

# Dérèglements climatiques et croissance économique: quels enjeux pour l'évaluation des politiques climatiques

**Patrick Schembri**

Observatoire de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines

CEARC - Cultures, Environnements, Arctique, Représentations, Climat et LabEx BASC

Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines et Université Paris Saclay

[Patrick.schembri@uvsq.fr](mailto:Patrick.schembri@uvsq.fr)



**CEARC**  
Cultures • Environnements  
Arctique • Représentations • Climat



# Introduction

- **Dynamique conjointe économie-environnement (WP3-WP TR)**
  - Modélisation: dynamique, statique comparative
  - La notion de limite et « the return of limits to growth »
- **Dynamique conjointe et causalités santé-environnement (WP3-WP2)**
  - Qualité de vie et bien-être (lecture par les dommages)
  - Gains de productivité (lecture par les activités productives)
- **Dynamique conjointe et politiques climatiques (WP3-WP1)**
  - Facture climatique et rétroactions climatiques
  - Coût de la transition et scénario contrefactuel

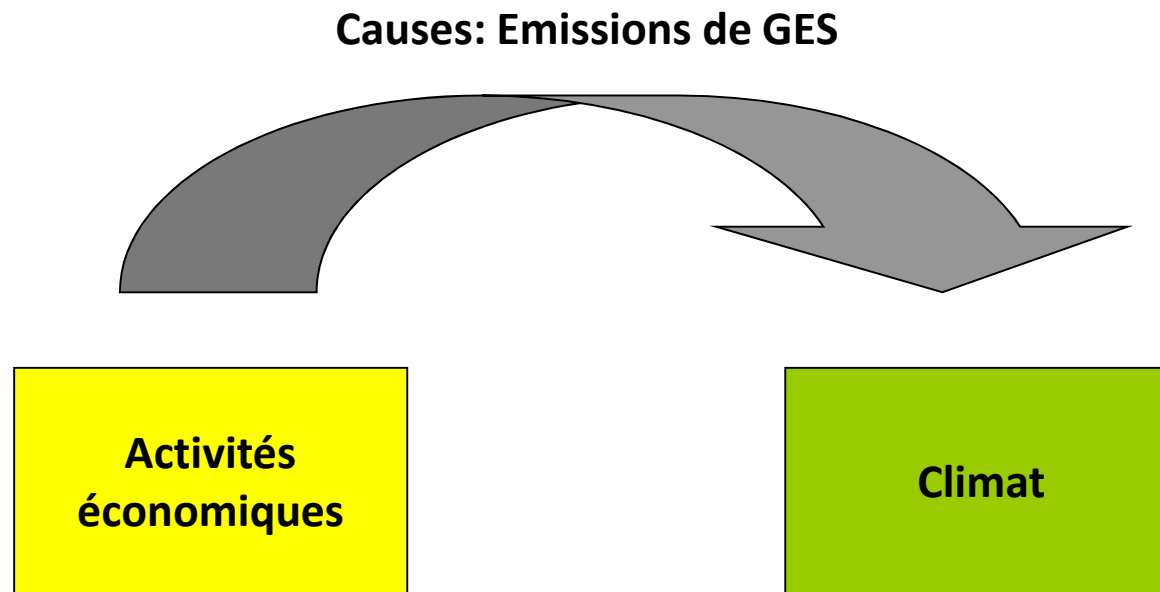
# Objectifs

- Interroger la rétroaction climatique dans les modèles de croissance économique
- Interroger la manière dont les scénarios d'émissions sont construits

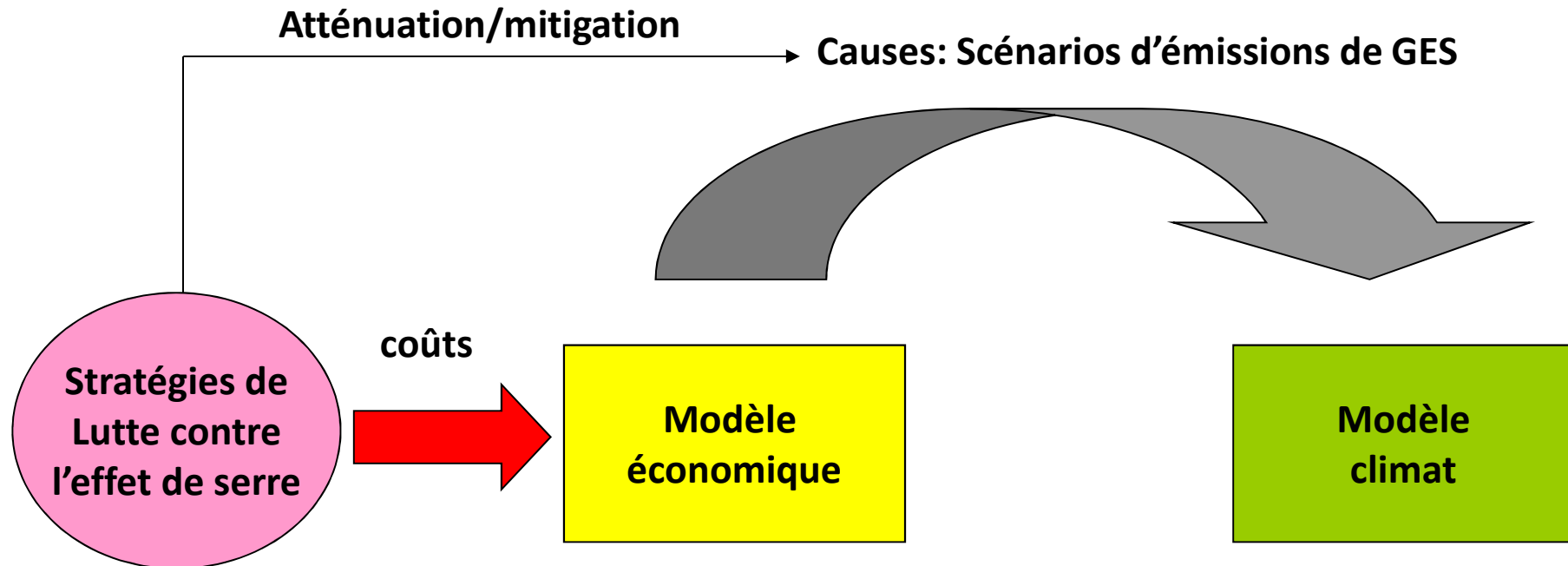
# Exposé en trois temps

- **Interactions économie-climat**
  - Cadre d'analyse
  - modélisation
- **Construction des trajectoires d'émissions de GES**
  - Les scénarios SSP
  - Leur évaluation
- **De l'impact à la rétroaction**
  - Climat et productivité du travail
  - Climat, scénarios ajustés et « effets de bouclage »

# Economie-climat: quelles interactions ?

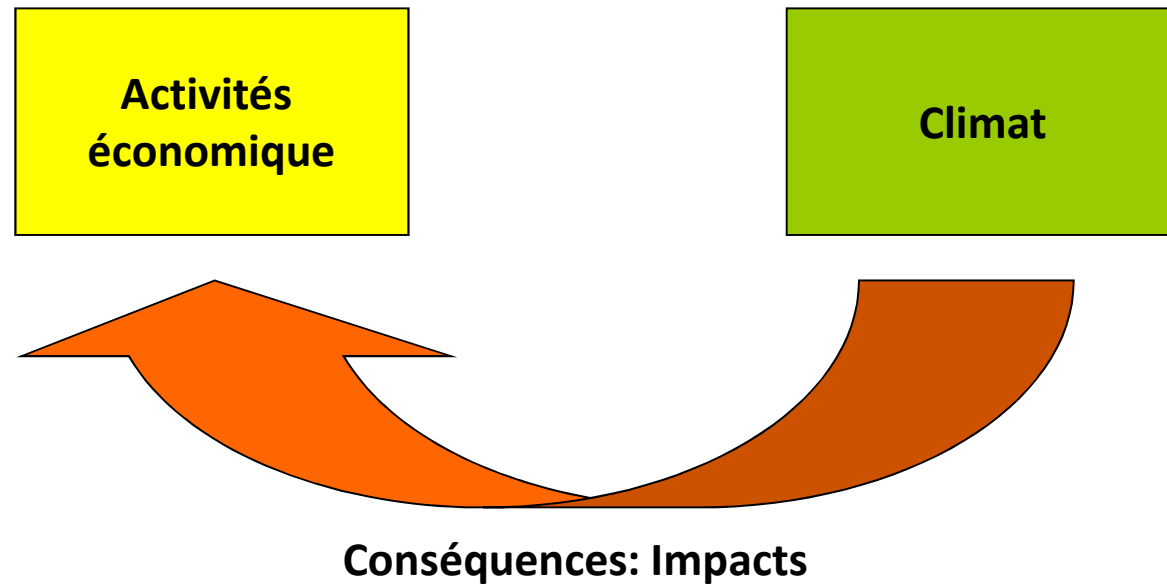


# Economie-climat: quelles interactions ?

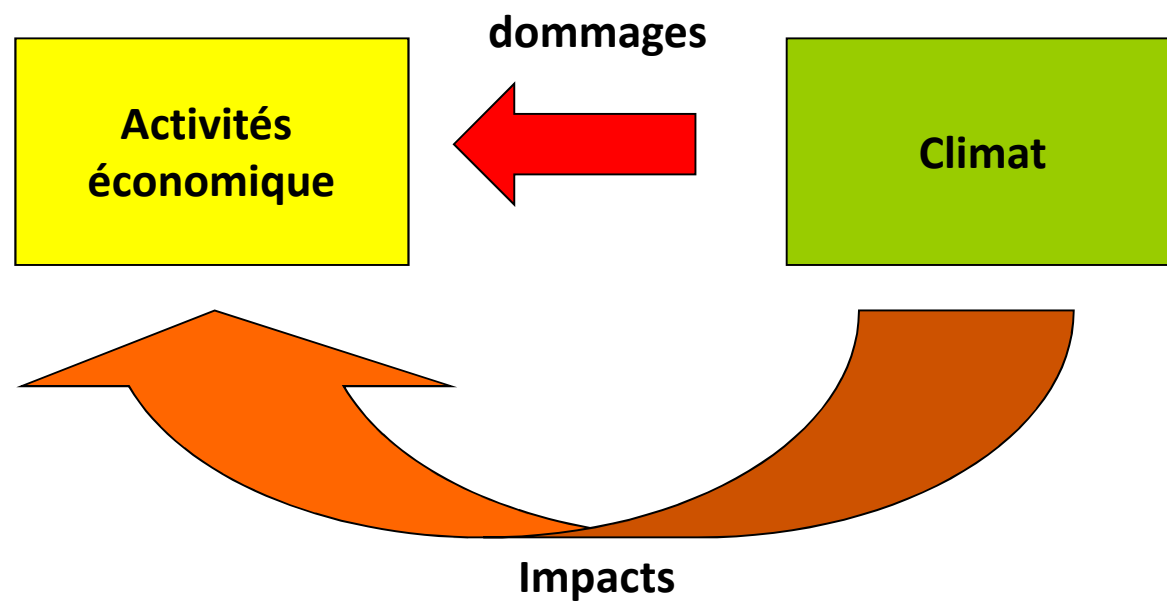


**Avantages: Quelle valeur pour les émissions évitées?**

# Economie-climat: quelles interactions ?



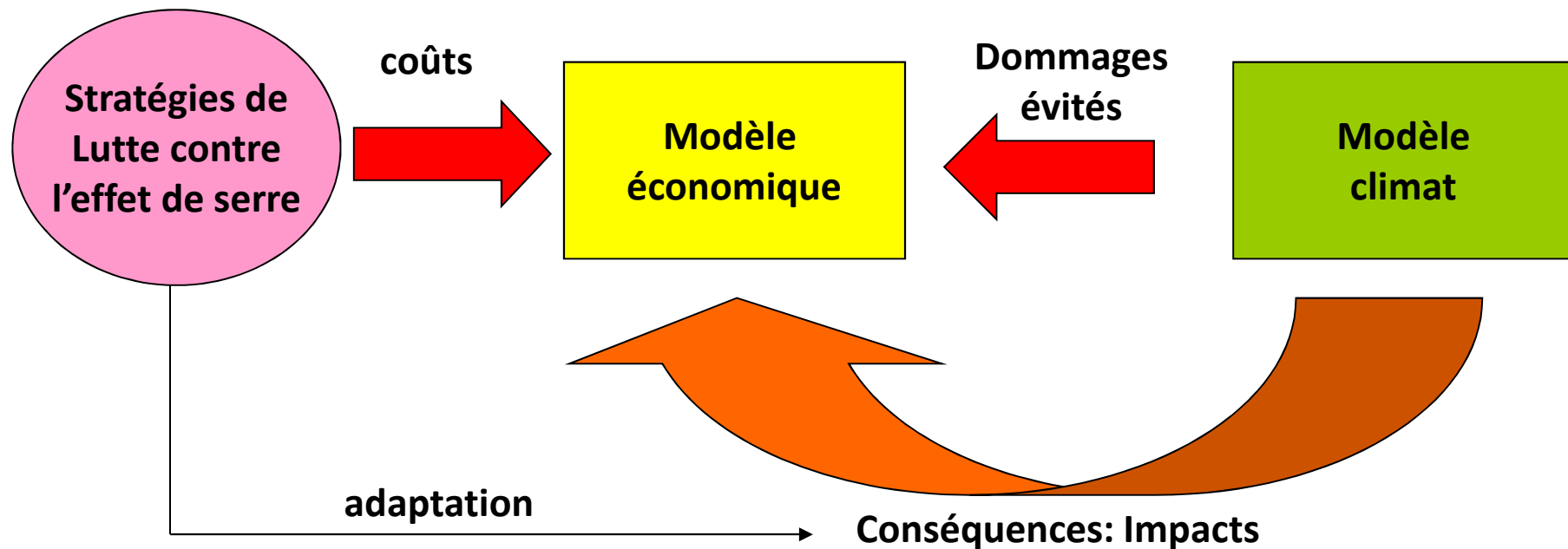
# Economie-climat: quelles interactions ?



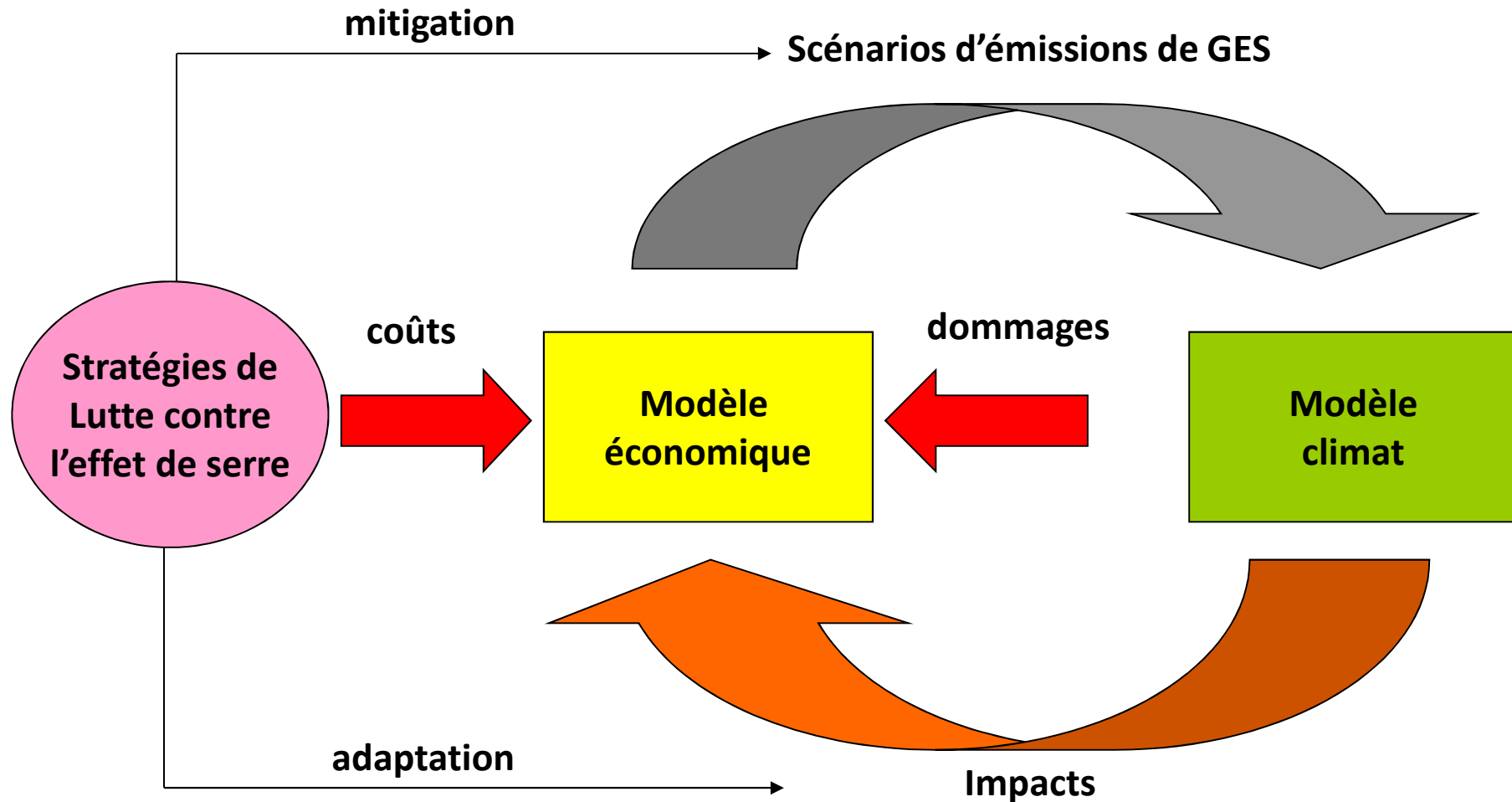


# Economie-climat: quelles interactions ?

Avantages: Quelle valeur pour les impacts et dommages évités?



# Economie-climat: quelles interactions ?



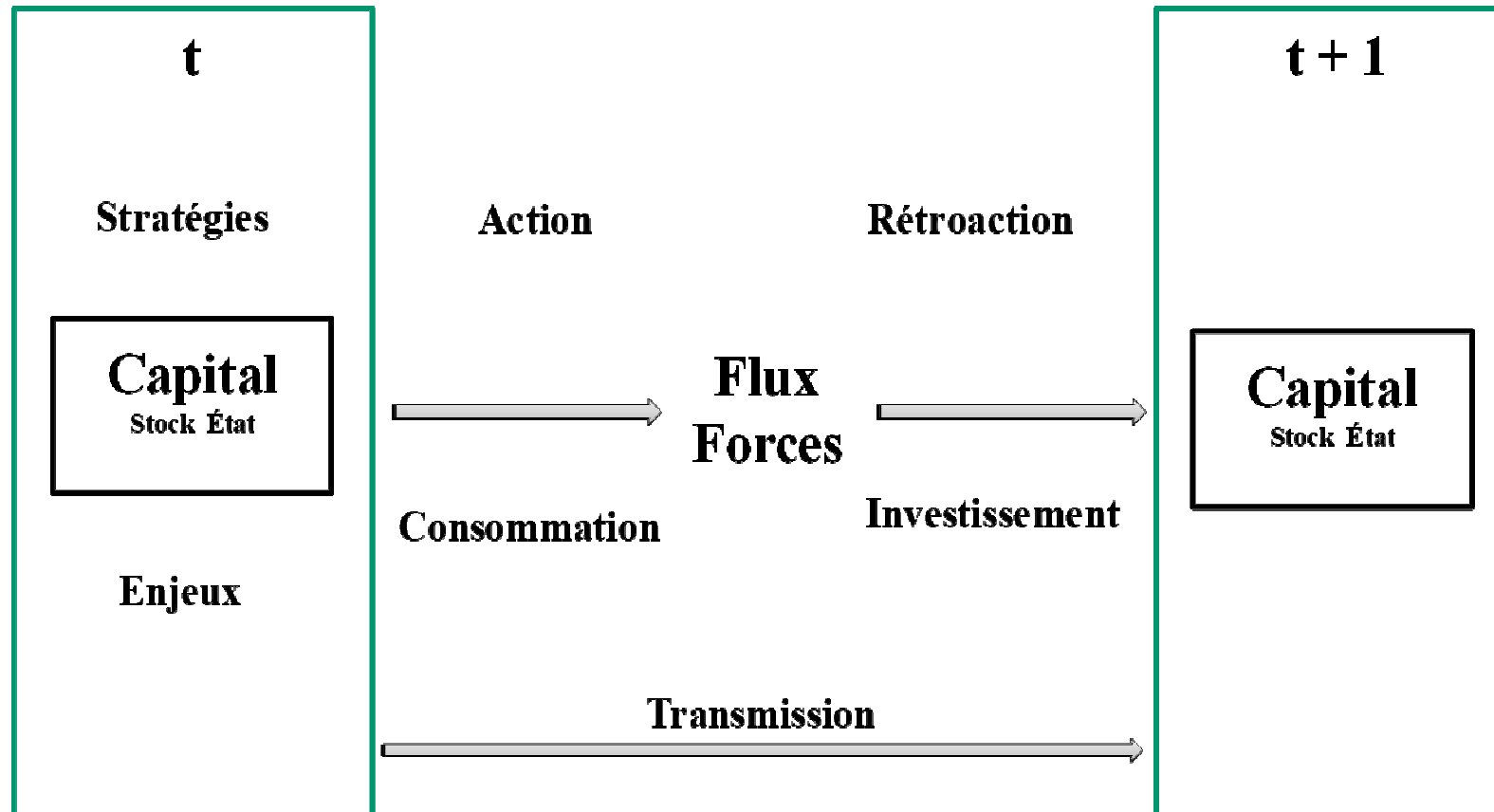
# Modélisation économie-climat: un bref état de l'art

- **Croissance, changement technologique endogène et climat:** Bovenberg & Smulders (1995;1996) ; Goulder & Schneider (1999) ; Goulder & Mathai, (2000) ; Popp, (2002;2004) ; Vand der Zwaan & alii. (2002) ; Grimaud, Lafforgue & Magné (2011) ; Hartley & alii. (2011) ; Hassler, Krusell & Olovsson (2011) ; Acemoglu & alii. (2012) ; Acemoglu & alii. (2016)
- **Analyses en EGC du climat:** Nordhaus (1994;2008, 2014) ; MacCracken & alii. (1999) ; Nordhaus & Boyer (2000) ; Nordhaus & Stern (2007) ; Krusell & Smith (2009) ; Adao, Narajabad & Temzelides (2012) ; Hassler & Krusell (2012) ; Golosov & alii. (2014); Pottier, Espagne, Fabert & Dumas (2015), den Elzen & van Vuuren (2010)
- **Macroéconomie « écologique » et climat:** Rezai, Taylor & Mechler (2013), Rezai, Taylor & Foley (2018, 2016); Fontana & Sawyer (2016); Taylor (2009)

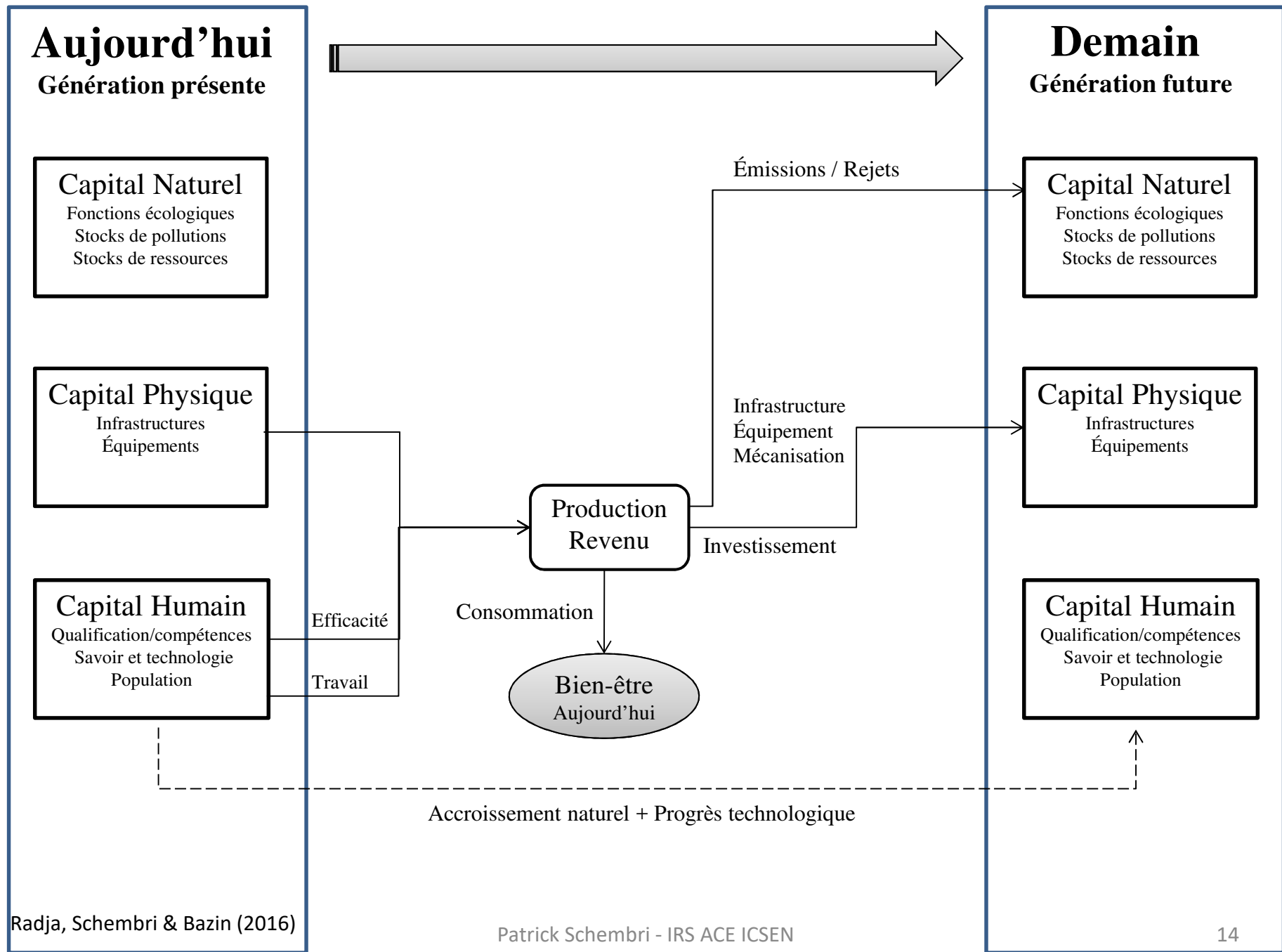
# Protocole de modélisation

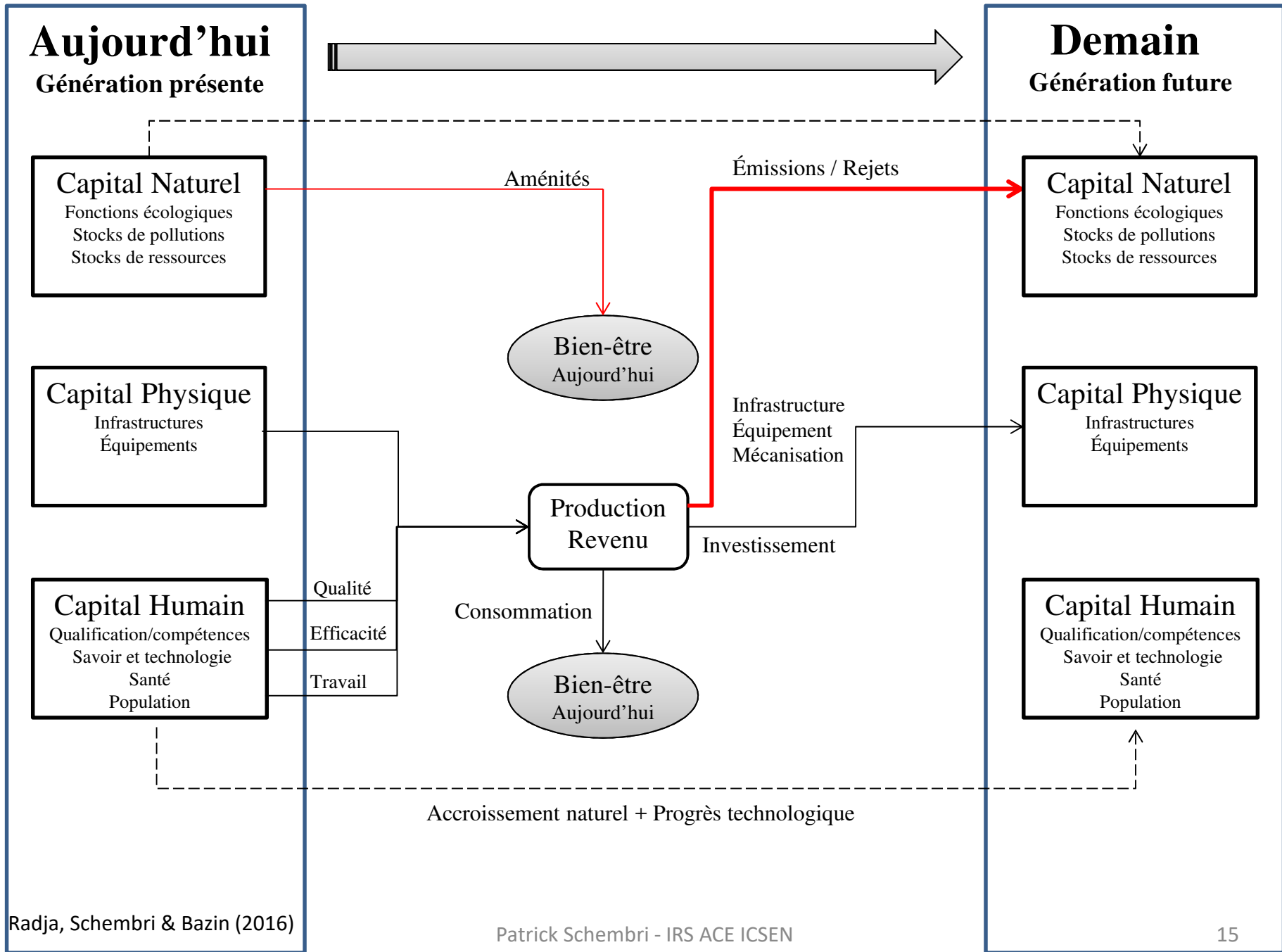
- **Une modélisation stock-flux**
  - Analyse dynamique de ces interactions
  - La mesure des effets croissance plutôt que celle des effets niveaux très souvent répandue
  - Traitement asymétrique de l'environnement entre le court terme et le long terme
- **La croissance potentielle**
  - Le très long terme et la flexibilité technique
  - Équilibre de croissance plutôt qu'optimum de croissance
  - Neutralité temporelle
- **La soutenabilité**
  - Le bien « capital » comme catégorie conceptuelle
  - La comparaison de vitesses
  - Les enjeux

# Modélisation



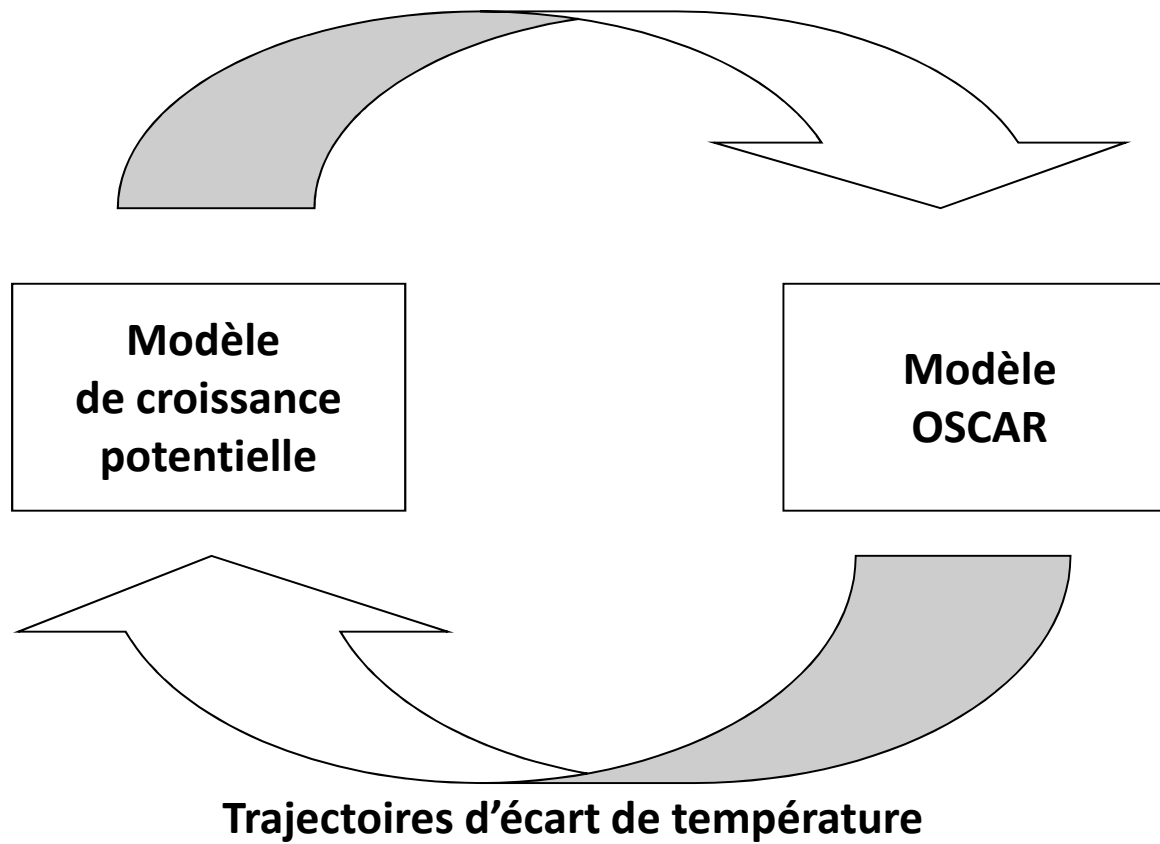
Source: P. Schembri



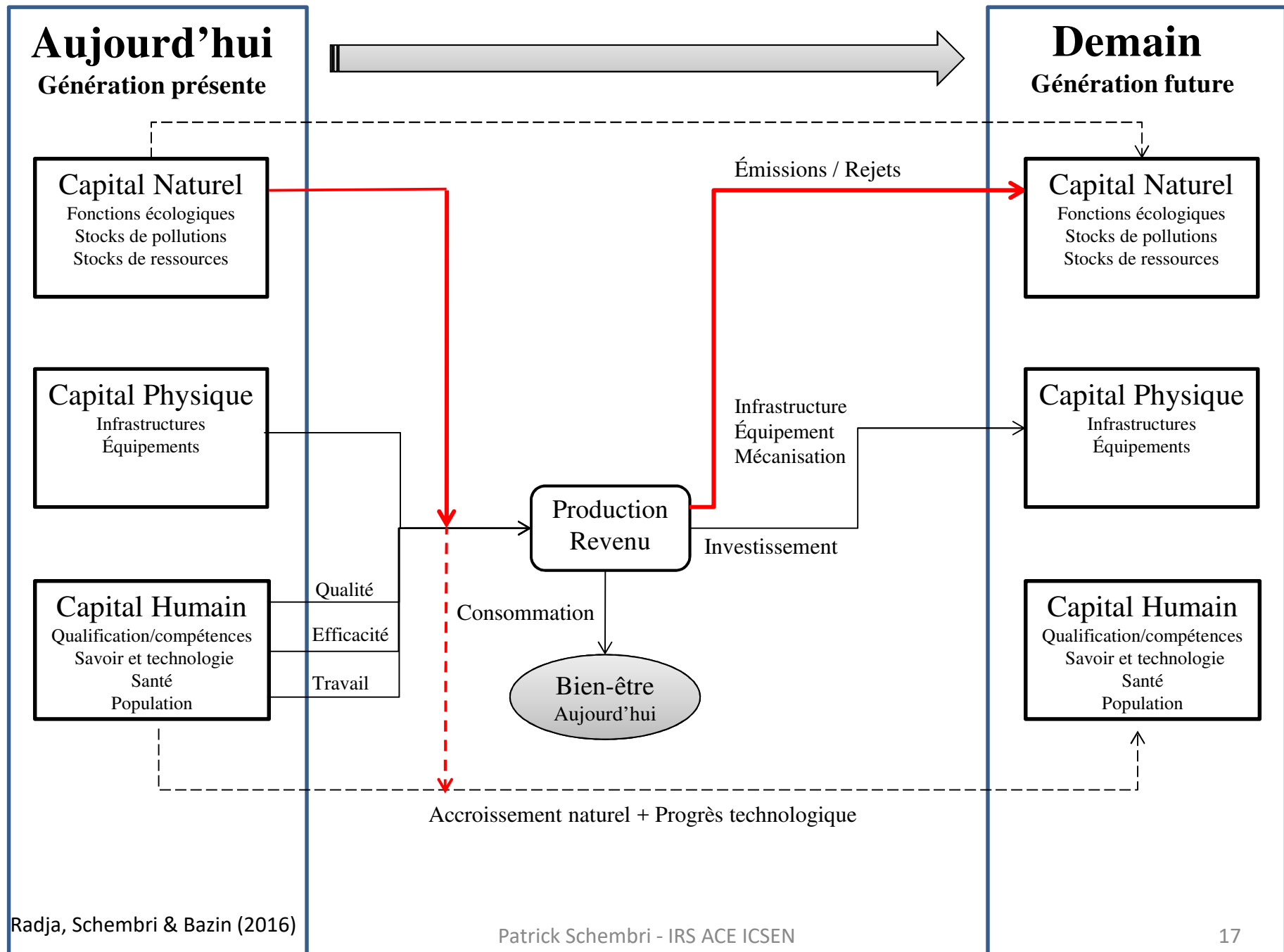


# Cadre analytique

trajectoires d'émissions de CO2

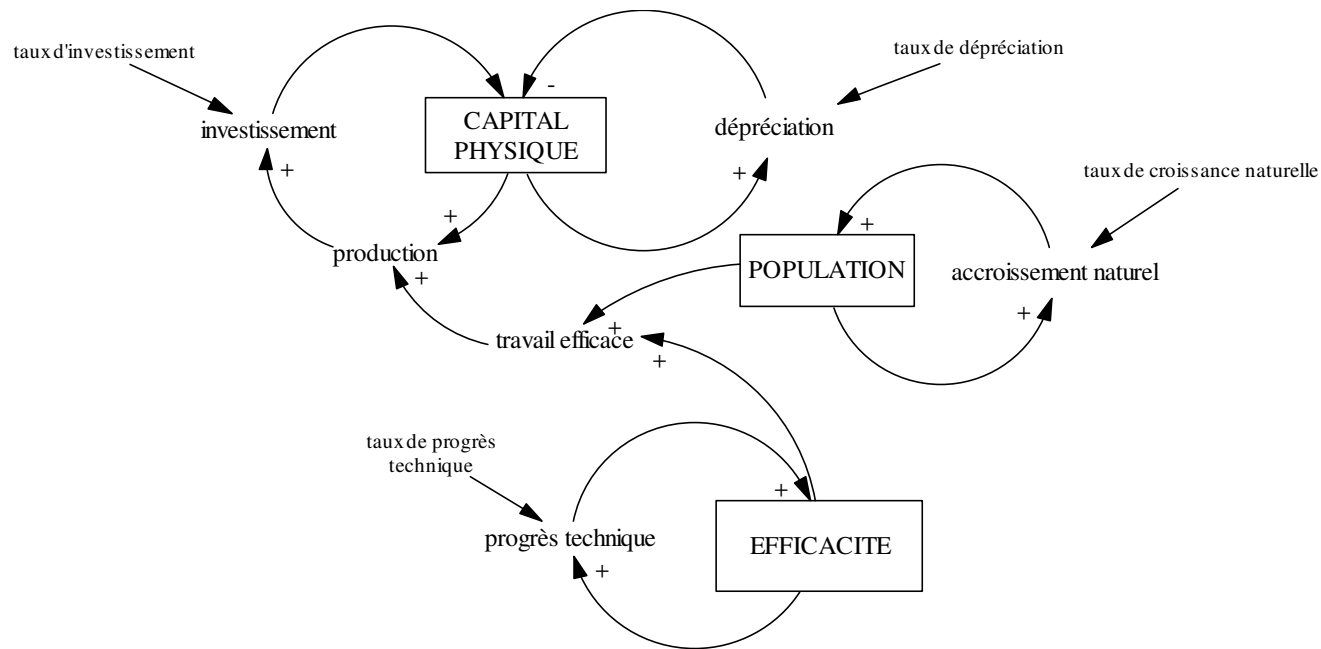






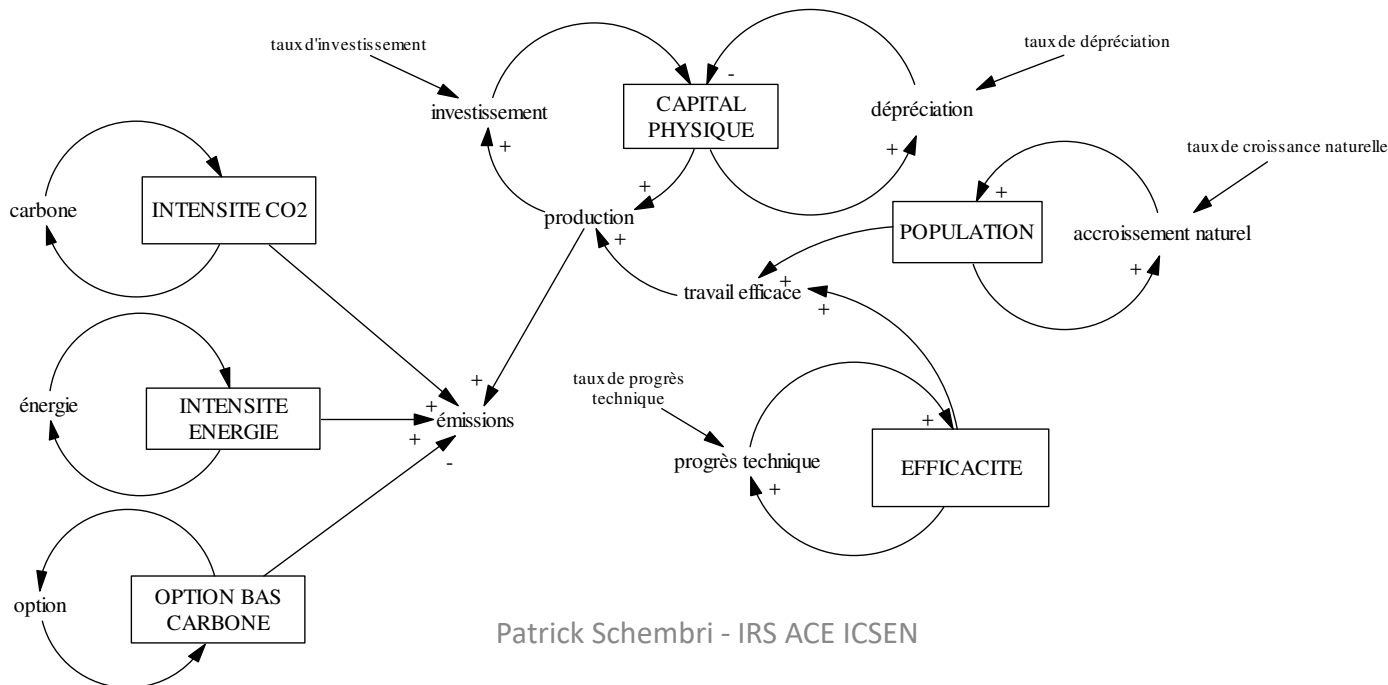
# Modélisation en dynamique des systèmes (1)

ETAT/STOCK	FORCE/FLUX	CONTROLE/PARAMETRE
<b>Capital physique (<math>K</math>)</b>	Investissement brut ( $I$ ) Revenu ou produit potentiel ( $Q$ ) Dépréciation	Taux d'investissement ( $s$ ) Taux de dépréciation du capital ( $\delta$ )
<b>Population (<math>N</math>)</b>	Nombre de travailleurs efficaces ( $H$ )	Taux de croissance naturelle ( $n$ ) Part population active ( $a$ )
<b>Efficacité (<math>A</math>)</b>	Progrès technique	Taux de progrès technique ( $m$ )



# Modélisation en dynamique des systèmes (2)

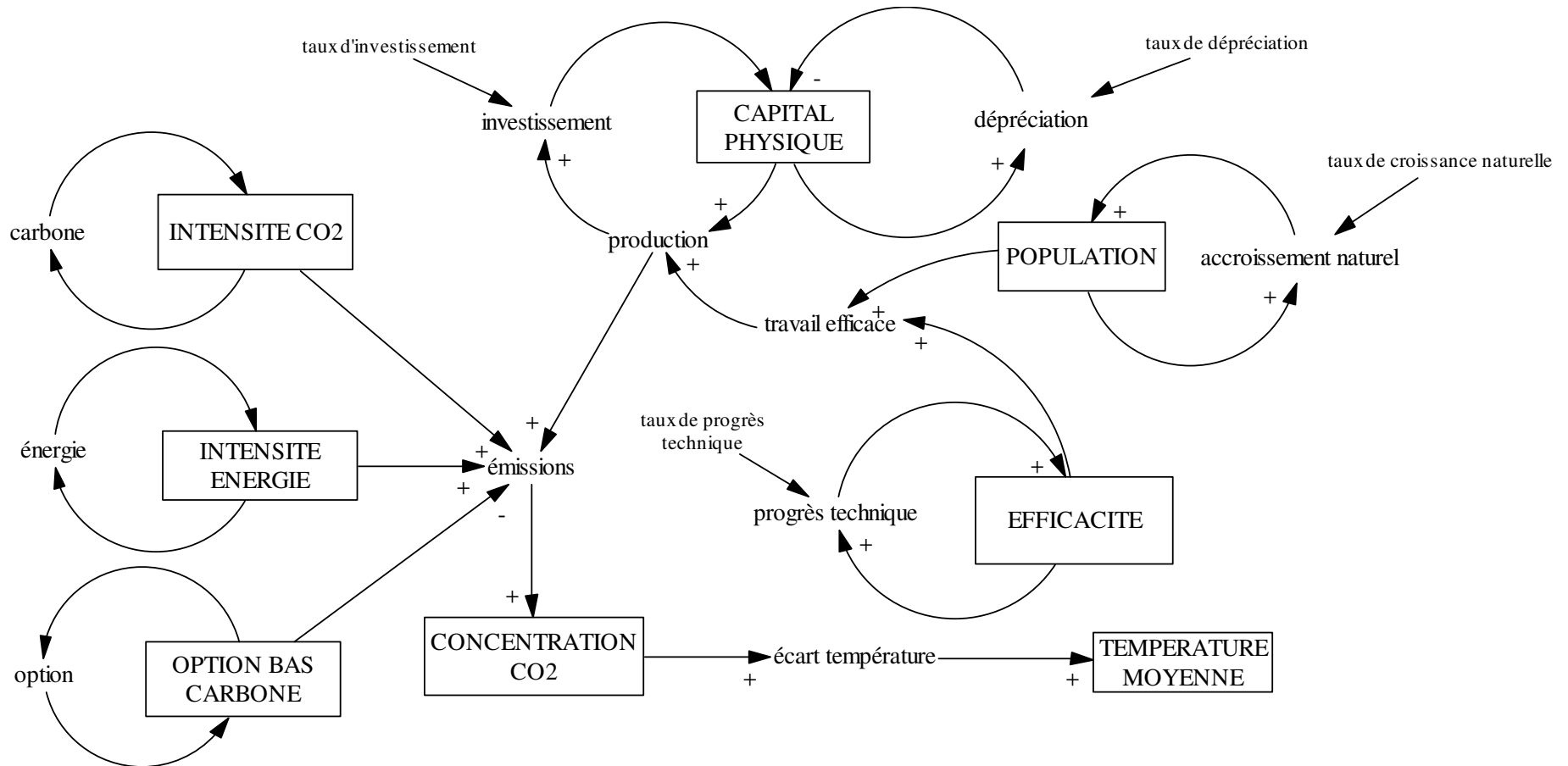
ETAT/STOCK	FORCE/FLUX	CONTROLE/PARAMETRE
<b>Capital physique (<math>K</math>)</b>	Investissement brut ( $I$ ) Revenu ou produit potentiel ( $Q$ ) Dépréciation	Taux d'investissement ( $s$ ) Taux de dépréciation du capital ( $\delta$ )
<b>Population (<math>N</math>)</b>	Nombre de travailleurs efficaces ( $H$ )	Taux de croissance naturelle ( $n$ ) Part population active ( $a$ )
<b>Effacité (<math>A</math>)</b>	Progrès technique	Taux de progrès technique ( $m$ )
<b>INTENSITE CARBONE (<math>\Gamma</math>)</b> <b>INTENSITE ENERGIE (<math>Z</math>)</b> <b>OPTION BAS CARBONE (<math>B</math>)</b>	Emissions de CO2 ( $E$ ) Intensité CO2 Intensité énergie Part énergie bas carbone	TCAM intensité CO2 ( $\gamma$ ) TCAM intensité énergie ( $\zeta$ ) TCAM option bas carbone ( $\beta$ )



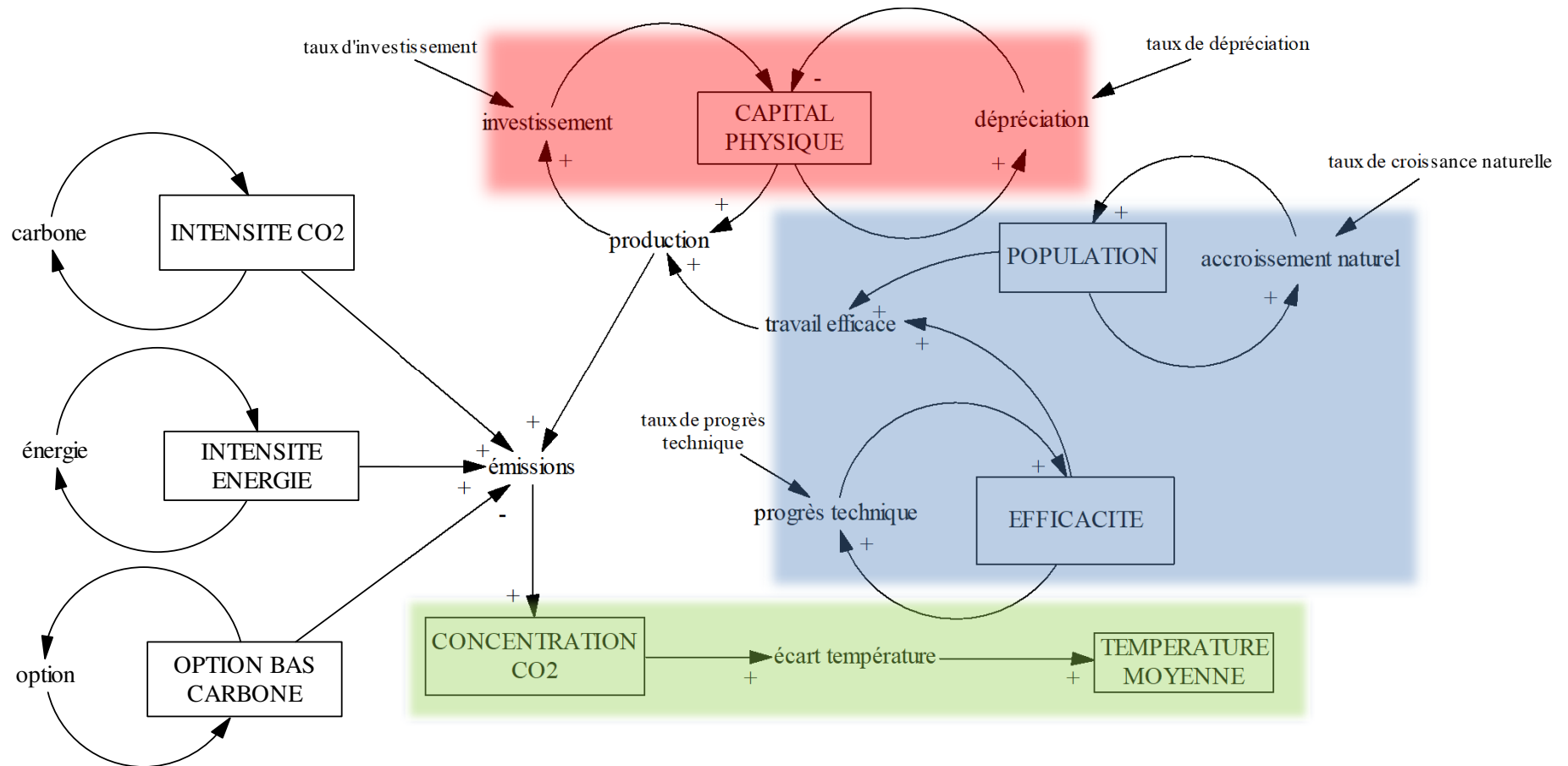
# Modélisation en dynamique des systèmes (3)

ETAT/STOCK	FORCE/FLUX	CONTROLE/PARAMETRE
<b>Capital physique (K)</b>	Investissement brut ( $I$ ) Revenu ou produit potentiel ( $Q$ ) Dépréciation	Taux d'investissement ( $s$ ) Taux de dépréciation du capital ( $\delta$ )
<b>Population (N)</b>	Nombre de travailleurs efficaces ( $H$ )	Le taux de croissance naturelle ( $n$ ) Part population active ( $a$ )
<b>Efficacité (A)</b>	Progrès technique	Taux de progrès technique ( $m$ )
<b>INTENSITE CARBONE (<math>\Gamma</math>) INTENSITE ENERGIE (<math>Z</math>) OPTION BAS CARBONE (<math>B</math>)</b>	Intensité CO2 Intensité énergie Part énergie bas carbone	TCAM intensité CO2 ( $\gamma$ ) TCAM intensité énergie ( $\zeta$ ) TCAM option bas carbone ( $\beta$ )
<b>CONCENTRATION CO2 (X)</b>	Emissions de CO2 (E)	Transfert ( $\tau$ )
<b>TEMPERATURE MOYENNE (T)</b>	Ecart de température ( $\Delta$ )	

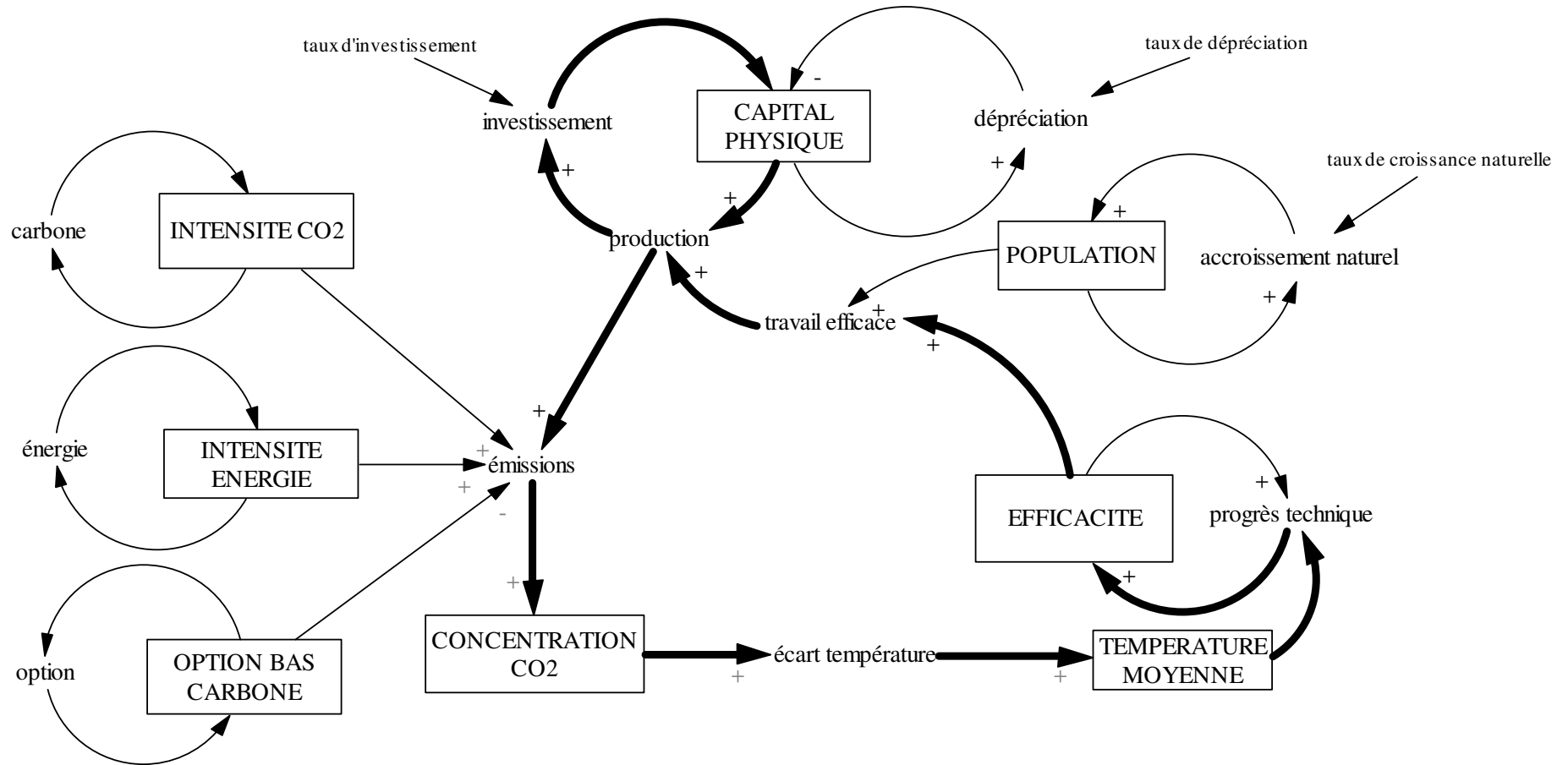
# Variables et diagramme causal (3)



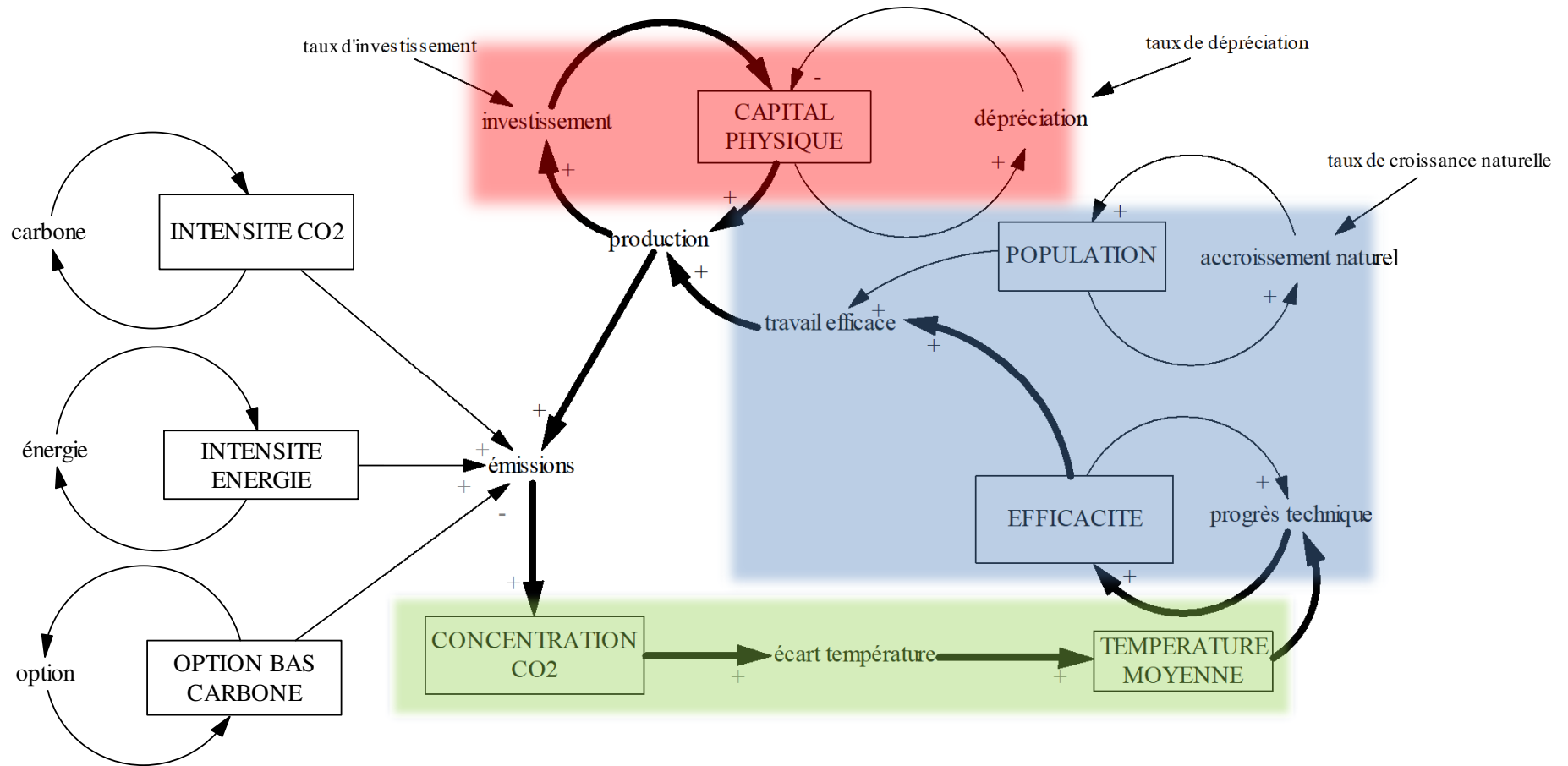
# Diagramme causal et biens capitaux



# modèle de croissance et rétroaction du climat



# modèle de croissance et rétroaction du climat





# Le modèle de croissance potentielle

Production potentielle:  $Q = F(K, AN) = K^{\alpha_0} H^{1-\alpha_0}$ , avec  $0 < \alpha_0 < 1$ .

## Le capital humain:

$$N(t) = N(0)e^{n_0 t}, n_0 \geq 0, N(0) = N_0 > 0$$

$$A(t) = A(0)e^{m_0 t}, m_0 > 0, A(0) = A_0 > 0.$$

$$\frac{Q}{N} \equiv q = A\varphi. \text{ sachant que } \frac{Q}{H} \equiv \varphi = \left(\frac{K}{H}\right)^{\alpha_0} = b^{\alpha_0}.$$

## Le capital physique:

$$\frac{dK}{dt} \equiv \dot{K} = sQ - \delta_0 K, 0 \leq \delta_0 < 1, 0 < s < 1,$$

$$K(0) = K_0 > 0$$

## Le capital naturel:

La concentration de CO2 :  $\dot{X} = \tau E$ ,  
avec  $\tau > 0$

$$\text{L'écart de température : } \Delta = \lambda \frac{\ln(\frac{X}{\bar{X}})}{\ln(2)},$$

avec  $\lambda > 0$  et  $\bar{X} = X_{1750}, T_0 = 15^\circ C$

## Taux de croissance de la productivité du travail:

$$\hat{q} = \hat{\varphi} + \hat{A} = \hat{Q} - \hat{H} + \hat{A} = \hat{Q} - \hat{N}$$

$$\hat{q} = \alpha_0 \hat{b} + m_0$$

## Le taux de croissance de l'économie à très long terme:

$$\hat{Q} = \hat{q} + \hat{N} = \hat{q} + n_0$$

## Le taux de croissance de l'économie à moyen-long terme :

$$\hat{Q}_{MT} = \alpha_0 \hat{K}_{MT} + (1 - \alpha_0) \hat{H} = \alpha_0 \left( s_0 \frac{\varphi}{b} - \delta_0 \right) + (1 - \alpha_0) \hat{H}.$$

Long terme versus très long terme

Flexibilité technologique ex ante et ex post

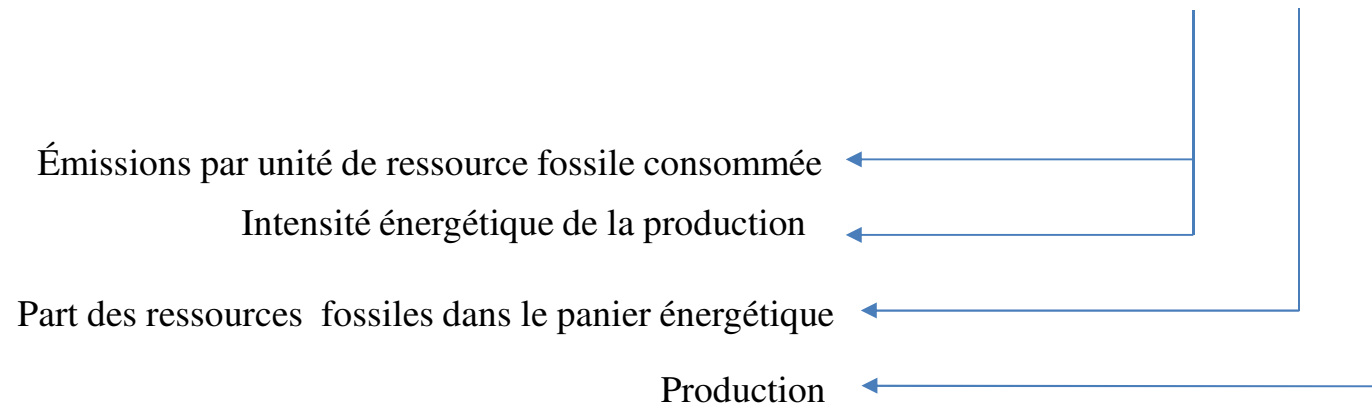
Pas d'optimisation, pas d'actualisation

Climat et « choc » de température

Krusel & Smith (2014)

# Le modèle de croissance potentielle

$$\text{Emissions de CO}_2 : E = \Gamma Z(1 - B)Q = \Gamma Z(1 - B)H\varphi$$



$$\begin{aligned} &\Gamma(0)e^{\gamma_0 t}, \Gamma(0) = \Gamma_0 \text{ et } 0 < \Gamma_0 < 1 \\ &Z(0)e^{\zeta_0 t}, Z(0) = Z_0 \text{ et } 0 < Z_0 < 1 \\ &B(0)e^{\beta_0 t}, B(0) = B_0 \text{ et } 0 \leq B_0 \leq 1 \end{aligned}$$

**I = EFFET VOLUME + EFFET COMPOSITION + EFFET QUALITE**

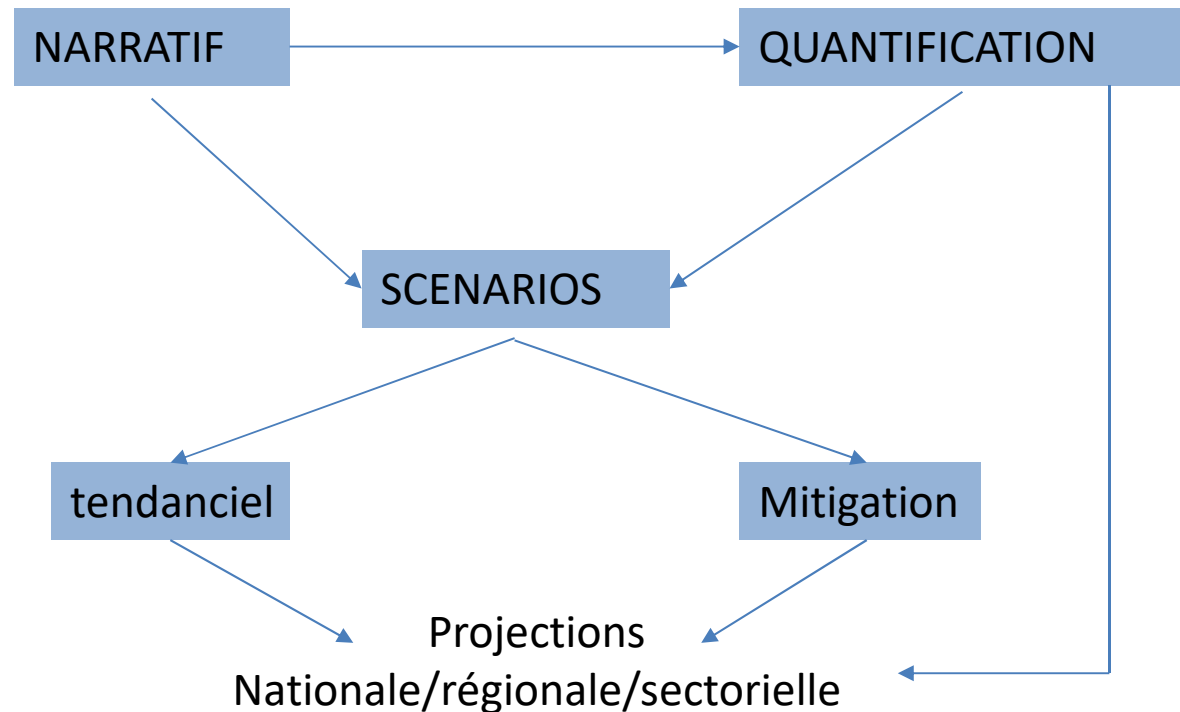
Du modèle IPAT (COMMONER, 1971) à l'identité de YOICHI KAYA (1993) :

$$I(t) = \text{POP}(t) \cdot \text{AFFLUENCE}(t) \cdot \text{TECHNOLOGIE}(t)$$

$$I(t) = [I(t)/F(t)] \cdot [F(t)/E(t)] \cdot [E(t)/\text{PIB}(t)] \cdot [\text{PIB}(t)/\text{POP}(t)] \cdot \text{POP}(t)$$

# SSP comme composante d'un nouveau cadre pour la construction de scénarios climatiques

- Une démarche collective qui repose sur l'usage de plusieurs modèles pour construire des sentiers ou cheminements futurs plausibles



# SSP comme composante d'un nouveau cadre pour la construction de scénarios climatiques

SCENARIOS	
<b>SSP1</b>	Sustainability Taking the Green Road (Low challenges to mitigation and adaptation)
<b>SSP2</b>	Middle of the Road (Medium challenges to mitigation and adaptation)
<b>SSP3</b>	Regional Rivalry – A Rocky Road (High challenges to mitigation and adaptation)
<b>SSP4</b>	Inequality – A Road Divided (Low challenges to mitigation, high challenges to adaptation)
<b>SSP5</b>	Fossil-fueled Development – Taking the Highway (High challenges to mitigation, low challenges to adaptation)

EFFETS	Horizon 2100	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
<b>VOLUME DEMOG</b>	Population	Croissance, forte baisse	Croissance, baisse	Forte croissance	Croissance, baisse	Croissance forte, baisse
	Éducation	Forte croissance	Forte croissance	Faible croissance	diminution	Forte croissance
	Urbanisation	Forte croissance	Croissance moyenne	Faible croissance	Forte croissance	Forte croissance
<b>VOLUME ECO</b>	PIB	Croissance moyenne	Croissance moyenne	Croissance faible	Croissance faible	Forte croissance
	Convergence	rapide	oui	non	non	rapide
	Inégalités	Forte baisse	baisse	Faible baisse	croissance	Forte baisse
	Conso énergies	Faible croissance, baisse	Croissance soutenue	croissance	Croissance, stagnation	Forte croissance
<b>COMPOSITION</b>	Panier énergétique	Croissance renouv	Part fossile importante	Fossiles croissants	Croissance renouv	Fossiles croissants
	Usage des sols	Conversion soutenable	Pression soutenue	Forte pression	Pression modérée	Pression modérée
<b>QUALITE</b>	Intensité carbone/énergie	Forte baisse	Baisse modérée	Faible baisse	baisse	stagnation
	Intensité énergie/PIB	Forte baisse	baisse	Faible baisse	baisse	Forte baisse
<b>Impact ENV</b>	Émissions de CO2	Faible croissance, baisse	croissance	Forte croissance	Faible croissance, baisse	Forte croissance
	Forçage radiatif	5-5,8	6,5-7,3	6,7-8	5,5-6	8-8,7

Source: P. Schembri

Patrick Schembri - IRS ACE ICSEN

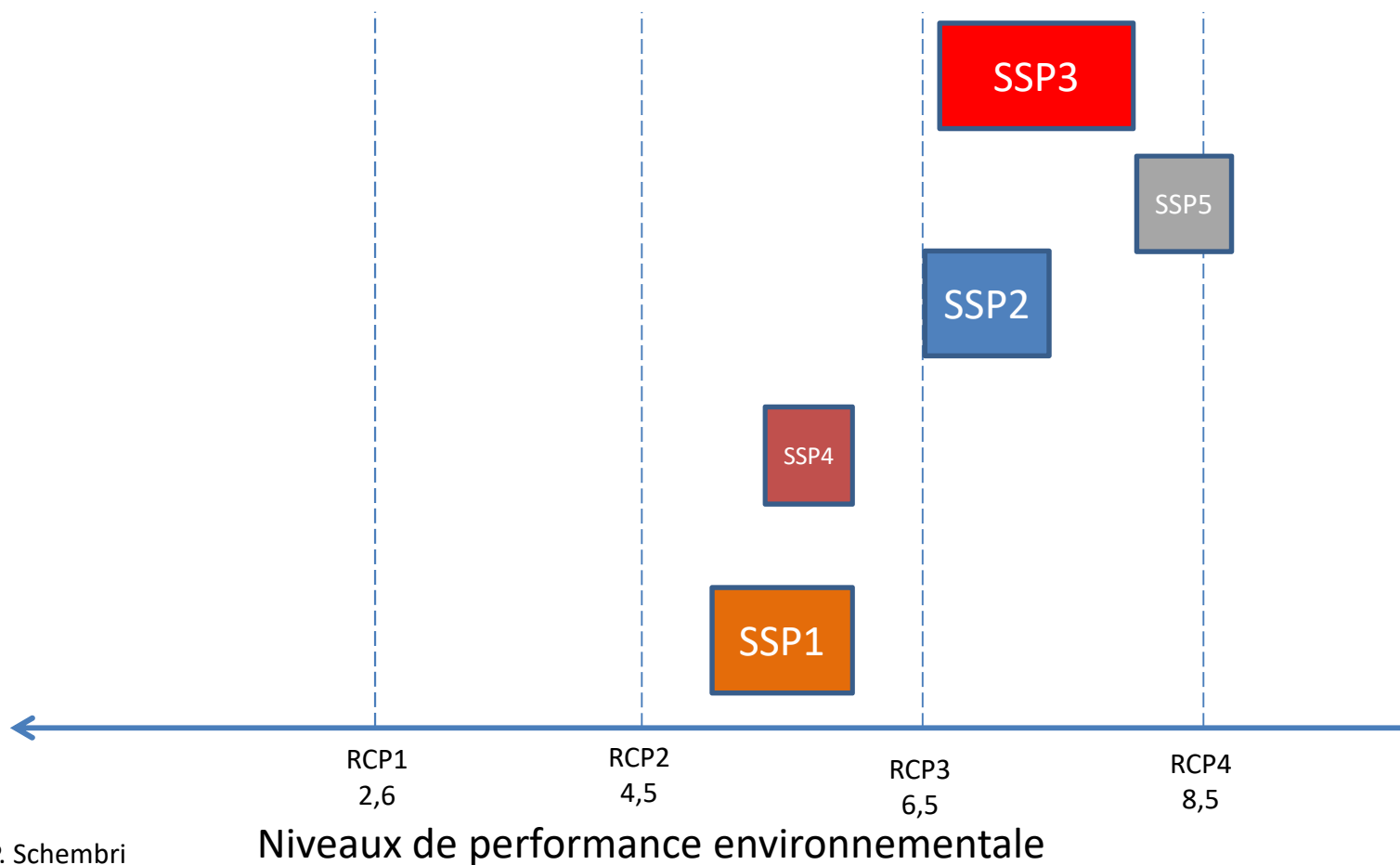
# Scénarios SSP et politiques climatiques

- L'idée: inclure dans les scénarios des hypothèses concernant les politiques climatiques (Shared climate Policy Assumptions – SPA)
  - Principaux leviers
    - Le niveau de coopération internationale à court-moyen terme
    - Le niveau d'engagement et sa déclinaison sectorielle
  - Principes fondateurs
    - Cohérence avec les narratifs et avec les défis en matière d'atténuation
    - Définition suffisamment large pour garantir la flexibilité dans les choix en matière d'instruments de politique économique

	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
<b>Atténuation</b>	Défi faible	Défi interm	Défi élevé	Défi faible	Défi élevé
<b>Adaptation</b>	Défi faible	défi interm	défi faible	défi élevé	défi élevé
<b>coopération</b>	Accession rapide à la coop. globale	Retard pour action globale et transitions régionales	Accession tardive avec pays à HR qui rejoignent d'abord la coopération	Accession rapide à la coop. globale	Retard pour action globale et transitions régionales
<b>Engagement</b>	Engagement > accord de Paris	Engagement = accord de Paris	Engagement < accord de Paris	Engagement > accord de Paris	Engagement < accord de Paris

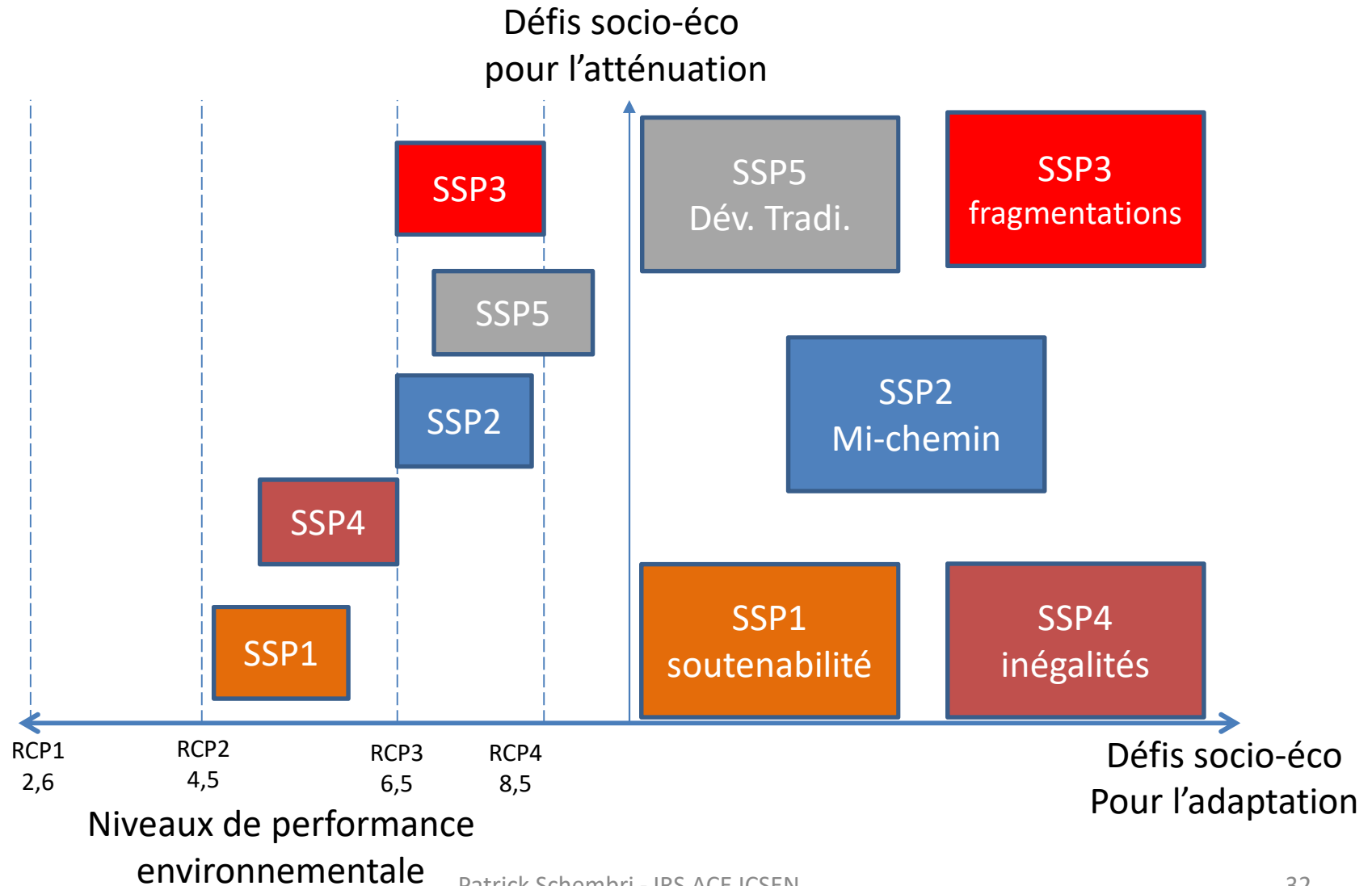
# Croisement entre scénarios SSP et scénarios RCP

Défis socio-éco pour l'atténuation



Source: P. Schembri

# Croisement entre scénarios SSP et scénarios RCP



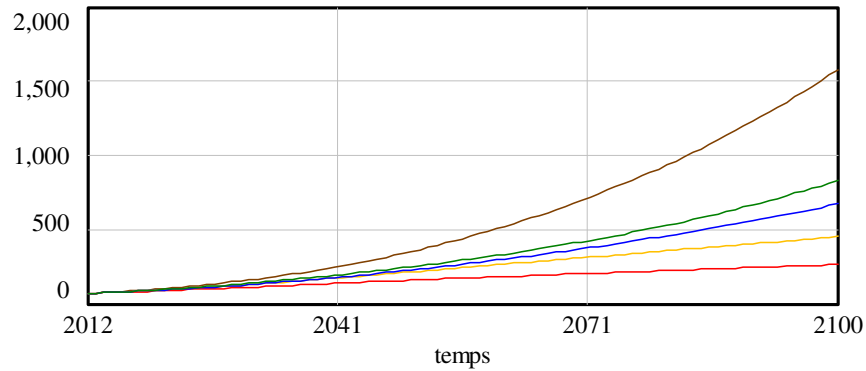


# Croisement entre scénarios SSP et scénarios RCP

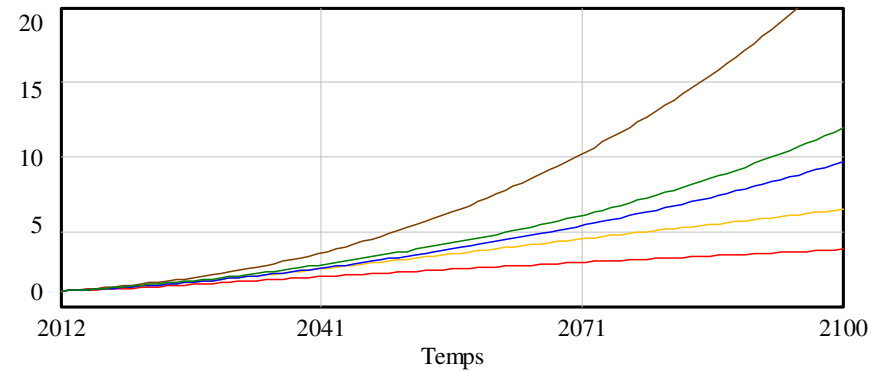
- **Respect des engagements RCP et changements structurels**
  - Pour atteindre 3,4 W/m<sup>2</sup>, il faut un système énergétique composé à 30% - 60% d'options bas carbone en 2050
  - Pour atteindre 2,6 W/m<sup>2</sup>, il faut un système énergétique composé de 40% - 70% d'options bas carbone en 2050
- **Aucun scénario SSP ne propose de tels changements**
  - SSP1 avec 30% d'options bas carbone à l'horizon 2050
  - SSP3 et SSP5 proposent une augmentation de la composante fossile avec un retour du charbon...
- **Non-faisabilité en termes de modélisation signifie la présence d'un risque accru au regard des transformations demandées**
  - Non-faisabilité en termes de modélisation ne veut pas dire non-faisabilité dans le monde réel

# Simulations: Effets d'échelle

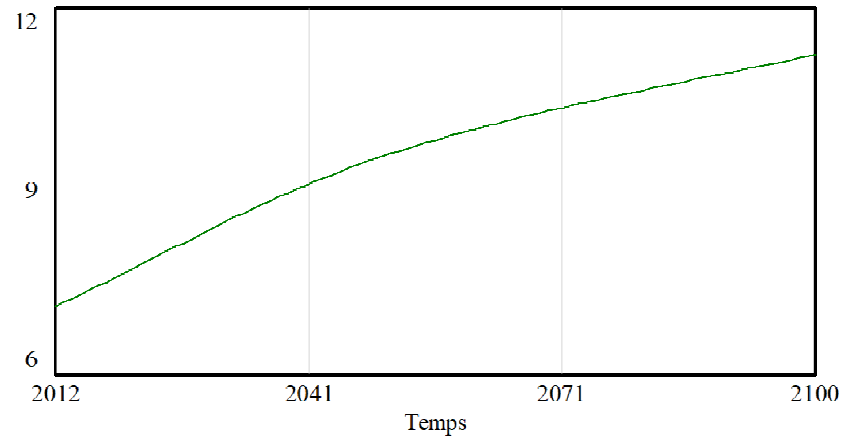
PRODUCTION POTENTIELLE (1000 milliards \$ 2010)



PRODUCTION POTENTIELLE (facteur de croissance - base 1 2012)

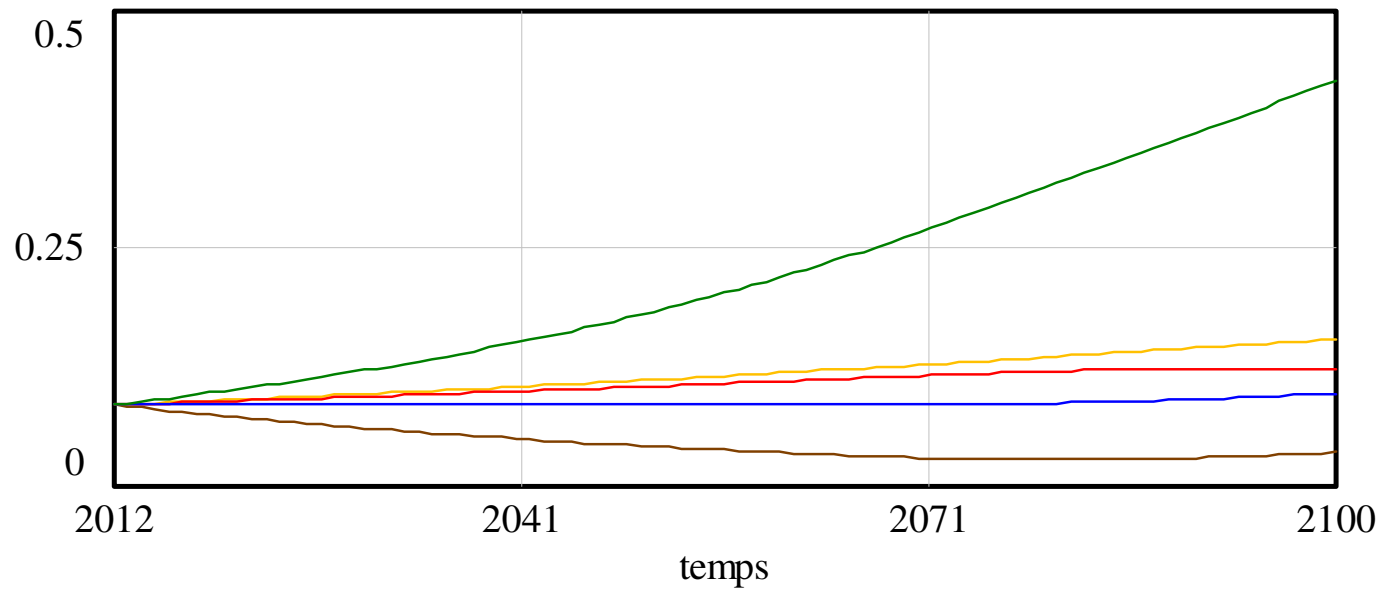


Population (milliards)

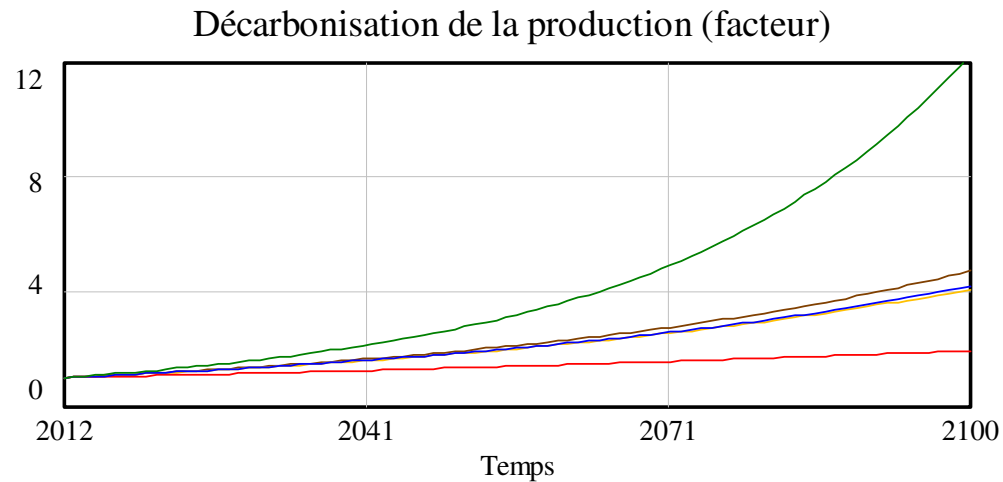
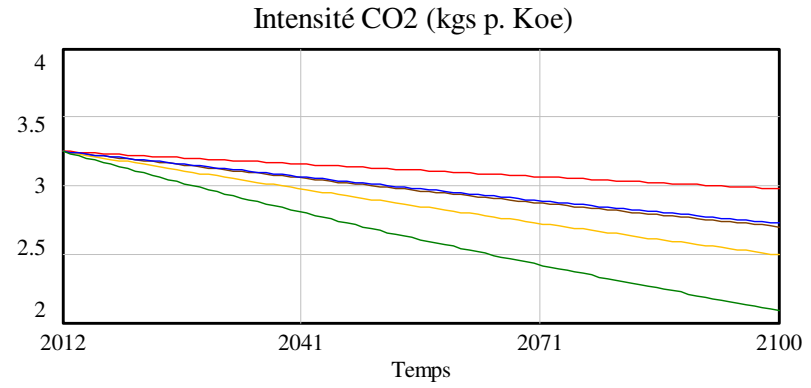
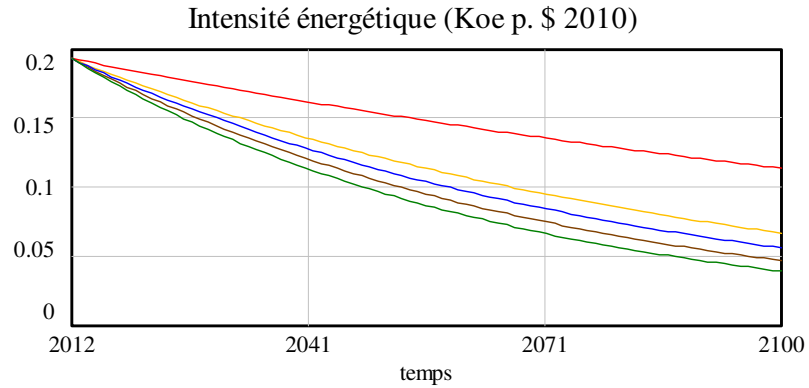


# Simulations: Effet composition

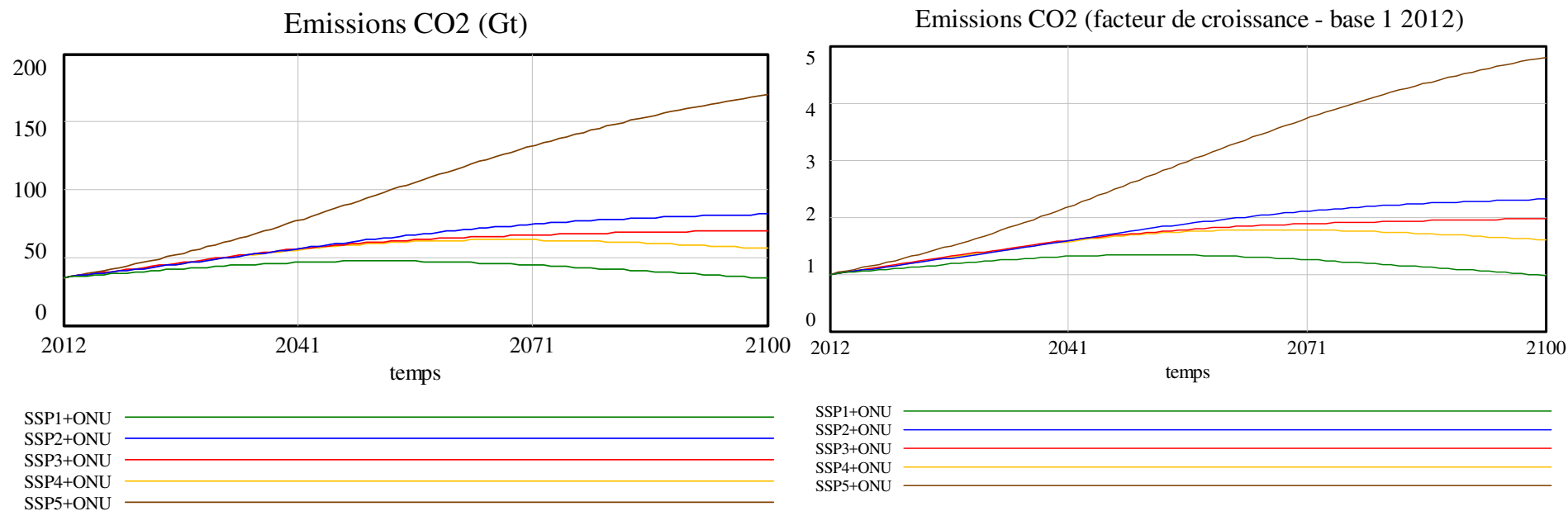
OPTION BAS CARBONE (part mix énergie)



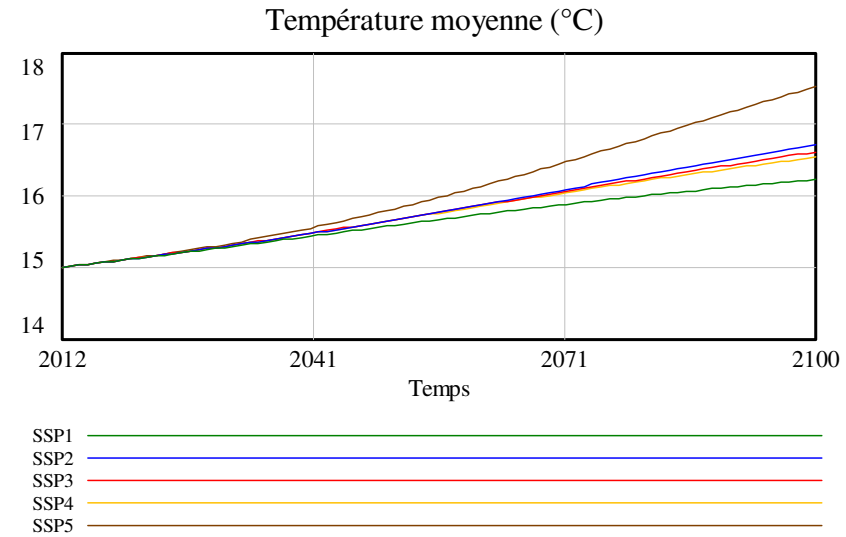
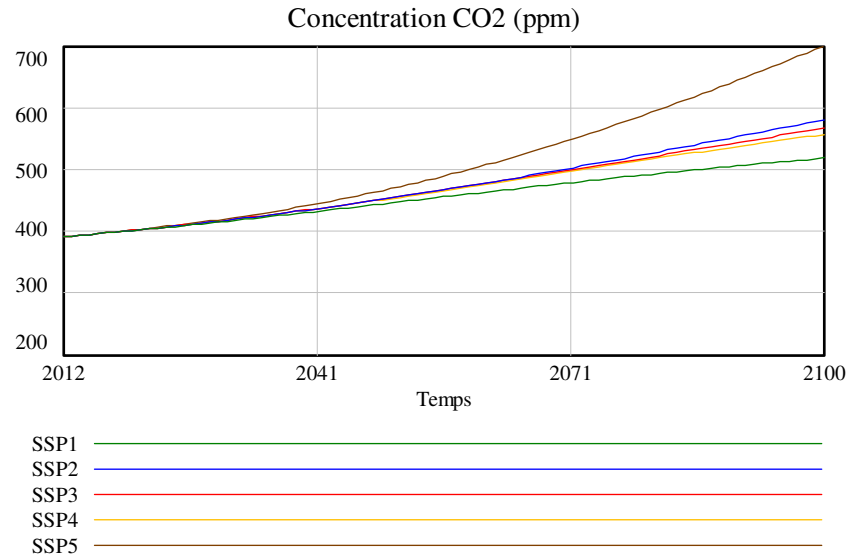
# Simulations: Effets qualité



# Les trajectoires d'émissions de CO2



# Perspectives climatiques

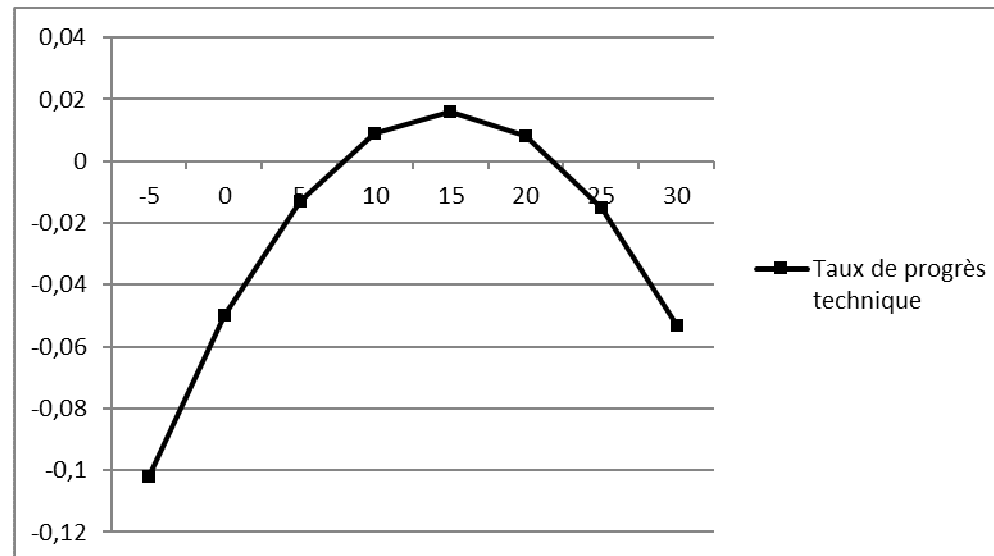


# De l'impact à la rétroaction

Impact de la température moyenne sur les gains de productivité:

$$m = m(T) = a_0 T^2 + a_1 T + a_3, \text{ avec } a_0 < 0, a_1 > 0 \text{ et } a_3 < 0.$$

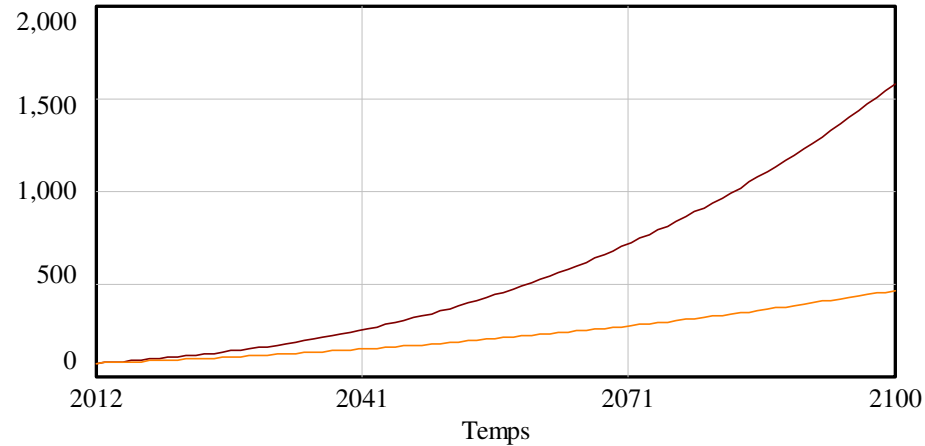
Burke, Hsiang & Miguel (2015)



Calibrage: P. Schembri

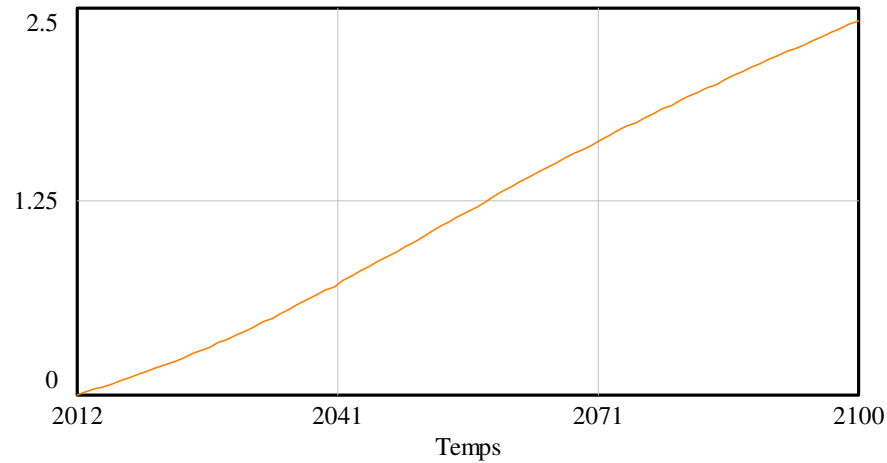
# Le modèle de croissance potentielle avec rétroaction

Production potentielle ajustée (1000 milliards \$ 2010)



SSP5 + RETROACTION ———  
SSP5 ———

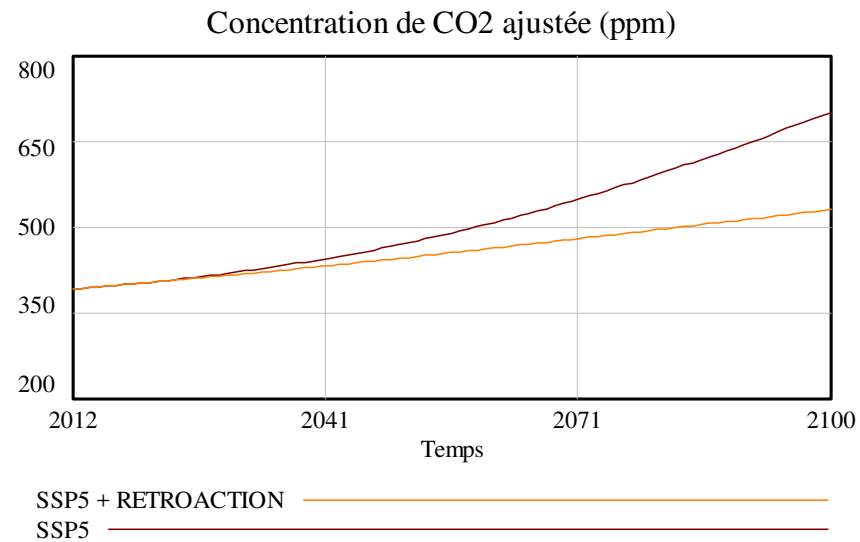
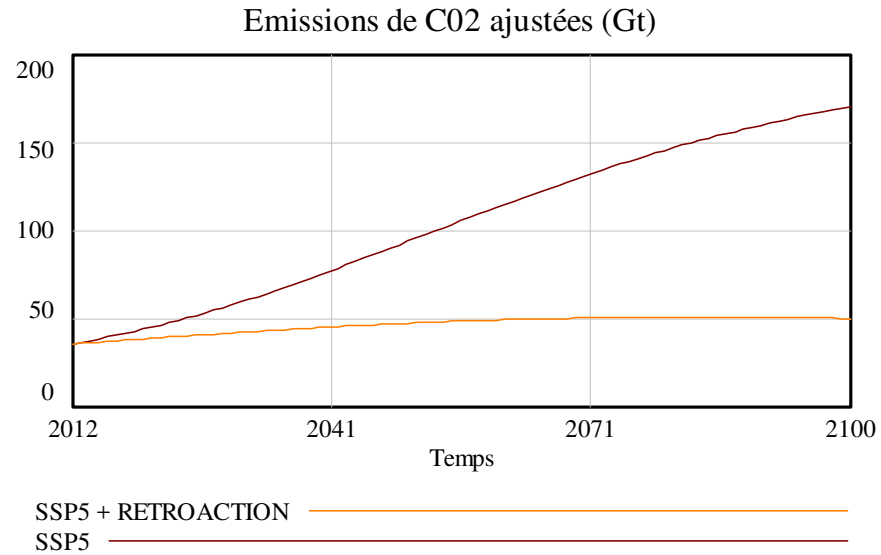
Coût d'opportunité instantané par \$ 2010 de production potentielle



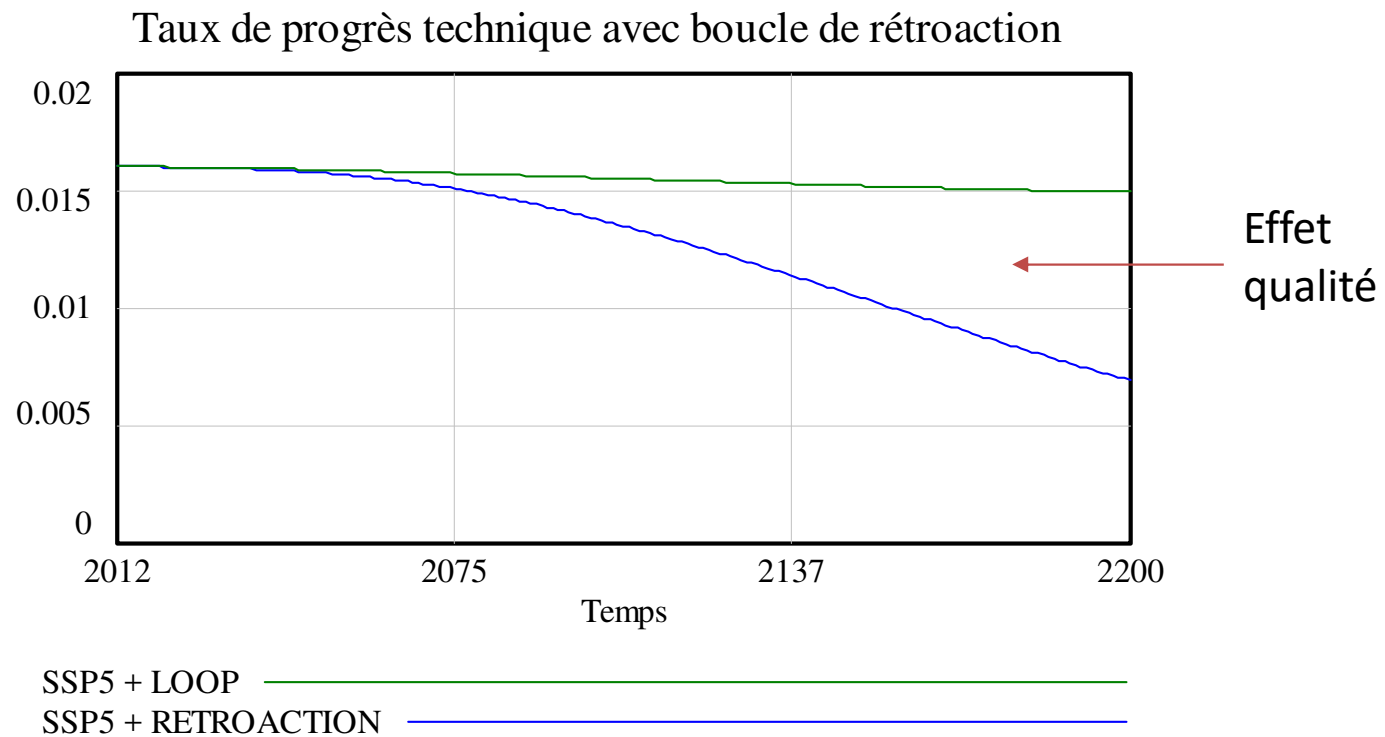
SSP5 + RETROACTION ———



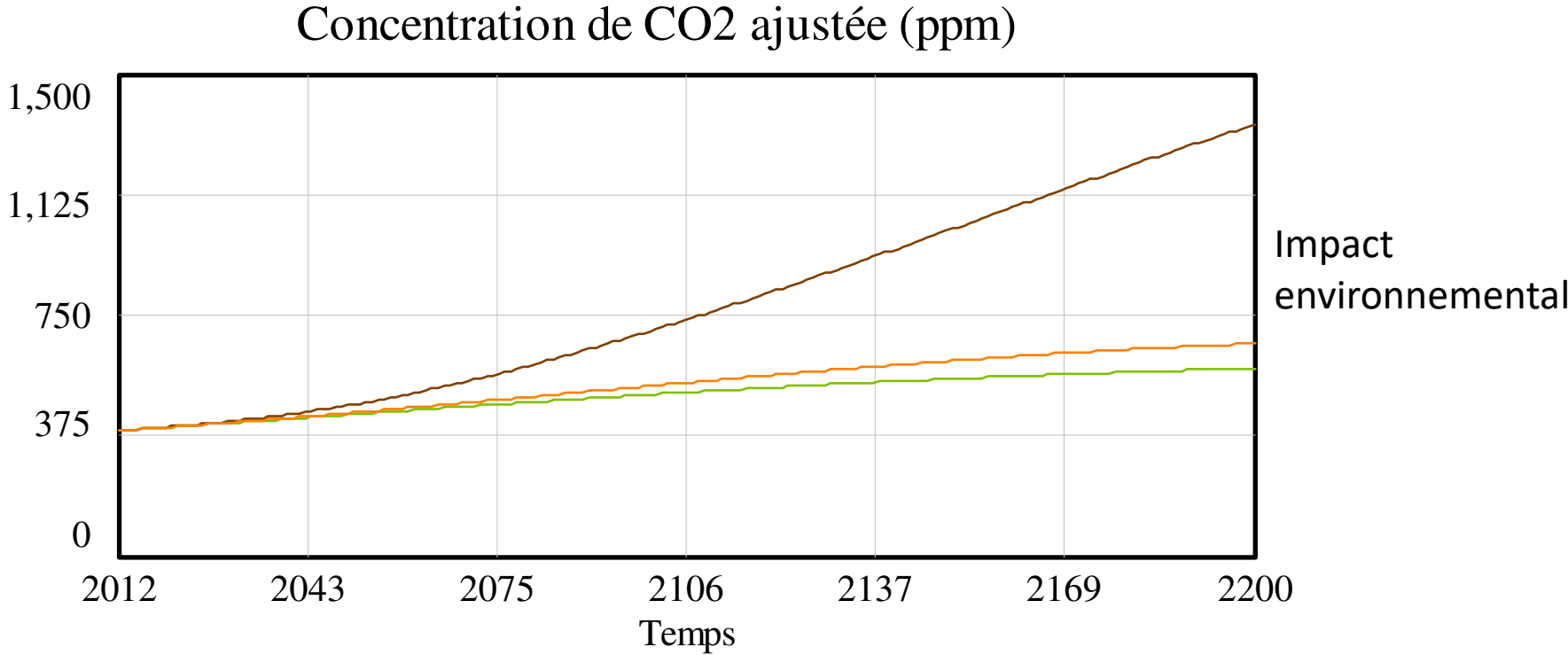
# Le modèle de croissance potentielle avec rétroaction



# Le modèle de croissance potentielle avec boucle de rétroaction

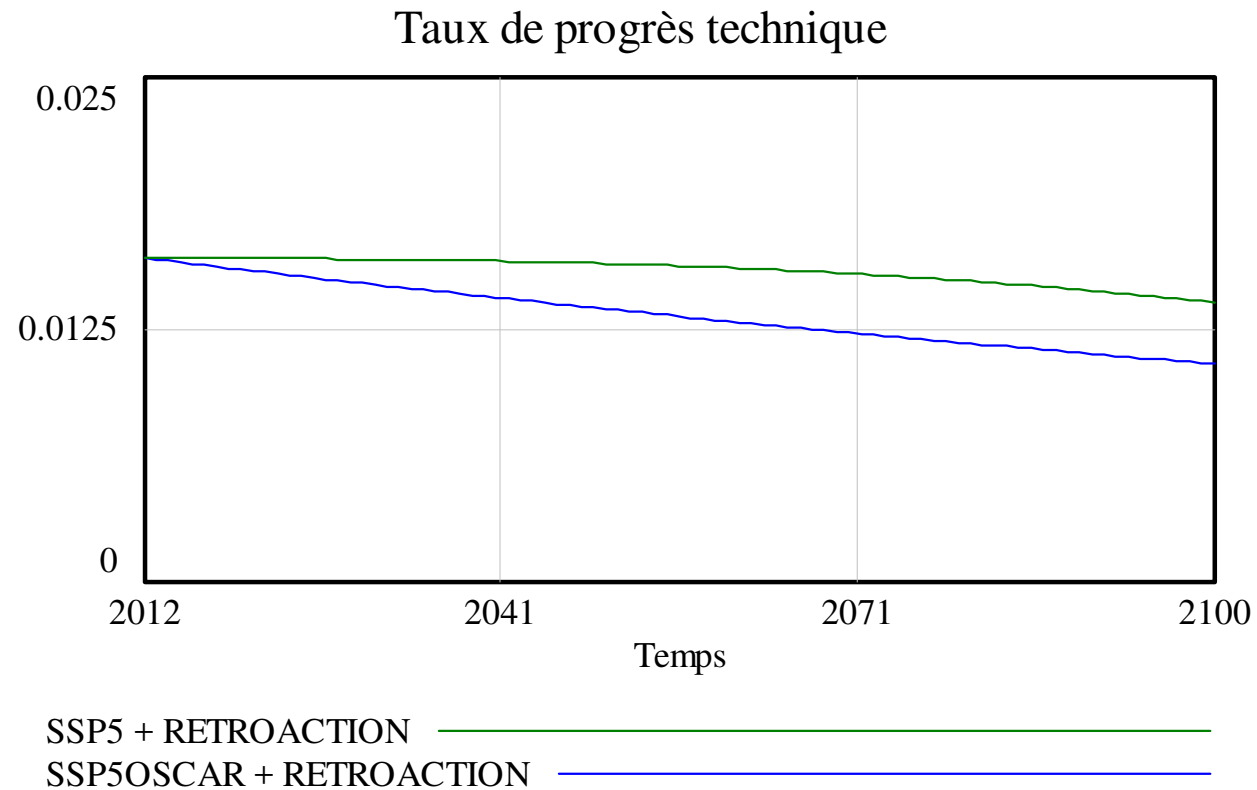


# Le modèle de croissance potentielle avec boucle de rétroaction

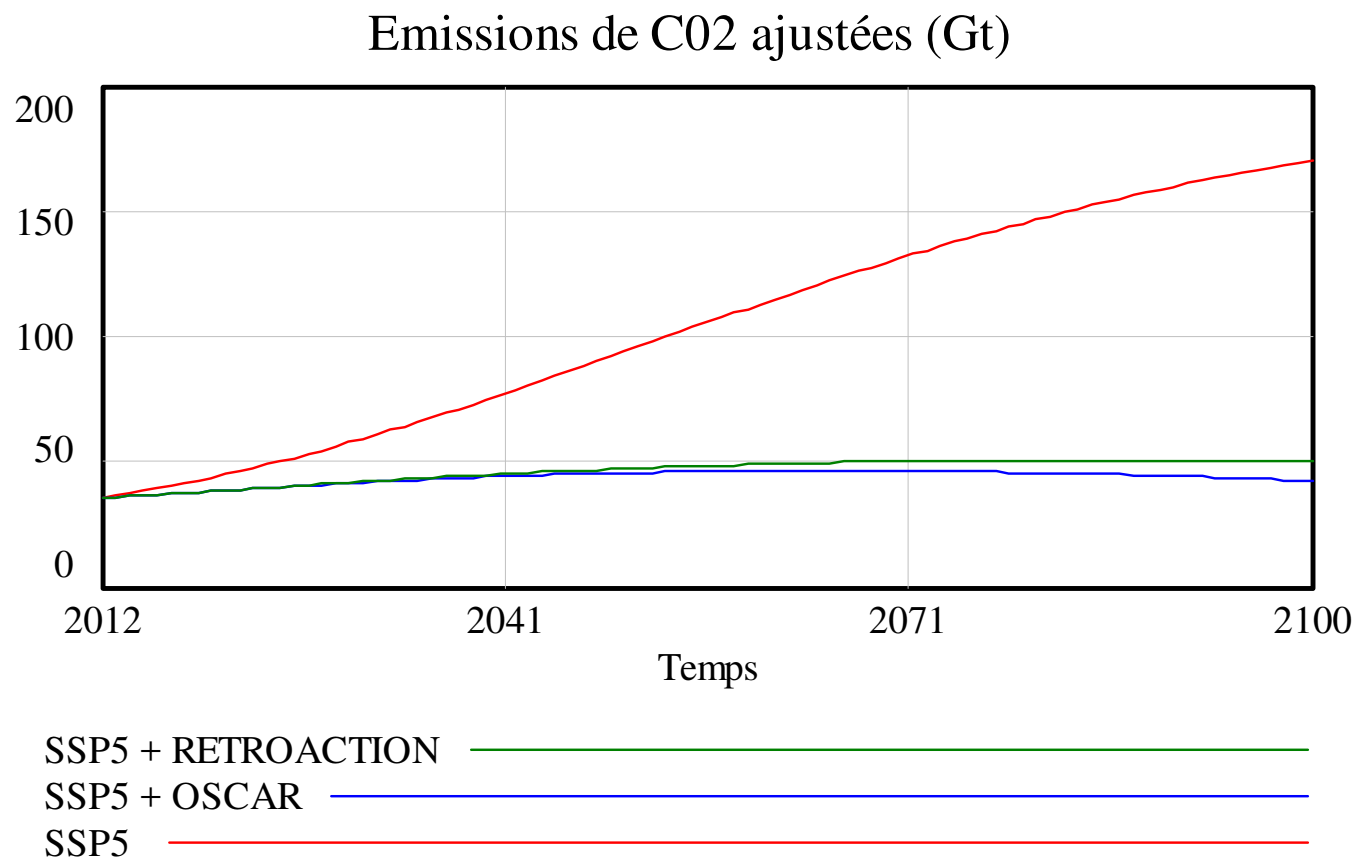


- SSP5 + RETROACTION
- SSP5
- SSP5 + LOOP

# Le modèle de croissance potentielle avec rétroaction et le modèle OSCAR



# Le modèle de croissance potentielle avec rétroaction et le modèle OSCAR



# Remarques conclusives

- L'importance d'un raisonnement en taux, pas seulement en niveau
  - Interactions économie-climat, ce n'est pas seulement une affaire de niveaux (dommages, coût, concentration,...), c'est aussi une affaire de vitesse et d'accélération...
- Boucle de rétroaction et dynamiques lentes – rapides
  - Effet de lissage et effet rebond
  - Effets de latence, délais
- Le choix du scénario de référence pour évaluer les politiques climatiques
  - Scénario sans climat, scénario avec rétroaction climatique, scénario avec boucle de rétroaction climatique