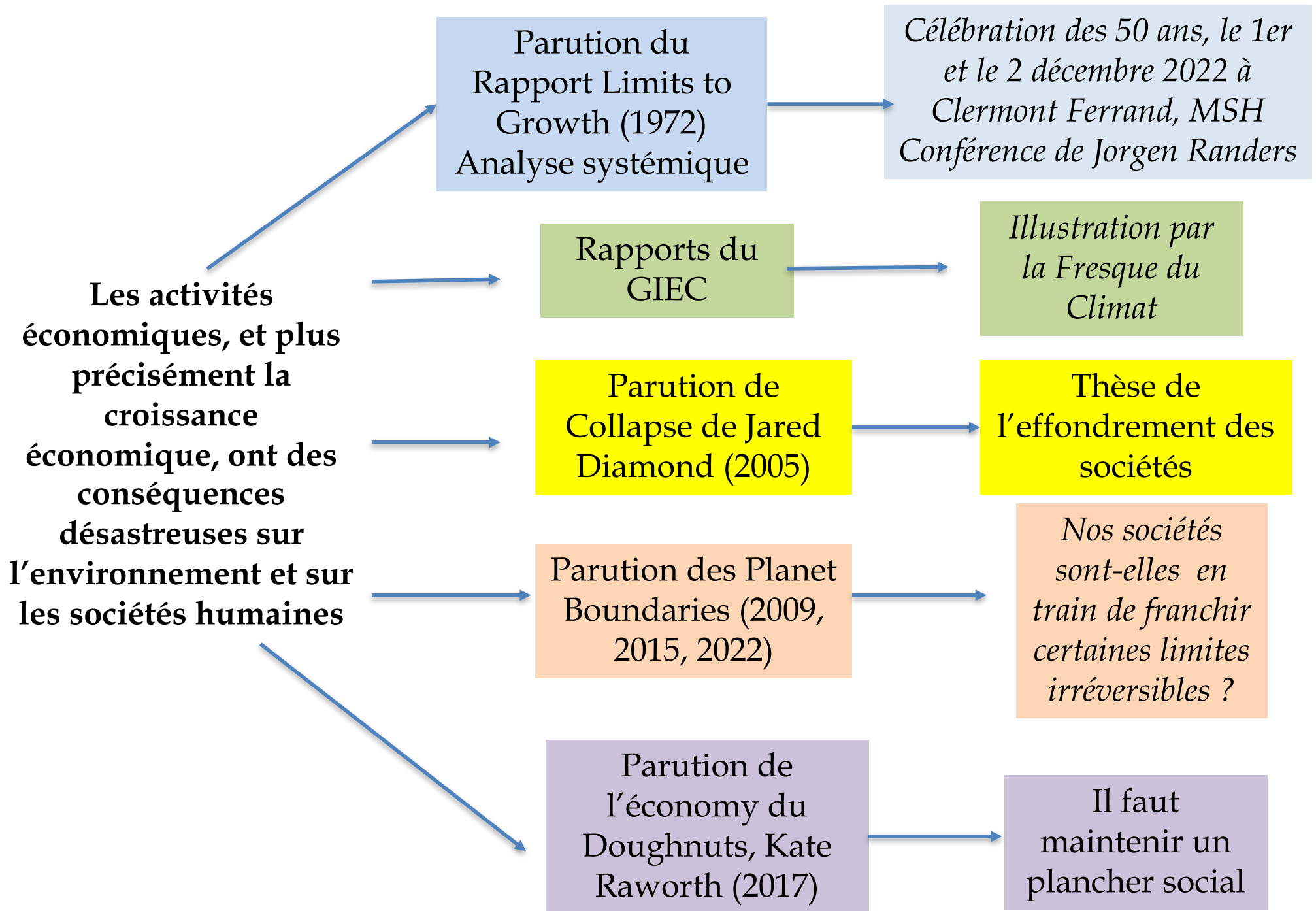
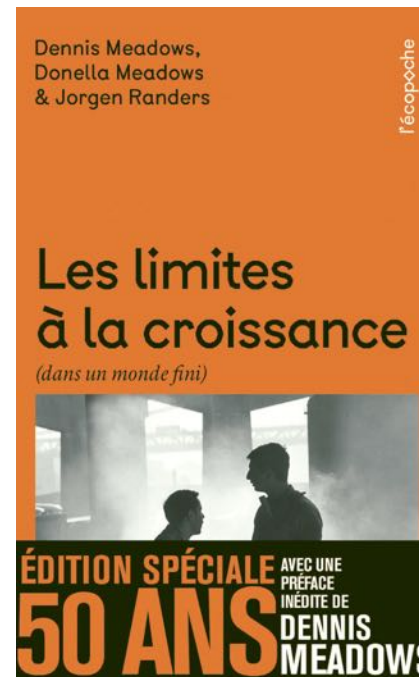
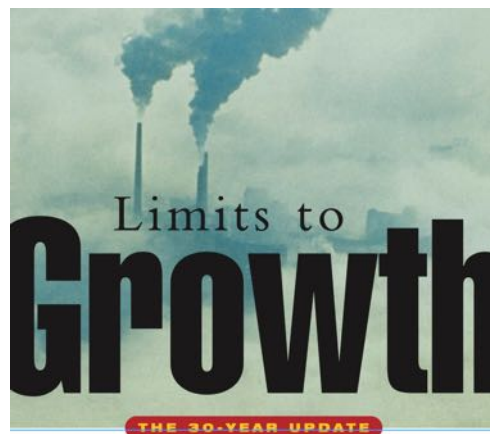
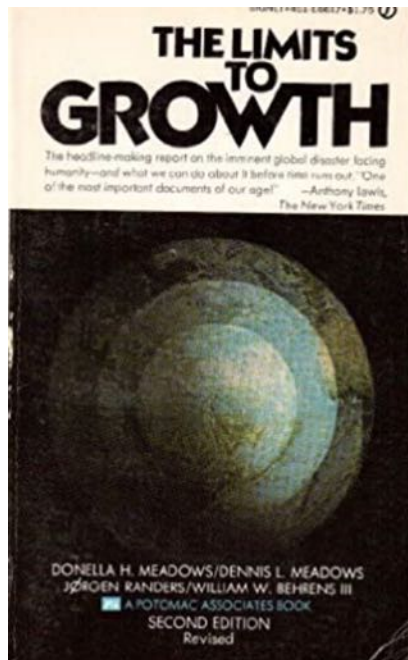


POURQUOI S'ENGAGER
DANS LA VOIE DE LA
DURABILITE FORTE ?



Limits to Growth (1972, 1992, 2002, 2022) – immersion dans l'analyse systémique ou la dynamique des systèmes



Celebration 50th Years of
Limits to Growth
1972- 2022



Clermont-Ferrand, France
MSH, Decembre 1st and 2nd, 2022

Donella Meadows • Jorgen Randers • Dennis Meadows



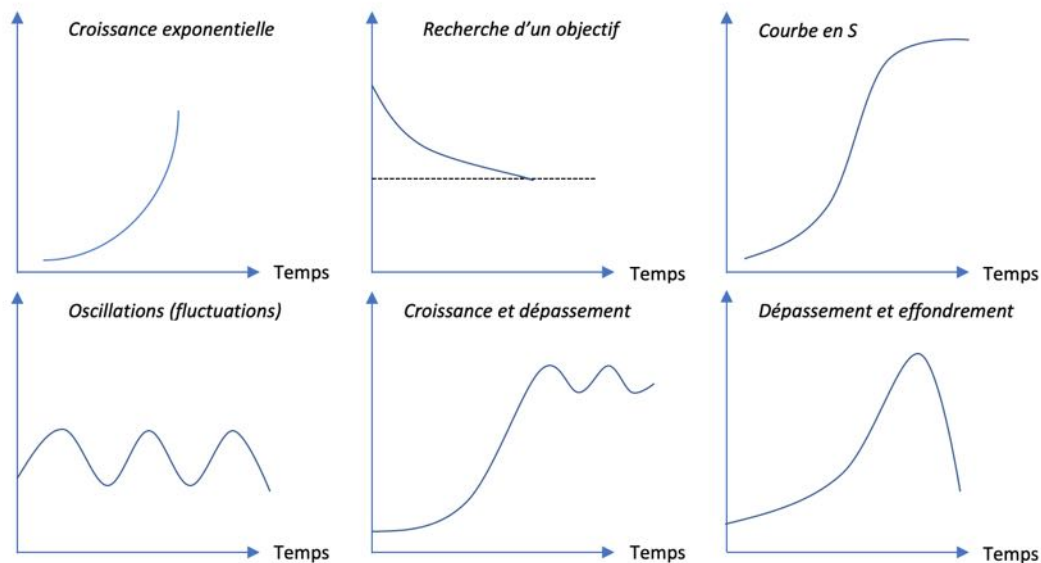
Contact : Arnaud Demer (arnaud.demer@uca.fr) Tél : 03 33 206 72 20 04 75 <https://erasme.uca.fr/>

Les 7 compétences de la pensée systémique (Richmond, 2000)

Richmond (2000) a défini ce qu'il appelle les 7 compétences associées à la pensée systémique. Compétences qui nous semblent plutôt correspondre à un guide méthodologique susceptible de comprendre certaines étapes importantes dans le processus mental.

§ 1. **La pensée dynamique** doit nous aider à définir le problème auquel nous voulons nous attaquer. La mise en système du problème (jeu d'hypothèses) donne lieu à l'apparition d'un modèle de comportement (Pattern of Behavior) ayant sa propre dynamique temporelle (Senge et al., 1994 ; Sterman, 2000).

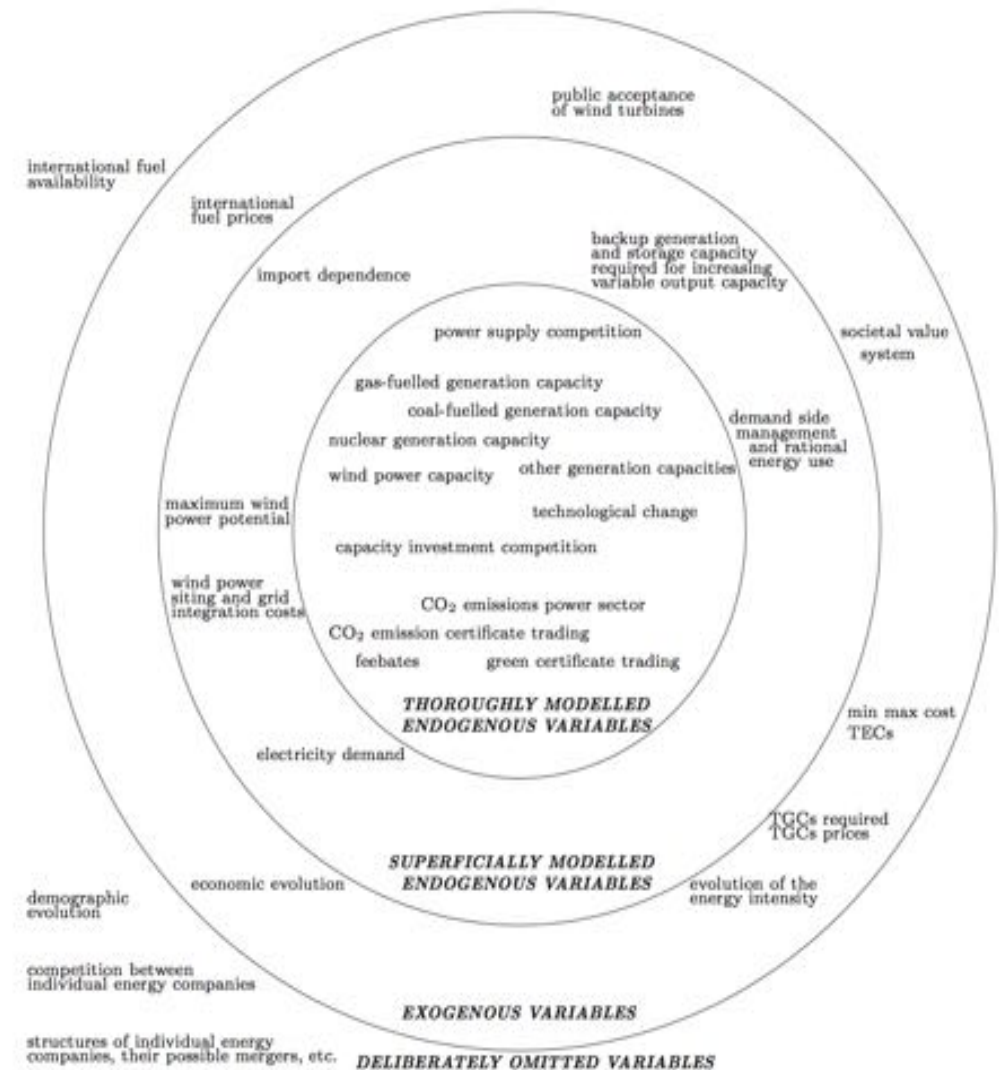
Différents modèles de comportements



Dans la figure suivante, six modèles de comportement sont décrits. *La croissance exponentielle* peut s'appliquer à la contamination générée par un virus, plus le nombre de personnes contaminées est important, plus la pente de la courbe sera importante. *La courbe en S* introduit un point d'inflexion, elle traduit une perte de vitesse dans la transmission du virus, les personnes contaminées sont toujours plus nombreuses mais le rythme de la contagion ralentit. La courbe *dépassement et effondrement* suggère que le nombre de cas contaminés commence à décroître, c'est la fin de l'épisode pandémique toutefois, la récurrence est possible et les cas (*oscillations* ou *croissance et dépassement*) sont toujours possibles).

§ 2. Le système en tant que réflexion sur les causalités est l'étape suivante.

Après avoir identifié un modèle de comportement dans le temps, l'étape suivante consiste à construire un modèle pour expliquer comment le comportement se manifeste. Il est nécessaire de définir les limites du système. La limite étendue explique ce qu'il faut inclure et ce qu'il faut exclure (variables endogènes et exogènes). La limite intensive définit la profondeur ou le niveau de détail auquel les éléments inclus dans le modèle sont représentés. Le modèle repose principalement sur des variables endogènes explicatives - des drivers qui impulsent la dynamique du système. Ces drivers introduisent des variables endogènes de second rang, de troisième rang..., puis des variables exogènes... Il existe également des variables endogènes qui n'ont pas été prises en compte (et dont il faudra expliquer la non prise en compte).



§ 3. *Forest Thinking* regroupe les détails pour nous donner une image « moyenne » du système

Elle réduit la complexité du modèle aux similitudes et aux principales voies d'accès. Ainsi, la pensée systémique retient l'approche globale pour comprendre des problèmes complexes... Elle ne peut accepter de simplifier la réalité toutefois elle devra se fixer certaines limites dans le niveau de détail du modèle.

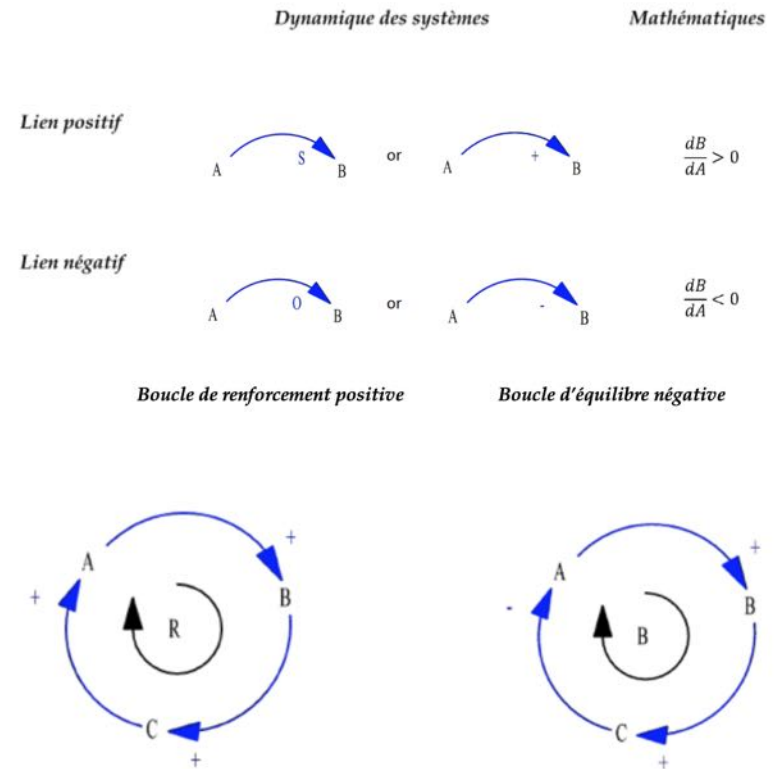
§ 4. **La réflexion opérationnelle** consiste à traiter les questions de causalité et de corrélation

Cette étape répond à la question suivante : Comment le comportement est-il réellement généré ? Quelle est la nature du processus ? Le projet part du principe que les relations complexes et interdépendantes entre les éléments (variables) du système font que le test de corrélation et la liste des facteurs de réussite ne sont pas pertinents (test non significatif). La conception du système doit se concentrer sur les causalités.

§ 5. **La pensée en boucles** suppose que la causalité ne va pas dans un seul sens et que chaque cause n'est pas indépendante de toutes les autres.

L'effet se répercute généralement pour influencer une ou plusieurs des causes et les causes elles-mêmes s'influencent les unes les autres. Dans la dynamique des systèmes, le **diagramme des boucles causales** (CLD) est une simple carte d'un système avec toutes ses composantes et leurs interactions.

Le CLD nous aide à visualiser la structure et le comportement d'un système, et à analyser le système de manière qualitative. Il existe deux boucles de rétroaction dans le CLD. La boucle de rétroaction de renforcement (R) est positive et s'auto-améliore, conduisant à une croissance exponentielle ou à des effondrements dans le temps. La boucle de rétroaction d'équilibrage (B) est négative et constitue une structure d'équilibre ou de recherche d'objectifs dans les systèmes. Cette boucle est source de stabilité et de résistance au changement.

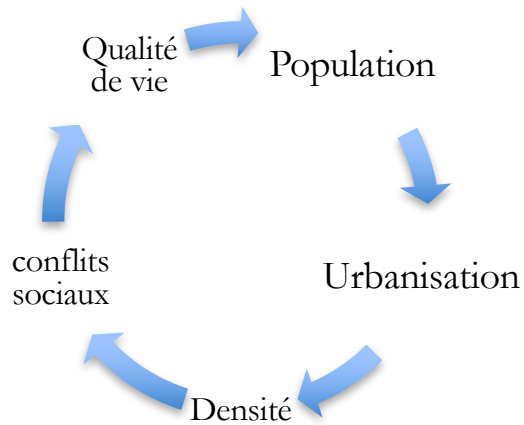


Source : Sterman (2000), Diemer (2004)

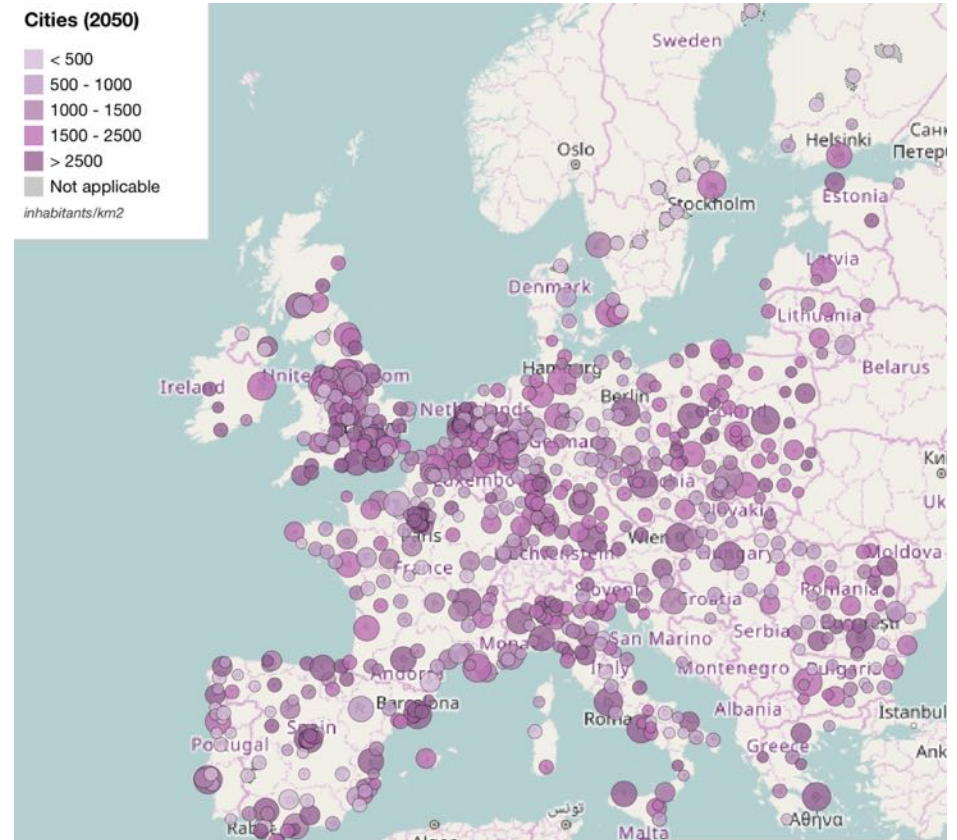
La mise en boucles définit le structure du système (modèle structurel)

Illustration par quelques boucles de causalités

Boucle de causalité Urbanisation – Population densité



Plus de population, plus d'urbanisation, une densité de population au m² qui s'accroît, plus de conflits sociaux, une dégradation de la qualité de vie.



Boucle de causalité

Urbanisation – Energie – Réchauffement climatique – Air Conditionné

Plus de croissance et plus de population signifient plus d'énergie, plus de GES, plus de réchauffement climatique... plus de système de climatisation... plus d'énergie..

USA : 45% de l'énergie provient de la climatisation.

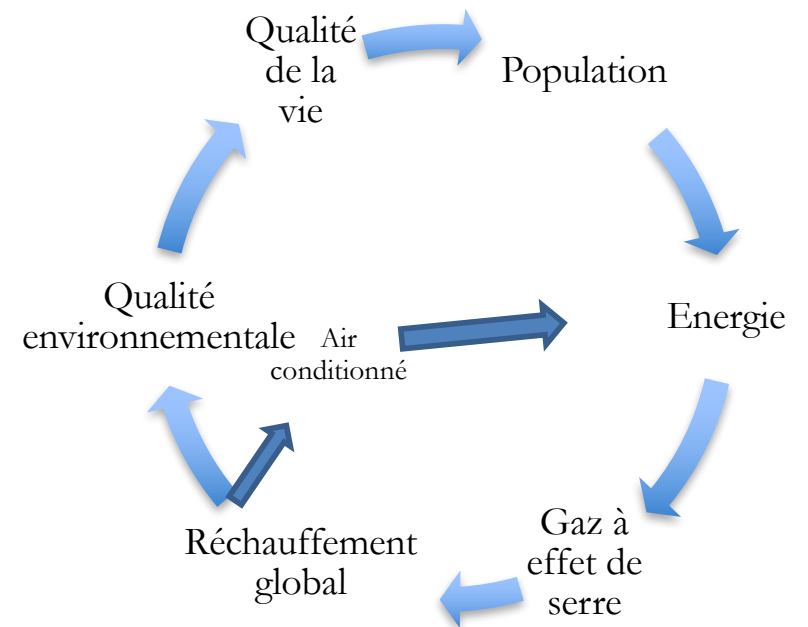
France : 3 % des Français ont la climatisation

Si 50 % des Français disposaient de la climatisation = ce serait l'équivalent de 20 centrales nucléaires. Les énergies renouvelables sont nécessaires mais pas suffisantes : Une centrale éolienne (2 MW) produit 4 GWh/an, soit l'équivalent de 1200 personnes... Pour une ville de 150 000 habitants = 125 centrales éoliennes

Une centrale éolienne (3 MW) très ventée produit 8 GWh/an, soit l'équivalent de 2300 personnes, Pour une ville de 150 000 personnes = 65 centrales éoliennes

La politique d'atténuation n'est pas plus réaliste.

La solution : réduire notre consommation



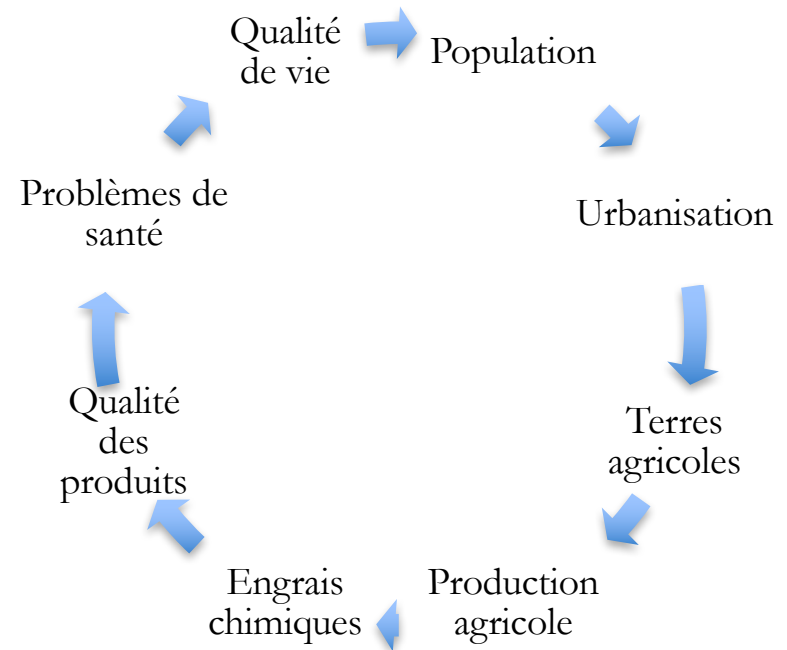
Boucle de causalité

Urbanisation – Terres agricoles – Qualité des aliments

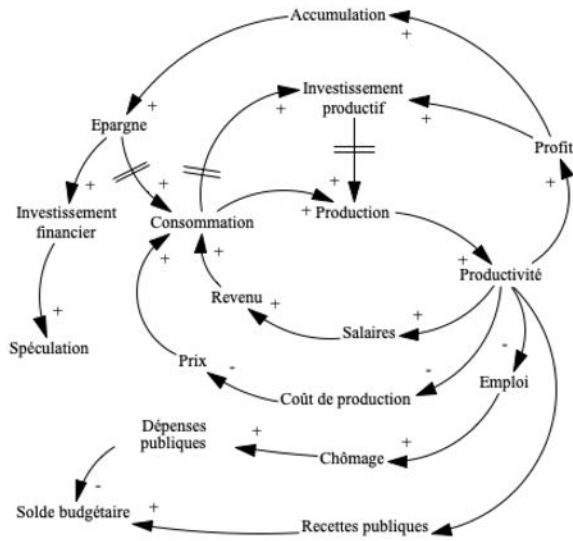
30 millions de terres agricoles disparaissent chaque année dans le monde. 10 millions pour l'érosion et l'appauvrissement des sols, 20 millions pour le développement industriel et immobilier.

De 1960 à 2010, l'urbanisation française a détruit 2,5 millions de terres agricoles. Entre 1993 et 2013, l'Europe a perdu 11 % des terres agricoles (l'équivalent de la Roumanie).

Comment peut-on parler de qualité alimentaire et de développement durable si nous ne sommes pas capables de sauver notre première ressource naturelle : la terre ?



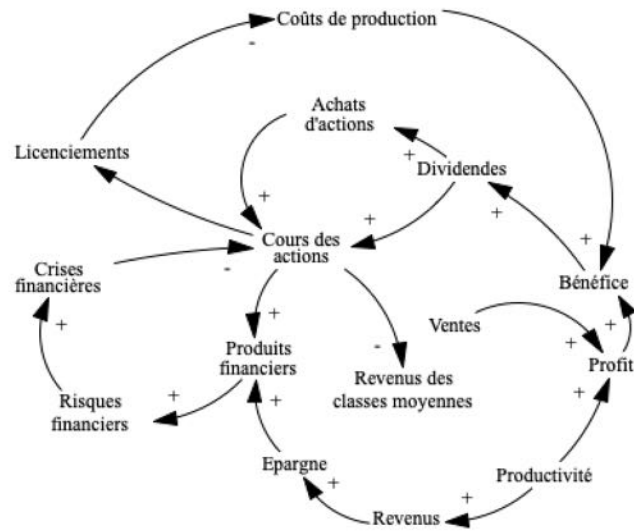
Boucle de Productivité



Pour baisser le temps de travail, à salaire identique, il faut être plus productif.

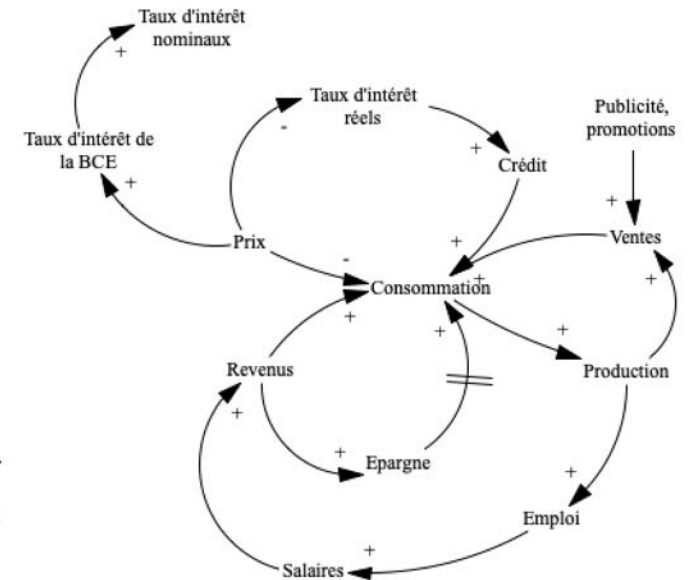
40 h par semaine → 35h par semaine → + Productivité horaire

Boucle d'Accumulation du Capital



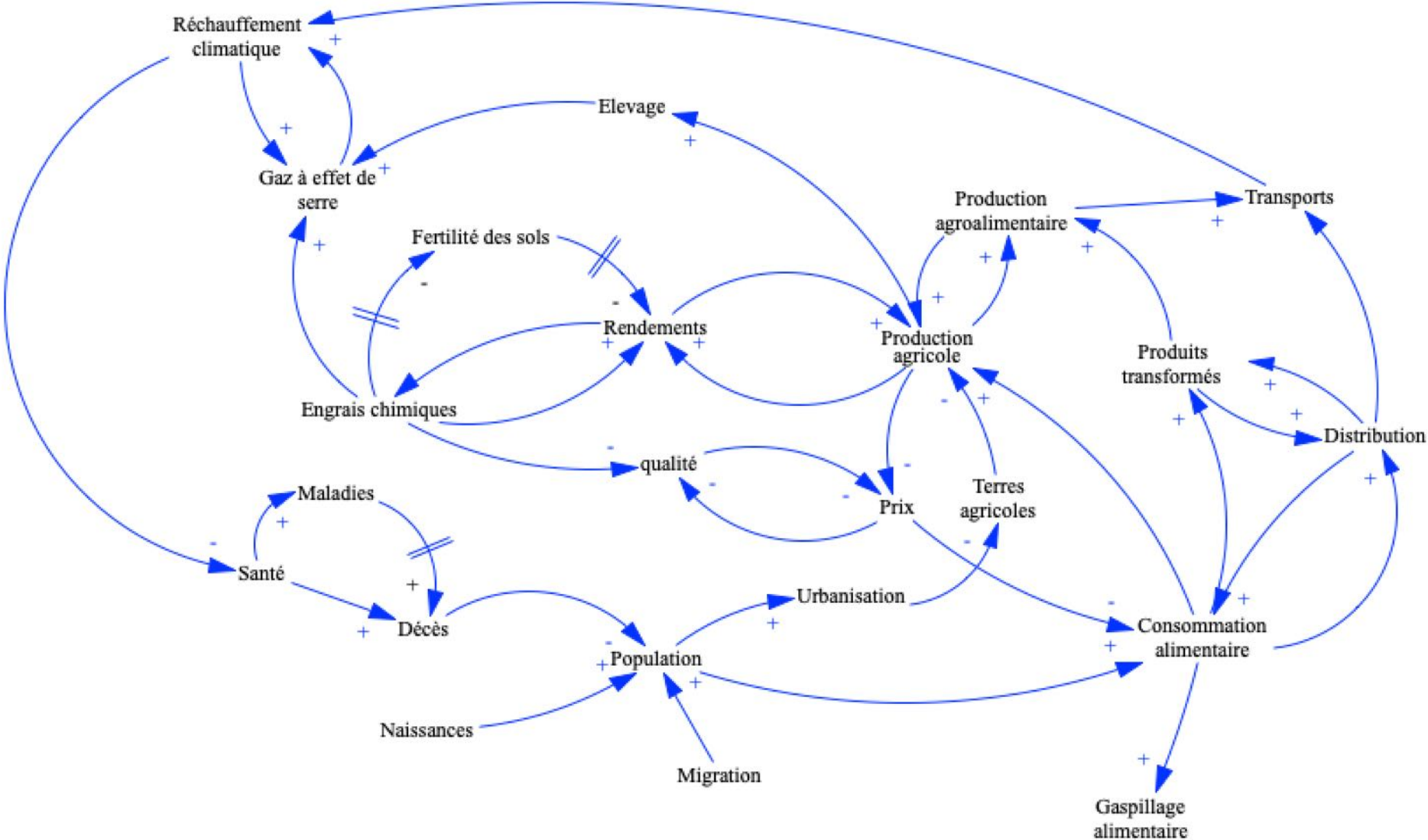
Les français ont une épargne égale à 5 000 milliards d'euros = 2 fois le PIB de la France

Boucle de Consommation



Un français consomme 84% de son revenu, un américain consomme 98% de son revenu

Boucles du système alimentaire



§ 6. La pensée quantitative nous rappelle que le quantitatif n'est pas synonyme de mesurable.

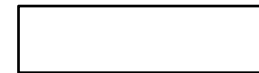
Pour effectuer une analyse quantitative plus détaillée, un diagramme de boucle causale (CLD) doit être transformé en un diagramme de stock et de flux (SDF). C'est l'étape qui permet de créer le modèle, d'étudier et d'analyser le système de manière quantitative..

Un stock est le terme désignant toute entité qui s'accumule ou s'épuise au fil du temps



STOCKS

Variable d'état



Ils accumulent des flux entrants et sortants de matériaux et d'informations

Ils changent lentement → Retards

Mathématiquement : Calcul intégral des flux

$$\text{Stock}(t) = \int_{t_0}^t [\text{Inflow}(s) - \text{Outflow}(s)]ds + \text{Stock}(t_0)$$

Les boucles de rétroaction introduisent des flux et des stocks.

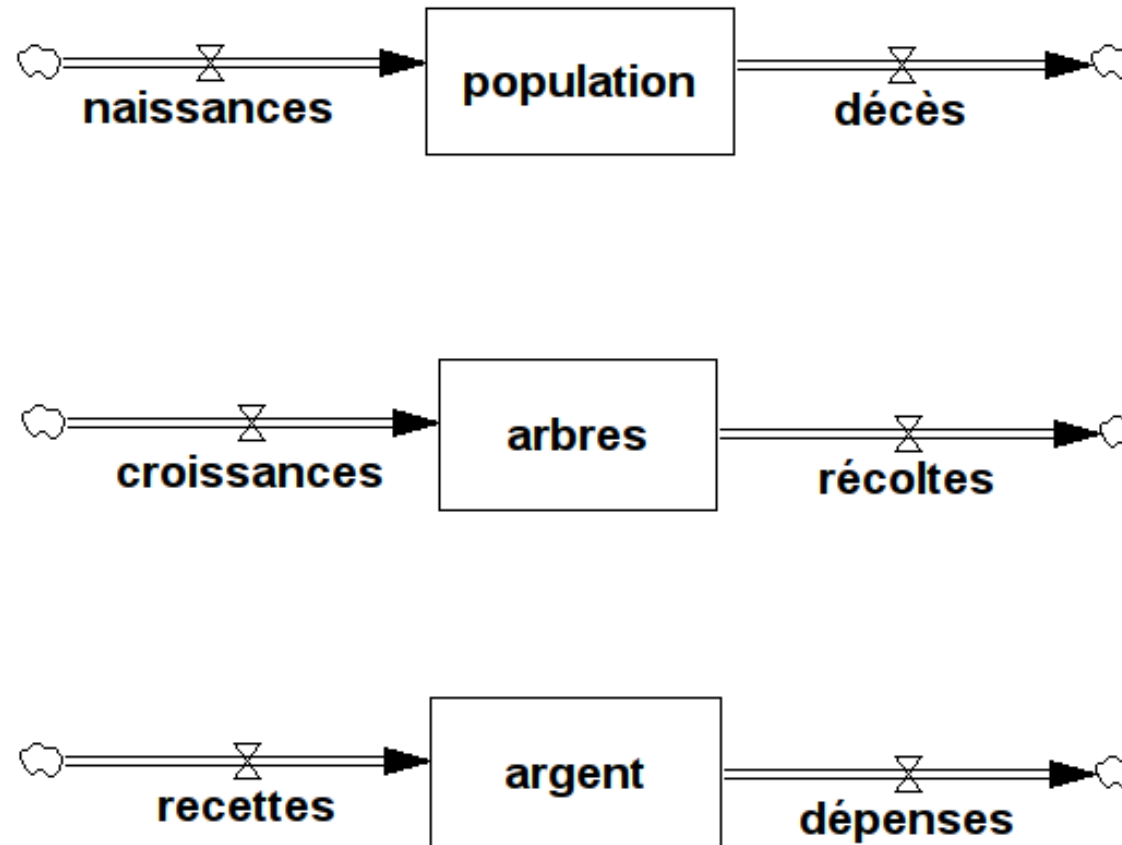


Diagramme des boucles causales (CLD)

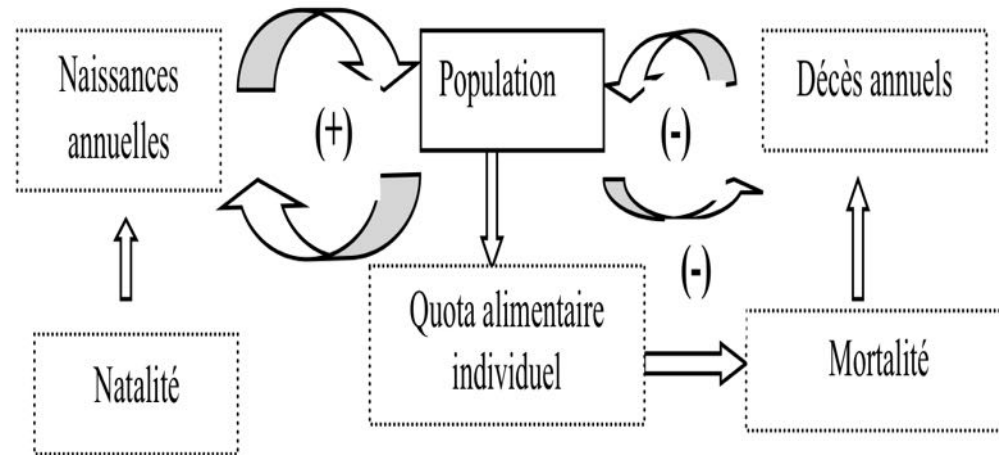
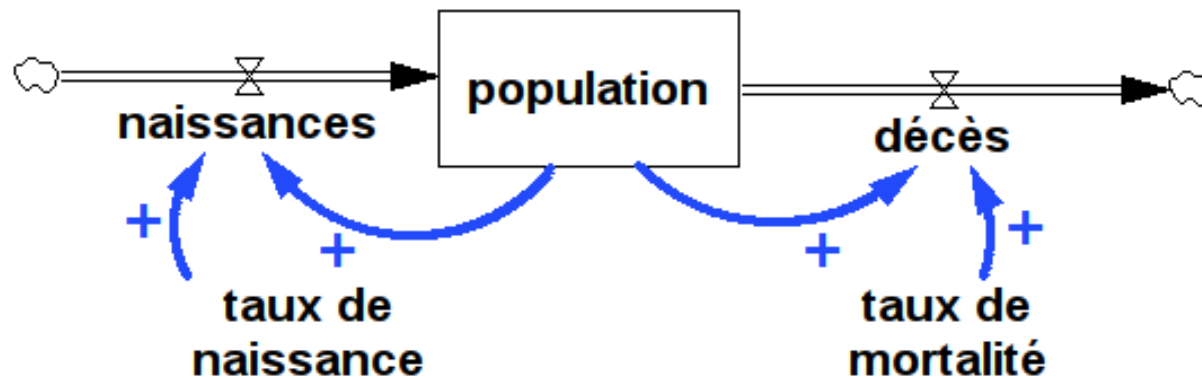
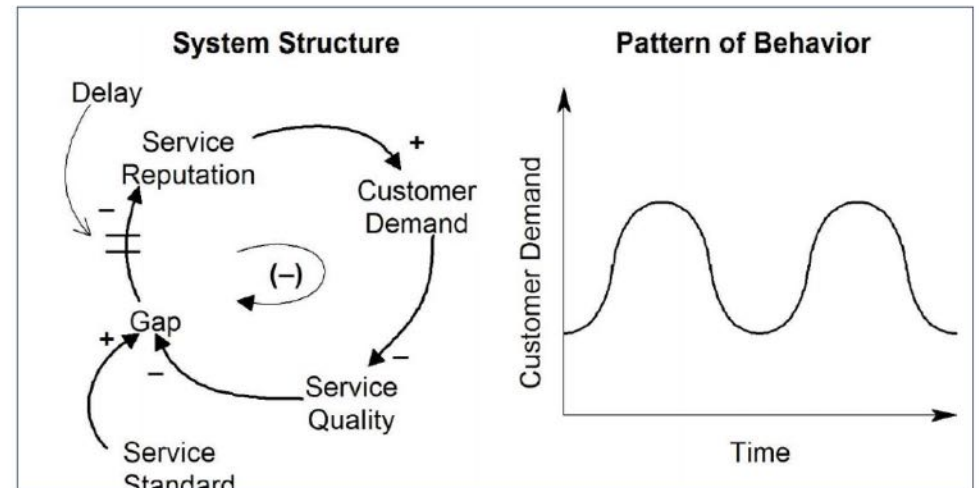
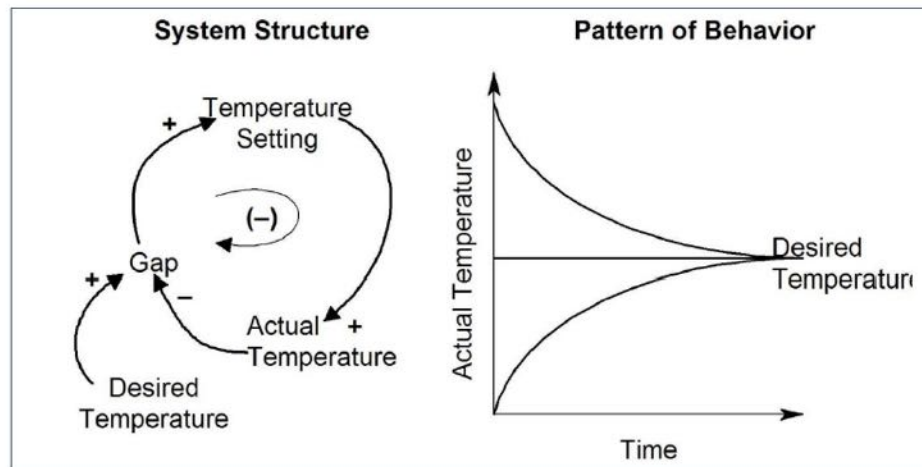
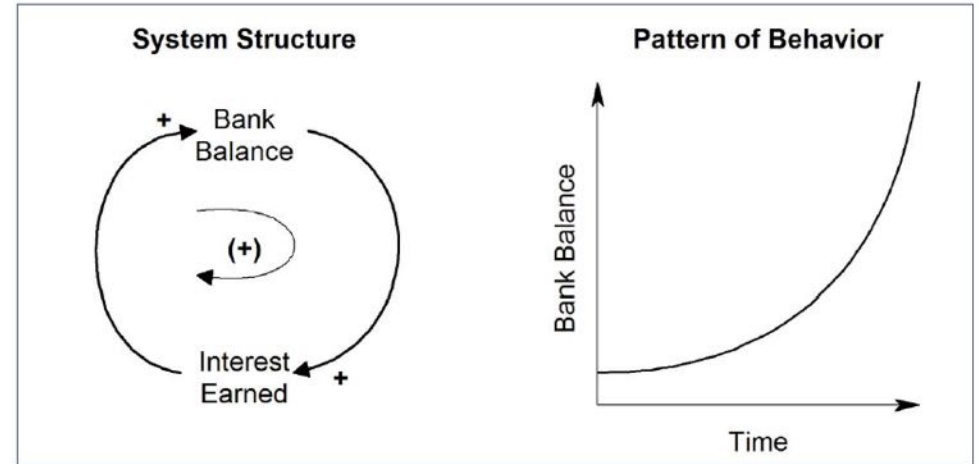


Diagramme Stocks Flux (SFD)



Structure and Behavior patterns



§ 7. **La pensée scientifique** rappelle que les modèles sont avant tout utiles (mais ils sont toujours faux !).

Les penseurs systémiques utilisent des variables et des données faciles à comprendre, pour avoir un sens relatif les uns par rapport aux autres. Ils veulent également savoir dans quelles circonstances leur modèle ne fonctionne pas ? Quelles sont les limites de leur confiance dans l'utilité de ce modèle ? Où se situent les principaux leviers ?

Points leviers (Leverage Points)

Un concept introduit par Donella Meadows (1999, 1997)

Un point dans un système où un petit changement peut conduire à un changement fondamental du système.

12 points leviers, allant d'un changement mineur à un changement plus profond du système.

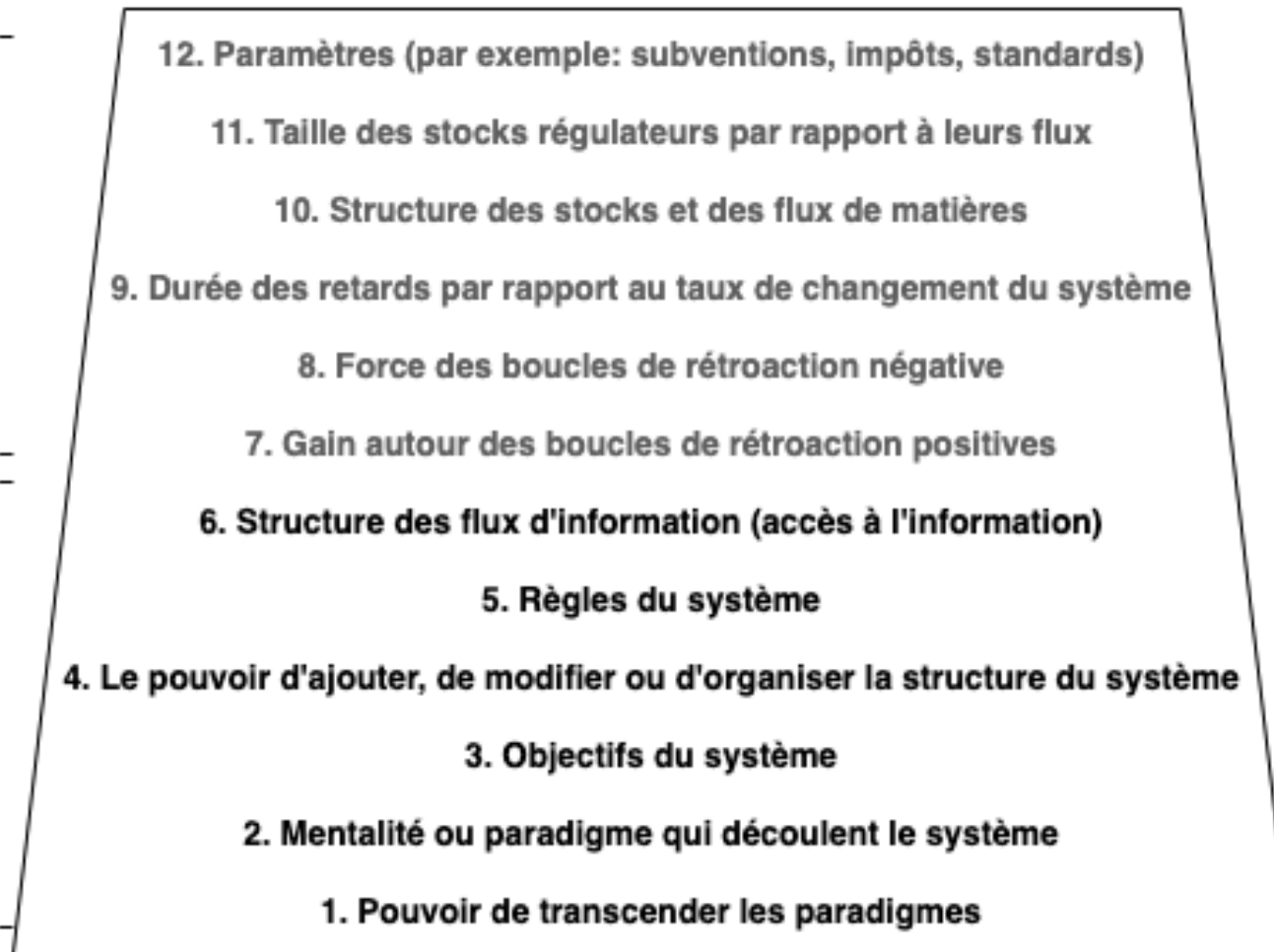
Ces points leviers peuvent renvoyer à des paramètres ou à de nouvelles variables, introduire de nouvelles boucles de rétroaction, proposer une conception différente du système ou encore relever de l'intention (Abson et al. 2017)

augmentation de l'efficacité (pour créer des changements à l'échelle du système) et l'immuabilité de l'information.

points de levier peu profonds

points de levier profonds

Lieu d'intervention dans un système (Meadows 1999)



Caractéristiques du système

parameters: les caractéristiques relativement mécanistes généralement visées par les décideurs politiques

rétroactions : les interactions entre les éléments d'un système qui déterminent la dynamique interne.

conception : les structures sociales et les institutions qui gèrent les rétroactions et l'environnement.

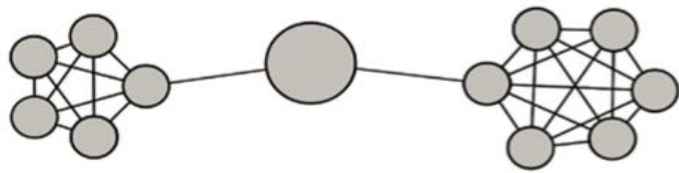
intention : les valeurs, les objectifs et la vision du monde des acteurs qui déterminent la direction émergente vers laquelle un système est orienté.

Comment identifier un point levier dans un CLD?

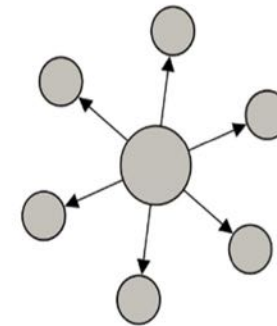
Les CLD sont un bon point de départ pour identifier les points leviers

- (1) Cause commune à de multiples effets qui peuvent influencer différentes parties du système (degré de sortie élevé)
- (2) Peut être influencé par un intervenant
- (3) Il s'agit d'une cause fondamentale et donc indépendante

Chercher des médiateurs (par exemple, des variables reliant les "hubs").



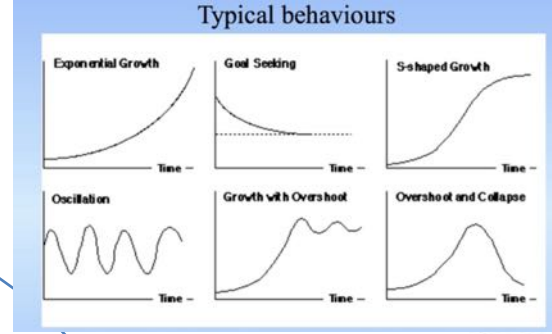
Médiateur



Variable de degré de sortie élevé

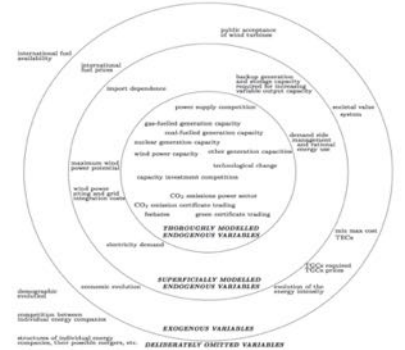
Drivers	Barriers
Envision - Increased revenue (Gaurier et al. 2011) - Lower capital costs (Van Buren et al. 2007)	- Operational costs and revenues (Gaurier et al. 2011) - Lack of funding (Bacardos et al. 2016; Fang et al. 2011; Li et al. 2015) - Insufficient financial support from banks (Chen et al. 2013) - Investments in extended production systems (Van Buren et al. 2007)
Regulation - New pollutant targeted regulations (Gaurier et al. 2011) - Strong government engagement (Mathews & Fan 2013; Zhu & Rath 2014) - Governmental industrial policies (Bhattacharya et al. 2012)	- Environmental regulations (Gaurier et al. 2011) - Inadequate public tax incentives (Chen et al. 2013)
Cooperation - Between stakeholders (Gundlach et al. 2017) - Social ties (Zhu & Rath 2014)	- Lack of willingness to collaborate (Bacardos et al. 2016) - Lack of cooperation and information sharing (Gibbs & Dixon 2007; Geller et al. 2015) - Lack of trust among leaders (Gibbs & Dixon 2007)
Knowledge and technology - Specific knowledge that actors acquire through experience and learning of IS in their system (Dixon et al. 2012) - Technical knowledge (Zhu and Rath 2014)	- Technological challenges (Li et al. 2015) - Lack of technology infrastructure readiness (Crosa & Ferrin 2016; Li et al. 2015)
Management - Corporate sustainable focus in the firm (Gaurier et al. 2011) - Proactive management (Gundlach et al. 2017)	- Cultural changes within firms (Gaurier et al. 2011) - Lack of awareness of IS (Bacardos et al. 2016; Chen & Yang 2006) - Lack of top management support (Bacardos et al. 2016; Chen & Yang 2006)
Resources - Availability of resources (Zhu & Rath 2014) - Staff mobility between different industries (Van Buren et al. 2007)	- Resource scarcity (Gaurier et al. 2011)
Location - A facilities in the system (Bhattacharya et al. 2012)	- Distances between companies (Gaurier et al. 2011)

Modèles de comportement

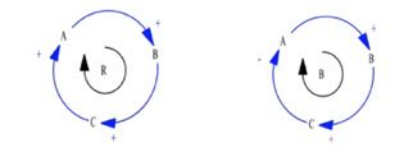
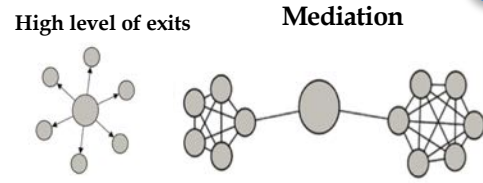


Points Leviers

Limites du système



6 étapes pour comprendre la dynamique d'un système



Source : Sterman (2000), Diemer (2004)

L'arbre qui cache la forêt



Diemer (2004)

Diagramme Boucles causales CLD - SFD

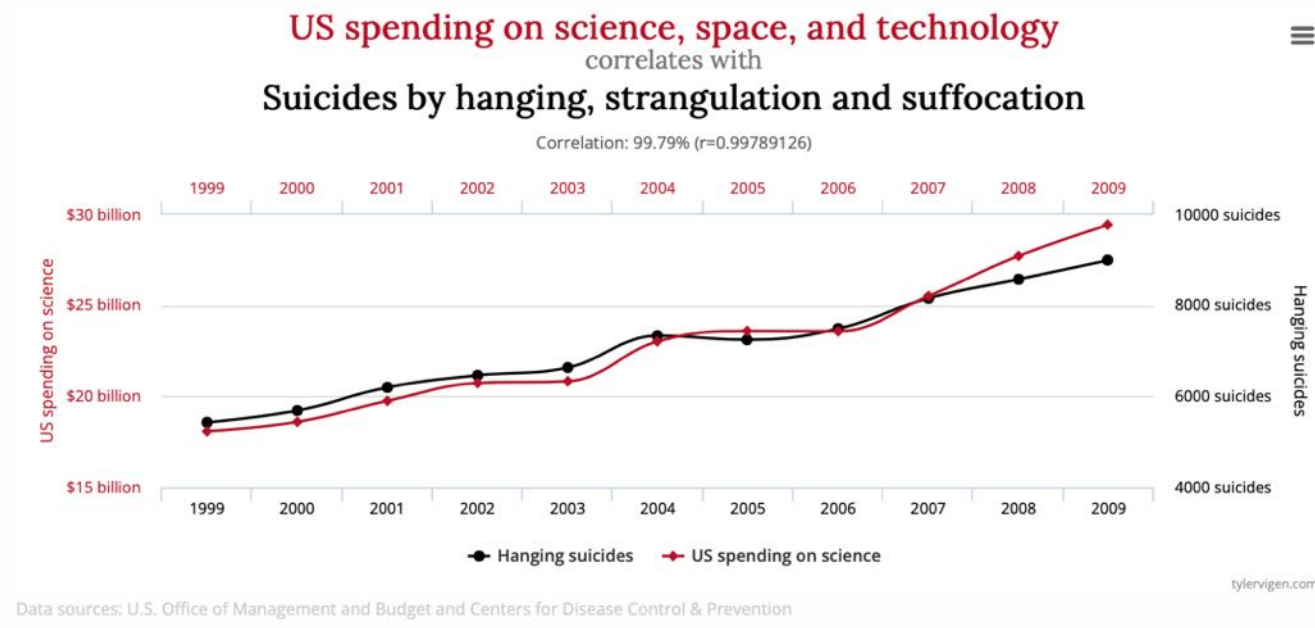
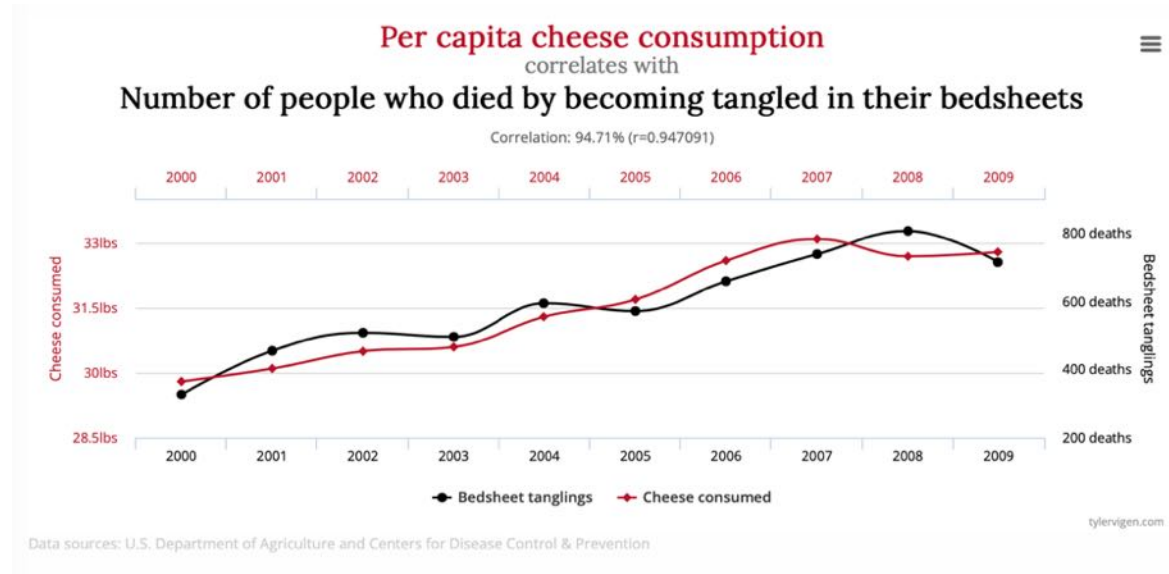
Causalités vs Corrélations

Accumulation

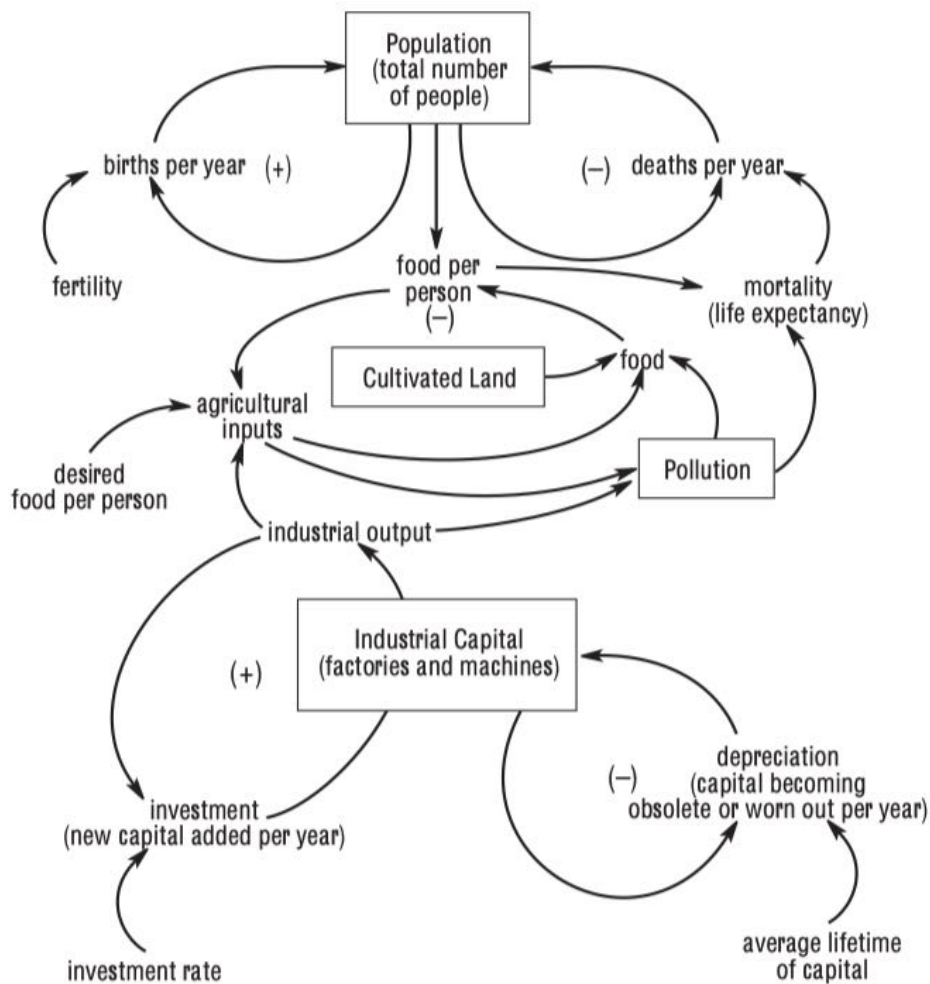
Effets non-linéaires

Retards

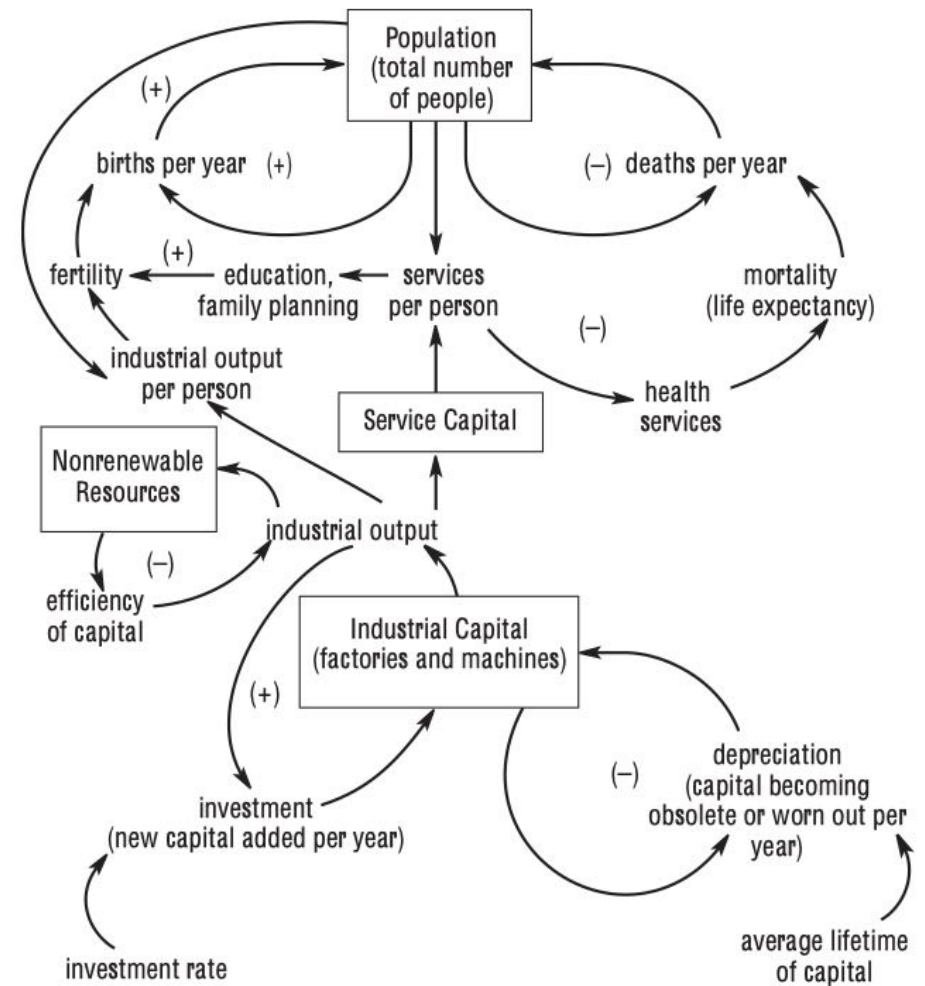
Une corrélation ne signifie pas une causalité, il est très difficile de démontrer une causalité



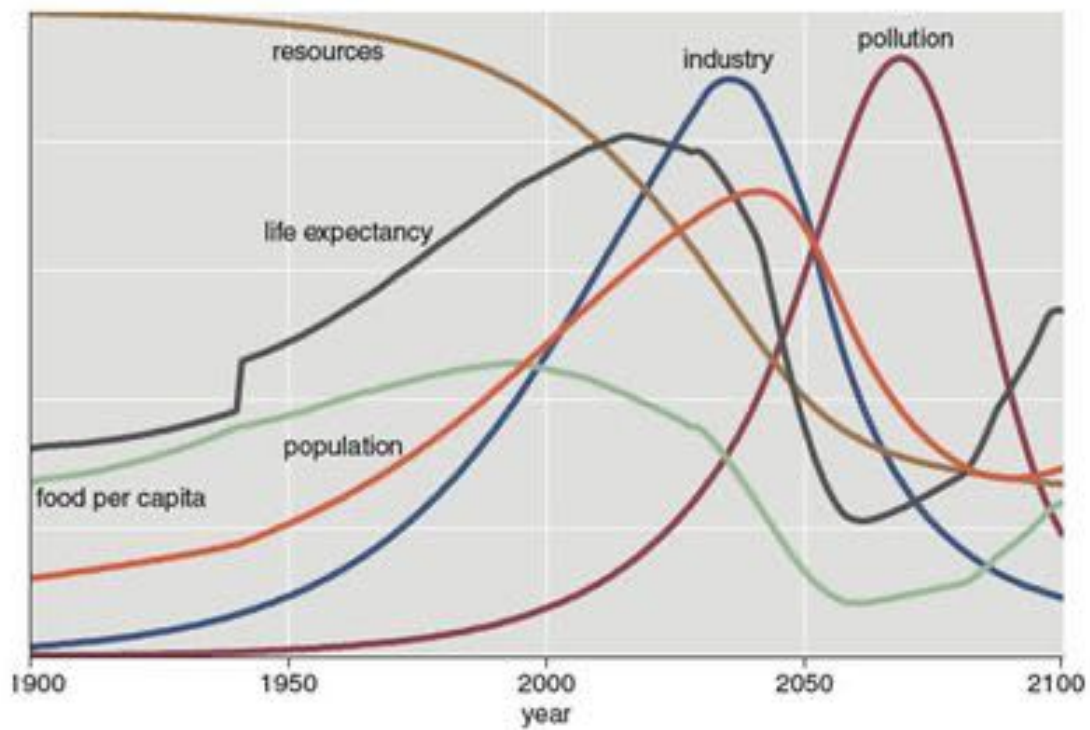
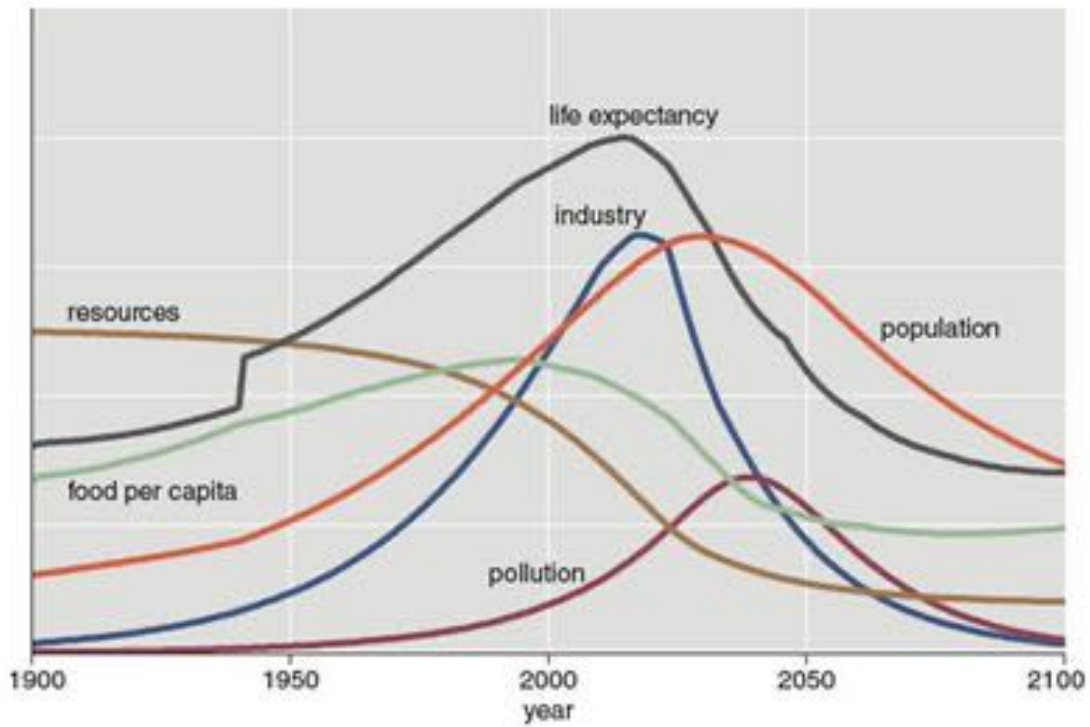
Deux exemples de boucles dans le modèle World 3 (Limits to Growth)



Boucle = Population, capital,
agriculture et pollution



Boucle = Population, Capital,
Services et Ressources



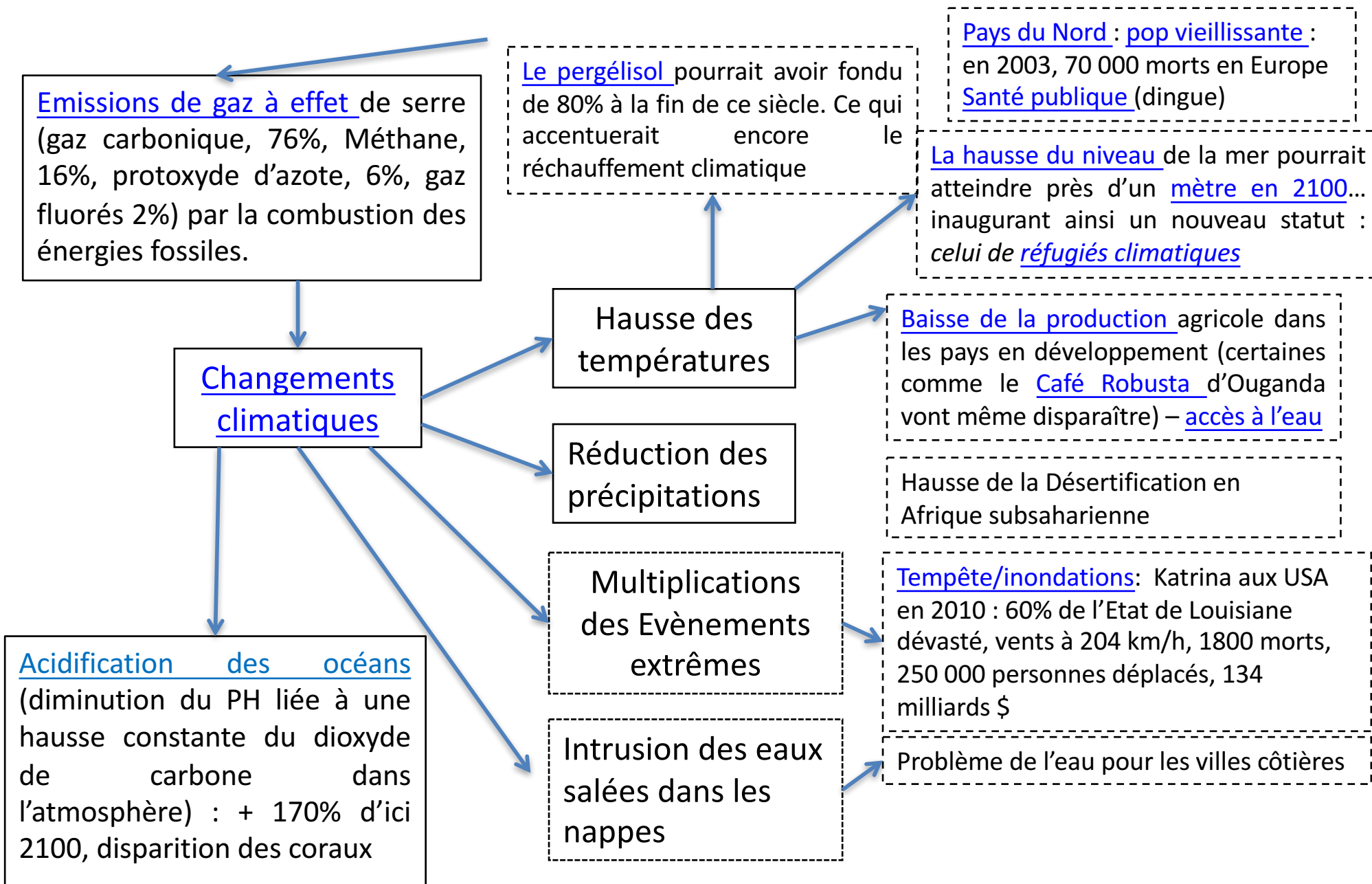
Simulation du modèle World 3 jusqu'à 2100

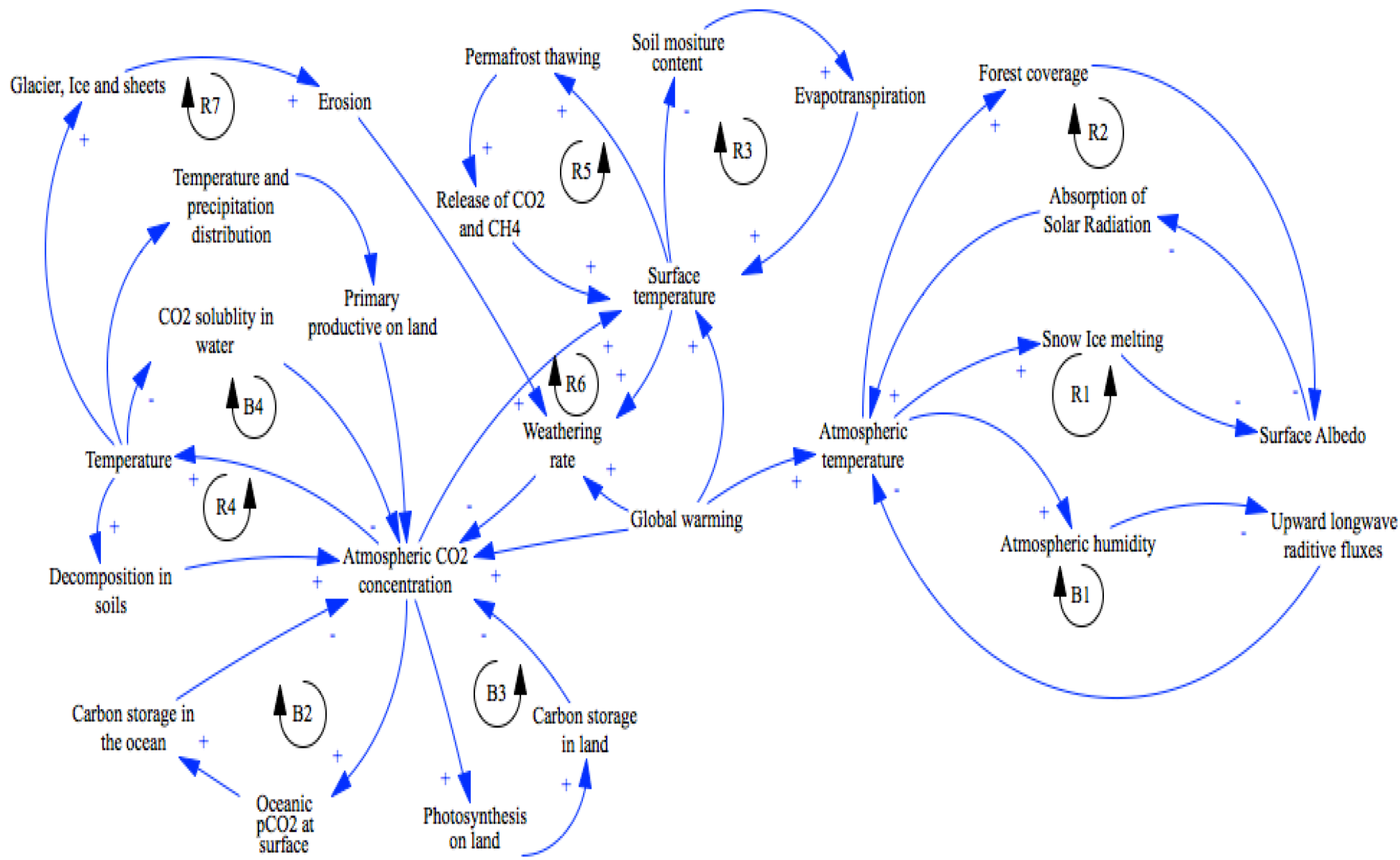


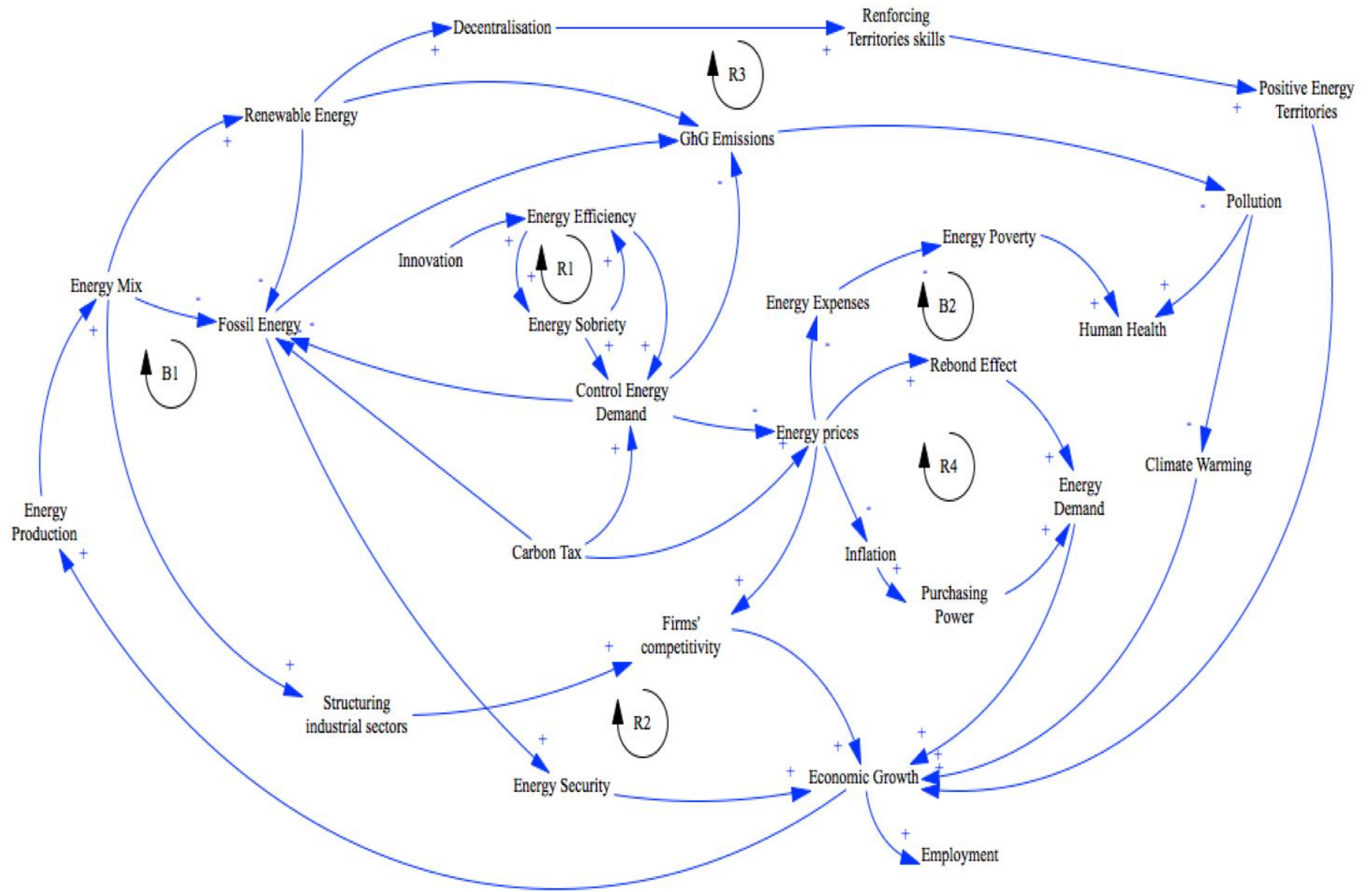
Rapports du GIEC

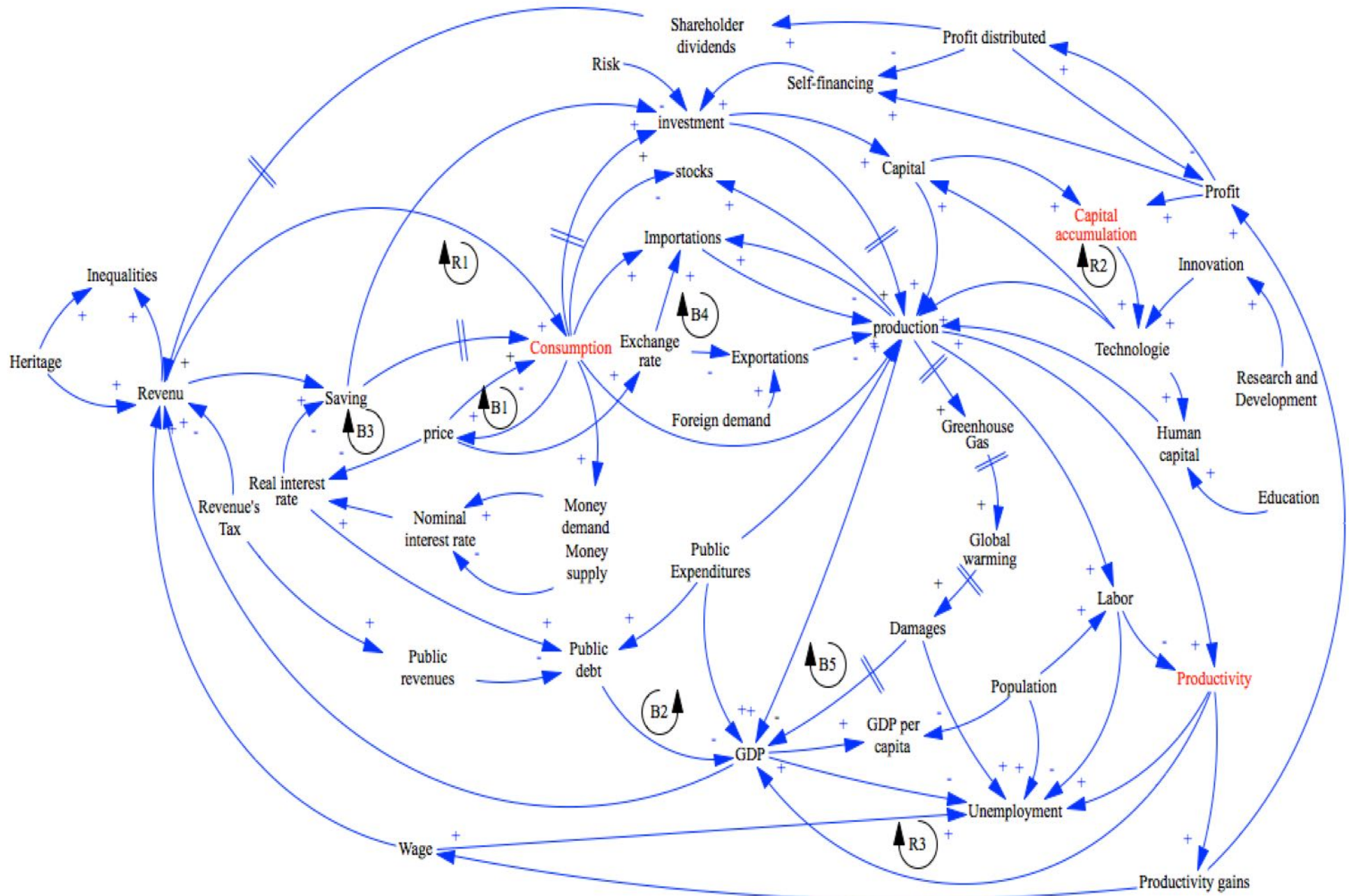
Avril 2022 - Que nous dit le nouveau rapport du GIEC ?

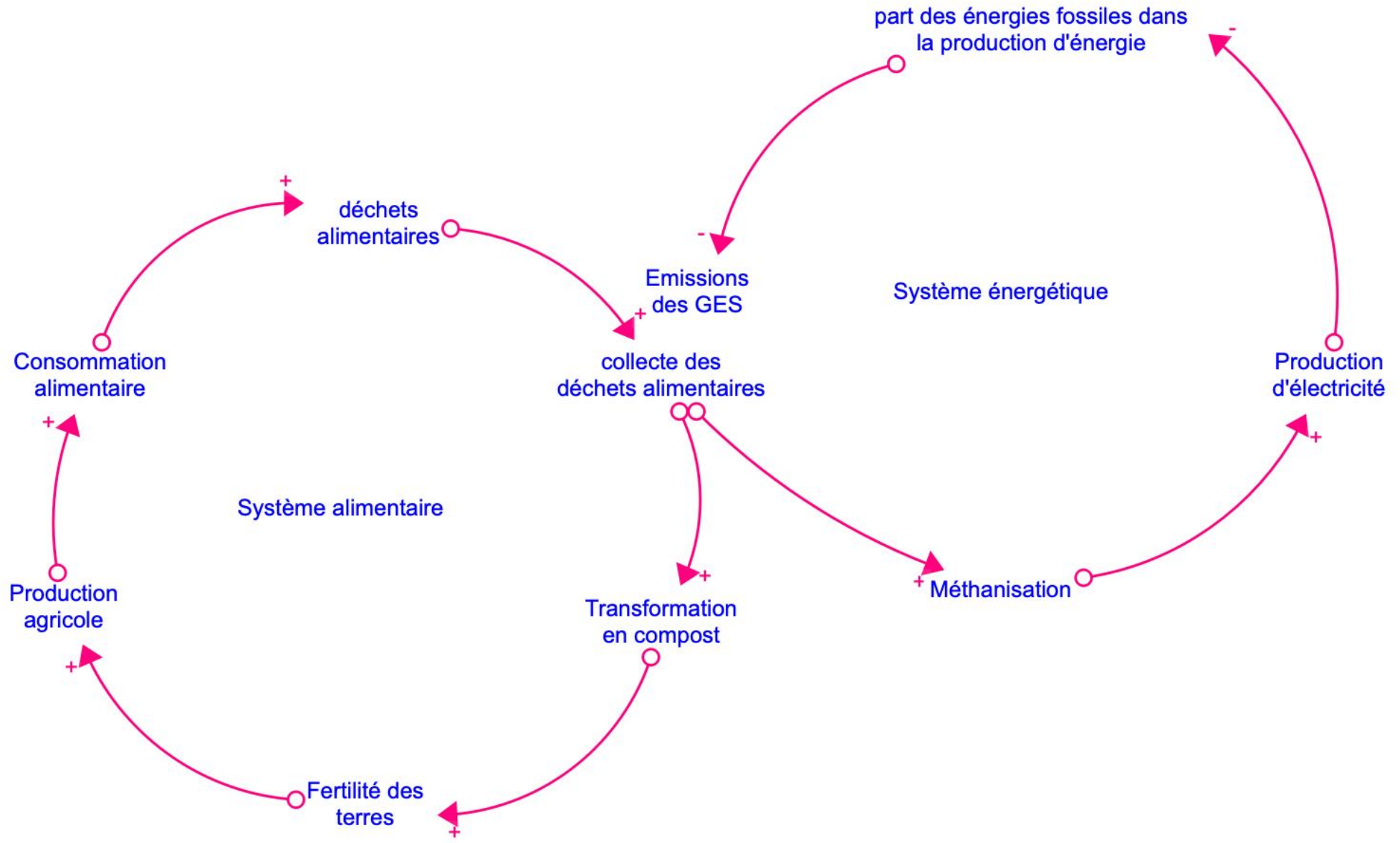






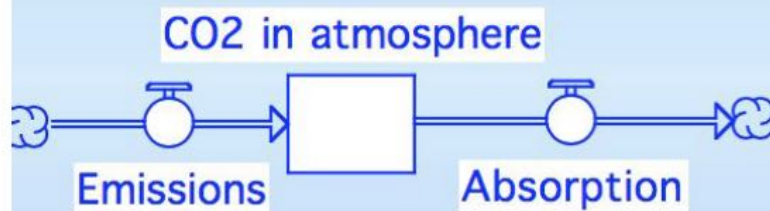






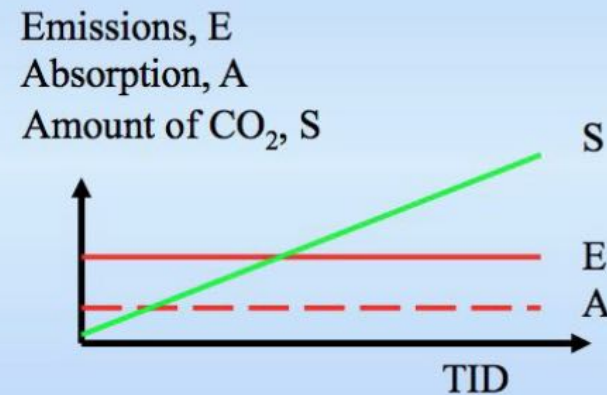
CO2 in the atmosphere example

STRUCTURE: stock and flows



In the moment, the amount of CO₂ in the atmosphere is what it is, independent of emission- and absorption rates

BEHAVIOUR: accumulation



The patterns become different because the stock sums up the difference between emission- and absorption flows over time

La gestion du risque « inondation », de Madagascar à l'Auvergne : le développement durable pour tendre vers une diminution de la vulnérabilité des sociétés

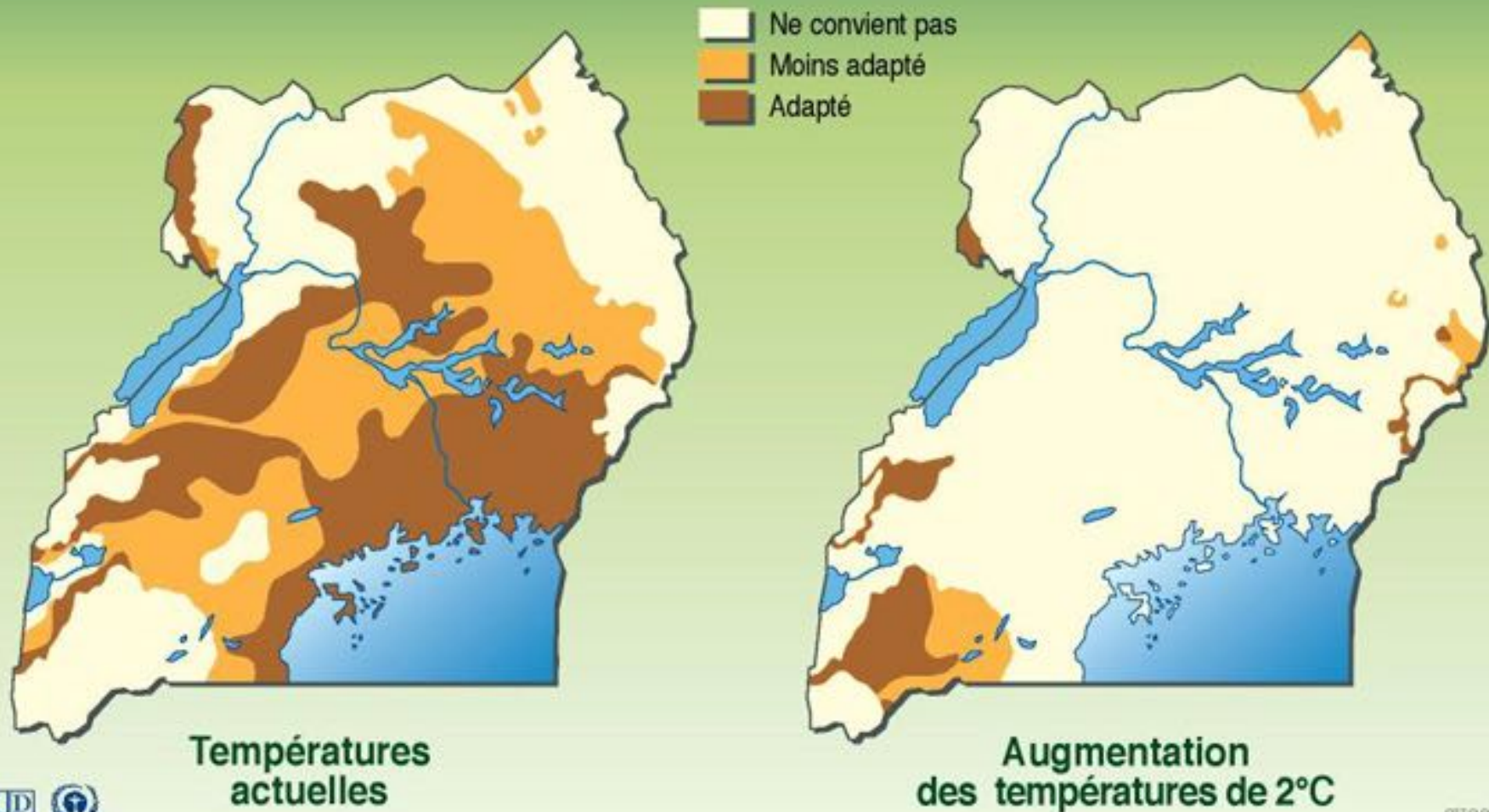
Que ce soit à Madagascar ou en Auvergne, les mesures prises collectivement ou individuellement doivent permettre d'améliorer la résilience des populations, c'est-à-dire leur capacité à se réparer après une catastrophe et à vivre avec le risque toujours présent

Proposition de 4 grands piliers de la gestion du risque

MEMOIRE, PREVENTION / MITIGATION, INTERVENTION ET REPARATION



Impact de l'augmentation des températures sur le café robusta en Ouganda

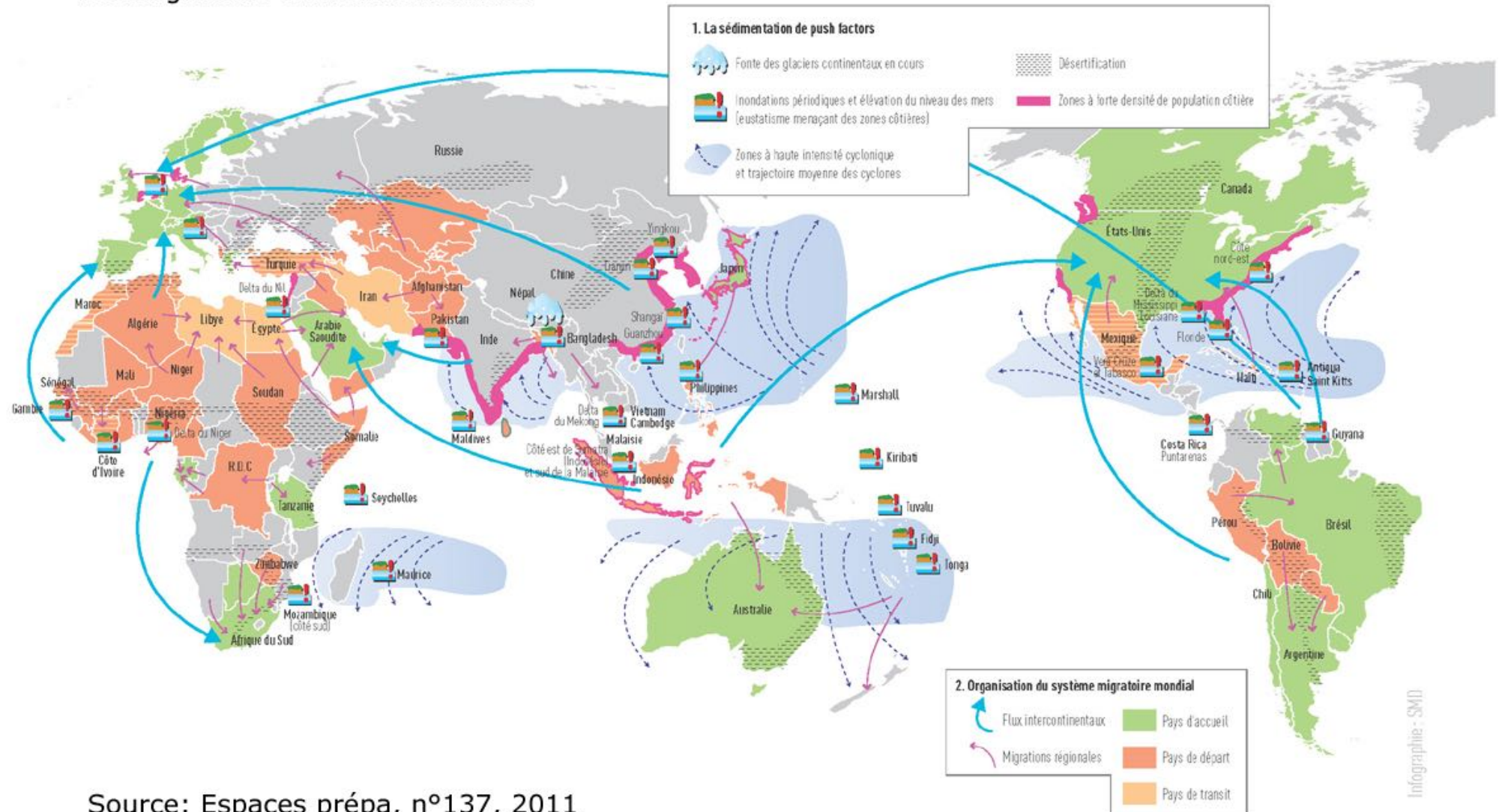


Les facteurs de déplacement de la population



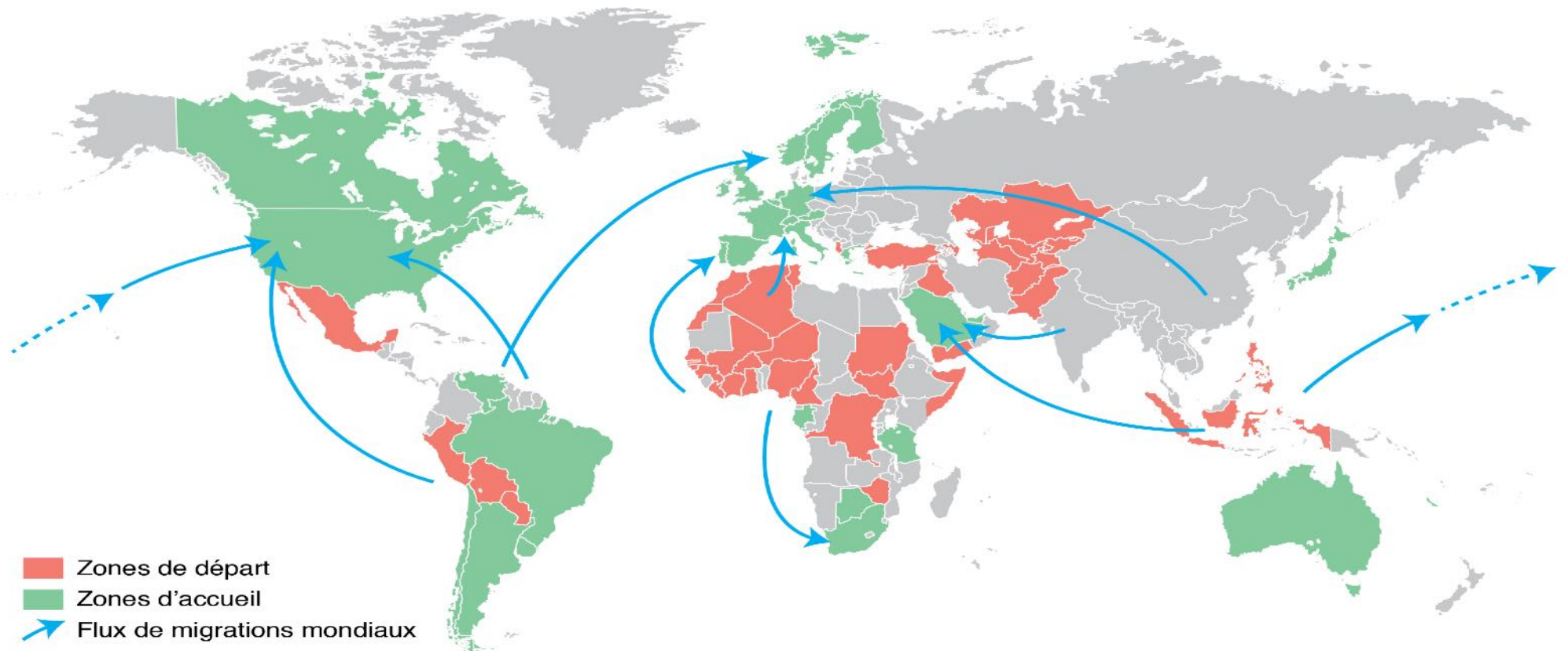
Climat et Migrations

Les migrations environnementales



Source: Espaces prépa, n°137, 2011

Les migrations environnementales mondiales



La bombe du pergélisol

1 Le réchauffement climatique provoque une hausse des températures

2 Le pergélisol se réchauffe

3 Les matières organiques dégèlent et pourrissent

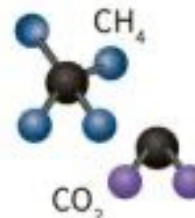
4 Le carbone est relâché dans l'atmosphère sous forme de CO₂ et de méthane

5 Plus de gaz à effet de serre signifie que le réchauffement pourrait être pire que prévu



Méthane (CH₄)

Gaz à effet de serre 25 fois plus puissant que le CO₂



Pergélisol

ou *permafrost*, représente 1/4 de la surface des terres dans l'hémisphère nord

renferme **1 700** milliards de tonnes de carbone, soit le double du CO₂ de l'atmosphère

Émissions de méthane

Prévisions en milliards de tonnes

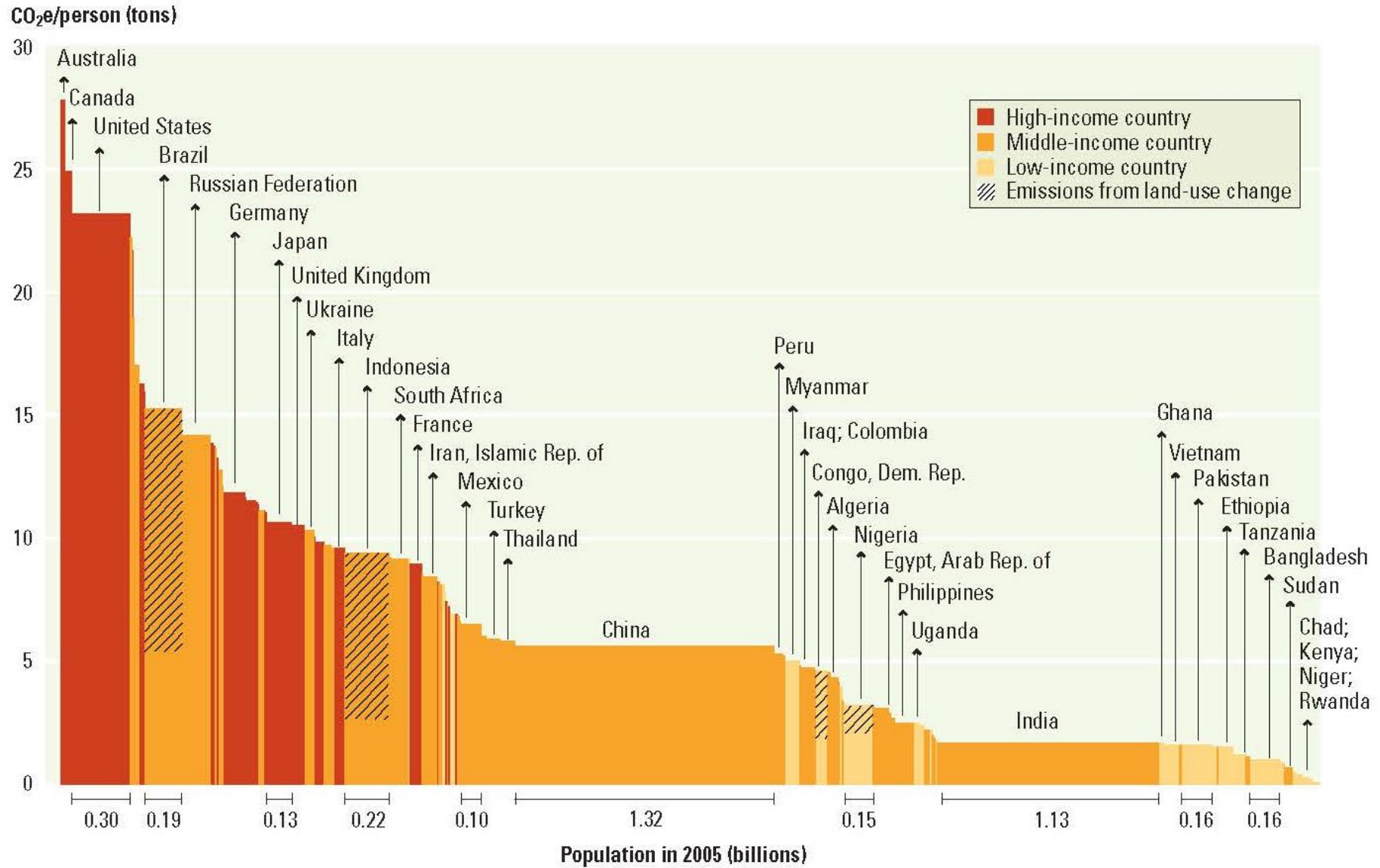
43-135

2100

246-415

2200

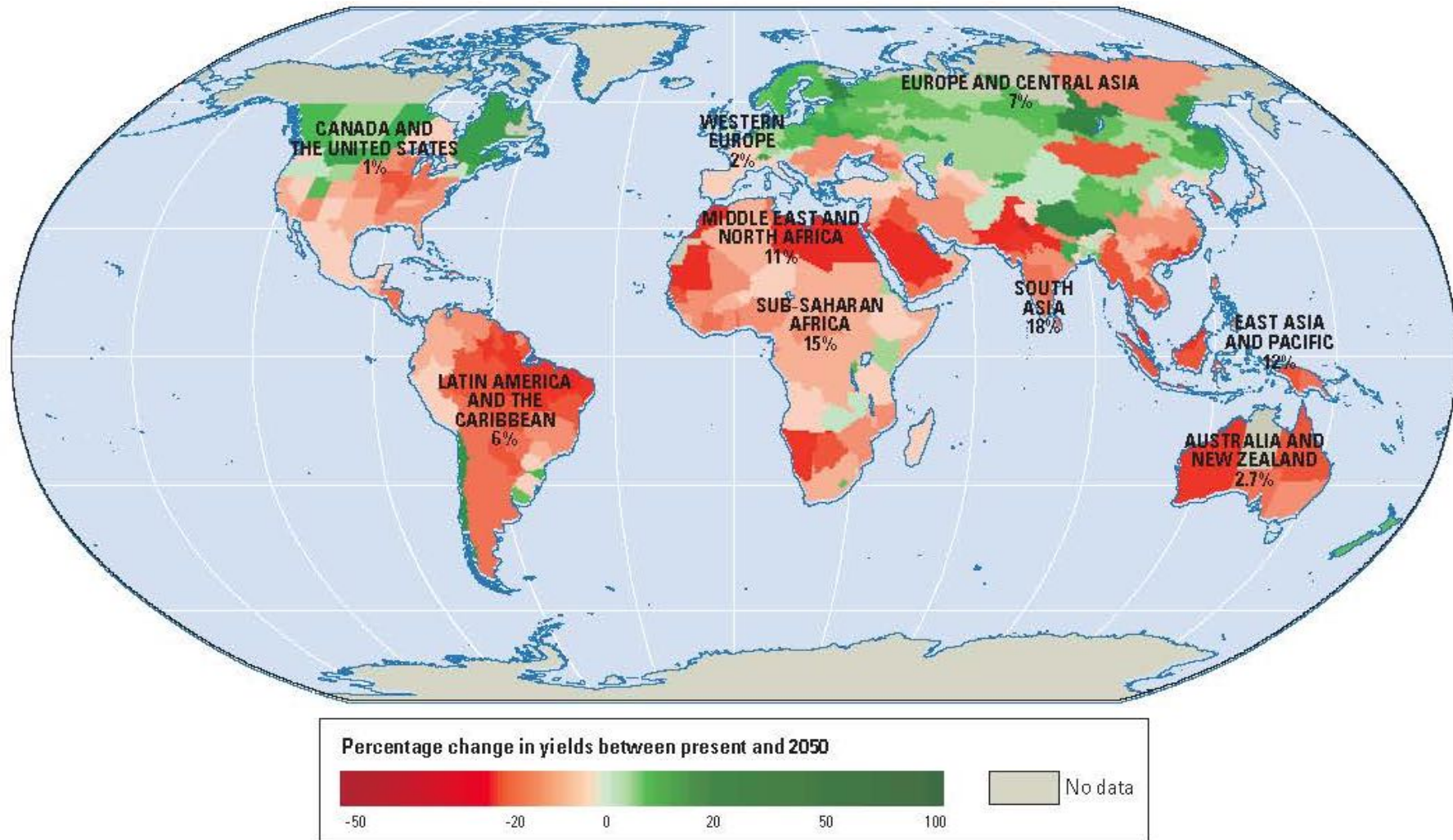
Emissions de CO2 par personne (tonnes) en fonction de la richesse des pays



Sources: Emissions of greenhouse gases in 2005 from WRI 2008, augmented with land-use change emissions from Houghton 2009; population from World Bank 2009c.

Note: The width of each column depicts population and the height depicts per capita emissions, so the area represents total emissions. Per capita emissions of Qatar (55.5 tons of carbon dioxide equivalent per capita), UAE (38.8), and Bahrain (25.4)—greater than the height of the y-axis—are not shown. Among the larger countries, Brazil, Indonesia, the Democratic Republic of Congo, and Nigeria have low energy-related emissions but significant emissions from land-use change; therefore, the share from land-use change is indicated by the hatching.

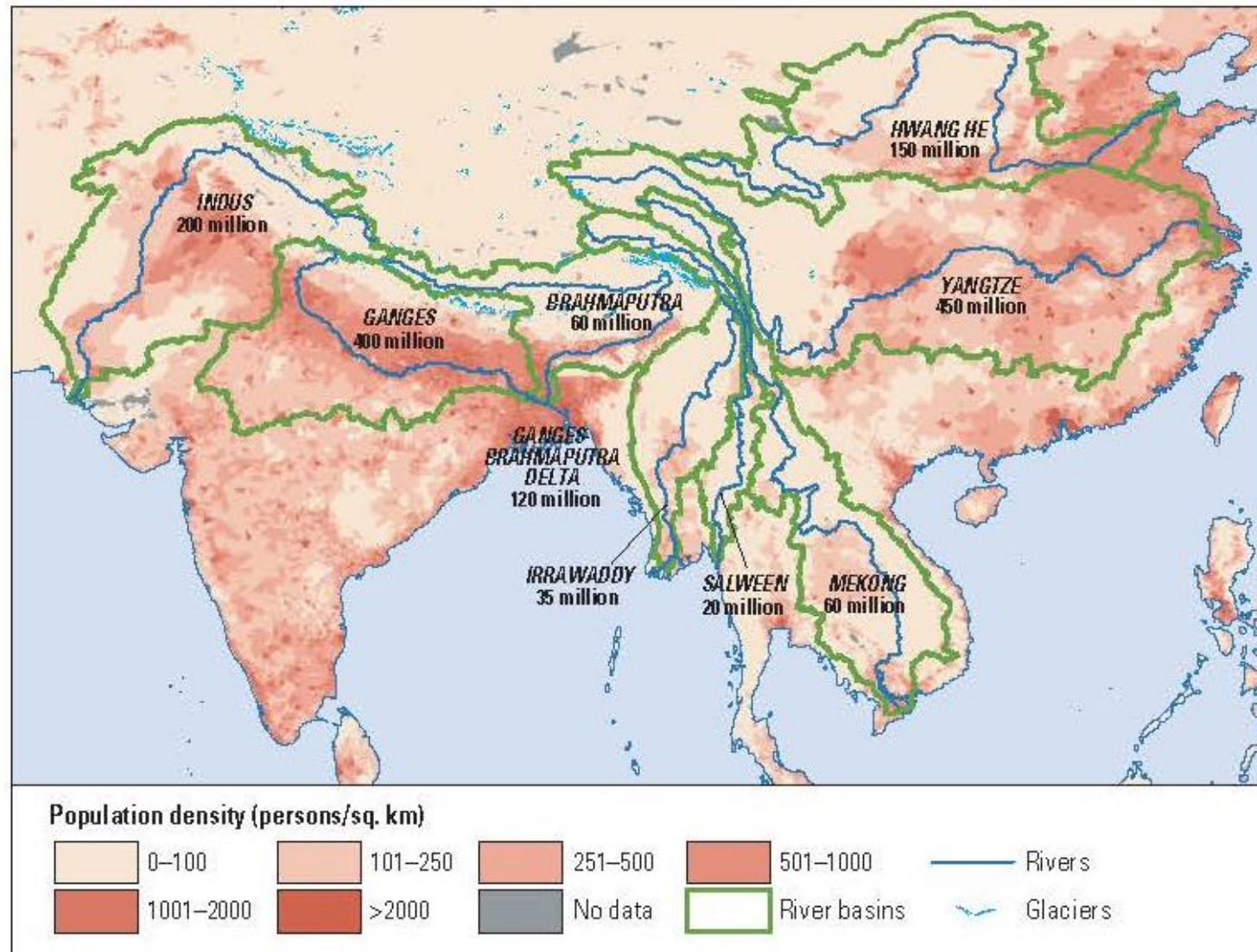
Les changements climatiques affecteront les rendements des récoltes en 2050



Sources: Müller and others 2009; World Bank 2008c.

Note: The coloring in the figure shows the projected percentage change in yields of 11 major crops (wheat, rice, maize, millet, field pea, sugar beet, sweet potato, soybean, groundnut, sunflower, and rapeseed) from 2046 to 2055, compared with 1996–2005. The yield-change values are the mean of three emission scenarios across five global climate models, assuming no CO₂ fertilization (a possible boost to plant growth and water-use efficiency from higher ambient CO₂ concentrations). The numbers indicate the share of GDP derived from agriculture in each region. (The share for Sub-Saharan Africa is 23 percent if South Africa is excluded.) Large negative yield impacts are projected in many areas that are highly dependent on agriculture.

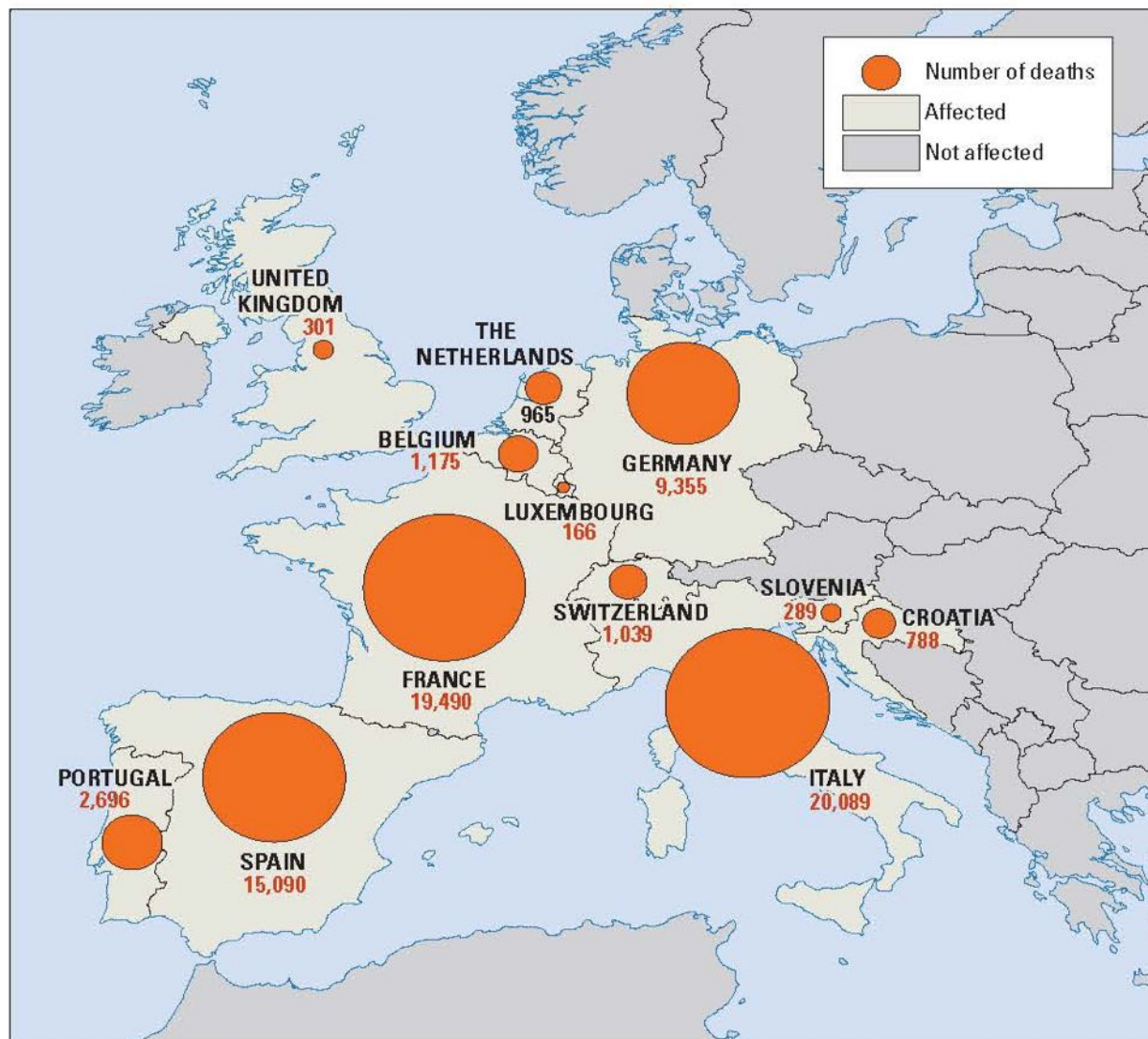
Plus d'un milliard de personnes dépendent des eaux des glaciers de l'Himalaya



Sources: Center for International Earth Science Information Network, <http://sedac.ciesin.columbia.edu/gpw/global.jsp> (accessed May 15, 2009); Armstrong and others 2005; ESRI 2002; WDR team.

Note: The glaciers of the Himalayas and Tibetan Plateau regulate the supply of water throughout the year in major river basins supporting large agricultural and urban populations, with meltwater providing between 3 and 45 percent of river flow in the Ganges and Indus, respectively. Reduced storage as ice and snowpack will result in larger flows and flooding during rainy months and water shortages during warmer, drier months when water is most needed for agriculture. Glacier locations shown in the map only include glaciers larger than 1.5 sq. km in area. Numbers indicate how many people live in each river basin.

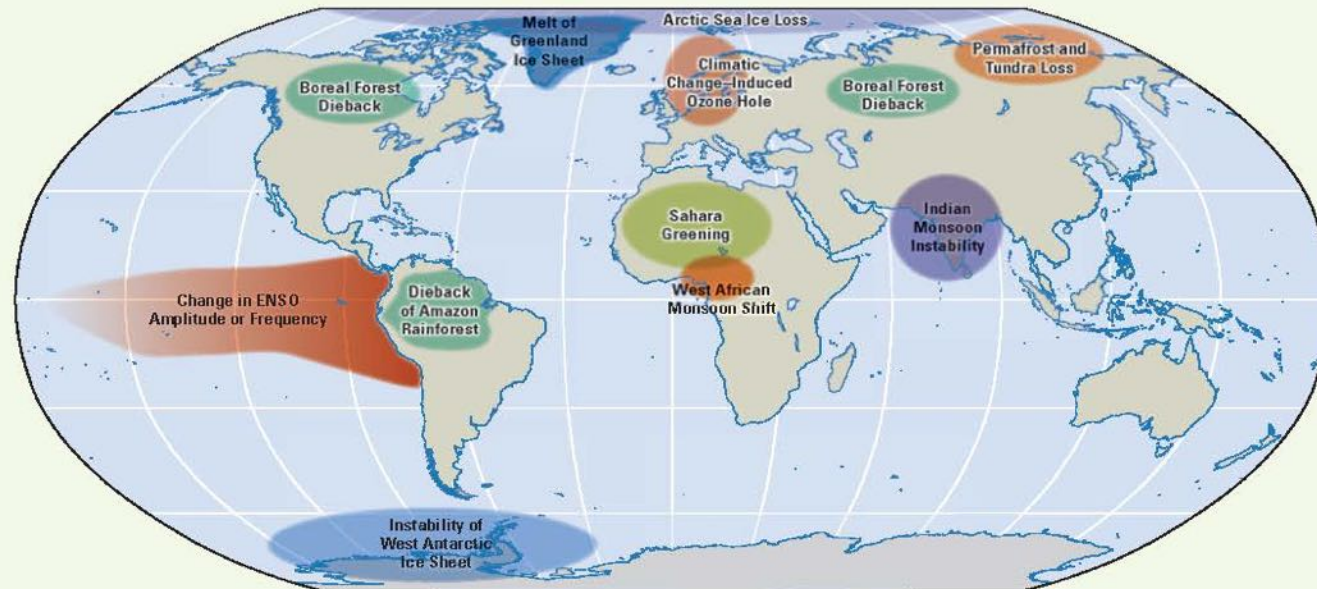
Les pays riches ont été durement affectés par l'épisode de chaleur de 2003 : 70 000 morts en Europe



Source: Robine and others 2008.

Note: Deaths attributed to the heat wave are those estimated to be in excess of the deaths that would have occurred in the absence of the heat wave, based on average baseline mortality trends.

Distribution globale des différents éléments du changement climatique



Source: Adapted from Lenton and others 2008.

Note: Several regional-scale features of the climate system have tipping points, meaning that a small climate perturbation at a critical point could trigger an abrupt or irreversible shift in the system. These could be triggered this century depending on the pace and magnitude of climate change.

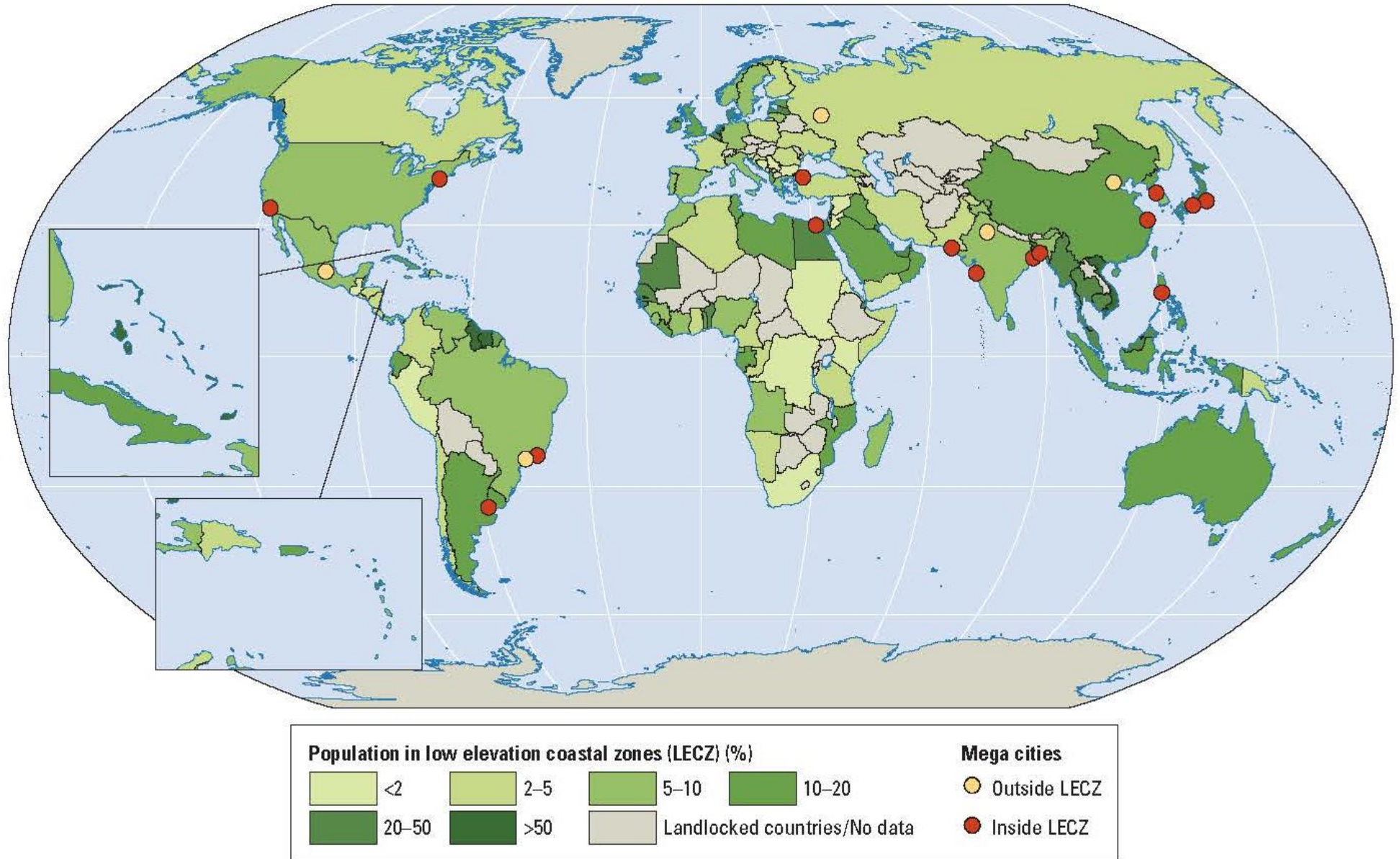
Table FA.1 Potential tipping elements in the climate system: Triggers, time-scale, and impacts

Tipping element	Triggering level of warming	Transition timescale	Key impacts
Disappearance of Arctic summer sea-ice	+0.5–2°C	~10 years (rapid)	Amplified warming, ecosystem change
Melting of Greenland ice sheet	+1–2°C	>300 years (slow)	Sea-level rise of 2–7 meters
Melting of West Antarctic ice sheet	+3–5°C	>300 years (slow)	Sea-level rise of 5 meters
Collapse of Atlantic thermohaline circulation	+3–5°C	~100 years (gradual)	Regional cooling in Europe
Persistence of El Niño-Southern Oscillation (ENSO)	+3–6°C	~100 years (gradual)	Drought in Southeast Asia and elsewhere
Indian summer monsoon	N/A	~1 year (rapid)	Drought
Sahara/Sahel and West African Monsoon	+3–5°C	~10 years (rapid)	Increased carrying capacity
Drying and dieback of Amazon rainforest	+3–4°C	~50 years (gradual)	Biodiversity loss, decreased rainfall
Northward shift of boreal forest	+3–5°C	~50 years (gradual)	Biome switch
Warming of Antarctic bottom water	Unclear	~100 years (gradual)	Changed ocean circulation, reduced carbon storage
Melting of tundra	Ongoing	~100 years (gradual)	Amplified warming, biome switch
Melting of permafrost	Ongoing	<100 years (gradual)	Amplified warming from release of methane and carbon dioxide
Release of marine methane hydrates	Unclear	1,000 to 100,000 years	Amplified warming from release of methane

Source: Adapted from Lenton and others 2008.

Note: An expert elicitation of opinions about the probability of passing a tipping point in a subset of these systems—the melting of the West Antarctic ice sheet, melting of Greenland ice sheet, Amazon drying, and ocean circulation (Kriegler and others 2009)—estimated at least a 16 percent probability of one of these events for a warming of 2–4°C. The probability would rise to greater than 50 percent for a global mean temperature change above 4°C relative to year 2000 levels. In many cases, these numbers are considerably higher than the probability allocated to catastrophic events in current climate-damage assessments; for example, Stern (2007) assumed a 5–20 percent loss of the ice sheets with a 10 percent probability for a warming of 5°C.

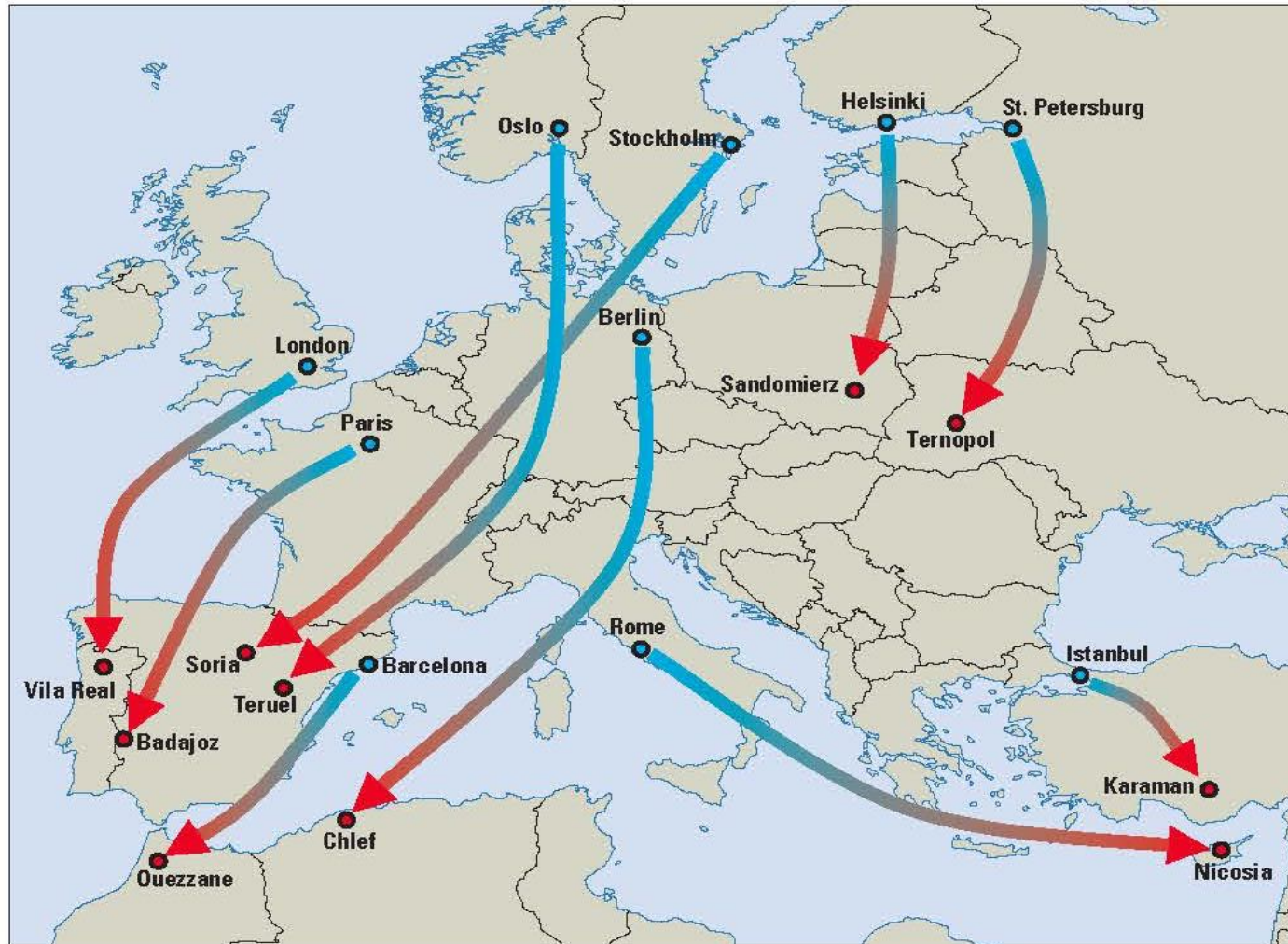
Les populations et les mégacités situées près des côtes sont menacées par la hausse de la mer et les tempêtes



Source: United Nations 2008a.

Note: Megacities in 2007 included Beijing, Bombay, Buenos Aires, Cairo, Calcutta, Dhaka, Istanbul, Karachi, Los Angeles, Manila, Mexico City, Moscow, New Delhi, New York, Osaka, Rio de Janeiro, São Paulo, Seoul, Shanghai, and Tokyo. Megacities are defined as urban areas with more than 10 million inhabitants.

Les villes d'Europe du Nord se préparent à avoir un climat du Sud



Source: WDR team, reproduced from Kopf, Ha-Duong, and Hallegatte 2008.

Note: With increasing global temperatures, climate zones will shift north, and by the middle of the 21st century many central and northern European cities will "feel" Mediterranean. This is not good news and has major implications: water utilities will need to adjust management plans, and health services will need to be prepared for more extreme heat episodes (similar to the 2003 European heat wave). While a few degrees of warming may seem appealing on a cold winter day in Oslo (the scenario shown in the map corresponds approximately to a global temperature increase of 1.2°C relative to today), the necessary changes in planning, public health management, and urban infrastructure are substantial. Buildings that were designed and engineered for cold harsh winters will need to function in a drier and hotter climate, and heritage buildings may suffer irreparable damages. Even more challenging is the construction of new buildings today as their design needs to be highly flexible to gradually adjust to drastically different conditions over the coming decades.

Les changements climatiques ont accéléré le retour de la DINGUE aux Amériques



Source: PAHO 2009.

Note: Infectious and vector-borne diseases have been expanding into new geographic areas all over the world. In the Americas the incidence of dengue fever has been rising because of increasing population density and widespread international travel and trade. Changes in humidity and temperature brought about by climate change amplify this threat and allows disease vectors (mosquitoes) to thrive in locations previously unsuitable for the disease; see Knowlton, Solomon, and Rotkin-Ellman 2009.