



<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/fr/>

Global Warming Dynamic Games

Y. Caseau, B. Martin & al

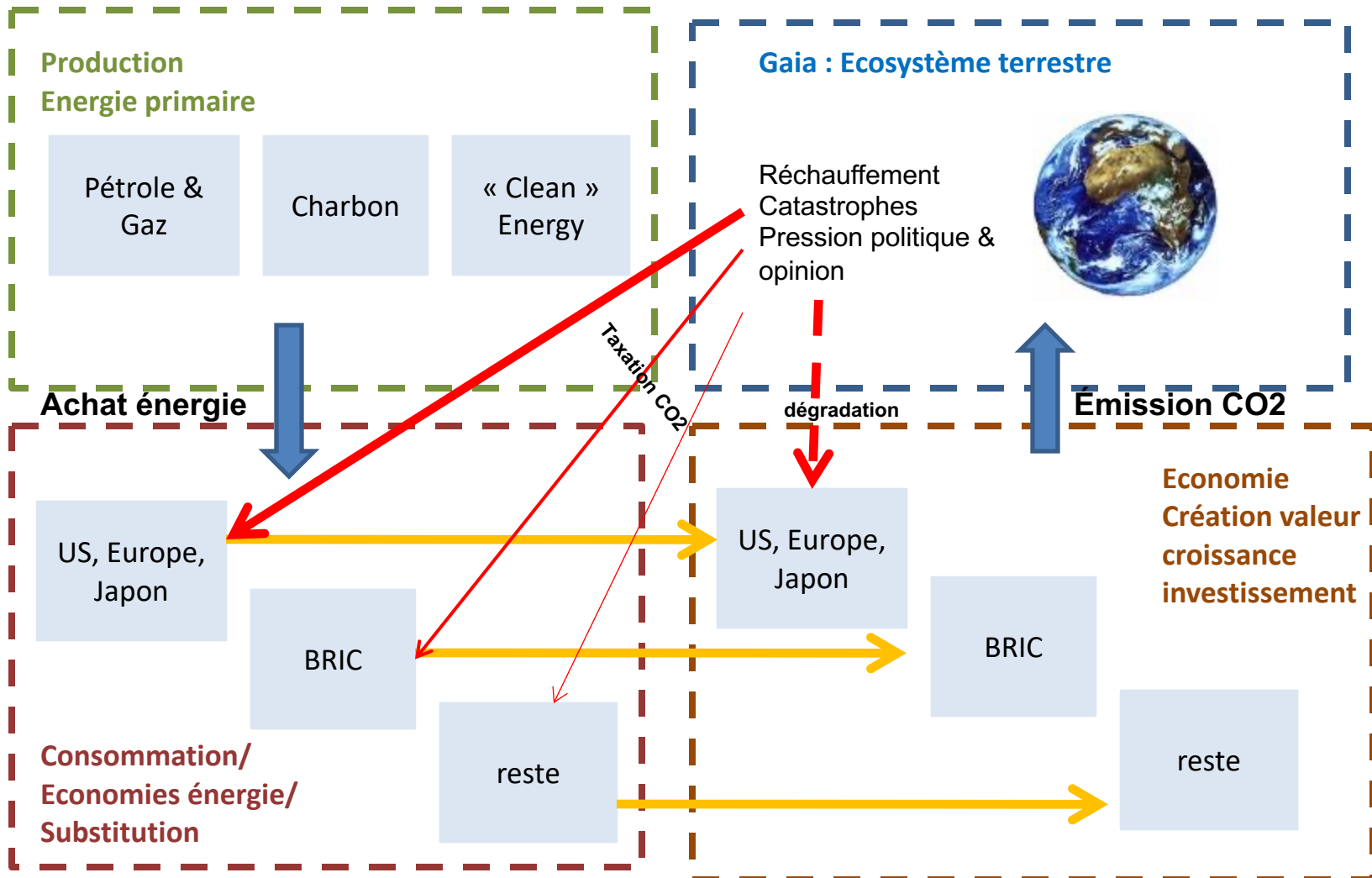
V0.2 – 24 Mai 2009

Liste des changements

- Majeur: savings = $f(\text{price}) \Rightarrow$ cout des invest E
- Besoin = $f(\text{économie} + \text{démographie})$
- Croissance économie = $f(\text{invest})$
- Changement du modèle de substitution
- Prise en compte du retard dans savings & substitute

- Objectif: **Cf notes Conseil Scientifique**
 - Produire des scénarios de consommation mondiale d'énergie et son impact sur le climat (en jouant sur des paramètres globaux) qui tiennent compte des couplages et des contraintes
 - Cela, pour obtenir des trajectoires qui évitent les défauts grossiers de « prolongement des courbes selon les trends observés »
- Ces scénarios sont obtenus à partir de la simulation d'un modèle grossier, selon les hypothèses fournies par le « joueur ». Ils sont représentés par les courbes classiques (évolution de la production de pétrole avec le « peak Oil », évolution du « prix du carbone », évolution des prix de l'énergie, etc.)
- **Il ne s'agit pas de modéliser pour prévoir, mais de construire un jeu (Dynamic Game), qui permet au joueur d'affiner sa compréhension systémique, d'observer et de s'appropriier les couplages entre les différentes dimensions**
- Ce modèle s'appuie sur la confrontation de quatre problématiques:
 1. La production d'énergie,
 2. La consommation d'énergie,
 3. L'économie mondiale qui produit de la richesse ... et du CO₂,
 4. Gaia, l'écosystème terrestre qui réagit au CO₂, et qui renvoie un « feedback » à l'économie.
- L'input du « jeu » est un ensemble d'hypothèses qui caractérisent la façon dont le joueur voit l'évolution de ces quatre domaines (l'abstraction du modèle est faite pour faciliter la formulation de ces hypothèses)
- **Ces hypothèses font bien sur débat, le but du jeu est d'évaluer les effets de leurs combinaisons, et de pouvoir le faire de façon répétée !**
- *Note: ce travail peut aussi être vu comme une plateforme pour faire collaborer des modèles plus spécialisés et plus précis, correspondant aux différentes problématiques mentionnées*

Couplage entre 4 sous-systèmes qui sont des abstractions simples des écosystèmes de la page précédente:



- 4 systèmes simples qui sont des abstractions d'écosystèmes « bien étudiés »
 - Production énergie primaire
 - Consommation énergie, y compris économie d'énergie et de substitution
 - Economie (production de valeur)
 - CO2 (niveau de CO2 en fonction de la consommation) et effet induit sur l'opinion (feedback)
- Ces quatre systèmes sont liés par 3 variables (ou familles selon le degré de sophistication)
 - Le prix de l'énergie
 - La consommation de l'énergie
 - La taxation du CO2 (taxe, compensation liés aux quotas, etc.)
- La détermination des prix se fait par intersection de familles de courbes représentant les « points de vues » des systèmes composants
 - Ex: producteur = quantité produite en fonction du prix,
consommateur = quantité consommée en fonction du prix
 - Ces courbes sont dynamiques, évoluent au cours du temps (stock, substitution) -> le cœur du modèle est la production de ces courbes à partir des variables d'état
 - Cette approche est simpliste (car les modèles le sont) mais également plus générale que des méthodes classiques de détermination du prix car elle tient compte de la vision globale (compétition, évolution technologique, état de l'économie, besoin des producteurs, ...)
- Une « trajectoire » doit être représentée par la juxtaposition des courbes caractéristiques de chaque module
 - Le résultat d'une simulation est très facile à lire

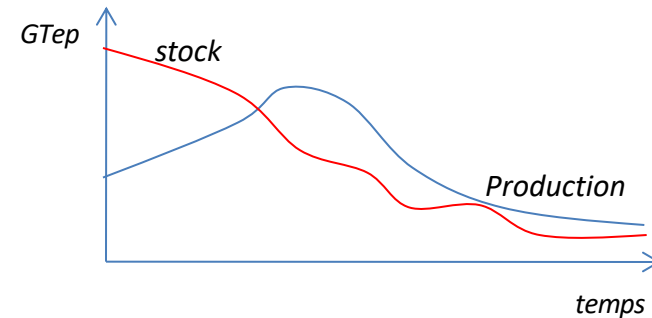
Description

- Modèle de la gestion d'un stock d'énergie
- Variable d'état: stock, production, revenu, capacité
- Stratégie:
 - Investissement dans des nouvelles explorations avec un délai (stock disponible = fonction du prix 10 ans plus tôt).
 - Quantité mise en production, fonction des objectifs du détenteur du stock
- Courbe « interface » = Quantité produite en fonction du prix (modèle M1 – cf. p11)

Instances (par source primaire)

- Dans une v0
 - Énergie fossile rare (pétrole, gaz sauf charbon)
 - Charbon – avec la macro-hypothèse que l'extraction de carburant à partir du charbon devient possible à partir de 100\$ le baril (cf. substitution)
 - Électricité/clean (nucléaire, hydro, solaire). Considérer un stock infini et une capacité de production qui évolue (très lentement).
- Dans une v1, séparer le gaz (qui s'apparente au charbon du point de vue des vecteurs, et au pétrole du point de vue de la rareté)
- Possibilité d'introduire l'aspect « stock uranium » dans un 3^e temps

Courbe caractéristique : « Peak Oil »



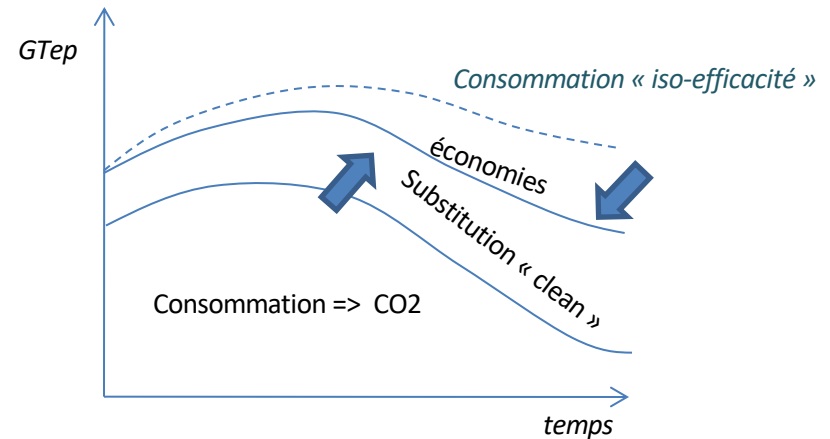
Modèle (Page 11):

- Stock en fonction du prix
- Délai de découverte
- CO₂/ Tep
- Capacité de production (fonction du prix, du stock, de la variation attendue, ...) simpliste dans une v0 -

Description

- Description d'un marché de consommation d'énergie à partir de la valeur générée par Tep (ou, inversement, de la contribution de l'énergie dans chaque G\$ de PNB)
- Interface (modèle M2 – cf. page 12): quantité consommée en fonction du prix
- La substitution ou les économies de fonctionnement nécessitent des investissements et un délai (ex: 3 ans)
- Le renoncement à la consommation réduit la production de richesse d'autant (selon la courbe de contribution de l'énergie fossile à la valeur).

- **Courbe caractéristique** : « Répartition des consommation »

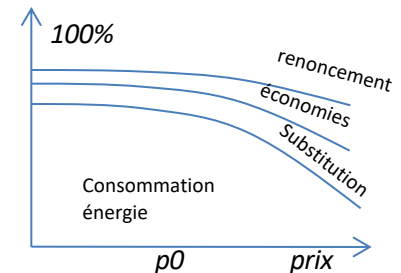


Instances:

- v0 : un seul marché
- V1: séparer plusieurs zones dont les patterns caractéristiques sont différents (analyse de la valeur de l'énergie dans le PNB, capacité à économiser, à substituer, ...)
- USA/Europe/Japon
- BRIC (Brésil/ Russie / Inde/ Chine)
- reste

Modèle (Page 12):

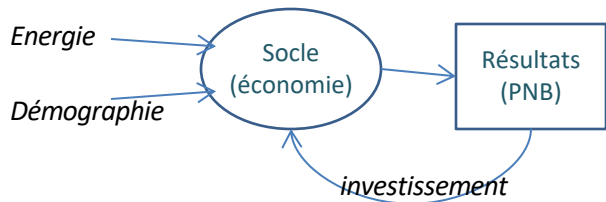
- Pattern générique (cf M2) qui décrit la réaction des acteurs économiques en fonction du prix de l'énergie fossile: une partie renonce, d'autres font des économies, d'autres substituent vers des énergies propres



- Instanciation de ce pattern en fonction du temps, des investissements et du prix de l'écotaxe
- Caractérise la capacité à réduire par économie
- Caractérise la capacité de substitution vers une autre forme d'énergie (matrice de substitution)

Description

L'économie est vue comme un socle de production qui crée de la valeur en fonction d'un marché en consommant de l'énergie. La taille du socle augmente en fonction des investissements, avec un délai.

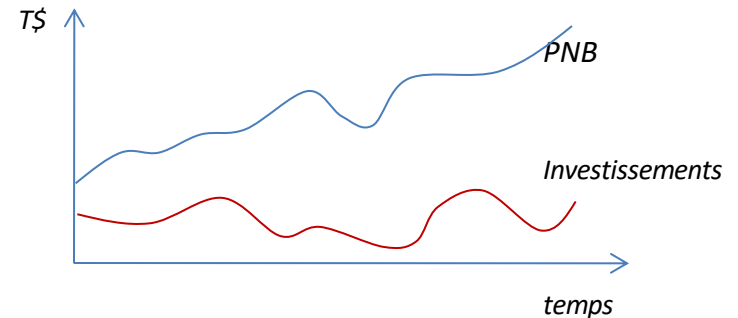


La sensibilité à l'énergie consommée est obtenue à partir du modèle M4 (cf. page 12)

Instances:

- Même instanciation que pour la consommation
 - V0: un seul bloc
 - V1: « Vieux Pays » / BRIC
- Note: c'est la partie la plus naïve du modèle mais la moins essentielle dans un premier temps

- **Courbe caractéristique** : Evolution PNB, investissement, PNB/habitant



Modèle (page 14):

- Investissements
 - fonction de la variation du résultat
 - Répartis en I_c (augmente le socle de production – génère la croissance) et I_e (permet une plus grande efficacité énergétique: économie et substitution)
- Démographie: simpliste = nombre d'habitants
- Croissance liée de façon simpliste aux investissements

Description

Un enchainement causal simple:

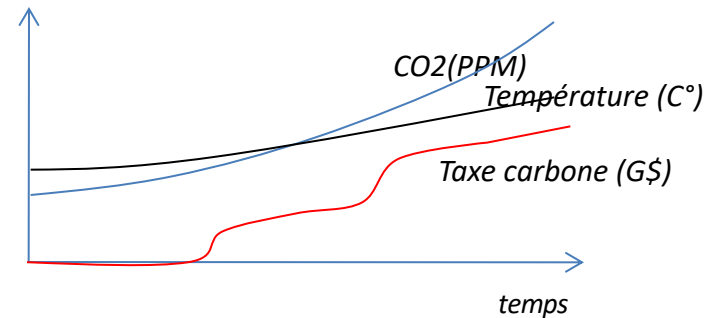
- Consommation => CO2
- CO2 => élévation de température
- Élévation => manifestations désagréables
- Manifestations + pression publique => renforcement de la taxe carbone

On ne retient que la dépendance concentration CO2 => taxation (dans la logique du modèle) , mais l'augmentation attendue de température est produite pour information

Deux facteurs: prix qui augmente (effet dissuasion) et part du monde où elle est appliquée (zone géographique).

L'effet négatif des catastrophes sur l'économie (perte de consommateur et de ressources de production) **est ignoré car spéculatif**

- **Courbe caractéristique : CO2, Température et écotaxe.**



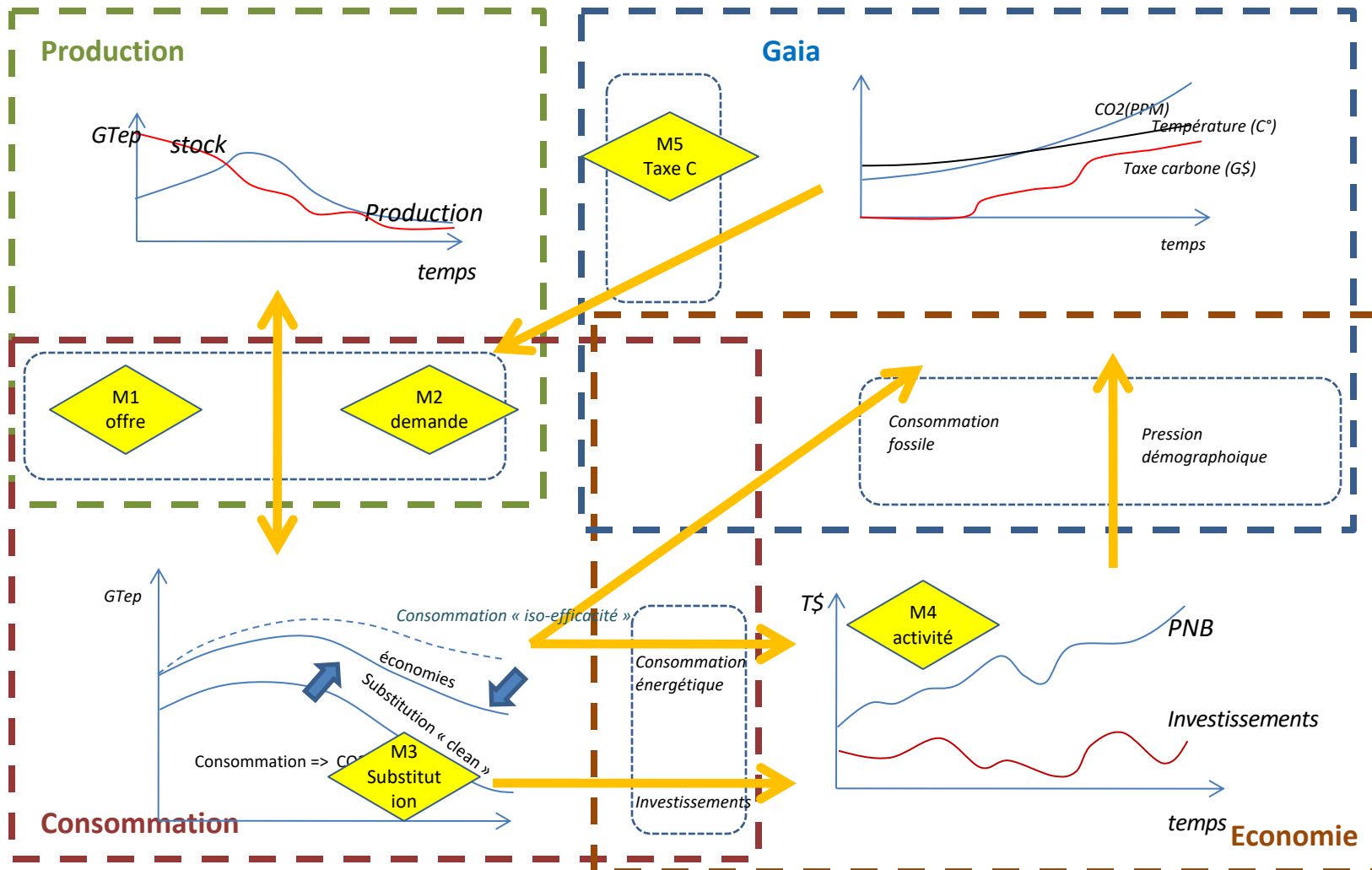
Instances:

- Une seule instance et un modèle simple, car trop d'inconnues
- La seule variable de « feedback » dans le « système général » est le montant de l'économie du carbone (la somme des montants prélevés, au titre d'une taxe ou au titre des swaps sous contraintes de quotas, qui sont réinvestis dans les économies ou la substitution)
- Dans une v1, on peut séparer plusieurs zones pour différencier l'application de la taxe carbone selon les régions (différentes opinions publiques et différents régimes politiques !)

Modèle (page 15):

- Prix taxe carbone = prix compensation + écotaxe (effets négatifs)
- Effet = $\text{CO}_2 / \text{Tep} \times \% \text{ de la consommation couverte par la taxe}$ -> montant total en première approximation (MTEC)
- Version simple du modèle = fonction qui lie la taxe carbone à la concentration en CO2 ☺
- Capacité de production fonction du prix, du stock, de la variation attendue,
- Pour simplifier, le montant ponctionné est injecté pour favoriser (substitution + économies d'énergie)

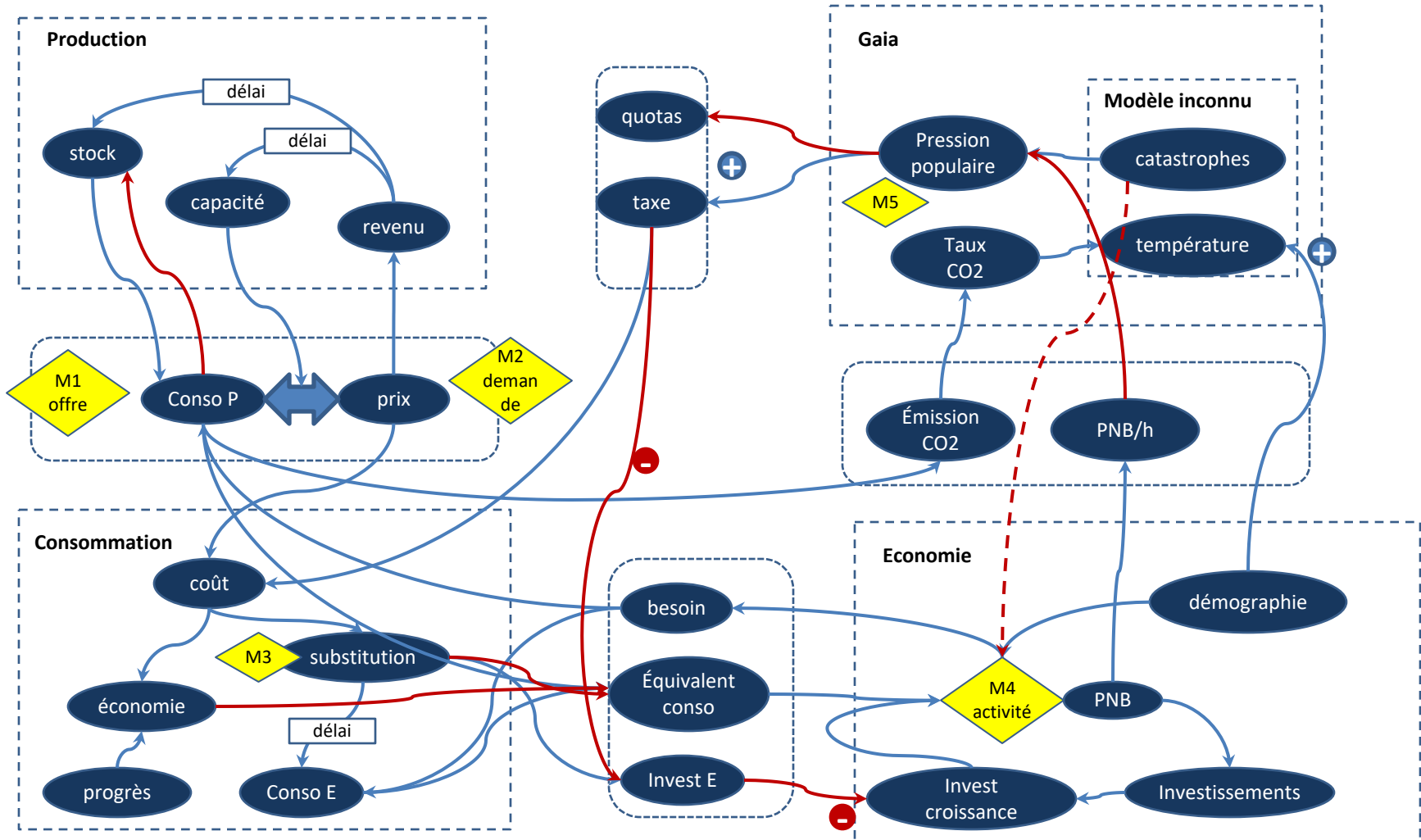
Les instanciation des quatre sous-domaines ne sont pas représentées sur cette figure pour favoriser la lisibilité



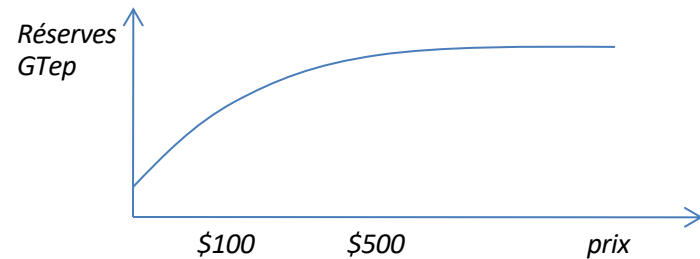
Global Warming : Dynamic System

11

Zoom sous forme d'une modélisation « Système Dynamique » dans la tradition Senge/Sterman

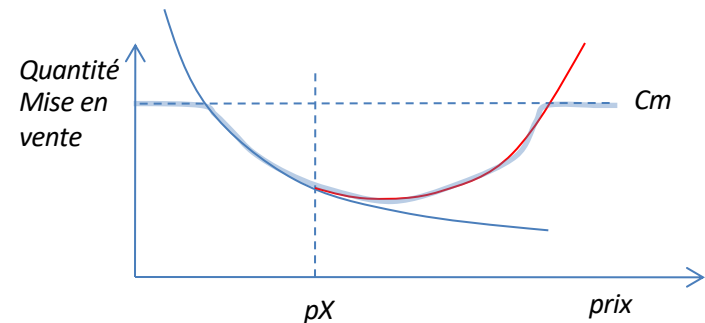


- Le producteur est défini par 3 éléments:
 1. Stock disponible: fonction du prix moyen (avec un retard)
 2. Capacité maximale de production
 3. Fonction d'utilité : quantité offerte en fonction du prix
- 1. Le stock (en G_{Tep}) est fonction du prix d'extraction
 - Le prix est le prix moyen sur 5 ans + un délai de prospection/extraction
 - Toute formes combinées ($v0$), séparation du charbon ensuite
- 2. La capacité maximale (C_m) de production peut-être modélisée de façon grossière dans un premier temps
 capacité max = production max (5 dernières années) * (1 + X%)

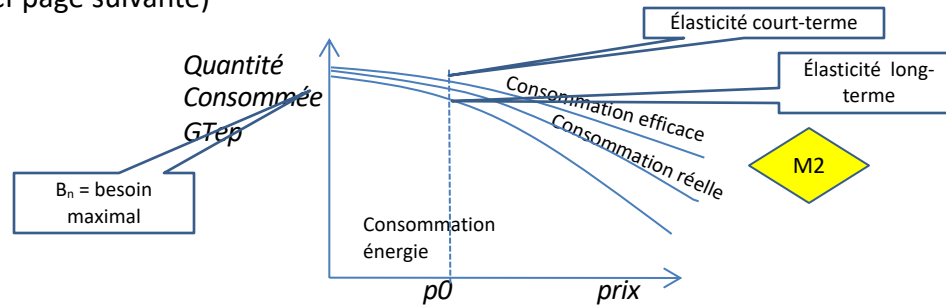


- 3. La fonction d'utilité est une combinaison de deux courbes simples:
 - Obtenir un revenu garanti (hyperbole bleue)
 - Si le prix est intéressant, transformer une partie du stock en cash (courbe rouge au dessus de p_X)
 - Dans une $v0$, on peut aussi considérer que cette courbe est un paramètre
 - M1 peut être défini par $R(\text{revenu})$, P_x et K :

$$Q(p) = \min(R/p + \max(0, p - p_x) * K, C_m)$$



- Le modèle « consommation » est fondé sur un histogramme inversé de la valeur de l'énergie fossile dans la répartition du PNB
- On en déduit le modèle M2 qui détermine la quantité consommable en fonction du prix, une fonction décroissante qui part de B_n (besoin maximal – cf page suivante)



- Au fur et à mesure que le prix augmente, une partie de l'énergie est fournie par substitution/économie – 2 courbes différentes:

- Consommation efficace énergie (input pour le modèle économie)
- Consommation réelle énergie (input pour le modèle CO2)

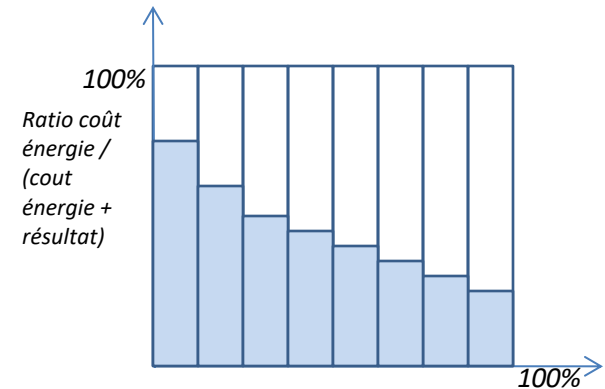
- La quantité d'énergie économisée (resp. substituée) est fonction

- du prix de l'énergie fossile augmentée du prix de la taxe carbone: La courbe ci-dessus donne une économie maximale E_m (resp. S_m = substitution maximale) rentable.
 - De la somme des investissements énergétiques consentis le_i
 - Du progrès technologique (facteur de progrès f qui rend l'économie ou la substitution de plus en plus facile)
 - Soit par exemple (pour une v_0)
- $$E_A = E_m * \min(100\%, F * \sum_{i=1}^{n-d} le_i * (1+f)^i)$$
- F est un paramètre d'efficacité ($G_{tep} / G\$$) que l'on calcule pour que l'investissement le_i soit rentable en k années

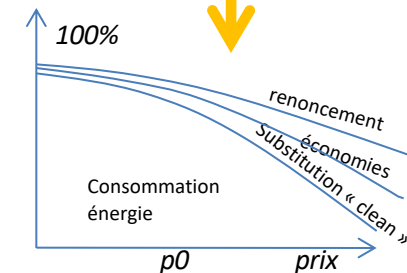
M3

- L'investissement énergétique le_i est la somme de
 - la « taxe carbone » (si l'énergie source est « propre »)
 - une fraction des investissements industriels (cf. page suivante – la fraction étant un pourcentage/paramètre)

- Note: on peut calibrer les « patterns » puisque les élasticités court/long termes sont supposées connues ☺



Répartition du PNB par intensité énergétique décroissante

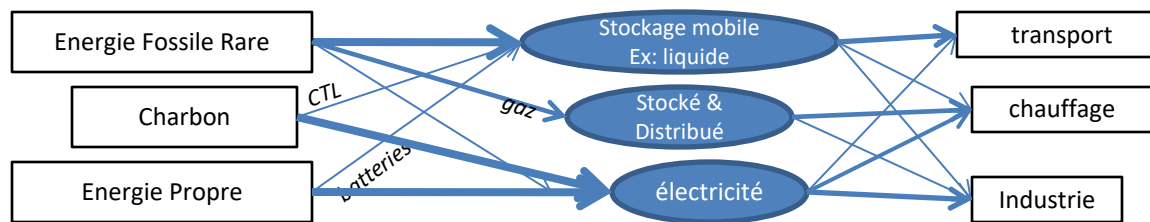


Paramètre clé du modèle :
Pattern d'évolution de la consommation d'un type d'énergie en fonction du prix (par bloc géographique)

- Le point clé de ce modèle est la substitution, définie par:

- Le taux de substitution maximal par type d'énergie, en fonction du prix (dans le *pattern* de la page précédente)
- Le coût de la substitution: la quantité d'investissement et son efficacité
- La matrice de substitution, ici approximé par un seul pourcentage X: X% du pétrole est substitué en charbon et (100 – X) en énergie propre, tandis que 100% du charbon est substitué en énergie propre

Les patterns M2 associés aux types d'énergie représente les hypothèse de substituabilité, obtenue par chaque joueur à partir de sa propre analyse énergie primaire / vecteur de distribution / usage par secteur , ce qui est illustré par la figure suivante:



- La détermination du prix d'un type d'énergie suit l'algorithme suivant:

- Pour chaque zone géographique, obtenir la courbe de demande en fonction du prix en multipliant le « pattern » par le besoin non contraint B_n (cf. page suivante)
- Faire la somme des courbes de demande pour obtenir la demande globale
- Obtenir le prix de vente en faisant l'intersection avec la courbe du modèle M1. Si plusieurs points sont possibles, choisir le point le plus proche du point précédent (simulation itérative année par année)
- Le prix de vente donne les économies potentielles et les substitutions potentielles pour chaque zone géographique
- En appliquant la formule de la page précédente, on obtient les quantités consommées (réelle et efficaces), et les quantités effectivement substituées

- Dans le cas de trois types, il faut appliquer l'algorithme successivement , en reportant les quantités substituées dans la demande:

- En premier pour le pétrole & Gaz
- Puis le charbon
- Puis les énergies « propres ».



- Le besoin énergétique théorique est calculé par rapport à la croissance de l'activité économique, au moyen d'une équation relative simple

$$B_n = B_{n-1} \times (D_n / D_{n-1}) \times (1 + a I_{c_{n-1}})$$

Le paramètre a est ajusté pour obtenir un taux de croissance plausible (si l'énergie est disponible)

- L'équation qui détermine le résultat économique tient compte de l'énergie disponible efficace

$$R_n = R_{n-1} \times (E_n / E_{n-1})^k$$

L'exposant k tient compte de la forme de la courbe de la page précédente (ex: k = 0,5)

- Les investissements dépendent du résultat (R = PNB) et de sa variation:

$$I_n = x\% \times I_{n-1} \times (R_n / R_{n-1}) + y\% \times (R_n - R_{n-1})$$

- Les investissements énergétiques sont une fraction des investissements et/ou du résultat

$$I_{e_n} = z\% \times R_n$$

Pour la v0, on se base sur le résultat, pour éviter des fluctuations trop grandes

Dans une version plus évoluée, on pourrait soit prendre une stratégie dépendant d'autres critères (différence de prix entre sources d'énergie), voire calculer un investissement optimisé

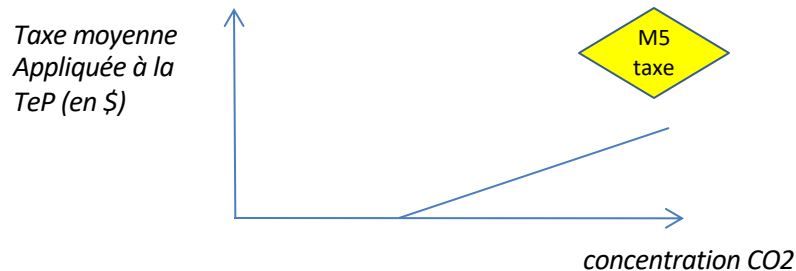
- Les investissements de croissances sont obtenus par simple différence

$$I_{c_n} = I_n - I_{e_n}$$

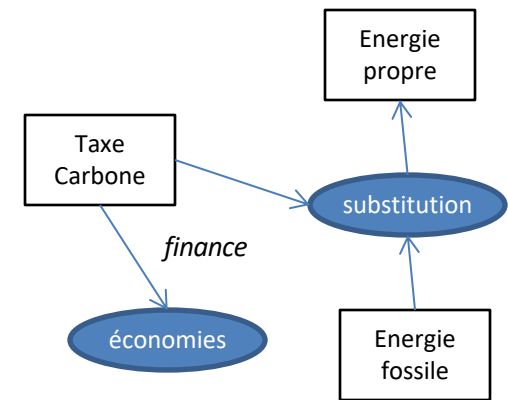
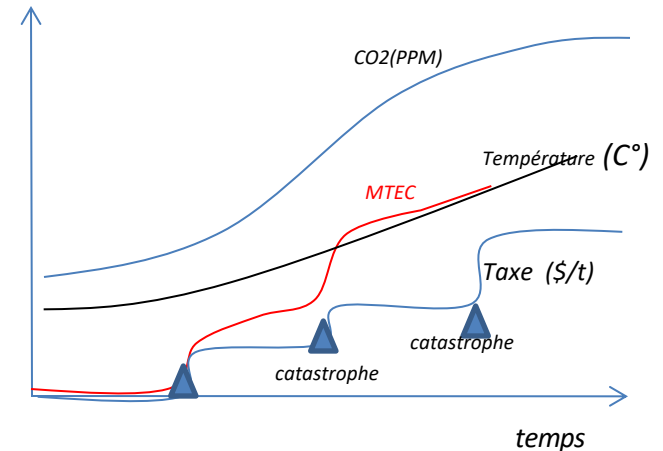
Note: Un investissement négatif correspond à un « désinvestissement », soit une réduction du socle

- Rappel: le modèle M4 a pour but de représenter très vaguement le couplage énergie <-> activité**
- Note: La répartition de l'investissement Ie entre les économies et la substitution d'une part, et entre les différents types d'énergies est représentée par 5 pourcentages (dont la somme vaut z).

- Il est probable que l'écosystème évolue par à-coups, en fonction d'événements dramatiques qui marqueront les opinions publiques (canicules, sécheresses, tsunامي, inondations côtières, etc.)
- Comme tous ces enchainements sont fortement incertains, le modèle M5, qui sert de paramètre à la simulation est fort simple:
 - Taxation = $f(\text{taux CO}_2)$
 - Taxation = MTEC = Montant Total de l'Economie Carbone



- Une fonction linéaire à partir d'un seuil suffit pour la v0 (approximation d'une fonction en escalier dont nous ignorons la distribution des paliers liées aux catastrophes)
- Comme il s'agit d'un modèle global, les aspects de « trade » (sous contraintes) sont ignorés. L'efficacité des montants prélevés par la régulation carbone et ré-injectés dans les économies et la substitution dépend du facteur F (cf. figure de droite et page 12)
- Une étape suivante serait la séparation:
 - Taxe carbone par tonne d'énergie fossile
 - Taux d'application de la taxe, par zone (on peut tracer le % d'émissions de CO2 qui sont touchés par le système de régulation)



- *Dynamic Game:*
 - La stratégie de chaque « acteur » (inconnue mais représentée par M1, M2, M3 et M4) est un paramètre clé du jeu
 - l'objectif de la simulation est de produire des trajectoires correspondant à des choix de stratégies
- Chaque sous-système comporte:
 - Courbes caractéristiques (utilisées comme output de simulation) – existe de façon historique
 - Une trajectoire est une simulation de l'évolution de ces courbes caractéristiques
 - « une stratégie » = comportement simplifié : des équations simples qui définisse les relations entre grandeurs
- Objectifs par version
 - V0: simulation très simple mais réaliste (trajectoires faisant sens)
 - V1: GTES – prise en compte des instanciations
 - V2: simulation distribuée (coopération de modèles) -> externalisée (le but étant de donner envie à d'autres, à un moment il faut laisser le sujet aux professionnels 😊)
- Next Steps:
 - Collecter les données (courbes et chiffres clés)
 - Collecter les feedbacks
 - Implémenter une v0 (suite du travail de Bruno), si possible sous forme de jeu en ligne