



HAL
open science

Interactions d'échelles en économie : Application à l'évaluation intégré des dommages du changement climatique et des événements extrêmes

Stéphane Hallegatte

► **To cite this version:**

Stéphane Hallegatte. Interactions d'échelles en économie : Application à l'évaluation intégré des dommages du changement climatique et des événements extrêmes. 2005. halshs-00008712

HAL Id: halshs-00008712

<https://shs.hal.science/halshs-00008712v1>

Preprint submitted on 2 Feb 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ECOLE DES HAUTES ETUDES EN SCIENCES SOCIALES



INTERACTIONS D'ECHELLES EN ECONOMIE :
APPLICATION A L'EVALUATION DES DOMMAGES
ECONOMIQUES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE
ET DES EVENEMENTS EXTREMES

Stéphane Hallegatte

**Thèse pour l'obtention du titre de Docteur de l'EHESS
Discipline : Economie de l'environnement**

Soutenue le 13 Juin 2005 devant le jury suivant :

M. Robert Boyer	Examineur
M. Philippe Courtier	Examineur
M. Michael Ghil	Rapporteur
M. Alain Haurie	Rapporteur
M. Jean-Charles Hourcade	Directeur de thèse
M. Serge Planton	Examineur

Remerciements

Au terme de ce travail de thèse, je tiens à remercier chaleureusement Jean-Charles Hourcade, qui m'a accueilli dans son laboratoire et m'a initié à l'économie, matière nouvelle pour moi à mon arrivée au CIRED. Les idées qui servent de fil rouge à cette thèse doivent beaucoup à ses intuitions et à sa vision de l'économie. Je le remercie aussi pour la confiance qu'il m'a témoignée en m'associant aux programmes de recherche du CIRED, et pour m'avoir introduit dans la communauté scientifique, en France comme à l'étranger.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à Jean-Yves Grandpeix et Alain Lahellec qui m'ont appris à faire de la recherche et qui m'ont aidé avec une incroyable disponibilité à chaque difficulté, c'est-à-dire à peu près tout le temps. Les idées développées dans cette thèse doivent beaucoup à leurs conseils et à leurs suggestions. Leur intérêt pour ma problématique, leur volonté de partager leurs connaissances et leur soutien constant m'ont été indispensables.

Ces travaux ont été financés par Météo-France, notamment grâce à l'appui de Philippe Courtier, Eric Brun et Serge Planton, qui m'ont fait confiance et ont pris le risque de soutenir une thèse à la frontière des domaines de compétence historiques de Météo-France.

Parmi les nombreuses collaborations fructueuses dont j'ai profité pendant ces trois années, je tiens à citer ici mes échanges avec Michael Ghil, qui a passé beaucoup de temps à me faire profiter de son expérience.

De nombreuses personnes m'ont aidé au jour le jour, ont participé directement ou indirectement au développement des idées de cette thèse ou m'ont apporté des suggestions pour l'écriture de ce manuscrit. J'aimerais remercier ici Philippe Ambrosi, Stéphane Blanco, Sandrine Bony, Renaud Crassous, Jean-Louis Dufresne, Patrice Dumas, Robert Franchisseur, Frédéric Gherzi, Laurent Gilotte, Vincent Gitz, François Gusdorf, Meriem Hamdi-Chérif, Jonathan Köhler et Hervé Le Treut.

Enfin, il me faut remercier l'ensemble des équipes du CIRED et du LMD, où j'ai trouvé le dynamisme (scientifique et amical) et les pauses café dont j'avais besoin. Je dois beaucoup à l'ambiance chaleureuse qui règne dans ces laboratoires.

Merci aussi à celles et ceux qui font en sorte que l'on puisse travailler dans de bonnes conditions : Naceur Chaabane, Catherine Douineau, Martine Maherou, Michèle Sadoun, Yaël Serfaty, Danny Tran et Eleonore Tyma.

Le mot de la fin ira à mes parents et à Sophie, pour leurs encouragements inconditionnels, aux nombreux amis qui m'ont témoigné leur intérêt pour mon thème de recherche, ils sont la meilleure source de motivation, et bien sûr à Emeline, qui m'a accompagné tout au long de cette thèse.

Table des matières

Remerciements	3
Introduction	21
I Changement climatique: Etat des connaissances et Problématique	25
1 Changement climatique et impacts: l'état des connaissances	27
1.1 Qu'est ce que le changement climatique?	28
1.1.1 Le principe de l'effet de serre	28
1.1.2 L'effet de serre additionnel	30
1.1.3 Les rétroactions du système climatique	31
1.1.4 Les modèles climatiques	32
1.1.5 Un changement climatique est aujourd'hui observable	33
1.1.6 Les prédictions de réchauffement	37
1.1.7 Les "catastrophes climatiques"	42
1.1.8 La régionalisation du changement climatique	46
1.1.9 Les incertitudes	46
1.2 Les réductions d'émissions	49
1.3 Les conséquences du changement climatique	51
1.3.1 Des observations aux prévisions	52
1.3.2 Ecosystèmes et végétation	53
1.3.3 Les impacts directs sur les sociétés	53
1.4 La difficile traduction des impacts en dommages	58
Références	60
2 L'évaluation des dommages: état des lieux et problématique	63
2.1 Qu'est ce qu'un dommage climatique?	64
2.1.1 Perte de productivité	64
2.1.2 Accélération de l'obsolescence du capital et des infra- structures	65

2.1.3	Altération des aménités liées à l'environnement et au climat	66
2.1.4	Les coûts indirects	67
2.1.5	Domages transitoires et dommages permanents	72
2.2	Des évaluations ponctuelles fragiles	73
2.2.1	Les premières évaluations (1991-1995)	73
2.2.2	La génération suivante (1996-2000)	76
2.3	La prise en compte de la dynamique	78
2.3.1	Les modèles agrégés	80
2.3.2	Les modèles dynamiques d'équilibre général calculable	81
2.4	Problématique et Méthodologie	82
	Références	87

II Les interactions d'échelles en climatologie et en économie de la croissance 91

3 La réponse du cycle hydrologique au changement climatique 93

3.1	Introduction	94
3.2	La réponse du cycle hydrologique	95
3.2.1	Expériences	95
3.2.2	Résultats	97
3.2.3	Discussion des résultats	106
3.3	Le concept de gain de rétroaction et son application au climat	106
3.4	Le modèle de rétroaction vapeur d'eau	108
3.4.1	Description	108
3.4.2	Le Formalisme d'Evolution par Transfert	110
3.4.3	Implémentation du modèle sous TEF	112
3.4.4	Validation du modèle	112
3.5	Méthodologie pour l'analyse de rétroaction	118
3.5.1	Définition de la rétroaction et caractérisation statique	118
3.5.2	Dynamique de la boucle de rétroaction	119
3.6	Application à la rétroaction vapeur d'eau	121
3.6.1	Définition de la rétroaction vapeur d'eau	121
3.6.2	Caractérisation de la rétroaction vapeur d'eau	122
3.6.3	Interprétation du facteur de rétroaction	126
3.6.4	Influence de la rétroaction sur la variabilité	126
3.7	Discussion	129
	Références	130

4 Les échelles temporelles de la rétroaction économie-climat et le coût climatique de la croissance 133

4.1	Introduction et Motivations	134
4.2	Modèle	135

4.2.1	Module climatique	136
4.2.2	Module démographique	136
4.2.3	Module macroéconomique	137
4.2.4	Module d'émissions	139
4.2.5	Module d'impact et d'adaptation	139
4.2.6	Paramètres du modèle	141
4.3	Simulations numérique	142
4.4	La rétroaction économie-climat	145
4.4.1	Résultats numériques	146
4.4.2	Interprétation des pôles et coût climatique de la croissance	148
4.4.3	Conséquences pour l'analyse coût-bénéfice	148
4.4.4	Effet d'une perturbation permanente ou d'une perturbation ponctuelle des émissions	150
4.5	Conclusions	151
4.6	Les limitations propres aux modèles de croissance	153
	Références	156

III Interactions moyen-terme/long-terme en économie : l'adaptation des infrastructures urbaines au changement climatique en présence d'incertitude **159**

5	Interaction moyen-terme / long-terme : l'adaptation des infrastructures urbaines au changement climatique en présence d'incertitude	161
5.1	Introduction	162
5.1.1	Un outil de mise en forme de l'information venant des modèles climatiques.	163
5.1.2	Déterminer des analogues à partir de sorties de GCMs	164
5.2	Dommmages et coûts d'adaptation: leurs déterminants et leurs interactions.	166
5.2.1	Coûts de l'adaptation en connaissance parfaite	168
5.2.2	Coûts d'investissements et arbitrage entre adaptation réactive et proactive	171
5.3	Les effets d'évictions des investissement d'adaptation et leurs impacts sur la croissance	176
5.4	Conclusions	178
	Références	180

IV Interactions court-terme/long-terme en économie: l'évaluation du coût des événements extrêmes dans un contexte

de changement climatique	181
6 Le modèle NEDyM	183
6.1 Introduction	184
6.2 Les différentes approches des cycles économiques	184
6.3 NEDyM (Non-Equilibrium Dynamic Model)	186
6.3.1 Variables et paramètres	186
6.3.2 Equations	186
6.4 Calibration du modèle et premiers résultats	195
6.5 Conclusion	196
Références	198
7 Une approche dynamique de l'évaluation du coût des événements extrêmes.	201
7.1 Introduction	202
7.2 Les événements extrêmes météorologiques (EEM)	203
7.2.1 Définition	203
7.2.2 Données	204
7.2.3 Changement climatique et événements extrêmes	206
7.3 Le modèle NEDyM.1 et son module "catastrophe"	208
7.3.1 Un modèle dynamique stable de déséquilibre (NEDyM.1)	208
7.3.2 Equilibre et dynamique de NEDyM.1	208
7.3.3 Le module "catastrophe"	212
7.4 Les dommages dus aux événements extrêmes	220
7.4.1 Hypothèse de stabilité de la distribution	220
7.4.2 Hypothèse de variation de la distribution	223
7.5 L'hypothétique effet des extrêmes sur la productivité	226
7.5.1 Modélisation du progrès technique	227
7.5.2 Dommages dus à une catastrophe	229
7.5.3 Dommages dus à une distribution de catastrophes	230
7.5.4 Influence de l'effet de productivité sur la bifurcation	231
7.5.5 Commentaires sur le réalisme de l'effet de productivité	232
7.6 Conclusions	234
Références	237
8 La prise en compte de la dynamique endogène de l'économie dans l'évaluation du coût macroéconomique des événements extrêmes	241
8.1 Introduction	242
8.2 Le modèle NEDyM.2	242
8.2.1 Paramètres et équilibre du modèle	242
8.2.2 Les cycles économiques dans NEDyM	245
8.3 Comportement temporel du modèle	249
8.4 Analyse	253

8.4.1	Analyse de bifurcation	253
8.4.2	Etude du spectre	254
8.5	Conséquences macroéconomiques des extrêmes	257
8.5.1	Les pertes liées à à un événement	257
8.5.2	Les pertes liées à une distribution d'événements	261
8.6	Conclusions	264
	Références	268
 Conclusion et perspectives		271
 Bibliographie		277
 Annexes		290
A Le Formalisme d'Evolution par Transfert		291
A.1	L'analyse du Système Linéaire Tangent	293
A.2	Solution numérique du Formalisme d'Evolution par Transfert	295
A.2.1	Equivalence entre la transformée de Borel et le schéma de Crank-Nicolson	295
A.2.2	Evolution temporelle du système	296
A.2.3	Analyse du SLT	297

Table des figures

1.1	Schéma de l'effet de serre : l'altitude équivalente d'émission est z_0 , à une température T_e . Le flux solaire entrant F_{SW} est égal au flux sortant F_{LW} . Le système est à l'équilibre.	29
1.2	Schéma de l'effet de serre additionnel: Si la concentration de GES augmente, l'altitude d'émission équivalente passe de z_0 à z'_0 , dont l'altitude est plus élevée et correspond donc à un flux sortant F'_{LW} inférieur au flux d'équilibre F_{LW} (figure de gauche). Le système est donc déséquilibré, et la température augmente jusqu'à ce que la température de l'altitude z'_0 soit la température d'émission qui égalise à nouveau flux solaire entrant et flux sortant. Le nouvel équilibre se fait à une température au sol T'_s supérieure à T_s (figure de droite).	30
1.3	Schéma du système climatique et de ses boucles de rétroaction: on modifie le forçage de ΔF_{TA} , le système climatique répond et toute une série de rétroactions modifie la réponse (albédo, vapeur d'eau, nuages...) pour obtenir un réchauffement final de ΔT_{SFC}	31
1.4	Concentrations historiques de CO_2 , de CH_4 et de N_2O , issues de différentes études, entre l'an 1000 et aujourd'hui. Source: <i>IPCC</i> [2001a].	34
1.5	Concentrations historiques de CO_2 et de méthane, et température depuis 400.000 ans; reconstruction à partir des carottes de glace de Vostok. Source: <i>IPCC</i> [2001a].	35
1.6	Concentrations passées de CO_2 , issues de différentes études, à différentes échelles de temps. La concentration actuelle est d'environ 370 ppm et il est probable qu'elle atteindra les 700ppm au cours du vingt-et-unième siècle. Source: <i>IPCC</i> [2001a].	36
1.7	Augmentation globale de la température sur 1000 ans, reconstruite à partir de différents proxies. Source: <i>IPCC</i> [2001a]. . .	37

1.8	Comparaison de l'évolution de la température moyenne avec des simulations de GCM forcés par (a) seulement les forçages naturels (solaire+volcanique); (b) seulement les forçages anthropiques (GES+aérosols); (c) tous les forçages. Source: <i>IPCC</i> [2001a].	38
1.9	Ensemble de scénarios SRES, en termes d'émissions (haut) et de concentration (bas) de CO ₂ . Source: <i>IPCC</i> [2001a].	40
1.10	Augmentation globale de la température, pour les différents modèles de l'IPCC et les différents scénarios d'émissions. Source: <i>IPCC</i> [2001a].	41
1.11	Augmentation globale du niveau de la mer, pour les différents modèles de l'IPCC et les différents scénarios d'émissions. Source: <i>IPCC</i> [2001a].	43
1.12	Réponse schématique de différents éléments du système climatique à un pic des émissions sur 100 ans. On constate que des émissions sur 100 ans nous engagent pour plusieurs millénaires. Source: <i>IPCC</i> [2001a].	44
1.13	Intensité de la circulation thermohaline en fonction d'un forçage en eau douce dans l'Atlantique Nord. Cette figure montre l'effet de seuil et l'hystérésis du système. Extrait de <i>Stocker et al.</i> [2001].	45
1.14	Changement régional de température en 2100, sous les scénario A2 (haut) et B2 (bas), calculé comme la moyenne du changement prédit par chaque modèle. Les isocontours donnent l'écart maximum entre les différents modèles. Source: <i>IPCC</i> [2001a].	47
1.15	Changement régional de précipitations en 2100, sous les scénario A2 (haut) et B2 (bas), calculé comme la moyenne du changement prédit par chaque modèle. Les isocontours donnent l'écart maximum entre les différents modèles. Source: <i>IPCC</i> [2001a].	48
1.16	Les "reasons for concern" de l'IPCC, c'est-à-dire les degrés de réchauffement pour lesquels certains types de dommages sont possibles. Source: <i>IPCC</i> [2001b].	51
2.1	Schéma de principe d'un modèle intégré et des échelles de temps considérée par chaque module.	83
3.1	Représentation schématique des deux expériences: <i>GES</i> en haut, où le flux LW est perturbé; <i>SW</i> en bas, où le flux SW est perturbé. Dans les deux cas, l'aire entre les deux courbes donne la quantité d'énergie supplémentaire stockée par la planète terre suite à la perturbation.	96

3.2	Changement du flux au sommet de l'atmosphère sur 9 mois dans les expériences <i>GES</i> en noir et <i>SW</i> en vert.	98
3.3	Changement de la Température de Surface de l'Océan (TSO, en haut) et de la Température de l'Atmosphère à la Surface (TAS, en bas) sur 20 ans dans les expériences <i>GES</i> en noir et <i>SW</i> en vert. Les variations de température sont en K.	99
3.4	Changement des précipitations convectives (noir) et de l'évaporation (vert), en mm par jour, sur 3 ans dans les expériences <i>GES</i> à gauche et <i>SW</i> à droite.	100
3.5	Modification du profil de température moyen, sur le mois suivant la perturbation dans les expériences <i>GES</i> et <i>SW</i> à droite.	101
3.6	Extrait de Yang et al. (2003).	103
3.7	Changement des précipitations convective (noir) et de l'évaporation (vert) dans la simulation <i>GES/FixTSO</i> , en mm par jour.	105
3.8	Schéma du modèle	109
3.9	Réponse du modèle à un saut de la concentration de CO ₂ : (a) en haut à gauche, la température de surface de l'océan; (b) en haut à droite, la température troposphérique à 5000m; (c) en bas à gauche, la température à la base de la stratosphère; (d) en bas à droite, le contenu en vapeur d'eau (kg · m ⁻²).	117
3.10	Evaporation et Précipitations en réponse à un saut de la concentration de CO ₂ de 330 ppmv à 660 ppmv.	119
3.11	Schéma d'une rétroaction (à gauche) et illustration de la coupure d'une boucle pour obtenir le modèle à boucle ouverte (gauche).	120
3.12	Représentation schématique de la modification du modèle, de façon à pouvoir couper la rétroaction vapeur d'eau.	122
3.13	Schéma de la rétroaction vapeur d'eau (gauche), mettant en jeu une nouvelle température, utilisée par les processus contrôlant la vapeur d'eau, alors que les autres processus utilisent toujours la variable de température normale. Illustration de l'ouverture de la boucle (droite).	123
3.14	Facteur de la rétroaction vapeur d'eau, en abscisses logarithmiques en haut et linéaires en bas. Si on applique une perturbation qui aurait mené à une réponse en forme de saut de 1K dans le modèle sans RVE, alors on obtient la réponse $FF_{T_{WV}}(t)$ dans le modèle complet. On distingue deux processus: un refroidissement dû à la baisse des précipitations et un réchauffement dû à l'humidité absolue supplémentaire.	125
4.1	Evolution de la concentration de CO ₂ (à gauche) et différence entre la température de surface et la température d'adaptation (à droite) sur 200 ans pour les 3 scénarios.	143

4.2	Evolution de la production (à gauche) et de γ_Y (à droite) sur 200 ans pour les 3 scénarios.	143
4.3	Schéma de la rétroaction économie-climat (à gauche); et modèle à boucle ouverte (à droite).	146
4.4	Facteur de rétroaction. Si les émissions sont perturbées par un saut de 1 GtC à $t = 0$, alors la variation réelle des émissions dans le modèle complet est donnée par cette fonction. Cette fonction permet donc de comparer une simulation type-IPCC à une simulation prenant en compte la rétroaction économie-climat.	147
4.5	Perte de production, actualisée, causée par le changement climatique additionnel créé par une augmentation exogène et permanente de la production de une unité à $t = 0$. "IM" fait référence aux simulations à impacts modérés et "II" aux simulation à impacts importants. δ est le taux d'actualisation, ici à 1 et 3%.	150
4.6	Fonction donnant la modification des émissions due à l'émission de 1 GtC à $t = 0$, en pourcentage	152
5.1	Carte de l'Europe et du bassin Méditerranéen. Les villes sont représentées par des cercles à la position de leur analogue acceptable, <i>i.e.</i> à l'endroit qui a aujourd'hui un climat proche de celui qu'elles auront à la fin du siècle, d'après les modèles climatiques. Quand aucun analogue acceptable n'a été trouvé, une croix représente la position du meilleur analogue en termes de température, en négligeant les précipitations. La carte du haut est pour le modèle ARPEGE-Climat, celle du bas pour HadRM3H.	167
5.2	Différents scénarii, en fonction de l'anticipation faite en 2005, du changement climatique réel (révélé en 2050) et du schéma d'adaptation.	172
7.1	Histogramme de la probabilité des pertes liées à un événement extrême météorologique, en 4 boîtes, selon les observations (<i>Obs</i>) et la loi de Weibull calibrée sur ces observations f_ζ (<i>Weibull</i>).	205
7.2	Températures estivales observées entre 1960 et 2003 (en °C) et les prédiction du modèle ARPEGE-Climat [<i>Gibelin et Déqué, 2003</i>] jusqu'en 2100 dans le scénario SRES/A2 [<i>IPCC, 2000</i>]. Figure de Michel Déqué [<i>Déqué, 2004b</i>].	206
7.3	Réponse du modèle à une diminution de 7% de la productivité, ainsi que la réponse du modèle de Solow au même choc. Sur le long terme, plus de 10 ans, le nouvel équilibre de NE-DyM après le choc est le même que celui du modèle de Solow.	211

7.4	Pertes de production à la suite de la destruction d'un tiers du capital productif, pour différentes hypothèses sur la fonction de production.	214
7.5	Production et taux d'emploi, en réponse à une catastrophe détruisant le capital pour 3% du PIB dans différentes hypothèses de modélisation.	218
7.6	Changement de la croissance économique annuelle, année par année, en réponse à la catastrophe, dans les différentes hypothèses.	218
7.7	Variation de production à cause des EEM pour l'UE (avec la distribution actuelle des événements extrêmes).	222
7.8	Pertes moyennes de PIB après 100 ans, en pourcentage de PIB, en fonction de f_{max} (en %) et des paramètres de la distribution d'EEM ($\alpha_p = \alpha_z$, en %). La ligne rouge sépare les paramètres pour lesquels les pertes sont inférieures à 1% du PIB.	224
7.9	Pertes moyennes de PIB après 100 ans, en pourcentage de PIB, en fonction de f_{max} (en %) et des paramètres de la distribution d'EEM (α_p à gauche, α_z à droite, en %).	225
7.10	Pertes de PIB, après une catastrophes détruisant du capital pour 3% du PIB, quand la croissance de la productivité est constante (No ETC) et quand la croissance de la productivité dépend du remplacement du capital (ETC).	229
7.11	Croissance du PIB, après une catastrophes détruisant du capital pour 3% du PIB, quand la croissance de la productivité est constante (No ETC) et quand la croissance de la productivité dépend du remplacement du capital (ETC).	230
7.12	Variation de PIB en réponse à une distribution d'EEM dans les modèles <i>ETC</i> , avec effet de productivité, et dans le modèle <i>No ETC</i> , sans effet de productivité. L'effet de productivité permet donc de compenser sur le long terme l'effet destructeur des EEM, même s'il ne réduit pas les conséquences négatives de court terme.	231
7.13	Perte moyenne de PIB due aux EEM, en fonction de la probabilité et de l'intensité des EEM. Dans chaque simulation, la probabilité et l'intensité sont multipliées par α par rapport à la distribution actuelle. $f_{max} = 10\%$	232
7.14	Pertes moyennes de PIB après 100 ans, en pourcentage de PIB, en fonction de f_{max} (en %) et des paramètres de la distribution d'EEM ($\alpha_p = \alpha_z$, en %).	233

8.1	Cycles économiques du modèle pour $\alpha_{inv} = 2.5$. Plus d'un cycle est reproduit pour clarifier la lecture. Sont représentés : (a) la production (en milliers de milliards d'euros), (b) le taux d'emploi (en %), (c) le salaire réel (sans unité), (d) le prix (sans unité), (e) le profit net par unité de capital, avec la valeur de ν (sans unité), (f) l'investissement (en milliers de milliards d'euros).	248
8.2	Comportement du modèle pour (a) $\alpha_{inv} = 1,7$ (gauche) et (b) $\alpha_{inv} = 2,5$ (droite).	251
8.3	Comportement du modèle pour (a) $\alpha_{inv} = 10$ (gauche) and (b) $\alpha_{inv} = 20$ (droite). On remarque que le taux d'investissement Γ_{inv} atteint sa limite supérieure $\gamma_{max} = 0,8$ à gauche, et ses deux limites γ_{max} et $\gamma_{min} = 0$ à droite.	252
8.4	Extrema du taux d'investissement en fonction de la flexibilité de l'investissement α_{inv}	255
8.5	Partie réelle de la seconde paire de valeurs propres conjuguées en fonction de la flexibilité de l'investissement α_{inv}	255
8.6	Spectre de puissance de la production pour cinq valeurs de α_{inv} (1,7; 2,5; 6,7; 10,0; 20,0) avec des unités arbitraires. Calculé par FFT à partir du cycle limite, avec des séries d'au moins 3000 ans. Lorsque c'était utile, on a fait figurer la fréquence de la deuxième paire de valeurs propres, f_2 , et la fréquence de la septième harmonique de la fréquence principale, notée f_3	256
8.7	Le cycle en terme de production, en fonction du décalage par rapport au minimum du cycle (en haut); et la perte de PIB totale (intégrée sur 20 ans) dont est responsable la catastrophe, en % du PIB max, en fonction du moment où elle a lieu, repéré par rapport au minimum du cycle (en bas).	259
8.8	La perte de production instantanée, pendant 20 mois après le choc. Les chocs sont indiqués par les barres verticales, en trait plein pour le choc dont les pertes sont minimum; en tirets pour le choc dont les pertes sont maximales. Dans le cas "perte min", l'effet du choc est positif après environ 11 mois grâce à l'effet de relance économique qui fait plus que compenser les pertes en capital productif.	260
8.9	En haut, la représentation de la bifurcation de l'économie (de la stabilité au cycle limite) par les extrema de l'oscillation du taux d'investissement; en bas, la perte de production moyenne due à une distribution d'événements extrême, en pourcentage de PIB. On remarque une forte dépendance des pertes à la flexibilité de l'investissement.	262

Liste des tableaux

2.1	Evaluation monétaire des impacts pour l'économie américaine au moment du doublement de la concentration de CO ₂ , montants annuels en milliards de dollars de 1990. On constate que si les estimations finales sont du même ordre de grandeur, il n'y a aucun accord sur les estimations secteur par secteur, démontrant la fragilité de ces études. Source: <i>Nordhaus</i> [1991], <i>Titus</i> [1992], <i>Cline</i> [1992], <i>Fankhauser</i> [1995], <i>Tol</i> [1995], d'après <i>IPCC</i> [2001b].	74
2.2	Dommmages annuels exprimés en termes monétaires au doublement de la concentration de CO ₂ . Source: <i>Fankhauser</i> [1995], <i>Tol</i> [1995], d'après <i>IPCC</i> [2001b].	75
2.3	Estimation régionalisée des dommages du changement climatique (les dommages en positif, les effets positifs en négatif; les nombres entre parenthèses sont les écarts-type dans l'étude de Tol). Source: <i>Mendelsohn et al.</i> [1997], <i>Mendelsohn et al.</i> [2000], <i>Nordhaus et Boyer</i> [1999] et <i>Tol</i> [2002a], d'après <i>IPCC</i> [2001b].	77
3.1	Sous-systèmes (cellules) du modèle avec ses variables et équations d'état.	113
3.2	Transferts, avec leurs variables de transfert et leurs équations (partie 1)	113
3.3	Transferts, avec leurs variables de transfert et leurs équations (partie 2)	114
3.4	Valeurs des paramètres atmosphériques	115
3.5	Valeurs des paramètres de surface	115
3.6	Flux LW échangés. Chaque ligne montre les flux émis par un objet vers les autres. Chaque colonne montre les flux reçus par un objet, émis par les autres. La somme de la colonne de l'océan est le flux LW total reçu par l'océan. La somme de la ligne de l'océan est le flux LW total émis par l'océan. Le flux LW total sortant est de 207 W·m ⁻²	116

3.7	Dérivées instantanées des flux échangés par rapport à la concentration de CO ₂ (exprimées pour le doublement de la concentration de CO ₂).	116
3.8	Valeurs d'équilibre des variables d'état pour différentes concentrations de CO ₂	118
4.1	Variables du modèle	136
4.2	Paramètres du modèle.	142
4.3	Pôles de la rétroaction économie-climat et gain et facteur statique pour 2 hypothèses sur le niveau des impacts.	147
4.4	Valeur nette présente des pertes de production dues au changement climatique supplémentaire créé par une augmentation de production exogène et permanente de une unité.	150
5.1	Résumé des coûts annuels d'investissement (en millions d'euros) pour Paris-IDF pour l'adaptation au changement climatique dans différents scénarii sur l'ampleur du réchauffement, sur l'anticipation en 2005 et sur la stratégie d'adaptation. . .	176
5.2	Résumé des coûts (en terme d'investissements, de pertes d'aménités et de diminution de croissance) du changement climatique à Paris-IDF dans différents scénarii. Les coûts d'investissement sont en millions d'euros.	178
6.1	Liste des variables d'état (dites <i>prognostiques</i>).	186
6.2	Liste des variables diagnostiques.	187
6.3	Liste des paramètres. Les 7 premiers déterminent l'équilibre du modèle; les 6 derniers n'influencent pas cet équilibre mais seulement la dynamique du modèle.	187
6.4	Etat d'équilibre de NEDyM en valeurs monétaires (quand c'est nécessaire, les flux nets sur un an sont reproduits entre parenthèses) et les valeurs observées sur l'Union Européenne à 15 en 2001 [<i>Eurostat</i> , 2002]. Les valeurs sont en milliers de milliards d'euros.	196
7.1	Liste des paramètres. Les 7 premiers déterminent l'équilibre du modèle et sont calibrés; les 6 derniers n'influencent pas cet équilibre mais seulement la dynamique du modèle, et sont choisis de manière <i>ad hoc</i>	209
7.2	Etat d'équilibre de NEDyM.1 (en valeurs nettes) et les valeurs observées sur l'Union Européenne à 15 en 2001 [<i>Eurostat</i> , 2002]. Les valeurs sont en milliers de milliards d'euros.	209
7.3	Récapitulatif des différentes hypothèses sur la modélisation des catastrophes.	217

-
- 7.4 Pertes moyennes de PIB dues aux EEM dans trois modèles différents: les coûts directs moyens (moyennes temporelles des coûts directs des EEM); la perte de production dans un modèle de croissance de long-terme (à la Solow); la perte de production dans un modèle qui prend en compte des processus de court-terme (NEDyM.1). 221
- 8.1 Liste des paramètres. Les 7 premiers déterminent l'équilibre du modèle; les 6 derniers n'influencent pas cet équilibre mais seulement la dynamique du modèle. On fera varier la flexibilité de l'investissement de manière systématique dans la suite de ce chapitre. 244
- 8.2 Etat d'équilibre de NEDyM.2 (quand c'est nécessaire, les flux nets sur un an sont reproduits entre parenthèses) et les valeurs observées sur l'Union Européenne à 15 en 2001 [*Eurostat*, 2002]. Les valeurs sont en milliers de milliards d'euros. 245

Introduction

Quasiment tous les pays du monde ont ratifié la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique, qui est entrée en vigueur dès le 21 mars 1994. Par cette ratification, ces pays ont explicitement reconnu la nécessité de “*stabiliser [...] les concentrations de gaz à effet de serre dans l’atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique*” (article 2 de la Convention). Cependant, la Convention ne quantifie pas ce niveau et, au moment de déterminer l’ambition des mesures à prendre pour limiter le changement climatique, le débat s’est centré sur la définition de ce qui constitue une “*perturbation dangereuse du système climatique*”.

On peut proposer une première réponse à cette question, en se fondant simplement sur quelques faits scientifiques largement acceptés : en l’absence de mesures énergiques, la composition de l’atmosphère sera très prochainement fondamentalement modifiée par l’action de l’Homme ; ce changement dans sa composition induit une perturbation significative du climat ; le système climatique est un système complexe, instable, capable de basculements importants et très mal compris ; le climat stable actuel est à la base de notre existence depuis plusieurs millénaires (notamment depuis la sédentarisation) ; sur lui reposent, entre autres, la production de nourriture, la disponibilité de l’eau, ainsi que la qualité de l’air.

On peut donc dire que, strictement, le risque associé à *toute perturbation significative* d’un système aussi vulnérable, mal compris et fondamental pour notre existence, rend cette perturbation dangereuse.

Toutefois, face aux coûts importants des réductions d’émissions, au manque d’éléments concrets pour justifier l’existence du risque, et surtout au besoin de se fixer un objectif et un calendrier de l’action qui soient tenables économiquement, le critère de dangerosité s’est révélé totalement inadapté. Il ne faut pas oublier en effet qu’une réduction brutale des émissions nécessiterait une réorganisation rapide de l’économie qui ne pourrait pas ne pas avoir des coûts économiques et sociaux importants : chômage¹, perte de pouvoir d’achat (en particulier pour les classes populaires), conflits sociaux...

Est donc apparue une demande forte d’évaluation des dommages, pour justifier l’action et son rythme. Cette demande était d’ailleurs en germe dans la suite de l’article 2 de la Convention quand elle affirmait qu’il “*conviendra d’atteindre ce niveau [de stabilisation des concentrations] dans un délai suffisant pour que les écosystèmes puissent s’adapter naturellement aux changements climatiques, que la production alimentaire ne soit pas menacée et que le développement économique puisse se poursuivre d’une manière durable*”. L’idée d’un arbitrage entre un délai de stabilisation suffisamment court pour éviter des pertes environnementales trop importantes et un délai assez souple

¹En guise d’illustration, on peut mentionner que 800.000 emplois en France sont directement liés à l’industrie automobile. Réduire l’usage de l’automobile demande donc de reconverter de nombreux salariés, et risque de provoquer une augmentation du chômage.

pour ne pas mettre à mal la croissance économique était donc déjà explicite. C'est cette double contrainte qui a ensuite focalisé les travaux sur le changement climatique et la recherche de trajectoires d'émissions optimales, permettant de limiter à la fois les dommages du changement climatique et les coûts des réductions d'émissions.

Ces travaux, et les trajectoires optimales qu'ils proposent, s'appuient sur des évaluations quantifiées des impacts et des dommages. Or, notre compréhension limitée de tous les éléments de ce problème environnemental – dynamique du climat, réponse des écosystèmes, dynamique économique et valorisation des impacts – rend les résultats de ces études très incertains, et ainsi très contestables.

Cette thèse s'appuiera sur la présentation de l'état des connaissances sur le changement climatique et ses impacts (chapitre 1) puis sur les dommages correspondants (chapitre 2). A partir de là, on établira le diagnostic suivant : les évaluations de dommages publiées à ce jour n'ont pas prêté assez d'attention aux interactions entre les différentes échelles temporelles mises en jeu par le couplage du système climatique et du système économique.

Cette question, qui fait partie des principales difficultés que rencontrent les climatologues dans leur entreprise de modélisation du climat, est en effet assez peu présente dans les évaluations de dommages, qui se placent uniquement dans une perspective de long terme et négligent les fluctuations de court terme et leur influence sur le long terme.

Partant de cette lacune, cette thèse aura une double dimension. D'un côté, elle s'orientera vers le développement d'un ensemble méthodologique permettant l'analyse des interactions d'échelles, en utilisant notamment le concept de boucle de rétroaction et les méthodes de l'analyse des systèmes dynamiques. Cet ensemble de méthodes sera ensuite appliqué tout au long de la thèse.

D'autre part, elle déclinera la problématique des interactions d'échelles sur trois systèmes.

Notre premier objet d'étude sera le cycle hydrologique et la rétroaction vapeur d'eau (chapitre 3). On profitera de la capacité des modèles climatiques à saisir une large gamme d'échelles pour proposer une méthode d'analyse de la dynamique des rétroactions et pour montrer comment des processus de court terme peuvent influencer le long terme.

Le second objet d'étude sera l'interaction de long terme entre le système climatique et le système économique. On utilisera la méthode développée précédemment pour éliciter les temps caractéristiques de la rétroaction qui lie les émissions de gaz à effet de serre aux impacts du changement climatique.

Dans un troisième temps, on s'intéressera aux dommages du changement climatique. D'abord, en regardant comment les décisions de moyen terme

concernant l'adaptation, qui sont prises en situation de grande incertitude, influencent le niveau des dommages sur des horizons extrêmement longs (chapitre 5).

Ensuite, on se concentrera sur les événements extrêmes et leurs effets de court terme, qui ne sont pas représentés dans les modèles de croissance. On proposera pour cela un modèle permettant la prise en compte d'effets de chocs de court terme dans une perspective de croissance de long terme (chapitre 6). On appliquera ce modèle à l'évaluation du coût économique des distributions d'événements extrêmes actuellement observées et envisageables dans le futur sous l'effet du changement climatique. D'abord en utilisant une version du modèle qui représente un monde où l'économie est stable et où les fluctuations viennent de chocs exogènes (chapitre 7) ; ensuite avec une version dans laquelle les cycles économiques sont endogènes (chapitre 8). On regardera alors comment les coûts des événements extrêmes et donc, en extrapolant, du changement climatique, dépendent de la situation économique et donc d'hypothèses difficiles à contrôler sur le futur de l'économie mondiale.

Première partie

**Changement climatique :
Etat des connaissances et
Problématique**

Chapitre 1

Changement climatique et impacts : l'état des connaissances

Sommaire

1.1	Qu'est ce que le changement climatique?	28
1.1.1	Le principe de l'effet de serre	28
1.1.2	L'effet de serre additionnel	30
1.1.3	Les rétroactions du système climatique	31
1.1.4	Les modèles climatiques	32
1.1.5	Un changement climatique est aujourd'hui observable	33
1.1.6	Les prédictions de réchauffement	37
1.1.7	Les "catastrophes climatiques"	42
1.1.8	La régionalisation du changement climatique	46
1.1.9	Les incertitudes	46
1.2	Les réductions d'émissions	49
1.3	Les conséquences du changement climatique	51
1.3.1	Des observations aux prévisions	52
1.3.2	Ecosystèmes et végétation	53
1.3.3	Les impacts directs sur les sociétés	53
1.4	La difficile traduction des impacts en dommages	58
	Références	60

Le changement climatique est aujourd'hui l'une des grandes questions de l'actualité scientifique et politique, nationale et internationale. La problématique en est donc bien posée. Toutefois, il n'est pas inutile de résumer en quelques pages le cœur de cette problématique en précisant les bases scientifiques sur lesquelles s'appuiera cette thèse. Ce résumé s'appuie très largement sur l'IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change¹, qui est une structure internationale mise en place en 1988 par l'Organisation Mondiale de la Météorologie et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement et dont le rôle est d'évaluer et de rassembler les connaissances pertinentes pour l'action face au changement climatique. L'IPCC publie 3 rapports, tous les 7 ans environ : un sur les bases scientifiques du changement climatique, un sur les impacts et l'adaptation et un sur les réductions d'émissions. Ces rapports rassemblent l'état de l'art sur la question. Plusieurs milliers de scientifiques participent à ces rapports, qui sont ensuite approuvés par la communauté scientifique et par les 194 gouvernements impliqués (dont les pays producteurs de pétrole). Ainsi, les résultats publiés par l'IPCC peuvent être considérés comme non-biaisés malgré les incertitudes et ils peuvent servir de base de travail sur ce sujet.

On présentera en premier lieu les bases physiques du problème, puis les options qui s'offrent à nous en termes de réduction des émissions. Enfin, on donnera une idée des impacts possibles du changement climatique sur les écosystèmes et les sociétés.

1.1 Qu'est ce que le changement climatique ?

Pour commencer, une courte description de la physique du changement climatique est proposée dans les sections suivantes.

1.1.1 Le principe de l'effet de serre, qui piège l'énergie au niveau du sol

La terre, avec son atmosphère, est un système quasi-isolé, dont la principale source d'énergie est le flux qu'elle reçoit du soleil sous la forme de lumière visible. Le système Terre est au premier ordre à l'équilibre, et le flux solaire entrant est quasiment parfaitement compensé par le flux radiatif sortant émis par la terre dans l'infrarouge. Ce flux est en première approximation le rayonnement du corps noir à $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En l'absence d'atmosphère, cet équilibre entre flux entrant et flux sortant mènerait donc à une température à la surface du globe $T_e = -33\text{ }^{\circ}\text{C}$, rendant la vie telle que nous la connaissons impossible. C'est la présence d'une

¹En français : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat. <http://www.ipcc.ch>

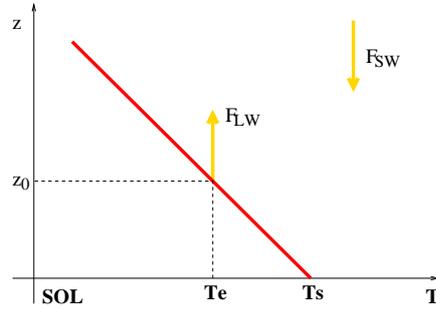


FIG. 1.1: Schéma de l'effet de serre : l'altitude équivalente d'émission est z_0 , à une température T_e . Le flux solaire entrant F_{SW} est égal au flux sortant F_{LW} . Le système est à l'équilibre.

atmosphère, et dans cette atmosphère de gaz à effet de serre (et notamment de vapeur d'eau) qui rend la température moyenne à la surface proche des 15°C .

Les Gaz à Effet de Serre (GES) sont des gaz transparents pour les longueurs d'onde du visible, qui sont les longueurs d'onde du rayonnement incident du soleil, et opaques dans les longueurs d'onde de l'infrarouge, qui sont les longueurs d'onde auxquelles émet la surface de la terre. En conséquence, le flux solaire incident, dans le visible, peut traverser l'atmosphère pour atteindre librement le sol (à l'exception notable des zones nuageuses). Par contre, le flux sortant dans l'infrarouge qui s'échappe vers l'espace ne vient majoritairement pas du sol, puisque l'atmosphère est opaque dans ces longueurs d'onde, mais d'une zone de plus haute altitude où l'épaisseur optique de l'air est assez basse pour qu'il devienne transparent même dans l'infrarouge.

On démontre que l'émission de l'atmosphère est équivalente à l'émission d'une unique couche d'atmosphère située à une altitude z_0 , qui dépend de l'épaisseur optique de l'atmosphère. Donc, comme le montre la figure 1.1, l'équilibre entre flux entrant F_{SW} et flux sortant F_{LW} se fait à une altitude z_0 . C'est donc à cette altitude que la température est de $T_e = -33^\circ\text{C}$, température d'équilibre avec le flux solaire entrant.

Grâce aux GES, l'équilibre ne se fait donc pas au niveau du sol, qui atteint 15°C . L'effet de serre est donc responsable d'un piégeage de l'énergie au niveau du sol et d'une augmentation de température au sol d'environ 48°C . La température du sol est relié à la température d'altitude z_0 par le gradient vertical de température $\gamma_z \approx -6 \text{ K km}^{-1}$. En conséquence, $z_0 \approx 8 \text{ km}$.

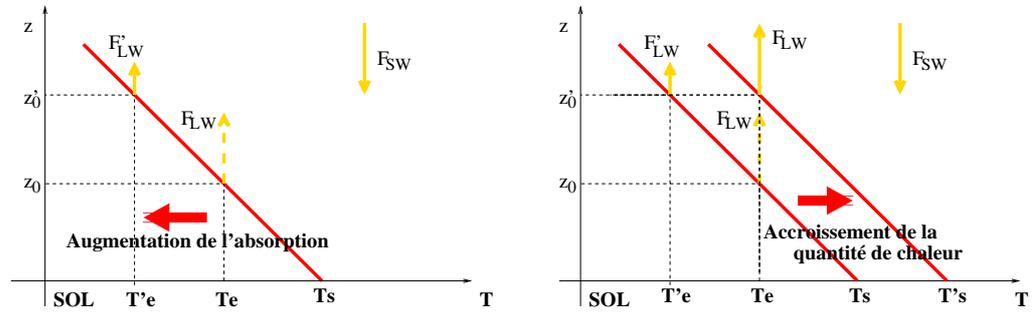


FIG. 1.2: Schéma de l'effet de serre additionnel : Si la concentration de GES augmente, l'altitude d'émission équivalente passe de z_0 à z'_0 , dont l'altitude est plus élevée et correspond donc à un flux sortant F'_{LW} inférieur au flux d'équilibre F_{LW} (figure de gauche). Le système est donc déséquilibré, et la température augmente jusqu'à ce que la température de l'altitude z'_0 soit la température d'émission qui égalise à nouveau flux solaire entrant et flux sortant. Le nouvel équilibre se fait à une température au sol T'_s supérieure à T_s (figure de droite).

1.1.2 L'effet de serre additionnel, responsable d'une augmentation de la température au sol

La vapeur d'eau est le plus important des gaz à effet de serre (en quantité et en effet total dans l'atmosphère). Cependant, de nombreux gaz partagent ces caractéristiques. En particulier, le CO_2 , le méthane (CH_4), l'ozone (O_3), les CFC et les HCFC sont aussi des gaz à effet de serre dont les pouvoirs absorbants ("l'opacité" dans l'infrarouge) varient : une molécule de CFC absorbe autant de rayonnement infrarouge que plusieurs milliers de molécules de CO_2 .

Quand la quantité de gaz à effet de serre augmente, l'atmosphère devient plus opaque dans l'infrarouge. Donc un rayon infrarouge issu de l'espace pénétrerait moins profondément dans l'atmosphère, ce qui veut dire que l'altitude d'émission équivalente passe de z_0 à z'_0 , qui est plus élevée (voir Fig. 1.2). Par exemple, pour un doublement de la concentration de CO_2 , la variation de z_0 est $\Delta z_0 = z'_0 - z_0 \approx 150$ m. Ce qui signifie que la terre émet vers l'espace à partir d'une zone de plus grande altitude, plus froide, et donc que le flux sortant F'_{LW} est plus faible que le flux entrant F_{SW} . Le système est donc en déséquilibre jusqu'à ce que la température de l'altitude z'_0 soit de nouveau celle qui équilibre le flux entrant et le flux sortant, c'est-à-dire T_e . Donc, la température d'altitude doit augmenter et, si le gradient vertical de température est inchangé, la température au sol doit être plus élevée, passant de T_s à T'_s . Pour une augmentation d'altitude $\Delta z_0 = 150$ m, l'augmentation de température est d'environ $\Delta z_0 \times \gamma_z = 0.15 \times 6 \approx 1$ K.

Il est remarquable que les GES d'origine anthropique qui s'accumulent

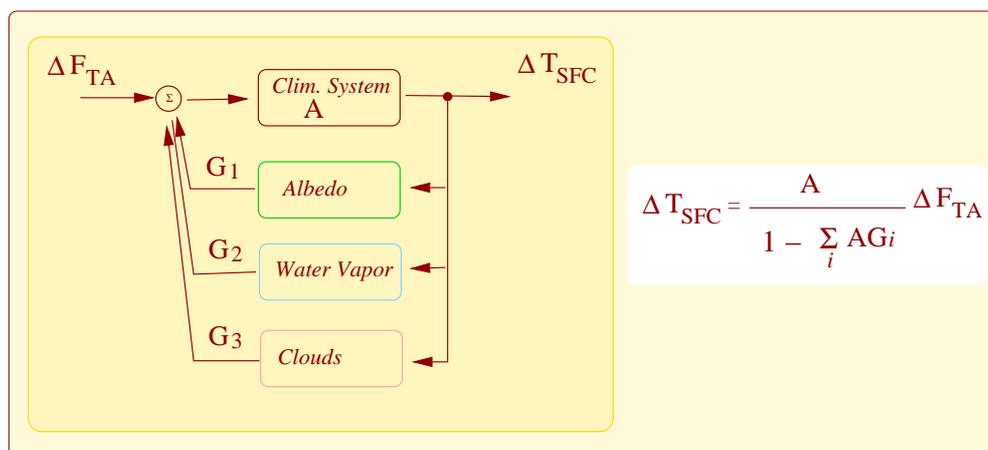


FIG. 1.3: Schéma du système climatique et de ses boucles de rétroaction : on modifie le forçage de ΔF_{TA} , le système climatique répond et toute une série de rétroactions modifie la réponse (albédo, vapeur d'eau, nuages...) pour obtenir un réchauffement final de ΔT_{SFC} .

dans l'atmosphère ont des durées de vie très différentes : une décennie pour le méthane (CH_4), environ un siècle pour le CO_2 , et jusqu'à 50.000 ans pour certains CFC et HFC. Ainsi des émissions de GES peuvent avoir des conséquences très durables.

1.1.3 Les rétroactions du système climatique, principales sources d'incertitude sur le changement climatique

L'augmentation de la température à la surface de la terre bouleverse le climat. Il ne s'agit pas d'une simple augmentation homogène de la température dans les 3 dimensions, mais d'une redistribution de l'énergie supplémentaire par le système climatique.

Ceci a de nombreuses conséquences sur le contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère, sur la couverture nuageuse, sur le gradient vertical de température, sur la répartition géographique de l'énergie... Toutes ces modifications peuvent à leur tour modifier le flux d'énergie sortant vers l'espace et modifier la température de la terre. Ce sont ces processus que l'on nomme les rétroactions du système climatique, et que l'on schématise dans la figure 1.3.

Parmi ces rétroactions, on peut citer la rétroaction vapeur d'eau, qui, d'après les modèles, pourrait amplifier à elle seule le réchauffement de 50 à 100%. Cette rétroaction est liée au fait que quand la température augmente, l'atmosphère peut "contenir" plus de vapeur d'eau (relation de Clausius-

Clapeyron). Si l'humidité relative² reste peu modifiée (ce que l'on observe dans les modèles), alors l'humidité absolue doit augmenter. Comme la vapeur d'eau est un gaz à effet de serre, cette humidité supplémentaire augmente à son tour le réchauffement et amplifie la perturbation initiale. Le chapitre 3 reviendra en détail sur une description dynamique de la réaction vapeur d'eau.

De plus, ces rétroactions ne passeront pas uniquement par l'atmosphère et l'océan. Par exemple, les réactions de la végétation et des sols aux changements de climat peuvent provoquer en retour des modifications des concentrations de gaz à effet de serre (*Cox et al.* [2000], *Friedlingstein et al.* [2003]) : si une forêt disparaît à cause des changements climatiques, le carbone dont elle est composée s'échappera dans l'atmosphère, et fera augmenter les concentrations de CO₂ ou de CH₄ (suivant le mode de décomposition du bois) ; si l'activité bactérienne dans les sols augmente à cause du réchauffement, le relâchement de méthane des sols pourrait lui aussi s'accroître...

De plus, ces rétroactions pourraient avoir des comportements extrêmement non-linéaires, irréguliers et irréversibles. Pour prendre un exemple, il est possible qu'un arrêt de la circulation thermohaline puisse se faire dans des temps très brefs (moins d'un siècle) et soit irréversible pour des horizons temporels de quelques siècles. Même si ce processus est mal connu, on sait que de tels comportements sont avérés dans le passé et donc sont *a priori* encore possibles et pourraient entraîner des changements très profonds du climat dans son ensemble.

Ces rétroactions, qui agissent également en réponse à la variabilité naturelle du climat, peuvent être positives ou négatives, c'est-à-dire avoir un effet amplificateur des variations ou au contraire un effet stabilisateur. Or, notre connaissance de toutes ces rétroactions est loin d'être parfaite et ce sont elles qui expliquent l'incertitude sur le réchauffement réel qui sera finalement observé à la suite de l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre.

1.1.4 Les modèles climatiques, outils de compréhension et de prédiction

Pour comprendre ces rétroactions climatiques, et donc expliquer les variations observées du climat dans le passé et fournir des prédictions du réchauffement climatique auquel nous serons confrontés, on utilise des modèles dits de circulation générale (MCG ou GCMs en anglais). Ces modèles sont des programmes informatiques, qui se comportent comme des "planètes artificielles". On essaie donc de reproduire les phénomènes physiques que l'on observe dans le climat, en se fondant sur les lois fondamentales de la phy-

²L'humidité relative est le quotient de la masse de vapeur d'eau présente par la masse de vapeur d'eau à la saturation.

siques (conservation de la masse, conservation de l'énergie, équations de la dynamique...).

Malgré la complexité du climat, ces modèles sont capables de reproduire de façon surprenante les principales caractéristiques du climat telles qu'on les observe (organisation en cellule de Hadley dans les tropiques, présence de moussons, de dépressions dans les hautes latitudes...). Le climat qu'ils reproduisent est très proche du climat réellement observé. Ils ont toutefois de nombreux défauts, certains variant selon les modèles, d'autres communs. Par exemple, la modélisation des nuages moyens pose problème dans tous les modèles alors que ces nuages pourraient jouer un rôle important dans le bilan radiatif de la terre; la convection est également difficile à modéliser car elle a lieu à des échelles inférieures à celle des mailles de GCMs, et on a des difficultés à reproduire son cycle journalier.

Ces modèles nous permettent de tester notre compréhension des phénomènes, en vérifiant qu'on est capable de reproduire leurs conséquences. De plus, une fois validés par leur capacité à reproduire le climat actuel, ou les climats du passé (les paléo-climats), ces modèles peuvent être "forcés" par une augmentation des concentrations de gaz à effet de serre, ou, pour ceux qui incluent un cycle du carbone, par des émissions de gaz, et l'on observe la réponse de ces planètes artificielles.

1.1.5 Un changement climatique est aujourd'hui observable

De nombreuses études visent à établir un historique de la composition chimique de l'atmosphère, en remontant aussi loin que possible. Sur les mille dernières années, la figure 1.4 montre une augmentation très significative des concentrations de CO₂, CH₄ et N₂O. D'autres travaux, dont les résultats sont reproduits en Fig. 1.6, ont montré que la composition actuelle de l'atmosphère n'a pas été rencontrée depuis au moins 20 millions d'années.

Il a également été montré, grâce aux carottes de glace de Vostok (Antarctique) qui conservent intactes des bulles d'air âgées de plus de 400.000 ans, que la température est très corrélée à la composition de l'atmosphère en terme de CO₂ et de méthane (voir Fig. 1.5). Bien que ceci ne dise rien des relations de causalité entre ces variables, et que le rôle des cycles astronomiques soit moteur dans ces variations, ceci montre clairement que les températures et les concentrations de GES sont liées d'une façon ou d'une autre et que le climat, que l'on est en train de perturber de manière significative, est un système manifestant des instabilités et qui peut répondre de manière importante aux variations des forçages.

Le troisième rapport de l'IPCC propose la figure 1.7, qui présente des reconstructions ³ de la température moyenne sur les 1000 dernières années.

³On appelle reconstruction des mesures indirectes de variables physiques. Par exemple,

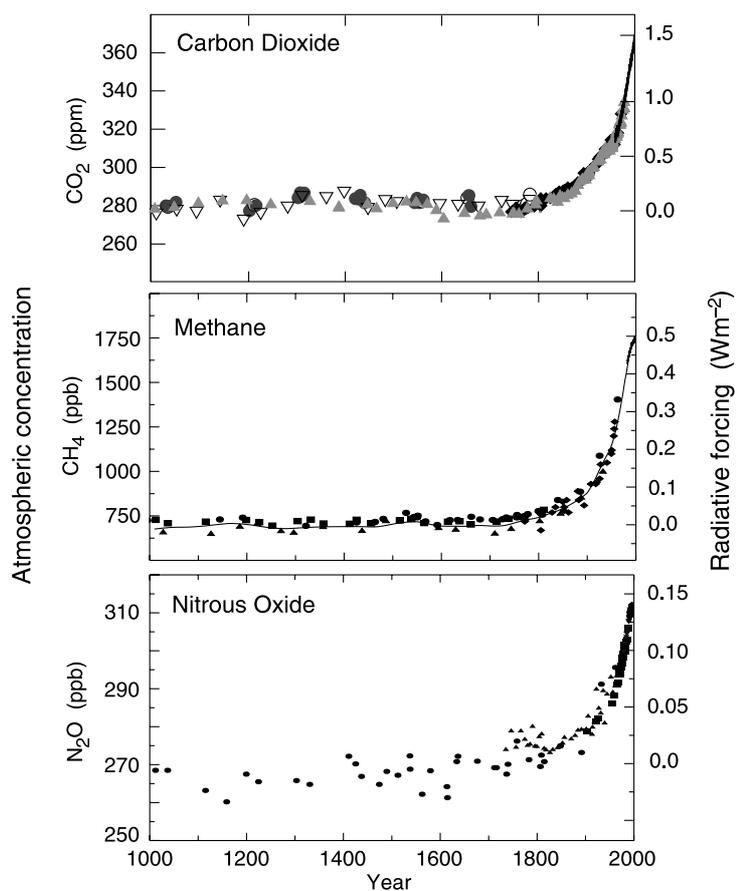


FIG. 1.4: Concentrations historiques de CO₂, de CH₄ et de N₂O, issues de différentes études, entre l'an 1000 et aujourd'hui. Source : IPCC [2001a].

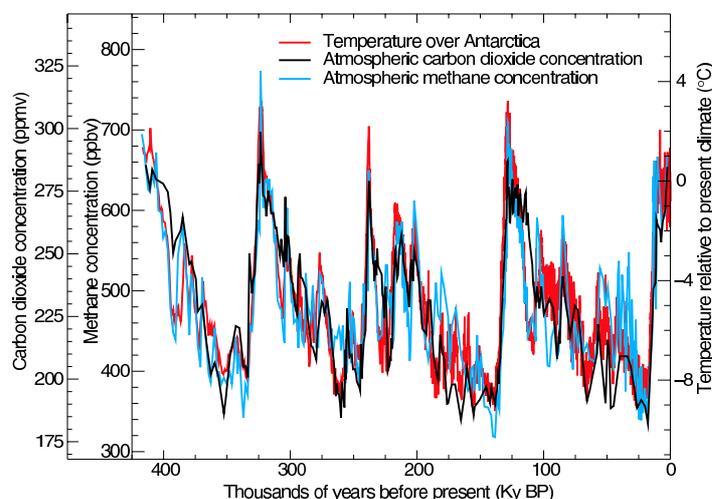


FIG. 1.5: Concentrations historiques de CO_2 et de méthane, et température depuis 400.000 ans ; reconstruction à partir des carottes de glace de Vostok. Source : *IPCC* [2001a].

Sur cette figure, il semble évident que le réchauffement de ces 50 dernières années est très inhabituel. On a parlé de *hockey stick* (crosse de hockey) pour qualifier cette figure et l'augmentation très rapide des températures de ces dernières décennies. Toutefois, cette figure est aujourd'hui contestée, en particulier à cause de la méthode statistique utilisée. De plus, des articles récents semblent montrer que la décennie 1990 n'a peut-être pas été aussi exceptionnelle qu'on ne l'a pensé [Chuiue et al., 2004].

Il n'en reste pas moins que les simulations montrent que les modèles actuels ne sont capables de reproduire les variations du $\text{XX}^{\text{ème}}$ siècle que s'ils prennent en compte les forçages anthropiques (figure 1.8). Là encore, le bon accord des modèles avec les observations peut être contesté sur la période 1850-1950 compte-tenu des incertitudes énormes qui restent sur le forçage par les aérosols et sur le rôle du cycle solaire. Toutefois, sur la période 1950-2000, on est incapable d'expliquer le réchauffement observé autrement que par les concentrations additionnelles de GES.

Il est donc difficile de conclure définitivement que le réchauffement du $\text{XX}^{\text{ème}}$ siècle ne provient pas de causes naturelles, même si on est aujourd'hui incapable de fournir une explication alternative satisfaisante : l'action des GES d'origine humaine est de loin l'explication la plus crédible.

Ces questionnements ne remettent de toute façon pas en cause les prévi-

la température peut être reconstruite à partir de mesures de cernes des arbres ou par des mesures isotopiques.

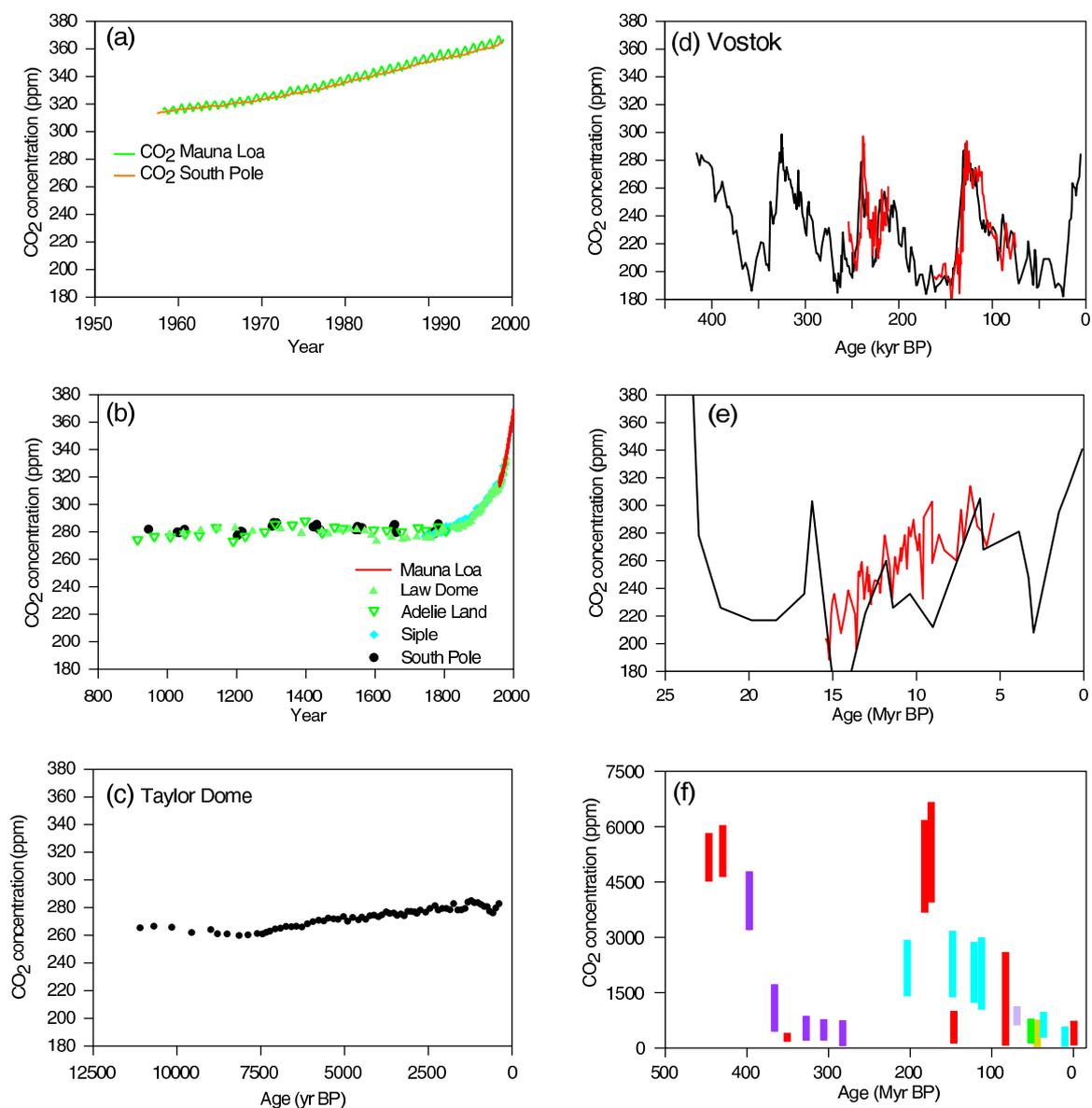


FIG. 1.6: Concentrations passées de CO₂, issues de différentes études, à différentes échelles de temps. La concentration actuelle est d'environ 370 ppm et il est probable qu'elle atteindra les 700ppm au cours du vingt-et-unième siècle. Source : IPCC [2001a].

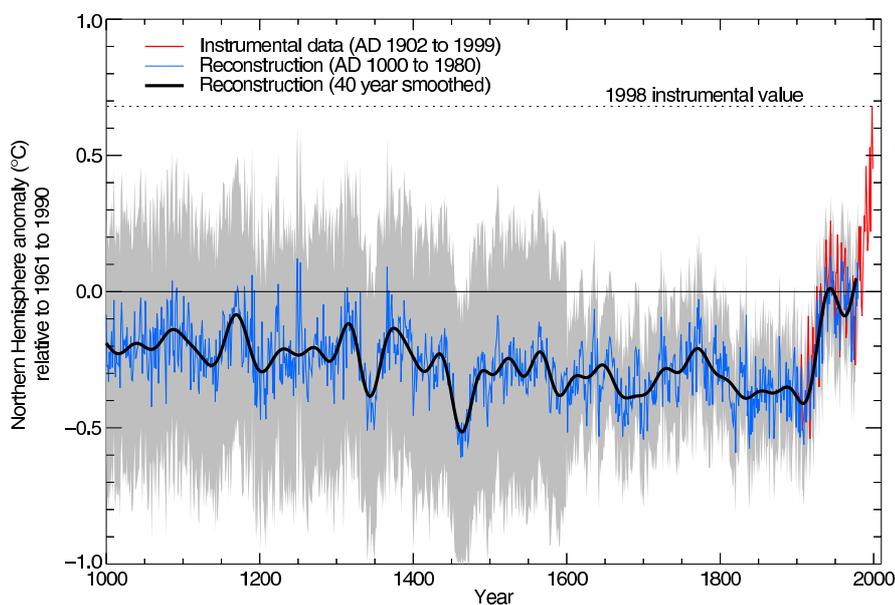


FIG. 1.7: Augmentation globale de la température sur 1000 ans, reconstruite à partir de différents proxies. Source : *IPCC* [2001a].

sions du changement climatique futur. En effet, les incertitudes sur le forçage par les aérosols ou sur l'impact du cycle solaire sont d'un ordre de grandeur comparable avec le forçage par les GES au cours du XX^{ème} siècle, mais sont d'un ordre de grandeur inférieur à ce forçage durant le XXI^{ème} siècle.

Ainsi, même s'il est certain que la compréhension de l'évolution du siècle dernier est indispensable à l'évaluation du changement climatique futur, il ne faut pas confondre le débat sur l'interprétation des variations du climat au cours du siècle dernier et le débat sur les changements climatiques futurs, car ces deux problèmes n'impliquent pas les mêmes incertitudes.

1.1.6 Les prédictions de réchauffement, à la fois robustes et incertaines

Quand on leur impose une concentration de CO₂ double de la concentration pré-industrielle (280 ppmv), l'augmentation de température moyenne dans les modèles de circulation générale s'étage entre 1,5 et 4,5 °C. Ceci montre l'importance de l'incertitude sur le réchauffement, d'autant que cette différence entre modèles ne décrit qu'une partie de l'incertitude : les défauts communs à tous les modèles (et ils sont nombreux) ne sont pas pris en compte dans cette fourchette d'incertitude. En conséquence, on peut dire que cette plage entre 1,5°C et 4,5°C décrit une borne inférieure de l'incertitude sur le

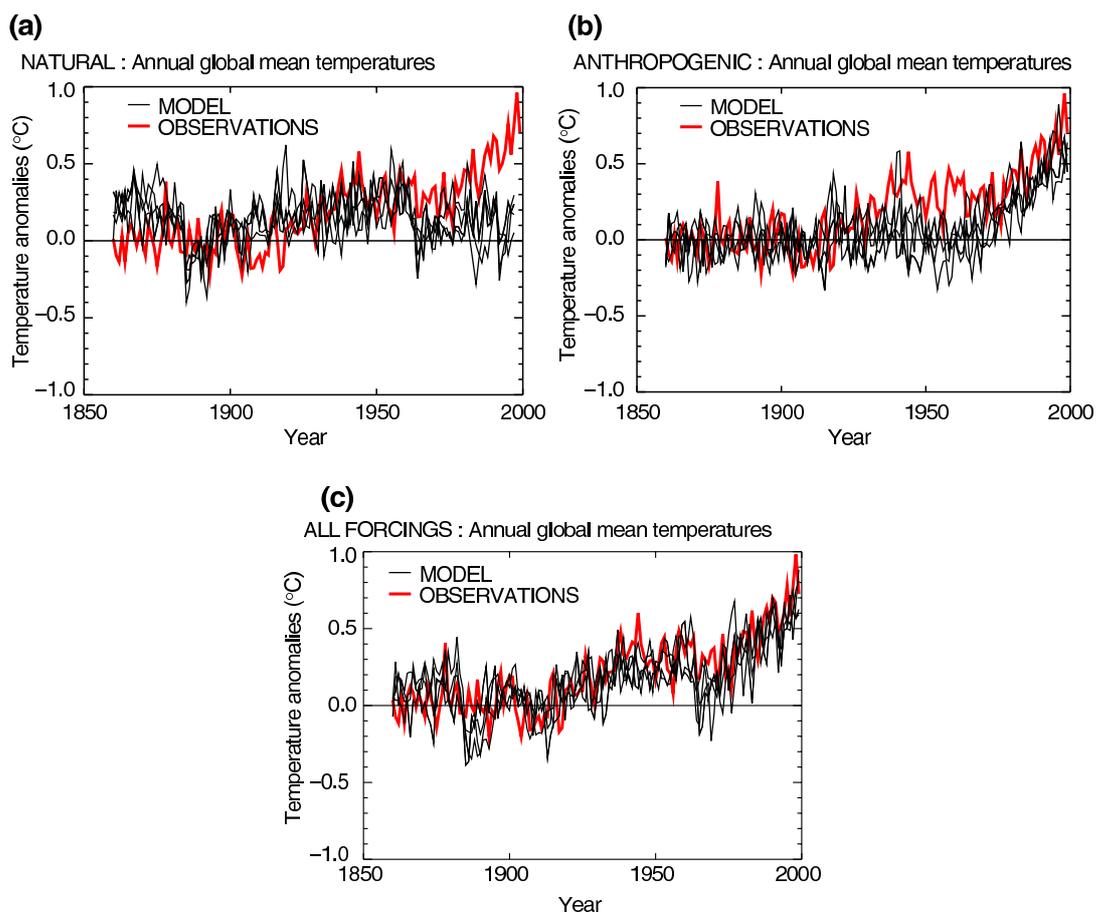


FIG. 1.8: Comparaison de l'évolution de la température moyenne avec des simulations de GCM forcés par (a) seulement les forçages naturels (solaire+volcanique); (b) seulement les forçages anthropiques (GES+aérosols); (c) tous les forçages. Source : IPCC [2001a].

réchauffement.

Dans les prédictions de réchauffement pour le vingt-et-unième siècle, s'ajoute à l'incertitude sur le climat une autre incertitude, qui est par nature irréductible : quelle quantité de GES l'humanité va-t-elle émettre au cours du siècle prochain ? Cette incertitude est d'une nature radicalement différente de la précédente puisqu'elle n'est pas liée à une mauvaise connaissance des processus, mais à notre liberté et notre capacité de choisir notre avenir (et également aux futurs développements technologiques). Pour prendre en compte cette incertitude, un groupe de travail de l'IPCC a développé un ensemble de scénarios d'émissions (les scénarios SRES), fondés sur des "storylines", c'est-à-dire des hypothèses de travail concernant l'évolution de nos sociétés. Par exemple, les scénarios notés A décrivent un monde qui se globalise alors que les scénarios B décrivent un monde plus fragmenté. La figure 1.9 montrent quelques uns des scénarios SRES, en termes d'émissions et de concentration de CO₂. A partir de ces hypothèses de base, la méthode consiste à fournir des *scénarios cohérents* en termes de démographie, de développement économique et technologique, et d'émissions de GES. Les scénarios doivent être cohérents, c'est-à-dire ne pas comporter de contradictions internes : ces scénarios décrivent des mondes possibles.

Bien sûr, ces scénarios ne prétendent pas couvrir le spectre des futurs possibles : si on le voulait, d'autres scénarios seraient atteignables. On ne prétend pas non plus que le futur que nous allons nous choisir se trouve parmi les scénarios proposés : ces scénarios ne sont pas des prévisions. Par contre, on prétend que montrer les conséquences du changements climatiques dans l'ensemble de ces scénarios cohérents permet de se faire une idée réaliste et non-biaisée du risque climatique dans les différents types de développements envisageables, et donc de guider une action publique.

Dans ce contexte, c'est un non-sens de rechercher le scénario le plus vraisemblable, car ce sont les conséquences d'un grand nombre de scénarios qu'il faut considérer pour se faire une idée du problème. En pratique, compte-tenu du nombre de scénarios existants et du temps de calcul que réclame une simulation de modèle climatique, on se restreint fréquemment aux scénarios A2 et B2, qui sont respectivement représentatifs d'un monde à fortes émissions et d'un monde à faibles émissions.

Quand on ajoute directement l'incertitude sur les phénomènes physiques et l'incertitude sur notre comportement futur, méthode qui a d'ailleurs beaucoup brouillé le discours des scientifiques dans le troisième rapport du IPCC, on arrive à un réchauffement moyen sur le globe en 2100 compris entre 1,5 et 5,8 K. Pour se donner une idée de l'ampleur de ce réchauffement, on peut se rappeler qu'une ère glaciaire correspond à 4 K de moins par rapport à aujourd'hui. La figure 1.10 montre l'augmentation de la température globale selon l'IPCC pour les différents modèles et les différents scénarios d'émissions.

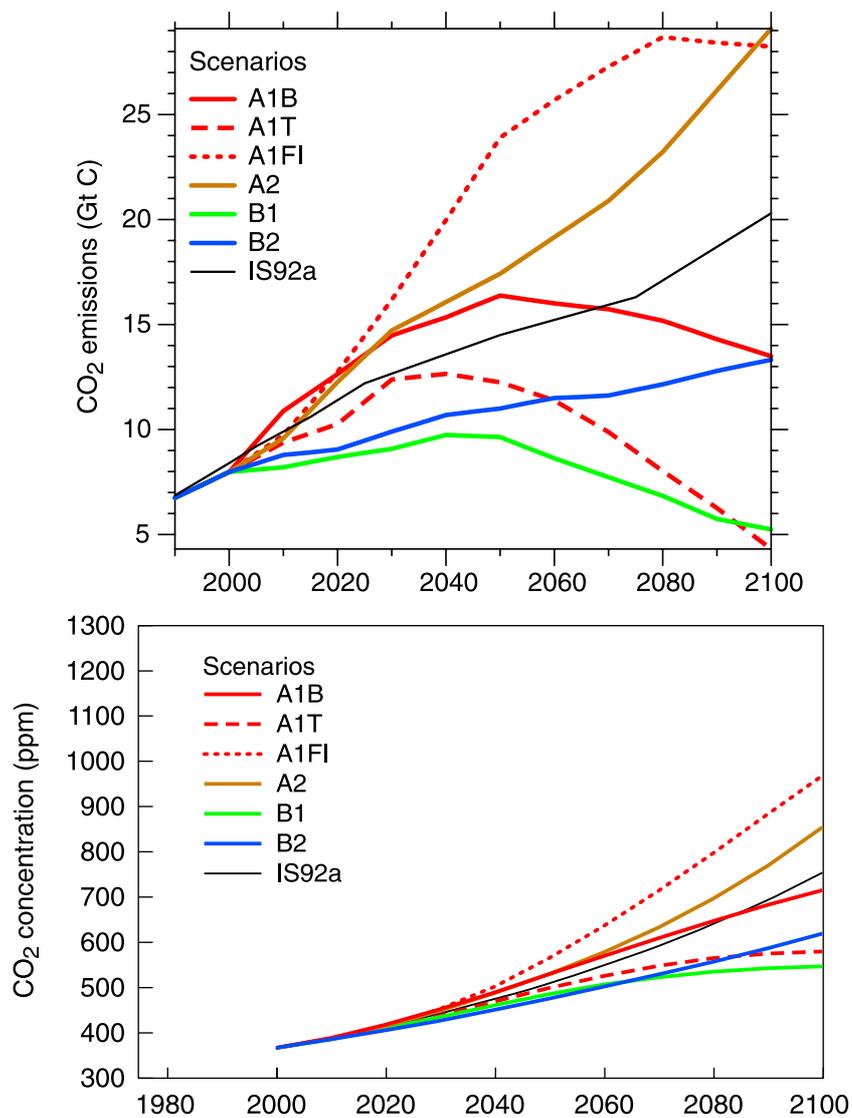


FIG. 1.9: Ensemble de scénarios SRES, en termes d'émissions (haut) et de concentration (bas) de CO₂. Source : IPCC [2001a].

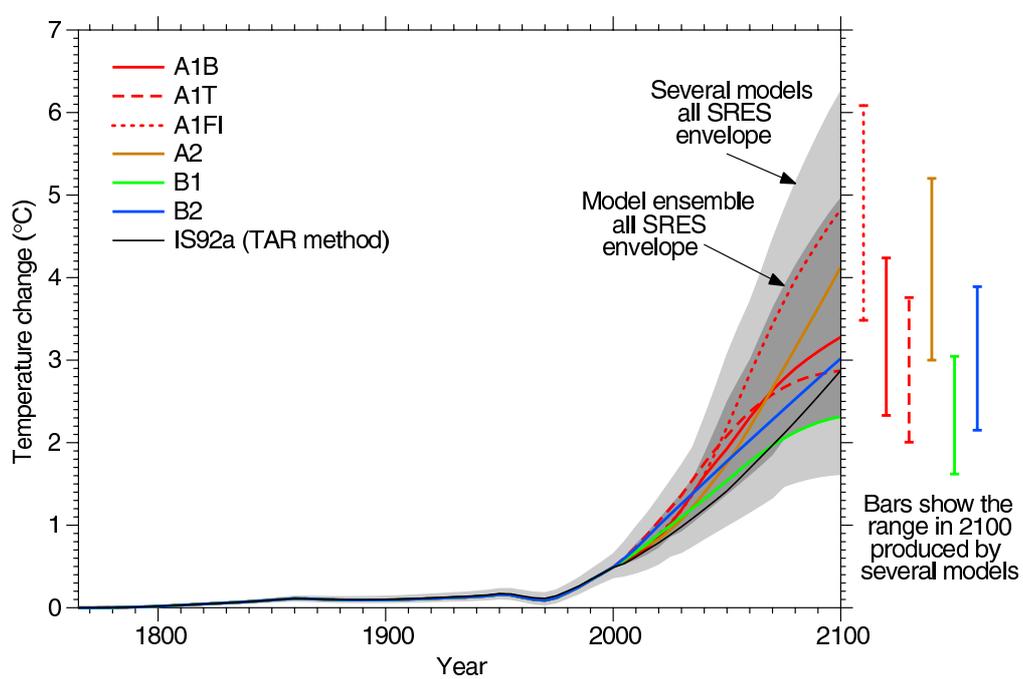


FIG. 1.10: Augmentation globale de la température, pour les différents modèles de l'IPCC et les différents scénarios d'émissions. Source : IPCC [2001a].

Il est à noter que ce réchauffement sera responsable d'une montée du niveau des mers, évaluée entre 20 à 80 cm en 2100 par les modèles (voir figure 1.11). Cette montée vient principalement de la dilatation thermique de l'océan, et implique donc des temps caractéristiques extrêmement longs (plusieurs millénaires). Également à long terme, la dilatation est amplifiée par la fonte des glaces et des glaciers continentaux, qui pourrait provoquer une montée de plusieurs mètres. Il est remarquable que, alors que l'incertitude sur le scénario compte pour 50% de l'incertitude totale sur la température, elle ne compte que pour environ 10% de l'incertitude totale sur la montée du niveau des océans en 2100. Ceci vient de l'inertie immense des processus gouvernant la montée du niveau des mers : la montée du niveau de la mer est un phénomène tellement lent qu'il dépendra, au cours de ce siècle, beaucoup de ce qui a déjà été émis aujourd'hui, et peu de ce qui sera émis au cours du siècle.

Cette inertie a une conséquence qu'il est fondamental de noter : les prévisions de l'IPCC pour la montée du niveau des mers sont relativement faibles (inférieure au mètre) ; mais considérer cette montée du niveau des mers sur un siècle seulement n'a pas beaucoup de sens compte tenu du temps caractéristique des processus concernés. Si on veut regarder les impacts de nos émissions *actuelles* via la montée du niveau des mers, l'horizon temporel à considérer est au moins de quelques siècles. Sur ces échelles de temps, ce type d'impact devient un problème grave, alors qu'il est occulté par l'horizon habituel d'un siècle.

Ces problèmes d'inertie sont encore mieux illustrés par la figure 1.12, qui montre, de manière schématique, les différentes conséquences d'un pic d'émissions sur 100 ans. Dans ce cas, la concentration de GES augmente sur environ 200 ans, la température augmente sur quelques siècles, et la montée du niveau des mers s'étale sur plusieurs millénaires. Ceci est une formidable illustration du caractère unique du problème du changement climatique : nos actions dans les décennies qui viennent nous engagent pour plusieurs millénaires. Jamais une décision humaine n'a eu jusque là des conséquences aussi durables.

1.1.7 Les “catastrophes climatiques”, un risque majeur du changement climatique

Les projections précédentes tendent à faire à croire que le changement climatique sera un processus régulier et continu. Pourtant, de nombreux phénomènes climatiques mettent en jeu des effets de seuil ou d'hystérésis. Pour cette raison, il est envisageable qu'un forçage d'origine anthropique modifie le climat de manière brutale, importante et irréversible.

Parmi ces risques, on peut citer :

- Le détachement d'une partie de la glace de l'Antarctique de l'Ouest,

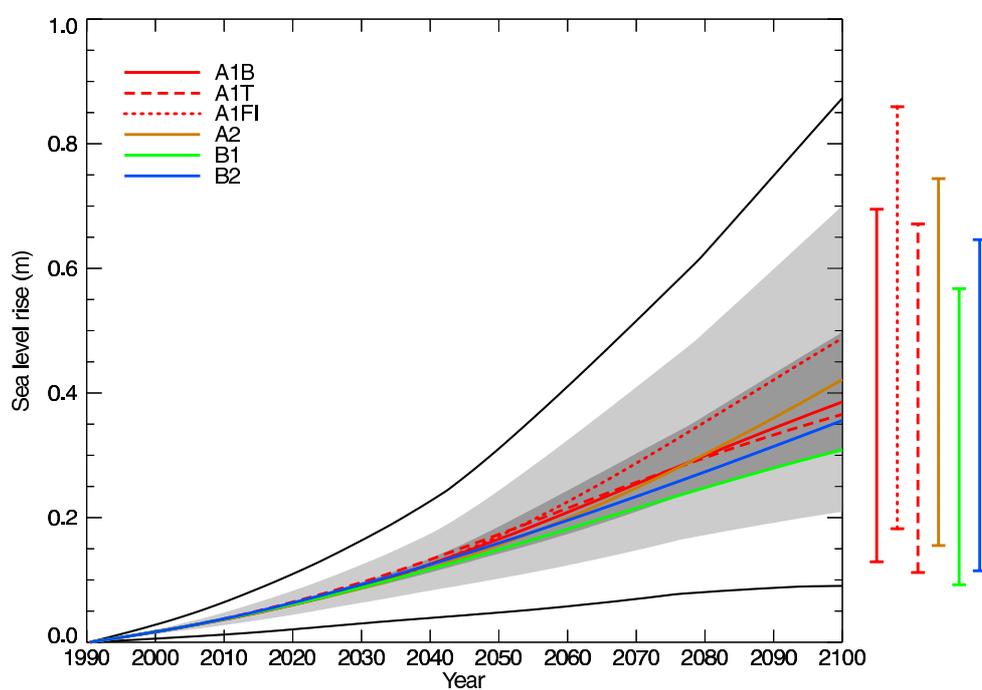


FIG. 1.11: Augmentation globale du niveau de la mer, pour les différents modèles de l'IPCC et les différents scénarios d'émissions. Source : IPCC [2001a].

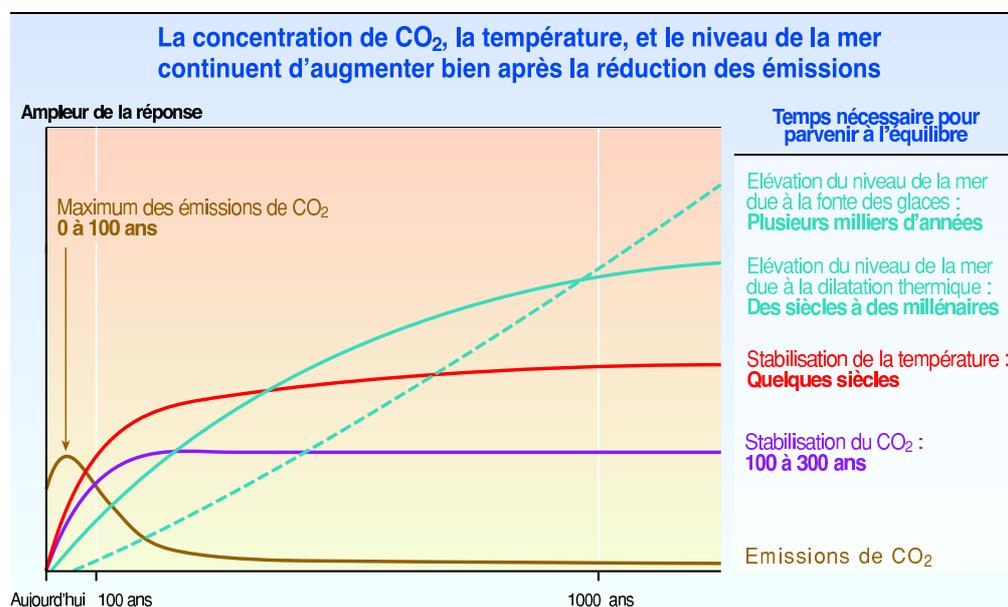


FIG. 1.12: Réponse schématique de différents éléments du système climatique à un pic des émissions sur 100 ans. On constate que des émissions sur 100 ans nous engagent pour plusieurs millénaires. Source : IPCC [2001a].

qui pourrait provoquer une montée très brutale du niveau des mers de plusieurs mètres ;

- Un dégazage violent des sols, à cause de la fonte du permafrost et/ou de l'augmentation de l'activité bactérienne dans les sols, qui pourrait augmenter de manière significative et brutale les concentrations de GES, créant une rétroaction importante.
- Un arrêt de la circulation thermohaline (CTH), qui transporte une partie importante de l'énergie que le climat transfère en permanence de l'équateur vers les pôles.

Ce dernier processus met en jeu de subtiles différences de flottabilités entre des eaux d'origines différentes, et des modèles simples ont montré le caractère bistable de ce système : si un forçage supplémentaire vient s'opposer à ce processus, par exemple un apport important d'eau douce dans l'Atlantique Nord, ce forçage peut arrêter la CTH, et amener le climat à un nouvel état stable où la CTH est stoppée. La disparition du forçage ne suffirait alors pas à rétablir cette circulation, et le climat devrait se réorganiser en fonction de ce changement fondamental. Ceci est illustré par la figure 1.13, extraite de *Stocker et al.* [2001], qui représente l'intensité de la circulation thermohaline, en fonction d'un forçage supplémentaire ΔF (ΔF mesure un apport supplémentaire d'eau douce dans l'Atlantique Nord). Elle montre que la CTH diminue lentement avec ΔF jusqu'à un seuil pour lequel

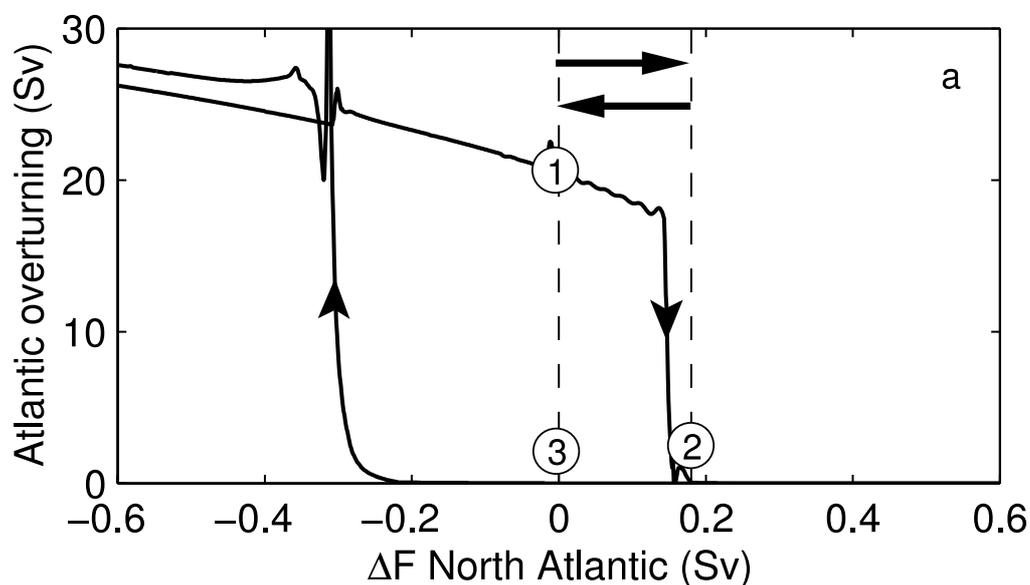


FIG. 1.13: Intensité de la circulation thermohaline en fonction d'un forçage en eau douce dans l'Atlantique Nord. Cette figure montre l'effet de seuil et l'hystérésis du système. Extrait de *Stocker et al.* [2001].

elle s'arrête. Supprimer alors le forçage ne ré-enclenche pas la CT, à moins d'imposer un forçage négatif significatif.

Ce type d'arrêt de la CTH permettent d'aider à expliquer les basculements rapides du climat entre périodes glaciaires et interglaciaires, et est un bon candidat pour expliquer les événements de Heinrich (refroidissements brutaux).

Le fait que les modèles climatiques soient calibrés et validés à partir de l'état actuel moyen du climat rend très incertaine leur capacité à prévoir comment le climat se réorganiserait autour d'un tel nouvel état, fondamentalement différent. Seul un modèle capable de reproduire de façon correcte les paléoclimats serait crédible dans des prévisions de réorganisation du climat.

Ces trois exemples montrent à quel point notre connaissance du système climatique est incomplète, et la gravité de possibles catastrophes climatiques illustre le risque auquel on s'expose en perturbant gravement le climat.

1.1.8 La régionalisation du changement climatique, nécessaire à l'évaluation des conséquences, mais encore hors de portée

Le réchauffement moyen prédit en 2100 (entre 1,5 et 5,8 K) n'est pas une information pertinente pour l'évaluation des conséquences d'un changement climatique. Il s'agit uniquement d'un repère, d'un indice du changement. En pratique, seules les variations locales font sens.

Il faut signaler que, quand on s'intéresse aux réchauffements locaux, le relativement bon accord des modèles entre eux disparaît. Les informations locales peuvent donc être considérées comme encore plus incertaines que le réchauffement moyen.

Les figures 1.14 et 1.15 montrent la moyenne, sur tous les modèles climatiques de l'IPCC, des variations régionales de température et de précipitation sur le globe sous les scénarios A2 et B2. Cette figure montre clairement que le changement climatique est très hétérogène et que les conséquences risquent d'être très inégalement réparties.

On observe que le réchauffement est plus important aux moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère nord que sur le reste du globe, et plus important sur les continents que sur les océans. Le réchauffement local va ainsi de moins de 1 K sur les océans de l'hémisphère sud à plus de 10 K au delà de 80°Nord.

Il est utile de préciser que les modèles reproduisent relativement bien les températures du climat présent, alors que les précipitations leur posent beaucoup plus de problèmes. En conséquence, on a tendance à faire plus confiance aux prévisions en termes de température qu'à celles en termes de précipitations, et à leurs variations plus qu'à leurs valeurs absolues. Toutefois, plusieurs résultats semblent robustes [Douville *et al.*, 2002] : on prévoit une augmentation globale des précipitations, à l'exception des régions sub-tropicales, où le renforcement des cellules de Hadley⁴ réduit encore les précipitations, et des continents des moyennes latitudes où la diminution de la disponibilité en eau du sol réduit les précipitations de printemps et d'été.

1.1.9 Les incertitudes sont importantes, et vont le rester

Tous les résultats reproduits ici sont entachés d'une grande incertitude. Les modèles de circulation générale ne reproduisent pas parfaitement le climat actuel, et cette validation ne serait de toute façon pas suffisante pour

⁴On appelle "cellules de Hadley" la circulation moyenne de grande échelle dans les régions tropicales, c'est-à-dire la convection de grande échelle dans la zone équatoriale (qui explique les pluies importantes) et la subsidence de grande échelle dans les régions sub-tropicales sèches (les grands déserts). Ce mécanisme participe au transfert de l'énergie de l'équateur vers les pôles.

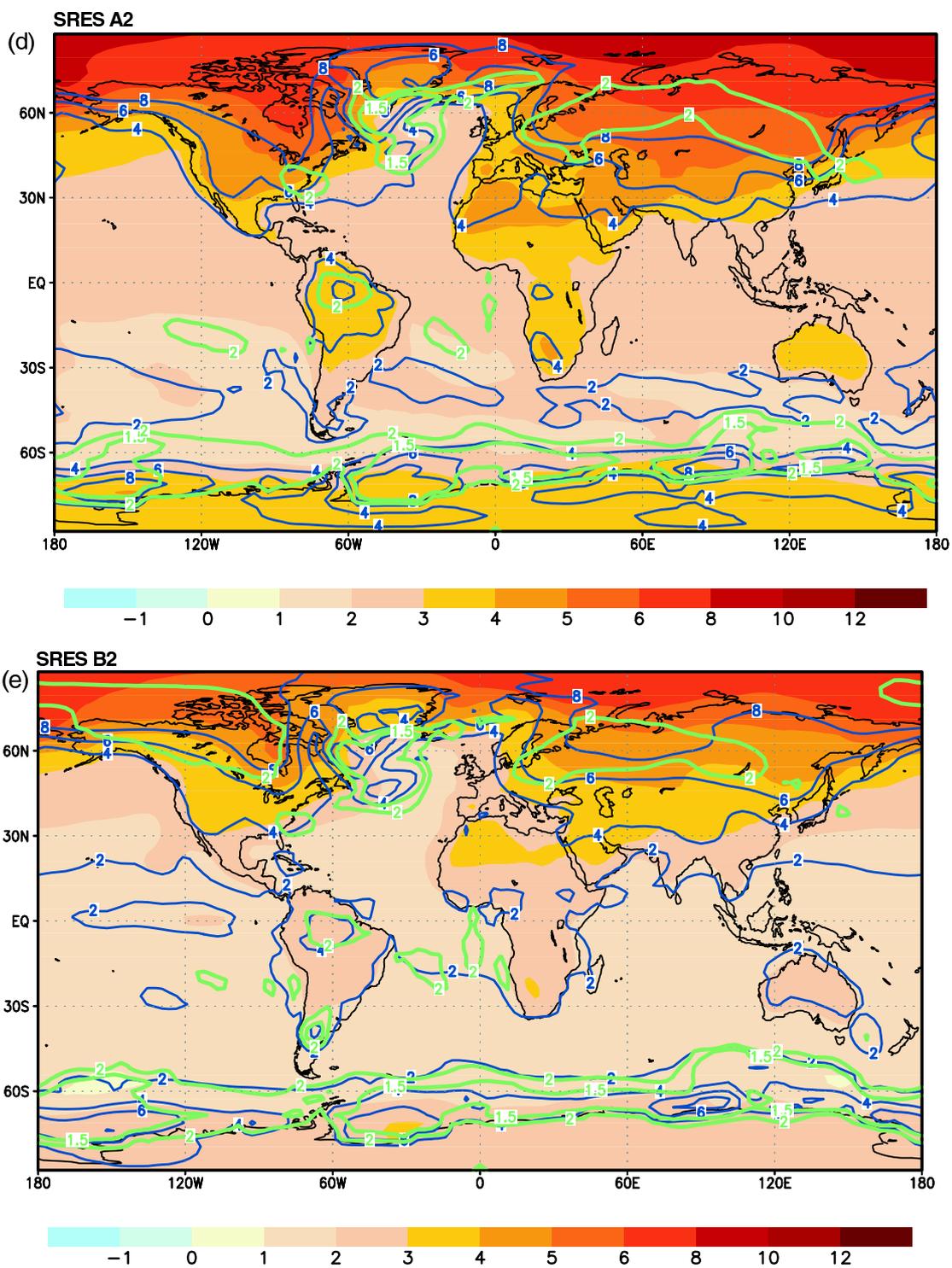


FIG. 1.14: Changement régional de température en 2100, sous les scénario A2 (haut) et B2 (bas), calculé comme la moyenne du changement prédit par chaque modèle. Les isocontours donnent l'écart maximum entre les différents modèles. Source : IPCC [2001a].

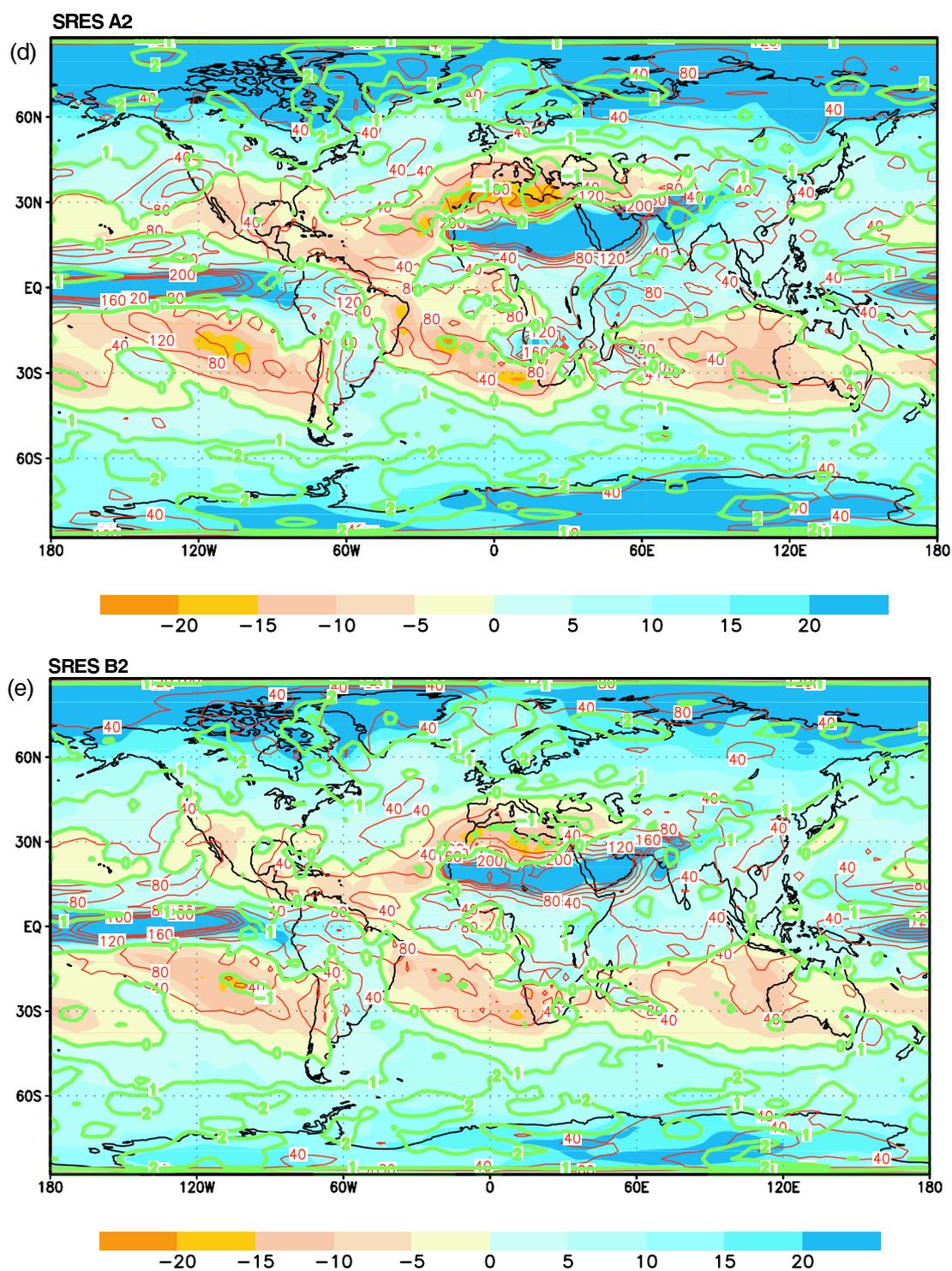


FIG. 1.15: Changement régional de précipitations en 2100, sous les scénario A2 (haut) et B2 (bas), calculé comme la moyenne du changement prédit par chaque modèle. Les isocontours donnent l'écart maximum entre les différents modèles. Source : IPCC [2001a].

démontrer leur capacité à prévoir le changement climatique : premièrement, la validation de ces modèles se fait principalement grâce aux variations de flux solaire entrant (cycles journalier, saisonnier ou de Milankovitch), alors que le forçage par les GES est qualitativement différent. Deuxièmement, il existe un risque que ces modèles soient excessivement conservatifs et stables, afin d'être mieux capables de reproduire le climat actuel, et donc moins capables de reproduire les non-linéarités et les effets de seuil dans l'évolution climatique. Par exemple, en cas d'arrêt de la circulation thermohaline, et si le système climatique se réorganise autour d'un nouvel état moyen, la capacité des modèles à prédire ce nouvel état et l'évolution du climat autour de ce nouvel état, est très discutable. Enfin, il n'est pas possible d'écarter formellement l'existence d'un "processus magique" actuellement inconnu (par exemple impliquant la microphysique des nuages) qui viendrait compenser le forçage par les GES et empêcher le climat de dériver⁵.

Notre connaissance va s'améliorer dans les décennies qui viennent, grâce à l'augmentation de la puissance informatique qui permettra d'améliorer la résolution des modèles, grâce aux nouvelles données fournies par les campagnes de mesures et aux manifestations probablement croissantes du changement du climat, et grâce à l'amélioration de notre compréhension des phénomènes. Cependant, cela ne signifie pas que l'incertitude sur le réchauffement futur va diminuer, et il ne faut donc pas compter sur une "révélation" prochaine de la réponse climatique pour mettre en place une action éventuelle de réduction d'émissions : un aspect irréductible du problème du changement climatique est qu'il faudra agir dans l'incertitude.

Sans aller plus loin dans l'évaluation des conséquences du changement climatique, l'existence de risques importants et d'irréversibilité, ainsi que les fortes incertitudes sur les phénomènes, poussent naturellement à envisager des réductions d'émissions, afin d'éviter de prendre le risque de perturber le climat.

1.2 Que peut-on faire pour réduire nos émissions et éviter ou limiter le changement climatique ?

Il n'est pas anodin que le terme anglais employé pour désigner des réductions d'émissions soit "to mitigate" que l'*Oxford dictionary* définit comme : "to make something less severe, violent or painful". Les travaux effectués jusqu'ici ont en effet considéré le plus souvent les réductions des émissions comme perturbation d'un scénario de référence et non pas comme changement du sentier de croissance vers une économie à faibles émissions.

⁵Un autre exemple d'un tel phénomène est l'effet d'iris proposé par *Lindzen et al.* [2001], mais qui a depuis été infirmé par plusieurs études (voir par exemple *Lin et al.* [2002])

Or, c'est un changement radical de notre sentier de croissance qui est nécessaire si l'on veut stabiliser (et ramener à leur valeur non-perturbée) les concentrations de gaz à effet de serre : il est pour cela nécessaire de diviser par 5 les émissions mondiales. Ce qui, en prenant en compte le développement des pays pauvres, et en particulier bien sûr de la Chine et de l'Inde, veut dire diviser par plus de 10 les émissions des pays riches, si on admet que chaque humain a droit à la même quantité annuelle d'émissions. Ceci ne peut être réalisé par perturbation d'un scénario de référence, et il s'agit bien d'un changement d'organisation générale de l'économie, des infrastructures et de l'urbanisme.

Ce défaut est aujourd'hui corrigé, et les recherches actuelles sont plus focalisées vers l'étude d'un transitoire vers un sentier de croissance soutenable.

En particulier, il faut noter que ce n'est pas du côté de l'offre que se trouvent les solutions de court-terme : aucune énergie renouvelable n'est capable de remplacer le pétrole, le gaz et le charbon dans les décennies à venir, même si la recherche sur les énergies propres et leur déploiement immédiat dans l'économie devraient être des priorités politiques ; et la séquestration pose pour l'instant plus de problèmes qu'elle n'en résout. C'est donc du côté de la demande qu'il faudrait regarder. La seule solution crédible passe par une diminution de la consommation énergétique.

L'industrie et la production d'électricité ont déjà fait de gros efforts dans ce domaine en Europe, même s'il reste beaucoup à faire dans le reste du monde. Des gisements d'économie bon marché sont également à rechercher dans le logement, en particulier en Europe. Des solutions techniques existent déjà et leur application n'est qu'une question de volonté politique, tout le monde gagnant à une réduction de la facture énergétique de l'habitat. Seul la tension actuelle sur le marché immobilier empêche ces mesures d'être mise en oeuvre, car les gouvernements cherchent avant tout à relancer la construction immobilière et donc répugnent à augmenter les coûts de construction en améliorant les normes.

Par contre, le défi est plus difficile dans les transports, qui représentent le secteur dont la consommation augmente le plus vite. Réduire la consommation des transports passe par un changement de l'urbanisme et le développement des transports en commun urbains mais aussi par une modification plus large des habitudes de transport (en particulier concernant le transport aérien international). Dans ce domaine, seule une réduction de la consommation de transport permettrait de réduire la facture énergétique de façon significative.

Face à l'importance des changements économiques et sociaux nécessaires pour réduire de manière significative nos émissions de GES, une demande forte de justification de telles mesures est apparue : les risques associés à

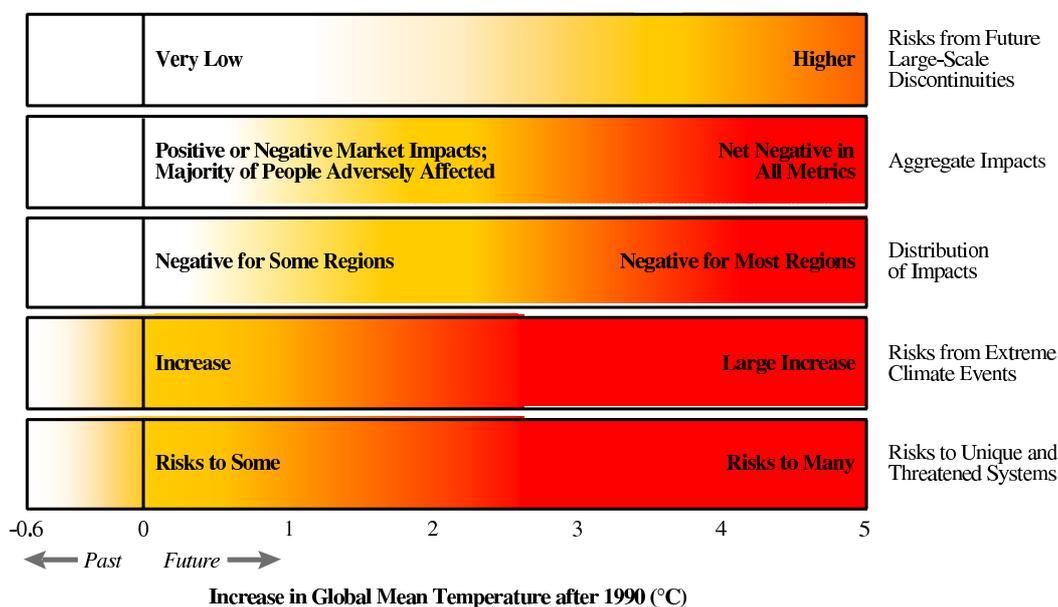


FIG. 1.16: Les “reasons for concern” de l’IPCC, c’est-à-dire les degrés de réchauffement pour lesquels certains types de dommages sont possibles. Source : IPCC [2001b].

une modification du climat n’ont pas été jugés suffisants pour justifier à eux seuls des mesures de réduction d’émissions. Un immense champ de recherche s’est donc ouvert, visant à évaluer les impacts du changement climatique sur les écosystèmes et les sociétés, et à en mesurer la gravité.

1.3 Quels sont les conséquences possibles du changement climatique ?

Il paraît évident qu’un changement de climat tel que le prévoient les modèles aurait d’importantes répercussions sur les écosystèmes et sur nos sociétés. Toutefois, ces impacts sont difficiles à anticiper en raison de notre mauvaise connaissance des mécanismes en jeu. Cela explique pourquoi l’IPCC, dans le résumé pour décideur du troisième rapport, ne donne pas d’information chiffrée sur les seuils dangereux, mais donne seulement des “zones de dommages” extrêmement vagues (voir figure 1.16).

Malgré cette difficulté, on va passer ici en revue les différents impacts observés et envisageables qui pourraient avoir des conséquences sur les sociétés et les économies.

1.3.1 Des observations aux prévisions

De nombreux changements dans les écosystèmes sont actuellement observés, changements dont le réchauffement climatique pourrait être responsable. D'après *Parmesan* [2003] et *Root et al.* [2003], plus de 80% des modifications actuellement observées dans la répartition des espèces sont cohérentes avec le réchauffement climatique.

En ce qui concerne les sociétés, les coûts des événements extrêmes ont largement augmenté au cours de la seconde moitié du vingtième siècle, mais sans que l'on puisse attribuer cet effet au changement climatique, ni même à une augmentation de la fréquence ou de l'intensité des événements météorologiques extrêmes. L'augmentation de ces coûts peut être totalement expliquée par la variation de la vulnérabilité des sociétés, liée à l'urbanisation, à la croissance de la population, et à la croissance économique [*Easterling et al.*, 2000]. Certains effets sur l'agriculture sont également soupçonnés, par exemple des modifications des dates de vendanges (voir *Ganichot* [2002] ou la revue de B. Seguin⁶), sans que l'on puisse être réellement conclusif.

Quand on cherche ensuite à évaluer les conséquences futures du changement climatique, on ajoute aux incertitudes sur le réchauffement climatique les incertitudes sur la réaction des écosystèmes et des sociétés à un changement de climat. On est donc face à une *cascade d'incertitudes* [*Schneider*, 1983], qui rend les résultats finaux extrêmement peu fiables.

De très nombreuses études d'impact ont tout de même été menées, souvent dans le cadre de grands projets de recherche (p. ex. ACACIA en Europe [*Parry*, 2000] ou le National Assessment of Climate Change (NACC) aux USA). Les travaux fondés sur le modèle IMAGE (*Alcamo* [1994], *Alcamo et al.* [1998]) ont été également très novateurs, car IMAGE a été le premier modèle réellement intégré, c'est-à-dire visant à prendre en compte tous les sous-systèmes, depuis le cycle du carbone jusqu'aux impacts sur la production et le commerce agricole⁷.

Ces études donnent un large panorama des divers impacts sur différents secteurs ou écosystèmes et différentes régions; elles sont fondées sur différentes hypothèses concernant les scénarios d'émissions et le changement climatique. Aussi elles sont très parcellaires et il est très difficile (voir impossible) d'en tirer une conclusion d'ensemble. Seules les sorties du modèle IMAGE étaient sensées fournir une vision globale des impacts du changement climatique, avec un succès certain dans le domaine de l'occupation des sols et de l'agriculture. Mais la cascade d'incertitudes et la complexité du

⁶Le Dossier de l'environnement de l'INRA n°22

<http://www.inra.fr/Internet/Produits/dpenv/images/edkaki.gif>.

⁷Seules les dynamiques démographique et économique sont explicitement exogènes dans le modèle.

modèle font que ses résultats sont très difficiles à analyser et à interpréter.

Pour contourner les incertitudes sur l'ampleur du changement climatique, des approches de type analyse de vulnérabilité ont également été suivies. Il s'agit de ne plus évaluer les conséquences d'un réchauffement de $x^\circ\text{C}$ sur tel écosystème, puisque l'incertitude sur x est trop grande et qu'elle dépend de notre comportement futur. On préfère donc rechercher l'intensité du réchauffement que peut supporter un écosystème et évaluer sa réponse quand ce seuil est dépassé. Ceci permet un certain découplage entre les incertitudes sur les scénarios d'émissions et sur le climat et les incertitudes sur la réponse des écosystèmes.

Les parties suivantes vont passer en revue un certain nombre d'études d'impacts sur différents systèmes.

1.3.2 Les impact potentiels sur les écosystèmes et la végétation sont inquiétants

Les impacts sur les écosystèmes sont à la fois difficiles à prévoir et fondamentaux. En effet, les études de vulnérabilité montrent clairement que les effets potentiels du changement climatique sur les écosystèmes sont très importants, en particulier pour les plus vulnérables comme par exemple :

- Les récifs coralliens, qui pourraient disparaître à assez court terme à cause du réchauffement des eaux [Buddemeier, 2004].
- Les zones basses (espaces deltaïques, maris, mangroves), qui pourraient être détruites par la montée du niveau des océans.

Le facteur essentiel reste le rythme du changement climatique, comparé aux capacités d'adaptation des écosystèmes [WBGU, 1997]. Or, la vitesse du changement prévu (quelques degrés en quelques décennies) est largement plus rapide que tous les changements climatiques naturels connus. Il est donc vraisemblable que le réchauffement d'origine anthropique soit plus destructeur que les variations naturelles du climat.

Pour cette raison, les résultats de *Thomas et al.* [2004] sont inquiétants : cette étude annonce une extinction massive d'espèces dès 2050, même dans des scénarios optimistes. La faiblesse de nos connaissances, et donc de ce résultat, n'enlève rien au danger immense que représenterait un tel événement, justifiant des recherches poussées dans ce domaine.

1.3.3 Les impacts directs sur les sociétés pourraient également être très importants

Les impacts prévus sur les sociétés seront largement développés dans le corps de cette thèse. En guise de premier aperçu, on peut citer un certain nombre d'impacts dont les conséquences peuvent être importantes, tirés principalement du rapport du deuxième groupe de travail de l'IPCC, et de

la thèse de Philippe Ambrosi [Ambrosi, 2004], qui dresse un tableau très précis de l'état de l'art dans le domaine.

1.3.3.1 Des impacts majeurs sur l'agriculture

Ce type d'impact est celui qui a été le plus étudié et qui est le mieux connu. La conclusion générale est que le changement climatique ne mènera pas à une rupture à l'échelle mondiale de la production agricole, et que la planète devrait rester capable de nourrir sa population. Toutefois, à l'échelle régionale, des transformations importantes sont à attendre et les problèmes liés à la sécurité alimentaire pourraient se multiplier.

Une des études les plus récente sur ce thème est celle réalisé par l'IIASA en 2002 [Fischer et al., 2002]. Cette étude modélise explicitement les productions régionalisées et le marché mondial des produits agricoles, ce qui permet d'avoir à la fois un point de vue local et global. Cette étude utilise les 4 scénarios SRES principaux de l'IPCC et 3 modèles climatiques différents, pour croiser l'incertitude sur la sensibilité du climat et l'incertitude sur le scénario socio-économique.

Cette étude conclue avant tout qu'une aggravation des disparités Nord-Sud est à attendre. En effet le réchauffement augmente les rendements dans certaines régions froides (p.ex en Sibérie) alors que les pays en voie de développement (PVD) sont souvent situés dans des régions chaudes où la température n'est pas un facteur limitant de la production agricole.

On a donc une concentration des zones de production au Nord, et une croissance de la population au Sud. Ceci crée une dépendance forte du Sud aux marchés internationaux et aux productions du Nord. Une telle évolution est déjà observée dans les scénarios sans changement climatique, mais elle est ici significativement intensifiée.

Ces changements de rendement interagissent avec le reste de l'économie et via les échanges internationaux, ce qui amène à des impacts économiques négatifs pour les PVD (surtout l'Afrique avec des pertes pouvant atteindre 10% du PIB), et à des résultats contrastés pour les pays développés (entre 0 et +20% pour la Russie et entre -6 et -20% pour l'Europe de l'Ouest).

Enfin, même si les conséquences du changement climatique sont largement moins graves que d'autres facteurs (p.ex les guerres), le déplacement des régions de hauts rendements et le passage à d'autres types de production qu'il exigera, risquent de poser des problèmes socio-politiques importants (redistribution de revenus entre pays, entre régions, entre catégories sociales), surtout dans les PVD où l'agriculture est centrale dans la vie économique.

1.3.3.2 Les impacts sur les ressources en eau : une aggravation des tensions pré-existantes

D'une manière comparable à ce que l'on observe pour les impacts agricoles, le changement climatique n'est pas la source principale des problèmes de ressources en eau. Cependant, il vient aggraver un peu plus la situation.

Aujourd'hui, un milliard sept cent millions de personnes, c'est-à-dire 20% de la population mondiale, vivent dans des régions où les ressources en eau sont menacées (c'est-à-dire que plus de 20% du flux est exploité). *Vörösmarty et al.* [2000] ont montré que l'évolution de cette situation dépend *sur le court-terme* avant tout du scénario démographique et socio-économique que l'on considère⁸. Mais en 2025, pour les scénarios pessimistes, il pourrait y avoir jusqu'à 5 milliards de personnes dans de telles régions souffrant de pénurie d'eau.

Le changement climatique risque d'aggraver ce problème dans certaines régions, notamment la région méditerranéenne, pour laquelle on attend un assèchement marqué en été, ainsi que l'Asie centrale et le sud de l'Afrique [IPCC, 2001b]. Sur l'Europe, le projet ACACIA [Parry, 2000] insiste sur les risques de mauvaise gestion de la ressource et sur les risques de sécheresse au sud de l'Europe.

Dans les petites îles, où les ressources en eau sont rares et indispensables car le transport d'eau est impossible, la montée du niveau de la mer menace les "lentilles d'eau douce". Ce problème dramatique est déjà observé (p. ex. dans les îles Karibati).

Cependant les conséquences futures du changement climatique sur les ressources en eau sont encore incertaines car il s'agit d'un problème très délicat, qui met en jeu un équilibre entre plusieurs processus mal connus : évolution des précipitations, évolution de l'évaporation (liés notamment à la nébulosité), ruissellement, infiltration, rôle de stockage joué par la neige et la glace en montagne, comportement des nappes phréatiques, évolution de la demande en eau (pour usages domestique, agricole, industriel et énergétique).

La diminution des ressources en eau peut avoir des conséquences importantes sur le reste de l'économie. Ainsi, la production électrique est dépendante des ressources en eau, par l'hydroélectricité et le refroidissement des centrales thermiques (fossiles et nucléaires). Les exemples de la canicule de 2003 en France et de la sécheresse sur le Brésil en 2001 montrent que les ressources en eau peuvent limiter la production d'énergie, avec des conséquences durables sur toute l'économie dans le cas du Brésil.

⁸Toutefois, on ne dispose pas d'études précises à long terme sur ces questions

1.3.3.3 Les infrastructures sont très vulnérables au changement climatique

Les infrastructures seront probablement fortement touchées par le changement climatique. Par exemple, dans les pays développés, la question du tourisme de montagne a été fréquemment posée. En effet, cette activité représente une part importante de l'économie locale et est pour l'instant très dépendante de la durée de la période enneigée, qui pourrait être fortement réduite au cours des prochaines décennies [Martin, 2002]. D'autres contraintes économiques et écologiques montrent qu'il ne sera pas possible de compenser par l'usage de neige artificielle, dont l'effet ne peut être que marginal. Les investissements lourds menés par les régions montagneuses risquent donc de voir leurs durées de vie réduites, et les économies locales seront durement touchées si une reconversion n'est pas conduite suffisamment tôt (p.ex tourisme vert d'été).

Mais la montée du niveau des océans risque de bouleverser de façon bien plus importante un certain nombre d'infrastructures et d'implantations humaines. La montée du niveau de la mer pourrait en effet accélérer l'érosion des côtes et provoquer un recul du trait de côte (d'entre 50 et 100m en Europe du Nord en 2080 selon Parry [2000]). Elle pourrait également faire empirer les marées de tempête, provoquant des inondations plus graves et plus fréquentes si aucune mesure de protection n'est prise. Par exemple, une élévation de 30 cm du niveau des mers multiplierait par dix le risque de surcôte supérieure à 1,4m dans l'estuaire de la Loire [Deneux, 2002]. A New-York, selon le NACC, la surcôte actuellement centennale aurait un temps de retour situé entre 4 et 60 ans en 2080, selon le scénario retenu [Rosenzweig et Solecki, 2001].

Si le niveau de la mer montait de 40 cm, Nicholls et al. [1990] évaluent que le nombre de personnes touchées annuellement par une inondation passerait de 13 millions à 93 millions, même si d'importantes mesures d'adaptation étaient prises.

Mais le plus difficile à gérer viendra probablement des déplacements de populations liés au recul du trait de côte. Même les scénarios optimistes réduisent la surface de pays comme le Bangladesh de manière significative : d'après Al-Farouq et Huq [1996], une montée du niveau de la mer de 1 mètre entraînerait l'inondation permanente de 15 à 18% des zones basses du Bangladesh, le déplacement de plus de 10 millions de personnes et la perte de terres agricoles de grande qualité.

La fonte du permafrost dans les zones montagneuses et boréales imposera aussi des travaux de rénovation ou de reconstruction d'infrastructures (bâtiments, routes, pipelines, mines...). En effet, les fondations de ces infrastructures ne sont pas adaptées à des sols non gelés. Weller et Lange [1999] observent déjà des dommages sur certains types de bâtiments en Russie,

venant probablement du réchauffement observé dans cette région au cours des dernières décennies. Ainsi, la plupart des constructions de certaines régions de Russie pourrait devenir inutilisable en 2030. L'Alaska a récemment supporté un réchauffement de 3°C en 40 ans. Les dommages sur les infrastructures routières sont chiffrés par le NACC à 3 millions US\$ par *miles* de route.

Ce problème lié au permafrost est emblématique de la différence entre régime permanent et transitoire. Dans les régions très froides, un réchauffement est en effet clairement positif pour les sociétés et l'économie sur le long terme. Cependant, la réadaptation des infrastructures et des modes de vie sur quelques décennies à des conditions totalement différentes ne se fera pas sans difficultés et sans de lourds investissements pour des régions actuellement assez pauvres.

1.3.3.4 Les impacts sur la santé

L'effet du climat sur la santé est loin d'être indépendant du scénario de développement retenu. En effet, l'influence du climat sur la santé diminue globalement avec la richesse. Cependant, le réchauffement pourrait modifier de manière sensible les risques auxquels les populations sont soumises. En particulier, la mortalité hivernale pourrait être réduite d'entre 5 et 7% grâce à des hivers plus doux, tout le reste restant égal par ailleurs [Deneux, 2002].

A l'opposé, des vagues de chaleur plus fréquentes pourraient augmenter la mortalité estivale de 12 à 18%, toujours en considérant tout le reste égal par ailleurs, c'est à dire en ne prenant pas en compte de processus d'adaptation⁹. En outre, une variabilité plus grande, comme observée dans les modèles climatiques régionaux (voir les résultats du projet PRUDENCE), pourrait faire empirer ces résultats car l'organisme a des difficultés à s'adapter rapidement à de brusques variations météorologiques [Besancenot et al., 2002].

Le réchauffement interagit également avec la qualité de l'air en ville, qui est souvent citée comme un co-bénéfice des politiques de lutte contre le changement climatique, qui réduisent également la pollution urbaine [Davis et al., 2000].

Le cas des maladies à vecteur mérite aussi d'être cité, car l'extension des zones touchées par le paludisme ou la dengue est redoutée.

⁹Ces prédictions sont à prendre avec prudence, car personne n'avait prévu d'augmentation de mortalité observée lors de la canicule de 2003.

1.3.3.5 Les événements extrêmes, amplificateurs du changement et sources d'impacts importants

Nous reviendrons longuement dans le corps de ce manuscrit sur les événements extrêmes. Ils sont importants car ils jouent un rôle d'amplificateur de changement : même une variation très faible de la moyenne ou de la variance d'une variable aléatoire peut totalement modifier les probabilités des extrêmes. Par exemple, pour une augmentation de température d'environ 3°C sur la France, la probabilité de subir 10 jours consécutifs des températures supérieures à 35°C est multipliée par plus de 20 [Déqué, 2004]. Egalement, une augmentation de 50% de la variance des températures estivales multiplie la probabilité d'une canicule de type 2003 par plus de 150 d'après les travaux de Schär *et al.* [2004].

On peut de plus dire dès maintenant que les événements extrêmes sont l'un des "canaux d'interaction" majeurs entre le climat et les sociétés (p. ex. *Munich-Re* [2004], *Swiss-Re* [2004], *IFRCRCS* [2002]) et que toute variation, même faible, des caractéristiques des événements extrêmes pourrait avoir des conséquences très graves sur certaines régions ou certaines catégories sociales.

1.3.3.6 Les interactions entre impacts, principales sources d'incertitudes sur les impacts

De plus, nous le verrons, tous ces impacts directs interagissent, se compensent ou s'amplifient. Par exemple, l'adaptation des stations de ski au manque de neige pourrait se faire grâce à de la neige artificielle. Mais fabriquer de la neige artificielle consomme énormément d'eau, alors qu'il y a déjà une forte compétition pour l'usage de cette ressource en hiver en montagne (eau potable, agriculture, hydroélectricité...) et que les régimes hydrologiques pourraient varier à cause du réchauffement. Autre exemple, la montée du niveau de la mer pourrait interagir avec une éventuelle augmentation de l'intensité des tempêtes pour créer des marées de tempête bien plus importante qu'aujourd'hui.

1.4 La difficile traduction des impacts en dommages

Il est utile de distinguer les impacts du changement climatique, quelques uns sont cités ci-dessus, et les dommages du changement climatique. En effet, ces derniers représentent la perte en bien-être liée aux impacts, qui dépend de la nature et de l'intensité des impacts, mais aussi de la situation des sociétés au moment où les impacts ont lieu, des capacités d'adaptation, de jugements de valeurs... Aussi, le chapitre suivant s'attachera à définir

précisément le terme de dommage et à expliciter les méthodes d'évaluation disponibles.

Références

- Al-Farouq, et Huq, *Adaptation to Climate Change in the Coastal Resources Sector of Bangladesh : Some Issues and Problems*, pp. 335–342, Springer-Verlag, New-York, NY, USA, 1996.
- Alcamo, J., *IMAGE 2.0, Integrated Modeling of Global Climate Change.*, J. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1994.
- Alcamo, J., R. Leemans, et G. Kreileman, *Global Change Scenarios of the 21st Century. Results from the Image 2.1 Model.*, Pergamon & Elseviers Science, London, United Kingdom, 1998.
- Ambrosi, P., *Amplitude et calendrier des politiques de réduction des émissions face aux risques climatiques : leçons des modèles intégrés*, PhD thesis, EHESS, 2004.
- Besancenot, J., K. Laaidi, et M. Laaidi, Mortalité en France selon le contexte thermique : réalité présente et scénarios pour le xxième siècle, *Actes du colloque Programme 'Gestion et Impacts du Changement Climatique' (GICC) : Séminaire de restitution, MATE et MEDIAS FRANCE (org.), Toulouse (France), 25-26 avril 2002*, 2002.
- Buddemeier, J. K. e. R. A., R.W., *Coral reefs & Global climate change : Potential Contributions of Climate Change to Stresses on Coral Reef Ecosystems*, Pew Center on Global Climate Change, Washington D.C., 2004.
- Chuine, I., P. Yiou, N. Viovy, B. Seguin, V. Daux, et E. Le Roy Ladurie, Grape ripening as a past climate indicator, *Nature*, 432, 2004.
- Cox, P. D., R. Betts, C. Jones, S. Spall, et I. Totterdell, Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model, *Nature*, 408, 184–187, 2000.
- Davis, D., A. Krupnick, et G. Thurston, The ancillary health benefits and costs of GHG mitigation : Scope, scale, and credibility, *Actes du colloque Ancillary benefits and costs of greenhouse gases mitigation, OECD (org.), Washington D.C.*, p. 58, 2000.
- Deneux, M., *L'évaluation de l'ampleur des changements climatiques, de leurs causes et de leur impact prévisible sur la géographie de la France à l'horizon 2025, 2050 et 2100*, Rapport n°3603 (Assemblée Nationale), n°224 (Sénat), Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (Assemblée Nationale, Sénat), 2002.
- Déqué, M., Canicule et simulation numérique (Heat wave and numerical simulation), available on http://medias.dsi.cnrs.fr/imfrex/web/documents/downloads/md_canicule.pdf (IMFLEX Project), 2004.
- Douville, H., F. Chauvin, S. Planton, D. Royer, J.-F. and Salas-Melia, et S. Tyteca, Sensitivity of the hydrological cycle to increasing amounts of greenhouse gases and aerosols, *Climate Dynamics*, 20(1), 45–68, 2002.

- Easterling, D., G. Meehl, C. Parmesan, S. Changnon, T. Karl, et L. Mearns, Climate extremes : observations, modeling and impacts, *Science*, 298, 2068–2074, 2000.
- Fischer, G., S. Mahendra, et H. Van Velthuizen, *Climate change and Agricultural vulnerability*, IIASA, Luxembourg (Austria), 160 pp., 2002.
- Friedlingstein, P., J.-L. Dufresne, P. Cox, et P. Rayner, How positive is the feedback between climate change and the carbon cycle?, *Tellus*, 55B, 692–700, 2003.
- Ganichot, B., Évolution de la date des vendanges dans les côtes-du-rhône méridionales, *C.R. des Vies Rencontres rhodaniennes, Institut Rhodanien, Orange*, pp. 38–41, 2002.
- IFRCRCS, World disaster report 2002, focusing on reducing risk, *International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies*, 2002.
- IPCC, *Climate Change 2001 : The Scientific Basis* [J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. Van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C.A. Johnson], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New-York, NY, USA, 2001a.
- IPCC, *Climate Change 2001 : Impacts, Adaptation and Vulnerability* [McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D., White, K.S. (Eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New-York, NY, USA, 2001b.
- Lin, B., B. Wielicki, L. Chambers, Y. Hu, et K.-M. Xu, The iris hypothesis : a negative or positive cloud feedback?, *Journal of Climate*, 15, 3–7, 2002.
- Lindzen, S., M.-D. Chou, et A. Hou, Does the earth have an adaptive infrared iris?, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 82, 417–432, 2001.
- Martin, E., Modification de la couverture neigeuse, in *Impacts potentiels du changement climatique en France au XXIème siècle, MATE (dir.)*, Paris, pp. 54–57, 2002.
- Munich-Re, Topics. annual review : Natural catastrophes 2003, *Munich Reinsurance Group, Geoscience Research Group, Munich, Germany*, 2004.
- Nicholls, R., F. Hoozemans, et M. Marchand, Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise, *Global Environmental Change*, 9 (Special Issue 'A new assessment of global effects of climate change'), 9, 69–87, 1990.
- Parmesan, C. e. G. Y., A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems, *Nature*, 421, 37–42, 2003.
- Parry, M., *Assessment of potential effects and adaptations for climate change in Europe : The Europe ACACIA project.*, Jackson Environmental Institute, University of East Anglia, Norwich, UK, 2000.
- Root, T., J. Price, K. Hall, S. Schneider, C. Rozenzweig, et A. Pounds, Fingerprints of global warming on wild animals and plants, *Nature*, 421, 57–60, 2003.

- Rosenzweig, C., et W. Solecki, *Climate change and a global city : the potential consequences of climate variability and change*, Metro East Coast, Columbia Earth Institute, New-York (NY), 2001.
- Schär, C., P. Vidale, L. D., C. Frei, C. Häberli, M. Liniger, et C. Appenzeller, The role of increasing temperature variability in european summer heatwaves., *Nature*, 427, 332–336, 2004.
- Schneider, S., *CO2, climate and society : a brief overview*, pp. 9–15, D. Reidel, Boston, MA, USA, 1983.
- Stocker, T. F., R. Knutti, et G. Plattner, The future of the thermohaline circulation - a perspective, in *The Ocean and Rapid Climate Changes : Past, Present, and Future*, D. Seidov et al. (Eds.), *Geophysical Monograph 126*, American Geophysical Union, pp. 277–293, 2001.
- Swiss-Re, Natural catastrophes and man-made disasters in 2003 : many fatalities, comparatively moderate insured losses., *Swiss Reinsurance Company, Zurich, CH*, 2004.
- Thomas, C., et al., Extinction risk from climate change, *Nature*, 427, 145–148, 2004.
- Vörösmarty, C., P. Green, J. Salisbury, et R. Lammers, Global water resources : Vulnerability from climate change and population growth, *Science*, 289, 284–288, 2000.
- WBGU, *Targets for Climate Protection, 1997 : A study for the third Conference of the Parties to the Framework Convention on Climate Change in Kyoto*, WBGU (German Scientific Advisory Council on Global Change), Bremerhaven (Germany), 1997.
- Weller, G., et M. Lange, *Impacts of global change in the Arctic regions*, International arctic science committee, Centre for global change and arctic system research, University of Alaska, Fairbanks (AK), 1999.

Chapitre 2

L'évaluation des dommages : état des lieux et problématique

Sommaire

2.1	Qu'est ce qu'un dommage climatique?	64
2.1.1	Perte de productivité	64
2.1.2	Accélération de l'obsolescence du capital et des infrastructures	65
2.1.3	Altération des aménités liées à l'environnement et au climat .	66
2.1.4	Les coûts indirects	67
2.1.5	Dommages transitoires et dommages permanents	72
2.2	Des évaluations ponctuelles fragiles	73
2.2.1	Les premières évaluations (1991-1995)	73
2.2.2	La génération suivante (1996-2000)	76
2.3	La prise en compte de la dynamique	78
2.3.1	Les modèles agrégés	80
2.3.2	Les modèles dynamiques d'équilibre général calculable	81
2.4	Problématique et Méthodologie	82
	Références	87

Ce chapitre tentera tout d'abord de définir un dommage climatique, en partant de la description des impacts donné au chapitre 1 et en décrivant les canaux via lesquels ces modifications des variables physiques liées au climat vont se transformer en dommages pour les populations. Il présentera ensuite une revue des évaluations de dommages publiées à ce jour, en se concentrant sur les méthodologies retenues.

2.1 Qu'est ce qu'un dommage climatique ?

Définir un dommage climatique n'est pas aussi évident qu'il y paraît. Combien de parisiens seraient heureux d'apprendre que leur climat pourrait ressembler à celui de Barcelone en 2070 ? A moins d'admettre que toute modification du climat d'origine humaine est à proscrire, considérer qu'un tel changement est un dommage demande de comprendre comment il réduira le bien-être des populations (pris au sens large, c'est à dire en tenant compte d'éventuels coûts psychologiques ou éthiques) et en quoi il nécessitera une adaptation dont le coût (économique et humain) peut être important [Ambrosi et Hourcade, 2003].

Pour cela, nous allons décrire les différents canaux par lesquels les impacts du changement climatique vont toucher les sociétés. Trois canaux sont ici proposés :

2.1.1 Perte de productivité

Notre système socio-économique s'est construit en fonction du climat auquel il est soumis depuis toujours. On ne réalise pas facilement à quel point ce qui nous entoure est dépendant du climat : depuis les habitations, leur forme, leur couleur, leur agencement, jusqu'aux réseaux de transport et aux systèmes énergétiques, tout a été bâti dans un climat considéré comme stable, où la variabilité naturelle est bien connue.

Un changement des conditions climatiques usuelles pourrait d'abord provoquer une inadaptation de nos systèmes productifs, et ainsi une baisse de la productivité moyenne de l'économie. Il vient immédiatement à l'esprit la perte de productivité des activités d'extérieur pendant une canicule : il est évident que la canicule de 2003 a réduit la productivité dans la construction, le bâtiment, l'entretien des infrastructures... ainsi que dans les bureaux non-climatisés. Les activités agricoles ont également vu leur productivité réduite par les trop hautes températures et par le régime pluviométrique inhabituel.

Ainsi, le changement climatique pourrait modifier les productivités de nombreux secteurs : secteur agricole, de la construction, des loisirs et du tourisme... Mais l'environnement rend aussi des services indirects auxquels on pense moins naturellement, comme la fourniture d'eau douce, la décom-

position de déchets, le rôle d'habitat pour la faune... Ces "services" pourraient être fortement touchés par un changement du climat, nous obligeant à consacrer des moyens pour faire ce que l'environnement faisait pour nous depuis toujours.

Mais la perte de productivité passe aussi par des détours plus complexes. Pour prendre un exemple extrême, les villages du Nord du Canada, qui vivent de la vente de leur production agricole, sont reliés au reste du pays par des "routes glacées" que les habitants parcourent en moto-neige. Quand les températures ne sont pas assez basses, ces villages sont coupés du reste du monde... Si de lourds investissements ne sont pas réalisés, leurs coûts de transport vont largement augmenter, faisant diminuer la productivité globale de ces villages vis-à-vis de l'extérieur.

Dans un tout autre domaine, les centrales électriques thermiques (au gaz naturel, au pétrole, au charbon ou nucléaire) ont besoin d'une source froide pour fonctionner. Cette source froide doit rester dans une gamme de température définie à la conception de la centrale pour obtenir le rendement maximum. Si, comme pendant la canicule de 2003 en Europe, la température des rivières dépasse la borne supérieure de cette gamme acceptable, le rendement de la centrale peut diminuer dans des proportions importantes, avec des conséquences sur toute l'économie. Ce qu'il est intéressant de noter, c'est que l'on est capable de fabriquer des centrales dont la gamme acceptable est bien plus haute que celle des centrales européennes actuelles (par exemple lorsqu'on construit des centrales dans les pays tropicaux). Il ne s'agit donc pas d'un problème technique au sens strict : le seul problème vient du fait que les centrales ont été conçues pour fonctionner dans une gamme de température qui ne sera plus adaptée dans quelques décennies. Leur productivité sera donc réduite, jusqu'à ce que leur système de refroidissement soit réadapté aux nouvelles conditions climatiques. On voit ici que cette perte de productivité va forcer au remplacement d'une partie du capital, ce qui nous amène au point suivant, l'accélération de l'obsolescence du capital.

2.1.2 Accélération de l'obsolescence du capital et des infrastructures

Dans les secteurs où la productivité deviendra si basse que le capital installé devra être remplacé par du capital plus récent (p.ex. les systèmes de refroidissement des centrales thermiques), le coût du changement climatique prendra la forme d'une mauvaise allocation du capital : on aura investi dans des usines ou des infrastructures dont la productivité et la durée de vie seront réduites par les nouvelles conditions climatiques. L'investissement initial aura donc été moins rentable que prévu. Certains mettent toutefois en avant les gains de productivité qui seront liés à ce remplacement plus rapide :

comme le capital sera en moyenne plus récent, il profitera de technologies plus efficaces, sa productivité sera donc supérieure, atténuant les coûts de remplacement. Ce dernier effet est cependant discutable, d'abord car il est de second ordre comparé au coût direct de remplacement du capital, et ensuite parce que consacrer d'importantes ressources à des travaux de réparation pourrait ralentir le rythme du progrès technique.

A cet effet direct s'ajoute un effet d'éviction : parce que certains secteurs demanderont des investissements massifs, d'autres secteurs se verront privés d'investissement (par l'intermédiaire d'une hausse des taux d'intérêt de long-terme ou par éviction investissement public/investissement privé). Pour prendre un exemple, il semble probable que si l'Etat doit prendre à sa charge des investissements massifs dans les infrastructures (routes, ports, système énergétique), il le fera au dépend d'autres activités essentielles (éducation, recherche, santé ?) ou par des augmentations des prélèvements qui réduiront les capacités d'investissement des agents privés.

A ces pertes de capital pour cause de productivité insuffisante ou d'éviction de l'investissement, s'ajoutera peut-être une diminution de la durée de vie du capital à cause d'une obsolescence prématurée due à des conditions météorologiques plus difficiles. Par exemple, si les inondations devaient devenir plus fréquentes dans certaines régions, la durée de vie des routes sera réduite. Il faut toutefois nuancer cet effet : par exemple, la diminution des zones de gel pourrait augmenter significativement la durée de vie des routes de montagnes.

2.1.3 Altération des aménités liées à l'environnement et au climat

Notre environnement et notre climat nous fournissent un grand nombre de services "directs", auxquels on peut attribuer une valeur. On distingue en général [NRC, 2004] la valeur d'usage (randonnées en montagne, apéritifs en terrasse, après-midi à la plage..., autant d'activités dans lesquelles le climat et l'environnement jouent un rôle essentiel mais difficile à évaluer monétairement) de la valeur d'existence, que l'on peut attribuer à quelque chose qui n'a pourtant pas d'influence directe sur notre qualité de vie (p. ex. l'existence d'espèces animales comme les baleines).

Lorsqu'on cherche à prendre en compte ces valeurs, on utilise des techniques *d'évaluation contingente* pour révéler une valeur monétaire sous forme d'une "volonté à payer" (*willingness to pay*) ou d'une "volonté à accepter" (*willingness to accept*) via des questions telles que : "combien êtes-vous prêt à payer pour profiter de tel ou tel climat ou pour sauver telle ou telle espèce animale ?" (voir par exemple Hanley et Spash [1993] ou Bateman et Willis [1995]). Une autre méthode, dite "*hédonique*", fait intervenir des comparaisons entre les prix de l'immobilier dans des régions comparables mais où le

climat est différent (p. ex. *Mendelsohn et al.* [2000] ou *Maddison* [2001]). Ces enquêtes font cependant face à de grandes difficultés : tout d'abord, on s'aperçoit vite que les réponses aux enquêtes dépendent largement de la façon dont les questions sont posées (par exemple, les volontés à payer pour sauver deux espèces animales sont différentes si on pose deux questions – une par espèce – ou une seule question pour les deux espèces) (voir par exemple *Hanley et al.* [1997]). Pour les études fondées sur les prix de l'immobilier, il est impossible de séparer le climat des autres facteurs (culture, vie locale, économie, accès aux services publics, attachement personnel...) (voir *Smith* [2000]). Ces études sont également confrontées à la volatilité des préférences et aux cycles médiatiques. Il a été montré [*Scimemi*, 1987] que les préférences présentent des périodes de sous- et de sur-réaction aux crises environnementales. Mais la plus grande difficulté tient à l'horizon temporel qu'il faut considérer pour traiter du changement climatique : pour évaluer les dommages, il faudrait savoir comment vont évoluer les préférences sur le long terme, ce qui est impossible, et tenir compte des questions d'équité intergénérationnelle [*Arrow*, 1995].

Pour contourner ces problèmes, il a été tenté de mesurer le revenu équivalent aux "services environnementaux" (disponibilité de l'eau, faculté d'épuration des milieux, ressources de la mer...). Une telle tâche apparaît cependant impossible, pour ne pas dire dépourvue de sens. En effet, l'évaluation de *Costanza et al.* [1997], qui aboutit à une valeur de 30 000 milliards US\$, a été très justement qualifiée par *Toman* [1998] de "serious underestimate of infinity"¹.

Mais même si l'on disposait d'évaluations crédibles, l'hypothèse sous-jacente consiste à supposer qu'il est toujours possible de substituer ces services environnementaux par leur valeur monétaire. C'est ce qui est qualifié de critère de *soutenabilité faible*. Cela revient à considérer que l'on est prêt à consentir des pertes environnementales si elles sont compensées par une plus grande richesse matérielle. Cette hypothèse justifie l'actualisation des dommages environnementaux et explique en grande partie pourquoi les modèles du type de celui de Nordhaus sacrifient l'environnement au profit d'investissements "classiques" considérés comme plus rentables. Si l'on utilise un critère de *soutenabilité forte* (pas de substitution entre capital naturel et capital produit), alors on ne peut plus actualiser les dommages (sur ce point voir aussi *Solow* [1974]).

2.1.4 Les coûts indirects

Les canaux précédents correspondent aux "entrées" des impacts climatiques dans l'économie. Il s'agit en quelque sorte des dommages de premier ordre. Mais la complexité du système socio-économique fait qu'il est tout à

¹En français : "sérieuse sous-estimation de l'infini".

fait possible qu'une grande partie des dommages viennent d'effets indirects, de propagations sectorielles ou régionales, de l'inertie et de l'incertitude, ou d'une perturbation des anticipations.

2.1.4.1 Propagation sectorielle

Tout d'abord, tous les secteurs économiques dépendent des infrastructures et de certains secteurs de base (énergie, eau, agriculture, matières premières...). Ces secteurs regroupent les activités sans lesquelles le reste de l'économie ne peut fonctionner. Le capital productif de ces secteurs de base a été qualifié par le terme "*overhead capital*"² par *Singer* [1951] ou par le terme "*social overhead capital*"³ par *Rostow* [1951] et *Hirschman* [1958].

Si ces secteurs sont touchés par le changement climatique, les conséquences vont s'étendre à tout le système économique : d'une manière caricaturale, les exemples de black-out électrique (par exemple New-York en 2003) montrent à quel point des coupures de courant perturbent toute l'activité économique. De même, on a vu comment deux années de sécheresse ont perturbé la production hydroélectrique brésilienne, et comment la montée du prix de l'électricité a mené à un reflux massif de l'utilisation de l'électricité par la population brésilienne, provoquant l'apparition de surcapacités de production les années suivantes, et un retour au chauffage par le bois et le charbon avec des conséquences importantes sur la pollution locale et la pression sur l'environnement.

Dans les PVD, il a été montré que l'absence d'infrastructures de base (transport, énergie, communication) fiables est l'un des obstacles majeurs au développement. Le changement climatique, en endommageant ce qui existe déjà et/ou en le rendant inadapté aux nouvelles conditions, pourrait freiner le développement de ces pays.

Dans le domaine agricole, la production "fait vivre" une grande partie de la population des PVD. Une réduction du revenu des paysans aurait donc rapidement des conséquences macro-économiques importantes. Dans les pays développés, même si le nombre d'agriculteurs est faible, la production agricole soutient toute une industrie agro-alimentaire qui serait handicapée par une baisse des rendements. Aussi, ne tenir compte que de la part de l'agriculture dans le PIB des pays riches revient à sous-estimer la vulnérabilité de l'économie à une baisse des rendements agricoles [*Hourcade et Chapuis*, 1995].

²En français : "capital supplémentaire"

³En français : "capital supplémentaire social"

2.1.4.2 Inertie, incertitude et anticipation : une source de dommages

Comme nous le verrons plus loin, même un changement climatique qui n'aurait que des impacts faibles (ou nuls) s'il était précisément prédit un siècle ou plus à l'avance, peut avoir de graves conséquences s'il n'est pas anticipé à cause des incertitudes scientifiques : si nous connaissions dès aujourd'hui les caractéristiques du climat futur, nous pourrions planifier dès maintenant les investissements d'adaptation les plus importants et éviter une grande partie des dommages correspondant aux impacts transitoires définis dans la partie précédente.

Malheureusement, le climat futur est largement incertain et la variabilité naturelle en complique beaucoup la détection précoce ; cette incertitude nous empêche d'investir massivement dès aujourd'hui, de peur d'éventuels "*sunk costs*", c'est-à-dire des coûts d'adaptation dépensés pour rien car réalisés en fonction d'un climat prédit erroné.

2.1.4.3 Effets redistributifs

Les impacts du changement climatique pourraient avoir des effets de court et long terme sur la distribution des revenus et des richesses.

On peut illustrer cet effet avec l'exemple des conséquences des catastrophes naturelles : dans les pays riches, les dégâts touchent principalement le bâti et les infrastructures. Aussi les pertes de court terme sont subies principalement par les ménages les plus aisés, les assurances et l'État, auxquels s'ajoutent toutefois certaines catégories sociales vulnérables (par exemple paysans et pêcheurs). De plus, la reconstruction offre par la suite de nombreux emplois non-qualifiés à des catégories de travailleurs particulièrement frappées par le chômage, jouant là un rôle de relance keynésienne qui peut être profitable (exemple des tempêtes de 1999 en France). On a donc un impact redistributif des catastrophes sur le court terme, même si les conséquences sur le long terme sont beaucoup moins évidentes et dépendent notamment de la réponse de l'investissement.

Dans les pays en voie de développement par contre, l'effet est inversé : comme les pertes sont essentiellement humaines, ce sont les catégories de population les moins éduquées et informées, qui n'habitent pas des logements en dur et qui travaillent en extérieur qui sont les plus durement touchées. Au niveau économique, l'agriculture et la pêche font vivre la majorité la plus pauvre de la population dans un grand nombre de ces pays, et ce sont là deux activités particulièrement vulnérables aux extrêmes climatiques, qui peuvent interrompre l'activité pendant de longues périodes ou faire perdre la production de plusieurs années.

Les extrêmes touchent donc durement les catégories les plus pauvres

dans les pays en voie de développement, jouant un rôle anti-redistributif, et la déstabilisation de l'économie et la destruction des infrastructures qu'ils entraînent en fait des obstacles importants au développement. Ainsi, le tsunami de décembre 2004 en Asie va, selon les dernières estimations, demander des activités de reconstruction étalées sur près de 10 ans, et il a jeté 2 millions de personnes sous le seuil de pauvreté.

2.1.4.4 Propagation régionale, migrations, sécurité et conflits

Les crises économiques récentes (par exemple l'Asie en 1997 ou la Russie et le Brésil en 1998) ont montré à quel point les économies sont interdépendantes. Quand les USA voient leur croissance diminuer, leur moindre demande de biens perturbe la croissance mondiale. On n'est d'ailleurs pas capable de savoir dans quelle mesure cet effet passe seulement par des variables réelles ou se propage également par les anticipations et le "moral" des acteurs. Dans ce cadre, il est évident que si un pays était durement touché par le changement climatique, ses voisins et ses principaux partenaires commerciaux seraient également touchés.

Ces effets de propagation passeront par des transformations des flux de capitaux et de biens, mais aussi par des processus socio-politiques que l'on peut classer en deux catégories : les comportements individuels, essentiellement les migrations, et les comportements étatiques.

Les migrations peuvent être motivées par des problèmes économiques ou par des problèmes beaucoup plus fondamentaux : accès à l'eau, confort du climat, recherche de terres fertiles, productivité agricole. Les exemples de migrations pour raison climatique ne manquent pas. On peut les classer en deux catégories : (i) Les migrations qui suivent une catastrophe naturelle ; par exemple les USA ont accueilli un grand nombre de réfugiés suite au cyclone Mitch sur le Honduras [McLeman et Smit, 2003]. (ii) Les migrations suite à de longues périodes de sécheresse, par exemple aux USA dans les années 30, où de nombreux fermiers des grandes plaines ont migré vers la Californie, créant des bidonvilles, des problèmes d'hygiène et de santé, et du chômage de masse ; ou l'Afrique de l'Est (Ethiopie, Soudan) au cours des 30 dernières années. La situation politique de cette région illustre par ailleurs les conflits engendrés par des migrations de masses [McLeman et Smit, 2003].

Ceci suggère qu'un Maghreb désertifié à la fin du XXI^{ème} siècle verrait probablement sa population migrer massivement soit vers une Europe alors vieillie et dépeuplée, soit vers l'Afrique de l'Ouest. La Chine est également une zone dans laquelle la baisse des rendements de certaines régions au profit d'autres pourraient exacerber des tensions déjà existantes. L'Histoire montre qu'il est difficile d'imaginer des mouvements de population aussi rapides sans conflits majeurs.

Les pénuries de ressources naturelles peuvent rapidement engendrer des conflits internationaux. Par exemple, il y a déjà des régions dans lesquelles des tensions politiques fortes existent pour le contrôle de l'eau. A partir des travaux de P.H. Gleick⁴, on peut citer les nombreux conflits des années 1970 pour le contrôle de l'eau au Moyen-Orient et en Afrique de l'Est : par exemple, l'Irak et la Syrie se sont disputé les eaux de l'Euphrate en 1974 et 1975, allant jusqu'à mobiliser leurs armées à leur frontière ; l'Egypte et l'Ethiopie sont en conflit depuis 1978 à propos de la construction de barrages sur le Nil par l'Ethiopie. Ce dernier épisode a même amené Anwar Sadat à affirmer en 1979 : *“L'eau est la seule chose qui pourrait mener l'Egypte à la guerre aujourd'hui”*.

Même si elles restaient constantes en volume, le déplacement rapide des ressources naturelles (eau ou productivité agricole) entraînerait fatalement de nombreux conflits. Ainsi, imaginer qu'un pays comme la Russie soit gagnant à un réchauffement global ne peut se faire qu'en négligeant les conséquences du redéploiement brutal des richesses sur les relations internationales.

2.1.4.5 L'interaction avec les réductions d'émissions

Un impact potentiel particulièrement indirect du changement climatique, mais qui pourrait être très important, passe par les réductions d'émissions. En effet, s'il s'avérait que les dommages sont importants, par exemple à la suite d'une série de catastrophes locales directement attribuables (ou seulement attribuée) au changement climatique ou de la détection de modifications inquiétantes de la circulation thermohaline, une pression forte, sans doute exacerbée par une sur-réaction habituelle dans les crises environnementales [*Scimemi, 1987; Hourcade et Chapuis, 1995*], s'exercerait pour réduire dans des délais très brefs les émissions.

Dans une telle situation, une catastrophe, éventuellement symbolique, mènerait à un sentiment d'urgence et à des mesures politiques draconiennes de réduction des émissions. Ces réductions, dont on craint les coûts quand elles sont étalées sur plusieurs décennies, pourraient avoir à être conduites dans une période plus courte encore, provoquant une crise économique forte.

Un scénario catastrophe étant celui où les sociétés ont à faire face à la fois à des impacts forts et répétés (par exemple des vagues de chaleur) et, parce que cela démontre la nécessité de stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre, à des mesures drastiques de réduction d'émissions, qui interdisent certains types d'adaptation (par exemple la généralisation de la climatisation) et qui handicapent la croissance et engendrent une crise économique.

⁴Disponible en ligne : <http://www.worldwater.org/conflict.htm>

Ceci montre qu'il n'y a pas indépendance entre l'évaluation des impacts et l'évaluation des coûts de réduction d'émissions : des dommages forts *impliquent* des réductions d'émissions rapides, dont les coûts s'ajoutent aux pertes directement dues au climat.

2.1.5 Dommages transitoires et dommages permanents

Les exemples cités jusqu'ici montrent clairement une distinction forte entre deux types d'impacts :

- Les *dommages transitoires*, qui sont les changements liés à un climat en évolution et à la demande correspondante de modification ou de remplacement de certaines infrastructures ou de certaines activités, mais qui à très long terme ne pourront plus être considérés comme des dommages. Par exemple, le réchauffement dans les régions polaires peut être présenté comme un effet positif du changement climatique (notamment pour l'agriculture). Cependant, profiter de ces nouvelles conditions demandera de renouveler les infrastructures (dont les fondations ne supporteront pas la fonte du permafrost) et d'investir dans le capital nécessaire aux nouvelles activités possibles. Même si on suppose que le résultat est positif à très long terme, il est probable qu'à court terme, les pertes dues aux besoins d'investissements et au remplacement des infrastructures l'emporteront largement sur les gains. De même, si dans une région précise, il devient plus adapté d'avoir une production maraîchère au lieu d'une production céréalière, cela va poser des problèmes (remplacement du matériel, variation de la demande de main d'œuvre...). Mais à long-terme, en admettant que tout se passe bien et notamment que les débouchés existent, il n'y a pas de raison de préférer la situation précédente à la nouvelle. Le problème ne vient que de la transition entre deux états.
- Les *dommages permanents*, liés à un climat modifié et stabilisé. Ces impacts restent présents sur le long-terme et représentent une réelle "supériorité" de l'état précédent sur le nouvel état. On peut mentionner par exemple une éventuelle augmentation de l'intensité des cyclones tropicaux. Même si on peut s'adapter à cette augmentation, elle représentera toujours un coût d'adaptation et un risque de dommages quoi que l'on fasse. C'est un dommage permanent.

Cette distinction est fondamentale car la séparation entre les effets de court-terme liés à une mauvaise adaptation et une réelle supériorité d'un climat sur un autre n'a pas été assez rigoureusement faite, ce qui brouille le discours sur l'adaptation et sur le niveau des dommages.

Tous ces points montrent qu'évaluer les dommages est une tâche difficile, risquée, controversée, peut-être impossible. Pourtant, un certain nombre d'auteurs s'y sont essayé. La partie suivante est un bref historique de ces

études.

2.2 Des évaluations ponctuelles fragiles

Les premières évaluations des dommages du changement climatique n'ont été réalisées qu'il y a une quinzaine d'années. C'est donc encore un domaine neuf et largement inconnu. Toutefois, certains progrès ont été accomplis entre la première génération d'études (entre 1991 et 1995) et les études les plus récentes.

Le premier obstacle que l'on doit signaler est l'absence d'un consensus sur une *norme* de mesure des impacts sur les sociétés. En particulier, il est impossible de mettre en rapport de manière non controversée des impacts dans différentes régions du monde, ou des impacts touchant des générations différentes, ou même des impacts de natures différentes touchant les même personnes (perte de confort/perte de productivité par exemple). Cette limitation des études scientifiques sur les dommages apparaît tout à fait indépassable. Les études d'impacts se sont donc d'abord concentrées sur les pertes économiques mesurables, secteur par secteur et région par région. Seuls quelques auteurs ont cherché à rassembler ces études pour construire un tableau d'ensemble des dommages climatiques.

2.2.1 Les premières évaluations (1991-1995)

Les premières évaluations des dommages ont été faites par *Nordhaus* [1991], *Cline* [1992], *Titus* [1992], *Tol* [1995] et *Fankhauser* [1995]. Il s'agit d'études énumératives, c'est à dire qui considèrent une économie statique, qui est le plus souvent l'économie actuelle. Pour simplifier le problème, on néglige donc l'évolution de l'économie et on suppose que les impacts du changement climatique touchent l'économie d'aujourd'hui. En outre, les dommages sont évalués secteur par secteur sans prendre en compte d'éventuelles interactions, par exemple entre l'agriculture et les ressources en eau.

Pour un changement climatique donné, et dans chaque secteur de l'économie (typiquement agriculture, sylviculture, régions côtières, énergie, chauffage, mortalité, ressources en eau et infrastructures), les études d'impacts disponibles sont rassemblées pour obtenir une évaluation de la perte de production de ce secteur (pour les secteurs productifs) ou une évaluation monétaire de la perte de bien-être (pour les secteurs non-productifs). Les pertes de chaque secteur sont ensuite pondérées et sommées pour obtenir une perte totale. Les premières études de ce type ont été menées sur les USA, et leurs résultats secteur par secteur sont résumées dans le Tab. 2.1. Les dommages totaux pour les USA s'étagent entre 1 et 2,5% du PIB américain selon les études.

Type de dommages	Nordhaus +3°C	Titus +4°C	Cline +2,5°C	Fankhauser +2,5°C	Tol +2,5°C
Agriculture	1,1	1,2	17,5	8,4	10,0
Sylviculture	faible	43,6	3,3	0,7	-
Disparition d'espèces	-	-	4,0	8,4	5,0
Zones côtières	12,2	5,7	7,0	9,0	8,5
Electricité	1,1	5,6	11,2	7,9	-
Chauffage non-élec	-	-	-1,3	-	-
Agrément pour l'Homme	-	-	-	-	12,0
Morbidité humaine	-	-	-	-	-
Mortalité humaine	-	9,4	5,8	11,4	37,4
Migration	-	-	0,5	0,6	1,0
Ouragans	-	-	0,8	0,2	0,3
Construction	-	-	-	-	-
Loisirs	-	-	1,7	-	-
Ressources en eau					
Disponibilité	-	11,4	7,0	15,6	-
Pollution	-	32,6	-	-	-
Infrastructures urbaines	-	-	0,1	-	-
Pollution de l'air					
Ozone tropo	-	27,2	3,5	7,3	-
autres	-	2,5	-	-	-
TOTAL					
milliards de US90\$	55,5	139,2	61,1	69,5	74,2
% PIB	1,0	2,5	1,1	1,3	1,5

TAB. 2.1: Evaluation monétaire des impacts pour l'économie américaine au moment du doublement de la concentration de CO₂, montants annuels en milliards de dollars de 1990. On constate que si les estimations finales sont du même ordre de grandeur, il n'y a aucun accord sur les estimations secteur par secteur, démontrant la fragilité de ces études. Source : Nordhaus [1991], Titus [1992], Cline [1992], Fankhauser [1995], Tol [1995], d'après IPCC [2001].

Région	Fankhauser		Tol	
	Md US\$	% PIB	Md US\$	% PIB
Union Européenne	53,6	1,4		
USA	61	1,3		
Autres membres de l'OCDE	55,9	1,4		
OCDE Amérique			74,2	1,5
OCDE Europe			56,5	1,3
OCDE Pacifique			59,0	2,8
TOTAL OCDE	180,5	1,3	189,5	1,6
Europe de l'Est / CEI	18,2	0,7	-7,9	-0,3
Economies planifiés d'Asie	16,7	4,7	18,0	5,2
Afrique			53,5	8,6
Amérique latine			30,3	8,7
Moyen-Orient			31,0	4,3
Total non-OCDE	89,1	1,6	126,2	2,7
TOTAL mondial	269,6	1,4	315,7	1,9

TAB. 2.2: Dommages annuels exprimés en termes monétaires au doublement de la concentration de CO₂. Source : *Fankhauser* [1995], *Tol* [1995], d'après *IPCC* [2001].

Ensuite, les auteurs précédents ont étendu leurs analyses au reste du monde, par des méthodes simples. Par exemple, Nordhaus suppose que la vulnérabilité des régions côtières est fonction de la racine carré du rapport de la surface côtière sur la surface de la région. Les résultats des études de *Tol* [1995] et *Fankhauser* [1995], qui utilisent des méthodes plus fines pour extrapoler aux autres régions du monde, sont reproduites dans la table 2.2.

Ces études restent limitées pour quatre raisons principales :

- Premièrement, les études d'impacts sur lesquelles elles se fondent sont incertaines et incomplètes. En particulier, les vulnérabilités des autres pays que les USA sont extrapolées de manière *ad hoc* à partir de la vulnérabilité américaine.
- Deuxièmement, ces études ne considèrent pas les interactions entre régions (p.ex les échanges de biens et de capitaux) et réalisent une agrégation des résultats sur le globe en ajoutant les gains et les pertes de PIB, ce qui revient à supposer d'illusoire mécanismes de compensations entre gagnants et perdants⁵.
- Troisièmement, ces études sont réalisées dans un cadre d'équilibre partiel, sans interactions entre secteurs. Or, nous avons vu plus haut l'importance de ces interactions.

⁵On trouve que ces compensations seraient du même ordre de grandeur que le montant actuel de l'aide au développement.

- Quatrièmement, ces études sont réalisées dans un cadre statique, à une date fixée, en considérant une augmentation de température fixée et instantanée, alors que l'on a affaire à des problèmes d'adaptation et d'ajustement essentiellement dynamiques. De plus, sur des durées de plusieurs décennies, la question de l'interaction avec le développement et la croissance est fondamentale.

2.2.2 La génération suivante (1996-2000)

Mendelsohn et al. [1997], *Mendelsohn et al.* [2000], *Nordhaus et Boyer* [1999], *Nordhaus et Boyer* [2000] et *Tol* [2002a] ont ensuite proposé des études plus précises, à la fois parce qu'elles profitent des nouvelles études d'impacts disponibles, en particulier sur les PVD, parce qu'elles portent une meilleure attention aux dommages non-marchands et parce qu'elles testent différentes hypothèses sur l'agrégation des gains et des pertes. Elles répondent donc en partie aux deux premières limitations citées dans la section précédentes. Leurs résultats sont reproduits en Tab. 2.3.

2.2.2.1 L'étude de *Nordhaus et Boyer* [2000]

Par exemple, *Nordhaus et Boyer* [1999] et *Nordhaus et Boyer* [2000] utilisent le modèle RICE-99 à 13 régions, et prennent en compte à la fois des dommages précis dans certains secteurs pour lesquels on a suffisamment d'informations (approche *bottom-up*) et des estimations de consentements à payer pour éviter certains impacts quand on ne dispose pas de suffisamment d'informations, par exemple pour les impacts d'une "catastrophe climatique" (approche *top-down*). La difficulté d'évaluation de ces consentements à payer est un obstacle important, on en a déjà parlé, mais cela n'enlève rien au progrès que représente la prise en compte de catégories d'impacts jusque là négligés.

2.2.2.2 L'étude de *Tol* [2002a]

Tol [2002a] s'est attaché tout particulièrement à tenir compte des problèmes d'équité intragénérationnelle, en intégrant dans ses modèles qu'un euro perdu n'a pas le même poids (et les mêmes conséquences sur le bien-être) suivant la richesse de la personne qui perd cet euro.

Pour évaluer l'importance des hypothèses sur l'agrégation, il retient trois méthodes et compare leurs résultats :

1. Une somme simple des totaux régionaux, qui revient à supposer qu'une unité monétaire a la même "valeur" en bien-être dans toutes les régions du monde, c'est-à-dire que la distribution actuelle et projetée du revenu est socialement optimale (poids de Negishi). On fait aussi référence à

	Mendelsohn et al,			Nordhaus et al,	Tol
	+1,5°C (2000)	+2°C (1997)	+2,5°C (2000)	+ 2,5°C	+1°C
Region					
Am, du Nord		-0,3			-3,4 (1,2)
USA			-0,3	0,5	
OCDE Europe		-0,4			-3,7 (2,2)
UE				2,8	
OCDE Pacifique					-1,0 (1,1)
Japon			0,1	0,5	
Europe de l'Est/CEI					-2,0 (3,8)
Europe de l'Est				0,7	
Russie		-1,1	-11,1	-0,7	
Moyen-Orient				2,0	-1,1 (2,2)
Amérique Latine		1,3			0,1 (0,6)
Brésil			1,4		
Asie du Sud/Sud-Est		0,8			1,7 (1,1)
Inde			2,0	4,9	
Chine		-0,4	-1,8	0,2	-2,1 (5,0)
Afrique		4,7		3,9	4,1 (2,2)
Pays développés	-0,12	-0,1	0,03		
PVD	-0,05	0,8	-0,17		
Total mondial					
Pond, PIB	-0,09	0,3	-0,1	1,7	-2,3 (1,0)
Pond, Pop				2,2	
Prix moyen mond,					2,7 (0,8)
Pond Equité					-0,2 (1,3)

TAB. 2.3: Estimation régionalisée des dommages du changement climatique (les dommages en positif, les effets positifs en négatif ; les nombres entre parenthèses sont les écarts-type dans l'étude de Tol). Source : *Mendelsohn et al.* [1997], *Mendelsohn et al.* [2000], *Nordhaus et Boyer* [1999] et *Tol* [2002a], d'après *IPCC* [2001].

cette méthode d'agrégation sous le nom de "un dollar, un vote", car elle donne un poids plus important aux plus riches. C'est également la méthode employée par Nordhaus.

2. Une somme des valorisations régionales calculées à partir des prix moyens mondiaux. Par exemple, la valeur d'une production perdue est calculée en multipliant la quantité perdue par le prix moyen mondial.
3. Agrégation des utilités pondérées par la population. Cette méthode d'agrégation est souvent appelée "un homme, un vote" ou démocratie universelle.

A cause de la grande hétérogénéité des dommages région par région, l'évaluation des dommages globaux de Tol change de signe selon la méthode d'agrégation retenue. Au-delà des doutes sur la qualité de l'évaluation dans chaque secteur et chaque région, ce résultat suggère avant tout que le concept de dommage global est inadapté et que les dommages du changement climatique doivent être appréhendés régionalement.

2.2.2.3 L'étude de *Mendelsohn et al.* [2000]

Mendelsohn a cherché à dépasser une autre des limitations des études de première génération. Ces évaluations de dommages ont en effet été réalisées pour une augmentation de température globale donnée. Mendelsohn et son équipe (dans *Mendelsohn et al.* [1997] et *Mendelsohn et al.* [2000]) cherchent à déterminer directement la dépendance des dommages régionaux à l'augmentation de température régionale. De plus, ils ajoutent dans la fonction une dépendance à la variation de précipitation.

En outre, ils utilisent des analogues spatiaux pour prendre en compte l'adaptation de l'agriculture aux nouvelles conditions climatiques : dans une région homogène, on utilise les différents climats existants pour évaluer les productions agricoles atteignables grâce à des mesures d'adaptation.

Ils réalisent leur étude sur 6 secteurs (agriculture, sylviculture, zones côtières, ressources en eau, tourisme, énergie), mais ils se concentrent sur les USA et extrapolent sur le reste du monde par des fonctions simples.

2.3 La prise en compte de la dynamique

Toutes les études précédentes ont en commun une limite fondamentale : elles ne considèrent qu'une économie statique, soumise à une concentration de CO₂ constante et connue de manière certaine. Les études de Mendelsohn n'améliorent cette approche que de manière marginale. De plus, les dommages sont considérés comme des perturbations d'un scénario de référence : le changement climatique est supposé ne pas modifier le sentier de croissance

de manière importante. On dispose donc d'informations de court terme, pour des changements climatiques restant modérés.

Or, le changement climatique est un problème dynamique, en interaction forte avec les questions de développement. Il paraît donc indispensable d'effectuer l'évaluation dans plusieurs scénarios socio-économiques, pour prendre en compte l'évolution de la vulnérabilité avec le développement économique et l'augmentation de la population. Par exemple, l'urbanisation croissante des zones côtières rend les pays plus vulnérables à la montée du niveau des mers, comme cela est déjà observé [Munich-Re, 2004]. A contrario, les risques sanitaires (p.ex. paludisme) sont largement réduits par le développement économique [Tol et Dowlatabadi, 2002].

De plus, les études précédentes se donnent une concentration de CO₂, qui ne dépasse jamais le niveau du doublement de la concentration pré-industrielle de CO₂ (560ppmv), alors que la concentration en 2100 pourrait dépasser 900ppmv. Or, les questions de réduction des émissions demandent avant tout de connaître la dépendance des dommages à la concentration. Il a été montré que cette dépendance est beaucoup plus importante pour la décision que le montant absolu des dommages pour une concentration [Ambrosi, 2004]. Et on sait également que la vitesse de changement du climat est un paramètre clef, mais négligé par ces études.

Il est donc nécessaire de réaliser des analyses en dynamique, pour établir la dépendance des dommages au scénario socio-économique et à la concentration de CO₂. Dans de telles études, les modèles utilisés sont trop simples et agrégés pour réellement évaluer les dommages. Donc, la prise en compte des dommages se fait par des *fonctions de dommages*, qui relient de manière plus ou moins *ad hoc* l'augmentation de température aux dommages, et qui sont calibrées sur les études énumératives de dommages économiques. Ces études en dynamique ne cherchent donc pas à évaluer les dommages de manière détaillée, mais plutôt à tirer les conséquences des évaluations ponctuelles, en tenant compte de la dynamique.

Les fonctions de dommages sont de la forme $D(\Delta T)$, où D est le dommage économique découlant d'un réchauffement ΔT . On ne dispose que d'un seul point pour calibrer ces fonctions de dommages : le réchauffement utilisé par l'évaluation de dommage énumérative. La dépendance à la température est ensuite ajoutée, en général via une fonction polynomiale du type $D(\Delta T) = \alpha(\Delta T)^\beta$. Dans ce cas, β est choisie de manière *ad hoc*, et α calibré sur l'évaluation de dommages énumérative. Les faiblesses de telles fonctions sont discutées en détail par Peck et Teisberg [1994], Tol [1996] et Ambrosi [2004], et tiennent au caractère *ad hoc* de la forme des fonctions, alors que c'est le paramètre clé dans l'évaluation des politiques optimales.

2.3.1 Les modèles agrégés

Un certain nombre d'études ont donc été menées avec des modèles très agrégés, parmi lesquelles on peut citer :

- Nordhaus [1994] avec son modèle DICE, évolution d'un modèle de croissance à la Solow [1956].
- Nordhaus et Boyer [1999] avec le modèle RICE, qui est une extension à plusieurs régions du modèle DICE, sans échange de biens ou de capital entre les régions.
- Manne et Richels [1995] et le modèle MERGE.
- Tol [2002a] et Tol [2002b] et son modèle d'évaluation intégrée FUND.
- Mendelsohn et Neumann [1999] et le modèle GIM.

Mais ces études n'ont pas pris le parti de regarder particulièrement les interactions avec la croissance. Elles se concentrent principalement sur la répartition temporelle des dommages, ce qui permet de calculer leur coût actualisé, et de le comparer au coût de réduction des émissions. Ces modèles proposent par là des trajectoires optimales de réduction des émissions, via une analyse coût-bénéfice qui compare le coût de réductions d'émissions au montant des dommages évités.

Pour aller plus loin sur l'interaction avec la croissance, Fankhauser et Tol [2005] ont réalisé une étude visant à prendre explicitement en compte la dynamique économique dans l'évaluation des dommages du changement climatique. Ils utilisent pour cela des modèles de croissance simples (type Solow-Swan ou Ramsey) et une fonction de dommage, et recherchent comment les dommages dépendent des hypothèses que l'on retient sur les déterminants de la croissance. Ils identifient en particulier quatre types d'impacts sur la dynamique économique : (1) les impacts hors-marché, c'est-à-dire les impacts directs sur le bien-être ; (2) les impacts de marché, sur la productivité ou la production ; (3) les impacts sur la santé et la mortalité ; (4) les impacts sur la longévité du capital. Ces quatre impacts ont des effets sur le ratio capital-travail, et donc sur la croissance.

Les auteurs insistent surtout sur les effets sur l'épargne et l'investissement⁶. Ils notent que les impacts hors-marché n'ont pas de conséquences sur l'épargne, mais que les trois autres types d'impacts mènent à une diminution de l'épargne, et donc à une réduction de la croissance qui multiplie par deux les pertes de PIB par rapport aux seuls impacts directs.

Suivant une approche complémentaire, Haurie et Moresino [2004] s'intéressent aux "catastrophes climatiques" (cf section 1.1.7), en introduisant explicitement un événement de faible probabilité mais dont les coûts seraient importants. Le calcul des dépenses de réductions d'émissions qu'on est prêt à consentir à cause de l'existence d'un tel événement pose alors des

⁶L'épargne et l'investissement sont toujours égaux dans les modèles utilisés.

problèmes d'équité inter-générationnelle importants, notamment à cause de l'horizon temporel qu'il faut considérer. Pour préserver l'intérêt des générations futures tout en tenant compte de la préférence pour le présent, *Haurie et Moresino* [2004], dans des travaux en cours, proposent l'utilisation de la théorie des jeux, en supposant que chaque génération a une fonction d'utilité qui tient compte du bien-être des générations futures.

Il est utile de noter que tous ces travaux sont fondés sur des modèles de croissance dérivés du modèle du Solow, qui est un modèle de long terme très simple, qui représente une économie à un seul secteur à l'équilibre sur des périodes longues.

2.3.2 Les évaluations fondées sur les modèles dynamiques d'équilibre général calculable

Très récemment, des études fondées sur des modèles dynamiques d'équilibre général calculable ont été lancées. Elles visent à étendre les travaux précédents à plusieurs secteurs en équilibre et à faire le lien entre les études ponctuelles détaillées et les études en dynamique. Elles ont deux objectifs principaux :

1. Etudier comment les impacts venant d'un secteur particulier (montée du niveau de la mer, impacts sur la santé, coûts des événements extrêmes...) se propagent dans le système économique international.
2. Prendre en compte un vrai scénario de contrôle, incluant la croissance de la population et la croissance économique.

A l'exception de *Fischer et al.* [2002], les résultats de telles études ne sont pas encore publiés, mais on trouve des working papers comme *Bosello et al.* [2004b], *Bosello et al.* [2004a] ou *Berritella et al.* [2004], ainsi que les travaux de Aaheim sur l'impact sur la sylviculture. Elles permettent une avancée significative en considérant une économie réaliste et en prenant en compte les questions de propagation sectorielle.

Au delà du fait que de nombreux secteurs sont toujours manquant, comme le mentionnent par exemple *Smith et Hitz* [2002] dans leur revue de littérature sur les impacts, le point faible principal de ces études est qu'elles se fondent sur des modèles qui ne sont capables de reproduire que des processus de long-terme, suffisamment lents pour que les hypothèses d'équilibre soient valable. Donc, tous les phénomènes de court-terme ou de choc ne peuvent être pris en compte.

2.4 Problématique et Méthodologie

Les points précédents ont montré que nous avons affaire à un problème très particulier, présentant des caractéristiques exceptionnelles : c'est un problème global et toute la planète est concernée ; les inerties mises en jeu rendent indispensable de penser plusieurs générations en avance et d'anticiper les actions et les dommages ; une action réelle de limitation de l'effet de serre met immédiatement en jeu des changements profonds de notre organisation économique et sociale ; les dommages potentiels sont importants mais l'incertitude reste immense.

La comparaison de notre définition d'un dommage climatique avec les processus pris en compte dans les évaluations décrites plus haut montre clairement que celles-ci comportent trop de lacunes pour que leur résultat soit considéré comme fiable. On fait face en particulier à deux groupes de problèmes :

- Dans un système complexe fortement couplé, comme le système climat-environnement-société, les boucles de rétroaction, les couplage multiples, la cascade d'incertitude rendent les analyses de causalité difficiles. A partir d'une simulation de modèle, il est souvent impossible de construire une compréhension des phénomènes sous-jacents et d'expliquer pourquoi le modèle s'est comporté comme on l'observe. Or, la fragilité des modèles fait que l'on ne peut se contenter de leurs résultats numériques : on cherche avant tout à améliorer la compréhension des processus.
- Tous les modèles utilisés sont des modèles de long-terme, qui ignorent les fluctuations de court-terme supposées transitoires, et qui se fondent donc sur des hypothèses d'équilibre : les marchés sont supposés parfaits et il n'y a ni chômage ni sous-utilisation du capital ; les investissements sont décidés et exécutés de manière optimale ; il y a substitution entre les facteurs et les secteurs économiques ; la croissance économique se fait de manière continue et régulière. Dans un tel cadre, les effets de chocs (événements extrêmes), de court-terme (variabilité naturelle et franchissement de seuil), de déséquilibre (choc de ressources), d'inadaptation temporaire sont mal pris en compte et l'impact du changement climatique sur l'économie est souvent modélisé seulement sous la forme de diminutions régulières et continues de productivités sectorielles.

On se trouve donc dans une situation où les modèles ne nous permettent pas d'améliorer notre compréhension, car leur interprétation est difficile, et où leurs résultats ne sont pas fiables, car d'importants processus sont manquants et que leur validation pose problème.

Il faut donc changer d'approche, se définir une problématique précise et l'accompagner d'une méthodologie mieux adaptée à notre objet d'étude.

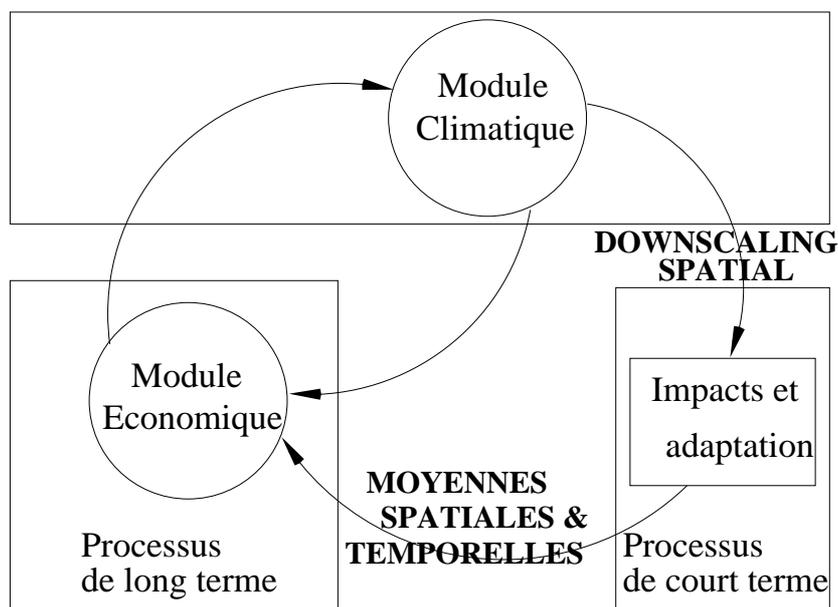


FIG. 2.1: Schéma de principe d'un modèle intégré et des échelles de temps considérée par chaque module.

On s'intéressera donc aux conséquences de l'utilisation de modèles de croissance de long-terme, fondés sur des hypothèses d'équilibre, qui négligent beaucoup des processus d'interaction d'échelles, qu'il s'agisse d'interactions entre décision, incertitude et inertie ou des dynamiques de court-terme. Ils modélisent le plus souvent les impacts du changement climatique comme la diminution régulière d'une productivité moyenne de l'économie, fonction de l'augmentation de température. La figure 2.1 illustre le schéma de principe d'un modèle intégré, où un module économique de long-terme fournit des émissions à un module climatique. Ce module climatique simule l'évolution du climat en réponse aux émissions. Cette évolution du climat sert aux modules d'impacts et d'adaptation qui évaluent les impacts économiques liés au changement climatique et les réponses à ces impacts sous forme d'adaptation. Ces impacts et ces réponses d'adaptation doivent ensuite nourrir le modèle économique de long-terme pour influencer sa trajectoire.

Il est fort probable que les impacts du climat sur l'économie transitent principalement via des processus de petites échelles spatiales, de court terme, et de déséquilibre : événements extrêmes, dépassements de seuils, limite de rentabilité de certaines activités, viabilité d'espèces animales ou de biomes... Aussi, la modélisation des impacts devrait mettre en jeu des modèles à haute résolution spatiale, mais aussi de court-terme et de déséquilibre, dont les pas de temps seraient très courts. De la même façon, l'essentiel des stratégies d'adaptation au changement climatique seront mises en place de manière

locale et ponctuelle, en réponse aux impacts ressentis et en se basant sur des anticipations d'impacts locaux.

Le module climatique est capable de reproduire les processus physiques de long-terme comme de court-terme⁷. En revanche, le modèle économique ne reproduit pas les phénomènes de court-terme, il faut donc transformer les sorties des modèles d'impacts et d'adaptation (à haute résolution temporelle) pour les rendre acceptables par le module économique (dont les entrées sont à faible résolution temporelle). C'est cette *dégradation d'échelle temporelle* qui n'a pas été étudiée avec suffisamment d'attention.

On part donc du diagnostic suivant : *les évaluations de dommages publiées jusqu'ici n'ont pas traité de manière satisfaisante la question des interactions d'échelles, et elles ont négligé l'influence des processus de court terme sur les trajectoires de long terme.*

Pour confirmer cette intuition, et proposer des solutions, nous allons procéder en plusieurs étapes :

1. On s'intéressera d'abord de façon générale aux problèmes d'interaction d'échelles. Pour cela, on procédera en deux temps :

- Afin d'appréhender la problématique des interactions d'échelles et de développer une approche méthodologique et des outils utiles pour la suite, on commencera par s'intéresser aux interactions d'échelles dans la modélisation du climat. Cette discipline est mieux armée que l'économie pour traiter de ces problèmes car elle fait appel à des modèles dont la gamme d'échelles va de quelques minutes (pas de temps de la dynamique d'un modèle de circulation générale) à plusieurs siècles. De tels modèles permettent donc d'étudier directement les interactions d'échelles, et éventuellement de développer des méthodes d'analyse. Une première partie de cette thèse sera donc consacrée à l'analyse de la rétroaction vapeur d'eau et du cycle hydrologique dans une perspective d'analyse des échelles de temps.

- Dans un deuxième temps, une étude des temps longs des interactions économie-climat sera menée, à l'aide d'un modèle de croissance de long terme, comparable à ceux utilisés dans les analyses de dommages, un modèle de Solow. L'objectif est triple :

Premièrement, se donner une idée des horizons temporels qu'il est nécessaire de considérer. Plusieurs auteurs ayant remarqué que l'horizon temporel influençait la politique optimale (voir *Cline* [1992] ou *Hasselmann et al.* [1997]), on pourra comparer cet horizon nécessaire avec l'horizon à 2100 utilisé dans les travaux de l'IPCC.

Ensuite, on cherche à confirmer ou infirmer la méthodologie de l'IPCC (au moins jusqu'au quatrième rapport) qui consiste à se don-

⁷En revanche sa résolution spatiale doit être améliorée via une réduction d'échelle (*downscaling*) pour fournir aux modules d'impacts et d'adaptation les informations dont ils ont besoin.

ner un scénario économique d'émissions, d'en déduire des concentrations et une trajectoire climatique, puis des impacts sur l'économie, sans prendre en compte la boucle de rétroaction créée par ces impacts sur le sentier de croissance et donc les émissions. Une telle méthode n'est valable que si l'intensité de cette boucle est négligeable (*i.e.* peu d'impacts économiques du changement climatique) ou si le temps caractéristique de cette boucle est beaucoup plus grand que l'horizon considéré (*i.e.* si la boucle est trop lente pour être active sur 100 ans).

Enfin, cette première approche de la rétroaction économie-climat servira à mettre en lumière les limites de l'approche classique des impacts du changement climatique. Certaines de ces limites pourront ensuite être étudiées dans les parties suivantes, en regardant plus spécifiquement la question des dommages.

2. On s'intéressera ensuite aux interactions entre le moyen et le long terme en économie, en se basant sur une étude de cas sur l'adaptation des zones urbaines en présence d'incertitude. Cette étude montre clairement comment nos choix *en terme d'adaptation* – et pas seulement en termes de réduction des émissions comme c'est maintenant bien connu – nous engagerons pour des périodes pouvant dépasser le siècle. En effet, l'adaptation au changement climatique est très délicate pour les secteurs dont les investissements ont des durées de vie très longues, car ils doivent anticiper leur adaptation très en avance. Or, les incertitudes concernant les changements futurs rendent ces anticipations peu fiables. Aussi la stratégie de moyen terme suivie face à ces incertitudes est un facteur essentiel de la détermination des impacts à long terme.
3. On regardera pour finir le problème des interactions entre le court et le long terme, en se concentrant sur le cas des événements extrêmes, dont la représentation dans les modèles intégrés est très sommaire. Ces chocs de court terme ont en effet potentiellement des conséquences sur les trajectoires économiques de long terme. En outre, il est tout à fait possible qu'une grande part des dommages du changement climatique passe par les impacts des extrêmes : tempêtes, inondations, vagues de chaleur ou autre... Ces événements, dont les temps caractéristiques s'étalent entre quelques heures et quelques semaines, sont très difficiles à prendre en compte dans des modèles d'équilibre dont les pas de temps sont de l'ordre de l'année. Il est donc particulièrement intéressant d'évaluer si une meilleure prise en compte de ces phénomènes pourrait améliorer de manière sensible l'évaluation des dommages.

Là encore, le travail se fera en deux étapes :

- Une modélisation de ces effets sera proposée, grâce à un modèle économique de déséquilibre, NEDyM⁸, capable à la fois de reproduire

⁸NEDyM signifie Non-Equilibrium Dynamic Model.

la croissance de long-terme, mais aussi de prendre en compte les impacts de court terme des catastrophes. On insistera donc beaucoup sur les interactions entre la dynamique économique de court-terme et la croissance de long-terme.

- Il est fort probable que les conséquences des catastrophes ne dépendent pas seulement de l'intensité de l'événement, mais aussi de la situation macro-économique au moment du choc. Cette interaction, négligée dans la partie précédente, sera au coeur de la suivante. On proposera une nouvelle version de NEDyM, capable de reproduire de façon raisonnable des cycles économiques endogènes. Après une analyse rigoureuse du comportement du modèle, on cherchera à évaluer l'ampleur des interactions entre catastrophes et cycles économiques.

Références

- Ambrosi, P., *Amplitude et calendrier des politiques de réduction des émissions face aux risques climatiques : leçons des modèles intégrés*, PhD thesis, EHESS, 2004.
- Ambrosi, P., et J.-C. Hourcade, *Evaluer les dommages : une tâche impossible ?*, pp. 117–144, Rapport du Conseil d'analyse économique, n° 39, Paris, La Documentation Française, 263 p., 2003.
- Arrow, K., Intergenerational equity and the rate of discount in long-term social investment, *IEA World Congress, December 1995*, 1995.
- Bateman, I., et K. Willis, *Valuing Environmental Preferences : Theory and Practice of the Contingent Valuation Method*, Oxford University Press, Oxford, United Kingdom, 1995.
- Berritella, M., A. Bigano, R. Roson, et R. Tol, A general equilibrium analysis of climate change impacts on tourism, *Working Paper, FNU-49, Hamburg University and Centre for Marine and Atmospheric Science, Hamburg*, 2004.
- Bosello, F., M. Lazzarin, A. Bigano, R. Roson, et R. Tol, Economy-wide estimates of the implications of climate change : Sea level rise, *Working Paper, FNU-38, Hamburg University and Centre for Marine and Atmospheric Science, Hamburg*, 2004a.
- Bosello, F., R. Roson, et R. Tol, Economy-wide estimates of the implications of climate change : Human health, *Working Paper, FNU-57, Hamburg University and Centre for Marine and Atmospheric Science, Hamburg*, 2004b.
- Cline, W., *The Economics of Global Warming*, Institute for International Economics, Washington D.C., 1992.
- Costanza, R., et al., The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature*, 387, 253–260, 1997.
- Fankhauser, S., *Valuing climate change : the economics of greenhouse*, Earthscan, London (UK), 1995.
- Fankhauser, S., et R. Tol, On climate change and economic growth, *Resource and Energy Economics*, 27, 1–17, 2005.
- Fischer, G., S. Mahendra, et H. Van Velthuisen, *Climate change and Agricultural vulnerability*, IIASA, Luxembourg (Austria), 160 pp., 2002.
- Hanley, N., et C. Spash, *Cost-Benefit Analysis and the Environment*, Edward Elgar, Aldershot, The Netherlands, 385 pp., 1993.
- Hanley, N., J. Shogren, et W. B., *Environmental Economics in Theory and Practice*, Oxford University Press, Oxford, United Kingdom, 464 pp., 1997.

- Hasselmann, K., R. Hasselmann, R. Giering, V. Ocana, et H. Von Storch, Sensitivity study of optimal CO₂ emission paths using a simplified structural integrated assessment model (SIAM), *Climatic Change*, 37, 345–386, 1997.
- Haurie, A., et F. Moresino, A stochastic control model of economic growth with environmental disaster prevention, *Working Paper*, 2004.
- Hirschman, A., *The strategy of Economic Development*, Yale University Press., 1958.
- Hourcade, J.-C., et T. Chapuis, No regret potential and technical innovation : a viability approach to integrated assessment of climate policies, *Energy Policy*, 23(4), 433–445, 1995.
- IPCC, *Climate Change 2001 : Impacts, Adaptation and Vulnerability [McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D., White, K.S. (Eds.)]*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New-York, NY, USA, 2001.
- Maddison, D., *The Amenity Value of Climate*, Earthscan, London, U.K., 2001.
- Manne, A., et R. Richels, The greenhouse debate : Economic efficiency, burden sharing and hedging strategies, *Econ. J.*, 16(4), 1–37, 1995.
- McLeman, R., et B. Smit, Changement climatique, migration et sécurité, *Commentaire n°86*, Service Canadien du Renseignement de Sécurité, disponible sur http://www.csis-scrs.gc.ca/fra/comment/com86_f.html, 2003.
- Mendelsohn, R., et J. Neumann, *The Impact of Climate Change on the United States Economy*, Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- Mendelsohn, R., W. Morrison, M. Schlesinger, et N. Andronova, Country-specific market impacts of climate change, *available on* erga.atmos.uiuc.edu/publication/market_impacts/text.html, 1997.
- Mendelsohn, R., W. Morrison, M. Schlesinger, et N. Andronova, Country-specific market impacts of climate change, *Climatic Change*, 45, 553–569, 2000.
- Munich-Re, Topics. annual review : Natural catastrophes 2003, *Munich Reinsurance Group, Geoscience Research Group, Munich, Germany*, 2004.
- Nordhaus, W., To slow or not to slow : The economics of the greenhouse effect, *Econ. J.*, 101, 920–937, 1991.
- Nordhaus, W., *Managing the Global Commons : The Economics of Climate Change*, MIT press, Cambridge, 1994.
- Nordhaus, W., et R. Boyer, *Warming the world : economics models of climate change*, MIT Press, Cambridge (MA, USA), 1999.
- Nordhaus, W., et R. Boyer, *Warming the world : economics models of climate change*, MIT Press, Cambridge (MA, USA), 2000.
- NRC, *Valuing Ecosystem Services : Toward Better Environmental Decision-Making*, National Research Council, Committee on Assessing and Valuing the Services of Aquatic and Related Terrestrial Ecosystems, USA, 313 pp., 2004.

- Peck, S., et T. Teisberg, Optimal carbon emissions trajectories when damages depend on the rate or level of global warming, *Climatic Change*, 28, 289–314, 1994.
- Rostow, W., *World Economy History and Prospect.*, Mac Millan, London., 1951.
- Scimemi, G., *Environmental policies and anticipatory strategies*, Campus, New-York, 1987.
- Singer, H., Development projects as part of national development, *Formulation and Appraisal of Development Projects. As quoted in Joshi, B.M. (1990) opcit.*, 1951.
- Smith, J., et S. Hitz, *Estimating global impacts from climate change : background paper for the OECD/WPGSP project "Benefits of climate policy"*, Stratus Consulting Inc., Boulder (CO), 2002.
- Smith, V., Jeem and non-market valuation, *Journal of Environmental Economics and Management*, 39, 351–374, 2000.
- Solow, R., A contribution to the theory of economic growth, *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65–94, 1956.
- Solow, R., "the economics of resources or the resources of economics, *American Economic Review, American Economic Association*, 64(2), 1–14, 1974.
- Titus, J., The cost of climate change to the united states, in *Global climate change : implications challenges and mitigation measures*, S.K. Majumdar, L.S. Kalkstein, B. Yarnal, E.W. Miller, L.M. Rosenfeld (dir.), *Pennsylvania Academy of Science, Easton (PA)*, 1992.
- Tol, R., The damage costs of climate change : Toward more comprehensive calculations, *Environmental and Resource Economics*, 5, 353–374, 1995.
- Tol, R., The damage costs of climate change towards a dynamic representation, *Ecological Economics*, 19, 67–90, 1996.
- Tol, R., New estimates of the damage costs of climate change, Part I : Benchmark estimates, *Environmental and Resource Economics*, 21(1), 47–73, 2002a.
- Tol, R., New estimates of the damage costs of climate change, Part II : Dynamic estimates, *Environmental and Resource Economics*, 21(2), 135–160, 2002b.
- Tol, R., et H. Dowlatabadi, Vector-borne diseases, development and climate change, *Integrated Environmental Assessment*, 2, 173–181, 2002.
- Toman, M., Research frontiers in the economics of climate change, *Environmental and Resource Economics*, 11(3-4), 603–621, 1998.

Deuxième partie

**Les interactions d'échelles en
climatologie et en économie
de la croissance**

Chapitre 3

La réponse du cycle hydrologique au changement climatique

Sommaire

3.1	Introduction	94
3.2	La réponse du cycle hydrologique	95
3.2.1	Expériences	95
3.2.2	Résultats	97
3.2.3	Discussion des résultats	106
3.3	Le concept de gain de rétroaction et son application au climat	106
3.4	Le modèle de rétroaction vapeur d'eau	108
3.4.1	Description	108
3.4.2	Le Formalisme d'Evolution par Transfert	110
3.4.3	Implémentation du modèle sous TEF	112
3.4.4	Validation du modèle	112
3.5	Méthodologie pour l'analyse de rétroaction	118
3.5.1	Définition de la rétroaction et caractérisation statique	118
3.5.2	Dynamique de la boucle de rétroaction	119
3.6	Application à la rétroaction vapeur d'eau	121
3.6.1	Définition de la rétroaction vapeur d'eau	121
3.6.2	Caractérisation de la rétroaction vapeur d'eau	122
3.6.3	Interprétation du facteur de rétroaction	126
3.6.4	Influence de la rétroaction sur la variabilité	126
3.7	Discussion	129
	Références	130

3.1 Introduction

Les modèles de circulation générale, qui sont les outils principaux utilisés par les climatologues pour prévoir la réponse du climat aux fortes concentrations de GES, représentent explicitement des échelles de temps allant de quelques minutes à des siècles. Dans cette discipline, contrairement à l'économie, il est donc possible d'appréhender la problématique des interactions d'échelles directement au sein d'un unique modèle.

Le problème que l'on se propose de regarder ici, et qui met en jeu d'importantes interactions d'échelles, concerne la réponse du cycle hydrologique à différents types de forçages.

Cette question est fondamentale parce que, comme avec tout modèle, la confiance que l'on peut accorder aux prédictions climatiques dépend directement de leur validation. Or, cette validation ne peut se faire que face à des données paléoclimatiques reconstruites ou face à des mesures directes effectuées depuis 150 ans. On valide donc les modèles grâce à une variabilité passée du climat, qui est largement forcée par des changements du flux solaire (cycle journalier, saisonnier, éruptions volcaniques, cycle de Milankovitch). Mais ce que l'on cherche à prévoir dans le cas du changement climatique, c'est la réponse du modèle à un forçage venant des concentrations de GES, c'est-à-dire à un forçage agissant principalement sur les flux infrarouges. Il n'est pourtant pas évident qu'il soit possible de valider la réponse des modèles à un forçage par les flux infrarouges à partir de leur réponse à un forçage par le flux solaire.

En effet, la réponse de court terme du cycle hydrologique est complètement différente dans le cas d'un forçage par les flux solaires, principalement dans le visible, ou dans le cas d'un forçage par les flux infrarouges. Et le cycle hydrologique est largement contrôlé par la convection, qui met en jeu une gamme très large d'échelles temporelles : de quelques heures pour un événement convectif à une vingtaine de jour pour que l'air parcourt la boucle ascendance–subsidence. On s'intéresse ici aux conséquences des variations du cycle hydrologique sur le long terme (années, décennies). Savoir si la différence de réponse de la convection sur le court terme n'est qu'un transitoire qui disparaît rapidement, ou si elle a des conséquences sur le long terme est donc nécessaire à l'évaluation de la qualité de la validation que l'on peut proposer des modèles.

Pour répondre à ces questions, on s'intéressera à la réponse d'une colonne d'atmosphère à un changement du flux visible et à un changement de concentration des GES menant à une variation du flux infrarouge d'amplitude comparable.

Ensuite, on isolera le rôle du cycle hydrologique sur la réponse du reste du système, en caractérisant ce rôle sous la forme d'une rétroaction précisément

définie et évaluée sur une large gamme d'échelles.

3.2 La réponse du cycle hydrologique

3.2.1 Expériences

3.2.1.1 Le modèle

On utilise ici la version unicolonne de LMDZ, le modèle atmosphérique de l'IPSL [voir par exemple *Doutriaux-Boucher et Quaas*, 2004], mais dans un version où la convection est modélisée par un schéma¹ d'Emanuel [*Emanuel*, 1991, 1993; *Emanuel et Zivkovic-Rothman*, 1999]. On ne considère pas d'advection ni de convergence d'humidité. La colonne considérée se trouve à 30° nord et le flux solaire entrant est constant (pas de cycle journalier ou saisonnier). La colonne est couplée à un *slab ocean*, c'est-à-dire à une Couche de Mélange Océanique (CMO) de 30 m supposée homogène en température. Pour équilibrer la colonne à une température cohérente avec les observations, un flux constant de 63 W m^{-2} est enlevé à la CMO. On suppose donc que la circulation de grande échelle n'est pas modifiée au cours de nos simulations. La concentration de CO_2 initiale est de 330 ppmv.

L'équilibre du modèle est le suivant : la température de surface de l'océan (TSO) est de 300K, la température atmosphérique de surface (TAS) est de 299K, l'évaporation (E) et la précipitation (P) varient entre 3 et 5 mm/jour, avec une moyenne autour de 4 mm/jour. Les couvertures nuageuses basse et moyenne sont à peu près nulles, alors que la couverture de nuages hauts varie entre 80 et 95% : il y a de la convection profonde en permanence.

Le fait que ce modèle soit incomplet, car il manque en particulier la dynamique de grande échelle, ne pose pas problème ici : on ne cherche pas à prévoir une réponse réaliste mais à comparer les réponses différentielles du cycle hydrologique local face à deux forçages différents. Pour une étude exhaustive et régionalisée de la réponse du cycle hydrologique à un forçage par les GES, on pourra se reporter à *Douville et al.* [2002].

3.2.1.2 Expériences

On conduit deux expériences. Dans chacune on perturbe le modèle à partir de son équilibre, le 1er Janvier 2000.

La première expérience, qui sera appelée *GES*, consiste à augmenter instantanément la concentration de CO_2 de 330 ppmv à 660 ppmv. Dans ce cas, il faut environ 100 jours pour que la stratosphère se mette à l'équilibre

¹Ce schéma est toutefois légèrement modifié, car il a été rendu plus indépendant de la discrétisation verticale.

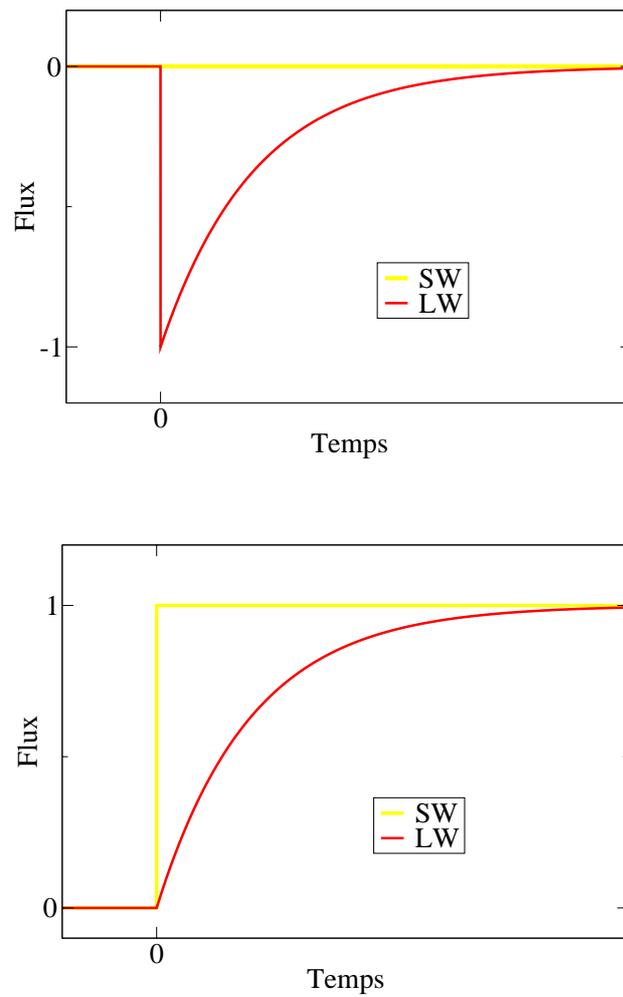


FIG. 3.1: Représentation schématique des deux expériences : *GES* en haut, où le flux LW est perturbé; *SW* en bas, où le flux SW est perturbé. Dans les deux cas, l'aire entre les deux courbes donne la quantité d'énergie supplémentaire stockée par la planète terre suite à la perturbation.

radiatif. A cet instant, alors que le reste de l'atmosphère n'est pas encore à l'équilibre, on peut définir le forçage radiatif additionnel (ΔF_{2X}) comme le déséquilibre entre le flux entrant et le flux sortant, qui vaut dans ce cas 3 W/m^2 . Il faut noter que le CO_2 additionnel réduit aussi le flux visible à la surface de 1.6 W/m^2 , par absorption dans ces fréquences, ce qui s'oppose au chauffage de l'océan par le flux infrarouge, sensible et latent.

La seconde expérience, qui sera appelée *SW*, consiste à augmenter instantanément le flux solaire incident de ΔF_{SW} . ΔF_{SW} est choisi tel que, après la perturbation et la mise à l'équilibre de la stratosphère (qui se fait en quelques jours), le changement de flux au sommet de l'atmosphère soit le même que dans l'expérience *GES*. En d'autres termes, on construit l'expérience *SW* d'une façon telle qu'elle mène au même changement de bilan radiatif au sommet de l'atmosphère, mais par une perturbation du flux visible plutôt que par un changement des concentrations de GES.

La figure 3.1 montre schématiquement le principe de ces expériences : dans un cas, expérience *GES*, on perturbe de manière permanente le flux LW et on regarde comment il répond pour ramener le bilan radiatif à l'équilibre ; dans l'autre cas, expérience *SW*, on perturbe le flux solaire entrant dans le short-wave (SW) et on regarde comment le flux long-wave (LW) ramène le bilan radiatif à l'équilibre. Dans chaque cas, l'aire entre les deux courbes donne la quantité d'énergie supplémentaire stockée par la planète terre suite à la perturbation.

La figure 3.2 montre le flux total au sommet de l'atmosphère depuis 3 mois avant la perturbation, jusqu'à 7 mois après. On constate que les perturbations totales sont très proches durant les premiers mois.

3.2.2 Résultats

3.2.2.1 Nouvel équilibre

Comme on peut le voir dans la figure 3.3, il y a toujours une différence d'environ $0,1 \text{ K}$, 20 ans après que la perturbation a eu lieu. L'équilibre final n'est donc pas le même dans chacun des cas. Ceci est cohérent avec *Hansen et al.* [1997] et *Joshi et al.* [2003] qui trouvent une sensibilité climatique inférieure de 20% dans le cas d'un forçage du flux solaire par rapport à un forçage équivalent par le CO_2 .

3.2.2.2 Transitoires

La figure 3.4 montre les précipitations convectives et l'évaporation de 3 mois avant la perturbation à 3 ans après. Elle montre que les réponses du cycle hydrologique sont très différentes :

- En réponse à la perturbation *SW*, on voit que l'évaporation augmente,

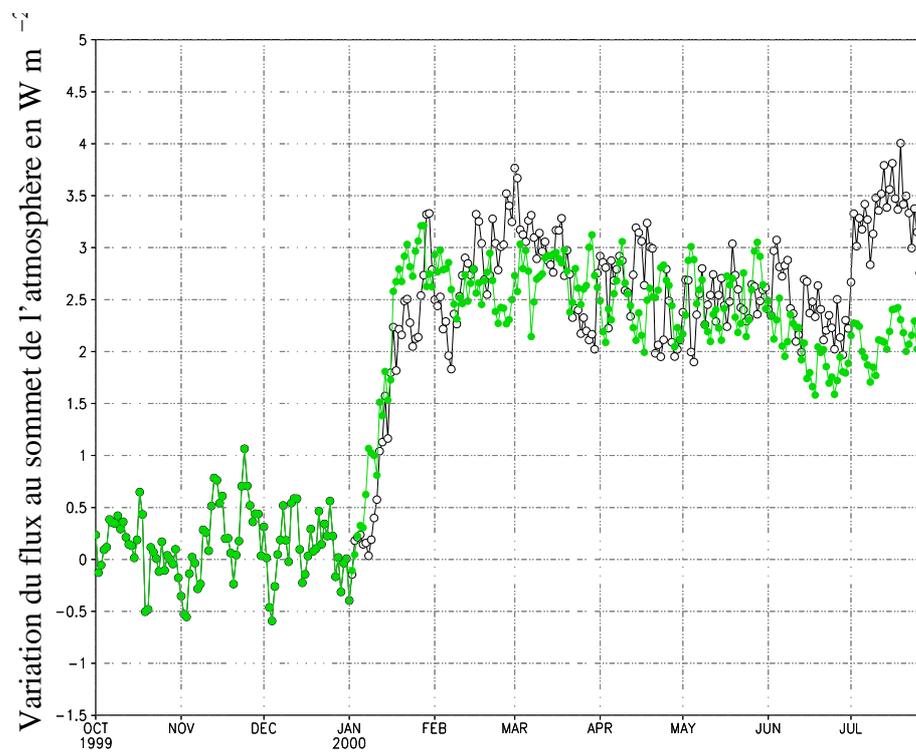
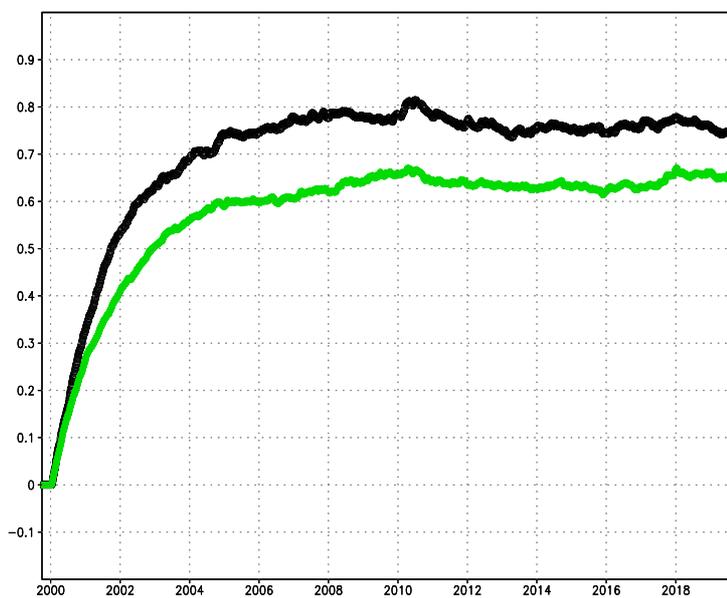


FIG. 3.2: Changement du flux au sommet de l'atmosphère sur 9 mois dans les expériences *GES* en noir et *SW* en vert.

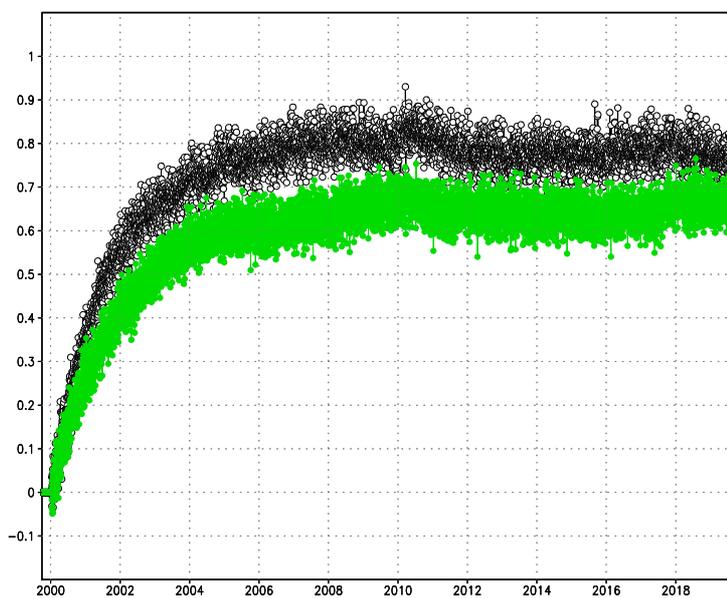
TSO



TAS

GRADS: COLA/IGES

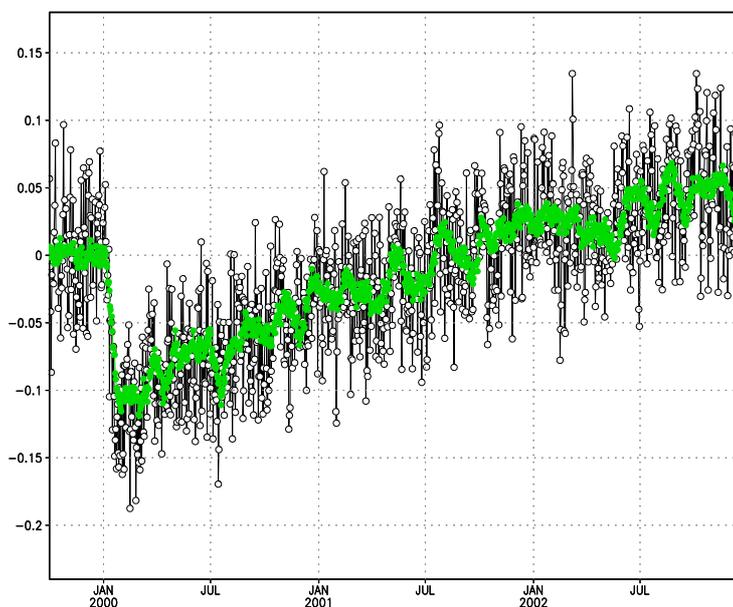
2004-08-25-15:05



GRADS: COLA/IGES

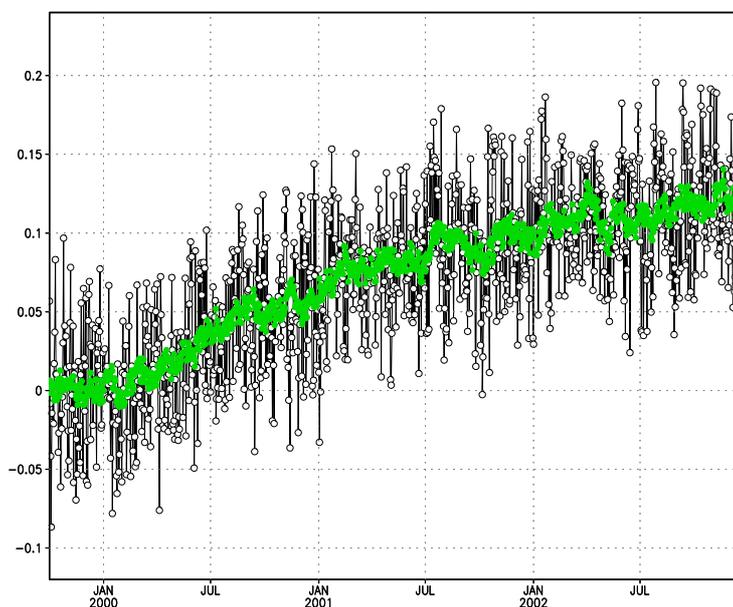
2004-08-25-15:06

FIG. 3.3: Changement de la Température de Surface de l'Océan (TSO, en haut) et de la Température de l'Atmosphère à la Surface (TAS, en bas) sur 20 ans dans les expériences *GES* en noir et *SW* en vert. Les variations de température sont en K.

GES*SW*

GrADS: COLA/IGES

2004-08-04-14:14



GrADS: COLA/IGES

2004-08-04-14:12

FIG. 3.4: Changement des précipitations convectives (noir) et de l'évaporation (vert), en mm par jour, sur 3 ans dans les expériences *GES* à gauche et *SW* à droite.

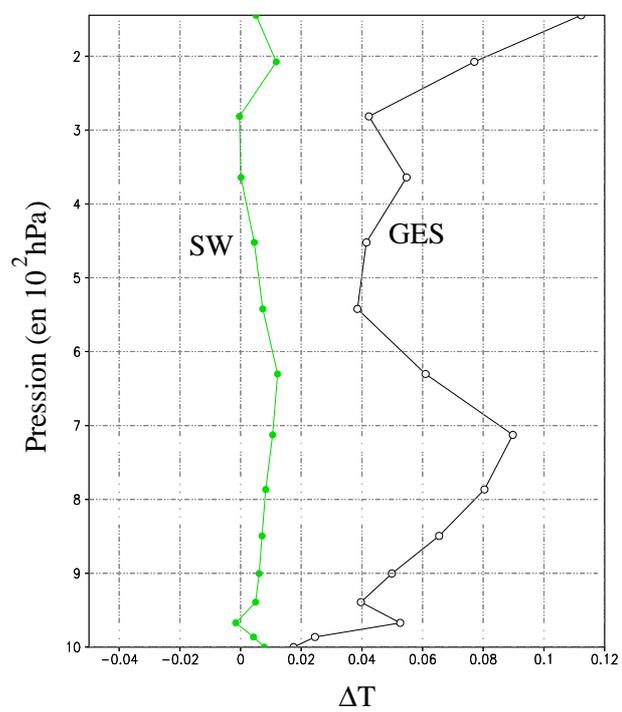


FIG. 3.5: Modification du profil de température moyen, sur le mois suivant la perturbation dans les expériences *GES* et *SW* à droite.

à cause de l'augmentation de la TSO. Comme l'océan a une inertie importante, cette réponse est toutefois lente et régulière. Cette augmentation régulière des flux de surface (flux latent par l'évaporation et flux sensible et radiatif), mène également à une augmentation de la convection et des précipitations associées. On note cependant que l'augmentation des précipitations est légèrement inférieure à l'augmentation de l'évaporation : l'humidité absolue est ainsi augmentée d'une façon telle que l'humidité relative est maintenue². Ceci provoque par ailleurs une modification du flux radiatif qui va amplifier le réchauffement.

- En réponse à la perturbation *GES*, la température troposphérique change rapidement. Si l'humidité absolue était conservée, cela mènerait à une diminution brutale de l'humidité relative. Mais le changement du profil de température augmente la stabilité de l'atmosphère et réduit les flux latents de surface et les précipitations convectives. La figure 3.5 montre la variation du profil de température dans le mois suivant la perturbation : on voit clairement que, dans le cas *GES*, le réchauffement vers 700 hPa va stabiliser l'atmosphère, expliquant la diminution quasi-instantanée de 3% des précipitations convectives (cf. figure 3.4). Cette réponse du court terme est également obtenue par *Yang et al.* [2003] (voir leur figure 1, reproduite ici en Fig. 3.6). Sur des échelles de temps plus longues, l'augmentation lente de la TSO intensifie les flux de surface et intensifie l'évaporation et les précipitations, jusqu'à les faire excéder leurs valeurs initiales.

Dans le cas *GES*, les précipitations et l'évaporation restent inférieures à leurs valeurs initiales pendant 2 ans après la perturbation. Comme la baisse de précipitation est légèrement supérieure à celle de l'évaporation, l'humidité absolue augmente d'une façon telle que l'humidité relative est maintenue³.

Un effet additionnel du changement du cycle hydrologique est une diminution du chauffage de l'atmosphère par condensation, principalement dans la haute troposphère (entre 400 et 100 hPa), et un chauffage supplémentaire de l'océan à cause de la réduction de l'évaporation. Ceci constitue un transfert de chaleur de l'atmosphère vers l'océan correspondant à la chaleur latente de vaporisation d'environ $0.1 \text{ mm/m}^2/\text{jour}$, c'est-à-dire environ 3 W/m^2 . Du point de vue de l'atmosphère, ceci est une rétroaction négative de court-terme : quand la température troposphérique est augmentée par un forçage externe (ex. par une concentration plus importante de GES), le cycle hydrologique est modifié d'une façon telle que de la chaleur est enlevée de la

²L'anomalie de profil moyen d'humidité relative reste inférieure à 0,5 % sur toute la colonne, en moyenne sur le mois suivant la perturbation.

³Ici encore, l'anomalie de profil moyen d'humidité relative reste inférieure à 0,5 % sur toute la colonne, en moyenne sur le mois suivant la perturbation.

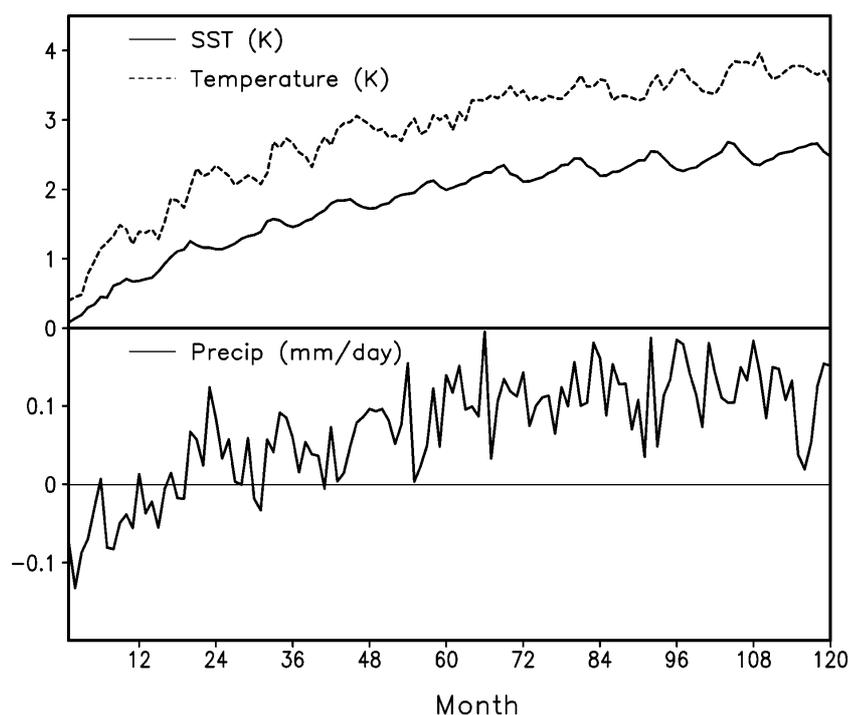


FIG. 1. Changes in global monthly mean SST, tropospheric temperature, and precipitation during the first 10 yr of a coupled ocean-atmosphere CO_2 doubling experiment. For each variable, the change was defined as the departure from the 10-yr average of monthly global means of the control ($1 \times \text{CO}_2$) experiment. Both experiments were performed using the UIUC 11-layer GCM coupled to a mixed layer ocean model. Global mean SST was computed using data over open ocean points. The method described in Table 1 was used to calculate the tropospheric temperature.

FIG. 3.6: Extrait de Yang et al. (2003).

troposphère et transférée à l'océan, atténuant ainsi le réchauffement de la troposphère, et réduisant la perturbation initiale.

Cet effet peut être clairement démontré par une simulation dans laquelle on double la concentration de CO_2 en maintenant la TSO fixée (simulation *GES/FixTSO*). Dans ce cas, l'augmentation de température troposphérique est inférieure à 0,05K, montrant qu'une modification de la TSO est nécessaire à un changement de la température atmosphérique (voir aussi Mitchell (1985), Yang et al. (2003)). Ceci s'explique partiellement par la figure 3.7 qui montre que dans ce cas les précipitations et l'évaporation sont réduits de 0,12 mm/jour après la perturbation. Ce changement du cycle hydrologique représente un flux négatif pour l'atmosphère de 3 W/m^2 , qui vaut plus de 50% du flux supplémentaire dont est responsable le CO_2 additionnel. La part restante du flux supplémentaire passe par les flux sensible et radiatif. Revenant à la simulation *GES*, si on considère maintenant des échelles de temps plus longues, on constate que, suite à la modification du cycle hydrologique qui est une rétroaction négative sur le court terme, l'humidité absolue augmente de 6% environ. Ceci génère un effet de serre additionnel et donc une rétroaction positive sur le long terme.

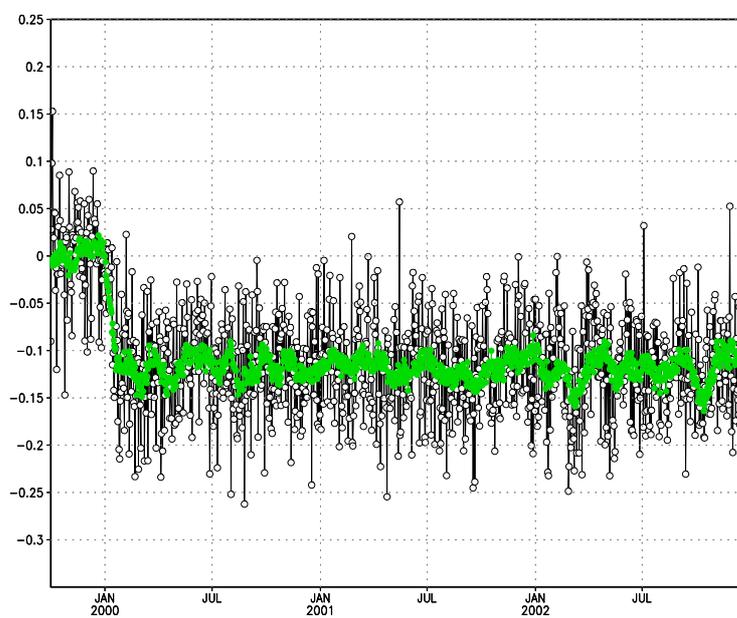
Ces deux effets du changement du cycle hydrologique (modification du flux latent à la surface et effet de serre additionnel lié à la vapeur d'eau) constituent la rétroaction du cycle hydrologique, qui est du point de vue de l'atmosphère, négative sur le court terme et positive sur le long terme.

Ces réponses sont cohérentes avec les études précédentes :

- Allen and Ingram (2002), qui en propose une analyse qui va dans le même sens que les résultats présentés ici.
- Yang et al. (2003), qui utilisent un modèle de circulation générale et des expériences à $\pm 1 \text{ K}$ de TSO en guise d'approximation d'un changement de flux solaire (expériences dites de Cess) et les comparent aux résultats de changements de concentration de CO_2 .
- Manabe et Wetherald [1975], qui ont comparé le cycle hydrologique dans une simulation de contrôle et dans une simulation à concentration de CO_2 doublée, mais qui ne se sont intéressés qu'aux états d'équilibre, pas aux transitoires.
- Hansen et al. [1997] et Joshi et al. [2003], qui ont comparé les réponses au CO_2 et au flux solaire, mais sans se concentrer sur le cycle hydrologique.

Ces simulations montrent que la réponse hydrologique à une augmentation de la concentration de CO_2 est, sur le court-terme, une diminution des précipitations et de l'évaporation, telle que l'humidité relative est maintenue.

De plus, on constate que la réponse à une variation de l'évaporation, tout le reste restant égal par ailleurs, est une variation équivalente des précipita-



GrADS: COLA/IGES

2004-08-25-17:31

FIG. 3.7: Changement des précipitations convective (noir) et de l'évaporation (vert) dans la simulation *GES/FixTSO*, en mm par jour.

tions convectives.

3.2.3 Discussion des résultats

On a montré ici que la réponse du cycle hydrologique était radicalement différente sur le court terme entre un forçage par les GES et un forçage par le flux solaire, même si on n'explique pas la différence de sensibilité de l'état final.

On montre en particulier que la réponse de court terme du cycle hydrologique est responsable dans cas d'un forçage GES d'une rétroaction négative, suivie d'une rétroaction positive, alors que seule la partie positive est apparente dans le cas d'un forçage par le flux solaire.

Il est cependant surprenant de voir que, comme le réchauffement de l'atmosphère par les GES est quasi-intégralement transféré à l'océan, les réponses de long-terme sont finalement très proches malgré les différences de court terme.

Ceci pousse à modéliser explicitement la rétroaction vapeur d'eau dans le cas du forçage par les GES, afin de mieux comprendre comment la réponse de court terme influence le long terme. Pour cela, on commence par définir le concept de rétroaction, et par passer en revue les application de ce concept à la modélisation du climat. Ensuite, on utilisera ce formalisme pour représenter et caractériser la réponse du cycle hydrologique à un forçage par les GES.

3.3 Le concept de gain de rétroaction et son application au climat

Le concept de gain de rétroaction a été introduit par *Bode* [1945] pour caractériser la réponse de circuits électriques linéaires à un signal d'entrée. Ce concept est aujourd'hui utilisé pour caractériser la réponse de processus climatiques, bien que ces derniers ne soient pas linéaires. L'hypothèse implicite sur laquelle ceci repose, ainsi que le suggèrent *Goodman et Marshall* [2003], est que les processus les plus inertes du système climatique répondent linéairement aux changements de forçage, une fois que les transitoires non-linéaires ont disparu.

Le concept de gain de rétroaction, appliqué aux modèles de circulation générale, a été utile pour construire des interprétations du comportement du climat. *Hansen et al.* [1984], parmi d'autres, a analysé le système climatique par la mise en évidence de quelques rétroactions principales. Il utilise pour cela la caractérisation d'une rétroaction telle que l'a proposée *Bode* [1945], par son gain (g) ou son facteur (f), défini par :

$$(1 - g) \cdot \delta\varphi_1^\infty = \frac{1}{f} \cdot \delta\varphi_1^\infty = \delta\varphi_1^0 \quad (3.1)$$

où $\delta\varphi_1^\infty$ est la variation de la valeur d'équilibre de φ_1 , après qu'un forçage a été perturbé; $\delta\varphi_1^0$ est la variation de la valeur d'équilibre de φ_1 en réponse à la même perturbation, mais lorsque la rétroaction a été désactivée.

Ainsi, la définition usuelle du gain de rétroaction se base sur la différence entre deux valeurs d'équilibre, et c'est pourquoi ce gain sera qualifié dans la suite de *gain statique*.

Une autre approche, utilisée par *Coakley [1977]* et *Wetherald et Manabe [1988]*, a l'avantage de séparer les différents processus élémentaires intervenant dans la réponse à un changement ΔF de la valeur du flux entrant. Elle utilise les dérivées partielles du flux sortant R , par rapport à la valeur de la variable clé de chacune des rétroactions ($x_i, i=1, \dots, n$), et la dérivée totale de chacune de ces variables par rapport à la température de surface moyenne (T_s). L'égalité entre le flux entrant F et le flux sortant R à l'équilibre donne une relation entre la perturbation du flux entrant et la variation de la valeur d'équilibre de la température de surface :

$$\Delta F = \Delta R \quad \Rightarrow \quad \Delta F = \left(\frac{\partial R}{\partial T_s} + \sum_i \frac{\partial R}{\partial x_i} \frac{dx_i}{dT_s} \right) \Delta T_s \quad (3.2)$$

En divisant cette équation par $\partial R / \partial T_s$, l'Eq. (3.2) peut être réécrite sous la forme de l'Eq. (3.1) :

$$\frac{\delta\varphi_1^0}{\frac{\Delta F}{\partial R}} = \left(1 + \sum_i \frac{\overbrace{\frac{\partial R}{\partial x_i}}^{-g_i}}{\frac{\partial R}{\partial T_s}} \frac{dx_i}{dT_s} \right) \frac{\delta\varphi_1^\infty}{\Delta T_s} \quad (3.3)$$

Cette méthode a aussi été étendue par *Colman et al. [1997]* pour prendre en compte les dérivées de second ordre, et se donner une idée de l'importance des non-linéarités.

La première limitation de cette formulation est que toutes les perturbations du système doivent passer exclusivement par T_s , et ne doivent pas influencer d'autres variables directement. On ne peut donc pas considérer de rétroaction dans laquelle la température de surface ne jouerait aucun rôle. Par exemple, dans le cas du forçage par le CO_2 , la variation de la concentration modifie la température de surface, ce qui peut ensuite engendrer des modifications d'autres variables comme le gradient vertical de température

(GVT); mais on doit aussi supposer que la variation de concentration de CO_2 ne peut modifier directement le GVT, ce qui est une hypothèse difficilement acceptable.

Une seconde limitation concerne l'addition des gains de rétroaction individuels effectuée pour obtenir la réponse complète du système. La dérivée totale (dx_i/dT_s) dans l'Eq. (3.3) d'un gain g_i ne doit pas inclure de processus commun avec celles des autres gain g_j . Or, il est en pratique difficile dans un système comme le climat de séparer les différents processus (voir par exemple *Schneider et al.* [1999]).

Le point commun des méthodes de caractérisation de rétroaction appliquées en climatologie est qu'elles considèrent systématiquement des états d'équilibre et qu'elles ne déterminent donc que des gains statiques de rétroaction. Il sera introduit dans les sections suivantes une définition du gain dynamique, restaurant ainsi la définition de *Bode* [1945], qui sera illustrée par un modèle simple de la rétroaction vapeur d'eau.

3.4 Le modèle de rétroaction vapeur d'eau

Le modèle est construit pour reproduire la dynamique de la rétroaction vapeur d'eau et du cycle hydrologique, en réponse à un forçage par les GES. En conséquence, certains processus physiques importants mais inutiles dans ce but précis seront négligés.

3.4.1 Description

On considère une unique colonne atmosphérique, contenant uniquement de la vapeur d'eau, du CO_2 et trois couches de nuages, et surplombant une couche de mélange océanique. La figure 3.8 montre un schéma du modèle.

Les hypothèses simplificatrices sont les suivantes :

- La convection n'est pas explicitement modélisée, mais ses effets sont pris en compte via des GVT fixés. On peut justifier cela par les travaux de *Zhang et al.* [1994], qui a montré que la variation du GVT n'affecte pas de manière significative la rétroaction vapeur d'eau.
- La couche de mélange océanique est supposée homogène en température et sa profondeur est fixée.
- L'absorption de la stratosphère dans le visible est fixée.
- On néglige la rétroaction de ventilation, qui décrit l'influence du vent sur les flux de surface, même si *Bates* [2003] suggère qu'il s'agit d'un processus important.
- Il n'y a pas de modélisation explicite des nuages.

Le contenu de l'atmosphère en vapeur d'eau est contrôlé par l'évaporation et les précipitations. L'évaporation dépend des températures de l'air à la sur-

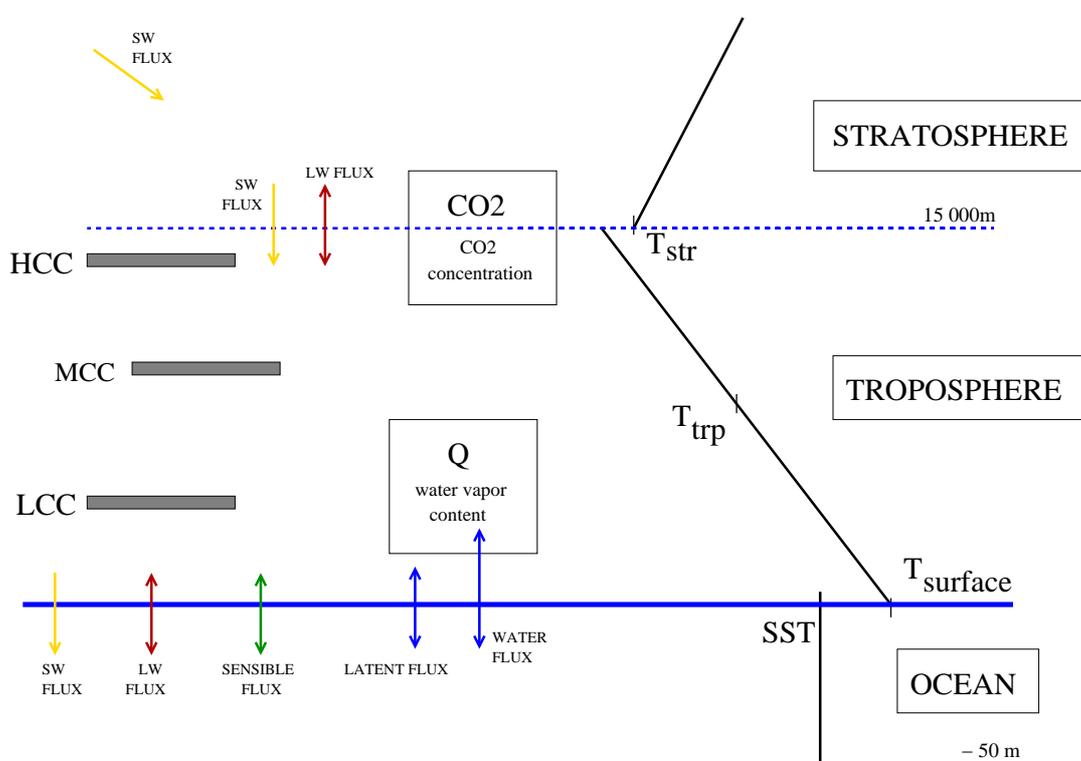


FIG. 3.8: Schéma du modèle

face et de l'océan superficiel. Par partir des conclusion de la section 3.2.2.2, on représente les précipitations de la façon suivante : elles sont supposées égales à la somme de l'évaporation et d'un terme de rappel de l'humidité relative vers sa valeur d'équilibre, qui est indépendante de la température dans les modèles de circulation générale :

$$P = E + \frac{1}{\tau_P} \cdot (Q - Q^\infty(T_{trp})) \quad (3.4)$$

Ceci est justifié par les simulations de la section 3.2.2.2, qui suggèrent que l'évaporation dirige les précipitations et que la convection a tendance à ramener l'humidité relative vers sa valeur d'équilibre. *Hall et Manabe* [2000a] obtiennent des résultats qui vont dans le même sens, car ils trouvent que la moyenne annuelle des précipitations est contrôlée par la moyenne annuelle de l'évaporation. L'hypothèse d'humidité relative constante est bien établie dans les MCG (voir *IPCC* [2001], Chp.7 ou *Hansen et al.* [1984]).

Cette modélisation est également cohérente avec les résultats de *Yang et al.* [2003], qui montrent qu'une augmentation de la température due à un accroissement de la concentration de CO₂ mène à une décroissance de l'évaporation et des précipitations, qui rappellent vers le niveau d'humidité relative d'équilibre (voir figure 3.6).

Ce niveau d'humidité d'équilibre est fixé sous la forme d'un profil d'humidité relative, partant de 0,7 à la surface, pour atteindre 0,4 à la tropopause, et tomber à zéro au dessus. Le rappel se fait avec un temps caractéristique de 5 jours, égal au temps caractéristique des processus synoptiques.

Le module radiatif, qui a été développé spécifiquement pour ce modèle, est un modèle d'atmosphère à 65 couches, avec 3 couches de nuages et deux gaz (H₂O et CO₂). Ce module calcule les budgets dans l'infrarouge de la troposphère, de la stratosphère et de l'océan en utilisant un modèle à bandes étroites de Malkmus avec un continuum de vapeur d'eau. Les principes sur lesquels se basent ce module ont été développés par *Green* [1967] et *Cherkaoui et al.* [1996]. De tels modules ont été développés par *Hartmann et al.* [1984] et *Soufiani et al.* [1985], qui a également créé la table des coefficients caractérisant les bandes étroites des deux gaz.

3.4.2 Le Formalisme d'Evolution par Transfert

Le TEF (Transfer Evolution Formalism) est un outil mathématique pour l'analyse de systèmes et la simulation (voir l'annexe A). Le modèle présenté ici est découpé en plusieurs sous-modèles correspondant à différents sous-systèmes du système climatique, et ensuite représenté mathématiquement par un ensemble d'équations appartenant à deux classes :

1. les cellules (décrites en Tab. 3.1) qui sont des sous-modèles élémen-

taires et correspondent à des équations d'état du type :

$$\begin{cases} \frac{\partial \boldsymbol{\eta}_\alpha}{\partial t} = \mathbf{G}_\alpha(\boldsymbol{\eta}_\alpha, \boldsymbol{\varphi}_1, \boldsymbol{\varphi}_2, \dots) \\ \frac{\partial \boldsymbol{\eta}_\beta}{\partial t} = \mathbf{G}_\beta(\boldsymbol{\eta}_\beta, \boldsymbol{\varphi}_1, \boldsymbol{\varphi}_2, \dots) \\ \dots \end{cases} \quad (3.5)$$

$\boldsymbol{\eta}_\alpha$ est le vecteur des variables d'état de la cellule α et $\boldsymbol{\varphi}_i$ est le vecteur des conditions aux limites de cette cellule, qui dépendent de l'état des autres cellules. C'est en quelque sorte les variables d'interface entre les cellules, elles sont nécessaires pour que le problème correspondant au système d'équations de chaque cellule soit bien posé.

2. les transferts (décrits dans Tab. 3.2 et 3.3), qui sont des équations de contrainte et d'interface :

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varphi}_1 = \mathbf{f}_1(\boldsymbol{\eta}_\alpha, \boldsymbol{\eta}_\beta, \dots, \boldsymbol{\varphi}) \\ \boldsymbol{\varphi}_2 = \mathbf{f}_2(\boldsymbol{\eta}_\alpha, \boldsymbol{\eta}_\beta, \dots, \boldsymbol{\varphi}) \\ \dots \end{cases} \quad (3.6)$$

On pose également $\boldsymbol{\eta}$, comme le vecteur d'état du système complet obtenu en couplant toutes les cellules, et $\boldsymbol{\varphi}$, comme le vecteur de toutes les variables d'interface qui couplent les cellules. Quand des conditions initiales sont données, le système complet est bien posé.

Pour réaliser une simulation et donc calculer l'évolution des variables pas de temps par pas de temps, on procède de la façon suivante : à chaque pas de temps, on calcule le Système Linéaire Tangent (SLT) au modèle complet, autour de son état courant ($\boldsymbol{\eta}(t_n)$) en écrivant $\boldsymbol{\eta}(t) = \boldsymbol{\eta}(t_n) + \boldsymbol{\delta}\boldsymbol{\eta}(t)$ et $\boldsymbol{\varphi}(t) = \boldsymbol{\varphi}(t_n) + \boldsymbol{\delta}\boldsymbol{\varphi}(t)$. On note $\dot{\boldsymbol{\delta}}\boldsymbol{\eta}(t)$ et $\dot{\boldsymbol{\delta}}\boldsymbol{\varphi}(t)$ les solutions du SLT, qui coïncident avec les solutions du système complet quand t est petit. On obtient alors le SLT autour de l'état courant suivant :

$$\begin{cases} \frac{\partial \dot{\boldsymbol{\delta}}\boldsymbol{\eta}_\alpha(t)}{\partial t} = \mathbf{G}_\alpha|_{t_n} + \frac{\partial \mathbf{G}_\alpha}{\partial \boldsymbol{\eta}_\alpha}|_{t_n} \dot{\boldsymbol{\delta}}\boldsymbol{\eta}_\alpha(t) + \frac{\partial \mathbf{G}_\alpha}{\partial \boldsymbol{\varphi}}|_{t_n} \dot{\boldsymbol{\delta}}\boldsymbol{\varphi}(t) \\ \dot{\boldsymbol{\delta}}\boldsymbol{\varphi}(t) = \sum_\beta \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \boldsymbol{\eta}_\beta}|_{t_n} \dot{\boldsymbol{\delta}}\boldsymbol{\eta}_\beta(t) + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \boldsymbol{\varphi}}|_{t_n} \dot{\boldsymbol{\delta}}\boldsymbol{\varphi}(t) \end{cases} \quad (3.7)$$

Dans ce système apparaissent toutes les matrices Jacobiennes caractéristiques du SLT. On démontre en annexe A que l'on peut résoudre ce système en prenant sa transformée de Borel, qui donne :

$$\begin{cases} \mathcal{B}[\dot{\boldsymbol{\delta}}\boldsymbol{\eta}](\tau) = \mathcal{B}[\dot{\boldsymbol{\delta}}\boldsymbol{\eta}_{dec}](\tau) + \underline{\mathcal{F}}(\tau) \mathcal{B}[\dot{\boldsymbol{\delta}}\boldsymbol{\varphi}](\tau) \\ \mathcal{B}[\dot{\boldsymbol{\delta}}\boldsymbol{\varphi}](\tau) = [1 + \underline{\mathcal{C}}(\tau)]^{-1} \mathcal{B}[\dot{\boldsymbol{\delta}}\boldsymbol{\varphi}_{ins}](\tau) \end{cases} \quad (3.8)$$

où $\mathcal{B}[f](\tau)$ est la transformée de Borel de $f(t)$ ⁴; τ est la variable de Borel; $\delta\eta(t)$ et $\delta\varphi(t)$ sont les solutions du SLT. Les quantités $\delta\eta_{dec}$, $\underline{\mathcal{F}}$, $\underline{\mathcal{C}}$, $\delta\varphi_{ins}$ peuvent être calculées par des calculs algébriques à partir des matrices Jacobiennes et du vecteur d'état au point courant.

Comme le SLT et le modèle complet coïncident sur un voisinage de l'état courant, l'évolution des variables du modèle complet est proche de l'évolution des variables du SLT si le pas de temps est assez petit. On a donc une approximation de l'évolution du modèle complet en résolvant le système (3.8), ce que l'on fait grâce à l'approximation suivante :

$$\begin{aligned}\delta\eta &\approx 2\mathcal{B}[\delta\eta](\frac{\delta t}{2}) \\ \delta\varphi &\approx 2\mathcal{B}[\delta\varphi](\frac{\delta t}{2})\end{aligned}\quad (3.10)$$

où $\delta\eta$ et $\delta\varphi$ sont les variations des variables d'état et des variables de transfert durant un pas de temps δt .

3.4.3 Implémentation du modèle sous TEF

Le système climatique est ici décomposé en 5 sous-systèmes (5 cellules) listées en Tab. 3.1, avec leurs variables d'état et leurs équations d'état⁵.

Les connections entre ces sous-systèmes sont représentées par 14 variables de transferts, listées en Tab. 3.2 et 3.3.

Les paramètres sont donnés en Tab. 3.4 et 3.5. Le rôle particulier de la variable de température T_{WV} sera détaillé dans la section 3.5.

3.4.4 Validation du modèle

Le tableau 3.6 reproduit les flux LW échangés entre les différentes composantes du système climatique à l'équilibre avec 330 ppmv de CO_2 dans l'atmosphère. Ces valeurs sont suffisamment proches de celles que l'on mesure (voir *Salby* [1996], p. 43). Les autres flux échangés dans le modèles (non reproduits) sont également proches de leurs valeurs mesurées.

La Table 3.7 montre la dérivée partielle (instantanée) de chaque flux LW par rapport à la concentration de CO_2 (tout le reste étant égal par ailleurs),

⁴la transformée de Borel s'écrit :

$$f(t) \xrightarrow{\mathcal{B}} \mathcal{B}[f](\tau) = \frac{1}{\tau} \int_0^{\infty} e^{-t/\tau} f(t) dt = \frac{1}{\tau} \tilde{f}\left(\frac{1}{\tau}\right) \quad (3.9)$$

où $\tilde{f}(p)$ est la transformée de Laplace de $f(t)$. Contrairement à la variable de Laplace, la variable de Borel τ est réelle et homogène à un temps. Pour plus d'information sur la transformée de Borel, voir en annexe A.

⁵La concentration de CO_2 sera constante dans ce chapitre, mais on la fait tout de même figurer en tant que variable d'état, car elle sera utilisée dans le chapitre suivant.

Sous-système	variable d'état	Modèle
<i>Stratosphère</i>	température (T_{str}) (K)	Capacitance à GVT fixé et uniforme $C_p^{str} \cdot \frac{dT_{str}}{dt} = \phi_{SW, str} + \phi_{LW, str}$
<i>Troposphère</i>	température à 5 Km (T_{trp}) (K)	Capacitance à GVT fixé et uniforme $C_p^{trp} \cdot \frac{dT_{trp}}{dt} = \phi_{SW, trp} + \phi_{LW, trp} + \phi_{sensible, trp} + \phi_{latent, trp}$
<i>Océan superficiel</i>	Température (SST) (K)	Capacitance à température uniforme $C_p^{oce} \cdot \frac{dSST}{dt} = \phi_{SW, oce} + \phi_{LW, oce} + \phi_{sensible, oce} - \phi_{latent, oce}$
<i>Humidité absolue</i>	Humidité absolue (Q) ($kg \cdot m^{-2}$)	Capacitance à grad. d'humidité relative fixé $\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{L_{ve}} \cdot (\phi_{latent, oce} - \phi_{latent, trp})$
<i>Concentration de CO₂</i>	CO ₂ (ppmv)	fixée

TAB. 3.1: Sous-systèmes (cellules) du modèle avec ses variables et équations d'état.

Transfert	variables de transfert	Modèle
<i>flux solaire</i>	bilan SW de la troposphère, la stratosphère, et l'océan ($\phi_{SW, trp}$, $\phi_{SW, str}$, $\phi_{LW, oce}$) ($W \cdot m^{-2}$)	flux solaire constant partagé entre l'océan, la troposphère, la stratosphère et une partie réfléchiée vers l'espace $\phi_{SW, str} = 40 W \cdot m^{-2}$ $\phi_{SW, trp} = (1 - a_{cloud}) \cdot C \cdot F_{SW}$ $\phi_{SW, oce} = (1 - albedo) \cdot (1 - C) \cdot F_{SW}$ $C = 1 - (1 - \alpha_{SW}^L \cdot LCC) \cdot (1 - \alpha_{SW}^M \cdot MCC) \cdot (1 - \alpha_{SW}^H \cdot HCC)$
<i>flux LW</i>	bilan LW de la troposphère, la stratosphère, et l'océan ($\phi_{LW, trp}$, $\phi_{LW, str}$, $\phi_{LW, oce}$) ($W \cdot m^{-2}$)	module radiatif de Malkmus à bandes étroites calcule les flux LW en fonction des températures, de la quantité de vapeur d'eau et de nuages
<i>Flux de chaleur sensible</i>	flux de chaleur à la surface ($\phi_{sensible, trp}$) ($W \cdot m^{-2}$)	Terme diffusif proportionnel à l'écart de températures à la surface $\phi_{sensible, trp} = -\phi_{sensible, oce} = h_{cond} \cdot (SST - T_{surf})$ $T_{surf} = T_{trp} - \gamma_{trp} \cdot H_{moy}$

TAB. 3.2: Transferts, avec leurs variables de transfert et leurs équations (partie 1)

Transfert	variables de transfert	Modèle
<i>Précipitations</i>	Précipitation à la surface et flux latent correspondant ($\phi_{latent, trp}$) ($W \cdot m^{-2}$)	Terme de relaxation de l'humidité relative vers un profil cible fixé $\phi_{latent, trp} = \phi_{latent, oce} - L_{ve} \cdot \frac{1}{\tau_P} \cdot (Q - Q^\infty(T_{trp}))$ $Q^\infty(T_{trp})$ est le contenu en vapeur d'eau correspondant au profil d'humidité relative cible.
<i>Evaporation</i>	Flux latent à la surface ($\phi_{latent, oce}$) ($W \cdot m^{-2}$)	Terme diffusif proportionnel à la différence d'humidité à la surface $\phi_{latent, oce} = k_{evap} \cdot L_{ve} \cdot (P_{sat}(SST) - r_H \cdot P_{sat}(T_{surf}))$ $P_{sat}(T)$ est la pression de vapeur saturante.
<i>Temperature "vapeur d'eau"</i>	T_{WV} (K)	$T_{WV} = T_{trp}$
<i>Couverture nuageuse</i>	couverture nuageuse haute, moyenne et basse (HCC, MCC, LCC) (pas d'unité)	fixées : $HCC = HCC_0$, $MCC = MCC_0$ $LCC = LCC_0$

TAB. 3.3: Transferts, avec leurs variables de transfert et leurs équations (partie 2)

Variable	Valeur
Humidité relative cible à la surface	0,7
Humidité relative cible à la tropopause	0,4
Altitude du sommet de l'atmosphère	65.000 m
Altitude de la tropopause	15.000 m
Altitude moyenne de la troposphère (H_{moy})	5000 m
GVT de la troposphère (γ_{trp})	$-6,5 \cdot 10^{-3} \text{ K m}^{-1}$
Capacité thermique de la troposphère (C_p^{trp})	$1,0 \cdot 10^7 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
GVT de la stratosphère (γ_{str})	$3,5 \cdot 10^{-3} \text{ K m}^{-1}$
Capacité thermique de la stratosphère (C_p^{str})	$1,2 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
albédo des nuages (a_{cloud})	0,88
Couverture nuageuse haute (HCC_0)	0,35
Altitude de la couverture nuageuse haute	14.000 m
Absorption SW de la couverture nuageuse haute (α_{SW}^H)	0,3
Emissivité de la couverture nuageuse haute	1
Couverture nuageuse moyenne (MCC_0)	0,25
Altitude de la couverture nuageuse moyenne	6.000 m
Absorption SW de la couverture nuageuse moyenne (α_{SW}^M)	1
Emissivité de la couverture nuageuse moyenne	1
Couverture nuageuse basse (LCC_0)	0,30
Altitude de la couverture nuageuse basse	2.000 m
Absorption SW de la couverture nuageuse basse (α_{SW}^L)	1
Emissivité de la couverture nuageuse basse	1

TAB. 3.4: Valeurs des paramètres atmosphériques

Variable	Valeur
albédo de l'océan ($albedo$)	0,05
Capacité thermique de l'océan (C_p^{oce})	$2,0 \cdot 10^8 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
Epaisseur de l'océan superficiel	50 m
Coefficient du flux de chaleur sensible atmosphère-océan (h_{cond})	$1,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
Coefficient de l'évaporation (k_{evap})	$0,7 \cdot 10^{-2} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$
Temps caractéristique des précipitations (τ_p)	5 jours
Chaleur latente de vaporisation (L_{ve})	$2,5 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$
Flux solaire entrant (F_{SW})	$340 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

TAB. 3.5: Valeurs des paramètres de surface

Emetteurs LW	Absorption ($W \cdot m^{-2}$)			
	Océan	Espace	Tropo.	Strato.
Océan	•	27,3	363,1	0,3
Espace	0,0	•	0,0	0,0
Troposphère	329,7	131,5	•	19,9
Stratosphère	0,1	48,1	12,9	•

TAB. 3.6: Flux LW échangés. Chaque ligne montre les flux émis par un objet vers les autres. Chaque colonne montre les flux reçus par un objet, émis par les autres. La somme de la colonne de l'océan est le flux LW total reçu par l'océan. La somme de la ligne de l'océan est le flux LW total émis par l'océan. Le flux LW total sortant est de $207 W \cdot m^{-2}$.

Emetteurs LW	Dérivée de l'absorption ($W \cdot m^{-2} \cdot 330 ppmv^{-1}$)			
	Océan	Espace	Tropo.	Strato.
Océan	•	-3,2	3,0	0,2
Espace	0,0	•	0,0	0,0
Troposphère	3,0	-5,1	•	2,6
Stratosphère	0,0	13,9	1,6	•

TAB. 3.7: Dérivées instantanées des flux échangés par rapport à la concentration de CO_2 (exprimées pour le doublement de la concentration de CO_2).

exprimée en terme de variation quand on double la concentration de CO_2 . Il est remarquable que l'effet du CO_2 sur le flux sortant LW au sommet de l'atmosphère (OLR⁶) soit positif : plus de CO_2 refroidit l'atmosphère sur le très court terme. Plus précisément la stratosphère refroidit brutalement et fortement (sa capacité thermique est faible) et la troposphère et l'océan se réchauffent lentement. Ce résultat classique est ici bien reproduit, voir *IPCC* [2001] (Chp. 2) ou *Hu et Tung* [2002].

La figure 3.9 reproduit l'évolution temporelle des variables d'état du modèle en réponse à un saut de 330 ppmv à 660 ppmv de la concentration de CO_2 . Aux échelles temporelles de la stratosphère, les températures de l'océan et de la troposphère sont à peu près constantes. En conséquence, la stratosphère atteint un quasi-équilibre déterminé par ses conditions aux limites, c'est-à-dire les températures de l'océan et de la troposphère et la concentration de CO_2 . C'est quand la stratosphère a atteint ce quasi-équilibre que

⁶OLR : Outgoing Longwave Radiation

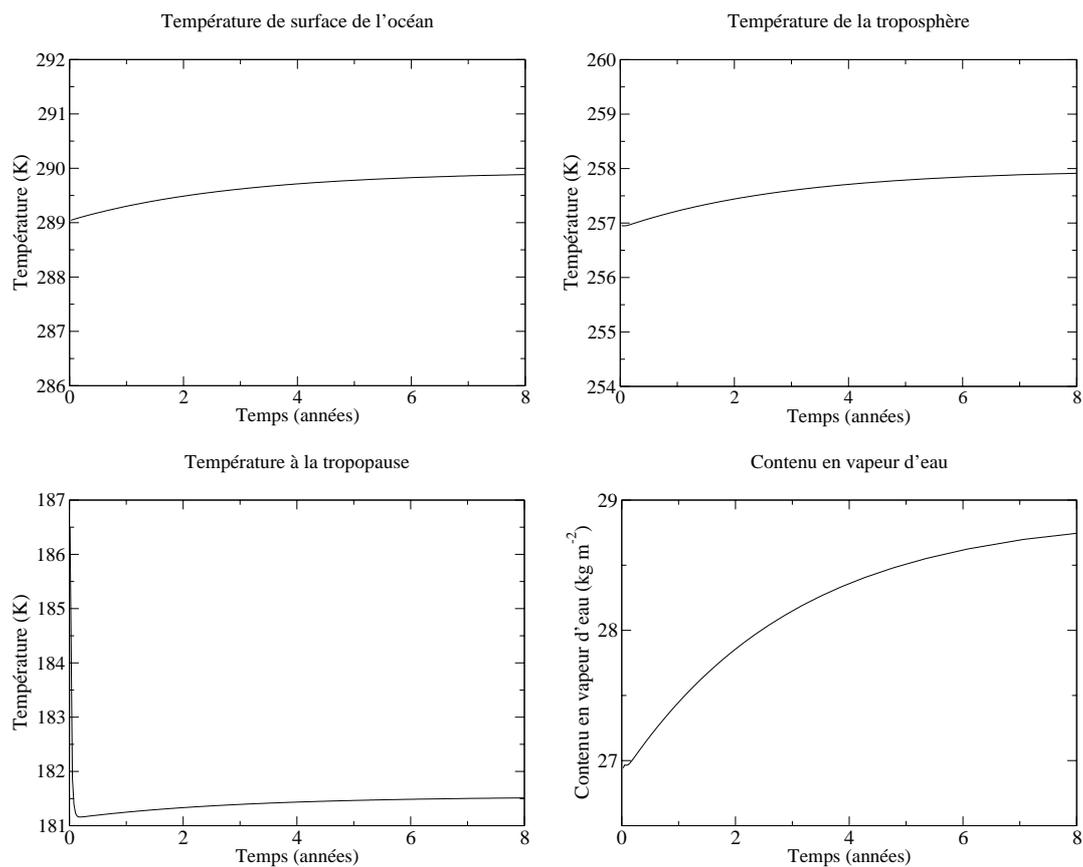


FIG. 3.9: Réponse du modèle à un saut de la concentration de CO_2 : (a) en haut à gauche, la température de surface de l'océan ; (b) en haut à droite, la température troposphérique à 5000m ; (c) en bas à gauche, la température à la base de la stratosphère ; (d) en bas à droite, le contenu en vapeur d'eau ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$).

CO ₂ (ppmv)	Δ Températures d'équilibre (K)			Δ Contenu en vapeur d'eau ($kg \cdot m^{-2}$)
	Océan	Atmosphère à la surface	Tropopause	
110	-1,1	-1,3	+0,9	-2,3 (-9 %)
330	0,0	0,0	0,0	0,0
660	+0,9	+1,1	-5,0	+2,0 (+7 %)
1320	+2,1	+2,5	-9,5	+4,8 (+18 %)
2640	+3,6	+4,4	-13,6	+8,9 (+33 %)

TAB. 3.8: Valeurs d'équilibre des variables d'état pour différentes concentrations de CO₂.

l'on définit le forçage radiatif additionnel, comme la variation de flux au sommet de l'atmosphère. On trouve ici $\Delta F_{2X} = 3,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, qui est proche des valeurs usuelles (*IPCC* [2001], Chp.6).

Sur des échelles de temps plus longues, l'océan et la troposphère se réchauffent lentement et la stratosphère, toujours à son quasi-équilibre, se réchauffe de manière correspondante. Cependant l'état final de la stratosphère correspond à un important refroidissement par rapport à l'état initial.

La Table 3.8 reproduit les valeurs d'équilibre des variables d'état pour différentes concentrations de CO₂. La sensibilité climatique du modèle au doublement du CO₂ est de 1.1K. Cette faible valeur par rapport à celle issue des modèles de circulation générale (voir *IPCC* [2001], Chp.9 ou *Kothavala et al.* [1999]) vient des non-linéarités et de la spatialisation des flux dans un MCG⁷.

On s'intéresse également à la réponse de court terme du cycle hydrologique. Pour cela, la figure 3.10 montre la réponse de l'évaporation et de la précipitation sur 90 jours. On constate une baisse de 0,5% des précipitations et de 0,3% de l'évaporation. Ceci est cohérent avec les résultats de *Yang et al.* [2003] (voir Fig.3.6). La moindre variation dans notre modèle est probablement directement due à sa faible sensibilité climatique.

3.5 Méthodologie pour l'analyse de rétroaction

3.5.1 Définition de la rétroaction et caractérisation statique

Dans le TEF, une boucle de rétroaction est définie comme un ensemble de processus reliés entre eux par des variables de transfert $\{\varphi_i, i=1, \dots, n\}$ et pour lesquels l'évolution de chaque variable, $\delta\varphi_j$, ne dépend que de $\delta\varphi_{j-1}$ (et $\delta\varphi_1$ ne dépend que de $\delta\varphi_n$).

⁷Par exemple, la moyenne du flux LW émis par une surface de température hétérogène est très différente du flux émis par une surface de température homogène dont la température est la température moyenne de la première surface.

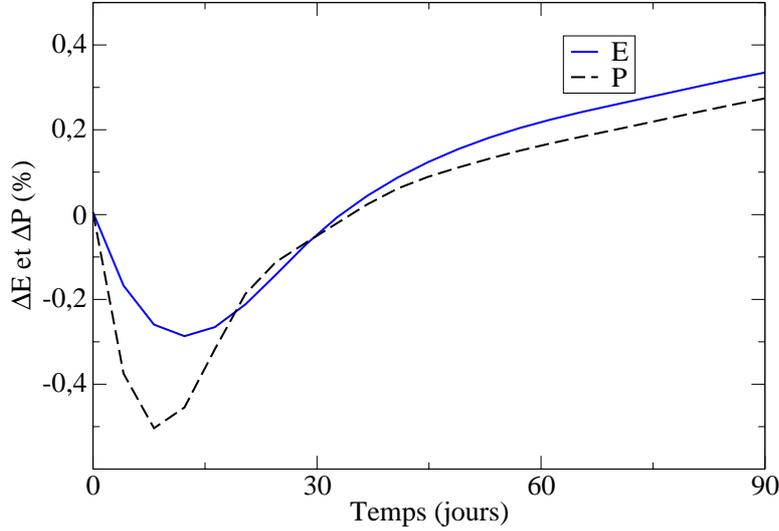


FIG. 3.10: Evaporation et Précipitations en réponse à un saut de la concentration de CO₂ de 330 ppmv à 660 ppmv.

Cette définition est cohérente avec la terminologie présentée dans la section 3.3. Cependant, partant de l'idée que la trajectoire d'un équilibre à un autre est essentielle dans la définition d'une rétroaction, on propose ici d'introduire la caractérisation dynamique de la rétroaction.

3.5.2 Dynamique de la boucle de rétroaction

Pour analyser la dynamique de la boucle de rétroaction, on utilise le SLT. Comme le modèle est non-linéaire, le SLT évolue avec le temps. On se place donc sur un équilibre stable du modèle, autour duquel le SLT permet d'analyser les trajectoires. On laisse ici de côté l'analyse de systèmes non-linéaires hors-équilibres.

Tant que les perturbations du modèle autour de son équilibre sont faibles, le SLT est valide sans limite de temps et il décrit toute la dynamique du modèle.

Quand un modèle est formalisé par le TEF, la méthode pour extraire une boucle de rétroaction du reste de la dynamique du modèle est simple : il suffit de conserver une unique variable en éliminant toutes les autres du système algébrique (3.8). La dernière équation restante est alors :

$$(1 - g_1(\tau)) \cdot \mathcal{B}[\delta^{\circ}\varphi_1](\tau) = \mathcal{B}[\delta^{\circ}\varphi_{1_{ins}}](\tau) \quad (3.11)$$

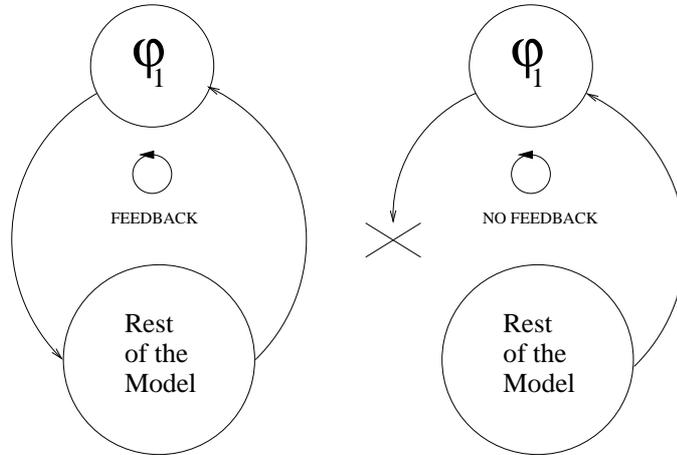


FIG. 3.11: Schéma d'une rétroaction (à gauche) et illustration de la coupure d'une boucle pour obtenir le modèle à boucle ouverte (gauche).

On montre en annexe A que $\delta\overset{\circ}{\varphi}_{1,ins}$ est la variation de φ_1 , dans le SLT, quand le reste du système (formé par toutes les variables éliminées) est insensible aux variations de φ_1 (en d'autres termes, quand la boucle de rétroaction est ouverte juste après φ_1 dans la Fig. 3.11). Alors que $\delta\overset{\circ}{\varphi}_1$ est la variation de φ_1 dans le SLT complet, à boucle fermée.

On définit alors $g_1(\tau)$ comme le *gain dynamique de la rétroaction* car il représente l'effet de la fermeture de la boucle sur la dynamique du modèle. Il est défini dans l'espace de Borel, et non dans l'espace réel, de même que Bode [1945] définit son gain dans l'espace de Laplace.

Cette fonction $g_1(\tau)$ généralise le gain statique de rétroaction puisqu'on peut écrire, en passant à la limite :

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \mathcal{B}^{-1}[g_1(\tau)](t) = \lim_{\tau \rightarrow +\infty} [g_1(\tau)] = g \quad (\text{gain statique}) \quad (3.12)$$

Alors que le gain statique de rétroaction ne donne que la réponse correspondant à un comportement asymptotique (la nouvelle valeur d'équilibre), le gain dynamique décrit la réponse dynamique de $\delta\overset{\circ}{\varphi}_1$, et donc de la rétroaction, en prenant la transformation de Borel inverse de l'Eq. (3.11) :

$$\delta\overset{\circ}{\varphi}_1(t) = \mathcal{B}^{-1} \left[\frac{1}{1 - g_1(\tau)} \right] * \frac{d}{dt} \delta\overset{\circ}{\varphi}_{1,ins}(t) \quad (3.13)$$

Cette équation montre que $\mathcal{B}^{-1}[1/(1 - g_1(\tau))]$ relie la dynamique du modèle quand la boucle est coupée ($\delta\overset{\circ}{\varphi}_{1,ins}(t)$) à la dynamique du modèle quand la boucle est active ($\delta\overset{\circ}{\varphi}_1(t)$).

3.6 Application à la rétroaction vapeur d'eau

3.6.1 Définition de la rétroaction vapeur d'eau

Le modèle simple est conçu pour reproduire la Rétroaction Vapeur d'Eau (RVE). Il en implémente l'une des définitions possibles. La boucle est la suivante : une perturbation exogène crée une augmentation de la température de la troposphère ; l'humidité relative est réduite (en conséquence de la loi de Clausius-Clapeyron) ; les précipitations changent pour maintenir l'humidité relative ; l'humidité relative retourne à son niveau initial qui correspond à une plus grande humidité absolue ; le bilan radiatif est modifié, et l'augmentation initiale de température troposphérique est amplifiée.

Le problème pour l'analyse de cette rétroaction est que notre formalisme permet l'analyse d'une boucle de rétroaction si celle-ci est associée à une variable (puisqu'on utilise l'élimination de toutes les autres variables). Or, la température troposphérique participe à de nombreuses rétroactions différentes. En conséquence, le gain associé avec la variable T_{trp} résultera de l'interaction de nombreux processus⁸.

Pour pouvoir séparer rigoureusement les boucles, on est amené à introduire une variable supplémentaire T_{WV} . T_{WV} est définie comme la température pertinente pour le mécanisme qui dirige la vapeur d'eau. T_{WV} pourrait être par exemple la température à une certaine altitude ou la température modifiée par un certain processus. Ici, T_{WV} est prise égale à la température de la troposphère T . En d'autres termes, T_{WV} est toujours égale à T mais elle ne désigne pas le même concept physique. En particulier, la variable T_{WV} est associée de manière unique à la boucle de rétroaction de la vapeur d'eau, ce qui permet d'appliquer notre méthode d'élimination des autres variables, et de caractériser la boucle unique passant par T_{WV} .

On modifie donc les équations du modèle de la façon suivante :

$$\begin{cases} T = f(\eta, Q) \\ Q = F(\eta, T) \\ \eta = G(T, Q) \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} T = f(\eta, Q) \\ T_{WV} = T \\ Q = F(\eta, T_{WV}) \\ \eta = G(T, Q) \end{cases} \quad (3.14)$$

où T, Q sont la température et l'humidité de la troposphère et η contient toutes les autres variables. f, F et G sont les fonctions correspondant aux équations du modèle. Cette modification est présentée en figure 3.12.

⁸Le même problème se pose quand on cherche à mesurer une rétroaction dans un MCG (voir *Schneider et al.* [1999]). En particulier, couper la RVE en remplaçant, dans une simulation à CO_2 croissant, le champs de vapeur d'eau par un champs extrait d'une simulation de contrôle pose plusieurs problèmes. Par exemple, la cohérence de court terme et de petite échelle entre l'humidité, les nuages et les flux est perdue.

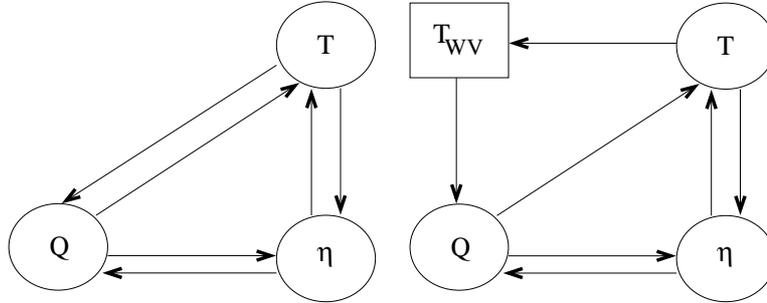


FIG. 3.12: Représentation schématique de la modification du modèle, de façon à pouvoir couper la rétroaction vapeur d'eau.

Il est remarquable que, bien que les deux systèmes soient mathématiquement équivalents et donnent la même évolution temporelle, leur structure est différente et leurs boucles de rétroaction ne sont pas les mêmes⁹.

Dans la nouvelle forme du modèle, il y a une boucle de rétroaction qui passe par T_{WV} et qui est distincte de toutes les autres boucles passant par T . La RVE est donc maintenant rigoureusement définie, et est schématisée dans la Fig. 3.13.

Cette méthodologie, comme celle utilisée par *Hall et Manabe* [2000b] dans leur analyse de rétroaction, permet de couper la RVE sans perdre la conservation de l'eau et la cohérence du modèle.

3.6.2 Caractérisation de la rétroaction vapeur d'eau

On choisit donc T_{WV} comme seule variable non-éliminée dans le processus d'élimination des variables dans le système (3.11) pour obtenir :

$$(1 - g_{WV}(\tau)) \cdot \mathcal{B}[\delta T_{WV}](\tau) = \mathcal{B}[\delta T_{WV,ins}'](\tau) \quad (3.15)$$

où $\delta T_{WV}(t)$ et $\delta T_{WV,ins}(t)$ sont les variations de T_{WV} dans le SLT quand la boucle est fermée et ouverte, respectivement (voir Fig. 3.13). La fonction $g_{WV}(\tau)$ est le gain dynamique de la rétroaction vapeur d'eau.

Si on effectue la transformée de Borel inverse de l'Eq.(3.15), on obtient :

⁹Ceci met en évidence l'importance de la *conception* d'un modèle : à résultats équivalents, la façon dont un modèle a été construit permet ou ne permet pas d'étudier certains processus.

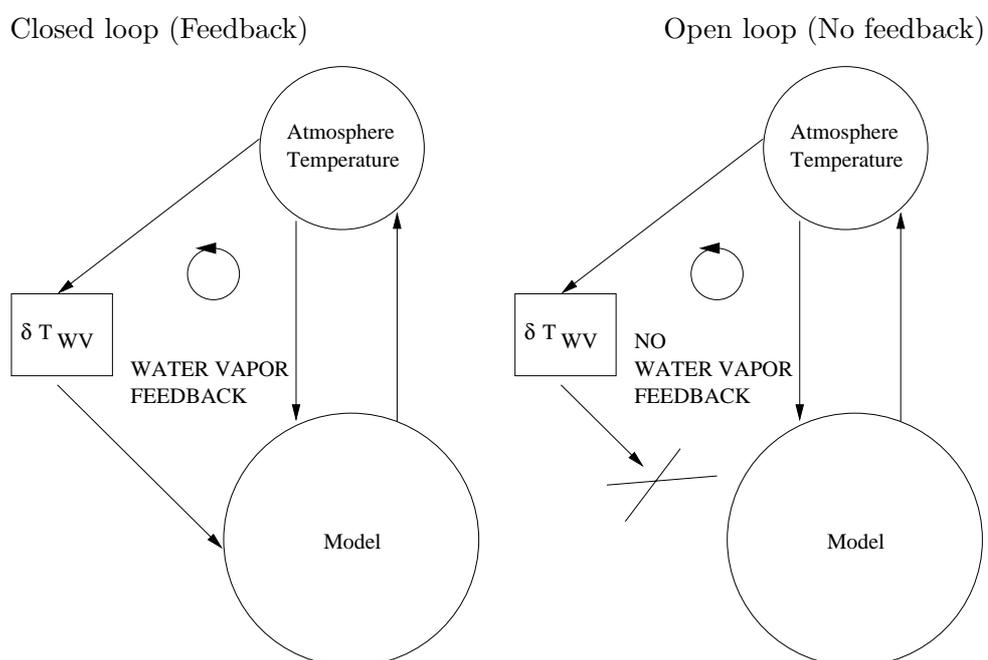


FIG. 3.13: Schéma de la rétroaction vapeur d'eau (gauche), mettant en jeu une nouvelle température, utilisée par les processus contrôlant la vapeur d'eau, alors que les autres processus utilisent toujours la variable de température normale. Illustration de l'ouverture de la boucle (droite).

$$\delta T_{WV}(t) = \mathcal{B}^{-1} \left[\frac{1}{1 - g_{WV}(\tau)} \right] * \frac{d}{dt} \delta T_{WV,ins}(t) \quad (3.16)$$

L'expression $(\mathcal{B}^{-1}[(1 - g_{WV}(\tau))^{-1}](t) \cdot \Delta T_0)$ peut être interprétée comme la variation totale de δT_{WV} après qu'un saut ΔT_0 a été appliqué¹⁰ sur la variable T_{WV} : $T_{WV} = T$ si $t \leq 0$; et $T_{WV} = T + \Delta T_0$ si $t > 0$.

On définit ensuite le *facteur dynamique de rétroaction* comme :

$$FF_{T_{WV}}(t) = \mathcal{B}^{-1} \left[\frac{1}{1 - g_{WV}(\tau)} \right] \quad (3.17)$$

Il s'interprète de la façon suivante : *c'est la réponse du modèle complet (avec RVE) à une perturbation qui aurait mené à un saut de 1K à t=0 dans le modèle sans RVE.* Comme dans le cas d'une transformée de Laplace, cette fonction est composée de *pôles*, qui s'expriment sous la forme (i) d'un résidu, qui est l'amplitude du pôle et qui donne la positivité ou négativité du pôle, c'est-à-dire son rôle d'amplificateur ou d'amortisseur des perturbations ; (ii) d'un temps caractéristique, qui donne l'échelle temporelle sur laquelle le pôle agit.

La résolution numérique du système 3.8 du modèle et le calcul de la transformée de Borel inverse nous donne le facteur de rétroaction :

$$FF_{T_{WV}}(t) = 1 - 0,56 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) + 1,17 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) \quad (3.18)$$

avec $\tau_1 = 7$ jours et $\tau_2 = 7,7$ ans¹¹. La fonction correspondante est reproduite en Fig. 3.14.

On utilise ici la fonction "saut" comme perturbation du système pour caractériser sa réponse. Cependant, on travaille toujours dans le SLT. En conséquence, la réponse du modèle à une perturbation plus réaliste comme une rampe s'obtient classiquement par le produit de convolution :

$$\delta T_{WV}(t) = FF_{T_{WV}}(t) * \frac{d}{dt} \delta T_{WV,ins}(t) \quad (3.19)$$

Ici $\delta T_{WV}(t)$ est la réponse du modèle complet avec RVE à une perturbation qui aurait mené à une réponse quelconque $\delta T_{WV,ins}(t)$ dans le modèle sans RVE.

¹⁰Bien sûr, comme on travaille dans le SLT, la réponse est proportionnelle à l'amplitude du saut.

¹¹Une analyse de sensibilité sur la valeur de τ_{prec} a montré que ce résultat était robuste, et que la partie négative de la rétroaction vapeur d'eau existe, même si son amplitude diminue, quand τ_{prec} devient très grand.

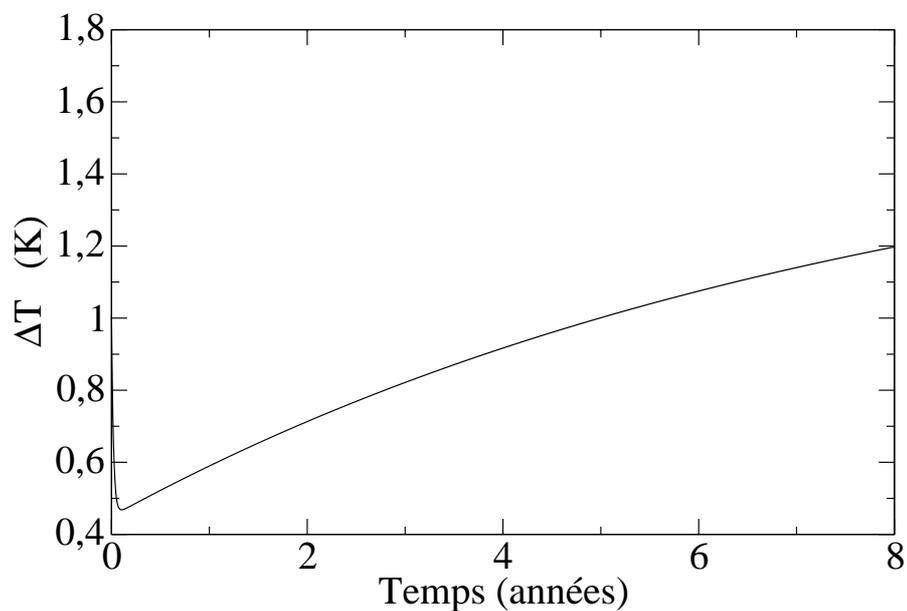
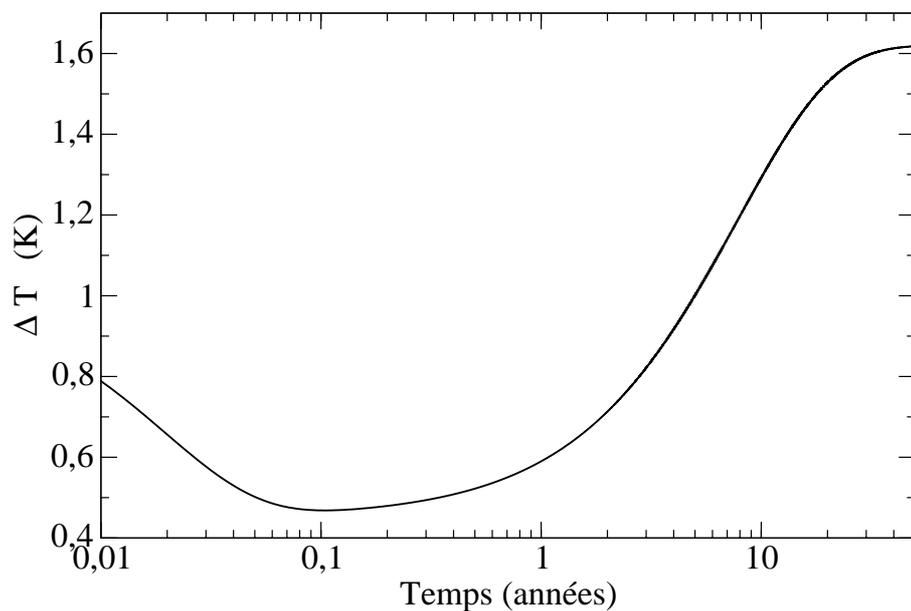


FIG. 3.14: Facteur de la rétroaction vapeur d'eau, en abscisses logarithmiques en haut et linéaires en bas. Si on applique une perturbation qui aurait mené à une réponse en forme de saut de 1K dans le modèle sans RVE, alors on obtient la réponse $FF_{T_{wv}}(t)$ dans le modèle complet. On distingue deux processus : un refroidissement dû à la baisse des précipitations et un réchauffement dû à l'humidité absolue supplémentaire.

3.6.3 Interprétation du facteur de rétroaction

On a ainsi trouvé un pôle lent et un pôle rapide. Le pôle rapide provient des processus décrits dans la partie 3.2.2.2 : c'est la décroissance des flux latents engendrés par les précipitations, en réponse à la hausse de température à humidité relative fixée.

Ce mécanisme fait partie de la RVE : n'importe quel transitoire qui augmente la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère doit générer un déséquilibre entre évaporation et précipitation qui se traduit par une consommation d'énergie et donc une baisse de température.

En conséquence, on trouve bien une partie négative à la RVE, avec un temps caractéristique de quelques jours. On peut vérifier la cohérence de notre pôle et l'illustrer en considérant une expérience de doublement du CO_2 qui mène à un réchauffement de 3K de la température de surface à l'équilibre. Cela correspond à une augmentation de $4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ de vapeur d'eau dans l'atmosphère et donc à une perte d'énergie latente de $-1 \cdot 10^7 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$. Comme les variations de flux radiatif sont de l'ordre de $3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, un mois de ce flux additionnel est consommé pour vaporiser la quantité d'eau nécessaire.

Le pôle lent correspond à la RVE classique, telle que considérée par *Hall et Manabe* [2000b] par exemple : c'est le réchauffement venant du flux radiatif additionnel dû à la quantité additionnelle de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Son temps caractéristique est de l'ordre de 8 ans, il s'explique par le fait que la boucle de rétroaction est constituée d'une chaîne de processus de temps caractéristiques faibles mais non nul qui se cumulent pour mener à ce temps long.

La rétroaction est donc un processus non-instantané, qui demande du temps pour s'installer. Ceci doit être pris en compte quand on cherche à mesurer la RVE, par exemple grâce aux observations d'éruptions volcaniques, dont les durées sont plus courtes que le temps caractéristique de la RVE.

En appliquant la relation (3.12) à l'Eq. (3.18) on retrouve le gain statique $g_{WV} = 38 \%$. Cette valeur est proche des résultats de MCG (voir *Lindzen* [1993] ou *Schneider et al.* [1999]). Cependant, l'élicitation des pôles rapide et lent montre l'intérêt de la méthodologie : la RVE n'est pas un processus monotone responsable d'une augmentation du réchauffement ; c'est plutôt un processus complexe avec sa dynamique propre qui s'inscrit dans le temps.

3.6.4 Influence de la rétroaction sur la variabilité

Disposant d'une caractérisation dynamique de la rétroaction, il est intéressant de regarder son influence sur la dynamique du modèle. Ceci peut se faire en considérant une perturbation sinusoïdale extérieure, débutant à $t = 0$, telle que la variation de température troposphérique dans le modèle où la rétroaction est coupée est donnée par l'Eq. (3.20) :

$$t > 0 \implies \delta T_{WV,ins}(t) = A_0 \cdot \sin(\omega t) \quad (3.20)$$

Comme le montre l'Eq. (3.19), la variation de température engendrée par cette perturbation dans le modèle complet, avec la rétroaction active, est donnée par :

$$\delta T_{WV}(t) = FF_{T_{WV}}(t) * \frac{d}{dt} \delta T_{WV,ins}(t) \quad (3.21)$$

Comme tous les pôles de la rétroaction sont réels, simples et négatifs, le facteur de rétroaction $FF_{T_{WV}}(t)$ s'écrit :

$$FF_{T_{WV}}(t) = 1 + \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \quad (3.22)$$

Des calculs simples mènent à :

$$\delta T_{WV}(t) = A_0 \left(\underbrace{\sin(\omega t)}_{(1)} + \sum_{i=1}^n \underbrace{\frac{\lambda_i}{1 + (\tau_i \omega)^2} (\sin(\omega t) - \omega \tau_i \cos(\omega t))}_{(2)} - \underbrace{\frac{\omega \tau_i \lambda_i}{1 + (\tau_i \omega)^2} e^{-\frac{t}{\tau_i}}}_{(3)} \right) \quad (3.23)$$

où (1) est l'effet de la perturbation dans le modèle sans rétroaction ; (2) est l'influence permanente du pôle ; (3) est l'effet transitoire du pôle. Ceci montre que pour chaque pôle i de la rétroaction :

1. si $\omega^{-1} \ll \tau_i$, *i.e.* si le temps caractéristique de la perturbation est beaucoup plus court que le temps caractéristique du pôle, alors *le pôle n'a pas d'influence sur la variation de température.*
2. si $\omega^{-1} \gg \tau_i$, *i.e.* si le temps caractéristique de la perturbation est beaucoup plus long que le temps caractéristique du pôle, alors *le pôle influence la variation de température.* Dans ce cas, l'influence du pôle i mène à une réponse en température :

$$\delta T_{WV}^i(t) = A_0(1 + \lambda_i) \sin(\omega t) \quad (3.24)$$

Ainsi, si le pôle de la rétroaction correspond à une rétroaction positive, alors le pôle augmente la variabilité. A l'inverse, si le pôle de la rétroaction correspond à une rétroaction négative, alors le pôle réduit la variabilité.

3. Entre ces deux extrêmes, quand le temps caractéristique du pôle est du même ordre que celui de la perturbation, l'influence du pôle existe mais décroît à mesure que le temps caractéristique de la perturbation décroît.

Dans le cas de la RVE, un pôle a un temps caractéristique de 7 jours et correspond à une rétroaction négative ; et un pôle a un temps caractéristique de 8 ans et correspond à une rétroaction positive. Donc, si on considère la transformée de Fourier de perturbations aléatoires de la température troposphérique (venant d'effets de la dynamique sur la couverture nuageuse par exemple), la RVE réduit la variabilité de la température troposphérique pour les hautes fréquences, pour lesquelles seul le pôle rapide peut influencer la variabilité. A l'opposé, la RVE augmente la variabilité de la température troposphérique pour les basses fréquences, pour lesquelles les deux pôles peuvent agir, dont le pôle positif, plus important.

Il est difficile de valider ce résultat par l'observation, car les analyses de corrélation entre températures et précipitations utilisent en général la température de surface de l'océan (TSO), et non la température troposphérique. L'anti-corrélation entre TSO et précipitations ne devrait être observée que dans les régions où la température troposphérique force la température de surface. *Kang et al.* [2004] observent une telle corrélation négative dans le Pacifique sub-tropical ouest, une région où les couplages atmosphère-océan sont particulièrement actifs. A l'opposé, leurs simulations à SST fixé (donc sans couplage atmosphère-océan) ne montrent aucune corrélation négative, montrant que l'anti-corrélation provient probablement du couplage atmosphère-océan. La partie négative de la rétroaction vapeur d'eau pourrait expliquer ces résultats.

Ceci permettrait également d'expliquer le fait, soulevé par *Hall et Manabe* [1999], que la RVE est deux fois plus efficace pour amplifier le changement climatique que pour amplifier les anomalies de température : dans le cas des anomalies, leurs plus courtes échelles de temps réduit l'efficacité du pôle long et renforce celle du pôle rapide : la RVE est donc "*moins positive*" que pour le changement climatique dont le temps caractéristique est très long.

D'une manière plus générale, la dynamique des rétroactions est nécessaire à chaque fois que les forçages sont variables. Dans le cas du changement climatique, s'ajoutent aux réponses de long terme les réponses de court terme du système climatique, qui peuvent modifier de manière significative les transitoires du système.

3.7 Discussion

L'analyse présentée ici utilise le Système Linéaire Tangent du modèle pour étudier la dynamique du système. Il a été montré que la mise en place d'une rétroaction est un processus transitoire, avec ses propres temps caractéristiques, et ceci a mené à l'introduction du facteur de rétroaction, qui dépend du temps et qui donne la réponse du modèle complet à une perturbation qui mènerait à un saut instantané si la rétroaction était coupée.

Ceci a permis de caractériser la rétroaction vapeur d'eau dans le modèle : elle a un gain statique à l'équilibre de 38%, proche des résultats d'autres études, et un temps caractéristique long de 8 ans qui montre l'inertie du mécanisme de la RVE. On montre donc que la RVE n'est pleinement active que dans le cas de perturbations de plus de 8 ans, ce qui n'est par exemple pas le cas des éruptions volcaniques.

De plus, la RVE est négative dans le modèle pour les échelles de temps plus courtes que quelques années et ne devient positive que sur des échelles de temps plus longues. Cet effet, venant du flux latent nécessaire pour ramener à l'équilibre l'humidité relative, suggère que la RVE pourrait réduire la variabilité naturelle de la température troposphérique sur des échelles courtes, alors qu'elle l'augmente sur les échelles longues. Cette particularité de la réponse de la vapeur d'eau serait responsable d'un "retard au réchauffement" dans le cas d'un forçage par le CO₂.

D'une manière plus générale, cette modélisation de la rétroaction vapeur d'eau explique la différence entre un forçage par les GES, dans lequel le pôle négatif est sensible, et un forçage par le flux solaire, dans lequel ce pôle n'est pas visible.

L'analyse est ici entièrement basée sur le SLT à l'équilibre. Il n'est pas évident d'étendre l'analyse aux systèmes non-linéaires hors-équilibre, pour lesquels le SLT n'est pas autonome¹².

La même méthode va maintenant être appliquée dans la suite de cette thèse à la rétroaction économie-climat, pour caractériser les échelles de temps des interactions entre l'économie et le climat.

¹²Une approche basée sur le propagateur est alors sans doute à privilégier.

Références

- Bates, On the ventilation feedback, *Working Paper*, 2003.
- Bode, H., *Network Analysis and Feedback Amplifier Design*, Van Nostrand, New York, 1945.
- Cherkaoui, M., J. Dufresne, R. Fournier, J. Grandpeix, et A. Lahellec, Monte-Carlo simulation of radiation in gases with a narrow-band model and a net-exchange formulation, *J. Heat Transfer*, *118*, 401–407, 1996.
- Coakley, J., Feedbacks in vertical-column energy balance models, *J. Atmos. Sci.*, *34*, 465–470, 1977.
- Colman, R., S. Power, et B. McAvaney, Non-linear climate feedback analysis in an atmospheric general circulation model, *Climate Dynamics*, *13*(10), 717–731, 1997.
- Doutriaux-Boucher, M., et J. Quaas, Evaluation of cloud thermodynamics phase parametrizations in the lmdz gcm using polder satellite data, *Geophysical Research Letters*, *31*, 6126–6130, 2004.
- Douville, H., F. Chauvin, S. Planton, D. Royer, J.-F. and Salas-Melia, et S. Tyteca, Sensitivity of the hydrological cycle to increasing amounts of greenhouse gases and aerosols, *Climate Dynamics*, *20*(1), 45–68, 2002.
- Emanuel, K., A scheme for representing cumulus convection in large scale models, *J. Atmos. Sci.*, *48*, 2313–2335, 1991.
- Emanuel, K., A cumulus representation based on the episodic mixing model : the importance of mixing and microphysics in predicting humidity., *In : The representation of Cumulus Convection in Numerical Models ; A.M.S. Meteorological Monographs*, *24*(46), 185–192, 1993.
- Emanuel, K., et M. Zivkovic-Rothman, Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models, *J. Atmos. Sci.*, *56*, 1766–1782, 1999.
- Goodman, J., et J. Marshall, Using neutral singular vectors to study low-frequency atmospheric variability (in press), *J. Atmos. Sci.*, 2003.
- Green, J., Division of radiative streams into internal transfer and cooling to space, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, *93*, 371–372, 1967.
- Hall, A., et S. Manabe, The role of water vapor feedback in unperturbed climate variability and global warming, *Journal of Climate*, *12*, 2327–2346, 1999.
- Hall, A., et S. Manabe, Effect of water vapor feedback on internal and anthropogenic variations of the global hydrologic cycle., *Journal of Geophysical Research*, *105*, 6935–6944, 2000a.
- Hall, A., et S. Manabe, Suppression of ENSO in a coupled model without water vapor feedback, *Climate Dynamics*, *16*(5), 393–403, 2000b.

- Hansen, J., D. Lacis, D. Rind, G. Russell, P. Stone, I. Fung, R. Ruedy, et J. Lerner, Climate Sensitivity : Analysis of Feedback Mechanisms, dans *Climate Processes and Climate Sensitivity*, vol. 5, édité par J. Hansen et T. Takahashi, pp. 130–162, Geophysical monograph 29, AGU, 1984.
- Hansen, J., M. Sato, et R. Ruedy, Radiative forcing and climate response, *Journal of Geophysical Research*, 102(D6), 6831–6864, 1997.
- Hartmann, J. M., R. Levi Di Leon, et J. Taine, Line-by-Line and Narrow-Band Statistical Model Calculations for H_2O , *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 32(2), 119–127, 1984.
- Hu, Y., et K. Tung, Interannual and Decadal variations of planetary wave activity, stratospheric cooling, and northern hemisphere annular mode, *Journal of Climate*, 15, 1659–1673, 2002.
- IPCC, *Climate Change 2001 : The Scientific Basis* [J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. Van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C.A. Johnson], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New-York, NY, USA, 2001.
- Joshi, M., K. Shine, M. Ponater, N. Stuber, R. Sausen, et L. Li, A comparison of climate response to different radiative forcings in three general circulation models : towards an improved metric of climate change, *Climate Dynamics*, 20, 843–854, 2003.
- Kang, I.-S., J.-Y. Lee, et C.-K. Park, Potential predictability of summer mean precipitation in a dynamical seasonal prediction system with systematic error correction, *Journal of Climate*, 17(4), 834–844, 2004.
- Kothavala, Z., R. Oglesby, et B. Saltzman, Sensitivity of the equilibrium surface temperature of CCM3 to systematic changes in atmospheric carbon dioxide, *Geophysical Research Letters*, 26(2), 209–212, 1999.
- Lindzen, S., Climate dynamics and global change, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 26, 353–378, 1993.
- Manabe, S., et R. Wetherald, The effects of doubling CO_2 concentration on the climate of a general circulation model., *J. Atmos. Sci.*, 32, 3–15, 1975.
- Salby, M., *Fundamentals of Atmospheric physics*, International Geophysics Series, Edited by R. Dmowska and J.R. Holton, Academic Press, San Diego, California, United-States, 626 pp, 1996.
- Schneider, E., B. Kirtman, et R. Lindzen, Upper tropospheric water vapor and climate sensitivity, *J. Atmos. Sci.*, 56, 1649–1658, 1999.
- Soufiani, A., J. M. Hartmann, et J. Taine, Validity of Band-Model Calculations for CO_2 and H_2O Applied to Radiative Properties and Conductive-Radiative Transfer, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 33(3), 243–257, 1985.

-
- Wetherald, R., et S. Manabe, Cloud feedback processes in a general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, *45*, 1397–1416, 1988.
- Yang, F., A. Kumar, M. Schlesinger, et W. Wang, Intensity of hydrological cycles in warmer climates, *Journal of Climate*, *16*, 2419–2423, 2003.
- Zhang, M., J. Hack, J. Kiehl, et R. Cess, Cloud feedback processes in a general circulation model, *Journal of Geophysical Research*, *99*, 5525–5537, 1994.

Chapitre 4

Les échelles temporelles de la rétroaction économie-climat et le coût climatique de la croissance

Sommaire

4.1	Introduction et Motivations	134
4.2	Modèle	135
4.2.1	Module climatique	136
4.2.2	Module démographique	136
4.2.3	Module macroéconomique	137
4.2.4	Module d'émissions	139
4.2.5	Module d'impact et d'adaptation	139
4.2.6	Paramètres du modèle	141
4.3	Simulations numérique	142
4.4	La rétroaction économie-climat	145
4.4.1	Résultats numériques	146
4.4.2	Interprétation des pôles et coût climatique de la croissance	148
4.4.3	Conséquences pour l'analyse coût-bénéfice	148
4.4.4	Effet d'une perturbation permanente ou d'une perturbation ponctuelle des émissions	150
4.5	Conclusions	151
4.6	Les limitations propres aux modèles de croissance	153
	Références	156

4.1 Introduction et Motivations

On sait aujourd'hui que l'action de l'Homme, via ses émissions de gaz à effet serre, perturbe le climat d'une manière globale. En effet, ces gaz sont bien mélangés dans l'atmosphère et peuvent être mesurés par une variable unique, globale : la concentration atmosphérique. Le fait qu'il existe plusieurs gaz à effet de serre peut être contourné en utilisant le forçage radiatif qui permet, au premier ordre, de mesurer l'impact de l'Homme sur le climat via une unique variable.

Il est également certain que le climat influence en retour l'activité humaine, via différents processus tels que les événements extrêmes, l'impact du climat sur les rendements agricoles, la consommation d'énergie liée au chauffage ou à la climatisation... Cette action du climat sur les sociétés est cependant essentiellement locale et hétérogène, et il n'y a pas de consensus sur l'impact global du climat sur l'économie, et en particulier sur les émissions totales de gaz à effet de serre.

C'est dans ce contexte que s'inscrivent les scénarios climatiques de l'IPCC : ils se donnent un scénario économique, et en déduisent une évolution de la concentration équivalente de CO₂, c'est-à-dire la concentration de CO₂ qui donnerait le même forçage radiatif que le panier de gaz à effet de serre effectivement présents dans l'atmosphère dans chaque scénario. A partir de cette trajectoire de concentration, on calcule la trajectoire climatique, *en boucle ouverte*, c'est-à-dire sans rétroaction du climat sur l'économie, les émissions et donc les concentrations. On suppose donc que, quelque soient les résultats du modèle climatique, les concentrations de GES sont fixées une fois pour toute.

La validité de cette hypothèse n'est pas évidente. Il est tout à fait envisageable que le climat et son changement aient une influence sur l'économie et les émissions. Si cette influence était significative, par exemple parce que les impacts du changement climatique empêcheraient certains pays pauvres de se développer aussi vite que dans un monde sans changement climatique, les scénarios climatiques de l'IPCC seraient *incohérents*. En effet, les concentrations qu'ils utiliseraient comme entrée seraient alors incompatibles avec le climat qu'il fournissent en sortie.

Valider la méthodologie de l'IPCC demande donc de caractériser la boucle de rétroaction entre l'économie et le climat, et de voir si elle peut être négligée sur les horizons temporels de ces scénarios, c'est-à-dire sur un siècle. Ce problème est absolument essentiel car la construction de *scénarios cohérents* est la seule réponse dont nous disposons face aux incertitudes fondamentales concernant le futur socio-économique. Ces scénarios cohérents, représentant des futurs possibles, peuvent illustrer le problème et guider la décision. Le plus important est donc de s'assurer que ces scénarios ne comportent pas de contradictions internes.

D'une manière connexe, l'horizon temporel choisi par l'IPCC – un siècle – doit être validé, ou au moins justifié. Cet horizon temporel est-il adapté à la problématique que l'on se donne ? Permet-il une prise en compte suffisante des impacts de long-terme ? On sait déjà que cela n'est pas le cas, puisque même une stabilisation immédiate des concentrations de GES aurait des conséquences climatiques sur plusieurs siècles, voir plus (notamment liés au réchauffement de l'océan profond et à la fonte des glaciers et des calottes). Mais, même en négligeant les phénomènes les plus lents, le délai entre le moment où une tonne de GES est émise et le moment où l'on observe des conséquences sur l'économie peut être extrêmement long et doit être évalué.

De façon plus large, les outils que nous avons à mettre en oeuvre pour comprendre et modéliser le changement climatique dépendent largement des échelles de temps impliquées dans le problème. C'est donc un point de départ tout à fait justifiable de mesurer, même de manière très approximative, les temps caractéristiques du processus que l'on cherche à comprendre, afin d'affiner le "cahier des charges" des modèles suivants. Par exemple, une bonne connaissance des temps caractéristiques et de leurs interactions, pourrait permettre, comme le propose *Haurie* [2005], une séparation rigoureuse entre le court et le long terme, qui pourrait rendre possible des analyses coût-bénéfice sur des systèmes de grande complexité.

Pour cela, il est nécessaire de modéliser de façon simple les processus qui mettent en jeu des inerties dans le système économie-climat :

- croissance et accumulation du capital, progrès technique, démographie, processus d'adaptation progressive à de nouvelles conditions climatiques dans la sphère socio-économique ;
- concentrations de GES et inertie du climat dans la sphère climatique.

C'est l'interaction de ces inerties qui va décider des temps caractéristiques de la rétroaction économie-climat. Ceci nécessite de dépasser le cadre des nombreuses études énumératives conduites jusqu'ici et qui considèrent seulement l'impact du changement climatique en un instant donné (par exemple *Nordhaus* [1991], *Cline* [1992] ou *Mendelsohn et Neumann* [1999]). Il est nécessaire de suivre une approche dynamique, comparable à celle de *Fankhauser et Tol* [2005] et *Tol* [2002b], et de se focaliser sur les transitoires qui nous mènent de l'état actuel du système économie-climat, où les sociétés sont supposées adaptées à leur climat, au nouvel état dans lequel les sociétés sont adaptées à un climat modifié.

4.2 Modèle

Ce travail utilise un modèle très simple, composé de 5 modules : un module climatique, un module démographique, un module macro-économique, un module pour les émissions et un module pour les impacts. Les variables

K	Capital productif	milliers de milliards de U.S.\$
Y	Production	milliers de milliards de U.S.\$
I	Investissement productifs	milliers de milliards de U.S.\$
τ_d	Temps de dépréciation	années
L	Population (proportionnel au travail)	millions d'habitants
γ_L	Croissance de la population	% par an
A	Productivité	pas d'unité
E	Emissions de GES	GtC/an
D	Intensité d'émissions	Pas d'unité
T_s	Température de surface	K
T_{ada}	Température d'adaptation	K
X	Impacts du changement climatique sur la productivité	pas d'unité

TAB. 4.1: Variables du modèle

du modèle (à l'exception de celles du modèle climatique) sont reproduites dans la table 4.1.

Les modules sont présentés dans les parties suivantes.

4.2.1 Module climatique

Le module climatique est le modèle climatique utilisé dans le chapitre 3, dans une version à nuage interactifs¹ dont la sensibilité au doublement de la concentration de CO₂ est de +2.8K, dans la gamme acceptée par *IPCC* [2001a].

Dans la suite, on va utiliser la température moyenne de surface fournie par ce modèle comme un *index climatique* mesurant le changement du climat. Ceci ne veut pas dire que les impacts ne sont provoqués que par l'augmentation de température. Cela sous-entend seulement que les variations de toutes les variables pertinentes peuvent être reliées aux variations de température globale, et que la température peut servir d'index pour mesurer le changement climatique dans toute sa complexité. Dans ce cadre, on peut résumer les impacts à un effet du changement de température globale, comme l'on fait les auteurs des évaluations d'impacts précédentes.

4.2.2 Module démographique

On utilise ici la même modélisation que le modèle DICE [Nordhaus, 1994]. Ce module reproduit un scénario avec stabilisation de la population

¹Dans ce modèle la couverture nuageuse haute augmente avec la température.

mondiale en 2200, autour de 11.5 milliards d'individus. Ce scénario est intermédiaire entre les SRES/A2 et B2 [IPCC, 2000].

Les équations sont les suivantes :

$$\frac{\partial L}{\partial t} = \gamma_L \cdot L \quad (4.1)$$

$$\gamma_L = \gamma_L^0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_L}} \quad (4.2)$$

On a donc bien la croissance de la population γ_L qui tend vers zéro, et la population L qui se stabilise.

Les impacts du changement climatique et de l'économie sur la croissance de la population sont négligés, même s'ils sont potentiellement une source importante d'interaction entre le climat et l'économie (IPCC [2001b], Chp.9).

4.2.3 Module macroéconomique

Le modèle macroéconomique utilisé est un modèle de croissance de Solow [Solow, 1956], proche de celui utilisé par Nordhaus [1994]. C'est un modèle de simulation, sans optimisation inter-temporelle, le taux d'épargne est fixé à 20%. Le modèle tient compte d'un progrès technique exogène, qui augmente la productivité et réduit les émissions de CO₂ par unité produite.

Ses équations sont les suivantes :

$$\frac{\partial K}{\partial t} = I - \frac{1}{\tau_d} \cdot K \quad (4.3)$$

$$Y = X \cdot A \cdot \lambda \cdot K^{1/3} \cdot L^{2/3} \quad (4.4)$$

$$I = \alpha_I \cdot Y \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \gamma_A \cdot A \quad (4.6)$$

Où Y est la production ; L le travail ; K le capital productif ; A la productivité totale ; X les impacts du changement climatique sur la productivité ; I l'investissement ; λ est un paramètre de calibrage de la production, fixé tel que $A = 1$ à $t = 0$; α_I est le taux d'épargne ; et γ_A est le paramètre de productivité. Pour faciliter l'analyse en terme de temps caractéristique, la dépréciation est exprimée via un temps de vie du capital (τ_d) plutôt que par un taux de dépréciation classique.

Pour faciliter l'étude du modèle, il est utile de séparer les effets de la croissance de la population et de l'accroissement de la productivité. Pour cela on normalise la production Y , le capital K , l'investissement I par leurs

valeurs d'équilibre : à chaque instant t , Y^* , K^* et I^* sont les valeurs d'équilibre de la production, du capital et de l'investissement si la population et la productivité étaient fixés à leurs valeurs à l'instant t . Ces valeurs d'équilibre seraient les valeurs réalisées s'il n'y avait aucune inertie dans le système économique. On peut les interpréter comme des *capacités* de l'économie.

Y^* , K^* et I^* sont proportionnels à $(L \cdot A^{3/2})$, comme le montrent les équations du modèle quand toutes les dérivés temporelles sont fixées à zéro. On définit donc les variables normalisées de la façon suivante :

$$K^* = K \cdot \frac{L_0}{L} \cdot A^{-3/2} \quad (4.7)$$

$$Y^* = Y \cdot \frac{L_0}{L} \cdot A^{-3/2} \quad (4.8)$$

$$I^* = I \cdot \frac{L_0}{L} \cdot A^{-3/2} \quad (4.9)$$

Où L_0 est la population initiale. On remarque que les variables normalisées sont égales aux variables classique à $t = 0$, car $A(t = 0) = 1$.

On peut alors récrire les équations du modèle :

$$\frac{\partial K^*}{\partial t} = \gamma_K \cdot K^* \quad (4.10)$$

$$\gamma_K = \frac{I^*}{K^*} - \frac{1}{\tau_d} - \gamma_L - \frac{3}{2}\gamma_A \quad (4.11)$$

$$Y^* = X \cdot \lambda \cdot L_0^{2/3} \cdot K^{*1/3} \quad (4.12)$$

$$I^* = \alpha_I \cdot Y^* \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \gamma_A \cdot A \quad (4.14)$$

La variable Y^* est la production, normalisée par la production à l'équilibre quand la population et la productivité sont fixées. Cette écriture permet d'exprimer le modèle sous une forme qui ne diverge pas vers l'infini à cause du progrès technique, et donc d'utiliser les méthodes d'analyse de système au voisinage d'un équilibre. De plus cela permet d'exprimer l'écart entre la production réalisée et la capacité de production d'équilibre de l'économie, qui serait la production s'il n'y avait pas d'inertie et de changement permanent de A et L .

On remarque dans l'Eq.(4.11) les signes négatifs devant γ_L et γ_A . Ceci vient de l'inertie du capital productif : quand la population ou la productivité augmente plus rapidement, le capital productif est plus en retard par rapport à sa valeur d'équilibre. En d'autres termes : le capital productif normalisé est

le rapport du capital productif par le capital productif à l'équilibre ; quand la population ou la productivité augmente, le dénominateur augmente instantanément alors que le numérateur augmente lentement (mais il augmente autant, asymptotiquement). Ce rapport est donc relié négativement à la croissance de la population et de la productivité.

4.2.4 Module d'émissions

Tous les GES sont modélisés par une concentration équivalente de CO₂. Les émissions sont supposées proportionnelles à la production, via un unique facteur représentant à la fois l'intensité énergétique² et l'intensité carbone³. On suppose une décroissance exogène des émissions par unité produite. Par commodité, on suppose que cette décroissance compense la croissance des émissions liée à la croissance économique due à l'accroissement de la productivité.

$$E = \frac{1}{A^{3/2}} \cdot \beta \cdot Y = \beta \cdot \frac{L}{L_0} \cdot Y^* \quad (4.15)$$

Pour des raisons de simplicité, il n'y a pas de vrai cycle du carbone dans le modèle. Seul un puits naturel est considéré, qui absorbe 40% des émissions. Ceci correspond à la situation actuelle. On néglige donc explicitement le rôle du cycle du carbone, même si des travaux récents [*Friedlingstein et al.*, 2003; *Cox et al.*, 2000] ont montré que ce cycle pourrait bien être un processus essentiel dans la dynamique du système complet.

Le scénario de contrôle du modèle (baseline) aboutit à un doublement de la concentration de CO₂ autour de 2100, ce qui correspond au scénario de base généralement accepté.

Cette partie du modèle est très faible et demanderait des améliorations, mais cette faiblesse ne change pas les conclusions que nous en tirerons.

4.2.5 Module d'impact et d'adaptation

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, on peut simplifier le discours sur les dommages en séparant les dommages transitoires et les dommages permanents. Dans ce travail, nous nous basons sur une hypothèse très optimiste : on supposera qu'il n'y a pas de dommages permanents (*i.e.* que le climat actuel n'est en rien supérieur au climat futur) mais que les dommages viendront de notre mauvaise adaptation à un climat en évolution.

²L'intensité énergétique est la quantité d'énergie utilisée pour produire une unité de biens.

³L'intensité carbone est la quantité de carbone émise pour produire une unité d'énergie.

Cela suppose que nos sociétés sont capables, à très long terme, de s'adapter à n'importe quel climat aussi bien qu'à l'actuel.

On s'intéresse donc avant tout à la période transitoire pendant laquelle l'économie subit des impacts dus à son inadaptation et doit s'adapter aux nouvelles conditions ⁴.

Il est évident que modéliser les impacts transitoires demande de modéliser, même de manière simple, la dynamique de l'adaptation, et pas seulement son résultat final. Pour cela, on introduit une température d'adaptation T_{ada} dépendante du temps : A chaque instant t , $T_{ada}(t)$ représente le climat auquel nos sociétés et nos économies sont adaptées. On suppose donc que quand la température de surface est égale à cette température d'adaptation, les sociétés sont parfaitement adaptées à leur climat et qu'il n'y a pas d'impact particulier du climat. Si ces températures sont différentes, cela veut dire qu'il y a inadaptation et que des impacts du changement climatique se manifestent, (1) via une réduction de la productivité (modélisée par la variable X); (2) via une réduction de la durée de vie du capital (modélisée par les variations de τ_d), à la fois car le capital peut être endommagé par le climat mais aussi parce que ce capital doit être remplacé précocement pour s'adapter au nouveau climat.

Ces deux impacts sont supposés proportionnels à l'inadaptation, c'est-à-dire à la différence entre T_{ada} et T_s .

$$X = 1 - \alpha_X \cdot |T_{ada} - T_s| \quad (4.16)$$

$$\tau_d = \tau_d^0 \cdot (1 - \alpha_\tau \cdot |T_{ada} - T_s|) \quad (4.17)$$

L'adaptation est modélisée par le fait que la température d'adaptation T_{ada} converge vers la température de surface avec un temps caractéristique τ_{ada} . Ceci signifie que si le climat est stable, l'adaptation fait converger T_{ada} vers la température de surface en τ_{ada} , et que si le climat évolue, l'adaptation est représenté par une course entre l'évolution du climat et le processus d'adaptation.

$$\frac{\partial T_{ada}}{\partial t} = \frac{1}{\tau_{ada}}(T_s - T_{ada}) \quad (4.18)$$

Bien sûr, le temps d'adaptation τ_{ada} dépend fortement du temps de dépréciation du capital : dans une économie où le capital est remplacé fréquemment, il est plus rapide et moins coûteux de l'adapter au fur et à mesure que

⁴De plus, l'effet direct du climat sur le bien-être n'est pas pris en compte, parce qu'il est difficile à évaluer, et parce que l'on ne cherche pas à mesurer les dommages du changement climatique mais à caractériser les interactions entre le climat et l'économie.

le climat change. Dans la suite on fixe τ_{ada} à 100 ans, car cela correspond au temps caractéristique des secteurs les plus inertes de l'économie (logement, infrastructure de transport, système énergétique).

Il est remarquable qu'on ne fait pas de distinction entre adaptation planifiée (proactive) et adaptation autonome (réactive). On résume donc la complexité des mécanismes d'adaptation à une adaptation réactive avec un simple et unique temps caractéristique. On verra au chapitre 5 à quel point ceci est insuffisant, même si ce n'est pas gênant pour le problème que l'on se propose de regarder dans ce chapitre.

Bien qu'aussi simple que celui des fonctions de dommages traditionnelles, ce formalisme présente l'avantage de permettre la prise en compte de la période transitoire pendant laquelle le système productif n'est pas adapté aux conditions climatiques. De plus, (1) il prend en compte à la fois l'amplitude et le rythme du changement climatique; (2) le climat présent n'est pas une référence absolue dans le modèle; (3) un rythme de l'adaptation est intégré au raisonnement; (4) tout changement de température (à la hausse comme à la baisse) pose problème, ce qui est plus réaliste que les fonctions de dommages pour lesquelles une baisse de température est toujours bénéfique.

4.2.6 Paramètres du modèle

Les paramètres du modèle sont choisis pour obtenir un scénario de contrôle réaliste. Les valeurs sont reproduites dans la table 4.2. La majorité des paramètres sont tirés de DICE (*Nordhaus* [1994]).

Plusieurs scénarios sur les impacts sont considérés. Dans le scénario "impacts modérés", une inadaptation de 1°C réduit la productivité de 2%⁵. C'est légèrement supérieur aux conclusions d'études d'impacts (*Fankhauser et al.* [1999], *Tol* [2002a], *IPCC* [2001b], Chp.19), mais ceci est compensé par le fait que l'adaptation est explicitement représentée. Un scénario à "impacts importants" suppose une perte de productivité de 4% par degré d'inadaptation.

L'effet du changement climatique sur le temps de dépréciation est peu documenté, même si son existence a été mentionnée par *Fankhauser et al.* [1999]. Le scénario "impacts modérés" suppose qu'une inadaptation de 1 °C réduit la durée de vie du capital de 5%, et le scénario "impacts importants" suppose une réduction de 10%.

A cause de l'important degré d'incertitude qui caractérise le problème du changement climatique, il existe une gamme assez large de valeurs possibles pour chaque paramètre. En caricaturant à peine, on peut donc démontrer à peu près ce que l'on veut en choisissant soigneusement son jeu de paramètres.

⁵Rappelons que cela ne veut pas dire qu'un réchauffement de 1°C réduit la productivité de 2% puisque l'adaptation a lieu en parallèle au réchauffement.

L_0	Population initiale	5632,7 millions (DICE)
K_0	Capital productif initial	21 10^{12} de U.S.\$
Y_0	Production initiale	14,6 10^{12} de U.S.\$
T_0	Température de surface initiale	287 K
T_{ada}^0	Température d'adaptation initiale	287 K
τ_d^0	Temps de dépréciation initial	20 ans
γ_L^0	Croissance initiale de la population	1,57% par an (DICE)
τ_L	Temps relatif à la population	4,5 ans (DICE)
β	Intensité d'émissions initiale	0,5 GtC / 10^{12} U.S.\$
λ	Facteur de production	0,01685 (DICE)
α_I	Taux d'épargne	20% (DICE)
γ_A	Croissance de la productivité	1,5% par an
τ_{ada}	Temps caractéristique de l'adaptation	100 ans
α_X	Perte de productivité pour une inadaptation de 1 K	2% ("impacts modérés")
α_τ	Variation de τ_d pour une inadaptation de 1 K	5% ("impacts modérés")

TAB. 4.2: Paramètres du modèle.

Cela illustre le besoin d'une approche capable de produire des faits stylisés qualitatifs et des résultats quantitatifs robustes, qui soient aussi indépendants que possible des paramètres incertains. Il est également nécessaire de mesurer la robustesse des résultats par des analyses de sensibilité.

Il est possible d'obtenir des résultats robustes malgré les incertitudes car il y a dans le système économie-climat de nombreuses contraintes physiques (inertie de l'océan et du cycle du carbone, effet intégrateur de la concentration) et économiques (contraintes d'investissement, productivité du travail...) qui permettent de restreindre fortement l'ensemble des possibles et de dégager des informations robustes. Pour aller dans ce sens, le modèle est construit selon le Formalisme d'Evolution par Transfert (TEF), déjà utilisé dans le chapitre précédent.

4.3 Simulations numériques

Un ensemble de simulations a d'abord été réalisé : une simulation de contrôle, une simulation avec des impacts économique modérés, et une simulation avec des impacts importants. La figure de gauche de la figure 4.1 montre l'évolution de la concentration de CO_2 , qui atteint le niveau du doublement autour de 2100. La concentration en 2200 est entre 1000 et 1200 ppmv. La figure de droite montre l'inadaptation $|T_s - T_{ada}|$. On peut voir que l'inadaptation est stabilisée autour de 2150, grâce aux processus d'adaptation et au ralentissement de l'augmentation de température.

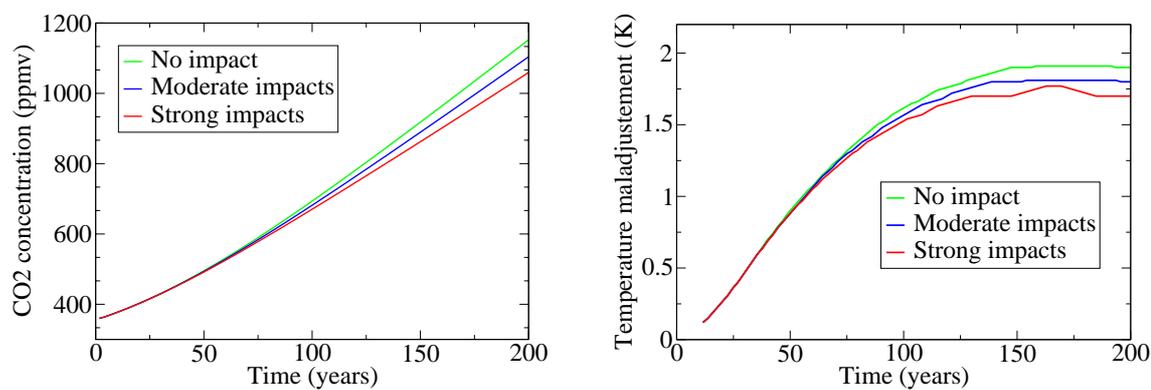


FIG. 4.1: Evolution de la concentration de CO_2 (à gauche) et différence entre la température de surface et la température d'adaptation (à droite) sur 200 ans pour les 3 scénarios.

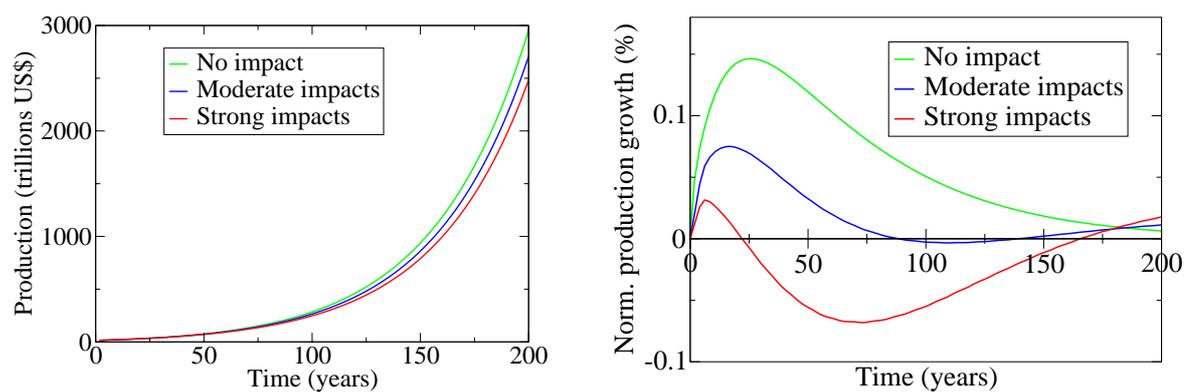


FIG. 4.2: Evolution de la production (à gauche) et de γ_Y (à droite) sur 200 ans pour les 3 scénarios.

La figure de gauche de la figure 4.2 reproduit l'évolution de la production. Apparemment, la production n'est pas beaucoup touchée par les impacts : en 2100, la production est réduite de 6% sur le siècle dans le cas des impacts modérés, ce qui est faible comparé à la croissance économique sur la période (une augmentation de 2000%). Cette faible valeur n'est pas étonnante compte tenu des évaluations de dommages qui ont servi à calibrer le modèle.

Pour comprendre les processus sous-jacents, il est nécessaire de regarder le taux de croissance de la production normalisée, $\gamma_Y = (dY^*/dt)/Y^*$, c'est-à-dire la croissance de la production rapportée à la production d'équilibre qui serait possible compte-tenu de la taille de la population et du niveau de la productivité. La figure de droite de la figure 4.2 montre l'évolution de γ_Y sur 200 ans. Dans le cas sans impact, la positivité de γ_Y vient du ralentissement de la croissance de la population : comme la population croît moins vite, la production est plus proche de la production d'équilibre.

La réduction de croissance normalisée due aux impacts du changement climatique est surtout sensible sur le moyen-terme : entre 0,05% et 0,2% entre 2025 et 2075, selon le niveau des impacts. Après 2175, le changement climatique est plus lent et l'adaptation devient capable de prévenir les dommages. A très long terme (non visible sur la figure), parce que les dommages permanents sont supposés nuls, les dommages du changement climatique sont nuls et les productions normalisées convergent quelque soit le niveau des impacts. Toutefois, ces impacts nuls sur le long-terme n'empêchent pas l'existence de dommages significatifs à moyen-terme.

La figure de droite permet de comprendre que les différences de production visibles en fin de simulations dans la figure de gauche viennent en fait de pertes de production invisibles en milieu de simulations, qui sont ensuite amplifiées par la croissance économique. Les courbes de production cachent donc les dommages réels : les pertes de production de moyen-terme sont importantes alors que les différences de long-terme entre scénarios sont faibles.

L'expression des dommages comme un différentiel entre une capacité de production d'équilibre et une production réalisée semble plus pertinente qu'une expression en termes de production, car elle permet de prendre en compte une *relativité des attentes* : compte tenu de la croissance économique des dernières décennies, avoir aujourd'hui le pouvoir d'achat des classes les plus favorisées d'il y a cinquante ans serait considéré comme difficile à vivre. Ce phénomène n'est pas visible dans des comparaisons de consommation ou de production, mais l'est si l'on considère des écarts entre une production réalisée et une capacité de production.

Ces résultats illustrent le fait qu'il n'est pas trivial d'analyser une trajectoire de modèle pour caractériser et quantifier un processus. Les outils d'analyse de boucle de rétroaction sont ici proposés pour répondre à ce pro-

blème. Comme dans le chapitre précédent, il est essentiel de considérer les transitoires, d'autant plus qu'il n'y a pas d'impacts permanents.

4.4 La rétroaction économie-climat

Nous suivons la méthodologie décrite dans le chapitre précédent, en choisissant les émissions E comme dernière variable retenue. L'analyse du modèle par transformée de Borel, donne alors par transformée inverse, une relation entre le comportement du modèle à boucle ouverte et le comportement du modèle à boucle fermée :

$$\delta E(t) = \mathcal{B}^{-1} \left[\frac{1}{1 - g_E(\tau)} \right] * \frac{d}{dt} \delta E_{ins}(t) \quad (4.19)$$

où δE est la variation des émissions E , donnée par le système linéaire tangent (SLT), quand la boucle économie-climat est fermée ; $\delta E_{ins}(t)$ est la variation des émissions E , donnée par le SLT, quand la boucle est ouverte ; $g_E(\tau)$ est le gain dynamique de la rétroaction économie-climat, qui est calculée par la résolution du SLT par transformée de Borel. La réécriture du modèle sous sa forme (4.10-4.14) permet de décrire le système économique en croissance équilibrée sous la forme d'un système à l'équilibre stable en γ_Y et γ_K . Ceci permet d'utiliser le SLT, même si le système réel est hors-équilibre.

Il est important de noter que ce que l'on appelle ici *modèle à boucle ouverte* est un modèle dans lequel l'influence du climat en retour sur l'économie – via les impacts – serait négligé. C'est donc un modèle intégré qui suit le protocole de l'IPCC, où l'évaluation des impacts du changement climatique se fait pas-à-pas : construction de scénarios économiques et d'émissions, simulation de l'évolution du climat, évaluation des impacts. La différence entre le modèle à boucle ouverte et le modèle à boucle fermée nous donne donc une évaluation de l'erreur que l'on fait en suivant cette méthodologie.

De la même manière qu'au chapitre 3, on définit ensuite le facteur de rétroaction comme :

$$FF_E(t) = \mathcal{B}^{-1} \left[\frac{1}{1 - g_E(\tau)} \right] \quad (4.20)$$

Le facteur de rétroaction $FF_E(t)$ peut être interprété comme la variation de E dans le modèle complet, en réponse à une perturbation qui mènerait dans le modèle à boucle ouverte à un saut des émissions de 1 GtC à $t = 0$.

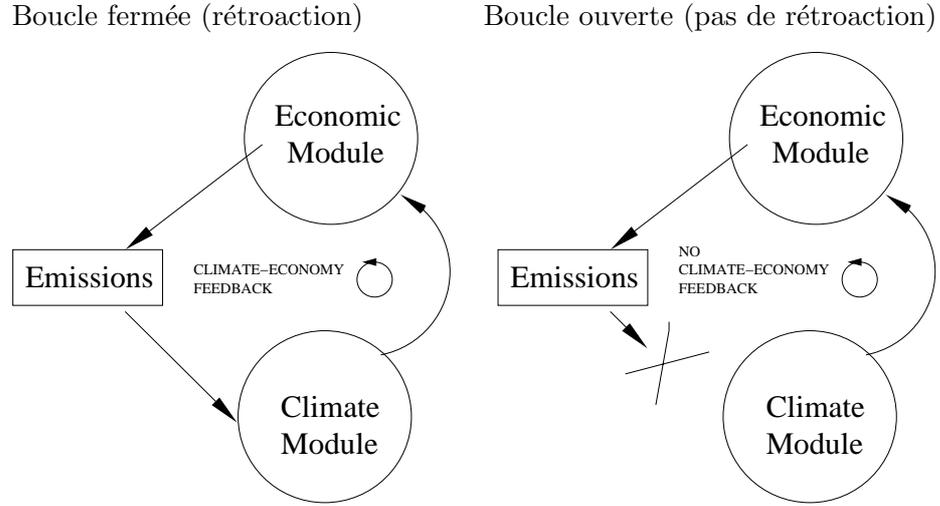


FIG. 4.3: Schéma de la rétroaction économie-climat (à gauche) ; et modèle à boucle ouverte (à droite).

En conséquence, la réponse du modèle à une perturbation plus réaliste s'obtient classiquement par le produit de convolution :

$$\delta E(t) = FF_E(t) * \frac{d}{dt} \delta E_{ins}(t) \quad (4.21)$$

Ici $\delta E(t)$ est la réponse du modèle complet avec rétroaction économie-climat à une perturbation qui aurait mené à une réponse quelconque $\delta E_{ins}(t)$ dans le modèle sans rétroaction économie-climat, c'est-à-dire suivant le protocole de l'IPCC.

4.4.1 Résultats numériques

La résolution numérique du SLT du modèle donne alors un facteur de rétroaction composé de deux *pôles*, c'est-à-dire deux exponentielles dépendant du temps :

$$FF_E(t) = 1 + \lambda_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right) + \lambda_2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}\right) \quad (4.22)$$

où les valeurs numérique dans les deux hypothèses sur les impacts sont reproduites en Tab. 4.3. Le facteur de rétroaction est reproduit en Fig. 4.4.

Hypothèse	λ_1	τ_1	λ_2	τ_2	gain statique
Impacts modérés	$7,5 \cdot 10^{-2}$	30,5 yrs	$-1,9 \cdot 10^{-1}$	77,5 yrs	-11,5%
Impacts importants	$2,3 \cdot 10^{-1}$	33,6 yrs	$-4,5 \cdot 10^{-1}$	62,9 yrs	-20,7%

TAB. 4.3: Pôles de la rétroaction économie-climat et gain et facteur statique pour 2 hypothèses sur le niveau des impacts.

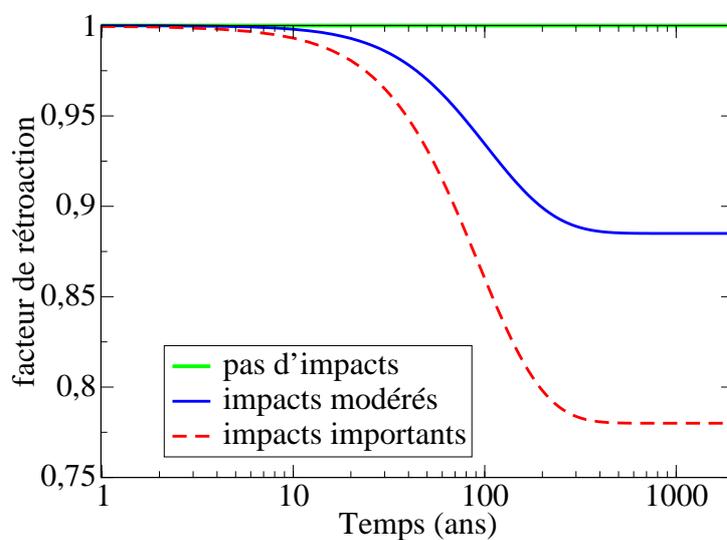


FIG. 4.4: Facteur de rétroaction. Si les émissions sont perturbées par un saut de 1 GtC à $t = 0$, alors la variation réelle des émissions dans le modèle complet est donnée par cette fonction. Cette fonction permet donc de comparer une simulation type-IPCC à une simulation prenant en compte la rétroaction économie-climat.

4.4.2 Interprétation des pôles et coût climatique de la croissance

La complexité du modèle est donc résumée à deux pôles : la réponse du modèle à un saut exogène et permanent des émissions a deux composantes, chacune caractérisée par leur intensité et leur temps caractéristique. Une telle description de la réponse du modèle est rigoureuse et sépare utilement l'intensité et l'échelle de temps des processus.

Le premier pôle (positif et de court-terme) montre que, en raison de l'inertie du système, une réduction d'émissions n'a pas d'impact en retour sur l'économie avant 20 ans. Ceci illustre le besoin d'anticipation dans la gestion du problème du changement climatique : les actions n'ont aucune conséquence pendant 20 ans.

Le second pôle (négatif et de long-terme) représente la course entre le changement climatique et les processus d'adaptation. Son temps caractéristique est extrêmement long, à cause des effets d'inertie et de stock dans le système, et relativement indépendant du niveau des impacts. Ceci montre que l'on a rempli une partie de nos objectifs en fournissant une information plus robuste qu'une simple évaluation de la perte de production à une date donnée.

Ce second pôle représente également la baisse de croissance due aux impacts du changement climatique. En effet, cette rétroaction, appliquée ici aux émissions, peut être exprimée de manière équivalente en termes de production (cf Eq. (4.15)). Ceci montre alors que si la production est augmentée de manière exogène et permanente de 1 unité, $FF_E(t)$ donne la production additionnelle réellement obtenue, en tenant compte des impacts supplémentaires du changement climatique : l'unité de production additionnelle va en effet être responsable d'émissions supplémentaires, qui vont augmenter le changement climatique et créer des impacts supplémentaires qui vont réduire la production. Dans ce modèle, pour des impacts modérés, c'est 10% de l'unité de production additionnelle qui est finalement perdue à cause des impacts supplémentaires.

C'est ce que nous appellerons le *coût climatique de la croissance*, défini comme le coût des impacts du changement climatique dus aux émissions additionnelles créées par la croissance économique. Ce coût climatique est une façon originale et rigoureuse de quantifier les impacts du changement climatique.

4.4.3 Conséquences pour l'analyse coût-bénéfice

Il faut donc quasiment un siècle pour que la boucle totale émissions – concentration – climat – impacts s'exprime de façon significative. Quand on compare ce temps caractéristique aux autres échelles de temps du système

économique, on voit que ce processus ne peut jouer de rôle auto-régulateur sur les échelles de temps de l'ordre du siècle : si les impacts se révèlent importants, la réduction de croissance correspondante arrivera trop tard pour contrôler nos émissions et éviter le plus gros des impacts. Si le changement climatique est réellement dangereux, la seule façon d'éviter ses impacts est de mettre en place des mesures de réduction des émissions, avec une anticipation d'environ un siècle. Ceci montre par ailleurs qu'une analyse coût-bénéfice sur 100 ans ne prend en compte qu'une partie infime des bénéfices d'une politique de réduction des émissions.

Pour illustrer ce point, on s'intéresse aux pertes de production dues à la rétroaction économie-climat, c'est-à-dire à $(FF_E(t) - 1)$. Si la production est augmentée de façon exogène et permanente de une unité, les émissions vont augmenter, le changement climatique s'intensifier (par rapport au cas sans augmentation de production) et provoquer des pertes de production supplémentaires données par $(FF_E(t) - 1)$.

On peut ensuite actualiser ces pertes au taux d'actualisation δ , pour obtenir $P_a(t) = (FF_E(t) - 1)e^{-\delta t}$, la fonction de pertes actualisées. Cette fonction donne, instant par instant, la valeur nette présente des pertes de production dues au changement climatique additionnel. Elle est reproduite en Fig. 4.5. L'actualisation des pertes fait que les pertes sont nulles à l'infini⁶. Toutefois, on constate que le maximum des pertes actualisées s'étale entre 45 ans ($\delta = 3\%$ et impacts importants) et 95 ans ($\delta = 1\%$ et impacts modérés). Ainsi, malgré l'actualisation, les pertes "qui comptent" dans l'analyse coût-bénéfice sont très éloignées dans le temps. En particulier, les pertes actualisées au-delà du siècle sont significatives dans tous les cas, et très importantes pour $\delta = 1\%$, même dans le cas impacts modérés. La conclusion est donc que l'actualisation ne permet pas de négliger les impacts de très long terme.

Ceci démontre qu'une analyse coût-bénéfice (1) ne peut être faite que si les dommages sont connus sur un horizon temporel très long (nettement supérieur au siècle); (2) doit prendre en compte les dommages au-delà de l'horizon du siècle, malgré l'actualisation.

La valeur nette présente des pertes de production dues à la production d'une unité supplémentaire est donnée par :

$$P = \int_0^{\infty} P_a(t) dt$$

Ces valeurs nettes présentes sont données dans le tableau 4.4. On remarque que la différence entre les pertes totales actualisées dans le cas "impacts modérés" et dans le cas "impacts importants" est plus importante que

⁶On se place ici dans le cas d'un taux d'actualisation non-nul. A propos des difficultés de l'utilisation de taux d'actualisation nuls, voir *Haurie* [2002].

	$\delta = 1\%$	$\delta = 3\%$
Impacts modérés	1,4	0,6
Impacts importants	10,4	5,0

TAB. 4.4: Valeur nette présente des pertes de production dues au changement climatique supplémentaire créé par une augmentation de production exogène et permanente de une unité.

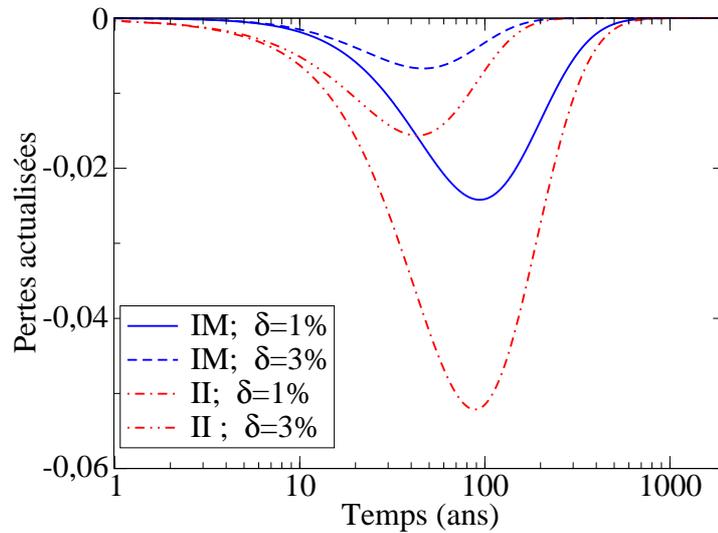


FIG. 4.5: Perte de production, actualisée, causée par le changement climatique additionnel créé par une augmentation exogène et permanente de la production de une unité à $t = 0$. “IM” fait référence aux simulations à impacts modérés et “II” aux simulations à impacts importants. δ est le taux d’actualisation, ici à 1 et 3%.

les différences instant par instant. Ceci vient du fait que les pertes sont à la fois plus importantes et plus rapprochées dans le temps dans le cas “impacts importants”.

4.4.4 Effet d’une perturbation permanente ou d’une perturbation ponctuelle des émissions

On a pu remarquer dans la Fig. 4.4 que le gain dynamique de la rétroaction économie-climat se stabilise sur le long terme, ce qui correspond à une stabilisation des dommages. En effet, on considère ici le rôle de la rétroaction, en réponse à un “saut” des émissions, c’est-à-dire une augmentation *instantanée et permanente* des émissions, qui correspond à une augmenta-

tion continue et constante de la concentration par rapport au scénario de référence (sans perturbation).

Malgré l'augmentation de la concentration, et donc de la température, la stabilisation des dommages a lieu grâce à l'adaptation, quand l'adaptation et le réchauffement sont "parallèles", c'est à dire quand l'inadaptation atteint un équilibre ($|T_s - T_{ada}| = cst$), malgré l'augmentation régulière de T_s .

Dans le modèle complet, dans un scénario climatique où la concentration de GES augmente constamment, on a finalement saturation de l'effet de serre, stabilisation de la température, et annulation de l'inadaptation et des dommages (cas des scénarios de la section 4.3). Ici, on considère l'effet d'une perturbation infinitésimale et permanente (le "saut" des émissions), qui mène à un accroissement continu de la concentration, mais qui n'a par définition pas d'influence sur la saturation (car elle est infinitésimale). En conséquence de quoi cette perturbation mène à une croissance continue de la température par rapport au scénario sans perturbation, et à une stabilisation des dommages, pas à leur annulation. Ceci peut également se dire en remarquant que la saturation est un phénomène non-linéaire, qui n'est par définition pas présent dans le SLT.

Le facteur de rétroaction représente la modification des émissions par la rétroaction, en réponse à un saut des émissions, c'est-à-dire à une perturbation permanente des émissions. On a ici considéré qu'une perturbation permanente avait plus de sens qu'une perturbation ponctuelle des émissions, car cette perturbation peut s'interpréter comme la mise en oeuvre d'une mesure de réduction d'émissions, dont les conséquences sont en général durables, ou comme une croissance de la production qui est permanente (en particulier si la croissance vient du progrès technique).

Si on s'intéresse à la modification des émissions par la rétroaction en réponse à une perturbation ponctuelle des émissions (par exemple à l'émission de 1 GtC à l'instant $t = 0$), alors il faut regarder la dérivée de $FF_E(t)$. Cette modification est représentée en Fig. 4.6. On constate que les conséquences de l'émission d'une tonne de carbone sont maximales environ 60 ans après l'émission et disparaissent 400 ans après, suite à l'adaptation (car il n'y a pas d'impacts permanents). D'après ce modèle, l'émission d'une tonne de carbone provoque donc des impacts qui, au maximum de la rétroaction 60 ans plus tard, réduisent les émissions de 0,7 tC dans le cas "impacts modérés" et de 1,7 tC dans le cas "impacts importants".

4.5 Conclusions

Ce travail de modélisation a permis de coupler un modèle climatique simplifié à un modèle macro-économique, d'une façon telle que les temps caractéristiques du système couplé puissent être évalués.

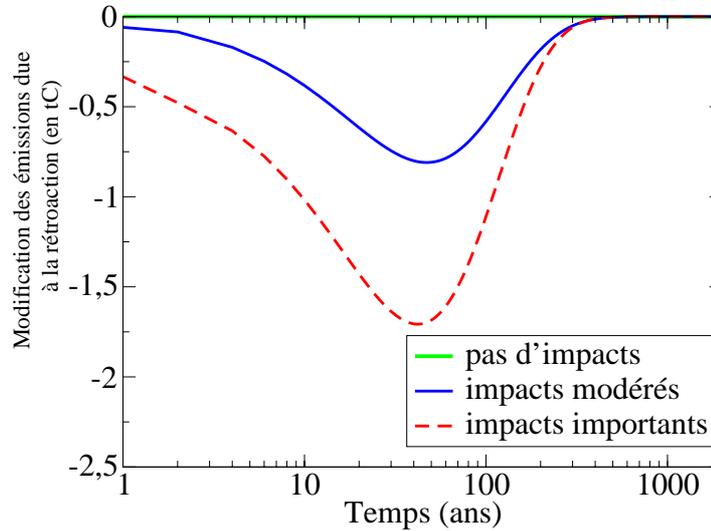


FIG. 4.6: Fonction donnant la modification des émissions due à l'émission de 1 GtC à $t = 0$, en pourcentage .

Le modèle macro-économique a introduit une modélisation des processus d'adaptation progressive à de nouvelles conditions climatiques, via une *température d'adaptation*, dépendante du temps, qui représente la température moyenne du globe à laquelle les sociétés sont adaptées à un instant donné ; et un temps caractéristique de l'adaptation, qui représente le temps nécessaire aux sociétés pour s'adapter à un nouveau climat.

Ce travail, visant à définir rigoureusement et à caractériser la boucle de rétroaction économie-climat grâce au formalisme d'évolution par transferts, a permis de réduire la complexité du modèle et de décrire la rétroaction sous forme de deux pôles, définis par leur intensité et leur temps caractéristique :

- Un pôle positif, de temps caractéristique d'environ 30 ans, qui traduit une résilience aux impacts du changement climatique ;
- Un pôle négatif, de temps caractéristique d'environ 70 ans, qui traduit l'effet destructeur des impacts du changement climatique sur ce qui leur a donné naissance, c'est-à-dire l'activité économique.

Le facteur de rétroaction peut s'interpréter comme une élasticité des émissions (ou de manière équivalente, de la production) à un changement permanent des émissions (ou de manière équivalente, de la production). En d'autres termes, il représente la variation additionnelle de production, provoquée par le changement climatique, en cas d'augmentation exogène de la production. Dans un schéma de croissance, il mesure donc le coût additionnel lié au changement climatique d'un point de croissance, d'où l'expression

de *coût climatique de la croissance*.

Cette formalisation permet de décrire les dommages du changement climatique d'une façon purement dynamique, qui ne sépare pas ce problème des thématiques de la croissance économique.

Elle permet également de dégager quatre points principaux :

- Même en supposant que l'adaptation de long-terme est parfaite, c'est-à-dire qu'il n'y aura pas de dommages permanents une fois que tout le travail d'adaptation aura été conduit, des impacts significatifs à moyen terme sont possibles. Il semble également que le PIB soit une variable trop intégrée pour mesurer les impacts et qu'un taux de croissance normalisé, qui compare la production réalisée avec la capacité de production de l'économie, soit plus pertinent.
- Le temps caractéristique principal de la rétroaction économie-climat est de 70 ans dans le modèle, démontrant qu'une auto-régulation du changement climatique par les dommages est impossible sur des horizons de l'ordre du siècle et que, si des dommages lourds étaient à attendre, seul des politiques de réduction d'émissions seraient à même de les éviter. La présence d'une résilience sur plus de 20 ans montre que les premiers effets économiques d'une action de réduction d'émissions n'apparaissent que 20 ans après l'action, et ne sont réellement significatif que 50 ans après l'action ; ceci démontre un besoin d'anticipation extrêmement important.
- Cette caractérisation montre que l'actualisation des dommages à 1 ou 3% ne permet pas de négliger les dommages de très long terme : une analyse coût-bénéfice sur 100 ans "oublie" une grande partie des bénéfices, alors qu'elle prend en compte tous les coûts. Donc, une analyse coût-bénéfice réclame une connaissance des dommages sur le très long terme et doit être réalisée sur un horizon de plusieurs siècles.
- Par contre, ce temps très long rend la méthodologie de l'IPCC acceptable au premier ordre : quelque soit le niveau des dommages économiques, ils ne peuvent pas être réduit (en part relative) de manière très importante sur 100 ans par la prise en compte de la rétroaction économie-climat. D'après ce travail, la prise en compte de la boucle complète économie-climat est donc souhaitable mais ne constitue pas une priorité comparé à d'autres limitations des évaluations de dommages, et notamment celles qui sont décrites dans la section suivante.

4.6 Les limitations propres aux modèles de croissance

Ces résultats permettent une première approche du problème en terme d'horizons temporels et de timing de l'action. Cependant, les limitations

d'une telle approche continue et régulière sont évidentes : on suppose ici, comme dans toutes les évaluations de dommages, que le changement climatique s'exprime comme une décroissance lente et régulière d'une productivité moyenne. Cette hypothèse est-elle défendable ?

Dans les théories classiques de la croissance (voir *Solow* [1956]), on admet que, sur les horizons temporels extrêmement longs que l'on considère, on peut supposer que l'économie est toujours à l'équilibre. Dans ce cadre, le changement climatique est un choc que l'on applique à une économie à l'équilibre *et qui ne brise pas cet équilibre*. Or, de grands auteurs (*Solow* [1988], *Arrow* [1989]...) reconnaissent douter de l'existence de cet équilibre. Selon eux, cet équilibre n'existe pas, ce qui n'empêche pas les théories de la croissance de décrire les processus de long terme du développement économique. Ainsi, dans son discours de remise du prix Nobel, *Solow* [1988] précise qu'après une perturbation, *“the economy that once strays from equilibrium growth [may] not automatically find its way back to any equilibrium path”*⁷. Son diagnostic est que *“Growth theory was invented to provide a systematic way to talk about and compare equilibrium paths for the economy. In that task it succeeded relatively well. In doing so however, it failed to come to grips adequately with the right way to deal with deviations from equilibrium growth”*⁸.

Mais la variabilité naturelle fait qu'une grande partie des impacts du changement climatique ne passera probablement pas par une décroissance continue et régulière de la productivité qui s'intègre facilement dans le cadre des théories de la croissance. Ces impacts se feront probablement par (i) franchissement de seuils et retrait de certains types de capitaux ou certains types de productions ; (ii) les événements extrêmes. Pour pouvoir modéliser ces effets par des pertes régulières de productivité, il faudrait pouvoir les moyenniser dans l'espace et dans le temps et donc considérer uniquement les grandes échelles, avec de longs pas de temps. Mais a-t-on le droit de moyenniser ces effets de court-terme sans modifier la trajectoire de long-terme ? C'est possible si le modèle est linéaire mais ce n'est plus le cas s'il existe des non-linéarités.

Il s'agit donc plutôt de considérer une gamme de perturbations climatiques depuis le très court terme jusqu'au long terme, appliquées à un système qui possède également sa propre variabilité interne, traversé de contradictions et de changements techniques, démographiques, politiques... L'interaction entre la perturbation exogène “changement climatique” et la va-

⁷En français : l'économie qui est sortie de son sentier de croissance équilibrée peut ne pas re-converger vers un sentier équilibré.

⁸En français : La théorie de la croissance a été inventée pour donner un cadre aux discussions sur les sentiers de croissance équilibrée de l'économie, et elle a relativement bien réussi à remplir ce rôle. Cependant, elle n'a jamais réussi à rendre en compte de façon satisfaisante des déviations par rapport aux sentiers d'équilibre.

riabilité interne endogène (ou créée par des chocs exogènes non-climatiques) est une question fondamentale.

Les deux dernières parties de cette thèse proposeront donc des modélisations des effets des interactions d'échelles : d'abord entre le moyen et le long terme, en insistant sur le rôle de l'incertitude dans la formation des dommages du changement climatique et dans la détermination des stratégies d'adaptation. Ensuite entre le court et le moyen terme, en modélisant explicitement les perturbations de court terme et les cycles économiques endogènes, négligés dans les modèles de croissance classique.

Références

- Arrow, K., Workshop on the economy as an evolving complex system : Summary, *In P. Anderson et al. (Eds.), The Economy as an Evolving Complex System, Addison-Wesley, New-York*, pp. 275–282, 1989.
- Cline, W., *The Economics of Global Warming*, Institute for International Economics, Washington D.C., 1992.
- Cox, P. D., R. Betts, C. Jones, S. Spall, et I. Totterdell, Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model, *Nature*, 408, 184–187, 2000.
- Fankhauser, S., et R. Tol, On climate change and economic growth, *Resource and Energy Economics*, 27, 1–17, 2005.
- Fankhauser, S., J. Smith, et R. Tol, Weathering climate change. some simple rules to guide adaptation investments, *Ecological Economics*, 30(1), 67–78, 1999.
- Friedlingstein, P., J.-L. Dufresne, P. Cox, et P. Rayner, How positive is the feedback between climate change and the carbon cycle?, *Tellus*, 55B, 692–700, 2003.
- Haurie, A., Turnpikes in multi-discount rate environments and gcc policy evaluation, *NCCR Working Paper 4-10*, 2002.
- Haurie, A., A two-timescale stochastic game framework for climate change policy assessment, *Working Paper*, 2005.
- IPCC, *Special Report on Emissions Scenarios [Nakicenovic, N. and Swart, R. (Eds.)]*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New-York, NY, USA, 2000.
- IPCC, *Climate Change 2001 : The Scientific Basis [J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. Van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C.A. Johnson]*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New-York, NY, USA, 2001a.
- IPCC, *Climate Change 2001 : Impacts, Adaptation and Vulnerability [McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D., White, K.S. (Eds.)]*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New-York, NY, USA, 2001b.
- Mendelsohn, R., et J. Neumann, *The Impact of Climate Change on the United States Economy*, Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- Nordhaus, W., To slow or not to slow : The economics of the greenhouse effect, *Econ. J.*, 101, 920–937, 1991.
- Nordhaus, W., *Managing the Global Commons : The Economics of Climate Change*, MIT press, Cambridge, 1994.
- Solow, R., A contribution to the theory of economic growth, *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65–94, 1956.

Solow, R., Growth theory and after, *The American Economic Review*, 78(3), 307–318, 1988.

Tol, R., New estimates of the damage costs of climate change, Part I : Benchmark estimates, *Environmental and Resource Economics*, 21(1), 47–73, 2002a.

Tol, R., New estimates of the damage costs of climate change, Part II : Dynamic estimates, *Environmental and Resource Economics*, 21(2), 135–160, 2002b.

Troisième partie

Interactions
moyen-terme/long-terme
en économie :
l'adaptation des
infrastructures urbaines au
changement climatique en
présence d'incertitude

Chapitre 5

Interaction moyen-terme / long-terme : l'adaptation des infrastructures urbaines au changement climatique en présence d'incertitude

Sommaire

5.1	Introduction	162
5.1.1	Un outil de mise en forme de l'information venant des modèles climatiques.	163
5.1.2	Déterminer des analogues à partir de sorties de GCMs	164
5.2	Dommages et coûts d'adaptation: leurs déterminants et leurs interactions.	166
5.2.1	Coûts de l'adaptation en connaissance parfaite	168
5.2.2	Coûts d'investissements et arbitrage entre adaptation réactive et proactive	171
5.3	Les effets d'évictions des investissements d'adaptation et leurs impacts sur la croissance.	176
5.4	Conclusions	178
	Références	180

5.1 Introduction

Pour illustrer les interactions d'échelles entre le moyen terme et le très long terme, ainsi que le rôle de l'incertitude, on propose ici une étude de cas qui permettra de mettre en évidence certains des processus essentiels. Une telle approche, dite "*bottom-up*", permet de mettre en lumière les hypothèses les plus contestables utilisées dans les évaluations de dommages, qui utilisent des concepts beaucoup plus abstraits (voir par exemple le chapitre 4). On s'intéressera à l'élaboration des stratégies d'adaptation des infrastructures, en réponse à la hausse des températures et en présence d'incertitude. Cette adaptation est un exemple typique d'interaction entre des actions à moyen terme (climat ressenti, anticipation du changement climatique futur et décision de mesures d'adaptation) et les conditions de long terme (type d'infrastructures et régime climatique).

On prendra comme sujet d'étude les zones urbaines. En effet, il y a eu très peu d'évaluations des impacts en zone urbaine, sans doute car il n'existe pas d'indicateur "naturel" du niveau des impacts, tel que le rendement d'une culture dans le secteur agricole. Or, 1) la majorité de la population est aujourd'hui urbaine, et souvent concentrée dans des mégapoles particulièrement vulnérables aux crises environnementales; 2) les villes concentrent la majorité des stocks de capital (logement, traitement des eaux, transport...); 3) les systèmes énergétiques sont conçus pour répondre principalement aux besoins des villes; 4) les besoins en infrastructures sont très sensibles aux changements de modes de vie, de demande en eau et de demande en énergie; 5) les coûts principaux du changement climatique pourraient venir principalement des coûts de transition dus à l'inertie du système économique et à la longue durée de vie du capital d'infrastructure.

Pour contourner les difficultés particulières de l'évaluation des dommages en zone urbaine, on proposera un moyen de mettre en forme l'information venant des modèles climatiques. Cette méthode s'appuie sur des analogues climatiques, qui seront construits pour un ensemble de villes européennes : Athènes, Barcelone, Berlin, Bruxelles, Copenhague, Dublin, Genève, Helsinki, Londres, Lisbonne, Madrid, Marseille, Oslo, Paris, Rome, Stockholm et Vienne. Ensuite, les conséquences économiques seront évaluées dans le cas particulier de Paris, en prenant en compte explicitement l'incertitude et l'inertie des secteurs les plus lents de l'économie que sont l'urbanisme, l'architecture et la production énergétique. On s'intéressera particulièrement aux mécanismes de formation des dommages et de détermination des stratégies d'adaptation.

5.1.1 Un outil de mise en forme de l'information venant des modèles climatiques.

Quel que soit le secteur considéré (agriculture, industrie, urbanisme...), les évaluations économiques des impacts environnementaux s'appuient sur des scénarios "sans changement environnemental" et calculent la différence en bien-être entre ce scénario et un scénario qui prend en compte des impacts environnementaux.

Une première difficulté vient de la nécessaire prise en compte des préférences individuelles et collectives (on peut préférer le climat actuel à un climat modifié). Or, il n'existe actuellement aucune méthode satisfaisante d'évaluation de ces préférences (sur ce point voir la section 2.1.3).

La deuxième composante principale des impacts environnementaux est liée aux coûts techniques que ceux-ci vont entraîner. Ces coûts représentent un dommage a priori beaucoup plus objectif, calculable et prévisible que les dommages venant des préférences pures. En particulier, ces coûts sont, au moins en partie, séparables du reste de l'économie et de la société : pour le secteur agricole par exemple, même s'il ne peut être analysé indépendamment du contexte institutionnel, les impacts qu'il subit peuvent être mesurés et anticipés pour fournir un indicateur des dommages sur la société.

Cette méthode est cependant plus difficilement applicable aux systèmes urbains, qui forment un tout cohérent, siège de nombreuses interactions entre : (1) des sous-systèmes techniques gouvernés par des processus et des institutions différentes ; (2) les modes de vie liés au contexte culturel et social ; (3) un contexte historique, comprenant les institutions et leur capacité à mener une adaptation à de nouvelles conditions.

Par exemple, la climatisation est une réponse évidente à la hausse des températures et à leurs conséquences sur le confort et la santé. Toutefois, les coûts associés ne peuvent être évalués sans prendre en compte que son installation est fortement contrainte par les caractéristiques techniques des bâtiments existants et que les changements en terme d'aménité pour la génération présente aura une influence forte sur le développement futur des formes urbaines et des modes de vie.

Ainsi, les analyses de coûts dites "énumérative" (par exemple *Nordhaus* [1991], *Cline* [1992] ou *Mendelsohn et Neumann* [1999]) sont confrontées à une double tâche : définir un scénario de référence sans changement climatique avec une description précise des formes urbaines (urbanisme, architecture, infrastructure de transport...) et développer une vision cohérente de l'adaptation au changement climatique dans ses différentes composantes.

La solution proposée ici fait usage "*d'analogues climatiques*" pour contourner ces difficultés. L'idée consiste à utiliser les sorties de GCMs pour donner une vision systémique de l'effort d'adaptation qui sera imposé à une ville *A*

par le changement climatique. Pour cela, on utilise les informations disponibles sur une autre ville B , qui a aujourd'hui un climat proche du climat futur que le modèle prévoit pour la ville A . On ne prétend pas que A va devoir se transformer en B , mais seulement qu'observer les infrastructures et les modes de vie ayant cours dans la ville B – que l'on suppose bien adaptée au climat actuel – donne un aperçu utile des besoins d'adaptation de A . On utilise ici ces analogues de manière qualitative, comme des illustrations du changement auquel il faut se préparer, même si une utilisation beaucoup plus quantitative paraît envisageable.

5.1.2 Déterminer des analogues à partir de sorties de GCMs

Cette méthodologie propose des réponses de la forme : “le meilleur analogue au climat futur projeté de la ville A à la fin du siècle est le climat de la ville B , C ou D selon les modèles l, m, et p”. Ces analogues sont calculés pour 2 modèles du projet PRUDENCE : le modèle ARPEGE-Climat, du CNRM/Météo-France, et le modèle HadRM3H, du Hadley Centre.

Les simulations sont forcées par les concentrations de GES du scénario SRES-A2 [IPCC, 2000]. Le modèle ARPEGE-Climat est un modèle global, il reçoit donc directement les concentrations en entrée. Le modèle HadRM3H est un modèle régional, forcé par des scénarios climatiques issus du modèle global HadAM3. A partir de ces simulations, sont calculées les moyennes mensuelles sur 30 ans des températures et des précipitations dans le climat présent (1960-1990) et pour le climat projeté à la fin du siècle (2070-2100). Pour déterminer l'analogue présent d'une ville A , on considère le point de grille x le plus proche de cet endroit. A ce point de grille, le climat présent est caractérisé par les moyennes mensuelles des températures et des précipitations : $T_i^p(x)$ (resp. $P_i^p(x)$) est la moyenne mensuelle de la température présente (resp. des précipitations présentes) pour le mois i . De la même façon, le climat futur projeté est défini par l'ensemble $\{T_i^f(x), P_i^f(x)\}$ pour les 12 mois.

Une telle caractérisation du climat reste fruste mais permet de prendre en compte le cycle saisonnier et d'utiliser plus d'information qu'une simple moyenne annuelle.

Pour comparer le climat futur de la ville A , $\{T_i^f(x), P_i^f(x)\}$, avec le climat présent du point de grille x' , $\{T_i^p(x'), P_i^p(x')\}$, 3 différentes métriques sont définies : (a) la moyenne des différences absolues des moyennes mensuelles des températures (d_T) ; (b) la moyenne des différences relatives des moyennes mensuelles des précipitations (d_P^M) ; (c) la différence relative de précipitation annuelle (d_P^A). Pour les précipitations, on prend en compte à la fois le cycle saisonnier, qui est essentiel dans la définition du système de gestion des eaux et dans la définition du climat ressenti, et la moyenne annuelle qui définit le

volume des ressources disponibles¹. Les trois métriques sont données par :

$$d_T(x, x') = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{i=12} \left| T_i^f(x) - T_i^p(x') \right| \quad (5.1)$$

$$d_P^A(x, x') = \frac{\left| \sum_{i=1}^{i=12} P_i^f(x) - \sum_{i=1}^{i=12} P_i^p(x') \right|}{\sum_{i=1}^{i=12} P_i^f(x)} \quad (5.2)$$

$$d_P^M(x, x') = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{i=12} \left| \frac{P_i^f(x) - P_i^p(x')}{P_i^f(x)} \right| \quad (5.3)$$

où d_T est en °C, et d_P^A et d_P^M sont en %.

Sans surprise, il est facile de trouver des analogues aux villes quand on utilise seulement la métrique de température d_T . On trouve très facilement des valeurs de d_T inférieures à 0,2°C. Mais ces analogues en température mènent dans la plupart des cas à des valeurs des métriques de précipitations très élevées. Pour cette raison, on se donne un critère d'acceptabilité, via des bornes supérieures des valeurs de d_P^A et d_P^M (15% et 30%, respectivement). Ces gammes peuvent sembler large, mais elles viennent de la forte variabilité des précipitations.

On définit alors les analogues en deux étapes :

- D'abord, on sélectionne le *meilleur analogue* en trouvant le point de grille x' qui minimise la métrique de température d_T , en maintenant les métriques de précipitations d_P^A et d_P^M à l'intérieur de leurs bornes d'acceptabilité.
- Ensuite, on retient ce meilleur analogue comme un *analogue acceptable* si d_T est inférieure à 1K.

Pour Barcelone par exemple, le changement climatique mène à un changement de température moyenne de 3,88K et 4,70K pour les modèles ARPEGE-Climat et HadRM3H, respectivement, associé à une variation de 36 et 16% des précipitations annuelles moyennes, et une variation de 30 et 25% des précipitations mensuelles moyennes. Les meilleurs analogues sont les climats d'aujourd'hui à Tunis ou Alger, pour chacun des modèles. On peut mesurer la qualité de ces analogues selon les 3 métriques : les différences de températures mensuelles moyennes sont de seulement 0,36K et 0,84K ; les différences de précipitations annuelles moyennes sont de 8 et 2% ; et les différences de précipitations mensuelles moyennes sont de 21 et 30%. Ces analogues sont donc acceptables selon nos critères.

¹Il est à noter que l'on ne prend pas en compte de variabilité inter-annuelle dans le calcul de ces analogues, alors qu'elle pourrait varier largement, avec des conséquences importantes sur les extrêmes [Schär et al., 2004].

Il est intéressant de noter qu'il n'est pas possible de trouver des analogues acceptables pour toutes les villes. Par exemple pour Genève dans le modèle ARPEGE-Climat, un bon analogue peut être trouvé en terme de température, si l'on ne tient pas compte des précipitations. Mais dès que l'on satisfait les contraintes en termes de précipitations ($d_P^A < 15\%$ and $d_P^M < 30, \%$), la plus basse valeur de d_T atteint 3,1K. Ainsi, il est impossible de satisfaire à la fois nos critères de température et de précipitations.

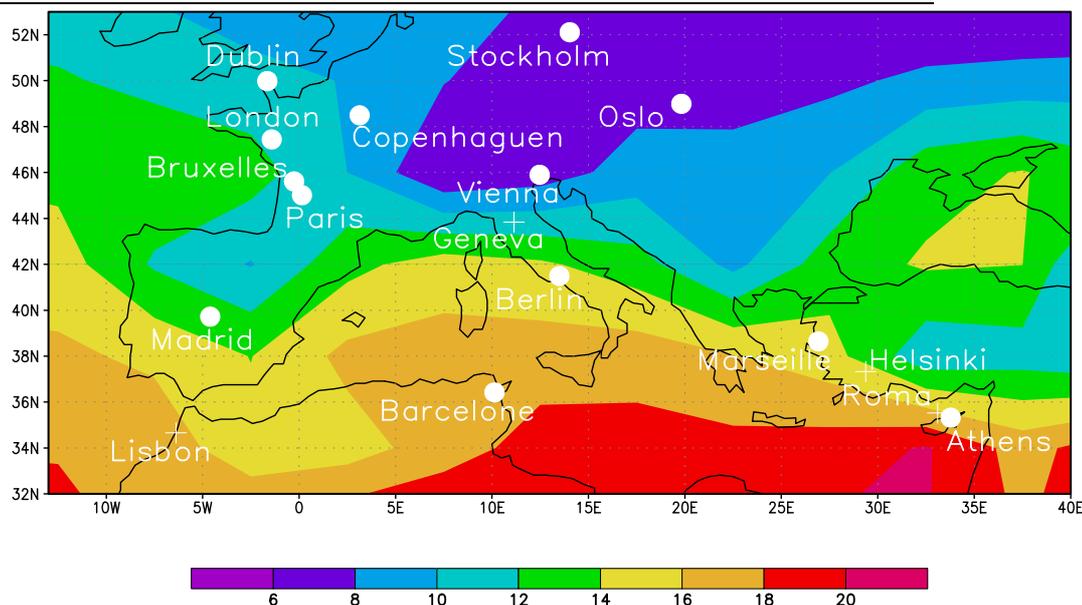
Les villes pour lesquelles on ne trouve pas d'analogue sont : Genève, Rome, Helsinki et Lisbonne dans ARPEGE-Climat et Athènes, Stockholm, Rome, Helsinki et Lisbonne pour le modèle HadRM3H. Ceci pourrait venir des limites spatiales de notre analyse, puisque l'on ne regarde que la région européenne et méditerranéenne et que des analogues pourraient exister en dehors de cette zone. Toutefois, l'absence d'analogue représente également le fait que le changement climatique pourrait engendrer des climats qui n'existent pas actuellement sur terre². Souvent en effet, il est facile de trouver des analogues en terme de température à une ville A . Mais si cet analogue se trouve dans un type de climat (tempéré, tropical, méditerranéen...) différent de celui de A , la structure saisonnière des précipitations est souvent très différente et aucun analogue ne peut être trouvé.

La figure 5.1 montre la "migration climatique" de 17 villes européennes : chaque ville est représentée à l'endroit de son analogue acceptable, c'est-à-dire à l'endroit qui a aujourd'hui un climat proche du climat que la ville aura à la fin du siècle selon chacun des modèles. Quand aucun analogue acceptable n'a été trouvé, une croix représente la position du meilleur analogue en termes de température, en négligeant les précipitations.

5.2 Dommages et coûts d'adaptation : leurs déterminants et leurs interactions.

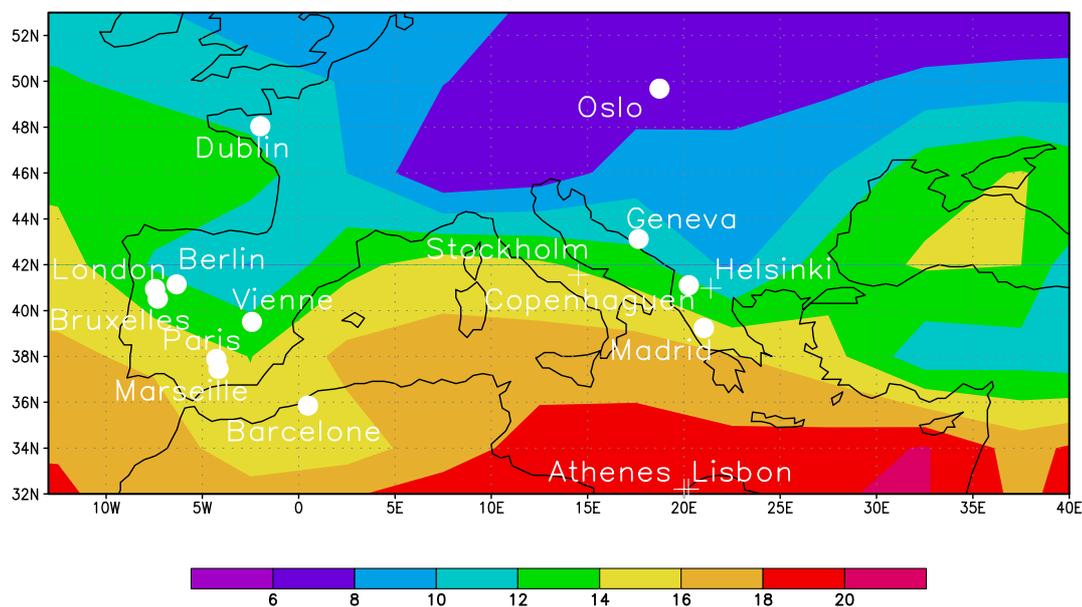
La carte précédente donne une vision synthétique des impacts du changement climatique et peut mener à deux réactions opposées. La réaction optimiste serait celle d'un européen du nord, content à l'idée que ses descendants puissent profiter du climat de Salamanque ou de Naples, persuadé que ce décalage climatique vers le sud va apporter des aménités positives pour la plupart des européens. La réaction opposée s'explique par les craintes attachées à une aussi impressionnante redistribution des climats : les chocs locaux, les pertes en aménités (une partie de la population peut ne pas apprécier de se faire imposer un climat plus chaud ou plus sec) ou les migrations éventuelles pourraient avoir des conséquences qui sont difficiles à prévoir et à maîtriser. Par exemple, le déplacement de Barcelone ou de Lis-

²Il est à noter que ces nouveaux climats n'ont pas de raison d'être considérés *a priori* comme plus extrêmes que les climats existants.



GRADS: COLA/IGES

2004-10-26-20:31



GRADS: COLA/IGES

2004-10-26-20:43

FIG. 5.1: Carte de l'Europe et du bassin Méditerranéen. Les villes sont représentées par des cercles à la position de leur analogue acceptable, *i.e.* à l'endroit qui a aujourd'hui un climat proche de celui qu'elles auront à la fin du siècle, d'après les modèles climatiques. Quand aucun analogue acceptable n'a été trouvé, une croix représente la position du meilleur analogue en termes de température, en négligeant les précipitations. La carte du haut est pour le modèle ARPEGE-Climat, celle du bas pour HadRM3H.

bonne vers des régions très chaudes et très sèches aurait des conséquences dramatiques pour l'attractivité de ces villes, et donc pour leurs populations. Les villes éventuellement gagnantes pourraient alors être touchées par des effets de propagations venant des villes perdantes (migrations incontrôlées, propagations économiques, conflits pour les ressources en eau...).

Pour réunir ces deux attitudes dans un cadre d'étude commun, on peut partir du fait que les aménités apportées par un climat sont dépendantes des infrastructures et des modes de vie. Il est alors possible de considérer les différences entre une ville et son analogue climatique à la fin du siècle comme un indicateur de l'importance de l'adaptation qui sera nécessaire pour supporter ou profiter du nouveau climat.

Ceci demande toutefois de ne pas considérer simplement l'adaptation comme un investissement supplémentaire ("end of pipe") mais plutôt comme une modification des infrastructures et des modes de vie. C'est évident lorsqu'on observe des villes bâties dans des climats différents : leurs différences ne tiennent pas seulement à l'ajout de climatisation, d'isolation ou de chauffage en fonction du climat ; c'est toute la structure urbaine qui est différente (type d'urbanisme, architecture, matériaux utilisés...), ainsi que les habitudes de vie (vie à l'extérieur ou à l'intérieur, horaires de vie, types d'activités de loisir, activités économiques et agricoles...).

Ensuite, il faut prendre en compte l'incertitude sur le climat futur : on a vu que l'analogue climatique de Paris à la fin du siècle est Bordeaux selon le modèle ARPEGE et Cordoue selon le modèle du Hadley Center. Dans un cas l'adaptation semble facile et peu coûteuse ; dans l'autre c'est un chamboulement important qui nous attend. Par exemple, la canicule de 2003 ne correspond qu'à un été assez courant dans le sud de l'Espagne, alors qu'elle a entraîné plus de 15.000 morts en France et une facture supérieure à 13 milliards d'euros. Ceci est évidemment dû à la mauvaise adaptation de la France à de telles températures, principalement un urbanisme et une architecture inadaptés et une mauvaise préparation des services de secours et de santé. Cette "expérience naturelle" dramatique met en lumière la vulnérabilité de nos sociétés au changement climatique et montre la nécessité d'une adaptation profonde. Mais rien n'est sûr, s'il s'avère que le climat de Paris devient celui de Bordeaux, une telle canicule restera exceptionnelle et de lourds investissements seraient inutiles.

5.2.1 Coûts de l'adaptation en connaissance parfaite

Ici, seront présentées quatre stratégies d'adaptation, qui peuvent être utilisées pour faire face principalement aux effets des canicules et des hautes températures sur la santé et le confort. Un aperçu des besoins de la gestion de l'eau sera aussi proposé. De nombreux autres impacts sont négligés, alors que leurs conséquences pourraient être importantes, il faut donc garder à

l'esprit que les évaluations proposées sont des bornes inférieures des coûts envisageables.

On supposera ici que tout ce passe en connaissance parfaite : le climat futur est donc supposé connu dès aujourd'hui, et les stratégies d'adaptation peuvent être mises en place avec une grande anticipation. Les dépréciations anticipées du capital dues au changement climatique sont donc réduites au minimum. On considère donc les stratégies optimales pour un niveau donné de réchauffement.

- *S1 : Installation de la climatisation dans certains locaux sensibles* (hôpitaux, métro, maisons de retraite, logements des personnes âgées...). Une telle mesure peut être mise en oeuvre en quelques mois, la seule contrainte étant la disponibilité des équipements. Cette adaptation additionnelle (pas de modification des infrastructures existante) a des coûts faibles sur le court et long terme, et est capable de faire face à un changement climatique faible à modéré (p. ex. le “déplacement” de Paris vers le climat de Bordeaux).

- *S2 : Généralisation de la climatisation* (logement, bureaux, commerces). Cette généralisation peut se faire en une ou deux décennies, les contraintes principales étant le développement de capacités de production électrique et la diffusion des équipements dans les logements de bas de gamme. La différence majeure entre *S1* et *S2* est l'apparition d'un pic de demande d'électricité significatif en été, comme aux USA alors qu'en Europe il n'y a actuellement qu'un pic d'hiver. Les projections de diffusion de la climatisation de *Adnot* [2002], dans un scénario sans changement climatique, suggèrent que la surface climatisée par habitant augmenterait très vite avec la température. En effet, on constate que la surface climatisée augmente et va augmenter très fortement dans les pays d'Europe du Sud, corrélativement avec l'augmentation de la richesse. Ceci montre que, dès que leur budget le permet, les habitants des pays d'Europe du Sud climatisent leurs lieux de travail et leurs habitations. Les habitants d'Europe du Nord feront donc probablement la même chose si les températures augmentent.

Le niveau futur de climatisation n'est cependant pas facile à prévoir. Aussi, on utilise le niveau de climatisation des USA comme repère pour une généralisation de la climatisation³. Cette hypothèse semble plutôt conservatrice pour une généralisation de la climatisation dans le cadre d'un changement climatique.

Si l'on suppose que la région Paris-Ile-de-France (30% de la population française et 40% du PIB) atteint ce niveau américain, cela signifie une augmentation de 10 TWh de la consommation annuelle d'électricité. Ceci représenterait d'une part une charge financière importante pour

³64% des ménages américains ont leur logement climatisé (Energy Information Administration, U.S. Department of Energy : <http://www.eai.doe.gov>).

les ménages à faible revenu (qui habitent souvent dans les logements les moins efficaces d'un point de vue énergétique). D'autre part, supposant que cette consommation se fait sur 1000 heures, ceci représente un besoin de capacité additionnelle de production⁴ de 10 GW. Si on répond à cette demande de capacité par un mix 30% nucléaire/70% gaz naturel, ceci représente un besoin d'investissement de 7 milliards d'euros, c'est-à-dire 1,2% du PIB de la région Paris-IDF. On ne parle pas ici des coûts d'opération, d'environ 400 millions d'euros par an.

- *S3 : Mise à niveau des normes de construction et d'urbanisme pour réduire la vulnérabilité des nouveaux bâtiments à des vagues de chaleur et pour les rendre climatisables à bas coûts.* Ceci va au-delà de simples normes d'isolation et de nombreuses autres options ont été proposées : réduction de la densité de construction, bâtiments plus bas, choix de l'orientation des rues pour réduire l'insolation et augmenter la ventilation naturelle, augmentation de la part de végétation, création de parcs, plantation d'arbres en bord de rue, utilisation de matériaux à haut albédo pour les rues et les bâtiments [Oke, 1987].

Cette stratégie affecte les infrastructures de base de la ville et permet de faire face à un réchauffement important, mais dont le rythme est suffisamment faible pour que le remplacement naturel des bâtiments permette leur adaptation à temps. Ainsi, en France, le temps de remplacement naturel des bâtiments est évalué à 150 ans environ⁵. Ceci fait que cette stratégie a un temps caractéristique supérieur au siècle. Le coût permanent de cette stratégie est faible : en effet il est remarquable que les coûts de construction d'un bâtiment de bas de gamme et ceux d'un bâtiment de haut de gamme ne diffèrent⁶ que d'un facteur 2, la différence de prix des logements venant essentiellement des aménités liées à la localisation (présence de service public, d'emplois, de commerces, de lieux de loisir...). On suppose donc que des normes permettant d'adapter les bâtiments à un climat plus chaud n'augmenteraient les coûts de construction que d'environ 10%. Le secteur du bâtiment représentant en France 4% du PIB, 2% pour la construction proprement dite et 2% pour la rénovation et la maintenance [BNP-Paribas, 2000], on estime ces coûts additionnels à environ 0,2% du PIB, c'est-à-dire 1,2 milliard d'euros par an pour Paris-IDF.

- *S4 : Adapter les bâtiments existants et l'urbanisme pour augmenter la robustesse de la ville aux hautes températures.* A cause des délais nécessaires à ce que la stratégie *S3* soit efficace, il peut s'avérer nécessaire d'investir dans l'adaptation des bâtiments existants (p.ex. pour

⁴On suppose ici qu'il n'y a actuellement pas de sur-capacité de production électrique, ce qui est faux à l'échelle française.

⁵Le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable estime qu'un tiers des bâtiments existant en 2050 auront été construits après l'an 2000.

⁶Jules Renard, 2004, communication personnelle.

améliorer l'isolation). Le coût de telles mesures serait très important : en supposant un coût de rénovation par appartement de 25.000 euros, on arrive à une somme de 80 milliards d'euros pour Paris-IDF, c'est-à-dire 15% de son PIB. Ce coût, ainsi que le problème de la disponibilité de travailleurs pour réaliser cet immense chantier, explique pourquoi le temps caractéristique d'une telle mesure est de plusieurs décennies et pourquoi elle est politiquement difficile à mettre en oeuvre. Elle permettrait cependant de faire face à des réchauffements importants, même avec des rythmes élevés. Elle réduirait également la consommation d'énergie pour le chauffage pendant l'hiver.

En plus des investissements dans la climatisation, un autre point critique de l'adaptation concerne la gestion de l'eau : le capital actuellement investi dans cette gestion est estimé à 200 milliards d'euros, avec 5 milliards d'euros par an d'investissement⁷. En supposant que 40% de ce capital est utilisé par Paris-IDF, et que 10% doivent être prématurément remplacés, on arrive à des investissements additionnels de l'ordre de 8 milliards d'euros (soit 1,5% du PIB).

5.2.2 Coûts d'investissements et arbitrage entre adaptation réactive et proactive

L'évaluation économique des dommages du changement climatique ne peut se passer de la définition d'hypothèses sur le comportement des agents qui ont à s'adapter à un climat changeant, sous la contrainte d'incertitude. Ce comportement, qui se fonde sur une situation et des anticipations à l'instant t , va influencer l'économie sur des horizons très longs, constituant ainsi un bon exemple d'interaction d'échelles.

L'incertitude est ici le facteur clé. La connaissance scientifique sur le changement climatique futur et ses impacts va en effet se construire progressivement avec le changement lui-même. Dans ce contexte, l'incertitude va amplifier les coûts sociaux du changement de climat, à cause de surprises auxquelles on ne se sera pas adapté à temps ou à cause de mauvaises adaptations prises en fonction de prédictions erronées. L'incertitude peut donc mener à des sur-adaptations (des investissements qui se révèlent finalement inutiles, appelés "*sunk costs*") ou à des sous-adaptations (menant à des pertes de bien-être et/ou à des adaptations dans l'urgence à coût élevé au moment où le problème se révèle). Ces deux types de mauvaise adaptation mèneront forcément à des coûts sociaux pour les générations futures.

Pourtant, les évaluations de dommages réalisées jusqu'ici (*Mendelsohn et al.* [2000], *Nordhaus et Boyer* [2000], *Tol* [2002a], *Tol* [2002b]) n'ont pas considéré cet effet multiplicatif lié à l'incertitude : les meilleures stratégies

⁷Rapport de l'Assemblée Nationale n°3081, Décembre 2000, Yves Tavernier.

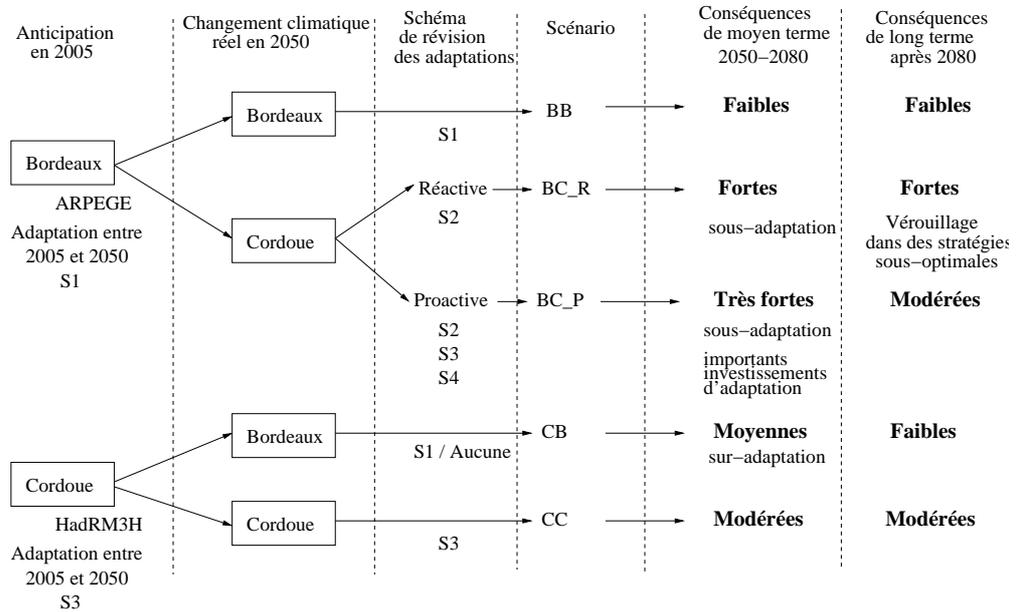


FIG. 5.2: Différents scénarii, en fonction de l'anticipation faite en 2005, du changement climatique réel (révélé en 2050) et du schéma d'adaptation.

d'adaptation sont systématiquement disponibles sans délai et sans inertie, ce qui explique largement que les dommages restent faibles. Ici, ces effets seront explicités dans le cas de l'adaptation de Paris-IDF aux hautes températures. Pour simplifier le raisonnement, il est supposé que l'amplitude du changement climatique est intégralement révélée en 2050, et qu'il n'y a que deux alternatives possibles, correspondant aux deux modèles ici considérés (ARPEGE-Climat et HadRM3H)⁸. L'adaptation se fait alors selon le schéma proposé en figure 5.2.

5.2.2.1 Scénario *BB*

Dans le scénario *BB*, le “planificateur” de Paris fait confiance au modèle ARPEGE-Climat, et anticipe que le climat de Paris va devenir celui de Bordeaux, ce qui se révèle exact. Dans ce cas, les mesures de la stratégie *S1* sont suffisantes et leur mise en oeuvre peut se faire en fonction du climat observé puisque leur délai d'application est très court. Dans ce cas, les coûts d'adaptation sont faibles.

⁸L'objectif est d'illustrer les processus mis en jeu dans l'adaptation au changement climatique, ce qui permet d'utiliser ces hypothèses, inacceptables pour une évaluation réaliste des coûts du changement climatique.

5.2.2.2 Scénario *BC*

Dans le scénario *BC*, le planificateur croît encore que le climat de Paris va devenir celui de Bordeaux, mais c'est finalement à celui de Cordoue que mène le changement climatique. Dans ce cas, les mesures de la stratégie *S1* sont mises en place pour répondre aux premiers effets du réchauffement, mais elles se révèlent progressivement insuffisantes. Une révision de la stratégie a donc lieu, sous la pression des événements (vagues de chaleurs à répétitions, ou d'une unique canicule d'ampleur sans précédent). En fonction du schéma de révision de l'adaptation, la réponse va être différente. Deux extrêmes peuvent être dégagés : l'adaptation réactive ou l'adaptation proactive, qui mènent à des résultats largement différents.

Première hypothèse : si l'adaptation est réactive (scénario *BC_R*), la révision de la stratégie est faite sous la pression d'accidents climatiques et dans un contexte de réponses décentralisées des agents. Les exemples passés de crises environnementales ont démontré que dans ce cas le sentiment d'urgence mène la plupart du temps à des sur-réactions et à une mobilisation des solutions les plus rapides, éventuellement au mépris de leurs coûts. Dans le cas qui nous intéresse ici, il s'agit d'une généralisation de la climatisation (stratégie *S2*).

Les conséquences de cette stratégie sur le système énergétique sont décrites dans la section précédente : si cet effort est mené en 10 ans, il en coûtera 700 millions d'euros par an, c'est-à-dire quasiment 1% du flux d'investissement de Paris-IDF. On peut s'interroger sur la capacité à financer un tel effort dans une situation où la nouvelle régulation du système électrique va priver Electricité de France de la garantie d'état que lui apportait son statut de monopole public.

De plus, le résultat de ce scénario d'adaptation réactive est un verrouillage (*lock-in*) progressif dans une adaptation par la climatisation uniquement, ce qui est peu robuste à des changements climatiques très importants et qui ne suffirait pas à garantir un confort comparable à l'actuel. De plus, cette solution générerait des émissions de GES importantes dont l'acceptabilité serait faible à une période où des impacts significatifs du changement climatique se feraient sentir.

Deuxième hypothèse : si l'adaptation se fait sur un mode proactif (scénario *BC_P*), il est possible d'éviter le lock-in dans une stratégie d'adaptation non-optimale en mettant en place une politique d'adaptation mélangeant : (1) *S2* à cause de l'urgence et des réponses individuelles décentralisées au réchauffement ; (2) *S3* parce qu'il est rationnel d'améliorer les bâtiments dans ce contexte ; (3) *S4* parce qu'on cherche à éviter les coûts importants de la stratégie *S2* sur le moyen terme. Dans ce scénario, *S2* n'est qu'une stratégie temporaire permettant d'attendre que *S3* et *S4* fassent effet. Cette réponse est la meilleure sur le long terme mais implique des efforts massifs sur le

court terme ; elle n'est envisageable que dans un contexte de planification centralisée de l'adaptation.

Dans ce scénario, des mesures de type S_4 sont rendues nécessaires par le temps d'action de la stratégie S_3 (lié au rythme de remplacement des bâtiments). Si on suppose que pour préserver la valeur des bâtiments et l'attractivité de la région, les mesures S_4 sont menées pendant 20 ans, les investissements annuels sont de l'ordre de 4 milliards d'euros par an, c'est-à-dire 0,7% du PIB de Paris-IDF et 4% des flux d'investissements annuels. Ceci représente une augmentation de 50% des coûts annuels de rénovation des bâtiments pendant 20 ans. A ces investissements s'ajoutent : (i) les coûts de la stratégie S_3 (1 milliard d'euros par an) ; (ii) les coûts d'investissement dans le secteur énergétique liés à S_2 (700 millions d'euros par an pendant 10 ans). On arrive alors à un coût final de près de 6 milliards d'euros par an, c'est-à-dire 6% des flux d'investissement pendant 10 ans, puis 5% pendant les 10 ans suivants.

Dans ces deux hypothèses, d'autres effets pourraient être significatifs :

- Le système de gestion des eaux demanderait à être adapté. En reprenant l'hypothèse d'un remplacement de 10% du capital actuellement en opération, on arrive à un investissement supplémentaire de 8 milliards d'euros, repartit sur quelques décennies. Sur 20 ans, cela représente 400 millions d'euros par an, c'est-à-dire une augmentation de 10% des investissements dans la gestion de l'eau.
- La mauvaise adaptation de nombreux bâtiments aux températures pourrait mener à une baisse de l'attractivité de la région, avec des conséquences sur les flux entrant et sortant d'investissements et une baisse des prix de l'immobilier.

5.2.2.3 Scénario CC

Dans le scénario CC , le planificateur de Paris-IDF sait dès aujourd'hui que le climat de Paris va devenir celui de Cordoue. Dans ce cas, la meilleure option consiste à mettre en oeuvre tout de suite la stratégie S_3 pour améliorer progressivement la robustesse des bâtiments aux hautes températures. Les coûts de ces mesures seraient faibles car elles n'impliquent pas de remplacement prématuré des bâtiments existants.

Un impact négatif significatif serait toutefois une augmentation des coûts de construction sur le court-terme, avec des conséquences négatives sur le marché immobilier déjà extrêmement tendu actuellement.

De plus, le temps de renouvellement très long des bâtiments, ainsi que l'existence de quartiers historiques dans lesquels il n'y a pas de renouvellement, fait que des mesures d'adaptation supplémentaires de type S_4 seront nécessaires. En 2050, un tiers des bâtiments sera récent et donc adapté aux

hautes températures grâce à *S3*. Dans les deux tiers restant, on suppose que la moitié des bâtiments demande des mesures spécifiques d'adaptation. Cela veut dire qu'un tiers des bâtiments demanderont une rénovation spécifique, pour un coût d'environ 25 milliards d'euros (environ un tiers des 80 milliards). Comme ce coût énorme peut être réparti sur 75 ans (entre 2005 et 2080), le montant annuel d'investissement n'est toutefois que de 33 millions d'euros.

Pour la gestion des eaux, les 8 milliards d'euros nécessaires peuvent être répartis sur plus de 50 ans, l'investissement annuel passe donc en dessous de 150 millions d'euros.

5.2.2.4 Scénario *CB*

Dans le scénario *CB*, le planificateur agit comme s'il était sûr que le climat de Paris allait devenir celui de Cordoue. En 2050, on apprend que ce sera celui de Bordeaux. Dans ce cas, les investissements entre aujourd'hui et 2050 sont les mêmes que dans le scénario *CC*, mais une grande partie de ces investissements sont finalement inutiles. Le coût de ces investissements inutiles ("*sunk costs*") serait dans ce cas largement supérieur au coût du changement climatique lui-même.

5.2.2.5 Synthèse

Ces scénarii extrêmement simples montrent que, dans un contexte d'incertitude forte, la stratégie la plus robuste et la plus efficace (*S3*) est difficile à mettre en oeuvre. Actuellement, à cause de la situation difficile du marché de l'immobilier en France, les gouvernements refusent de mettre en place des mesures qui pourraient freiner la construction de logements sur le court terme en augmentant les coûts de construction.

L'arbitrage entre des bénéfices incertains sur le long terme et des coûts évidents sur le court terme se fait de manière compréhensible en faveur du court-terme. On observe le même phénomène dans la gestion des crues : après une inondation, il est difficile d'exproprier les propriétaires de logements situés en zone inondable. Même interdire la construction dans ces zones est difficile car cela fait chuter la valeur des logements de la zone. En conséquence la solution retenue est toujours la construction de digues de plus en plus hautes, qui provoquent des inondations de plus en plus graves quand elles rompent ou quand elles sont dépassées. Là encore, le court terme l'emporte sur le long terme, et le changement climatique pourrait ici aggraver encore la situation et rendre ces politiques proprement intenable.

Finalement, on voit que l'incertitude présente sur le réchauffement futur empêche d'implémenter des solutions de long terme et risque de nous mener à des adaptations rapides mais sous-optimales sur le long-terme. Les

Scenario	1ère période (2005-2050)				Seconde période (2050-2070)			
	Bâtiment		Energie	Eau	Bâtiment		Energie	Eau
	Normes	Rénov.			Normes	Rénov.		
BB	0	0	0	0	0	0	≈ 0	0
BC_R	0	0	0	0	0	0	700	400
BC_P	0	0	0	0	1000	4000	700	400
CC	1000	400	0	150	1000	400	0	150
CB	1000	400	0	150	0	0	≈ 0	0

TAB. 5.1: Résumé des coûts annuels d'investissement (en millions d'euros) pour Paris-IDF pour l'adaptation au changement climatique dans différents scénarii sur l'ampleur du réchauffement, sur l'anticipation en 2005 et sur la stratégie d'adaptation.

coûts du changement climatique viennent alors plus de l'incertitude que du changement lui-même.

5.3 Les effets d'évictions des investissements d'adaptation et leurs impacts sur la croissance

Les coûts d'investissement pour les 5 scénarii sont reproduits dans le tableau 5.1. Actualiser ces coûts à leur valeur nette présente réduit énormément la valeur des investissements de la deuxième période. Cela suggère qu'il est plus efficace (en terme d'analyse coût-efficacité) de suivre une stratégie de type *B-* pendant la première période (2005-2050). De la même façon, dans le scénario *BC*, une stratégie réactive *BC_R* semble plus efficace que la stratégie *BC_P*⁹.

Mais les dommages économiques totaux ne peuvent se résumer à la somme des dépenses actualisées. En effet, les coûts d'investissement et les pertes d'aménité auront forcément des conséquences sur la dynamique économique et sur le bien-être des populations.

L'objectif n'est pas ici de proposer une estimation quantifiée des impacts du changement climatique sur le PIB, sur la croissance ou sur le bien-être. Cependant, il est possible d'identifier certains des mécanismes qui pourraient amplifier les coûts sociaux. Parmi ceux-ci, l'effet d'éviction des dépenses d'adaptation sur l'investissement productif et la chute des prix de l'immobilier semblent importants.

Les conséquences macro-économiques d'une baisse des prix de l'immobilier peuvent être significatives [*Lhomme*, 2003] : (i) la réduction des loyers peut entraîner des défauts dans le remboursement de nombreux prêts, met-

⁹Bien que la nécessité de conduire des réductions d'émissions en parallèle rendront probablement la solution *BC_R* peu satisfaisante.

tant en danger les banques et par leur intermédiaire toute l'économie ; (ii) la réduction de la richesse apparente des ménages provoque une baisse de la consommation et une augmentation de l'épargne. Pour donner un ordre de grandeur, les 4 milliards d'euros par an de rénovation de l'habitat dans le scénario *BC_P* peuvent être comparés avec la valeur du parc immobilier de Paris-IDF (500 milliards d'euros) : une baisse de 20% de la valeur du parc immobilier¹⁰ suffit à justifier cette rénovation et la stratégie *BC_P*.

Le second canal via lequel les investissements d'adaptation peuvent impacter les tendances macro-économiques est l'effet d'éviction sur l'investissement productif. Dans un modèle de croissance standard de type *AK* [Rebelo, 1991], dans lequel tous les facteurs de production sont agrégés dans un capital productif composite K , on a :

$$Y = A \cdot K, \quad (5.4)$$

$$I = \gamma Y, \quad (5.5)$$

$$\frac{dK}{dt} = I - \frac{K}{\tau}, \quad (5.6)$$

avec Y la production, K le stock de capital productif composite, I l'investissement, $\delta \approx 0,05$ (la durée de vie du capital est d'environ 20 ans), $\gamma \approx 20\%$ et $A \approx 0,4$ (facteur d'échelle).

On obtient un chemin de croissance équilibré :

$$Y(t) = Y(t=0) \cdot e^{(A\gamma - \delta) \cdot t}$$

C'est-à-dire une croissance annuelle de $g = A\gamma - \delta \approx 3\%$.

Donc, un changement $\delta\gamma$ du taux d'investissement (parce qu'une partie de l'investissement est utilisé pour de l'adaptation non-directement productive) réduit la croissance de :

$$\delta g = A \cdot \delta\gamma$$

Ainsi, une réduction de 1 point du taux d'investissement (p. ex. de 20% à 19%), parce que 1% du PIB est utilisé pour de l'adaptation, réduirait la croissance annuelle de 0,4%. Ainsi en prenant en compte uniquement les investissements dans les bâtiments, l'eau et le système énergétique, on arrive à des investissements d'adaptation de 6 milliards d'euros par an, et donc à une croissance réduite de 0,4% sur 20 ans, c'est-à-dire une réduction du PIB de 8% en 2070, comparé à un scénario sans changement climatique¹¹.

¹⁰La baisse de valeur du parc immobilier a été de 30% durant la crise immobilière des

Scenario	Court terme (2005-2050)		Moyen terme (2050-2070)			Long terme (2070-)	
	Inv. d'adapt.	coûts macro (%)	Pertes aménités	Inv.	Coûts macro (%)	Pertes aménités	Conso. énergie
BB	aucun	aucun	faible	aucun	aucun	faible	faible
BC_R	aucun	aucun	fort	1100	0,1%	fort	fort
BC_P	aucun	aucun	fort	6100	1%	faible	faible
CC	1550	0,1%	faible	1550	0,1%	faible	faible
CB	1550	0,1%	aucun	aucun	aucun	faible	faible

TAB. 5.2: Résumé des coûts (en terme d'investissements, de pertes d'aménités et de diminution de croissance) du changement climatique à Paris-IDF dans différents scénarii. Les coûts d'investissement sont en millions d'euros.

Le tableau 5.2 résume les coûts en terme d'aménités et de croissance dans les différents scénarios. Il montre que si les "coûts perdus" liés à une sur-adaptation (sunk-costs) restent modérés, il n'en va pas de même des coûts d'une sous-adaptation éventuelle. En particulier, il est possible qu'une sous-adaptation dans les décennies qui viennent nous mène à une situation où il faudra choisir entre d'énormes investissements d'adaptation sur le court terme et d'importantes pertes d'aménités et de bien-être sur le long-terme à cause de verrouillages dans des options d'adaptation non-optimales.

5.4 Conclusions

Il a donc été montré comment, en l'absence d'indicateurs naturels du niveau des impacts climatiques ou d'estimation monétaire du montant des dommages, l'utilisation d'analogues climatiques permet de communiquer sur le changement climatique et d'informer sur les risques à attendre d'une modification du climat. Ces analogues permettent également de se faire une idée assez précise des futurs besoins d'adaptation, en prenant en compte l'incertitude venant des modèles, même si on a précisé au chapitre 1 que la différence entre les modèles est une piètre évaluation de l'incertitude réelle sur les caractéristiques du changement climatique.

En se concentrant sur la région Parisienne et l'Ile-de-France, et en regardant explicitement comment on pouvait mettre en place des stratégies d'adaptation à partir de l'information disponible, on a montré comment l'incertitude sur le moyen terme et la grande inertie de certains secteurs économiques interagissaient pour engendrer des impacts de très long terme.

Ceci mène à deux conclusions principales. D'abord, l'évaluation statique

années 90.

¹¹On suppose ici que le montant des investissements nécessaires est constant **en part du PIB**, car l'augmentation de la production est compensée par une amélioration de la qualité des bâtiments et de leur coûts.

et énumérative des dommages tend à sous-estimer les coûts réels du changement climatique pour les générations futures, en particulier car elle néglige les effets d'éviction de l'investissement et les éventuelles dépréciations d'actifs, qui peuvent avoir des conséquences macroéconomiques significatives.

Mais surtout, on constate qu'un changement de climat, qui ne mènerait qu'à des impacts limités si le futur climat était connu suffisamment longtemps à l'avance, peut avoir des conséquences très importantes à cause de l'incertitude. Elle empêche en effet les secteurs à grande inertie de s'adapter en temps et en heure aux nouvelles conditions et peut alors mener à des *lock-in* dans des stratégies d'adaptation sous-optimales qui privilégient le court terme mais qui sont très coûteuses à terme. Ainsi, de la même façon que les décisions concernant les réductions d'émissions, on l'a vu au chapitre 4, nos décisions actuelles en matière d'adaptation nous engagent pour plusieurs décennies.

Ceci montre que la modélisation des dommages climatiques et environnementaux sur le très long terme ne peut faire l'impasse, dans un contexte d'incertitude, sur les processus d'élaboration des dommages et des stratégies d'adaptation, qui se déroulent sur les temps beaucoup plus brefs de la décision politique, industrielle et individuelle.

Références

- Adnot, J., Energy efficiency and certification of central air conditioners, *Etude pour la D.G. Transport-Energie (DGTREN) de l'U.E.*, 2002.
- BNP-Paribas, Btp 2000 : Encore de l'or pour le béton, *Conjoncture, Etudes économiques de BNP-Paribas*, 2000.
- Cline, W., *The Economics of Global Warming*, Institute for International Economics, Washington D.C., 1992.
- IPCC, *Special Report on Emissions Scenarios [Nakicenovic, N. and Swart, R. (Eds.)]*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New-York, NY, USA, 2000.
- Lhomme, G., Les liaisons dangereuses de l'immobilier et de la finance en Allemagne et au royaume-uni, *Crédit Agricole, Département des Etudes Economiques et Bancaires*, available on <http://www.credit-agricole.fr/ca/kiosque-eco/index.shtml>, 2003.
- Mendelsohn, R., et J. Neumann, *The Impact of Climate Change on the United States Economy*, Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- Mendelsohn, R., W. Morrison, M. Schlesinger, et N. Andronova, Country-specific market impacts of climate change, *Climatic Change*, 45, 553–569, 2000.
- Nordhaus, W., To slow or not to slow : The economics of the greenhouse effect, *Econ. J.*, 101, 920–937, 1991.
- Nordhaus, W., et R. Boyer, *Warming the world : economics models of climate change*, MIT Press, Cambridge (MA, USA), 2000.
- Oke, T., *Boundary layer climates, 2nd edition*. Routledge, 1987.
- Rebelo, S., Long run policy analysis and long run growth, *Journal of Political Economy*, 99, 500–521, 1991.
- Schär, C., P. Vidale, L. D., C. Frei, C. Häberli, M. Liniger, et C. Appenzeller, The role of increasing temperature variability in european summer heatwaves., *Nature*, 427, 332–336, 2004.
- Tol, R., New estimates of the damage costs of climate change, Part I : Benchmark estimates, *Environmental and Resource Economics*, 21(1), 47–73, 2002a.
- Tol, R., New estimates of the damage costs of climate change, Part II : Dynamic estimates, *Environmental and Resource Economics*, 21(2), 135–160, 2002b.

Quatrième partie

Interactions court-terme/long-terme en économie : l'évaluation du coût des événements extrêmes dans un contexte de changement climatique

Chapitre 6

Le modèle NEDyM

Sommaire

6.1	Introduction	184
6.2	Les différentes approches des cycles économiques	184
6.3	NEDyM (Non-Equilibrium Dynamic Model)	186
6.3.1	Variables et paramètres	186
6.3.2	Equations	186
6.4	Calibration du modèle et premiers résultats	195
6.5	Conclusion	196
	Références	198

6.1 Introduction

Il peut paraître aventureux de proposer une approche originale des interactions entre le court et le long terme en économie, compte tenu des nombreux travaux publiés en économie sur ce thème depuis un siècle. On s'est toutefois orienté dans cette voie car les questions liées au changement global posent un problème particulier : on cherche à décrire les interactions entre l'environnement et les systèmes humains sur des échelles de temps extrêmement longues. Jusqu'ici, ont été principalement utilisés dans ce domaine des modèles de croissance de type Solow, avec l'idée que sur de telles périodes le paradigme de la croissance équilibrée ("*golden age paradigm*") était une approximation acceptable. Mais on a vu dans les chapitres précédents (cf. chapitre 2) que le changement climatique pouvait interagir avec l'économie sur des échelles de temps très courtes, sur lesquelles la croissance équilibrée n'est pas un concept valide.

Ceci met en avant tout un ensemble de problèmes, familiers aux modélisateurs en économie, mais avec un jeu de questionnements différent. Alors que le débat principal en macroéconomie est de savoir si (et comment) un gouvernement peut agir de manière efficace pour contrôler la conjoncture économique, la question est pour nous plutôt de savoir comment des chocs, impacts dus aux changements climatiques, catastrophes naturelles ou politique de décarbonisation, peuvent modifier la trajectoire de croissance de long-terme de l'économie. On insiste donc particulièrement sur les inerties, techniques et institutionnelles, et on cherche à caractériser des régimes économiques et les bifurcations entre ces états.

On va donc commencer par une brève revue de la littérature existante sur les déséquilibres et les cycles économiques, puis proposer un modèle économique dynamique de déséquilibre, NEDyM.

6.2 Les différentes approches des cycles économiques

Comme il a déjà été dit au chapitre 4, la théorie de la croissance ignore les questions de déséquilibre pour s'intéresser aux trajectoires de croissance équilibrée de long-terme, même si ses principaux fondateurs reconnaissent ne pas être sûr de l'existence d'un tel équilibre (p. ex. *Solow* [1988] ou *Arrow* [1989]).

Pourtant, pour l'un des courants principaux de la théorie économique (*Slutsky* [1927], *Frisch* [1933], *Lucas* [1975], *Kydland et Prescott* [1982]...), l'économie a un unique équilibre stable et les cycles viennent de chocs aléatoires sur l'offre de monnaie, sur la technologie ou sur la productivité. Ces chocs se propagent alors et sont absorbés par l'économie, qui retourne à son équilibre de long-terme. Les fluctuations économiques ont donc dans cette

approche une origine purement exogène.

L'autre grande approche théorique, dans la ligne des travaux de Keynes et de Kalecki, modélise l'économie par des relations non-linéaires entre les grands agrégats économiques. Ainsi, à partir du modèle de *Harrod* [1939], qui montre que la croissance devient instable si on introduit un accélérateur dans l'investissement, *Samuelson* [1939] montre que cette instabilité permet de reproduire des cycles économiques simples. *Kalecki* [1937] trouve aussi des cycles économiques en introduisant dans un modèle de multiplicateur des délais d'ajustement et une dépendance de l'investissement aux profits passés. De même, des contraintes financières et les variations de revenus permettent d'endogénéiser les cycles dans les travaux de *Kaldor* [1940] et de *Hicks* [1950]. L'hypothèse de sauts discontinus de l'investissement en réponse à la différence entre stock de capital et un niveau de stock désiré permet également à *Goodwin* [1951] de simuler des cycles. Ensuite, *Goodwin* [1967] a représenté les variations de répartition du revenu entre salaires et profits par le processus dit de *reserve army of labor*, dans lequel le coût du travail est corrélé avec le taux d'emploi. Il aboutit alors à un modèle instable de type prédateurs-proies (modèle de Volterra). C'est également cet effet qui dirige le cycle dans les modèles Keynésiens de *Chiarella et Flaschel* [2000] et *Chiarella et al.* [2002]. On peut également citer ici les travaux de la théorie de la régulation [*Boyer et Saillard*, 2002; *Boyer et al.*, 2004], qui mettent l'accent sur l'évolution des modes de régulation internes à l'économie, dont les blocages peuvent générer des fluctuations de l'activité, les "*petites crises*", ou des changements de mode de régulation, les "*grandes crises*" [*Lordon*, 2002].

Les modèles néoclassiques aussi peuvent reproduire des cycles endogènes alors que leur hypothèse de marché parfait rendent inopérants les effets de demande et de distribution de revenu. Dans ces modèles, les cycles viennent du comportement d'épargne [*Day*, 1982], d'interaction entre générations (*Gale* [1973], *Reichlin* [1986]), d'interaction entre secteurs [*Benhabib et Nishimura*, 1979], ou d'interactions entre des effets de richesses et des mouvements des taux d'intérêt réels [*Grandmont*, 1985].

Dans certains cas, ces modèles, keynésien ou néoclassique, ont également des comportements chaotiques. Une revue des ces aspects est proposée par *Rosser* [1999].

L'approche suivie ici est un peu différente : on cherche à représenter les inerties présentes dans le système économique, qui sont à l'origine de cycles. Pour cela, on part d'un modèle de croissance néoclassique de *Solow* [1956], et on introduit (i) des délais d'ajustement, venant soit de régulations, soit d'inerties techniques et institutionnelles; (ii) un module d'investissement kaléckien, qui détermine l'investissement en fonction de la profitabilité.

Symbole	Description	Unité
F	liquidités des producteurs et des banques	monétaire
G	stock de biens	physique
K	capital	physique
L	nombre de salariés	millions de salariés
M	liquidités des consommateurs	monétaire
p	prix	monétaire
w	salaire	monétaire
Γ_{inv}	taux d'investissement du producteur	pas d'unité

TAB. 6.1: Liste des variables d'état (dites *prognostiques*).

6.3 NEDyM (Non-Equilibrium Dynamic Model)

NEDyM est un modèle macro-économique idéalisé qui représente un producteur, un consommateur, et un bien, utilisé pour la consommation et l'investissement.

Il est construit à partir du modèle de Solow, dans lequel le noyau statique représentant les équilibres de marché est remplacé par des relations dynamiques, qui introduisent des délais dans un retour vers l'équilibre.

6.3.1 Variables et paramètres

Les 8 variables d'état, dites aussi *prognostiques*, dont les évolutions sont décrites par des équations différentielles ordinaires (EDO), sont listées dans le Tab. 6.1.

Les 11 autres variables, les variables diagnostiques, liées aux variables d'état par des équations algébriques, sont listées dans le Tab. 6.2.

Les paramètres sont listés dans le Tab. 6.3, leurs valeurs étant justifiées plus loin.

6.3.2 Equations

6.3.2.1 Marché des biens

Dans le modèle de Solow, le prix p est déterminé par l'égalité de la production Y et de la demande D . Dans NEDyM, $Y \neq D$ et on introduit un stock de biens G , alimenté par la production Y et vidé par la demande D . A chaque instant, Y peut être différent de D et faire varier le stock G : une sur- ou sous-production temporaire est possible.

Le stock de bien peut être positif ou négatif. Il peut être interprété comme un *délai de vente* (ou l'opposé d'un *délai de livraison*) : si G est

Symbole	Description	Unité
Y	production	physique
C	consommation	physique
D	demande (=ventes)	physique
Div	dividendes	monétaire
S	achat d'actions (=épargne disponible)	monétaire
I	investissements physiques	physique
L_d	demande de travail optimale	millions de salariés
Y_d	production optimale (correspondant à L_d)	physique
L_e	demande de travail effective	millions de salariés
Π	profits bruts	monétaire
Π_n	profits nets	monétaire

TAB. 6.2: Liste des variables diagnostiques.

Symbole	Description	Valeur
A	productivité totale	$A = 3,2 \cdot 10^{-4}$
e_{full}	taux d'emploi d'équilibre	$e_{full} = 90\%$
L_{max}	population active (en millions)	$L_{max} = 180$
ν	norme financière de rendement des capitaux	$\nu = 3\% \cdot an^{-1}$
ρ	norme financière de retour sur capital investi (RoE)	$\rho = 10\% \cdot an^{-1}$
γ_{save}	taux d'épargne	$\gamma_{save} = 0,3$
τ_{dep}	temps caractéristique de dépréciation du capital	$\tau_{dep} = 20$ ans
α_F	taux d'utilisation des liquidités du producteur	$\alpha_F = 20\% an^{-1}$
α_M	taux d'utilisation des liquidités du consommateur	$\alpha_M = 20\% an^{-1}$
α_{inv}	flexibilité de l'investissement	$\alpha_{inv} = 2,5$
α_p^1	flexibilité des prix, impact du stock	$\alpha_p^1 = 3,6 \cdot 10^{-3}$
α_p^2	flexibilité des prix, impact du déséquilibre instantané	$\alpha_p^2 = 0$
τ_{empl}	temps caractéristique du marché de l'emploi	$\tau_{empl} = 2$ ans
τ_{wage}	temps caractéristique des salaires	$\tau_{wage} = 2$ ans

TAB. 6.3: Liste des paramètres. Les 7 premiers déterminent l'équilibre du modèle ; les 6 derniers n'influencent pas cet équilibre mais seulement la dynamique du modèle.

positif, il y a sur-production et G/D peut être interprété comme le temps que met le producteur à vendre un bien après l'avoir produit. Si G est négatif, il y a sous-production, et G/Y peut être interprété comme le temps que met un consommateur à recevoir le bien qu'il a commandé. Ainsi défini, G est assez général pour permettre la prise en compte des services, pour lesquels il n'y a pas de stock en tant que tel mais plutôt des délais d'attente. La sous-production peut venir de délais dans les processus de production, transport et distribution ou de sous-capacités dues à l'inertie des systèmes de production.

Le prix augmente ou diminue en fonction de la situation du stock de biens et du déséquilibre instantané entre la production et la demande, pour ramener l'économie vers l'équilibre $Y = D$ avec un stock nul ($G = 0$). Ceci garantit la "conservation de la masse" : un bien qui a été vendu, a été ou sera produit ; un bien qui a été produit, a été ou sera vendu. En conséquence, l'égalité entre production et demande est vérifiée sur le long-terme, mais les délais d'ajustement peuvent briser cette égalité sur le court-terme.

- La demande D est égale à la somme de la consommation C et de l'investissement I :

$$D = C + I \quad (6.1)$$

- Stock de biens (ou délai de vente ou l'opposé d'un délai de production) :

$$\frac{dG}{dt} = Y - D \quad (6.2)$$

- Evolution du prix :

$$\frac{dp}{dt} = -p \cdot \left(\alpha_{price}^1 \cdot \frac{Y - D}{Y} + \alpha_{price}^2 \cdot \frac{G}{D} \right) \quad (6.3)$$

Selon la version du modèle, l'évolution du prix dépend de l'état du stock de biens rapporté à la demande et/ou du déséquilibre instantané entre la production et la demande, rapporté à la production. Un temps caractéristique permet la prise en compte du délai d'ajustement des prix. Si le stock est positif, la production n'est pas vendue et le *pouvoir de marché* est du côté du consommateur, ce qui fait baisser les prix. Si le stock est négatif, il y a pénurie de biens, et le prix augmente. Il serait ici envisageable de prendre en compte une asymétrie entre les tendances de prix à la hausse et à la baisse.

6.3.2.2 Fonction de production

Comme dans le modèle de Solow, on utilise une fonction de Cobb-Douglas [Cobb et Douglas, 1928] :

$$Y = f(L, K) = A \cdot L^\lambda \cdot K^\mu \quad (6.4)$$

avec $\lambda = 2/3$, $\mu = 1/3$ et A la productivité totale. La fonction de production donne la production en fonction des deux facteurs de production, le stock de capital K et le travail L . Ici le capital est considéré comme un objet physique (machines, usines...), pas comme une somme d'investissements financiers.

6.3.2.3 Marché du travail

Dans le modèle de Solow, le salaire w est tel que $L = e_{full} \cdot L_{max}$: l'économie est toujours au plein emploi. Dans NEDyM, le producteur fixe sa demande effective de travail L_e , qui maximiserait ses profits en fonction du prix et du salaire. Le nombre de salariés employés L tend vers cette demande effective de travail avec un délai représentant les contraintes techniques et institutionnelles. Quand le taux d'emploi est supérieur (resp. inférieur) à son niveau d'équilibre e_{full} , le salaire augmente (resp. diminue), ce qui ramène le taux d'emploi vers sa valeur d'équilibre.

- Evolution du taux d'emploi :

$$\frac{dL}{dt} = \frac{-1}{\tau_{empl}}(L - L_e) \quad (6.5)$$

Le producteur ajuste le nombre de salariés de façon à atteindre sa demande effective de travail L_e . Cependant, il existe des contraintes techniques : changer le rapport travail/capital implique d'adapter l'organisation du travail et parfois de modifier les équipements. De plus, les lois du travail, les coûts de transaction, et le temps de recherche et d'embauche des salariés sont aussi impliqués dans ce délai d'ajustement. Ceci est pris en compte via le paramètre τ_{empl} .

- Evolution du salaire nominal (courbe de Phillips [1958]) :

$$\frac{dw}{dt} = \frac{w}{\tau_{wage}} \left(\frac{L}{L_{max}} - e_{full} \right) \quad (6.6)$$

De la même manière que Rose [1967], les salaires sont seulement déterminés par le taux d'emploi, avec un temps caractéristique donné. Ceci permet de prendre en compte les rigidités du marché de l'emploi. Les salaires augmentent quand le taux d'emploi est élevé, via le pouvoir de

négociation des salariés, indépendamment ou par l'intermédiaire des syndicats.

Cette modélisation ne tient pas explicitement compte de l'organisation sociale et institutionnelle. On suppose ici une détermination du salaire essentiellement par des mécanismes de marché, ce qui est très réducteur. On trouve dans *Boyer et Saillard* [2002] une description des modes d'organisation du marché du travail, qui insiste sur l'existence d'autres modes de régulation, et notamment sur l'institutionnalisation de la relation salariale. Or, *Boyer* [1997] montre que le fonctionnement de l'économie, et en particulier le taux de croissance et le taux de chômage, dépend fortement de l'interaction entre le mode de régulation du salaire et les caractéristiques du reste de l'économie (organisation et division du travail, évolution de la productivité, déterminants de l'investissement...). Une extension du modèle dans cette direction est donc nécessaire si l'on veut représenter les différents modes de fonctionnement de l'économie.

- Optimisation de la demande de travail :

Le producteur cherche à optimiser la demande de travail L_d , en supposant que sa production va être vendue et en égalisant la productivité marginale du travail et le salaire réel.

$$\frac{w}{p} = \frac{df}{dL}(L_d, K) \quad (6.7)$$

- Demande effective de travail :

$$L_e = \text{Min}(L_{max}, L_d) \quad (6.8)$$

6.3.2.4 Comportement du consommateur

Dans le modèle de Solow, le revenu total (venant des salaires et des profits, *i.e.* $wL + \Pi$) est toujours égal à la somme de la consommation et de l'investissement ($pC + S$). Dans NEDyM, le consommateur reçoit un revenu $wL + Div$ (salaires plus dividendes) et peut consommer C , ou épargner, soit en stockant (dans son stock de liquidités M), soit en rendant son épargne disponible pour l'investissement (S) en achetant des actions (pour plus de détails, voir la section *comportement du producteur*, 6.3.2.6).

- Liquidités du consommateur :

$$\frac{dM}{dt} = (w \cdot L + Div) - (p \cdot C + S) \quad (6.9)$$

– Consommation :

$$C = (1 - \gamma_{save}) \cdot \frac{1}{p} \cdot \alpha_M \cdot M \quad (6.10)$$

A chaque instant, le consommateur dépense (consommation plus achat d'actions S) une part constante de ses liquidités ($\alpha_M M$). Ceci introduit le fait que quand le revenu augmente, le stock de liquidités augmente aussi, car on a besoin de plus de liquidités pour acheter plus de biens. La répartition entre consommation et épargne disponible est faite de manière exogène par le paramètre γ_{save} .

– Epargne rendue disponible pour l'investissement via l'achat d'actions :

$$S = \gamma_{save} \cdot \alpha_M \cdot M \quad (6.11)$$

6.3.2.5 Evolution du capital productif

Le capital productif évolue comme dans le modèle de *Solow* [1956], mais il s'agit ici de capital physique :

$$\frac{dK}{dt} = \frac{-1}{\tau_{dep}} K + I \quad (6.12)$$

6.3.2.6 Comportement du producteur

Dans le modèle de Solow, le produit des ventes pD est égal à la somme des salaires wL et des profits Π ; l'investissement I est égal à l'épargne S . Dans NEDyM, un module d'investissement inspiré des idées de *Kalecki* [1937] est utilisé.

Il n'y a pas de création de monnaie, ce qui signifie que la Banque Centrale maintient la base monétaire fixe. Le stock de liquidités F du producteur est introduit : il contient à la fois les liquidités des entreprises et des intermédiaires financiers. F est alimenté par les profits bruts Π (qui sont les produits des ventes moins les salaires) et par l'épargne disponible S venant des consommateurs.

On suppose que les consommateurs rendent leur épargne disponible en achetant des actions émises par les entreprises, directement ou via les intermédiaires financiers. En supposant que les hypothèses du théorème de Modigliani-Miller sont vérifiées [*Modigliani et Miller*, 1958], ce qui n'est bien sûr par très réaliste, ajouter des dettes et des obligations ne changerait pas le problème de l'investissement.

A chaque pas de temps, une partie fixe de F ($\alpha_F F$) est utilisée pour l'investissement physique I et pour redistribuer des dividendes. Un taux

d'investissement endogène (Γ_{inv}) est utilisé pour répartir $\alpha_F F$ entre l'investissement physique I et les dividendes Div .

Il est important de noter que les dividendes, *i.e.* la part des liquidités du producteur qui est redistribuée, sont l'ensemble des gains financiers des investisseurs¹. Ces dividendes incluent les dividendes redistribués, mais aussi le produit des ventes d'actions entre consommateurs, les gains en capital, les rachats d'action par les producteurs, les liquidations d'entreprises... L'équivalence entre ces catégories de profits redistribués est démontrée dans *Copeland et Weston* [2003]. Ce choix de modélisation dans NEDyM est justifié par le fait que quand il y a plus d'investissement financier que d'investissement physique, la part additionnelle retourne aux consommateurs, comme augmentation des dividendes ou comme une conséquence des ventes d'actions entre consommateurs.

En conséquence, l'épargne disponible peut être soit utilisée pour des investissements productifs, soit pour redistribuer des dividendes. Cette seconde possibilité crée une boucle monétaire "non-productive" : à partir du stock de liquidités du consommateur, de la monnaie est transférée via l'épargne disponible au stock de liquidités du producteur, puis re-transférée via les dividendes (au sens large) au stock de liquidités du consommateur. L'argent est échangé entre agents sans qu'un investissement productif n'ait lieu. De l'argent est donc soustrait à l'économie réelle sans être stockée par un unique agent. Ce processus est celui qui transforme les épargne et investissement *ex ante*, qui ne sont pas coordonnés, en épargne et investissement *ex post* cohérents. Quelque soit la quantité d'épargne disponible, si la situation économique est telle que la rentabilité du capital est faible, il n'y a pas transformation de l'épargne en investissement et l'épargne est "rendue" aux consommateurs via Div . Ainsi l'égalité entre épargne et investissement est brisée. On peut noter que cette boucle a un temps caractéristique très court (quelques semaines dans le modèle), ce qui impose un pas de temps très court dans le modèle.

Dans NEDyM, l'investissement physique est dirigé par Γ_{inv} , lui-même dirigé par la rentabilité du capital, avec une inertie qui vient : (i) des incertitudes et des coûts d'ajustement, qui font que les producteurs ne réagissent pas instantanément aux signaux économiques (*Day* [1979], *Lucas* [1967]); (ii) des délais entre le moment où un investissement est décidé et le moment où l'investissement est effectivement réalisé [*Kalecki*, 1937].

On peut noter que dans NEDyM la demande n'a pas d'influence directe sur l'investissement, à l'exception de son rôle important dans la détermination des profits. On trouve dans *Boyer* [1997] une taxonomie des régimes d'investissement, dans lesquels l'investissement peut être déterminé par les

¹On les qualifie aussi de "simple cash flow definition of profit" [*Copeland et Weston*, 2003].

profits ou directement par la demande. On se place ici plutôt dans un régime *classique*, où les profits seuls déterminent l'investissement.

- Profits bruts :

$$\Pi = pD - wL \quad (6.13)$$

- Liquidités des producteurs :

$$\frac{dF}{dt} = \Pi + S - Div - pI \quad (6.14)$$

- répartition entre dividendes et investissement physique :

$$pI + Div = \alpha_F F \quad (6.15)$$

Le producteur utilise une partie fixée de son stock de liquidités pour l'investissement physique et les dividendes.

La répartition entre investissement et dividendes dépend du taux d'investissement Γ_{inv} :

$$I = \Gamma_{inv} \cdot \frac{1}{p} \cdot (\alpha_F \cdot F) \quad (6.16)$$

- Dynamique du taux d'investissement du producteur :

Comme dans *Kalecki* [1937], *Rose* [1967] ou *Malinvaud* [1982], l'investissement est fonction de la profitabilité, et non de la demande agrégée comme dans les modèles keynésien avec accélérateur (*p. ex.* *Harrod* [1939], *Goodwin* [1951], *Schinasi* [1981]...). Classiquement, on utilise les valeurs observées de la profitabilité comme anticipation des profits futurs.

On considère ensuite deux possibilités, qui représentent deux organisations différentes du système économique, décrites dans *Aglietta et Rebérioux* [2004]. Dans la première, une *économie managériale*, dans laquelle le producteur est contrôlé par les dirigeants des entreprises qui cherchent à maximiser les profits des entreprises sur le long-terme. Cette option, déjà décrite dans *Berle et Means* [1932], peut être interprétée comme une situation dans laquelle la priorité est donnée aux investissements : le producteur redistribue ce qui reste disponible une fois que les investissements ont été financés.

Dans la seconde possibilité, le producteur est contrôlé par ses actionnaires (*économie actionnariale*). C'est une situation dans laquelle la priorité est donnée aux dividendes : le producteur investit ce qui reste disponible quand les dividendes demandés ont été redistribués aux actionnaires.

1. Economie managériale :

Les profits nets du producteur Π_n , sont les profits selon leur définition comptable [Copeland et Weston, 2003], c'est-à-dire les profits bruts auxquels on soustrait la dépréciation du capital :

$$\Pi_n = \Pi - \frac{1}{\tau_d} pK = pD - wL - \frac{1}{\tau_d} pK \quad (6.17)$$

Et le taux d'investissement suit la loi :

$$\frac{d\Gamma_{inv}}{dt} = \begin{cases} \alpha_{inv}(\gamma_{max} - \Gamma_{inv}) \left(\frac{\Pi_n}{pK} - \nu \right) & \text{if } \frac{\Pi_n}{pK} - \nu > 0 \\ \alpha_{inv}(\Gamma_{inv} - \gamma_{min}) \left(\frac{\Pi_n}{pK} - \nu \right) & \text{if } \frac{\Pi_n}{pK} - \nu \leq 0 \end{cases} \quad (6.18)$$

La répartition entre dividendes et investissements physiques dépend des profits nets par unité de capital, que l'on compare à une norme financière de rendement des capitaux ν [Boyer, 2000].

Si le profit net par unité de capital est supérieur (resp. inférieur) à la norme financière ν , le producteur augmente (resp. diminue) ses investissements physiques.

La limite $\gamma_{min} = 0$ représente le fait que l'investissement ne peut être négatif, c'est-à-dire que l'on ne peut pas "consommer" du capital installé; $\gamma_{max} = 0,8$ représente la contrainte de financement de l'investissement. Le choix de leur valeur ne modifie pas qualitativement la dynamique du modèle. L'asymétrie dans la loi (6.18) traduit le fait que l'investissement diminue (resp. augmente) plus rapidement quand l'investissement est élevé (resp. faible) que quand l'investissement est déjà réduit (resp. important).

Cette modélisation peut se récrire en utilisant le Q de Tobin [1969] : si le profit net futur est supposé égal à l'actuel, et si la valeur de la compagnie V est égale au flux actualisé de profit net, alors $V = \Pi_n/\nu$, où ν est le taux d'actualisation. Q est alors défini par la valeur de la compagnie divisée par le coût de remplacement de son capital pK . Dans NEDyM, le taux d'investissement augmente quand $Q > 1$ et diminue quand $Q < 1$.

Le choix de ν détermine le niveau d'investissement et donc le niveau de production. Ici, ν est supposé constant à 3%. La valeur de ν est inférieure au rendement observé des capitaux dans le secteur privé, car NEDyM ne sépare pas investissements privés et investissements publics, qui ne sont pas déterminés selon les mêmes normes.

2. Economie actionnariale :

La répartition entre les dividendes et l'investissement dépend ici des dividendes par unité de capital : si les dividendes par unité de capital sont supérieurs (resp. inférieurs) au taux de retour sur capital demandé ρ , le producteur augmente (resp. diminue) l'investissement pour diminuer (resp. augmenter) les dividendes. Ici, ρ est fixé de façon exogène. Ce type de fonctionnement de l'économie a été décrit par *Jensen* [1986].

$$\frac{d\Gamma_{inv}}{dt} = \begin{cases} \alpha_{inv}(\gamma_{max} - \Gamma_{inv}) \cdot \left(\frac{Div}{p \cdot K} - \rho\right) & \text{if } \frac{Div}{p \cdot K} - \rho > 0 \\ \alpha_{inv}(\Gamma_{inv} - \gamma_{min}) \cdot \left(\frac{Div}{p \cdot K} - \rho\right) & \text{if } \frac{Div}{p \cdot K} - \rho \leq 0 \end{cases} \quad (6.19)$$

Il est à noter que l'on a pas modélisé de façon explicite *l'accélérateur financier* [Boyer et al., 2004], qui passe par les prêts bancaires et la prime de risque associée. Cet accélérateur a sa dynamique propre et doit modifier les caractéristiques des fluctuations économiques.

6.4 Calibration du modèle et premiers résultats

Si la productivité totale A est constante, NEDyM a un équilibre, qui peut être stable ou instable, selon le choix du type d'économie (managériale ou actionnariale) et selon les valeurs des paramètres. Certains des paramètres du modèle (A , e_{full} , γ_{save} , L_{max} , ν , ρ , τ_{dep}) sont choisis de façon à ce que l'équilibre du modèle soit l'état de l'économie de l'Union Européenne à 15 pays en 2001, même s'il n'y a pas de raison de croire que l'Europe est à l'équilibre en 2001.

On n'a pas fait de calibrage individuel des autres paramètres (α_F , α_{inv} , α_M , α_p^1 , α_p^2 , τ_{empl} , τ_{wage}). Des valeurs ont donc été choisies conjointement de manière à obtenir un comportement réaliste du modèle.

Les valeurs des paramètres sont reproduites dans le Tab. 6.3 et l'équilibre correspondant dans le Tab. 6.4, avec les valeurs observées issues de *Eurostat* [2002].

On remarque que à partir des 6000 milliards disponibles pour le producteur (épargne disponible plus profits), 2000 milliards sont utilisés pour l'investissement et 4000 milliards sont utilisés pour redistribuer des dividendes (au sens large, c'est-à-dire en incluant les dividendes, les échanges d'action entre consommateurs,...). De plus, les revenus totaux (salaires plus dividendes) valent 10.000 milliards d'euros, supérieurs au PIB. Ceci s'explique par le fait que NEDyM ne considère pas des flux nets sur un an comme la comptabilité nationale, mais des flux bruts instantanés (sommés

Symbole	Description	Valeurs d'équilibre (et valeurs nettes)	Valeurs observées en 2001 (UE-15)
pY	production (=demande)	9	8.8
L	nombre de salariés (en % de la population active)	90%	92.6 %
wL	salaires totaux	6	5.6 (taxes comprises)
pC	consommation	7	6.8
S	épargne disponible	3 (2)	1.8
Π	profits bruts	3	3.2
Div	dividendes	4 (3)	3.2
pI	investissements physiques	2	1.8

TAB. 6.4: Etat d'équilibre de NEDyM en valeurs monétaires (quand c'est nécessaire, les flux nets sur un an sont reproduits entre parenthèses) et les valeurs observées sur l'Union Européenne à 15 en 2001 [Eurostat, 2002]. Les valeurs sont en milliers de milliards d'euros.

sur un an). Les valeurs des variables de NEDyM dans le Tab. 6.4 tiennent donc compte de la boucle non-productive entre épargne et dividendes qui n'est pas vue par la comptabilité nationale. Il faut donc transformer les sorties de NEDyM pour les rendre comparables à la comptabilité nationale. Ainsi les dividendes, qui valent 3000 milliards d'euros dans NEDyM (valeur *ex ante*), sont réduit à 2000 milliards d'euros quand on ne considère que le flux net annuel (valeur *ex post*).

Avec le jeu de paramètres du Tab. 6.3, l'équilibre de NEDyM est l'état stationnaire d'un modèle de Solow avec un taux d'épargne $\gamma_{save}^* = 22\%$.

Les chapitres suivants vont utiliser des versions différentes de NEDyM, dont l'équilibre pourra être stable ou instable suivant le jeu de paramètre retenu et le type d'économie considérée (managériale ou actionnariale).

6.5 Conclusion

On a proposé dans ce chapitre un cadre de modélisation, NEDyM, dont l'objectif est de modéliser les processus de court terme en introduisant des inerties, des stocks et des délais d'ajustement dans un modèle néoclassique à la Solow. Le comportement de ce modèle dépend de façon directe du jeu de paramètres utilisé, ainsi que du type d'économie considérée. L'objectif est de pouvoir reproduire, dans un cadre unique, différents types de comportement économique qui ont été proposés par ailleurs. On se rapproche donc des méthodes de la théorie de la régulation [Boyer, 2004], même si (i) on ne prétend pas représenter l'ensemble des régimes économiques proposés par cette

théorie (par exemple, les modélisations du marché du travail ou de l’outil productif sont dans notre modèle bien trop sommaires); (ii) on s’intéresse plus particulièrement à la dynamique des fluctuations de court-terme.

Dans cette optique, on propose deux versions de NEDyM.

La première, NEDyM.1, est la version “*économie actionnariale*” de NEDyM, avec un jeu de paramètres qui assure un équilibre stable et des réponses réalistes autour de son équilibre stable. On se place donc dans un monde à la *Kydland et Prescott* [1982], où l’économie est stable et réagit à des chocs exogènes (chocs de productivité ou de demande) qui provoquent les fluctuations de court terme.

La seconde, NEDyM.2, reproduit des cycles économiques endogènes venant de la dynamique intrinsèque et déterministe du modèle, (comme dans *Samuelson* [1939], *Kalecki* [1937], *Goodwin* [1951], ou *Chiarella et Flaschel* [2000]), et non de chocs exogènes comme dans *Kydland et Prescott* [1982]. Cette version représente une “*économie managériale*”.

Il est remarquable que la version “*économie managériale*” est beaucoup plus instable que la version “*économie actionnariale*”², et ceci pour une raison très simple : dans le cas d’une économie actionnariale, la redistribution de dividendes importants pousse à augmenter les investissements (Eq. (6.19)). Cependant, toute augmentation des investissements se fait au détriment de la redistribution de dividendes (Eq. (6.15)), ce qui vient naturellement réguler la croissance des investissements, stabilisant par là le modèle. Pour autant, cette caractéristique ne permet pas de justifier un mode de régulation uniquement fondé sur la souveraineté actionnariale dans l’économie réelle. En effet, le modèle ne tient pas compte des problèmes d’une telle régulation, qui sont maintenant bien connus [*Aglietta et Rebérioux*, 2004; *Boyer et al.*, 2004], notamment en ce qui concerne (i) la possibilité d’existence d’un contrôle actionnarial correctement informé (la décennie 90 fournit son lot d’exemples); ainsi que (ii) la justification d’un tel mode de régulation qui écarte complètement les salariés de la gestion du processus de production.

Dans les deux chapitres qui suivent, on va successivement :

(1) utiliser la version NEDyM.1 qui possède un équilibre stable, pour regarder comment les processus de court-terme modifient le comportement de long-terme, même dans un modèle stable à la *Kydland et Prescott* [1982].

(2) Ensuite, on s’intéressera à la capacité du modèle à reproduire de manière endogène les caractéristiques fondamentales des cycles économiques. L’interaction des chocs exogènes avec la dynamique endogène sera alors évoquée.

²Il a à noter que les jeux de paramètres pour lesquels NEDyM version *économie managériale* a un équilibre stable ne permettent pas d’obtenir des réponses réalistes autour de l’équilibre.

Références

- Aglietta, M., et A. Rebérioux, *Dérives du Capitalisme Financier*, Bibliothèque Albin Michel Economie, 2004.
- Arrow, K., Workshop on the economy as an evolving complex system : Summary, In P. Anderson et al. (Eds.), *The Economy as an Evolving Complex System*, Addison-Wesley, New-York, pp. 275–282, 1989.
- Benhabib, J., et K. Nishimura, The Hopf-bifurcation and the existence of closed orbits in multi-sectoral models of optimal economic growth, *Journal of Economic Theory*, 21, 421–444, 1979.
- Berle, A., et G. Means, *The Modern Corporation and Private Property*, New-York, Harcourt, Brace and World, 1932.
- Boyer, R., Why does employment differ in the course of time and across nation ? An institutional answer in the light of the Régulation theory, *Metroeconomica*, 48(1), 1–35, 1997.
- Boyer, R., Is a finance-led growth regime a viable alternative to Fordism ? A preliminary analysis, *Economy and Society*, 29(1), 111–145, 2000.
- Boyer, R., *La théorie de la régulation. Les fondamentaux*, Coll. Repères, La Découverte Paris, 2004.
- Boyer, R., et Y. Saillard, *La théorie de la régulation. L'état des savoirs*, Coll. Recherches, La Découverte, Paris, 2002.
- Boyer, R., M. Dehove, et D. Plihon, *Les crises financières*, Rapport du Conseil d'Analyse Economique, n° 50, La documentation française, Paris, 2004.
- Chiarella, C., et Flaschel, *The Dynamics of Keynesian Monetary Growth*, Cambridge University Press, 2000.
- Chiarella, C., P. Flaschel, G. Gong, et W. Semmler, Nonlinear Phillips curves, complex dynamics and monetary policy in a keynesian macro model, *School of Finance and Economics, University of Technology, Sydney, Working Paper number 120*, 2002.
- Cobb, C., et P. Douglas, A theory of production, *The American Economic Review*, 18(1), 139–165, 1928.
- Copeland, T., et J. Weston, *Financial Theory and Corporate Policy*, Third Edition, Pearson Education International, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA, 2003.
- Day, R., *Cautious optimizing*, in J. Roumasset et al. (Eds.), Risk Uncertainty and Agricultural Development, New-York, Agricultural Development Concil, ch. 7, 1979.
- Day, R., Irregular growth cycles, *American Economic Review*, 72, 406–414, 1982.

- Eurostat, *Economic portrait of the European Union 2001*, Panorama of the European Union, European Commission, 2002.
- Frisch, R., *Propagation Problems and Impulse Problems in Dynamic Economics*, Economic Essay in honor of Gustav Cassel, London : George Allen and Unwin, 1933.
- Gale, D., Pure exchange equilibrium of dynamic economic models, *Journal of Economic Theory*, 6, 12–36, 1973.
- Goodwin, R., The non-linear accelerator and the persistence of business cycles, *Econometrica*, 19, 1–17, 1951.
- Goodwin, R., *A growth cycle*, In C. Feinstein (Ed.), *Socialism, Capitalism and Economic Growth*, Cambridge University Press, Cambridge, 1967.
- Grandmont, J.-M., On endogenous competitive business cycles, *Econometrica*, 5, 995–1045, 1985.
- Harrod, R., An essay on dynamic economic theory, *Economic Journal*, 49, 1433, 1939.
- Hicks, J., The cycle in outline, *A Contribution to the Theory of the Trade Cycle*, Oxford, Oxford University Press, Ch. 8, pp. 95–107, 1950.
- Jensen, M., Agency costs of free cash flow, corporate finance and takeovers, *American Economic Review*, 76, 323–329, 1986.
- Kaldor, N., A model of the trade cycle, *Economic Journal*, 50, 78–92, 1940.
- Kalecki, M., A theory of the business cycle, *Review of Economic Studies*, 4, 77–97, 1937.
- Kydland, F., et E. Prescott, Time to build and aggregate fluctuations, *Econometrica*, 50(6), 1345–1370, 1982.
- Lordon, F., *Formaliser la dynamique et les crises régulationnistes*, pp. 264–272, dans Boyer et Saillard [2002], 2002.
- Lucas, R., Adjustment costs and theory of supply, *Journal of Political Economy*, 75, 321–334, 1967.
- Lucas, R., An equilibrium model of the business cycle, *The Journal of Political Economy*, 83(6), 1113–1144, 1975.
- Malinvaud, E., Wages and unemployment, *The Economic Journal*, 92(365), 1–12, 1982.
- Modigliani, F., et M. Miller, The cost of capital, corporation finance and the theory of investment, *American Economic Review*, 48, 261–97, 1958.
- Phillips, A., The relation between unemployment and the rate of change of money wage rates in the United Kingdom, 1862-1957, *Economica*, 25(100), 283–299, 1958.

- Reichlin, P., Equilibrium cycles in an overlapping generations model with production, *Journal of Economic Theory*, 40, 89–102, 1986.
- Rose, H., On the nonlinear theory of employment cycle, *Review of Economic Studies*, 34, 153–173, 1967.
- Rosser, J., On the complexities of complex economic dynamics, *The Journal of Economic Perspectives*, 13(4), 169–192, 1999.
- Samuelson, P., A synthesis of the principle of acceleration and the multiplier, *Journal of Political Economy*, 47, 786–797, 1939.
- Schinasi, B., A nonlinear dynamic model of short-term fluctuation, *Review of Economic Studies*, 48, 649–656, 1981.
- Slutsky, E., The summation of random causes as a source of cyclic processes, III(1), *Conjuncture Institute, Moscow, Reprinted in Econometrica*, 5, 105–146, 1927.
- Solow, R., A contribution to the theory of economic growth, *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65–94, 1956.
- Solow, R., Growth theory and after, *The American Economic Review*, 78(3), 307–318, 1988.
- Tobin, J., A general equilibrium approach to monetary policy, *Journal of Money, Credit and Banking*, 1, 1969.

Chapitre 7

Une approche dynamique de l'évaluation du coût des événements extrêmes.

Sommaire

7.1	Introduction	202
7.2	Les événements extrêmes météorologiques (EEM)	203
7.2.1	Définition	203
7.2.2	Données	204
7.2.3	Changement climatique et événements extrêmes	206
7.3	Le modèle NEDyM.1 et son module “catastrophe”	208
7.3.1	Un modèle dynamique stable de déséquilibre (NEDyM.1)	208
7.3.2	Equilibre et dynamique de NEDyM.1	208
7.3.3	Le module “catastrophe”	212
7.4	Les dommages dus aux événements extrêmes	220
7.4.1	Hypothèse de stabilité de la distribution	220
7.4.2	Hypothèse de variation de la distribution	223
7.5	L'hypothétique effet des extrêmes sur la productivité	226
7.5.1	Modélisation du progrès technique	227
7.5.2	Dommages dus à une catastrophe	229
7.5.3	Dommages dus à une distribution de catastrophes	230
7.5.4	Influence de l'effet de productivité sur la bifurcation	231
7.5.5	Commentaires sur le réalisme de l'effet de productivité	232
7.6	Conclusions	234
	Références	237

7.1 Introduction

Les événements extrêmes sont l'un des principaux canaux par lesquels le climat et l'économie interagissent. Selon les compagnies de réassurance (*Munich-Re* [2004], *Swiss-Re* [2004]), ils touchent plus d'un million de personnes chaque année, sont responsables d'un grand nombre de morts (35.000 en 2003), de pertes économiques importantes ¹ (environ 65 milliards de dollars en 2003, plus de 130 milliards en 2004, sans compter le séisme d'Asie du Sud). Ils sont également suspectés de représenter des obstacles majeurs au développement économique des pays les plus pauvres (*IFRCRCS* [2002], *Benson et Clay* [2004]). En 2004, la saison cyclonique a été particulièrement dure avec plus de 2000 morts en Haïti, 4 cyclones successifs sur la Floride (plus de 50 milliards de dollars de dégâts) et une saison très active également en Asie. On en sait toutefois assez peu sur les conséquences macroéconomiques des événements extrêmes (on trouve une revue très complète de l'existant dans *Benson et Clay* [2004]).

De plus, il est tout à fait possible que la fréquence et l'intensité des événements extrêmes, ainsi que les zones qu'ils menacent, changent dans les décennies prochaines à cause du réchauffement climatique [voir par exemple, *West et al.*, 2001; *Choi et Fisher*, 2003; *Christensen et Christensen*, 2003; *Déqué*, 2004a; *Beniston*, 2004; *Schär et al.*, 2004]. En conséquence, il semble essentiel de prendre en compte les extrêmes dans l'évaluation des dommages potentiels du changement climatique. Il a été toutefois remarqué [*Goodess et al.*, 2003] que ces événements sont actuellement très mal représentés dans les modèles intégrés. La difficulté principale vient du fait que les conséquences de tels événements mettent en jeu principalement des phénomènes de court-terme : destruction du capital productif, rupture de production, arrêt de la fourniture de services essentiels (eau de boisson, énergie, services de santé...). Il n'est pas possible de prendre en compte ces processus dans un modèle d'équilibre dont le pas de temps est de l'ordre de l'année.

Or, comme il a été mentionné dans le chapitre 4, les évaluations des dommages économiques dus au changement climatique utilisent des modèles de croissance conçus pour reproduire les caractéristiques de long-terme de la croissance économique [*Peck et Teisberg*, 1992; *Nordhaus*, 1994; *Tol*, 1997; *Ambrosi et al.*, 2003]. Dans ces modèles, les événements extrêmes ne peuvent être correctement pris en compte et les impacts du changement climatiques ne sont donc représentés que par une baisse continue et régulière de la productivité moyenne, liée à l'augmentation de température. Ceci explique en

¹Les *pertes économiques* d'une catastrophe sont définies par le Bureau de l'Analyse Economique du Ministère du Commerce des USA comme les dommages directs au capital fixe tangible, c'est-à-dire principalement les bâtiments et les infrastructures ; les pertes en biens de consommation durables (p.ex. voitures), en stocks ou en activité ne sont pas pris en compte. Les *dommages estimés* tiennent compte des effets indirects de la catastrophes, mais plusieurs méthodologies de calcul concurrentes existent.

partie pourquoi le changement climatique n'a pour conséquence dans ces modèles qu'une faible baisse de la croissance économique, négligeable comparée à l'augmentation de productivité liée au progrès technique (*p. ex. Gerlagh et Papyrakis [2003] and Azar et Schneider [2003]*).

L'objectif de cette partie est d'évaluer l'importance de la prise en compte des extrêmes. Représentent-ils une part significative des dommages? Peut-on les moyenner sur des durées plus longues pour les prendre en compte dans un modèle de croissance de long-terme? Si oui, comment? Pour répondre à ces questions, on utilise une version de NEDyM capable de reproduire des réponses économiques de court-terme, tout en étant équivalent à un modèle de Solow sur le long-terme. NEDyM.1 est ici utilisé pour estimer les conséquences macro-économiques d'un changement de la distribution des événements extrêmes météorologiques sur l'Europe, en négligeant tous les autres aspects du changement climatique. L'objectif n'est donc clairement pas de proposer une estimation des coûts du changement climatique mais seulement d'évaluer l'importance des événements extrêmes dans une telle estimation.

La première section de ce chapitre définit ce que l'on entend par événement extrême météorologique et propose une modélisation de la distribution statistique de tels événements. La deuxième section décrit rapidement le modèle NEDyM.1 et son module "catastrophe". La troisième section applique NEDyM.1 à l'évaluation des conséquences de la distribution actuelle des extrêmes, et de possibles distributions futures.

7.2 Les événements extrêmes météorologiques (EEM)

7.2.1 Définition

Dans ce chapitre, on considère des événements extrêmes météorologiques (EEM) comme de courtes périodes durant lesquelles des destructions significatives de capital ont lieu. On choisit de ne représenter que les événements majeurs auxquels il est impossible de s'adapter ou à des coûts insupportables². Les événements extrêmes "fréquents", c'est-à-dire qui arrivent plusieurs fois par an en Europe en moyenne, sont négligés car (1) ils ne constituent pas des chocs significatifs au niveau macroéconomique, (2) l'effet de lissage de l'assurance permet de les prendre en compte de manière correcte comme une perte moyenne annuelle dans un modèle de long-terme.

On ne s'intéressera pas ici aux "catastrophes climatiques", telles que le détachement d'une partie de la glace de l'Antarctique de l'Ouest, qui mènerait à des impacts globaux largement supérieurs à ceux des catastrophes

²Des exemples de tels événements sont les inondations d'Europe Centrale en 2002 ou la crue de la Seine de 1910.

naturelles que l'on connaît actuellement. Plusieurs auteurs se sont intéressés aux conséquences de tels événements, dont *Nordhaus et Boyer* [1999], qui proposent une volonté à payer pour les éviter et *Haurie et Moresino* [2004], qui développent une méthodologie pour les prendre en compte dans l'analyse coût-bénéfice.

Dans la suite, on s'intéresse à 4 types d'EEM : les inondations, les tempêtes (avec leur marée de tempête), les sécheresses et les vagues de chaleur.

7.2.2 Données

Munich-Re [2003] propose une liste des catastrophes naturelles d'origine météorologique. Munich Re fait remarquer en particulier que le nombre de catastrophes météorologiques par décennie a augmenté d'un facteur 4,4 entre les années 60 et les années 90 et que les pertes économiques correspondantes ont augmenté d'un facteur 7,9. En supposant que la variabilité naturelle n'a pas changé durant cette période (ce qui est cohérent avec les observations climatologiques (*IPCC* [2001], chp. 2)) cela signifie que la perte économique par événement a augmenté d'un facteur $7,9/4,4 \approx 1,8$ en 30 ans à cause de l'augmentation de notre vulnérabilité. Cela correspond à une augmentation de 2% par an de la perte moyenne par événement³. Cela permet de définir une perte économique normalisée, qui est une estimation des pertes économiques que provoquerait un événement s'il se produisait aujourd'hui, que l'on calcule en utilisant la croissance de 2% par an des pertes moyennes liées à un événement.

La modélisation des événements extrêmes (voir *Katz et al.* [2002]) se fait classiquement de la façon suivante : (i) on choisit un seuil de perte au delà duquel on considère un événement comme extrême ; (ii) on calcule une probabilité d'occurrence, sur un mois ; (iii) quand un événement arrive, une fonction de densité de probabilité donne son intensité.

Comme les événements fréquents sont négligés, on se donne un seuil d'événement extrême à 0,01% du PIB de l'Union Européenne. Cela représente des pertes directes d'environ 800 millions d'euros. On suppose que les 20 dernières années sont représentatives de la distribution statistique, que cette distribution est stationnaire pendant cette période, et que les EEM sont indépendants. Ainsi la probabilité d'occurrence d'un EEM peut être calculée ; on trouve⁴ $p_{EE} = 0,06$.

La figure 7.1 représente un histogramme de la distribution des pertes des EEMS en 4 boîtes. Elle donne la probabilité, si un EEM arrive, que ses

³Ceci suggère que, durant les 30 dernières années, le nombre d'événements a augmenté, mais que la perte par événement a augmenté dans les mêmes proportions que le PIB. En d'autres termes, il y a eu plus d'événements mais de gravité constante.

⁴On suppose qu'il ne peut y avoir qu'un EEM en un mois, alors que l'on a des exemples du contraire.

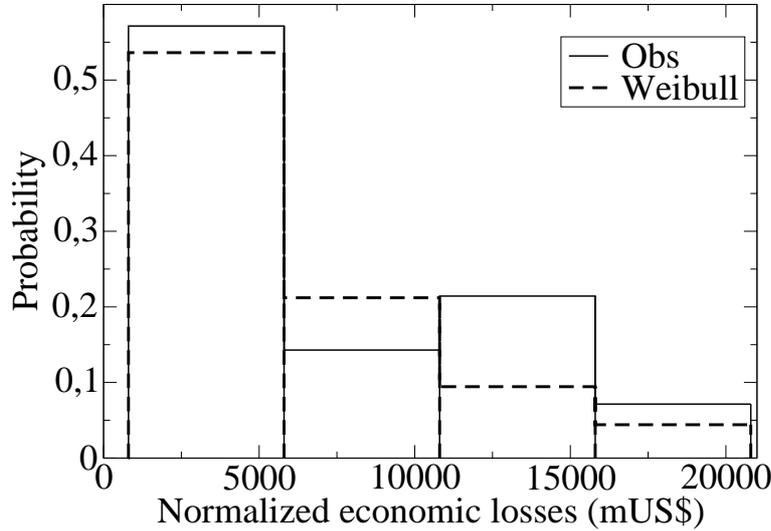


FIG. 7.1: Histogramme de la probabilité des pertes liées à un événement extrême météorologique, en 4 boîtes, selon les observations (*Obs*) et la loi de Weibull calibrée sur ces observations f_{ζ} (*Weibull*).

pertes soient comprises dans chacune des boîtes. Bien sûr, la taille de série empêche toute analyse statistique rigoureuse. La distribution observée sera tout de même supposée significative, car on cherche avant tout à identifier des comportements qualitatifs robustes.

Il a été montré que l'intensité "naturelle" des EEM a une queue de probabilité géométrique [Katz *et al.*, 2002]. Toutefois, la relation entre intensité naturelle (ex : vitesse du vent) et pertes économiques est une question très ouverte. Dans la suite, on suppose que la distribution de probabilité de pertes économiques suit une loi de Weibull, donnée par :

$$f_{\beta,\lambda}(s) = \beta \cdot \lambda^{\beta} \cdot (s - s_{EE})^{\beta-1} \cdot \exp\left(-\left(\lambda(s - s_{EE})^{\beta}\right)\right) \quad (7.1)$$

Le calibrage donne $\lambda = 0.897933333$ et $\beta = 0.000178672$, et la loi correspondante est reproduite en Fig. 7.1. Cette fonction colle raisonnablement avec les observations. Cependant, pour tester la robustesse de nos résultats, une loi linéaire est également calibrée et utilisée dans la suite.

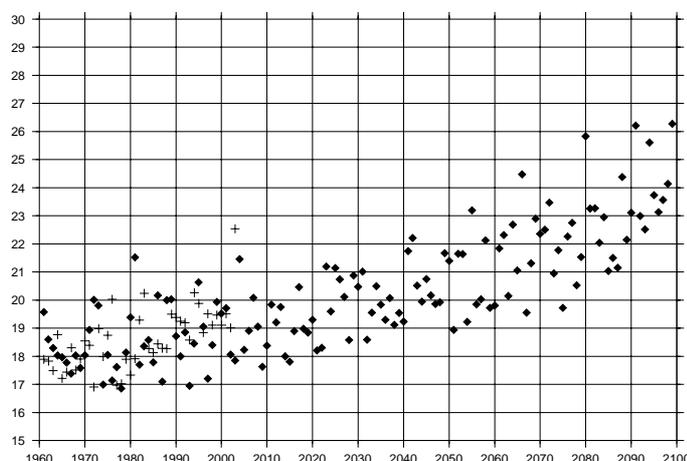


FIG. 7.2: Températures estivales observées entre 1960 et 2003 (en °C) et les prédictions du modèle ARPEGE-Climat [Gibelin et Déqué, 2003] jusqu'en 2100 dans le scénario SRES/A2 [IPCC, 2000]. Figure de Michel Déqué [Déqué, 2004b].

7.2.3 Changement climatique et événements extrêmes

Il est probable que le changement climatique modifiera dans les prochaines décennies les pertes économiques dues aux EEM. Par exemple, il est possible que la trajectoire moyenne des dépressions extra-tropicales change, avec comme conséquence que des zones actuellement relativement épargnées par ces dépressions – et donc peu adaptées – ne le soient plus. Dans ce cas, les pertes provoquées par les dépressions pourraient augmenter sans que leur fréquence ou leur intensité ne soit modifiée.

Mais les fréquences des EEM vont probablement être modifiées par le changement climatique, puisque des conditions actuellement exceptionnelles vont devenir courantes. Ainsi, la canicule de 2003 sur l'Europe est un événement très rare dans le climat actuel [Schär et al., 2004] mais correspond à un été ordinaire en 2080 selon la plupart des modèles climatiques comme le montre la figure 7.2 qui présente les températures estivales observées entre 1960 et 2003 et les prédictions du modèle ARPEGE-Climat [Gibelin et Déqué, 2003] jusqu'en 2100 dans le scénario SRES/A2 [IPCC, 2000]. Selon Beniston [2004], cette vague de chaleur de 2003 est une bonne approximation des futurs étés sur l'Europe vers la fin du vingt-et-unième siècle.

En plus des changements de température moyenne, Schär et al. [2004] trouvent une augmentation de la variabilité des températures (de plus de 100%) dans les modèles climatiques régionaux sur l'Europe. Or, ils montrent également qu'à température moyenne inchangée, une augmentation de 50% de la variance des températures estivales multiplie par 150 la probabilité d'une canicule de l'intensité de celle de 2003.

Une autre illustration des effets de seuil liés aux événements extrêmes est donnée par *Déqué* [2004a] : dans le modèle ARPEGE-Climat, la probabilité de dépasser 35°C en été passe de 1% aujourd'hui à 11% en 2070 sur Paris et de 1% à 27% à Marseille. Plus précisément, le nombre de jours pendant lesquels la température maximum sur la France dépasse 30°C pendant 10 jours consécutifs est multiplié par plus de 20 entre aujourd'hui et la fin du siècle. Bien sûr, cette augmentation des périodes de canicule est accompagnée par une diminution de la probabilité des périodes de grand froid, dont les conséquences économiques sont actuellement importantes.

La modification des précipitations et du niveau de la mer pourrait également avoir des conséquences importantes sur les probabilités d'inondation, ainsi que l'illustrent les travaux de *Christensen et Christensen* [2003] sur les inondations estivales sur l'Europe, ceux de *Rosenzweig et Solecki* [2001] sur les surcôtes à New-York, ou ceux de *Nicholls et al.* [1990], qui évaluent que le nombre de personnes touchées annuellement par une inondation passerait de 13 millions à 93 millions si le niveau de la mer montait de 40 cm.

Toutefois, cette augmentation des pertes dues aux EEM est bornée par : (i) les limites naturelles des EEM, qui ne peuvent être dépassées pour des raisons physiques ; (ii) le fait que les pertes sont largement corrélées à la valeur économique des zones touchées et qu'il existe des potentiels de pertes qui ne peuvent être dépassés (on trouve une évaluation des potentiels de pertes dues aux inondations dans *Swiss-Re* [1998]) ; (iii) les mesures d'adaptation qui peuvent être prises pour limiter les pertes (digues, système d'alerte, normes de construction...). Donc, le lien entre les changements de distribution de probabilité de l'intensité naturelle des événements extrêmes et leurs pertes associées est loin d'être évident. Jusqu'à aujourd'hui, seulement quelques études sont disponibles. Elles suggèrent toutes que le changement climatique va faire augmenter les pertes dues aux événements extrêmes :

- *Choi et Fisher* [2003] montrent qu'une augmentation de 1% des précipitations annuelles augmenterait de 2,8% les coûts des catastrophes naturelles aux USA. Ceci mènerait donc, au doublement de la concentration de CO₂, à une augmentation entre 100 et 250% des pertes liées aux inondations et entre 150 et 300% des pertes liées aux cyclones.
- *Dorland et al.* [1999] ont cherché le lien entre l'intensité des vents et les dommages des tempêtes. Ils trouvent qu'une augmentation de 6% de la vitesse des vents provoquerait une multiplication par 5 des pertes moyennes annuelles.
- *West et al.* [2001] ont estimé que la montée du niveau de la mer pourrait à elle seule faire augmenter les pertes dues aux tempêtes de 5%.

Pour l'instant, il reste cependant impossible de prédire de façon crédible comment les pertes économiques directes des événements extrêmes vont évoluer dans les prochaines décennies. Pourtant les dommages économiques liés à ces catastrophes pourraient représenter une partie importante

des dommages dus au changement climatique. On se propose ici d'évaluer la vulnérabilité de l'économie aux extrêmes, sous la forme de la sensibilité des dommages économiques (directs et indirects) aux variations des pertes économiques directes dues aux extrêmes.

7.3 Le modèle NEDyM.1 et son module “catastrophe”

Pour prendre en compte les événements extrêmes dans l'évaluation des dommages du changement climatique, on utilise le modèle NEDyM.1 et un module spécifique, qui sont décrits dans cette section.

7.3.1 Un modèle dynamique stable de déséquilibre (NEDyM.1)

Tel qu'il est présenté au chapitre précédent, NEDyM.1 modélise une économie stylisée, fermée et homogène. On néglige ici la propagation des chocs entre secteurs et entre région, malgré leur importance. On se concentre sur les effets de déséquilibre dans l'économie.

Cette version du modèle NEDyM considère une *économie actionnariale*, et ses paramètres dynamiques ont été choisis d'une façon telle que le modèle possède un *équilibre stable* et des réponses réalistes aux chocs exogènes. On se place donc dans un contexte à la *Kydland et Prescott [1982]*, où les fluctuations économiques viennent de chocs exogènes.

7.3.2 Equilibre et dynamique de NEDyM.1

On va vérifier ici que NEDyM.1 est bien équivalent au modèle de *Solow [1956]* sur le long terme, et qu'il reproduit des réponses de court terme acceptables.

7.3.2.1 Calibration et Equilibre

Le modèle reste calibré pour que son équilibre soit l'état économique de l'Union Européenne à 15 en 2001. Les autres paramètres ne sont pas calibrés individuellement mais sont choisis conjointement de manière à ce que l'équilibre du modèle soit stable et que les réponses du modèle soient réalistes (voir plus bas). Les valeurs des paramètres sont reproduites dans la Tab. 7.1.

Cet état d'équilibre, reproduit en Tab. 7.2, est exactement celui d'un modèle de Solow calibré avec un taux d'épargne $\gamma_{save}^* = 22\%$. C'est seulement les réponses aux chocs de ces modèles qui sont différentes, leurs comportements de long-terme sont les mêmes.

Symbole	Description	Valeur
A	productivité totale	$A = 3,2 \cdot 10^{-4}$
e_{full}	taux d'emploi d'équilibre	$e_{full} = 90\%$
L_{max}	population active (en millions)	$L_{max} = 180$
ρ	norme financière de retour sur capital investi	$\rho = 10\% \cdot an^{-1}$
γ_{save}	taux d'épargne	$\gamma_{save} = 0,3$
τ_{dep}	temps caractéristique de dépréciation du capital	$\tau_{dep} = 20 \text{ ans}$
α_F	taux d'utilisation des liquidités du producteur	$\alpha_F = 20\%an^{-1}$
α_M	taux d'utilisation des liquidités du consommateur	$\alpha_M = 20\%an^{-1}$
α_{inv}	flexibilité de l'investissement	$\alpha_{inv} = 10$
α_p^1	flexibilité des prix, impact du stock	$\alpha_p^1 = 10^{-2}$
α_p^2	flexibilité des prix, impact du déséquilibre instantané	$\alpha_p^2 = 10^{-2}$
τ_{empl}	temps caractéristique du marché de l'emploi	$\tau_{empl} = 2 \text{ ans}$
τ_{wage}	temps caractéristique des salaires	$\tau_{wage} = 2 \text{ ans}$

TAB. 7.1: Liste des paramètres. Les 7 premiers déterminent l'équilibre du modèle et sont calibrés; les 6 derniers n'influencent pas cet équilibre mais seulement la dynamique du modèle, et sont choisis de manière *ad hoc*.

Symbole	Description	Valeurs d'équilibre (valeurs nettes)	valeurs observées en 2001 (UE-15)
pY	production (=demande)	9	8,8
L	nombre de salariés	90%	92,6 %
wL	salaires totaux	6	5,6
			(taxes comprises)
pC	consommation	7	6,8
S	épargne disponible	2	1,8
Div	dividendes	3	3,2
pI	investissements physiques	2	1,8

TAB. 7.2: Etat d'équilibre de NEDyM.1 (en valeurs nettes) et les valeurs observées sur l'Union Européenne à 15 en 2001 [*Eurostat*, 2002]. Les valeurs sont en milliers de milliards d'euros.

7.3.2.2 Sentier de croissance équilibrée

Quand on introduit le changement technique, via une augmentation régulière de la productivité A , le modèle atteint un sentier de croissance équilibrée de plein emploi. Pour une croissance de la productivité de 2%, on observe une croissance du PIB de 3%. Ce comportement est également celui d'un modèle de Solow.

7.3.2.3 Transition entre deux sentiers équilibrés

A partir du sentier précédent, si on réduit instantanément la croissance de la productivité de 2% par an à 0%, la production continue de croître pendant environ 80 ans, à cause du temps d'ajustement de la quantité de capital productif. A partir de l'instant où on réduit la croissance de la productivité, le chômage supplémentaire atteint 2% en 10 ans et disparaît ensuite en 30 ans grâce aux mécanismes d'ajustement. Pendant cette période, le salaire réel diminue de 7% et le taux d'investissement de 25%.

7.3.2.4 Réponse à un choc en productivité

Pour mieux comprendre le comportement du modèle, on considère maintenant le modèle sans croissance de la productivité. Dans ce cas, le modèle a un équilibre stable. A partir de cet équilibre, la productivité A est brutalement réduite de 7%. La réponse de NEDyM.1 est reproduite en figure 7.3, ainsi que la réponse en production du modèle de Solow.

Après la baisse de productivité, la production décroît instantanément. Cette décroissance est ensuite amplifiée par la baisse de la demande de travail : vu le prix et le salaire (constants sur le très court terme), une productivité plus basse amène le producteur à réduire sa demande de travail. Ce choc mène également à une baisse des profits et donc du taux d'investissement. Ainsi on observe une diminution de la quantité de travail utilisée et de la quantité de capital productif, ce qui amplifie la baisse de production.

Finalement, le chômage transitoire et la baisse de l'investissement font que le choc est amplifié par rapport à un modèle de Solow, même si l'équilibre final est le même dans les deux modèles. Dans NEDyM.1, au plus fort de la crise, le chômage a augmenté de 2,5%. Le nouvel état d'équilibre est atteint 50 ans après le choc, le salaire réel est réduit de 10%, le prix a crû de 15% et la production est 10% inférieure à l'état précédant le choc.

7.3.2.5 Conclusions sur NEDyM.1

NEDyM.1 est tout à fait équivalent à un modèle de Solow quand les paramètres évoluent lentement et il est capable de reproduire des réponses

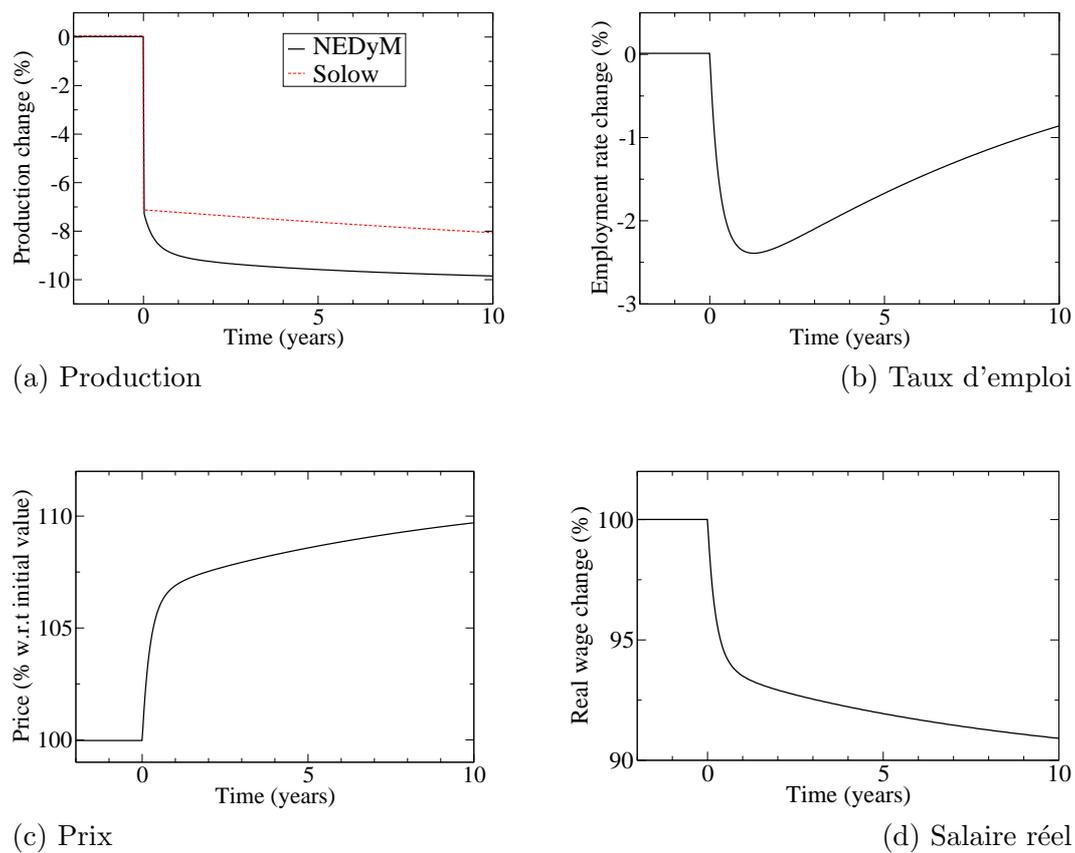


FIG. 7.3: Réponse du modèle à une diminution de 7% de la productivité, ainsi que la réponse du modèle de Solow au même choc. Sur le long terme, plus de 10 ans, le nouvel équilibre de NEDyM après le choc est le même que celui du modèle de Solow.

de court terme réalistes en réponse à des chocs.

7.3.3 Le module “catastrophe”

Comme nous l'avons vu aux chapitres 1 et 2, l'évaluation des dommages du changement climatique impose de prendre en compte les événements extrêmes. Or, les conséquences de ces événements ne passent pas principalement par une baisse de la productivité (ou de la production) mais plutôt par la destruction du capital productif.

Ainsi, *Munich-Re* [2003] propose une estimation des conséquences des inondations de l'été 2002 en Allemagne : elles ont provoqué une perte directe de production de “seulement” un milliard d'euros mais elles ont détruit du capital pour dix milliards d'euros dont 4 milliards d'euros d'infrastructure, 2 milliards d'euros de capital dans le commerce et l'industrie et 2 milliards d'euros dans l'habitat. Selon la même source, les inondations du Mississippi en 1993 ont détruit pour 18 milliards de dollars de capital. Les tempêtes de 1999 en Europe ont également détruit pour 20 milliards d'euros de capital, alors que les pertes directes de production ont été faibles. *Swiss-Re* [1998] propose une estimation des potentiels de destruction des inondations dans plusieurs pays. On peut noter parmi eux un potentiel pour la Hollande de 30 à 60 milliards de dollars en cas d'inondation normale et jusqu'à 100 milliards de dollars en cas de marée de tempête ⁵.

Dans les modèles tels que DICE [Nordhaus, 1994], tous les impacts, y compris les événements extrêmes, passent par des baisses de production, puis d'investissements. En d'autres termes, on réduit les flux, sans jamais toucher aux stocks. Or, les impacts sur la production et les impacts sur le capital ne sont équivalents que s'ils sont moyennés sur des durées très longues (au moins quelques années). Si on regarde les impacts à court terme, ils doivent être distingués, ce qui est fait dans la section suivante.

7.3.3.1 Modélisation des pertes de capital productif : une fonction de production de Cobb-Douglas modifiée

La destruction du capital productif à cause d'une catastrophe peut être prise en compte via une réduction instantanée de la quantité de capital K . Cependant, une telle modélisation est discutable. En effet, les modèles de type Solow sont fondés sur l'hypothèse de rendements décroissants : quand la quantité de capital productif augmente à offre de travail constante, le capital devient de moins en moins efficace. Si une catastrophe est simplement

⁵On peut noter ici que les sécheresses ne touchent pas seulement l'agriculture mais aussi le capital : les assureurs ont ainsi indemnisé pour 3,3 milliards d'euros de dégâts sur l'habitat causé par des sécheresses en France entre 1989 et 2002 (Source : R. Cojean, communication personnelle).

modélisée par une réduction du stock de capital ($K \rightarrow K - \Delta K$), cela veut dire que la situation après une catastrophe est équivalente à une situation dans laquelle on a investi moins. Ainsi on admet l'équivalence entre une situation dans laquelle une partie du capital a été détruite et une situation dans laquelle on a décidé de ne pas réaliser certains investissements.

Pour explorer ce problème, on considère une situation initiale dans laquelle $K = K_0$ et la production vaut Y_0 . Si un tiers du capital est alors détruit par une catastrophe, K passe de K_0 à $K_0 - K_0/3$.

Dans le modèle de Solow, (hypothèse *H1*), la production est donnée par une fonction de Cobb-Douglas en fonction du stock de capital K et de la quantité de travail L ($Y = f(K, L) = AL^\lambda K^\mu$). Quand un tiers du capital est détruit on obtient une nouvelle production $Y_1 = f(L, K_0 - K_0/3)$ (voir Fig. 7.4). Mais la disparition d'une part du capital ne change pas la quantité de travail utilisé dans le modèle de Solow : la substitution entre travail et capital permet de compenser *immédiatement* la perte de capital. Ceci donne ce résultat discutable : quand une portion du capital représentant $x\%$ du capital installé est détruite, la production est réduite d'un facteur inférieur à x , ce qui paraît peu réaliste ⁶.

On propose alors de modifier la fonction de Cobb-Douglas en introduisant un terme ξ_K , qui est la proportion de capital non-détruit. On pose alors que la quantité effective de capital après la catastrophe est égale à $K = \xi_K \cdot K_0$; la production est alors donnée par la nouvelle fonction de production :

$$Y_2 = \xi_K \cdot f(L, K_0) \quad (7.2)$$

Ici, $(1 - \xi_K)$ est la proportion de capital détruit, c'est-à-dire un tiers. Dans la Fig. 7.4, ceci est représenté par la nouvelle fonction de production (courbe en tirets) qui donne une nouvelle production Y_2 , largement inférieure à Y_1 .⁷

⁶En particulier, le fait que les infrastructures de réseau soient fortement touchées alors qu'elles ont des rendements croissants permet de mettre en doute cette propriété.

⁷Pour illustrer ce point, on peut récrire la fonction de Cobb-Douglas sous une forme intégrale :

$$Y = f(L, K_0) = \int_0^{K_0} \partial_2 f(L, k) \cdot dk, \quad (7.3)$$

où $\partial_2 f$ est la dérivée par rapport au deuxième argument de f (le stock de capital). On suppose donc ici que le capital n'est pas homogène mais est la somme d'un continuum de capitaux de moins en moins efficaces. La modélisation que l'on propose ici consiste à supposer que le capital est détruit de manière uniforme, indépendamment de sa productivité. Ceci est fait via le coefficient ξ_K dans la fonction de production :

$$Y = \int_0^{K_0} \partial_2 f(L, k) \cdot \xi_K \cdot dk \quad (7.4)$$

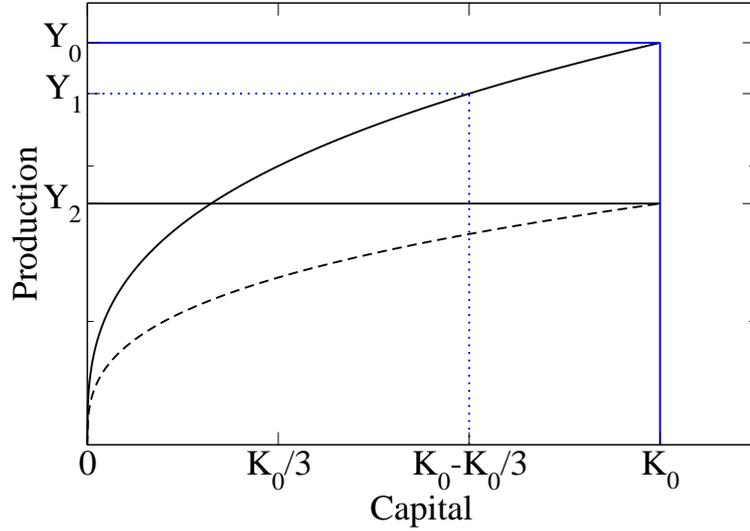


FIG. 7.4: Pertes de production à la suite de la destruction d'un tiers du capital productif, pour différentes hypothèses sur la fonction de production.

Dans ce cas, quand une portion représentant $x\%$ du capital est détruite, la production est réduite de la même proportion x , ce qui paraît plus conforme aux observations.

Avec cette modélisation (hypothèse $H2$), K_0 est maintenant un capital productif potentiel, c'est-à-dire le capital productif quand il n'y a pas de capital détruit. Ce capital potentiel est maintenant noté K_p et le capital effectif, qui tient compte des destructions, vaut $K = K_p \cdot \xi_K$.

En conséquence, la fonction de production de Cobb-Douglas est remplacée par :

$$Y = f_{CC}(L, \xi_K, K_p) = \xi_K \cdot A \cdot L^\lambda \cdot K_p^\mu \quad (7.6)$$

Il devient alors nécessaire de distinguer, dans l'investissement après une catastrophe, I_n , l'investissement dans du nouveau capital (*i.e.* un investissement dans K_p) et I_r , un investissement de reconstruction⁸, utilisé pour réparer les dégâts de la catastrophe (*i.e.* un investissement dans ξ_K) :

Ce qui est équivalent à :

$$Y = \xi_K \int_0^{K_0} \partial_2 f(L, k) \cdot dk = \xi_K f(L, K_0) = \xi_K \cdot A \cdot L^\lambda \cdot K_0^\mu \quad (7.5)$$

⁸Ce terme est a été introduit par *Albala-Bertrand* [1993].

$$\underbrace{\dot{K}}_{I-1/\tau_{dep}\cdot K} = \underbrace{\xi_K \cdot K_p}_{I_r} + \underbrace{\xi_K \cdot \dot{K}_p}_{I_n-1/\tau_{dep}\cdot K} \quad (7.7)$$

L'équation de la dynamique du stock de capital ($dK/dt = -K/\tau_{dep} + I$) devient :

$$\frac{dK_p}{dt} = \frac{-1}{\tau_{dep}} K_p + \frac{I_n}{\xi_K} \quad (7.8)$$

La reconstruction est modélisée par :

$$\frac{d\xi_K}{dt} = \frac{I_r}{K_p} \quad (7.9)$$

Dans le modèle, il est plus rentable de réparer le capital détruit que d'investir dans du nouveau capital (à cause de l'hypothèse des rendements décroissants du capital, alors que la reconstruction a un rendement constant). On suppose donc tout d'abord que dès que $\xi_K < 1$, c'est-à-dire dès qu'il y a du capital détruit, tous les investissements sont consacrés à remplacer le capital détruit pour ramener ξ_K à 1. I_r et I_n sont donc donnés par :

$$\begin{cases} I_n = I - I_r \\ I_r = \begin{cases} \text{Min}(I, (1 - \xi_K) \cdot K_0) & \text{if } \xi_K < 1 \\ 0 & \text{if } \xi_K = 1 \end{cases} \end{cases} \quad (7.10)$$

7.3.3.2 Limitation des investissements de reconstruction

Dans le cas des événements extrêmes météorologiques, la quantité de capital détruite est en général largement inférieure aux investissements annuels totaux. Donc, dans l'hypothèse *H2*, les dégâts sont réparés en nettement moins d'un an. Ceci n'est pas cohérent avec les observations d'événements réels. Par exemple, selon Munich Re, les inondation d'Europe Centrale en 2002 ont demandé des réparations étalées sur 3 ans. Ceci montre qu'il n'est pas possible d'utiliser tout l'investissement d'une économie pour réparer les dommages. En réalité, ces réparations sont financées principalement par les compagnies d'assurance et de réassurance, par des organismes publics et par les consommateurs. Or, leur capacité de mobilisation de fonds n'est pas infinie. Ce problème est encore plus aigu dans les pays en voie de développement [*Benson et Clay, 2004*].

De plus, la contrainte financière est aggravée par les contraintes de ressources dans les secteurs clefs de la reconstruction. Cet effet a été très net après les tempêtes de 1999 en France, quand le manque de couvreurs a forcé de nombreux habitants à vivre avec leur toit endommagé pendant plus d'un an ; ou après l'explosion de l'usine AZF en 2001 à Toulouse où il a fallu 2 ans aux vitriers pour remplacer toutes les vitres brisées. Chez AXA-Ré, on estime que les coûts de réparation sont augmentés de 50% à cause de l'inflation créée par le manque de travailleurs ou de moyens dans les secteurs clefs⁹. Cette limitation des réparations n'est donc pas que financière, elle est aussi technique¹⁰.

Grâce à notre modélisation, il est possible de prendre en compte cet effet. Par exemple en supposant que les investissements de reconstruction ne peuvent dépasser une fraction f_{max} de l'investissement total (reconstruction plus nouveaux investissements) :

$$\begin{cases} I_n = I - I_r \\ I_r = \begin{cases} \text{Min}(f_{max} \cdot I, (1 - \xi_K) \cdot K_0) & \text{if } \xi_K < 1 \\ 0 & \text{if } \xi_K = 1 \end{cases} \end{cases} \quad (7.11)$$

Cette hypothèse sera notée $H3$ dans la suite. La valeur de f_{max} est une mesure de la capacité de l'économie à financer et à réaliser, sur le court-terme, la reconstruction. Cette valeur est donc fortement corrélée à l'organisation économique (en particulier en ce qui concerne le marché de l'assurance et le financement public de la reconstruction). Elle diffère selon la région et selon la période considérées.

7.3.3.3 Etude de cas et analyse de sensibilité

Pour valider nos hypothèses de travail, l'économie de NEDyM.1 à l'équilibre est soumise à une catastrophe qui détruit le capital productif à hauteur de 3% du PIB. Ce montant élevé est choisi pour que la catastrophe soit importante et comparable en termes relatifs avec le séisme de Marmara en Turquie¹¹ en 1999. On choisit cet événement car il est significatif au niveau macroéconomique et parce que ses conséquences économiques ont été bien étudiées (voir par exemple *World Bank* [1999] ou *OECD* [2003]). Selon la Banque Mondiale, il a généré des pertes économiques directes chiffrées entre 1,5 et 3% du PIB.

⁹Communication personnelle.

¹⁰Il est probable que la contrainte financière soit largement dominante dans les pays en développement, alors que les deux doivent jouer dans les pays développés.

¹¹On ne tiendra pas compte des importantes différences macroéconomiques entre l'UE et la Turquie.

Hypothèse	Description
<i>H1</i>	Fonction de production de Cobb-Douglas Pas de distinction entre investissements productifs et de reconstruction
<i>H2</i>	Fonction de production de Cobb-Douglas modifiée Distinction entre investissements productifs et de reconstruction Pas de limitation aux investissements de reconstruction
<i>H3</i>	Fonction de production de Cobb-Douglas modifiée Distinction entre investissements productifs et de reconstruction Limitation des investissements de reconstruction à f_{max} % des investissements totaux

TAB. 7.3: Récapitulatif des différentes hypothèses sur la modélisation des catastrophes.

Dans NEDyM, la destruction d’une partie du capital productif à partir de l’équilibre mène à une situation de sous-production car la production diminue alors que la demande reste constante sur le court terme. Cette situation de sous-production provoque une augmentation du prix qui, s’ajoutant à la baisse du salaire due au chômage créé par le choc, augmente les profits, et encourage l’investissement de reconstruction. On entre alors dans une phase de reconstruction, où l’activité est intense, avec un taux d’emploi et un taux d’investissement supérieurs à leurs niveaux d’équilibre. Des interactions complexes ont ensuite lieu sur le moyen terme, car la variation du revenu des ménages agit alors sur la demande et sur la mise à disposition de l’épargne.

La figure 7.5 montre la réponse économique en terme de chômage et de production pour les hypothèses *H1*, *H2* et *H3* pour différentes valeurs de f_{max} : 20%, 10%, 5%, 1% (les caractéristiques des différentes hypothèses sont rappelées en Tab. 7.3). Elle montre que l’ampleur du choc dépend très largement de l’hypothèse retenue : la perte de production est multipliée par 2 entre *H1* et *H2* ; et à nouveau par 2 entre tous les cas *H3* et *H2*. De plus la durée de la perte de production dépend aussi beaucoup de l’hypothèse : entre quelques mois pour *H1* et plusieurs années pour la pire hypothèse *H3*.

La figure 7.6 montre le taux de croissance annuel dans toutes les hypothèses. Pendant l’année du séisme, la croissance est diminuée de 0,2% dans *H1* et *H2*, et entre 0,45 et 0,8% dans les différents cas *H3*. L’année suivante, la croissance est augmentée dans tous les cas sauf *H3* avec $f_{max} = 1%$: elle est augmentée de 0,1% dans *H1* et *H2* et d’entre 0,1 et 0,45% dans *H3*. Les années suivantes, l’influence du choc est faible dans tous les cas, sauf pour *H3* avec $f_{max} = 5%$ ou 1%.

L’hypothèse qui correspond le mieux à la réponse observée est *H3* avec $f_{max} = 10%$. En particulier, la durée de reconstruction est d’environ 2 ans

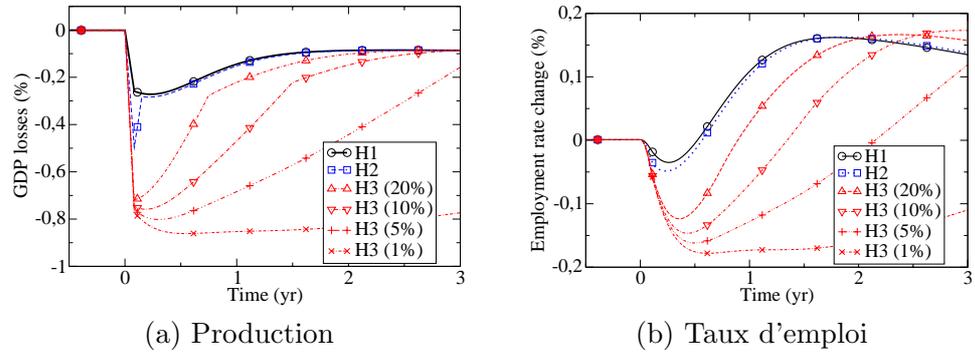


FIG. 7.5: Production et taux d'emploi, en réponse à une catastrophe détruisant le capital pour 3% du PIB dans différentes hypothèses de modélisation.

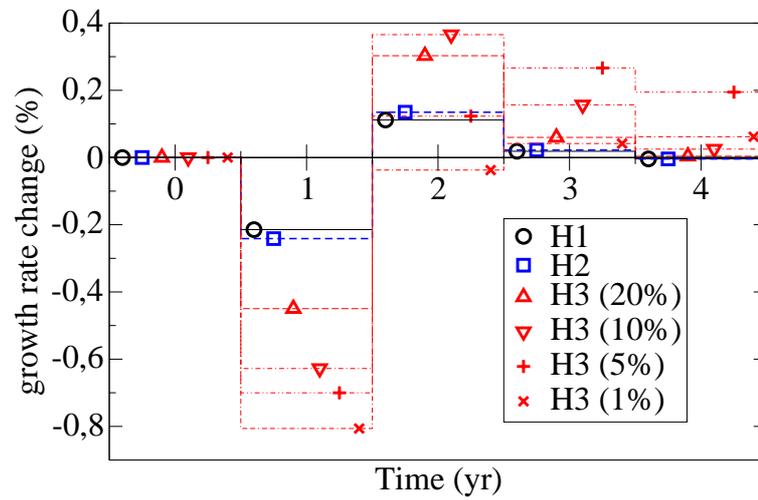


FIG. 7.6: Changement de la croissance économique annuelle, année par année, en réponse à la catastrophe, dans les différentes hypothèses.

et le comportement de la croissance est proche des conclusions de la Banque Mondiale : “*In terms of indirect costs, the Bank team estimates that the earthquake will reduce GNP in 1999 by 0.6 percent-1.0 percent. [...] In the year 2000, GNP growth is expected to exceed baseline forecasts by some 1 percent of GNP due primarily to reconstruction activity.*”¹². Il est important de noter qu’on ne dispose que de ces prévisions des conséquences économiques, il n’existe pas de travaux de vérification *a posteriori*.

La perte totale de production due au séisme dans NEDyM est alors de 4% du PIB, c’est-à-dire 20 milliards d’euros, ce qui correspond aux estimations de l’OCDE ou de la Turkish Industrialists and Businessmen Association (TUSIAD) (voir *OECD* [2003]).

La croissance de 0,3% de la production l’année suivant le choc semble sous-estimée comparée aux conclusions de la Banque Mondiale. On peut proposer 4 explications :

- Il est possible [*OECD*, 2003] que le remplacement de vieux matériels détruits par des matériels plus récents ait amélioré la productivité de l’économie turque, ce qui n’est pas pris en compte par le modèle. Ce point sera étudié en détail plus loin dans ce chapitre.
- On a pas tenu compte ici des effets redistributifs des catastrophes : si en termes de coût humain, les classes les plus pauvres paient – et de loin – le plus lourd tribut aux catastrophes, en termes économiques, c’est plutôt les classes aisées qui perdent le plus sur le court-terme, car les moyens de production dont ils sont propriétaires sont détruits. En revanche, la reconstruction fournit du travail non qualifié à des catégories sociales qui font souvent face à un chômage de masse. On a donc redistribution des classes aisées vers les classes les plus pauvres, ce qui produit un effet de relance local compte tenu des habitudes de consommation différentes de ces classes sociales. Une réserve importante concerne toutefois les catégories sociales très pauvres et très nombreuses qui vivent de l’agriculture et de la pêche dans les pays en développement et qui sont fortement vulnérables aux extrêmes météorologiques. De plus, les conséquences sur la distribution de long-terme des revenus de ces effets de court terme ne sont pas évidentes.
- Ensuite, le rôle clef de l’Etat n’est pas pris en compte, alors que celui-ci peut prendre en charge une partie importante de la reconstruction, avec l’aide de l’assistance étrangère. Toutefois, on se concentre ici sur les contraintes économiques et l’aide de l’Etat ne modifie pas le problème des ressources, surtout si l’économie est au plein-emploi lors du choc : il faut toujours produire les biens nécessaires à la reconstruction. En conséquence, le rôle de l’Etat pourrait être d’augmenter encore le

¹²En français : En termes de coûts indirects, l’équipe de la Banque estime que le séisme réduira le PIB en 1999 de 0,6 à 1,0 %. [...] En l’an 2000, la croissance du PIB devrait être augmentée d’environ 1% principalement à la suite des activités de reconstruction.

taux d'investissement, avec comme conséquences une reconstruction plus rapide, payée par une inflation plus importante après le choc, et une augmentation de la dette publique.

- Enfin, il est difficile de distinguer l'effet des catastrophes de la trajectoire économique sous-jacente (hors catastrophe), qui dépend de nombreux autres facteurs. Ainsi, l'économie turque était en pleine récession quand le séisme a eu lieu (décroissance du PIB de 7% en un an). Prendre en compte l'état initial de l'économie demanderait d'appliquer le choc sur une économie en déséquilibre, ce qui sera fait au chapitre 8.

Ces résultats montrent toutefois que NEDyM.1 est capable de reproduire qualitativement les conséquences macro-économiques des catastrophes, en choisissant la valeur de f_{max} . Il est cependant difficile de valider le modèle de manière rigoureuse car l'effet des catastrophes sur les grands agrégats économiques (comme le PIB) est souvent inférieur à leur variabilité [Albala-Bertrand, 1993].

7.4 Les dommages dus aux événements extrêmes

NEDyM.1 est très simple. Toutefois, ce type de modèle a l'avantage d'être suffisamment robuste aux changements techniques et institutionnels que l'on peut attendre de ce siècle. Il peut donc servir à mieux comprendre les effets des événements extrêmes sur le long-terme, dans un contexte de changement climatique.

7.4.1 Hypothèse de stabilité de la distribution

Cette section vise à estimer les pertes de production dues aux EEM sur 200 ans dans le modèle NEDyM.1, à partir de son état d'équilibre – ni progrès technique ni croissance de la population ne sont ici considérés. Bien sûr, l'objectif n'est pas de reproduire une trajectoire économique réaliste sur une si longue période, mais seulement de proposer une estimation des coûts macro-économiques de la distribution actuelle d'EEM et de comparer son ordre de grandeur avec ce que l'on observe. Pour avoir un ensemble représentatif d'EEM, la simulation doit être la plus longue possible, d'où le choix d'une série de 200 ans.

La distribution de probabilité des pertes calibrées dans la section 7.2.2 est alors utilisée pour appliquer une série d'EEM à l'économie modélisée par NEDyM.1. Dans ce cas, le coût direct moyen annuel des EEM est d'environ 0,002% du PIB (c'est-à-dire 180 millions d'euros par an). La figure 7.7 montre les conséquences sur la production : à cause des EEM, la production moyenne est réduite de 0,05% sur le long-terme. Les processus dynamiques multiplient donc par 20 les coûts directs des EEM. Pour s'assurer de la ro-

Modèle d'évaluation des dommages	Pertes moyennes de production
Coûts directs moyens	180 millions d'euros 0,002 % du PIB
Pertes de production dans un modèle de Solow	2 milliards d'euros 0,02 % du PIB
NEDyM.1	4,5 milliards d'euros 0,05 % du PIB

TAB. 7.4: Pertes moyennes de PIB dues aux EEM dans trois modèles différents : les coûts directs moyens (moyennes temporelles des coûts directs des EEM) ; la perte de production dans un modèle de croissance de long-terme (à la Solow) ; la perte de production dans un modèle qui prend en compte des processus de court-terme (NEDyM.1).

bustesse de ces valeurs, la même simulation est faite avec une distribution de probabilité linéaire au lieu de la distribution de Weibull. Cette simulation supplémentaire mène à des résultats équivalents (-0,04% du PIB), montrant que ces résultats sont peu dépendants de la forme de la distribution de probabilité.

Le rôle du court terme

Pour évaluer l'importance des processus de court-terme, qui ne peuvent être pris en compte dans les modèles de croissance de long-terme, une simulation supplémentaire est faite en utilisant le coût moyen annuel des EEM au lieu du coût événement par événement. On remplace donc la distribution de probabilité des EEM par sa moyenne temporelle.

Dans ce cas, la production est réduite de 0,02% seulement, soit 2 fois moins qu'en tenant compte de la distribution temporelle des pertes directes.

Ceci montre que les processus de court-terme multiplient par 2 le coût macro-économique moyen des EEM, alors qu'ils sont totalement négligés dans les modèles de croissance.

Les trois évaluations de perte de production (moyenne temporelle des coûts directs, pertes de PIB dans un modèle de long-terme et pertes de PIB en tenant compte du court-terme) sont résumées dans le tableau 7.4.

De plus dans NEDyM.1, s'ajoutent aux conséquences de long-terme les chocs de court-terme : après chaque catastrophe, la production est réduite, parfois de 0,15% sur quelques années. Les conséquences sur le chômage sont en revanche faibles, aux alentours de 0,02%, négatives juste après le choc, puis positives pendant la reconstruction.

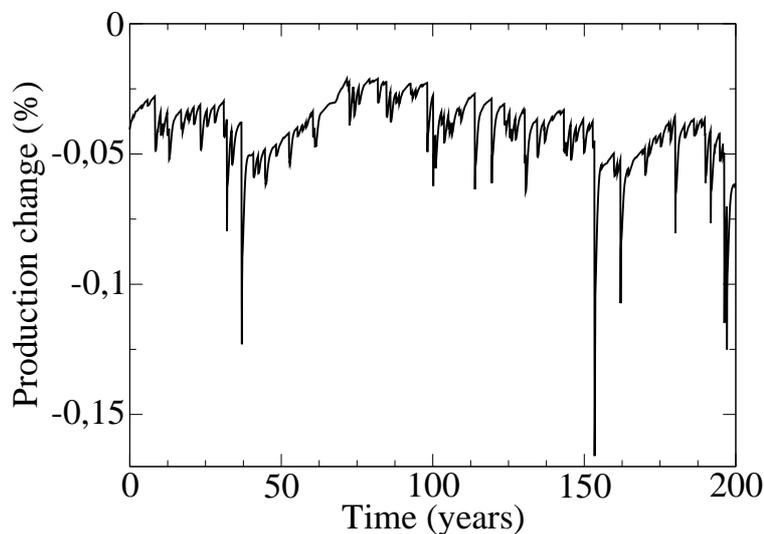


FIG. 7.7: Variation de production à cause des EEM pour l'UE (avec la distribution actuelle des événements extrêmes).

Le rôle de l'échelle spatiale

On peut s'interroger sur l'importance de l'agrégation spatiale dans ces résultats : il est clair en effet que les conséquences sur certaines régions ou certaines catégories sociales peuvent être plus importantes. Pour l'illustrer, une simulation est faite dans laquelle on suppose que les EEM ne touchent pas l'UE en entier (avec un partage des conséquences sur toute l'Europe) mais seulement un plus petit pays. La surface de ce pays, et son économie, sont supposées être un dixième de celles de l'UE. Dans ce cas, le coût direct moyen des EEM (en part relative au PIB) est inchangé car il y a moins d'événements mais ils sont plus graves. Cependant, les conséquences juste après les chocs sont importantes : on observe des pertes atteignant 0,5% du PIB, avec un chômage supplémentaire de 0,2% pendant le choc.

Ceci suggère que le partage du risque aide à faire face aux EEM et permet de supprimer une grande part des effets négatifs de court terme, sans augmenter les coûts de long terme. Le partage du risque augmente la fréquence des événements, si bien que la perte moyenne de production est inchangée, mais les coûts de court-terme après chaque catastrophe sont largement réduits.

7.4.2 Hypothèse de variation de la distribution

L'augmentation des pertes liées aux EEM au cours des dernières décennies a montré que l'économie était de plus en plus vulnérable aux événements extrêmes et suggère que le changement climatique pourrait provoquer des dommages importants par ce canal. De plus, la localisation des populations et du capital productif pourrait changer dans les prochaines décennies, modifiant la distribution des coûts d'EEM.

Pour évaluer cette vulnérabilité alors que l'on est pas capable de prévoir l'évolution future des extrêmes, on utilise une analyse de sensibilité, sur l'impact entre termes de PIB de variations de la distribution de probabilité des EEM. Cette approche peut se rapprocher des "modes climatiques" de *Haurie* [2003], qui distingue (i) une dynamique de long-terme, le mode climatique, qui serait caractérisé ici par les paramètres de la distribution de probabilité ; et (ii) un comportement de court terme, qui dépend du mode climatique, qui serait ici composé des tirages des événements extrêmes.

Pour réaliser notre analyse de sensibilité, la variation de la probabilité d'occurrence des EEM est donnée par :

$$p_{EE} = \alpha_p \cdot p_{EE}^0, \quad (7.12)$$

et celle de la distribution de probabilité des coûts par :

$$f(s) = \beta \cdot \lambda^\beta \cdot \left(\frac{s - s_{EE}}{\alpha_z} \right)^{\beta-1} \cdot \exp \left(- \left(\lambda \left(\frac{s - s_{EE}}{\alpha_z} \right)^\beta \right) \right). \quad (7.13)$$

Ceci signifie que la probabilité d'occurrence des EEM est multipliée par α_p , et le coût direct moyen par α_z . On réalise donc une analyse de sensibilité sur α_p et α_z . Pour simplifier, on suppose que $\alpha_p = \alpha_z$ et on fait des simulations pour 6 valeurs : {1, 2, 3, 4, 5, 6}.

Comme on l'a vu dans l'analyse de sensibilité dans la section 7.3.3.3, les pertes de PIB dépendent beaucoup de f_{max} . Mais la valeur de 10% utilisée dans les simulations précédentes peut ne pas correspondre aux pays pauvres, qui ont de grandes difficultés à financer leur reconstruction [*Benson et Clay*, 2004], et pourrait ne pas correspondre à la situation économique dans quelques décennies. C'est pourquoi on fait également varier f_{max} entre 1% et 10%.

La figure 7.8 montre la perte moyenne de production due aux EEM après 100 ans, en fonction de f_{max} et des paramètres de la distribution d'EEM ($\alpha_p = \alpha_z$).

Le point intéressant est l'existence d'une bifurcation : pour chaque valeur de f_{max} , les pertes de PIB sont limitées tant que α_p et α_z sont inférieurs à

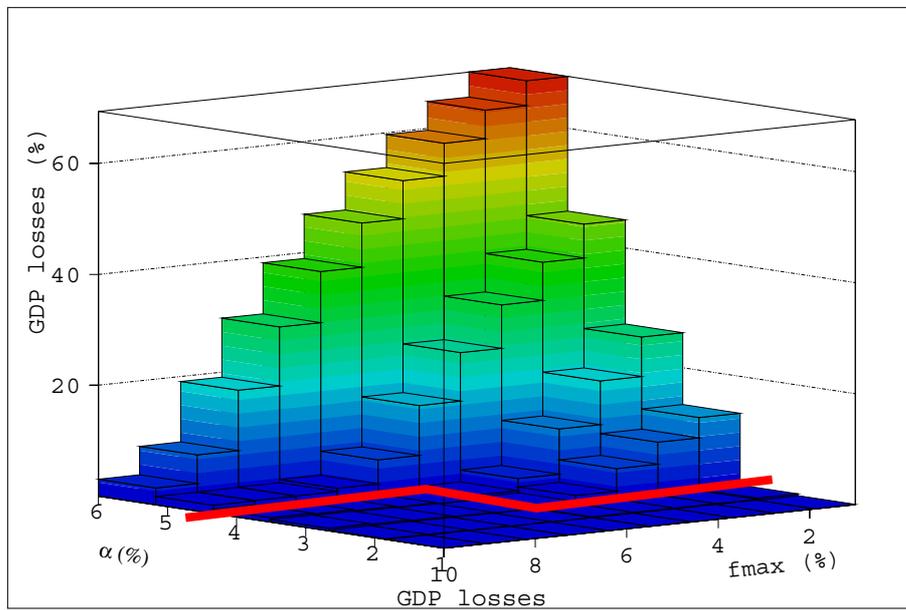


FIG. 7.8: Pertes moyennes de PIB après 100 ans, en pourcentage de PIB, en fonction de f_{max} (en %) et des paramètres de la distribution d'EEM ($\alpha_p = \alpha_z$, en %). La ligne rouge sépare les paramètres pour lesquels les pertes sont inférieures à 1% du PIB.

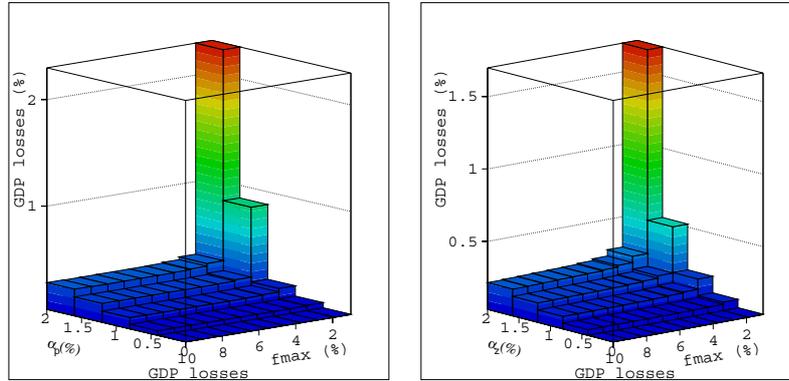


FIG. 7.9: Pertes moyennes de PIB après 100 ans, en pourcentage de PIB, en fonction de f_{max} (en %) et des paramètres de la distribution d'EEM (α_p à gauche, α_z à droite, en %).

un certain seuil. Mais, dès que ce seuil est dépassé, les pertes augmentent très rapidement. Ceci illustre une vulnérabilité aux EEM : quand leur coût dépasse la capacité de financement et de reconstruction de l'économie, les dommages explosent. Cette bifurcation montre qu'il est important d'avoir une organisation économique capable de faire face aux événements extrêmes : la ligne rouge dans la figure 7.8 montre, pour chaque valeur de α_p et α_z , la valeur minimale de f_{max} qui permet de maintenir les coûts totaux des EEM en dessous de 1% du PIB.

Quand on ne fait augmenter que la fréquence, c'est-à-dire α_p , ou que l'intensité, c'est-à-dire α_z , on observe le même type de bifurcation, comme le montre la figure 7.9.

Ce type de bifurcation peut aider à expliquer pourquoi certains pays pauvres ne connaissent pas le développement économique que l'on pourrait attendre : comme ils font face régulièrement à des catastrophes naturelles qui détruisent leurs infrastructures, et qu'ils n'ont pas les capacités de financement et de reconstruction qui leur permettraient de reconstruire rapidement après chaque choc, ils n'arrivent pas à accumuler le capital et les infrastructures nécessaires. Plus précisément, ce n'est pas parce que les conséquences de chaque événement sont faibles [Albala-Bertrand, 1993] que l'accumulation d'événements n'a pas de conséquences significatives. Par exemple, le Guatemala ajoute à des troubles politiques permanents une série de catastrophes naturelles impressionnante qui empêche tout développement : le cyclone Mitch en 1998, 3 ans de sécheresses entre 1999 et 2001, puis le cyclone Michèle en 2001. Dans la même région, le premier ministre du Honduras affirme que le cyclone Michèle en 2001 "put the country's economic

*development back 20 years*¹³ [IFRCRCS, 2002]. Le fait que le problème de financement de la reconstruction puisse être considéré comme un obstacle important au développement économique a déjà été mentionné par *Gilbert et Kreimer* [1999] et *Benson et Clay* [2004]. Les résultats de cette étude proposent une évaluation quantitative de ce problème.

Dans le futur, si les pertes dues aux événements extrêmes augmentaient à cause du changement climatique, une adaptation spécifique pourrait être nécessaire, afin de rendre les économies capables de reconstruire au plus vite après chaque événement. Cette adaptation pourrait passer par des modifications de la régulation du marché de l'assurance (exemple du package *Solvency* de la Commission Européenne qui vise à augmenter les marges de solvabilité du secteur de l'assurance) ou par la création de fonds spécifiques (exemple du Florida Hurricane Catastrophe Fund ou du système Cat-Nat en France).

7.5 L'hypothétique effet des extrêmes sur la productivité

Dans la section 7.3.3.3, il a été mentionné le fait que le remplacement du capital détruit, parfois obsolète, par du capital récent et plus efficace, pourrait modifier l'impact économique des événements extrêmes¹⁴. Cet effet sera appelé par la suite *l'effet de productivité*.

La possible existence de ce processus a déjà été soulevée, notamment par *Albala-Bertrand* [1993], *Stewart et al.* [2001] et *Benson et Clay* [2004]. Plus précisément *Albala-Bertrand* [1993] a étudié les conséquences de 28 catastrophes sur 26 pays entre 1960 et 1979. Il trouve que dans la plupart des cas le PIB augmente dans les années qui suivent les catastrophes. D'après *Stewart et al.* [2001] et *Benson et Clay* [2004], cela est toutefois principalement le fait de l'effet de relance keynésienne de la reconstruction, plutôt que le fait d'une mise en place de technologies plus efficaces. *Benson et Clay* [2004] note en particulier que la mise en place de nouvelles technologies est difficile dans un contexte de catastrophe, à cause du manque de ressources financières et de la situation d'urgence. On reviendra sur ce point dans la suite.

Il reste intéressant de regarder comment les résultats de notre modèle sont modifiés si l'on prend en compte l'effet de productivité. Pour cela, on propose ici une modélisation de la mise en place de nouvelles technologies et on réalise les mêmes expériences que dans les sections précédentes.

¹³En français : a ramené le développement économique du pays 20 ans en arrière.

¹⁴Mon attention a été attiré sur ce point par les remarques de Carlo Carraro et de Richard Tol, que je remercie pour leurs commentaires.

7.5.1 Modélisation du progrès technique

Pour modéliser le progrès technique, on va supposer une amélioration exogène constante de la productivité de la technologie la plus récente. Ceci est sensé prendre également en compte l'amélioration de l'organisation du travail. Ainsi la productivité de la technologie la plus récente est supposée croître au rythme de 2% par an.

Pendant, les technologies utilisées dans l'économie ne sont pas seulement les plus récentes. Il y a aussi les technologies plus vieilles, mises en place lors d'investissements passés. Pour modéliser l'incorporation des technologies dans le capital productif, on commence par considérer une première économie caractérisée par une quantité de travail L_1 et un stock de capital K_1 , dont le productivité totale est *homogène*, égale à Λ_1 . La production est alors :

$$Y_1 = \Lambda_1 L_1^\alpha K_1^\beta \quad (7.14)$$

On considère ensuite une seconde économie, caractérisée par L_2 , et un stock de capital K_2 , de productivité homogène $\Lambda_2 > \Lambda_1$. Sa production est :

$$Y_2 = \Lambda_2 L_2^\alpha K_2^\beta \quad (7.15)$$

Si on suppose que les ratios capital/travail de ces deux économies sont identiques (*i.e.* $L_1/K_1 = L_2/K_2 = \nu$), alors l'économie que l'on crée en fusionnant ces deux économies est caractérisée par une quantité de travail $L = L_1 + L_2$, et un stock de capital $K = K_1 + K_2$ dont la *productivité moyenne* est A . Comme $Y = Y_1 + Y_2$, on a :

$$\overbrace{AL^\alpha K^\beta}^{A\nu K} = \overbrace{\Lambda_1 L_1^\alpha K_1^\beta}^{\Lambda_1 \nu K_1} + \overbrace{\Lambda_2 L_2^\alpha K_2^\beta}^{\Lambda_2 \nu K_2}, \quad (7.16)$$

ce qui signifie :

$$A = \frac{K_1 \Lambda_1 + K_2 \Lambda_2}{K_1 + K_2} \quad (7.17)$$

La *productivité moyenne* A d'un ensemble de i types de capitaux de productivité Λ_i est donc la moyenne pondérée de leurs productivités.

On applique maintenant cela à l'équation de la dynamique du capital (investissement/dépréciation) : le capital productif à un instant t , K_t , est constitué par :

- une partie $(1 - 1/\tau_{dep})$ du capital de l'année précédente K_{t-1} dont la productivité moyenne est A_{t-1} ;
- le montant I_t des investissements de l'année, que l'on suppose uniquement composé des technologies les plus récentes, et donc de productivité Λ_t .

En conséquence, ce capital K_t a une productivité moyenne égale à la moyenne pondérée de la productivité moyenne du capital précédent et de la productivité des technologies les plus récentes :

$$A_t = \frac{I_t \Lambda_t + (1 - \frac{1}{\tau}) K_{t-1} A_{t-1}}{I_t + (1 - \frac{1}{\tau}) K_{t-1}} = \frac{I_t \Lambda_t + (1 - \frac{1}{\tau}) K_{t-1} A_{t-1}}{K_t} \quad (7.18)$$

On fait ici l'hypothèse, très contestable mais qui simplifie beaucoup les calculs, que le capital est déprécié indépendamment de sa productivité. Dans le réalité, c'est plutôt le capital le moins efficace qui est déprécié. En pratique, ceci réduit seulement très légèrement le niveau de production du sentier de croissance équilibrée du modèle, et ne change rien à la modélisation des conséquences des extrêmes. Cette hypothèse est donc acceptable compte tenu de l'objectif de cette modélisation.

En réécrivant l'Eq.(7.18) en temps continu, on obtient :

$$\frac{dA_t}{dt} = \frac{I_t}{K_t} (\Lambda_t - A_t) , \quad (7.19)$$

Cette équation décrit l'évolution de la productivité moyenne du capital, en fonction de (1) la productivité du capital le plus récent ; (2) la productivité moyenne du capital déjà installé ; (3) la quantité d'investissement, rapportée à la quantité de capital déjà installé.

Ce modèle est qualifié ci-après de modèle *ETC* pour *embodied technical change*, c'est-à-dire progrès technique "incorporé". Dans ce modèle, si une catastrophe force le remplacement d'une partie du capital, la nouvelle productivité moyenne sera supérieure à celle sans catastrophe.

Pour pouvoir évaluer rigoureusement les conséquences de la prise en compte de ce processus, on crée également un modèle supplémentaire dans lequel la croissance de la productivité moyenne est exogène, en remplaçant l'Eq.(7.19) par :

$$\frac{dA_t}{dt} = \frac{I_0}{K_0} (\Lambda_t - A_t) , \quad (7.20)$$

Ce modèle, dans lequel l'effet de productivité est supprimé, est appelé ci-après le modèle *No ETC*.

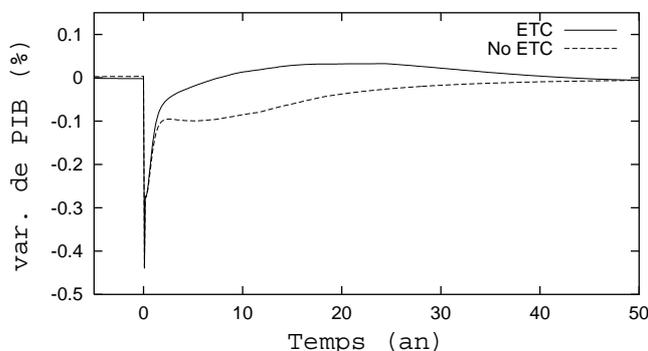


FIG. 7.10: Pertes de PIB, après une catastrophes détruisant du capital pour 3% du PIB, quand la croissance de la productivité est constante (No ETC) et quand la croissance de la productivité dépend du remplacement du capital (ETC).

Les modèles *ETC* et *No ETC* ont le même sentier de croissance équilibrée, c'est-à-dire le même *scénario de référence* quand il n'y a pas d'événements extrêmes. La différence entre leurs réponses à un événement extrême donne l'effet de productivité.

7.5.2 Dommages dus à une catastrophe

On reprend ici la simulation des conséquences d'une catastrophe qui détruit du capital productif pour 3% du PIB (cf section 7.3.3.3). La figure 7.10 montre la réponse des deux modèles *ETC* et *No ETC* à une telle catastrophe.

On observe que la différence entre les deux hypothèses est négligeable durant les quelques années suivants le choc (environ 5 ans), mais devient significative pendant les 25 années qui suivent. La différence est alors d'environ 0,1% du PIB. C'est peu, mais cela permet de n'avoir plus de perte de PIB liée au choc 10 ans après l'événement, alors que sans l'effet de productivité il faut 40 ans pour revenir au niveau initial.

En terme de croissance (voir Fig. 7.11), on voit que la diminution de croissance est seulement très légèrement réduite la première année, mais que la croissance est augmentée d'environ 0,05% pendant 3 ans après le choc.

Si l'on compare maintenant dans la Fig. 7.10 la variation absolue de PIB dans le modèle *ETC* avec l'effet de productivité, on constate que la catastrophe aboutit à une situation supérieure au scénario de référence sans catastrophe ($\text{Var. de } PIB > 0$) d'environ 0,04%, pendant quelques années. Cette amélioration nette par rapport au scénario de référence est toute-

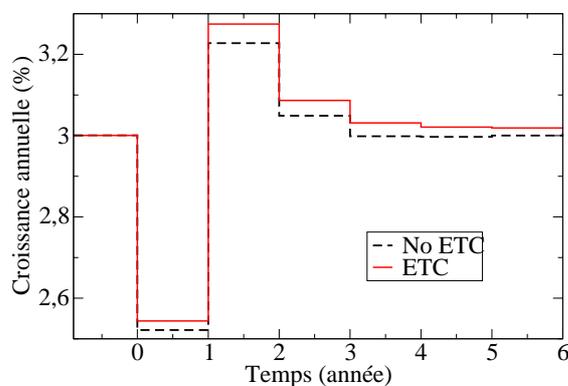


FIG. 7.11: Croissance du PIB, après une catastrophes détruisant du capital pour 3% du PIB, quand la croissance de la productivité est constante (No ETC) et quand la croissance de la productivité dépend du remplacement du capital (ETC).

fois très faible, ce qui montre qu'il est irréaliste de parler d'effet positif des événements extrêmes. Au mieux, comme dans notre modèle qui utilise les hypothèses les plus optimistes, l'effet de productivité permet de réduire les impacts négatifs, jamais de les rendre positifs.

7.5.3 Dommages dus à une distribution de catastrophes

On peut maintenant appliquer à ce modèle la distribution d'EEM calculée en section 7.2.2 et voir comment l'effet de productivité modifie nos résultats.

La figure 7.12 montre les pertes de production sur 200 ans dans le modèle *ETC*, avec effet de productivité, et dans le modèle *No ETC*, sans effet de productivité. Dans les deux cas, on compare les sorties avec le scénario de référence, c'est-à-dire le scénario sans événement extrême, qui est identique dans les deux modèles.

On remarque que la perte de PIB moyenne observée dans le cas sans effet de productivité (-0,04% du PIB) disparaît complètement dans le modèle où cet effet est pris en compte. La relativement faible influence de l'effet de productivité quand on considère un seul événement devient donc significative quand on considère une distribution. Ceci ne veut toutefois pas dire qu'on aurait intérêt à accélérer la rotation du capital. En effet, dans le modèle, le maintien de la production se fait au prix d'un taux d'investissement plus élevé, et donc d'une consommation plus faible, quoi que supérieure à celle du cas sans effet de productivité.

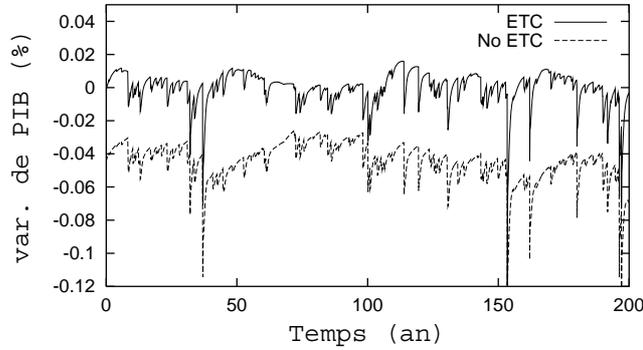


FIG. 7.12: Variation de PIB en réponse à une distribution d'EEM dans les modèles *ETC*, avec effet de productivité, et dans le modèle *No ETC*, sans effet de productivité. L'effet de productivité permet donc de compenser sur le long terme l'effet destructeur des EEM, même s'il ne réduit pas les conséquences négatives de court terme.

7.5.4 Influence de l'effet de productivité sur la bifurcation

On peut maintenant s'interroger sur l'existence de la bifurcation observée sur la perte de PIB en fonction de la valeur de f_{max} , la capacité à financer et à mener la reconstruction, et de la fréquence et de l'intensité des événements. Cette bifurcation existe-t-elle toujours quand on prend en compte l'effet de productivité?

La Fig. 7.13 montre la perte de PIB (sur 100 ans) due aux EEM, en fonction de $\alpha_p = \alpha_z$. Ici f_{max} reste à 10%.

On peut observer que pour une large gamme de valeurs de α (entre 0 et 5, environ), les pertes de PIB augmentent linéairement dans le modèle sans effet de productivité *No ETC* (de 0 à -1.5% du PIB). Dans le modèle *ETC* par contre, le PIB moyen n'est pas réduit par les EEM : le remplacement précoce du capital compense l'effet des chocs.

Quand α est supérieur à 5, c'est-à-dire quand les EEM sont 5 fois plus fréquents et 5 fois plus coûteux qu'aujourd'hui, les pertes de PIB augmentent rapidement, pour atteindre 100% à $\alpha \approx 7.2$. La valeur de α pour laquelle a lieu la bifurcation est indépendante de la prise en compte ou non de l'effet de productivité.

On refait ici la même analyse de sensibilité que dans la section 7.4.2. Le résultat est reproduit dans la figure 7.14. On constate que les pertes de PIB sont largement réduites par rapport au cas sans effet de productivité, et que la zone de l'espace des paramètres pour laquelle les pertes de PIB sont inférieures à 1% est plus grande. Cependant, les pertes peuvent tou-

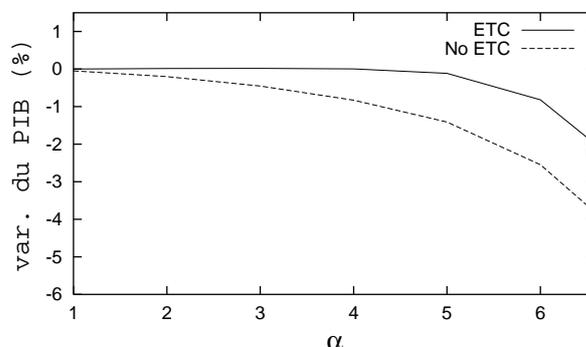


FIG. 7.13: Perte moyenne de PIB due aux EEM, en fonction de la probabilité et de l'intensité des EEM. Dans chaque simulation, la probabilité et l'intensité sont multipliées par α par rapport à la distribution actuelle. $f_{max} = 10\%$.

jours atteindre des valeurs significatives pour des gammes de distribution envisageables.

7.5.5 Commentaires sur le réalisme de l'effet de productivité

L'hypothèse de l'effet de productivité a fait dire que les catastrophes naturelles pourraient être bénéfiques à long terme à l'activité économique. Il semble donc important de faire quelques commentaires sur le réalisme d'un tel effet. Tout d'abord, il faut préciser qu'admettre que la destruction d'une part du capital est bénéfique revient à admettre l'existence d'importantes sous-optimalités permanentes dans l'appareil productif, et donc à remettre en cause l'hypothèse fondamentale des modèles d'équilibre général.

Toutefois, sans aller jusqu'à considérer que les catastrophes sont bénéfiques, il est possible d'envisager que le remplacement du capital puisse réduire le coût des catastrophes, sans le rendre négatif. Mais plusieurs arguments vont à l'encontre de cette hypothèse :

- Il paraît difficile d'imaginer que les producteurs puissent “profiter” d'une catastrophe pour moderniser leur outil de production, en particulier dans les pays pauvres où il n'y a pas ou peu d'aide aux sinistrés qui doivent donc remettre en route la production au plus vite et n'ont pas le temps de concevoir un mode de production plus efficace fondé sur des technologies plus récentes [Benson et Clay, 2004]. Le manque de moyens financiers et humains les pousse à faire au moins cher et au moins risqué, et donc généralement à reproduire le mode de production précédant l'événement. De plus, aucun des travaux empiriques sur les conséquences des catastrophes ne constate un tel phénomène.

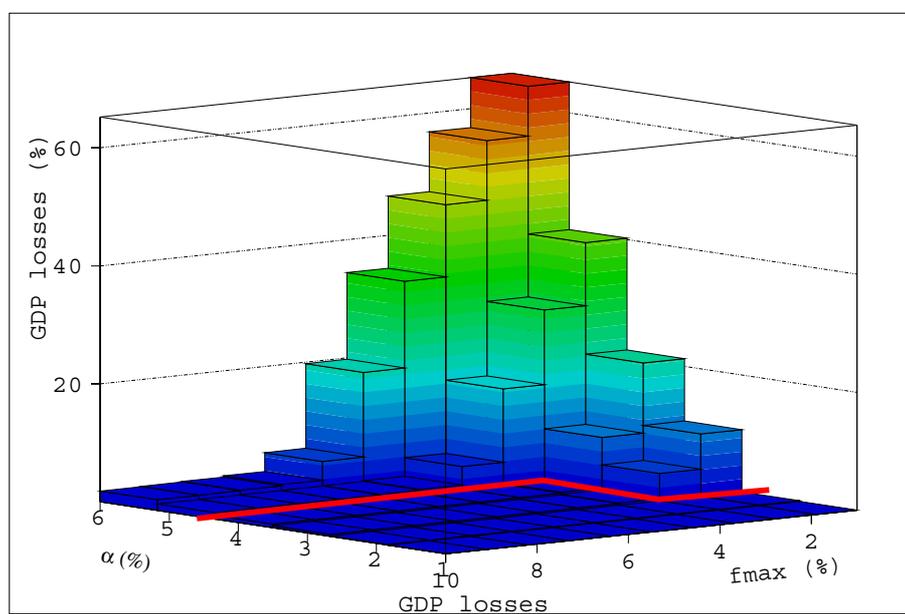


FIG. 7.14: Pertes moyennes de PIB après 100 ans, en pourcentage de PIB, en fonction de f_{max} (en %) et des paramètres de la distribution d'EEM ($\alpha_p = \alpha_z$, en %).

- Ensuite, la modélisation que l'on propose ci-dessus prend comme hypothèse une croissance constante de la technologie la plus récente. Mais si l'on suppose que la technologie la plus récente progresse par des mécanismes d'apprentissage (*“learning-by-doing”*) ou sous l'effet de la recherche-et-développement, alors l'utilisation de ressources pour la reconstruction pourrait bien nuire au progrès technologique, et donc à la croissance de la productivité. On peut facilement imaginer qu'un distributeur d'électricité obligé d'investir massivement pour rebâtir son réseau détruit par une tempête, ne lancera pas de grands programmes de recherche pendant la reconstruction. Dans notre modèle, cette situation se traduirait par un $A(t)$, la productivité moyenne, plus proche de $\Lambda(t)$, la productivité de la technologie la plus récente. Mais on aura également une croissance plus faible de $\Lambda(t)$; au final, on obtiendrait un $A(t)$ plus faible que dans le cas sans catastrophes.
- Enfin, il faut tenir compte de la répartition sectorielle des dommages des catastrophes. En général, les infrastructures et l'habitat sont les secteurs les plus touchés. Par exemple, les inondations de l'été 2002 en Europe centrale ont détruit selon *Munich-Re* [2003] pour 4 milliards d'euros d'infrastructure et 2 milliards d'euros dans l'habitat, et “seulement” 2 milliards d'euros dans l'industrie et le commerce. Or, c'est principalement dans l'industrie que l'on attend une forte augmentation de la productivité grâce au remplacement du capital. Peu de progrès sont à attendre dans la rénovation des logements et la reconstruction des routes et des réseaux ferrés. Il est peu probable que l'augmentation de productivité venant du remplacement de 2 milliards d'euros de capital dans l'industrie soit significative comparée aux ressources nécessaires à la reconstruction de 6 milliards d'euros dans les infrastructures et l'habitat.

7.6 Conclusions

Dans ce chapitre, On a évalué les conséquences macro-économiques des événements extrêmes en utilisant un modèle économique de déséquilibre, NEDyM.1, qui reproduit un monde dans lequel l'économie a un équilibre stable. Dans ce cas, les fluctuations économiques sont donc provoquées par des chocs exogènes.

On a montré que sur le court terme, l'équivalence entre un impact sur les flux (la production) et un impact sur les stocks (le capital) n'est pas valide. On a donc besoin d'introduire explicitement un module qui représente l'effet de la catastrophe sur le capital, en tenant en compte (i) de la différence entre une situation où des équipements ont été détruits et une situation où il y a moins de capital parce qu'on a décidé d'investir moins; et (ii) de la limitation des investissements de reconstruction due aux contraintes

techniques et financières. Cette modélisation permet de reproduire de façon satisfaisante les conséquences du séisme de Marmara en Turquie.

Ce travail a permis de constater que les processus dynamiques multiplient par 20 les coûts directs des événements extrêmes. Les processus de court-terme sont responsables de 50% de cette augmentation, alors qu'ils sont négligés dans les modèles de croissance traditionnel. Ceci montre à quel point il est important de considérer une large gamme d'échelles temporelles.

Sur le long-terme, les pertes de PIB dues aux extrêmes dépendent, de façon très non-linéaire, à la fois de la distribution des extrêmes et de la capacité de l'économie à financer et à mener la reconstruction après chaque catastrophe. Pour une distribution des extrêmes donnée, il y a une valeur de bifurcation de la capacité de reconstruction : au delà de cette valeur les pertes restent modérées, en deçà elles augmentent très rapidement. Ceci illustre la différence entre considérer un événement et une distribution d'événements : une série d'événements quasi-négligeables peut avoir des conséquences significatives au niveau macro-économique. Ceci montre qu'il est impossible de calculer le coût de certains types de catastrophes indépendamment des autres : elles interagissent de façon importante.

Ce résultat pourrait aussi aider à expliquer l'absence de développement économique dans certaines régions, qui subissent des catastrophes naturelles à répétition et qui n'ont pas les moyens de faire face financièrement aux coûts de reconstruction.

On note également qu'un effet très contestable, l'effet positif lié au remplacement précoce du capital détruit par du capital plus récent et plus efficace, peut réduire significativement les pertes du PIB, voire les annuler jusqu'à ce qu'on atteigne la bifurcation, dont la position n'est pas modifiée par cet effet. Il semble toutefois peu probable que l'effet de productivité soit significatif, pour trois raisons principales : (i) la situation d'urgence et le manque de moyen, qui poussent au renouvellement à l'identique de l'appareil productif après une catastrophe ; (ii) l'effet d'éviction de la reconstruction sur les dépenses de recherche et développement, et donc sur le progrès technique ; (iii) et enfin le fait que les secteurs les plus touchés par les catastrophes sont les infrastructures et l'habitat, qui ne sont pas des secteurs où on peut attendre un impact fort du renouvellement du capital.

Le modèle montre également que des changements futurs de la distribution des extrêmes pourraient engendrer des pertes de PIB significatives, même si l'effet de productivité est actif, et forcer à une adaptation de l'organisation économique. La forte dépendance des pertes de PIB à la capacité de reconstruction illustre le fait que l'évaluation des dommages économiques du changement climatique ne dépend pas seulement d'hypothèses sur le climat futur, mais aussi d'hypothèses sur l'organisation économique future.

Finalement, ces résultats suggèrent que les dommages du changement cli-

matique pourraient venir des chocs plus que de changements réguliers de la productivité. Après les premières études énumératives des impacts du changement climatique [*Nordhaus*, 1991; *Cline*, 1992; *Mendelsohn et Neumann*, 1999, ...], *Tol* [1996] et *Fankhauser et Tol* [2005] ont insisté sur la nécessité de prendre en compte les dynamiques de long terme de l'économie. Ce travail montre qu'il est aussi nécessaire de prendre en compte la dynamique de court-terme.

Il reste néanmoins un effet important qui a été négligé dans ce chapitre : l'effet de relance keynésienne lié à la demande de reconstruction. Dans une situation de déséquilibre, cette relance peut améliorer nettement la situation économique. Prendre en compte un tel effet demande de modéliser une économie déséquilibrée, c'est-à-dire de modéliser les cycles économiques. C'est l'objectif du chapitre suivant.

Références

- Albala-Bertrand, J., The political economy of large natural disasters with special reference to developing countries., *Oxford : Clarendon Press*, 1993.
- Ambrosi, P., J.-C. Hourcade, S. Hallegatte, P. Lecocq, P. Dumas, et M. Ha Duong, Optimal control models and elicitation of attitudes towards climate damages, *Environmental Modeling and Assessment*, 8(3), 133–147, 2003.
- Azar, C., et S. Schneider, Are the costs of (non-)stabilising the atmosphere prohibitive? A response to Gerlagh and Papyrakis, *Ecological Economics*, 46(3), 329–332, 2003.
- Beniston, M., The 2003 heat wave in europe : A shape of things to come? an analysis based on swiss climatological data and model simulations, *Geophysical Research Letters*, 31(2), L02,202, doi :10.1029/2003GL018,857, 2004.
- Benson, C., et E. Clay, Understanding the economic and financial impact of natural disasters, *The International Bank for Reconstruction and Development. The World Bank, Washington D.C.*, 2004.
- Choi, O., et A. Fisher, The impacts of socioeconomic development and climate change on severe weather catastrophe losses : mid-atlantic region (mar) and the u.s., *Climatic Change*, 58, 149–170, 2003.
- Christensen, J., et O. Christensen, Severe summer flooding in europe, *Nature*, 421, 805–806, 2003.
- Cline, W., *The Economics of Global Warming*, Institute for International Economics, Washington D.C., 1992.
- Déqué, M., Temperature et précipitations extremes sur la france dans un scenario de changement climatique (Temperature and precipitation extremes over france in a climate change scenario), available on <http://medias.dsi.cnrs.fr/imfrefx/web/documents/extremes.htm> (IMFREX Project), 2004a.
- Déqué, M., Canicule et simulation numérique (Heat wave and numerical simulation), available on http://medias.dsi.cnrs.fr/imfrefx/web/documents/downloads/md_canicule.pdf (IMFREX Project), 2004b.
- Dorland, C., R. Tol, et J. Palutikof, Vulnerability of the netherlands and northwest europe to storm damage under climate change, *Climatic Change*, 43, 513–535, 1999.
- Eurostat, *Economic portrait of the European Union 2001*, Panorama of the European Union, European Commission, 2002.
- Fankhauser, S., et R. Tol, On climate change and economic growth, *Resource and Energy Economics*, 27, 1–17, 2005.
- Gerlagh, R., et E. Papyrakis, Are the costs of (non-)stabilising the atmosphere prohibitive? A comment, *Ecological Economics*, 46(3), 325–327, 2003.

- Gibelin, A., et M. Déqué, Anthropogenic climate change over the mediterranean region simulated by a global variable resolution model, *Climate Dynamics*, 20, 327–339, 2003.
- Gilbert, R., et A. Kreimer, Learning from the world bank's experience of natural disaster related assistance., *Disaster Management Facility Working Paper Series 2. Urban Development Division, World Bank, Washington, D.C.*, 1999.
- Goodess, C., C. Hanson, M. Hulme, et T. Osborn, Representing climate and extreme weather events in integrated assessment models : a review of existing methods and options for development, *Integrated Assessment*, 4, 145–171, 2003.
- Haurie, A., Integrated assessment modeling for global climate change : An infinite horizon optimization viewpoint, *Environmental Modeling and Assessment*, 8, 117–132, 2003.
- Haurie, A., et F. Moresino, A stochastic control model of economic growth with environmental disaster prevention, *Working Paper*, 2004.
- IFRCRCS, World disaster report 2002, focusing on reducing risk, *International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies*, 2002.
- IPCC, *Special Report on Emissions Scenarios [Nakicenovic, N. and Swart, R. (Eds.)]*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New-York, NY, USA, 2000.
- IPCC, *Climate Change 2001 : The Scientific Basis [J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. Van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C.A. Johnson]*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New-York, NY, USA, 2001.
- Katz, R., M. Parlange, et P. Naveau, Statistics of extremes in hydrology, *Advances in Water Resources*, pp. 1287–1304, 2002.
- Kydland, F., et E. Prescott, Time to build and aggregate fluctuations, *Econometrica*, 50(6), 1345–1370, 1982.
- Mendelsohn, R., et J. Neumann, *The Impact of Climate Change on the United States Economy*, Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- Munich-Re, Topics. annual review : Natural catastrophes 2002, *Munich Reinsurance Group, Geoscience Research Group, Munich, Germany*, 2003.
- Munich-Re, Topics. annual review : Natural catastrophes 2003, *Munich Reinsurance Group, Geoscience Research Group, Munich, Germany*, 2004.
- Nicholls, R., F. Hoozemans, et M. Marchand, Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise, *Global Environmental Change*, 9 (Special Issue 'A new assessment of global effects of climate change'), 9, 69–87, 1990.
- Nordhaus, W., To slow or not to slow : The economics of the greenhouse effect, *Econ. J.*, 101, 920–937, 1991.

- Nordhaus, W., *Managing the Global Commons : The Economics of Climate Change*, MIT press, Cambridge, 1994.
- Nordhaus, W., et R. Boyer, *Warming the world : economics models of climate change*, MIT Press, Cambridge (MA, USA), 1999.
- OECD, Lessons learned in dealing with large-scale disasters, *General Secretariat, Advisory unit on multi-disciplinary issues*, OECD, 2003.
- Peck, S., et T. Teisberg, CETA : a model for carbon emissions trajectory assessment, *Econ. J.*, 13(1), 55–77, 1992.
- Rosenzweig, C., et W. Solecki, *Climate change and a global city : the potential consequences of climate variability and change*, Metro East Coast, Columbia Earth Institute, New-York (NY), 2001.
- Schär, C., P. Vidale, L. D., C. Frei, C. Häberli, M. Liniger, et C. Appenzeller, The role of increasing temperature variability in european summer heatwaves., *Nature*, 427, 332–336, 2004.
- Solow, R., A contribution to the theory of economic growth, *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65–94, 1956.
- Stewart, F., E. Fitzgerald, et associates, War and underdevelopment. vol. 1 : The economic and social consequences of conflict., *Oxford : Oxford University Press*, 2001.
- Swiss-Re, Floods - an insurable risk?, *Swiss Reinsurance Company, Zurich, CH*, 1998.
- Swiss-Re, Natural catastrophes and man-made disasters in 2003 : many fatalities, comparatively moderate insured losses., *Swiss Reinsurance Company, Zurich, CH*, 2004.
- Tol, R., The damage costs of climate change towards a dynamic representation, *Ecological Economics*, 19, 67–90, 1996.
- Tol, R., On the optimal control of carbon dioxide emissions : an application of fund, *Environmental Modeling and Assessment*, 2, 151–163, 1997.
- West, J. J., M. Small, et H. Dowlatabadi, Storms, investor decisions, and the economic impacts of sea level rise., *Climatic Change*, 48, 317–342, 2001.
- World Bank, Turkey : Marmara earthquake assessment, *World Bank Working Paper*, 1999.

Chapitre 8

La prise en compte de la dynamique endogène de l'économie dans l'évaluation du coût macroéconomique des événements extrêmes

Sommaire

8.1	Introduction	242
8.2	Le modèle NEDyM.2	242
8.2.1	Paramètres et équilibre du modèle	242
8.2.2	Les cycles économiques dans NEDyM	245
8.3	Comportement temporel du modèle	249
8.4	Analyse	253
8.4.1	Analyse de bifurcation	253
8.4.2	Etude du spectre	254
8.5	Conséquences macroéconomiques des extrêmes	257
8.5.1	Les pertes liées à un événement	257
8.5.2	Les pertes liées à une distribution d'événements	261
8.6	Conclusions	264
	Références	268

8.1 Introduction

On a vu dans le chapitre précédent que l'impact économique d'événements météorologiques pouvait être amplifié par des phénomènes de déséquilibre. Puis on a signalé que les conséquences d'un événement pouvaient être différentes selon l'état de l'économie avant le choc, montrant la nécessité de représenter des économies en déséquilibre. Or, ces déséquilibres sont fortement liés aux cycles économiques qui sont observés depuis la naissance du capitalisme (voir par exemple *Zarnovitz* [1985] ou *Kontolemis* [1997]). Deux questions semblent ici essentielles : (1) ces cycles sont-ils créés par des chocs exogènes — comme les événements extrêmes ou des chocs sur les technologies et la demande — ou sont-ils endogènes ? Dans cette seconde éventualité, tous les chocs exogènes s'ajouteraient alors à une dynamique pré-existante. (2) Existe-t-il des interactions entre ces cycles et la croissance de long-terme, alors qu'aucun résultat définitif n'a été publié sur ce point ?

Dans le chapitre précédent, on a reproduit des fluctuations économiques (qu'on ne peut cependant pas vraiment qualifier de cycle) engendrées par des chocs exogènes dans un modèle stable. Même si on ne doute pas de pouvoir calibrer le modèle pour reproduire une variance cohérente avec celle observée, on note que ces cycles ne reproduisent pas les caractéristiques (*les faits stylisés*) des cycles observés que ce soit en termes d'asymétrie ou de régularité.

On propose donc un modèle, NEDyM.2, qui est une version de NEDyM dans laquelle l'équilibre est instable et dont la trajectoire reproduit de manière endogène des cycles économiques, dont on va étudier les caractéristiques. On se démarque donc de l'approche à la *Kydland et Prescott* [1982], où les fluctuations économiques viennent de chocs exogènes, pour rechercher des sources de fluctuations économiques endogènes, dans la ligne des travaux de *Samuelson* [1939], *Kalecki* [1937], *Goodwin* [1951], ou *Chiarella et Flaschel* [2000].

8.2 Le modèle NEDyM.2

Cette version du modèle NEDyM considère une *économie managériale*, qui est nettement plus instable que l'*économie actionnariale* dans NEDyM, et on cherche à étudier la dynamique du modèle en fonction de son jeu de paramètres.

8.2.1 Paramètres et équilibre du modèle

On rappelle ici les valeurs des paramètres, qui sont reproduites dans le Tab. 8.1, et l'équilibre correspondant, qui est reproduit dans le Tab. 8.2

avec les valeurs observées issues de *Eurostat* [2002]. On va s'intéresser tout particulièrement au paramètre α_{inv} , qui représente la flexibilité de l'investissement. En effet, dans NEDyM, l'investissement physique est dirigé par Γ_{inv} , qui répond à la profitabilité du capital d'autant plus vite que α_{inv} est grand. Ainsi, un α_{inv} petit signifie que l'investissement varie lentement en fonction du signal de profitabilité, alors qu'un α_{inv} grand traduit le fait que l'investissement peut varier rapidement en fonction de la profitabilité. La vitesse de réaction de l'investissement aux signaux de profitabilité dépend : (i) de la volatilité de l'activité, des incertitudes et des coûts d'ajustement, qui font que les producteurs ne réagissent pas instantanément aux signaux économiques (*Day* [1979], *Lucas* [1967]); (ii) des délais entre le moment où un investissement est décidé et le moment où l'investissement est effectivement réalisé [*Kalecki*, 1937]; (iii) de la capacité à mobiliser rapidement des ressources dans les secteurs profitables. Ainsi, dans une économie où le niveau d'activité est très incertain et volatile, où les coûts d'ajustement sont importants et dont les secteurs principaux sont des secteurs lourds (ex : industrie), dont les investissements sont longs à mettre en place, α_{inv} sera très faible ; dans une économie stable et prédictible, à faibles coûts d'ajustement et dont les investissements dans les secteurs clés sont rapides (ex : services), α_{inv} sera très élevé.

On peut aussi interpréter un α_{inv} élevé comme la caractéristique d'une économie de marché pure, où l'investissement est entièrement dirigé par la profitabilité de court terme. A l'opposé, un α_{inv} faible représente une économie dans laquelle il existe un contrat social (ou une forte proportion d'investissements publics qui ne suivent pas une norme de profitabilité), qui fait qu'elle résiste aux signaux de court terme en profitabilité pour ne répondre qu'aux tendances de long terme.

Quand $\alpha_{inv} = 0$, c'est-à-dire quand il n'y a pas de dynamique de l'investissement, NEDyM.2 a un équilibre stable et cette propriété est conservée quand la dynamique de l'investissement reste faible, c'est-à-dire pour des valeurs de α_{inv} faibles.

Aucun calibrage individuel n'a été fait pour les autres paramètres (α_F , α_M , α_p , τ_{empl} , τ_{wage}), car on ne cherche pas à reproduire précisément des données historiques avec un modèle aussi simple. On cherche pour l'instant à reproduire les faits stylisés des cycles (déphasages, asymétrie...) et à identifier les mécanismes moteurs. Suivant une pratique courante dans le calibrage des modèles de long terme, des valeurs ont donc été choisies de manière à obtenir des comportements réalistes.

Comme il reste des défauts à ce calibrage, on envisage dans un second temps d'utiliser les méthodes de l'estimation de paramètres issus de la théorie du contrôle [*Jazwinski*, 1970; *Gelb*, 1974; *Kendrick*, 2005] et déjà appliqués à la météorologie et à l'océanographie [voir par exemple, *Talagrand et Courtier*, 1987; *Ghil et Malanotte-Rizzoli*, 1991] pour calibrer ces para-

Symbole	Description	Valeur
A	productivité totale	$A = 3,2 \cdot 10^{-4}$
e_{full}	taux d'emploi d'équilibre	$e_{full} = 90\%$
L_{max}	population active (en millions)	$L_{max} = 180$
ν	norme financière de rendement des capitaux	$\nu = 3\% \cdot an^{-1}$
γ_{save}	taux d'épargne	$\gamma_{save} = 0,3$
τ_{dep}	temps caractéristique de dépréciation du capital	$\tau_{dep} = 20$ ans
α_F	taux d'utilisation des liquidités du producteur	$\alpha_F = 20\% an^{-1}$
α_M	taux d'utilisation des liquidités du consommateur	$\alpha_M = 20\% an^{-1}$
α_{inv}	flexibilité de l'investissement	variable
α_p^1	flexibilité des prix, impact du stock	$\alpha_p^1 = 3,6 \cdot 10^{-3}$
α_p^2	flexibilité des prix, impact du déséquilibre instantané	$\alpha_p^2 = 0$
τ_{empl}	temps caractéristique du marché de l'emploi	$\tau_{empl} = 2$ ans
τ_{wage}	temps caractéristique des salaires	$\tau_{wage} = 2$ ans

TAB. 8.1: Liste des paramètres. Les 7 premiers déterminent l'équilibre du modèle ; les 6 derniers n'influencent pas cet équilibre mais seulement la dynamique du modèle. On fera varier la flexibilité de l'investissement de manière systématique dans la suite de ce chapitre.

mètres de façon plus rigoureuse. Cependant, dans le cadre de cette thèse, l'objectif n'est clairement pas la prévision macro-économique, mais la mise en évidence de phénomènes qualitatifs liés aux interactions entre les cycles endogènes et les chocs environnementaux. Aussi, la capacité du modèle à reproduire de manière qualitative les cycles est suffisante pour notre propos.

Les paramètres dynamiques du modèle peuvent être interprétés de la façon suivante : si le stock de biens est négatif, constant à -1 mois de demande agrégée (*i.e.* un délai de livraison de 1 mois) le prix augmente, suivant une fonction exponentielle du temps, avec un temps caractéristique de 10 ans. S'il y a une différence constante de 1% entre le taux d'emploi et le taux d'emploi d'équilibre, le salaire augmente de la même façon, avec un temps caractéristique de 2 ans.

S'il y a une différence fixe de 4% entre $\Pi_n/(pK)$ et ν , le taux d'investissement Γ_{inv} tend vers γ_{max} avec un temps caractéristique égal à $100/\alpha_{inv}$.

Si $\alpha_{inv} = 1$, ce temps est de 25 ans, et l'investissement est constant sur le court terme : les producteurs ne répondent qu'aux tendances économiques de très long terme.

Si $\alpha_{inv} = 2,5$, ce temps est de 10 ans, et la stratégie des producteurs dépend de la situation économique.

Si $\alpha_{inv} = 10$, ce temps est de 2 ans, et les producteurs modifient leur politique d'investissement en permanence, en fonction de la situation.

Si $\alpha_{inv} > 25$, ce temps caractéristique est inférieur à un an et Γ_{inv}

Symbole	Description	Valeurs d'équilibre (et valeurs nettes)	valeurs observées en 2001 (UE-15)
pY	production (=demande)	9	8,8
L	nombre de salariés	90%	92,6 %
wL	salaires totaux	6	5,6
			(taxes comprises)
pC	consommation	7	6,8
S	épargne disponible	3 (2)	1,8
Π	profits bruts	3	3,2
Div	dividendes	4 (3)	3,2
pI	investissements physiques	2	1,8

TAB. 8.2: Etat d'équilibre de NEDyM.2 (quand c'est nécessaire, les flux nets sur un an sont reproduits entre parenthèses) et les valeurs observées sur l'Union Européenne à 15 en 2001 [*Eurostat*, 2002]. Les valeurs sont en milliers de milliards d'euros.

“saute” entre son maximum et zéro, comme dans le modèle de *Goodwin* [1951]. On a donc une économie de “stop-and-go”, qui consacre tous ses moyens à l'investissement ou qui s'arrête d'investir, selon la situation.

Bien sûr, quand la différence entre $\Pi_n/(pK)$ et ν est supérieure, les temps caractéristiques sont réduits d'autant.

8.2.2 Les cycles économiques dans NEDyM

Pour des valeurs assez grande de α_{inv} , par exemple $\alpha_{inv} = 2,5$, l'équilibre de NEDyM.2 devient instable, et le modèle atteint un cycle limite plutôt qu'un point fixe.

L'oscillation de base du modèle présente des caractéristiques proches de celles des cycles économiques de la deuxième partie du vingtième siècle. La figure 8.1 montre le cycle pour $\alpha_{inv} = 2,5$. L'amplitude de cette oscillation est trop grande, mais sa période de 5,4 ans est cohérente avec les observations (voir *Kontolemis* [1997], *Süssmuth* [2002], le site NBER ¹ ou la revue par *Zarnovitz* [1985]). La variabilité de la longueur du cycle n'est pas reproduite, car le cycle est régulier dans le modèle.

Le cycle est composé de plusieurs phases, qui sont cohérentes avec la description de *Zarnovitz* [1985], et dont les durées sont cohérentes avec celles mesurées par NBER, *Süssmuth* [2002] et *Kontolemis* [1997] :

- De $t = 0$ à $t = 1$ an, une phase de reprise, durant laquelle la production augmente avec de petites oscillations. Cette phase est caractérisée par un taux d'emploi en hausse et par des prix et salaires approximative-

¹<http://www.nber.org/cycles.html>

ment constants. Ceci s'accompagne d'une augmentation de la consommation et de l'investissement, donc de la demande. En conséquence, les profits (resp. les prix) augmentent, rétroagissant sur l'investissement et la demande (resp. sur le taux d'emploi). Ces rétroactions positives forment un effet de multiplicateur-accélérateur [Harrod, 1939].

- De $t = 1$ à $t = 3$ ans, une phase d'expansion, pendant laquelle l'emploi est haut et croissant, et les salaires en augmentation. Ce développement mène toutefois à une inflation croissante du prix et du salaire qui réduit l'effet de multiplicateur-accélérateur sur l'investissement. Une diminution de la consommation vient de l'augmentation des prix, qui réduit le pouvoir d'achat du stock de liquidités des consommateurs (effet *Pigou* [1947]), mais sans changement important du produit des ventes (pD). Pendant cette période, le profit net par unité de capital ($\Pi_n/(pK)$) décroît, à cause de l'augmentation des coûts du travail et de l'inflation qui augmente la valeur de remplacement du capital pK . Cette période d'investissement croissant et d'augmentation de la vitesse de la monnaie correspond : (i) à une période de destruction de "l'armée de réserve des travailleurs", qui est responsable de la baisse des profits dans *Goodwin* [1967], *Skott* [1989] et *Rose* [1967] ; (ii) à une période d'inflation, durant laquelle la hausse du prix réduit le profit par unité de capital. Ces deux effets, liés à la contrainte sur la disponibilité du travail et à l'inertie du système de production qui ne peut suivre la demande, s'opposent à l'instabilité de l'investissement et sont responsables du retournement.
- De $t = 3$ à $t = 4,5$ ans, le retournement et la phase de contraction : à $t = 3$ ans, le profit net par unité de capital $\Pi_n/(pK)$ devient plus faible que la norme financière de rendement des capitaux ν et le taux d'investissement commence à décroître, suivi par la demande. L'économie est alors dans une situation de sur-production, le stock de biens augmente rapidement, ce qui fait décroître le prix à partir de $t = 4$ ans. A ce moment, il y a déflation et le taux d'emploi décroît rapidement. Le profit net par unité de capital continue de décroître. Le salaire réel, qui augmente jusqu'au début de la contraction, commence à diminuer quelques mois après le retournement.
- De $t = 4,5$ à $t = 5,2$ ans, la phase de dépression : le taux d'investissement est toujours décroissant, mais la baisse des prix rétablit le pouvoir d'achat et la consommation repart malgré le faible taux d'emploi. De plus, la baisse du prix et du salaire rend l'investissement meilleur marché et rétablit les profits, ce qui fait remonter les profits nets par unité de capital $\Pi_n/(pK)$. Quand ce dernier croise la valeur de la norme financière de rendement des capitaux ν , l'investissement repart à la hausse et on entre dans une nouvelle phase de reprise.

Tout au long de ce cycle, une oscillation de courte période de l'emploi et du salaire est observée, avec de faibles conséquences sur la production.

Dans la réalité, il est envisageable que cette oscillation soit verrouillée en fréquence sur la fréquence annuelle, qui dirige de nombreux “forçages” (emploi saisonnier, comportement de consommation...).

Il est important de noter que l’asymétrie du cycle observée par NBER et *Kontolemis* [1997] est bien reproduite : la phase de récession est plus courte que la phase d’expansion. Cette asymétrie vient du processus suivant : durant la phase de croissance, l’économie passe d’une situation de sur-production à une situation de sous-production, et le stock de biens devient négatif, ce qui correspond à l’existence de commandes non-satisfaites qui font augmenter le prix. Cependant, ceci a lieu alors que la demande est très forte, et la quantité de commandes non-satisfaites reste raisonnable comparée à la demande totale. Ceci fait que la réponse du prix reste lente. A l’opposé, la demande est faible pendant la phase de contraction, et quand l’économie passe en sous-production, le stock de biens devient positif. La quantité de biens invendus devient très vite importante comparée à la demande, qui est faible, et le prix réagit donc très rapidement, expliquant pourquoi la récession est plus brutale que la phase d’expansion. Il est noter que ceci entraîne que l’asymétrie dans le cycle est directement liée à son amplitude en terme de demande.

Ce cycle économique est cohérent avec les *faits stylisés* cités par *Zarnovitz* [1985] (voir en particulier son tableau 4). Dans NEDyM, ainsi que dans les observations de *Zarnovitz*, on trouve que les variables suivantes sont coïncidentes avec le cycle : la production (Y), le chômage $((L_{full} - L)/L_{full})$; l’inflation $((dp/dt)/p)$ et la vitesse de la monnaie. Sont en avance sur le cycle, dans NEDyM et pour *Zarnovitz* : les nouvelles commandes de biens de consommation, la variation du nombre de commandes non-satisfaites (ici la dérivée temporelle de G), les marges et le prix de la production par unité de coût du travail utilisé (ici les profits bruts Π). Sont en retard sur le cycle : le salaire réel (w/p) , la part des salaires dans le revenu $(wL/(wL + Div))$, les stocks de bien (G). Toutes ces propriétés sont bien reproduites. On peut noter en particulier que NEDyM reproduit la corrélation entre l’inflation, le prix et la production : l’inflation est procyclique et le prix contracyclique (mais corrélé positivement avec la production retardée de quelques mois), ce qui est cohérent avec les données [e.g., *King et Watson*, 1996; *Yun*, 1996]. On retrouve donc un comportement en *relation de Philipps neo-keynésienne*, qui vient dans NEDyM de la rigidité du prix².

NEDyM est donc capable de reproduire des cycles avec des caractéristiques réalistes, même si un meilleur calibrage reste à effectuer pour corriger les points faibles du modèle : (i) le fait que le revenu $(wL + Div)$ est en retard sur le cycle (il devrait coïncider), ceci vient du fait que dans NEDyM les coûts salariaux oscillent avec une plus grande amplitude que les profits ;

²A la différence de *Wang et Wen* [2004], qui expliquent ces corrélations par l’action de la Banque Centrale dans un modèle à prix flexible.

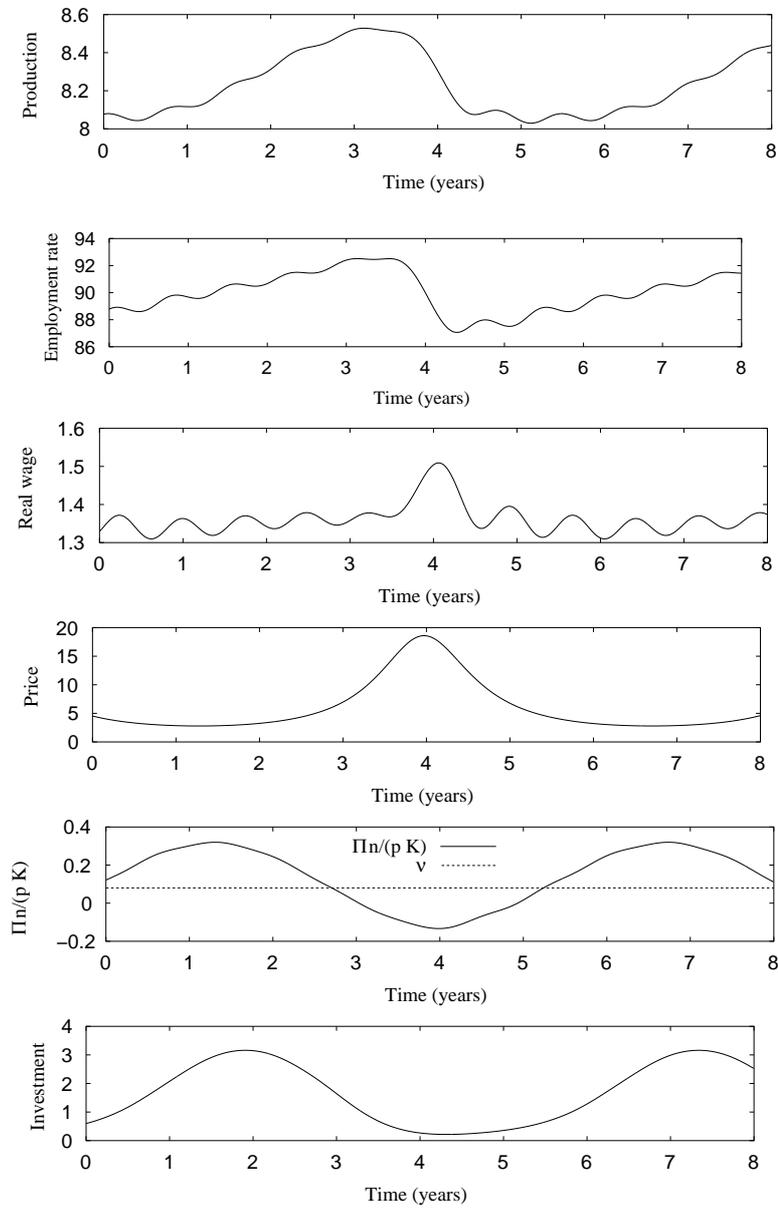


FIG. 8.1: Cycles économiques du modèle pour $\alpha_{inv} = 2.5$. Plus d'un cycle est re-produit pour clarifier la lecture. Sont représentés : (a) la production (en milliers de milliards d'euros), (b) le taux d'emploi (en %), (c) le salaire réel (sans unité), (d) le prix (sans unité), (e) le profit net par unité de capital, avec la valeur de ν (sans unité), (f) l'investissement (en milliers de milliards d'euros).

(ii) le fait que les ventes décroissent trop tôt et soient trop variables comparées à la variation de la production. Ces deux problèmes sont liés à la trop grande amplitude de la variation du prix et du salaire.

Il est important de noter que NEDyM est un modèle essentiellement classique, puisque toutes les relations de comportement dépendent de prix et non de quantités, même si les délais d'ajustement peuvent engendrer des comportements keynésiens sur le court terme.

8.3 Comportement temporel du modèle

La richesse d'un modèle simple et agrégé est de pouvoir explorer l'espace des paramètres, pour s'intéresser aux différents comportements possibles. En particulier, on se concentre ici sur la dépendance de la dynamique à la valeur de la flexibilité de l'investissement α_{inv} , qui est le paramètre clef de ce modèle.

Si $\alpha_{inv} = 0$, le taux d'investissement du producteur Γ_{inv} est constant, selon l'Eq. (6.18). Le modèle atteint alors un équilibre de plein-emploi, avec un stock de bien nul. La production dépend alors de la valeur initiale (fixe) de Γ_{inv} . Dans ce cas, on se ramène à l'état stationnaire d'un modèle de Solow.

Si le taux d'investissement peut varier, plusieurs types de comportement sont possibles :

– **Situation 1.**

Si le taux d'investissement varie lentement, par exemple avec une flexibilité de l'investissement de $\alpha_{inv} = 0,5$, Γ_{inv} tend vers sa valeur d'équilibre, où le profit net par unité de capital est égal à la norme financière de rendement des capitaux ν . Le modèle atteint alors un équilibre stable. Dans ce cas ν détermine l'investissement et donc le niveau d'activité. NEDyM.2 a alors le même équilibre stable qu'un modèle de Solow dont le taux d'épargne est bien choisi.

– **Situation 2.**

Si la flexibilité de l'investissement est supérieure, par exemple avec $\alpha_{inv} = 1,7$, le modèle n'atteint plus d'équilibre stable, mais tend vers une solution oscillante. L'oscillation du taux d'investissement Γ_{inv} se répercute alors dans le système productif, via le niveau d'investissement. La figure 8.2 montre l'évolution de l'état du modèle dans ce cas, pour deux valeurs de α_{inv} , après que les transitoires ont disparu.

La raison fondamentale de ce comportement oscillatoire est que l'investissement augmente quand la demande est haute et diminue quand la demande est basse; cette réponse amplifie toute variation de la demande. Comme dans *Harrod* [1939], l'effet de multiplicateur/ accélérateur déstabilise le modèle. Il faut noter que les fluctuations de la

demande ne viennent pas d'une thésaurisation à la Keynes, mais de changements de la quantité de monnaie impliquée dans la boucle entre épargne des consommateurs et dividendes redistribués, quand un bas niveau de profit décourage les producteurs d'investir.

Cette instabilité est contrebalancée par (i) la montée du prix, qui vient de l'inertie de l'offre qui ne peut répondre à temps à l'augmentation de demande ; (ii) par la montée des coûts du travail (wL) due au taux d'emploi élevé et au salaire en hausse. Ces processus réduisent le profit net par unité de capital et s'opposent à l'instabilité de l'investissement. Ils stabilisent donc le modèle. Le modèle atteint donc une oscillation amplifiée. L'amplitude de l'oscillation augmente jusqu'à la saturation due à la non-linéarité de la réponse du prix et du salaire et de l'influence du prix sur les profits. On note que la contrainte d'offre de travail, qui est responsable du retournement dans de nombreux modèles (p. ex. *Rose* [1967], *Goodwin* [1967] ou *Skott* [1989]), n'agit pas seule dans NEDyM : le rôle de l'inflation est également important.

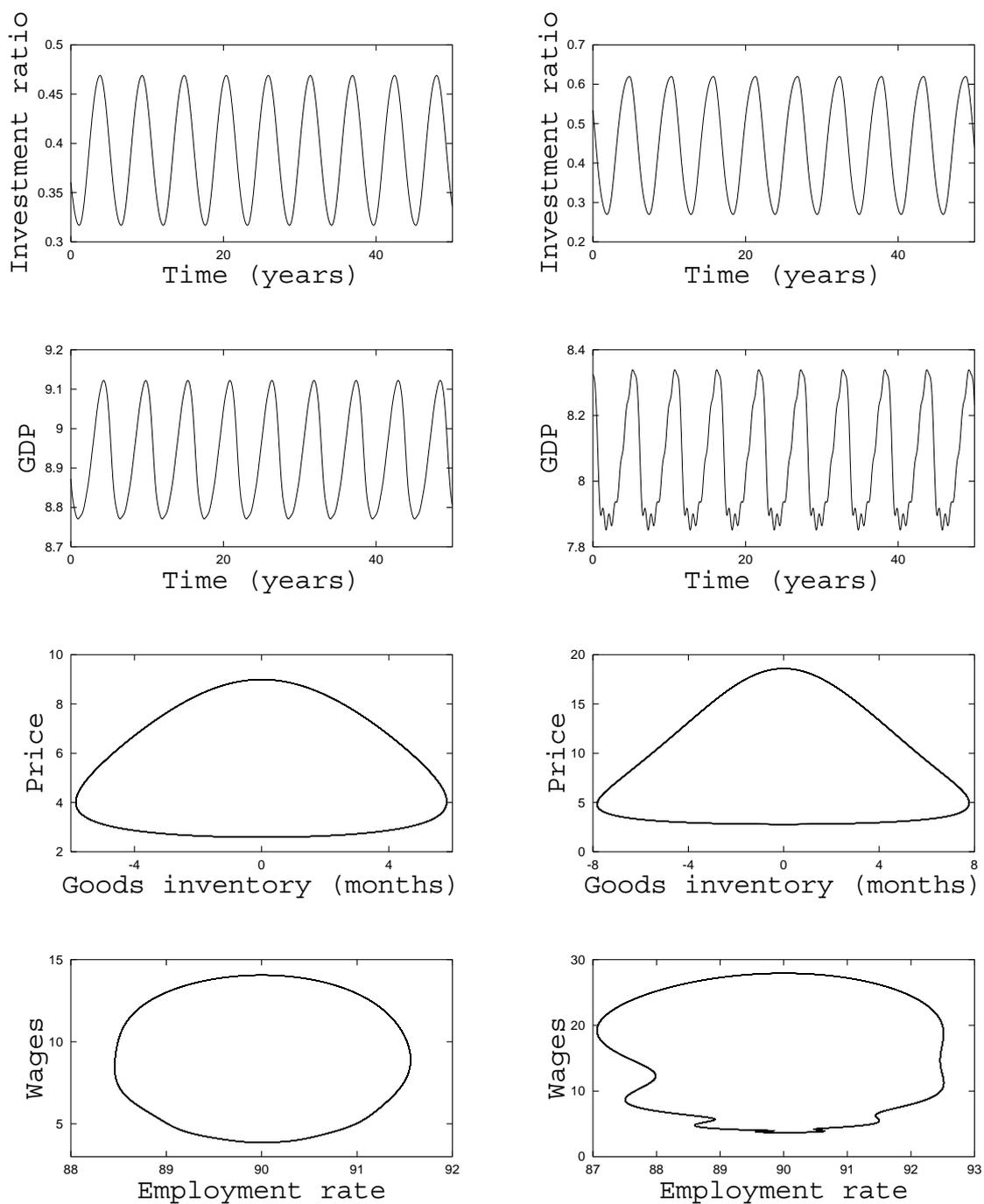
Une autre caractéristique de la solution oscillatoire de la figure 8.2 est le fait que le taux d'emploi et le stock de biens oscillent autour de leurs valeurs d'équilibre. La production, pourtant, n'oscille pas autour de sa valeur d'équilibre, mais autour d'un état sous-optimal. Quand on compare la Fig. 8.2(a) avec la Fig. 8.2(b), on voit que l'augmentation de l'amplitude de l'oscillation s'accompagne d'une diminution du niveau moyen de production.

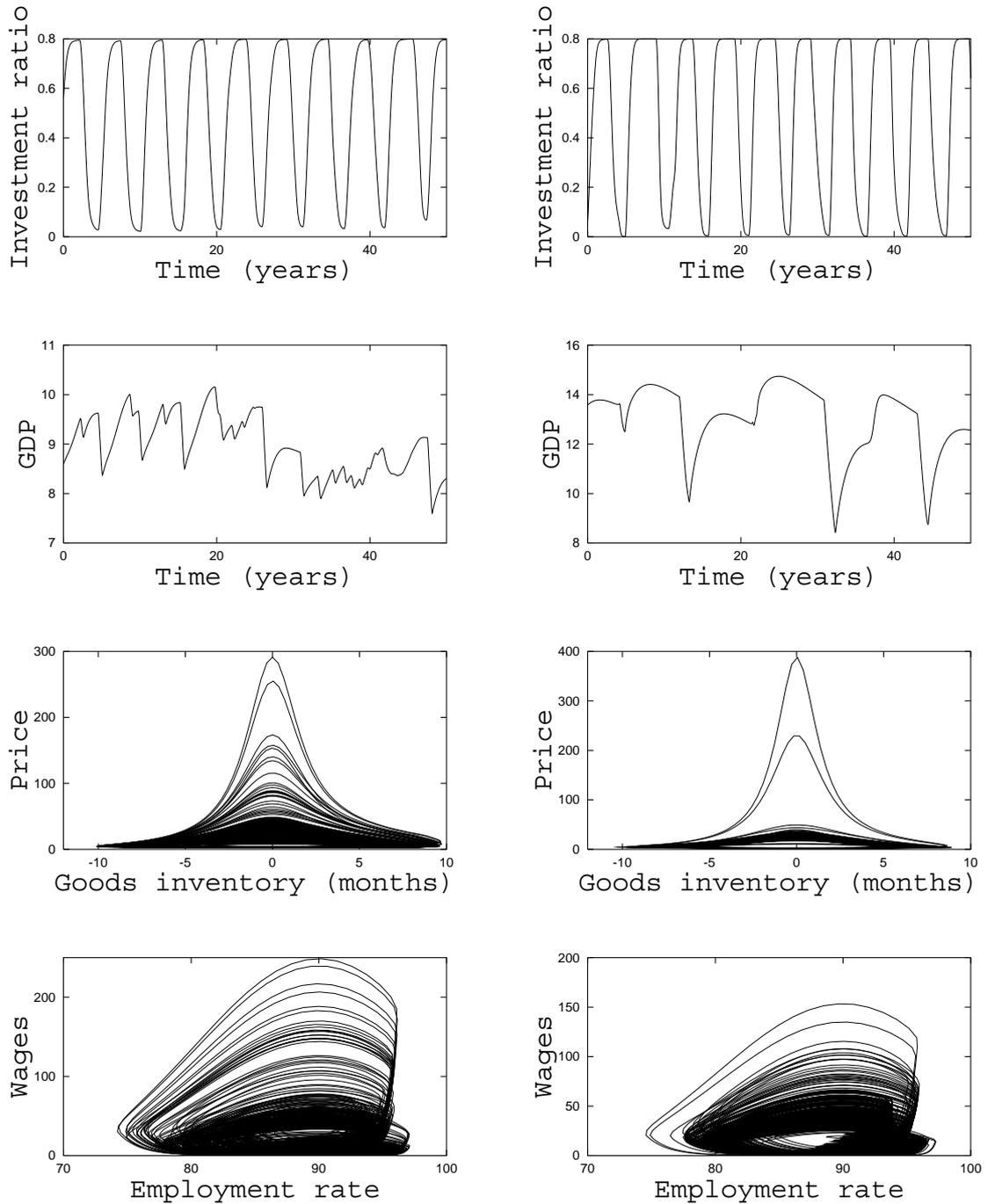
Quand la flexibilité de l'investissement α_{inv} augmente, l'oscillation devient plus importante, mais aussi plus irrégulière. En particulier, l'oscillation en terme de taux d'emploi est régulière pour $\alpha_{inv} = 1,7$, mais montre des "coudes" (*kinks* en anglais), quand $\alpha_{inv} = 2,5$. Ces coudes viennent de l'interaction entre le salaire (marché de l'emploi) et le prix (marché des biens) quand l'amplitude de l'oscillation est suffisante. Ces coudes affectent également la production, qui devient plus irrégulière.

– **Situation 3.**

Pour des valeurs plus importantes de α_{inv} , par exemple $\alpha_{inv} = 5$, le taux d'investissement Γ_{inv} atteint ses limites γ_{min} et/ou γ_{max} et de nouvelles non-linéarités apparaissent (cf. Eq. (6.18)). Ces contraintes changent le comportement du modèle de façon qualitative, et le rendent chaotique comme le montre la figure 8.3.

Dans ce cas, le couplage entre une boucle positive (profit/ investissement) et une boucle négative (coût du travail/ investissement et prix/ investissement) ne dirige plus seul le modèle. Comme Γ_{inv} s'approche de ses limites, l'oscillation est affectée par deux contraintes supplémentaires : pas d'investissement négatif (pas de consommation

(a) $\alpha_{inv} = 1,7$ (b) $\alpha_{inv} = 2,5$ FIG. 8.2: Comportement du modèle pour (a) $\alpha_{inv} = 1,7$ (gauche) et (b) $\alpha_{inv} = 2,5$ (droite).



(a) $\alpha_{inv} = 10$

(b) $\alpha_{inv} = 20$

FIG. 8.3: Comportement du modèle pour (a) $\alpha_{inv} = 10$ (gauche) and (b) $\alpha_{inv} = 20$ (droite). On remarque que le taux d'investissement Γ_{inv} atteint sa limite supérieure $\gamma_{max} = 0,8$ à gauche, et ses deux limites γ_{max} et $\gamma_{min} = 0$ à droite.

du capital installé) et la contrainte de financement des investissements. L'effet non-linéaire de ces contraintes perturbe l'oscillation et crée le comportement chaotique.

Ces résultats peuvent être comparés à ceux de *Day et Shafer* [1985], qui trouvent des comportements chaotiques dans un modèle keynésien quand *l'investissement induit* est suffisamment fort. Leur investissement induit se rapproche de la flexibilité de l'investissement dans NEDyM.

8.4 Analyse

8.4.1 Analyse de bifurcation

Le comportement du modèle dépend particulièrement de la valeur de la flexibilité de l'investissement α_{inv} . Suivant l'approche générale de la théorie de systèmes dynamiques [*Guckenheimer et Holmes*, 1997], on étudie cette dépendance en cherchant les changements qualitatifs de comportement du modèle quand α_{inv} augmente. On trouve des applications en macroéconomie de cette méthode, appelée analyse de bifurcation, dans *Barnett et He* [2002], *Benhabib et Nishimura* [1979], *Lordon* [2002] et *Chiarella et al.* [2002]. Cette méthode est également utilisée dans de nombreux champs intéressants l'économie comme la dynamique des populations [*May*, 1974] ou la climatologie [*Ghil et Childress*, 1987].

La figure 8.4 montre les extrema de l'oscillation du taux d'investissement Γ_{inv} en fonction de la flexibilité de l'investissement α_{inv} . La bifurcation est clairement visible. Une analyse précise montre qu'elle a lieu pour $\alpha_{inv} \approx 1,4$: pour $\alpha_{inv} < 1,4$, le modèle a un équilibre stable ; pour $\alpha_{inv} > 1,4$ le modèle tend vers un cycle limite, ainsi qu'on peut le voir dans la section 8.3 (voir Fig. 8.2 et 8.3). Les oscillations de Γ_{inv} se propagent dans les autres variables du système économiques, qui deviennent toutes périodiques.

La transition d'un équilibre stable à un cycle limite est associée à une bifurcation de Hopf [*Guckenheimer et Holmes*, 1997]. Pour le confirmer, le modèle est linéarisé autour de son état d'équilibre X_0 . Le comportement d'une perturbation δX au voisinage de X_0 est donné par :

$$\frac{d \delta X}{dt} = M(\alpha_{inv}) \delta X, \quad (8.1)$$

où $M(\alpha_{inv})$ est la matrice Jacobienne du modèle autour de son état d'équilibre X_0 , pour une valeur donnée de α_{inv} . Comme le modèle a 8 variables d'état, M est une matrice 8x8. Le calcul des valeurs propres λ_i ($i = 1, \dots, 8$) de $M(\alpha_{inv})$, pour différentes valeurs de α_{inv} , donne la stabilité de l'équilibre et le comportement du modèle autour de cet équilibre.

Le calcul est fait pour 25 valeurs de α_{inv} , de 0,5 à 2,0. Pour toutes ces valeurs de α_{inv} , quatre valeurs propres principales sont trouvées, les autres ont une partie réelle négative de 3 ordres de grandeur inférieure à celles des quatre principales.

Les 4 valeurs propres principales sont réparties en 2 paires de valeurs propres complexes conjuguées. La première paire (λ_1, λ_2) est indépendante de α_{inv} , sa partie réelle est $-0,66 \cdot 10^{-3}$, correspondant à un temps d'amortissement de 4,15 ans ; sa partie imaginaire vaut $0,23 \cdot 10^{-1}$, correspondant à une oscillation de période 276 jours. Cette oscillation vient du marché de l'emploi et de la courbe de Phillips.

La deuxième paires de valeurs propres (λ_3, λ_4) a une partie imaginaire indépendante de α_{inv} , égale à $0,32 \cdot 10^{-2}$, correspondant à une oscillation de période 5,5 ans, proche de celle observée dans le modèle (Fig. 8.1, 8.2, ou 8.3). La partie réelle dépend de α_{inv} , ainsi qu'on le voit dans la Fig. 8.5. Cette figure montre la partie réelle de λ_3 et λ_4 en fonction de α_{inv} et montre une grande linéarité. Quand $\alpha_{inv} = 1,39$, la partie réelle de la paire de valeurs propres est nulle et l'équilibre est neutre. Quand $\alpha_{inv} < 1,39$, cette partie réelle est négative, l'équilibre est stable et l'oscillation de période 5,5 ans est amortie. Quand $\alpha_{inv} > 1,39$, cette partie réelle est positive, l'équilibre est instable et l'oscillation de période 5,5 ans est amplifiée. Cette oscillation est cependant bornée par des non-linéarités et mène à un cycle limite. On a donc bien une bifurcation de Hopf à $\alpha_{inv} = 1,39$.

8.4.2 Etude du spectre

Pour étudier plus avant les changements de comportement du modèle que l'on voit dans les Fig. 8.2 et 8.3, on calcule le spectre de puissance de plusieurs variables du modèle, pour plusieurs valeurs du paramètre α_{inv} . Les résultats sont représentés dans la Fig. 8.6 pour l'une des variables, la production Y , et pour 5 valeurs de α_{inv} ; les résultats pour les autres variables et pour des valeurs intermédiaires de α_{inv} sont similaires.

Quand la flexibilité de l'investissement est faible, la figure montre une oscillation de période $T \approx 5,4$ ans et quelques harmoniques d'amplitude décroissante. On ne trouve pas de variabilité significative pour des périodes supérieures à 6 ans. La différence entre la période mesurée $T \approx 5,4$ et la période donnée par l'analyse de bifurcation $T' \approx 5,5$ s'explique par les non-linéarités qui viennent modifier cette période quand on s'éloigne de la bifurcation.

On remarque que pour $\alpha_{inv} = 1,7$ et $\alpha_{inv} = 2,5$, la fréquence de la deuxième paire de valeurs propres $f_2 = 1/276 \text{ dy}^{-1}$, n'est pas visible. En revanche, la septième harmonique de la fréquence principale, $f_3 = 7/5,5 \text{ yr}^{-1}$, est d'amplitude plus importante que les harmoniques précédentes, ce qui suggère que la fréquence f_2 est verrouillée sur la fréquence f_3 , dont elle amplifie l'oscillation par résonance non-linéaire. Comme on l'a déjà dit, il est possible que

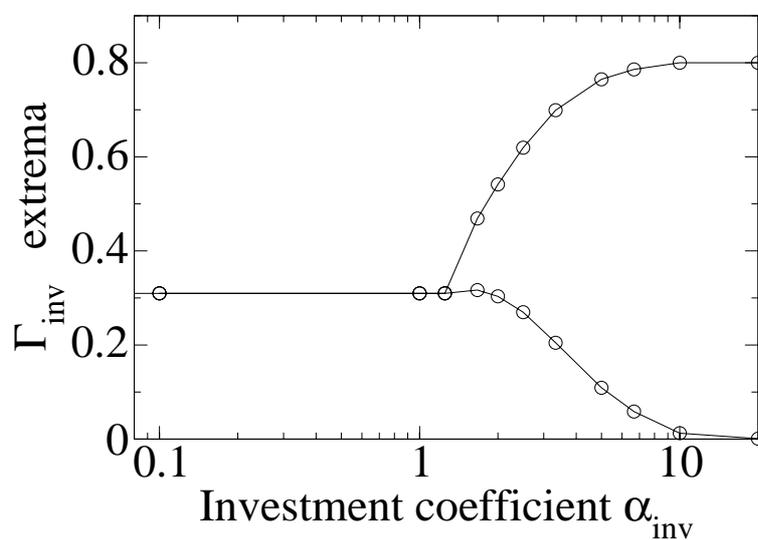


FIG. 8.4: Extrema du taux d'investissement en fonction de la flexibilité de l'investissement α_{inv} .

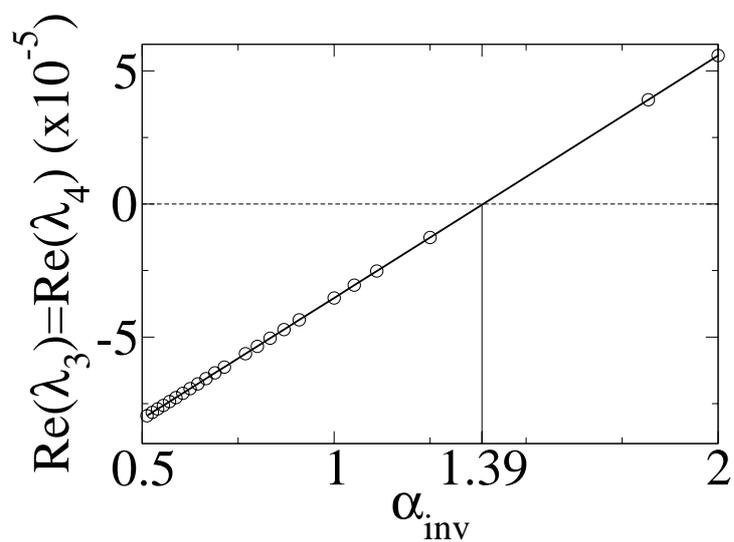


FIG. 8.5: Partie réelle de la seconde paire de valeurs propres conjuguées en fonction de la flexibilité de l'investissement α_{inv} .

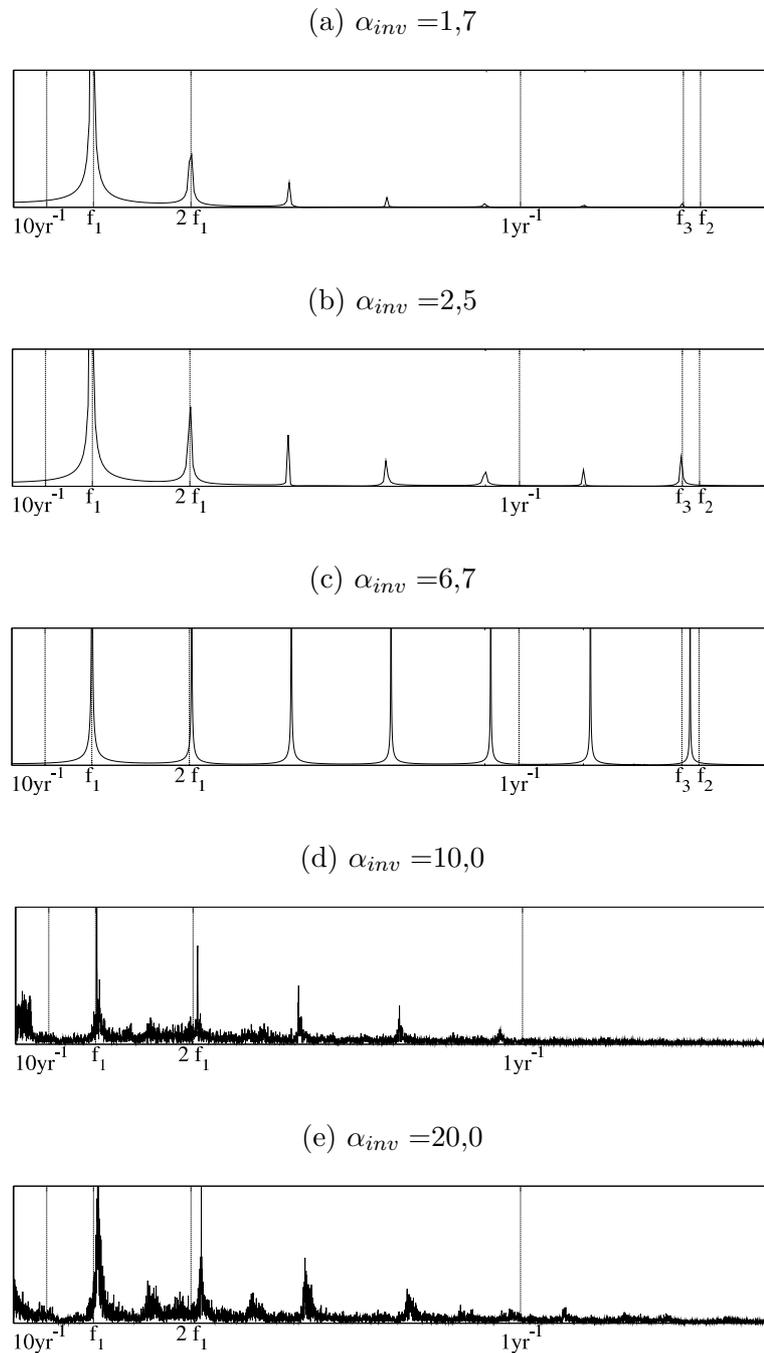


FIG. 8.6: Spectre de puissance de la production pour cinq valeurs de α_{inv} (1,7; 2,5; 6,7; 10,0; 20,0) avec des unités arbitraires. Calculé par FFT à partir du cycle limite, avec des séries d'au moins 3000 ans. Lorsque c'était utile, on a fait figurer la fréquence de la deuxième paire de valeurs propres, f_2 , et la fréquence de la septième harmonique de la fréquence principale, notée f_3 .

dans le monde réelle, cette fréquence f_3 soit à son tour verrouillée sur la fréquence annuelle, qui dirige un grand nombre de forçages.

Quand la flexibilité de l'investissement augmente, l'amplitude des oscillations augmente également (voir encore Fig. 8.2 et 8.3). De plus, le spectre devient plus riche en pics de hautes fréquences à cause des harmoniques de la fréquence principale, $f_1 = 1/5,4 \text{ yr}^{-1}$.

Quand la flexibilité devient très élevée, $\alpha_{inv} \geq 10,0$, une forte variabilité de long-terme apparaît, ainsi qu'un comportement de chaos déterministe.

8.5 Conséquences macroéconomiques des extrêmes

On a vu dans les sections précédentes qu'il pouvait exister plusieurs régimes économiques dont les caractéristiques en termes de fluctuations pouvaient beaucoup différer. Ainsi, nos résultats suggèrent l'existence d'un arbitrage entre la capacité d'adaptation et la stabilité : si la flexibilité de l'investissement est faible, il n'y a pas (ou peu) de cycles économiques, mais l'adaptation de l'économie à un choc exogène est lente. Si la flexibilité de l'investissement est élevée, l'économie s'adapte rapidement aux chocs exogènes mais le bien-être de la population est affecté par de larges fluctuations endogènes du taux d'emploi et par une perte de production moyenne à cause des non-linéarités.

Revenons maintenant aux conséquences des événements extrêmes, cette fois dans une économie qui n'est pas à l'équilibre comme dans le chapitre précédent, mais qui montre des cycles endogènes significatifs. On est bien conscient des limites de notre modélisation, dans la mesure où les caractéristiques du cycle reposent sur un calibrage encore fragile. Il est toutefois important de regarder de manière qualitative comment les chocs exogènes interagissent avec le cycle et comment les conséquences d'une catastrophe dépendent de la situation économique pré-existante.

8.5.1 Les pertes de production liées à un événement extrême

Pour évaluer la dépendance de la perte totale de production à la situation économique pré-existante, on impose la même catastrophe qu'à la section 7.3.3.3, qui détruit du capital productif à hauteur de 3% du PIB. Cette catastrophe est imposée sur l'économie dont le cycle est décrit en section 8.2.2. La catastrophe a donc lieu en un point précis du cycle économique. On peut se demander comment la perte de production totale engendrée par la catastrophe dépend du moment où elle a lieu, et de la situation économique sur laquelle elle s'exerce. Pour cela, on réalise une série de simulations, dans lesquelles on déplace le point où la catastrophe arrive. On intègre ensuite la perte de production sur 20 ans pour obtenir les pertes totales.

La figure 8.7 montre : (1) en haut, le cycle de référence, en terme de production, en fonction du décalage en mois par rapport au minimum du cycle; et (2) en bas, la perte de PIB totale (intégrée sur 20 ans, en % du PIB,) dont est responsable une catastrophe, en fonction du moment où elle a lieu, repéré par rapport au minimum du cycle. Ainsi, une catastrophe arrivant en bas de cycle, est représentée au décalage zéro, une catastrophe arrivant au pic du cycle est représentée au décalage -10 mois.

On constate immédiatement que les pertes totales sont fortement corrélées avec le point du cycle où la catastrophe a lieu : de 0% si elle a lieu au minimum du cycle, jusqu'à 20% de PIB si elle a lieu 38 mois après le minimum, c'est-à-dire environ 15 mois avant le maximum du cycle. Une catastrophe ayant lieu au pic du cycle engendre des pertes d'un montant de 2% du PIB.

A priori, il peut sembler paradoxal qu'une économie en crise supporte mieux une catastrophe qu'une économie en pleine croissance. Pourtant, cela s'explique facilement : si la catastrophe a lieu au minimum du cycle, les salaires sont faibles, le chômage est élevé, le taux d'investissement est bas, donc des ressources sont disponibles pour la reconstruction. Parce que la demande reste constante sur le court terme, alors que la production subit un choc négatif, les prix augmentent ; de plus, le chômage supplémentaire réduit encore les salaires. On observe donc une augmentation des profits qui favorisent l'investissement de reconstruction et donc rétablissent rapidement le niveau de capital antérieur à la catastrophe. L'effet de relance économique de la catastrophe accélère la sortie de crise de l'économie³. C'est à peu près ce qui s'est produit lors du séisme de Marmara, qui a eu lieu alors que l'économie turque était en récession de 7% par an (voir l'analyse de sensibilité faite en section 7.3.3.3). On remarque que, dans ce cas particulièrement favorable, la perte totale de production est faible, voir nulle, c'est-à-dire que la perte liée au choc est compensée par l'effet de relance créé par l'événement. Cependant, en aucun cas la catastrophe n'a de conséquences économiques strictement positives.

Quand la catastrophe a lieu 15 mois avant le maximum du cycle, l'économie est à son pic en terme de taux de croissance, et les besoins de reconstruction arrivent alors que les ressources sont déjà rares. En conséquence, la demande additionnelle de travail due à la reconstruction, que l'on observait déjà dans NEDyM.1 à partir de l'équilibre, se fait sentir alors que le taux d'emploi est déjà supérieur à sa valeur d'équilibre. Elle engendre donc une aggravation de la pénurie d'offre de travail et une augmentation des coûts du travail, qui réduisent les profits et donc l'investissement, ce qui nuit à l'accumulation du capital et donc prolonge les conséquences du choc.

³Cet effet serait probablement très fortement amplifié par la modélisation de l'action du gouvernement finançant la reconstruction des infrastructures publiques.

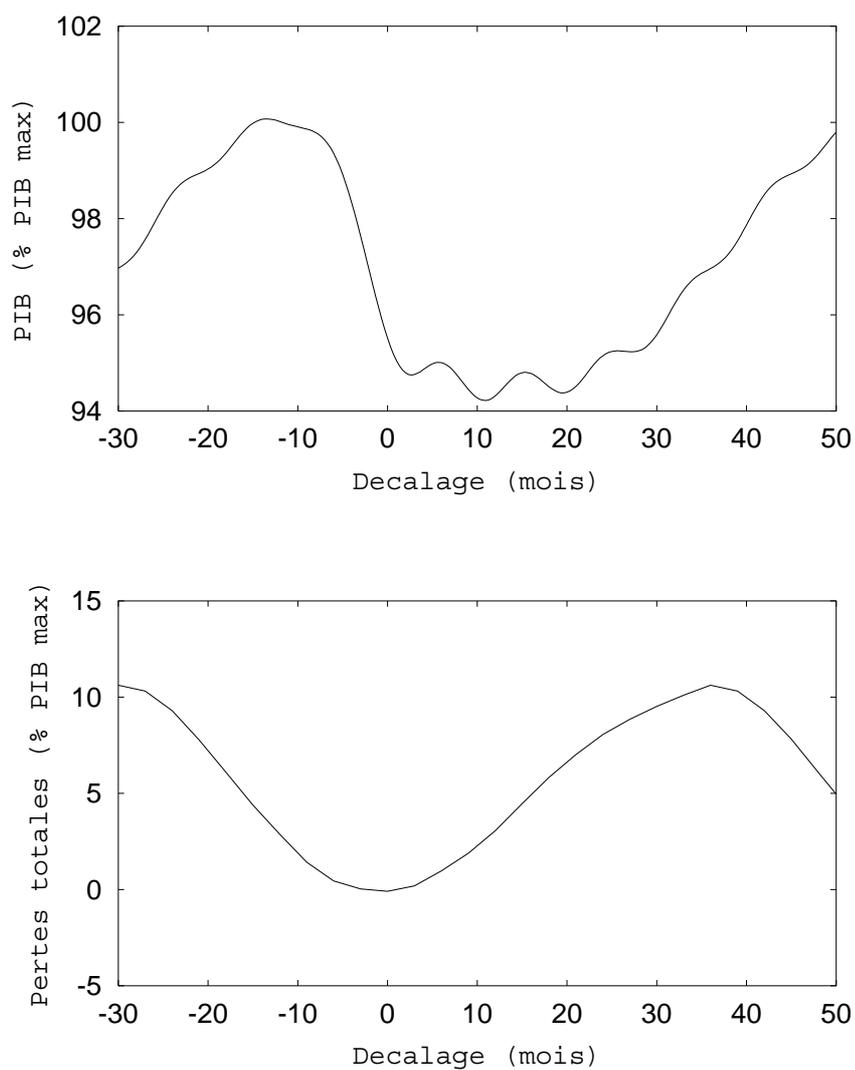


FIG. 8.7: Le cycle en terme de production, en fonction du décalage par rapport au minimum du cycle (en haut); et la perte de PIB totale (intégrée sur 20 ans) dont est responsable la catastrophe, en % du PIB max, en fonction du moment où elle a lieu, repéré par rapport au minimum du cycle (en bas).

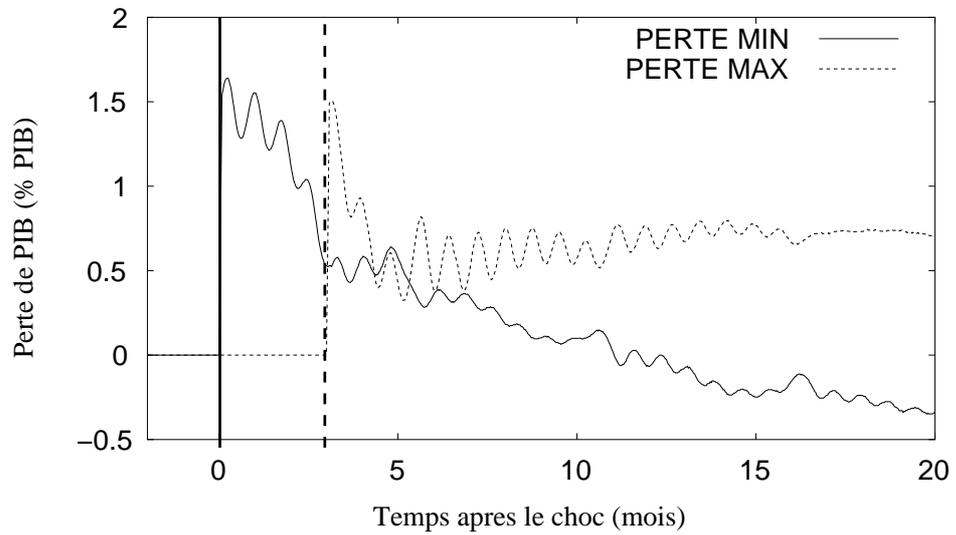


FIG. 8.8: La perte de production instantanée, pendant 20 mois après le choc. Les chocs sont indiqués par les barres verticales, en trait plein pour le choc dont les pertes sont minimum ; en tirets pour le choc dont les pertes sont maximales. Dans le cas “perte min”, l’effet du choc est positif après environ 11 mois grâce à l’effet de relance économique qui fait plus que compenser les pertes en capital productif.

La figure 8.8 montre la production instantanée après le choc dans deux cas extrêmes : dans le cas *Perte min*, la catastrophe a lieu au minimum du cycle, quand les conséquences sont minimales ; dans le cas *Perte max*, la catastrophe a lieu en période de forte croissance, quand les conséquences sont maximales. On voit clairement sur les productions que le choc “minimum” est compensé très rapidement, et la production devient supérieure à celle du scénario de contrôle (sans catastrophe) 11 mois après le choc⁴ : l’effet de relance l’emporte alors sur la perte de capital productif. Le choc “maximum” dure lui très longtemps, et la production ne repasse pas au dessus de sa valeur sans choc : il n’y a aucun effet de relance, puisque l’économie était déjà en surchauffe. On peut remarquer également que les conséquences du choc se propagent sur plusieurs cycles, ce qui montre qu’il existe une mémoire longue des chocs, même dans un modèle aussi simple et agrégé.

8.5.2 Les pertes de production liées à une distribution d’événements extrêmes

On vient de voir que le coût d’un événement dépendait de la situation économique à l’instant où le choc arrivait. On se demande maintenant si le coût d’une distribution d’événements dépend de la dynamique d’une économie, c’est-à-dire par exemple de sa stabilité ou de l’existence de cycles endogènes.

Pour répondre à cette question, on applique la distribution d’événements extrêmes actuelle, telle que calculée dans le chapitre 7, section 7.2.2, à des économies dont la flexibilité de l’investissement varie de $\alpha_{inv} = 0$ à $\alpha_{inv} = 10$. On applique cette distribution sur l’économie à l’équilibre quand il est stable ou sur son cycle limite, quand il n’existe pas d’équilibre stable.

Les pertes de PIB, en pourcentage du PIB non-perturbé, sont reproduites en Fig. 8.9, en parallèle avec une représentation de la bifurcation selon α_{inv} . On constate que les coûts d’une distribution d’événements extrêmes dépendent du comportement de l’économie (ici en fait de α_{inv}).

Le coût des extrêmes dépend en effet d’un jeu complexe entre deux effets contradictoires de la flexibilité, qui s’ajoutent à l’impact négatif direct sur le bien-être que peuvent avoir des fluctuations de l’activité :

- Un effet positif : la capacité de l’économie à réagir face à un choc externe, qui augmente quand la flexibilité de l’investissement augmente. En effet, il est évident qu’il est bon pour une économie d’être capable de mobiliser des ressources et de décider rapidement d’investissements de reconstruction.
- Un effet négatif : si l’investissement est suffisamment flexible pour

⁴On note que la production *instantanée* devient plus importante dans le scénario avec catastrophe que dans le scénario de contrôle, mais que la production *totale* reste plus faible dans le premier cas : la catastrophe n’est pas bénéfique en termes de production.

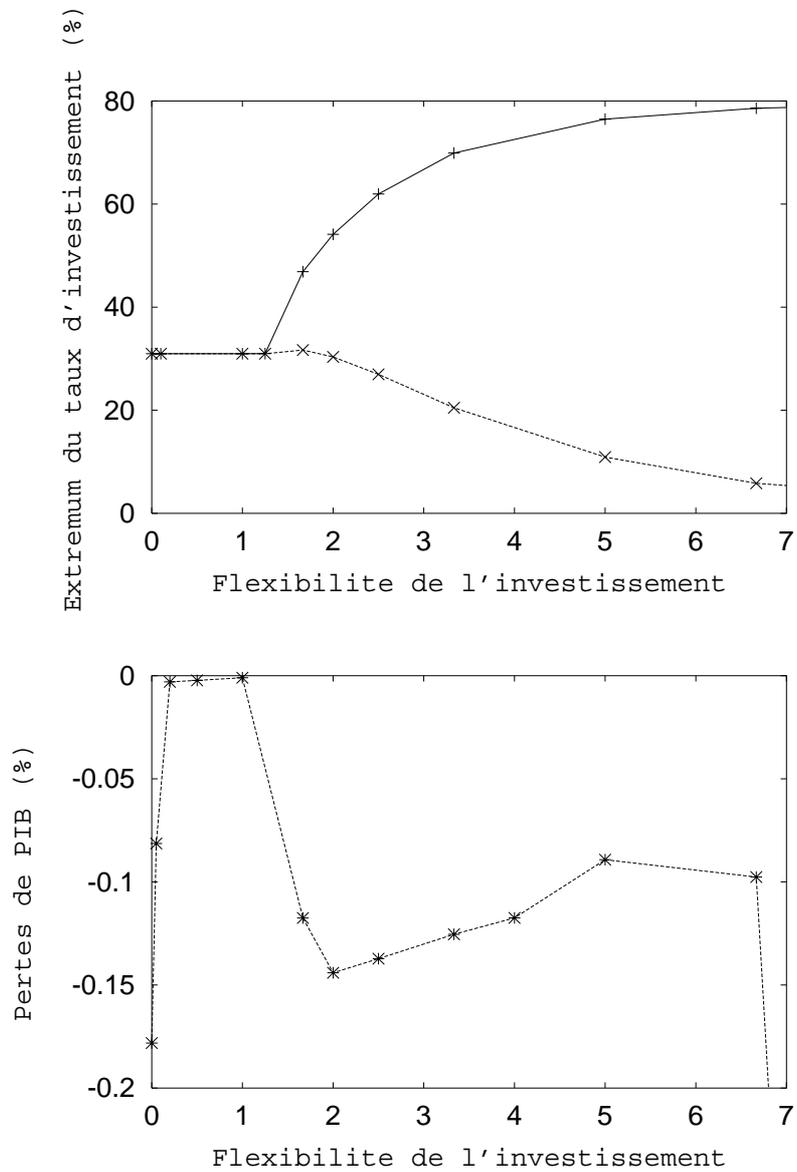


FIG. 8.9: En haut, la représentation de la bifurcation de l'économie (de la stabilité au cycle limite) par les extrema de l'oscillation du taux d'investissement ; en bas, la perte de production moyenne due à une distribution d'événements extrême, en pourcentage de PIB. On remarque une forte dépendance des pertes à la flexibilité de l'investissement.

engendrer des cycles endogènes, l'économie présente des périodes de vulnérabilité. En effet, au cours de son cycle, l'économie passe par des phases de sur-utilisation des ressources, où l'inflation est importante et où il n'y a plus de possibilité d'augmenter l'investissement ou la quantité de travail utilisée. Même si la production est alors maximale, le coût d'une catastrophe ayant lieu lors d'une de ces phases est très important, on l'a vu précédemment. Le coût est plus faible en période de crise, car il y a des ressources disponibles, mais la production est plus faible, ce qui nuit à la reconstruction. Ainsi le coût plus important lors des phases de sur-utilisation des ressources n'est pas compensé par le coût plus faible lors des phases de sous-utilisation des ressources : une économie hors-équilibre est en moyenne plus vulnérable qu'une économie à l'équilibre⁵.

La conséquence de ces deux effets contradictoires est la complexité du lien entre flexibilité et coût des extrêmes : on trouve que les coûts sont importants quand il n'y a pas de flexibilité de l'investissement ($\alpha_{inv} = 0$). Quand l'investissement répond aux signaux de profitabilité ($\alpha_{inv} > 0$), et tant que l'économie reste stable ($\alpha_{inv} < 1,4$), les coûts diminuent quand la flexibilité augmente, car cela permet à l'investissement d'augmenter pendant la phase de reconstruction, et donc de reconstituer le capital plus rapidement. D'une façon générale, on a des coûts relativement faibles pour une économie stable, car elle subit les chocs alors qu'elle est proche de son équilibre (puisque seul un choc précédent peut l'avoir éloigné de son équilibre).

Conformément à l'intuition, les coûts augmentent rapidement quand les cycles endogènes apparaissent ($\alpha_{inv} > 1,4$), car les chocs touchent alors une économie hors-équilibre, qui est plus vulnérable. Parce que les déséquilibres sont plus prononcés quand la flexibilité est plus grande – l'amplitude du cycle augmente – on trouve alors toute une gamme de valeurs de α_{inv} pour lesquelles les coûts des extrêmes augmentent avec la flexibilité.

Cependant, quand la flexibilité dépasse un seuil ($\alpha_{inv} > 2,0$), on constate un comportement opposé : parce que l'effet positif de la flexibilité l'emporte alors sur l'effet négatif, les coûts commencent à décroître avec la flexibilité, tout en restant supérieurs aux coûts observés pour des économies stables (à l'exception du cas où l'investissement est fixé).

Quand la flexibilité de l'investissement augmente encore ($\alpha_{inv} > 5,0$), l'amplitude des cycles endogènes devient plus grande et on passe d'un comportement en cycle limite, que l'on sait bien analyser, à un comportement chaotique qui est beaucoup plus délicat à interpréter⁶.

⁵Il n'est pas inutile de rappeler que lorsque l'économie suit un cycle limite, elle ne passe jamais par l'équilibre : elle "tourne" autour mais elle est toujours hors-équilibre.

⁶On peut également remarquer sur le spectre en Fig. 8.6 que pour des valeurs élevées de α_{inv} , il apparaît une variabilité de long terme dans le modèle. Les coûts peuvent donc montrer une dépendance à la dynamique de long terme, ce qui rend nécessaire de faire des

On trouve alors que les coûts augmentent très rapidement avec la flexibilité de l'investissement. On peut expliquer ce comportement par l'apparition d'un comportement de chaos déterministe : la sensibilité du modèle aux conditions initiales fait qu'un choc infinitésimal peut faire diverger les trajectoires du modèle. Ainsi les événements extrêmes peuvent engendrer des coûts significatifs, même s'ils ne détruisent qu'une petite partie du capital productif. Dans ce cas, l'essentiel des dommages vient des coûts indirects liés à la déstabilisation de l'économie, les coûts directs étant alors négligeables.

En conclusion, on trouve une très grande dépendance du coût d'une distribution d'événements extrêmes aux caractéristiques de l'économie : tant que l'économie reste stable, la flexibilité de l'investissement permet une reconstruction plus rapide et constitue donc un facteur positif. Mais dès qu'une trop grande flexibilité rend l'économie instable, les coûts augmentent très rapidement. Dans ce cas, l'effet positif de la flexibilité est d'abord dominé par l'augmentation de l'amplitude des cycles qui accentue la vulnérabilité. Pour des flexibilités plus grandes encore, l'effet positif de la flexibilité redevient positif, bien que les coûts restent supérieurs aux cas stables. Quand la flexibilité devient très grande, le modèle devient chaotique et les coûts augmentent très rapidement. Les conséquences directes des chocs deviennent alors négligeables comparées aux coûts de la déstabilisation qu'ils occasionnent.

8.6 Conclusions

Ce chapitre a proposé une modélisation de cycles économiques endogènes, tels que les définit *Lucas* [1975] : “*serially correlated movements about trend which are not caused by movements in the availability of factors of production*”⁷. Ici les cycles viennent de délais d'ajustement des prix, des salaires et des décisions d'investissement dans un modèle néoclassique sur le long-terme.

Les cycles économiques reproduits dans NEDyM sont conformes aux caractéristiques principales des cycles observés dans le monde réel : on distingue 4 phases (reprise, expansion avec inflation et plein-emploi, contraction avec déflation, dépression avec chômage) ; on note en particulier : (i) l'asymétrie du cycle [*Kontolemis*, 1997], avec une expansion plus longue que la contraction ; (ii) des déphasages corrects entre les variables ; (iii) la corrélation positive entre l'inflation et la production ; (iv) la période comprise entre 5 et 6 ans.

Le processus moteur de ces cycles est l'effet de multiplicateur-accélérateur quand la flexibilité de l'investissement dépasse une certaine valeur. L'insta-

simulations beaucoup plus longues.

⁷En français : mouvements corrélés autour de la tendance, qui ne sont pas dus à des mouvements de la disponibilité des facteurs de production.

bilité structurelle vient alors de l'interaction entre cet effet keynésien de court-terme dû à la rigidité des prix et salaire, et les contraintes sur la disponibilité du travail et sur les capacités de production : avec l'augmentation de l'investissement, la demande augmente plus rapidement que la capacité de production et le taux d'emploi atteint des valeurs très élevées, créant une inflation du prix et des salaires, augmentant à la fois le coût du travail et le coût du capital et réduisant ainsi l'investissement. L'interaction de ces processus crée un comportement oscillatoire dont l'amplitude augmente avec la flexibilité de l'investissement.

Quand la flexibilité de l'investissement augmente, l'amplitude des cycles économiques est plus importante et les contraintes financières sur l'investissement deviennent active ; l'investissement ne peut plus répondre "librement" aux signaux de profits et ce nouveau processus interagit avec les deux premiers pour engendrer une dynamique complexe et chaotique.

Il est intéressant de noter que les fluctuations de la demande ne viennent pas de la thésaurisation keynésienne, mais de variations de la quantité de monnaie impliquée dans la boucle entre épargne des ménages et redistribution de dividendes quand le taux de profit décourage l'investissement. On note également que l'asymétrie des cycles est due à l'élasticité des prix aux variations du stock de biens invendus ou de commandes non-satisfaites, qui est plus forte en période de forte croissance qu'en période de récession.

Le long du cycle, l'emploi oscille autour de sa valeur d'équilibre alors que la production oscille autour d'une valeur inférieure à sa valeur d'équilibre. Cette sous-optimalité vient des non-linéarités : l'oscillation de moyenne nulle d'une variable peut avoir des conséquences sur la valeur moyenne d'une autre variable. Ce mécanisme de *rectification non-linéaire* rend impossible d'exprimer le modèle en terme de relations entre les valeurs moyennes des variables : la variabilité de court-terme modifie le comportement de long-terme.

On a montré donc comment des modifications du modèle de Solow permettent de prendre en compte et de reproduire des cycles économiques tels qu'ils sont décrits dans la littérature économique. Ainsi, dans un système économique simple sans progrès technique ni croissance de la population, des comportements complexes peuvent s'expliquer par des facteurs endogènes plutôt que par des chocs aléatoires comme dans la théorie des cycles réels [Kydland et Prescott, 1982]. Les inerties techniques et institutionnelles du système économique, et plus précisément les temps caractéristiques qui gouvernent les processus d'adaptation dans l'économie, pourraient être les déterminants principaux de l'instabilité économique.

Ce modèle ne prétend pas reproduire les trajectoires économiques historiques, car il est trop simple et il ne prend pas en compte de nombreux déterminants (géopolitique, évolution institutionnelle...). Il ne prétend pas

non plus résoudre la controverse entre ceux qui rejettent l'existence du chaos dans les données économiques (*Baumol et Benhabib* [1989], [*Brock et al.*, 1991]) et ceux qui pensent que le chaos n'est pas détectable à cause de la brièveté des séries de données disponibles [*Jarsulic*, 1993]. On recherche ici seulement à proposer un cadre aux discussions sur les interactions entre le court-terme et le long-terme en économie. Pour cela, ce travail devra bien sûr être prolongé, pour prendre en compte des processus jusqu'ici négligés. Pour la dynamique de court et moyen termes, il sera nécessaire de raffiner la modélisation du système financier [*Boyer et al.*, 2004] et d'incorporer des effets keynésiens, tels que ceux proposés dans *Chiarella et Flaschel* [2000] or *Chiarella et al.* [2002]. Ceci pourra être fait en introduisant (i) des influences directes des quantités sur les comportements (demande de travail et investissement par exemple); (ii) un modèle d'anticipation des profits. Pour le long terme, on propose de s'inspirer des travaux de l'école de la régulation pour : (i) d'une part, étudier les conséquences des changements de l'organisation économique, par exemple entre les économies managériale et actionnariale [*Aglietta et Rebérioux*, 2004] ou entre un marché du travail plus ou moins institutionnalisé [*Boyer*, 1997]; (ii) d'autre part, prendre en compte l'interaction entre les cycles économiques et l'intégration des technologies les plus efficaces (voir p. ex. *Schumpeter* [1939] et *Aghion et Howitt* [1998]).

L'application de la version actuelle de NEDyM à l'évaluation des conséquences économiques des événements extrêmes permet toutefois dès maintenant de mettre en évidence la forte dépendance de la perte de production totale à la situation économique : un choc sur une économie déprimée, où des ressources sont disponibles et inutilisées engendre un effet de relance qui compense le coût du choc lui-même; un choc sur une économie en pleine croissance, où les ressources sont rares, a des effets négatifs renforcés car le choc vient aggraver des déséquilibres existants (inflation, pénurie de travail et de capitaux). On ne peut donc pas parler de manière absolue du coût d'un événement extrême : la situation de l'économie qui subit le choc est au moins aussi déterminante que l'intensité du choc dans le calcul de ses conséquences socio-économiques.

Ces résultats suggèrent l'existence d'un arbitrage entre la capacité d'adaptation et la stabilité : si la flexibilité de l'investissement est faible, il n'y a pas (ou peu) de cycles économiques, mais l'adaptation de l'économie à un choc exogène est lente. Si la flexibilité de l'investissement est élevée, l'économie s'adapte rapidement aux chocs exogènes mais (i) le bien-être de la population est affecté par de larges fluctuations endogènes du taux d'emploi et par une perte de production moyenne à cause des non-linéarités; (ii) au cours de ses fluctuations, l'économie traverse des phases de tension interne qui la rendent vulnérable aux chocs exogènes, qui peuvent alors engendrer des coûts importants.

On trouve donc, assez logiquement, que le coût d'une distribution d'événements

nements extrêmes frappant une économie dépend fortement des caractéristiques dynamiques de cette économie. En particulier, une économie flexible qui présente des fluctuations endogènes de l'activité est beaucoup plus vulnérable aux chocs exogènes qu'une économie plus rigide et stable. Certes, une économie flexible minimise le coût d'un choc qui la touche à l'équilibre ; mais comme elle s'écarte en permanence de cet équilibre pour traverser des phases de déséquilibre, elle est d'une manière générale beaucoup plus vulnérable. Il semble donc que l'économie la plus robuste aux chocs exogènes serait une économie très flexible, que des politiques de stabilisation maintiendraient en permanence au voisinage de son équilibre.

On voit donc qu'il serait trompeur de considérer les coûts des extrêmes comme séparables du fonctionnement du reste de l'économie, tout le reste restant égal par ailleurs. Évaluer les dommages des événements extrêmes demande une analyse des fortes interactions entre les chocs et la dynamique interne du système économique. Et cette conclusion s'étend au problème du changement climatique dans son ensemble : les dommages engendrés par le changement climatique dépendront bien sûr de l'intensité et de la rapidité de ce changement, mais tout autant de la situation économique à l'endroit et au moment où les impacts se feront sentir. Une économie qui a une forte variabilité endogène ne répondra pas de la même façon à des chocs environnementaux qu'une économie très stable. Évaluer les dommages sous la forme d'une unique perte de PIB semble donc peu pertinent si les hypothèses sur l'économie sous-jacente ne sont pas clairement explicitées.

Références

- Aghion, P., et P. Howitt, *Endogenous Growth Theory*, 694 pp. pp., MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1998.
- Aglietta, M., et A. Rebérioux, *Dérives du Capitalisme Financier*, Bibliothèque Albin Michel Economie, 2004.
- Barnett, W., et Y. He, *Bifurcations in macroeconomic models*, Innovations in Macrodynamics, S. Dowrick, R. Pitchford, S. Turnovsky (Eds.), Cambridge University Press, 2002.
- Baumol, W., et J. Benhabib, Chaos : Significance, mechanism, and economic applications, *Journal of Economic Perspectives*, 3(1), 77–105, 1989.
- Benhabib, J., et K. Nishimura, The Hopf-bifurcation and the existence of closed orbits in multi-sectoral models of optimal economic growth, *Journal of Economic Theory*, 21, 421–444, 1979.
- Boyer, R., Why does employment differ in the course of time and across nation? An institutional answer in the light of the Régulation theory, *Metroeconomica*, 48(1), 1–35, 1997.
- Boyer, R., et Y. Saillard, *La théorie de la régulation. L'état des savoirs*, Coll. Recherches, La Découverte, Paris, 2002.
- Boyer, R., M. Dehove, et D. Plihon, *Les crises financières*, Rappoport du Conseil d'Analyse Economique, n° 50, La documentation française, Paris, 2004.
- Brock, W., D. Hsieh, et B. Lebaron, *Nonlinear Dynamics, Chaos and Instability*, MIT Press, Cambridge, 1991.
- Chiarella, C., et Flaschel, *The Dynamics of Keynesian Monetary Growth*, Cambridge University Press, 2000.
- Chiarella, C., P. Flaschel, G. Gong, et W. Semmler, Nonlinear Phillips curves, complex dynamics and monetary policy in a keynesian macro model, *School of Finance and Economics, University of Technology, Sydney, Working Paper number 120*, 2002.
- Day, R., *Cautious optimizing*, in J. Roumasset et al. (Eds.), Risk Uncertainty and Agricultural Development, New-York, Agricultural Development Council, ch. 7, 1979.
- Day, R., et W. Shafer, Keynesian chaos, *Journal of Macroeconomics*, 7(3), 277–295, 1985.
- Eurostat, *Economic portrait of the European Union 2001*, Panorama of the European Union, European Commission, 2002.
- Gelb, A., *Applied Optimal Estimation*, MIT Press, Cambridge, MA, 374 pp., 1974.

- Ghil, M., et S. Childress, *Topics in Geophysical Fluid Dynamics : Atmospheric Dynamics, Dynamo Theory and Climate Dynamics*, Springer-Verlag, New York/Berlin/London/Paris/ Tokyo, 485 pp., 1987.
- Ghil, M., et P. Malanotte-Rizzoli, Data assimilation in meteorology and oceanography, *Adv. Geophys.*, 33, 141–266, 1991.
- Goodwin, R., The non-linear accelerator and the persistence of business cycles, *Econometrica*, 19, 1–17, 1951.
- Goodwin, R., *A growth cycle*, In C. Feinstein (Ed.), *Socialism, Capitalism and Economic Growth*, Cambridge University Press, Cambridge, 1967.
- Guckenheimer, J., et P. Holmes, *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcations of Vector Fields*, 3rd ed., Springer-Verlag, New York, 1997.
- Harrod, R., An essay on dynamic economic theory, *Economic Journal*, 49, 1433, 1939.
- Jarsulic, M., A nonlinear model of the pure growth cycle, *Journal of Economic Behavior and Organization*, 22(2), 133–151, 1993.
- Jazwinski, A., *Stochastic Processes and Filtering Theory*, Academic Press, New-York, 376 pp., 1970.
- Kalecki, M., A theory of the business cycle, *Review of Economic Studies*, 4, 77–97, 1937.
- Kendrick, D., Stochastic control for economic models : past, present and the paths ahead, *J. Econ. Dyn. & Control*, 29, 3–30, 2005.
- King, R., et M. Watson, Money, prices, interest rates and the business cycle, *The Review of Economics and Statistics*, 78(1), 35–53, 1996.
- Kontolemis, Z., Does growth vary over the business cycle ? Some evidence from the G7 countries, *Economica*, 64(255), 441–460, 1997.
- Kydland, F., et E. Prescott, Time to build and aggregate fluctuations, *Econometrica*, 50(6), 1345–1370, 1982.
- Lordon, F., *Formaliser la dynamique et les crises régulationnistes*, pp. 264–272, dans *Boyer et Saillard [2002]*, 2002.
- Lucas, R., Adjustment costs and theory of supply, *Journal of Political Economy*, 75, 321–334, 1967.
- Lucas, R., An equilibrium model of the business cycle, *The Journal of Political Economy*, 83(6), 1113–1144, 1975.
- May, R., *Stability and Complexity in Model Ecosystems*, Princeton Landmarks in Biology, Princeton University Press, Princeton, 1974.
- Pigou, A., Economic progress in a stable environment, *Economica*, 14(55), 180–188, 1947.

- Rose, H., On the nonlinear theory of employment cycle, *Review of Economic Studies*, 34, 153–173, 1967.
- Samuelson, P., A synthesis of the principle of acceleration and the multiplier, *Journal of Political Economy*, 47, 786–797, 1939.
- Schumpeter, J., *Business Cycles*, two volumes, McGraw-Hill, 1939.
- Skott, P., Effective demand, class struggle and cyclical growth, *International Economic Review*, 30(1), 231–247, 1989.
- Süssmuth, B., National and Supranational Business Cycles (1960-2000) : A Multivariate Description of Central G7 and EURO15 NIPA Aggregates, *CESifo Working Paper Series No. 658*, 2002.
- Talagrand, O., et P. Courtier, Variational assimilation of meteorological observations with the adjoint vorticity equation. part. 1 & 2, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 478, 1311–1347, 1987.
- Wang, P.-F., et Y. Wen, Endogenous money of sticky prices? – comment on monetary non-neutrality and inflation dynamics, *J. Econ. Dyn. & Control*, 2004.
- Yun, T., Nominal price rigidity, money supply endogeneity, and business cycle, *Journal of Monetary Economics*, 37, 345–370, 1996.
- Zarnovitz, V., Recent work on business cycle in historical perspective : A review of theories and evidence, *Journal of Economic Literature*, 23(2), 523–580, 1985.

Conclusion et perspectives

Les principaux résultats de cette thèse permettent d'éclairer la fragilité des modèles utilisés dans l'évaluation des dommages économiques du changement climatique. On a vu en particulier que les modèles économiques de long terme (par exemple *Solow* [1956] ou *Nordhaus* [1994]) supposent que l'on peut négliger les processus de plus court terme pour modéliser le long terme et que l'on peut considérer, pour ces problèmes, que l'économie est toujours à l'équilibre. De nombreux auteurs (dont *Solow* [1988] et *Arrow* [1989]) ont cependant fait remarquer que l'existence d'un tel équilibre était peu probable, et que les modèles de croissance étaient incapables de faire le lien entre les fluctuations de court terme – les cycles économiques par exemple – et les tendances de long terme.

De plus, nous avons montré que, principalement à cause de la variabilité naturelle du climat, une grande partie des impacts du changement climatique ne passera probablement pas par une décroissance continue et régulière de la productivité, qui pourrait dès lors s'intégrer facilement dans le cadre des théories de la croissance. Ces impacts se feront plus probablement sentir par des franchissements de seuils et des événements extrêmes. Pour pouvoir représenter ces effets dans un modèle de croissance, il faudrait pouvoir les moyenniser dans l'espace et dans le temps. Mais a-t-on le droit de moyenniser ces effets de court terme sans prendre en compte leur distribution temporelle ? Ou bien les interactions entre les petites et les grandes échelles rendent-elles cette stratégie inadéquate ? D'après notre diagnostic initial, cette question n'a pas été posée de façon suffisamment rigoureuse par les évaluations de dommages publiées jusqu'ici.

Il nous semble que les résultats de cette thèse ont largement confirmé notre diagnostic en montrant sur plusieurs points distincts que le jeu des échelles temporelles était essentiel mais mal compris et mal pris en compte par les études existantes.

Ainsi, on a commencé par une analyse d'un processus climatique, les modèles climatiques étant par construction capables de reproduire une large gamme d'échelles temporelles. On s'est intéressé à la réponse du cycle hydrologique au forçage anthropique et à la caractérisation de la rétroaction vapeur d'eau. On a trouvé que l'interaction de processus simples et rapides mène à une dynamique complexe. En particulier, la rétroaction vapeur d'eau, qui augmente de plus de 50% le réchauffement dû au CO₂, a besoin de près de 10 ans pour être complètement active et, pendant plusieurs années, elle est négative à cause de l'effet des variations de court terme des précipitations. Ceci nous a permis de démontrer qu'il est essentiel de s'intéresser aux processus rapides pour comprendre les réponses de long terme, et de proposer

une méthodologie d'analyse dynamique des rétroactions. Cette méthodologie a ensuite été utilisée pour étudier les temps caractéristiques de la rétroaction économie-climat, dans un modèle intégré dont le cœur est un modèle de croissance équilibrée de long terme, à la Solow.

En utilisant ce modèle de croissance, qui néglige les phénomènes de court terme, on a mis en évidence la longueur des temps caractéristiques de cette rétroaction : la rétroaction économie-climat laisse apparaître deux temps caractéristiques, un autour de 30 ans et un autour de 80 ans. On a trouvé qu'une action sur les émissions n'a aucun impact en retour sur l'économie pendant 20 ans, et qu'elle exprime principalement ses effets 80 ans après avoir été engagée. Même une actualisation à des taux de 1 à 3 % ne permet pas de négliger les dommages sur le très long terme, au-delà du siècle. Il est donc nécessaire de les évaluer pour conduire des analyses coût-bénéfice.

La caractérisation dynamique de la rétroaction économie-climat a aussi permis de justifier la méthode de l'IPCC qui consiste à négliger la rétroaction des impacts du changement climatique sur les scénarios d'émissions jusqu'en 2100. On a trouvé que cet horizon était trop rapproché pour permettre à la rétroaction de modifier de manière significative les émissions – d'autant plus que l'essentiel des impacts est attendu après 2050. D'autres limitations des évaluations de dommages semblent bien plus prioritaires. La méthode de l'IPCC est donc justifiée par la simplification que permet le découpage du problème en sous-problèmes indépendants.

Cette première analyse des interactions entre le climat et l'économie a également mis en évidence l'insuffisance des modèles de croissance de long terme pour représenter les dommages du changement climatique.

Pour illustrer ces lacunes, on a regardé d'abord comment les stratégies d'adaptation, qui se construisent sur le court et moyen terme dans un contexte très incertain, sont responsables de verrouillages sur le long terme, qui influencent la croissance et le bien-être. Les bâtiments, les infrastructures et les systèmes électriques ont des durées de vie importantes et représentent une part importante du capital installé. Eviter une mauvaise adaptation de ces secteurs aux conditions climatiques, et donc une mauvaise allocation du capital, demande donc une anticipation des investissements qui reste hors de portée à cause de l'incertitude sur le réchauffement futur. Nous en concluons que les dommages du changement climatique sont autant liés à l'incertitude sur le réchauffement qu'au réchauffement en lui-même et que, à l'instar de nos décisions de réductions d'émissions, les décisions concernant l'adaptation dans les prochaines décennies vont nous engager sur le long terme.

On s'est intéressé ensuite aux couplages entre la dynamique économique de court terme et les tendances de long terme en se concentrant sur les

conséquences des événements extrêmes.

Deux interprétations des fluctuations économiques existent dans la littérature : une approche à la *Kydland et Prescott* [1982] pour qui les fluctuations économiques viennent de chocs exogènes et une approche à la *Goodwin* [1951] pour qui elles viennent d'instabilités endogènes au système économique. On a donc proposé un cadre de modélisation capable de reproduire ces deux interprétations.

Dans une situation à la *Kydland et Prescott* [1982] où l'économie possède un équilibre stable, on a montré que la prise en compte de processus de court terme, comme l'impact des catastrophes sur le stock de capital et la limitation des moyens qu'une économie est capable de mobiliser pour la reconstruction, augmente d'un facteur 2 le coût macroéconomique total d'une distribution réaliste d'événements extrêmes climatiques. La forte dépendance des coûts totaux à la capacité de reconstruction illustre en outre que l'évaluation des dommages économiques d'un changement climatique ne dépend pas seulement d'hypothèses sur le climat futur, mais aussi d'hypothèses sur l'organisation future du système économique.

On montre également que ces processus de court terme peuvent mener à des bifurcations des trajectoires de long terme quand la fréquence ou l'intensité des événements extrêmes excèdent les capacités de reconstruction des économies. Or, les caractéristiques des extrêmes seront fortement modifiées au cours de ce siècle, que ce soit par le changement climatique ou par une probable redistribution des implantations humaines.

On a ensuite proposé une modélisation des cycles économiques, dans laquelle les fluctuations viennent de l'instabilité intrinsèque de la relation entre l'investissement, la demande et les profits, contrainte par la disponibilité du travail et par l'inertie de la production. On a obtenu par là un modèle de cycle qui possède des caractéristiques proches des observations. On distingue ainsi quatre phases (reprise, expansion avec inflation, contraction avec déflation, dépression avec chômage). Malgré la trop forte amplitude des cycles en termes de prix, on note des caractéristiques réalistes : (i) l'asymétrie du cycle, avec une expansion plus longue que la contraction ; (ii) des déphasages corrects entre les variables ; (iii) la corrélation positive entre l'inflation et la production ; (iv) la période du cycle comprise entre 5 et 6 ans.

Dans ce cadre, le coût d'un événement extrême devient fortement dépendant de la phase du cycle à laquelle l'événement a lieu : ce coût est quasiment nul s'il a lieu au minimum du cycle, grâce à l'effet de relance, alors que les pertes sont fortement amplifiées s'il a lieu en période de forte croissance, où il y a déjà pénurie de ressources. Ainsi les pertes liées aux événements extrêmes sont très dépendantes de la dynamique de l'économie que l'on considère : une économie flexible qui présente des fluctuations endogènes de l'activité est beaucoup plus vulnérable aux chocs exogènes qu'une économie plus rigide

et stable. En effet, même si la flexibilité permet de minimiser le coût d'un choc touchant une économie à l'équilibre, elle provoque également des fluctuations qui écartent en permanence l'économie de son équilibre, ce qui lui fait traverser des phases de déséquilibre où elle est très vulnérable. Il semble donc que l'économie la plus robuste à de tels chocs serait une économie très flexible, que des politiques de stabilisation maintiendraient en permanence au voisinage de son équilibre. Ces résultats montrent qu'il n'est pas possible de séparer l'évaluation des dommages de la question de la dynamique propre de l'économie, car ces deux problèmes sont intrinsèquement liés.

Ces différents exercices de modélisation ont permis d'aboutir à deux conclusions. D'abord, nous insistons sur l'importance des processus de court terme dans l'évaluation des dommages du changement climatique : le problème du changement climatique diffère fondamentalement de l'étude classique de la croissance, dans laquelle les paramètres évoluent lentement et de façon continue et pour laquelle les modèles de croissance à *la Solow* ont été développés. Au contraire, une grande partie des dommages du changement climatique risque de transiter par des effets de choc. En pratique, même en supposant que les déséquilibres économiques ne sont que transitoires et que l'économie est stable, cela ne veut pas dire que les dommages ne passeront pas par ces processus hors-équilibre transitoires. On a montré de plus que ces transitoires peuvent durer sur de longues périodes (il est question d'infrastructures, d'énergie, de bâtiments), et que leurs effets sur le bien-être peuvent être importants.

Ensuite, nous affirmons l'impossibilité de séparer l'évaluation des dommages et la représentation de la croissance et de la dynamique économique. Cela rend nécessaire un scénario de référence qui tienne compte des stratégies d'adaptation suivies par les agents, des éventuelles contraintes sur les capacités financières et techniques, et de la dynamique propre du système économique et social. Les dommages du changement climatique ne peuvent être seulement représentés comme une perte appliquée à une économie dont la dynamique reste inchangée. Au contraire, les pertes de bien-être pourraient bien provenir d'interactions complexes entre la dynamique économique et des déséquilibres transitoires issus des chocs climatiques. Aussi, cette thèse s'est abstenue de proposer un chiffrage du niveau des dommages.

Nous concluons en insistant sur la distinction qui a déjà été mentionnée au premier chapitre, entre une incertitude scientifique, inhérente à notre compréhension insuffisante du changement climatique, des impacts et de l'économie, et une incertitude beaucoup plus fondamentale, qui concerne

l'avenir que nous allons construire et l'état du monde sur lequel le changement climatique s'exercera.

Cette thèse a mis en lumière certaines lacunes des évaluations disponibles, qui rendent leurs résultats insuffisamment fiables pour être utilisés dans la décision politique. En particulier, l'importance des interactions d'échelles et la non-séparabilité entre la dynamique économique et les chocs provenant des impacts du changement climatique, suggèrent un ambitieux programme de recherche dont la réalisation devrait permettre de mieux juger de la capacité de nos économies à faire face aux nombreux défis que le changement du climat nous imposera de relever.

Bibliographie

- Adnot, J., Energy efficiency and certification of central air conditioners, *Etude pour la D.G. Transport-Energie (DGTREN) de l'U.E.*, 2002.
- Aghion, P., et P. Howitt, *Endogenous Growth Theory*, 694 pp. pp., MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1998.
- Aglietta, M., et A. Reberieux, *Dérives du Capitalisme Financier*, Bibliothèque Albin Michel Economie, 2004.
- Al-Farouq, et Huq, *Adaptation to Climate Change in the Coastal Resources Sector of Bangladesh : Some Issues and Problems*, pp. 335–342, Springer-Verlag, New-York, NY, USA, 1996.
- Albala-Bertrand, J., The political economy of large natural disasters with special reference to developing countries., *Oxford : Clarendon Press*, 1993.
- Alcamo, J., *IMAGE 2.0, Integrated Modeling of Global Climate Change.*, J. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1994.
- Alcamo, J., R. Leemans, et G. Kreileman, *Global Change Scenarios of the 21st Century. Results from the Image 2.1 Model.*, Pergamon & Elseviers Science, London, United Kingdom, 1998.
- Ambrosi, P., *Amplitude et calendrier des politiques de réduction des émissions face aux risques climatiques : leçons des modèles intégrés*, PhD thesis, EHESS, 2004.
- Ambrosi, P., et J.-C. Hourcade, *Evaluer les dommages : une tâche impossible ?*, pp. 117–144, Rapport du Conseil d'analyse économique, n° 39, Paris, La Documentation Française, 263 p., 2003.
- Ambrosi, P., J.-C. Hourcade, S. Hallegatte, P. Lecocq, P. Dumas, et M. Ha Duong, Optimal control models and elicitation of attitudes towards climate damages, *Environmental Modeling and Assessment*, 8(3), 133–147, 2003.
- Arrow, K., Workshop on the economy as an evolving complex system : Summary, *In P. Anderson et al. (Eds.), The Economy as an Evolving Complex System*, Addison-Wesley, New-York, pp. 275–282, 1989.
- Arrow, K., Intergenerational equity and the rate of discount in long-term social investment, *IEA World Congress, December 1995*, 1995.
- Azar, C., et S. Schneider, Are the costs of (non-)stabilising the atmosphere prohibitive? A response to Gerlagh and Papyrakis, *Ecological Economics*, 46(3), 329–332, 2003.

- Barnett, W., et Y. He, *Bifurcations in macroeconomic models*, Innovations in Macrodynamics, S. Dowrick, R. Pitchford, S. Turnovsky (Eds.), Cambridge University Press, 2002.
- Bateman, I., et K. Willis, *Valuing Environmental Preferences : Theory and Practice of the Contingent Valuation Method*, Oxford University Press, Oxford, United Kingdom, 1995.
- Bates, On the ventilation feedback, *Working Paper*, 2003.
- Baumol, W., et J. Benhabib, Chaos : Significance, mechanism, and economic applications, *Journal of Economic Perspectives*, 3(1), 77–105, 1989.
- Benhabib, J., et K. Nishimura, The Hopf-bifurcation and the existence of closed orbits in multi-sectoral models of optimal economic growth, *Journal of Economic Theory*, 21, 421–444, 1979.
- Beniston, M., The 2003 heat wave in europe : A shape of things to come? an analysis based on swiss climatological data and model simulations, *Geophysical Research Letters*, 31(2), L02,202, doi :10.1029/2003GL018,857, 2004.
- Benson, C., et E. Clay, Understanding the economic and financial impact of natural disasters, *The International Bank for Reconstruction and Development. The World Bank, Washington D.C.*, 2004.
- Berle, A., et G. Means, *The Modern Corporation and Private Property*, New-York, Harcourt, Brace and World, 1932.
- Berritella, M., A. Bigano, R. Roson, et R. Tol, A general equilibrium analysis of climate change impacts on tourism, *Working Paper, FNU-49, Hamburg University and Centre for Marine and Atmospheric Science, Hamburg*, 2004.
- Besancenot, J., K. Laaidi, et M. Laaidi, Mortalité en france selon le contexte thermique : réalité présente et scénarios pour le xxième siècle, *Actes du colloque Programme 'Gestion et Impacts du Changement Climatique' (GICC) : Séminaire de restitution, MATE et MEDIAS FRANCE (org.), Toulouse (France), 25-26 avril 2002*, 2002.
- BNP-Paribas, Btp 2000 : Encore de l'or pour le béton, *Conjoncture, Etudes économiques de BNP-Paribas*, 2000.
- Bode, H., *Network Analysis and Feedback Amplifier Design*, Van Nostrand, New York, 1945.
- Bosello, F., M. Lazzarin, A. Bigano, R. Roson, et R. Tol, Economy-wide estimates of the implications of climate change : Sea level rise, *Working Paper, FNU-38, Hamburg University and Centre for Marine and Atmospheric Science, Hamburg*, 2004a.
- Bosello, F., R. Roson, et R. Tol, Economy-wide estimates of the implications of climate change : Human health, *Working Paper, FNU-57, Hamburg University and Centre for Marine and Atmospheric Science, Hamburg*, 2004b.

- Boyer, R., Why does employment differ in the course of time and across nation? An institutional answer in the light of the Régulation theory, *Metroeconomica*, 48(1), 1-35, 1997.
- Boyer, R., Is a finance-led growth regime a viable alternative to Fordism? A preliminary analysis, *Economy and Society*, 29(1), 111-145, 2000.
- Boyer, R., *La théorie de la régulation. Les fondamentaux*, Coll. Repères, La Découverte Paris, 2004.
- Boyer, R., et Y. Saillard, *La théorie de la régulation. L'état des savoirs*, Coll. Recherches, La Découverte, Paris, 2002.
- Boyer, R., M. Dehove, et D. Plihon, *Les crises financières*, Rappoort du Conseil d'Analyse Economique, n° 50, La documentation française, Paris, 2004.
- Brock, W., D. Hsieh, et B. Lebaron, *Nonlinear Dynamics, Chaos and Instability*, MIT Press, Cambridge, 1991.
- Buddemeier, J. K. e. R. A., R.W., *Coral reefs & Global climate change : Potential Contributions of Climate Change to Stresses on Coral Reef Ecosystems*, Pew Center on Global Climate Change, Washington D.C., 2004.
- Cherkaoui, M., J. Dufresne, R. Fournier, J. Grandpeix, et A. Lahellec, Monte-Carlo simulation of radiation in gases with a narrow-band model and a net-exchange formulation, *J. Heat Tranfert*, 118, 401-407, 1996.
- Chiarella, C., et Flaschel, *The Dynamics of Keynesian Monetary Growth*, Cambridge University Press, 2000.
- Chiarella, C., P. Flaschel, G. Gong, et W. Semmler, Nonlinear Phillips curves, complex dynamics and monetary policy in a keynesian macro model, *School of Finance and Economics, University of Technology, Sydney, Working Paper number 120*, 2002.
- Choi, O., et A. Fisher, The impacts of socioeconomic development and climate change on severe weather catastrophe losses : mid-atlantic region (mar) and the u.s., *Climatic Change*, 58, 149-170, 2003.
- Christensen, J., et O. Christensen, Severe summer flooding in europe, *Nature*, 421, 805-806, 2003.
- Chuine, I., P. Yiou, N. Viovy, B. Seguin, V. Daux, et E. Le Roy Ladurie, Grape ripening as a past climate indicator, *Nature*, 432, 2004.
- Cline, W., *The Economics of Global Warming*, Institute for International Economics, Washington D.C., 1992.
- Coakley, J., Feedbacks in vertical-column energy balance models, *J. Atmos. Sci.*, 34, 465-470, 1977.
- Cobb, C., et P. Douglas, A theory of production, *The American Economic Review*, 18(1), 139-165, 1928.

- Colman, R., S. Power, et B. McAvaney, Non-linear climate feedback analysis in an atmospheric general circulation model, *Climate Dynamics*, 13(10), 717–731, 1997.
- Copeland, T., et J. Weston, *Financial Theory and Corporate Policy*, Third Edition, Pearson Education International, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA, 2003.
- Costanza, R., et al., The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature*, 387, 253–260, 1997.
- Cox, P. D., R. Betts, C. Jones, S. Spall, et I. Totterdell, Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model, *Nature*, 408, 184–187, 2000.
- Davis, D., A. Krupnick, et G. Thurston, The ancillary health benefits and costs of GHG mitigation : Scope, scale, and credibility, *Actes du colloque Ancillary benefits and costs of greenhouse gases mitigation*, OECD (org.), Washington D.C., p. 58, 2000.
- Day, R., *Cautious optimizing*, in J. Roumasset et al. (Eds.), Risk Uncertainty and Agricultural Development, New-York, Agricultural Development Council, ch. 7, 1979.
- Day, R., Irregular growth cycles, *American Economic Review*, 72, 406–414, 1982.
- Day, R., et W. Shafer, Keynesian chaos, *Journal of Macroeconomics*, 7(3), 277–295, 1985.
- Deneux, M., *L'évaluation de l'ampleur des changements climatiques, de leurs causes et de leur impact prévisible sur la géographie de la France à l'horizon 2025, 2050 et 2100*, Rapport n°3603 (Assemblée Nationale), n°224 (Sénat), Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (Assemblée Nationale, Sénat), 2002.
- Déqué, M., Temperature et précipitations extrêmes sur la France dans un scénario de changement climatique (Temperature and precipitation extremes over France in a climate change scenario), available on <http://medias.dsi.cnrs.fr/imfrex/web/documents/extremes.htm> (IMFREX Project), 2004a.
- Déqué, M., Canicule et simulation numérique (Heat wave and numerical simulation), available on http://medias.dsi.cnrs.fr/imfrex/web/documents/downloads/md_canicule.pdf (IMFREX Project), 2004b.
- Dorland, C., R. Tol, et J. Palutikof, Vulnerability of the Netherlands and northwest Europe to storm damage under climate change, *Climatic Change*, 43, 513–535, 1999.
- Doutriaux-Boucher, M., et J. Quaas, Evaluation of cloud thermodynamics phase parametrizations in the LMDz GCM using polder satellite data, *Geophysical Research Letters*, 31, 6126–6130, 2004.

- Douville, H., F. Chauvin, S. Planton, D. Royer, J.-F. and Salas-Melia, et S. Tyteca, Sensitivity of the hydrological cycle to increasing amounts of greenhouse gases and aerosols, *Climate Dynamics*, 20(1), 45–68, 2002.
- Easterling, D., G. Meehl, C. Parmesan, S. Changnon, T. Karl, et L. Mearns, Climate extremes : observations, modeling and impacts, *Science*, 298, 2068–2074, 2000.
- Emanuel, K., A scheme for representing cumulus convection in large scale models, *J. Atmos. Sci.*, 48, 2313–2335, 1991.
- Emanuel, K., A cumulus representation based on the episodic mixing model : the importance of mixing and microphysics in predicting humidity., *In : The representation of Cumulus Convection in Numerical Models ; A.M.S. Meteorological Monographs*, 24(46), 185–192, 1993.
- Emanuel, K., et M. Zivkovic-Rothman, Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models, *J. Atmos. Sci.*, 56, 1766–1782, 1999.
- Eurostat, *Economic portrait of the European Union 2001*, Panorama of the European Union, European Commission, 2002.
- Fankhauser, S., *Valuing climate change : the economics of greenhouse*, Earthscan, London (UK), 1995.
- Fankhauser, S., et R. Tol, On climate change and economic growth, *Resource and Energy Economics*, 27, 1–17, 2005.
- Fankhauser, S., J. Smith, et R. Tol, Weathering climate change. some simple rules to guide adaptation investments, *Ecological Economics*, 30(1), 67–78, 1999.
- Fischer, G., S. Mahendra, et H. Van Velthuizen, *Climate change and Agricultural vulnerability*, IIASA, Luxembourg (Austria), 160 pp., 2002.
- Friedlingstein, P., J.-L. Dufresne, P. Cox, et P. Rayner, How positive is the feedback between climate change and the carbon cycle?, *Tellus*, 55B, 692–700, 2003.
- Frisch, R., *Propagation Problems and Impulse Problems in Dynamic Economics*, Economic Essay in honor of Gustav Cassel, London : George Allen and Unwin, 1933.
- Gale, D., Pure exchange equilibrium of dynamic economic models, *Journal of Economic Theory*, 6, 12–36, 1973.
- Ganichot, B., Évolution de la date des vendanges dans les côtes-du-rhône méridionales, *C.R. des VIes Rencontres rhodaniennes*, Institut Rhodanien, Orange, pp. 38–41, 2002.
- Gelb, A., *Applied Optimal Estimation*, MIT Press, Cambridge, MA, 374 pp., 1974.
- Gerlagh, R., et E. Papyrakis, Are the costs of (non-)stabilising the atmosphere prohibitive? A comment, *Ecological Economics*, 46(3), 325–327, 2003.
- Ghil, M., et S. Childress, *Topics in Geophysical Fluid Dynamics : Atmospheric Dynamics, Dynamo Theory and Climate Dynamics*, Springer-Verlag, New York/Berlin/London/Paris/ Tokyo, 485 pp., 1987.

- Ghil, M., et P. Malanotte-Rizzoli, Data assimilation in meteorology and oceanography, *Adv. Geophys.*, 33, 141–266, 1991.
- Gibelin, A., et M. Déqué, Anthropogenic climate change over the mediterranean region simulated by a global variable resolution model, *Climate Dynamics*, 20, 327–339, 2003.
- Gilbert, R., et A. Kreimer, Learning from the world bank's experience of natural disaster related assistance., *Disaster Management Facility Working Paper Series 2. Urban Development Division, World Bank, Washington, D.C.*, 1999.
- Goodess, C., C. Hanson, M. Hulme, et T. Osborn, Representing climate and extreme weather events in integrated assessment models : a review of existing methods and options for development, *Integrated Assessment*, 4, 145–171, 2003.
- Goodman, J., et J. Marshall, Using neutral singular vectors to study low-frequency atmospheric variability (in press), *J. Atmos. Sci.*, 2003.
- Goodwin, R., The non-linear accelerator and the persistence of business cycles, *Econometrica*, 19, 1–17, 1951.
- Goodwin, R., *A growth cycle*, In C. Feinstein (Ed.), *Socialism, Capitalism and Economic Growth*, Cambridge University Press, Cambridge, 1967.
- Grandmont, J.-M., On endogenous competitive business cycles, *Econometrica*, 5, 995–1045, 1985.
- Green, J., Division of radiative streams into internal transfer and cooling to space, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 93, 371–372, 1967.
- Guckenheimer, J., et P. Holmes, *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcations of Vector Fields*, 3rd ed., Springer-Verlag, New York, 1997.
- Hall, A., et S. Manabe, The role of water vapor feedback in unperturbed climate variability and global warming, *Journal of Climate*, 12, 2327–2346, 1999.
- Hall, A., et S. Manabe, Effect of water vapor feedback on internal and anthropogenic variations of the global hydrologic cycle., *Journal of Geophysical Research*, 105, 6935–6944, 2000a.
- Hall, A., et S. Manabe, Suppression of ENSO in a coupled model without water vapor feedback, *Climate Dynamics*, 16(5), 393–403, 2000b.
- Hanley, N., et C. Spash, *Cost-Benefit Analysis and the Environment*, Edward Elgar, Aldershot, The Netherlands, 385 pp., 1993.
- Hanley, N., J. Shogren, et W. B., *Environmental Economics in Theory and Practice*, Oxford University Press, Oxford, United Kingdom, 464 pp., 1997.
- Hansen, J., D. Lacis, D. Rind, G. Russell, P. Stone, I. Fung, R. Ruedy, et J. Lerner, Climate Sensitivity : Analysis of Feedback Mechanisms, dans *Climate Processes and Climate Sensitivity*, vol. 5, édité par J. Hansen et T. Takahashi, pp. 130–162, Geophysical monograph 29, AGU, 1984.

- Hansen, J., M. Sato, et R. Ruedy, Radiative forcing and climate response, *Journal of Geophysical Research*, 102(D6), 6831–6864, 1997.
- Harrod, R., An essay on dynamic economic theory, *Economic Journal*, 49, 1433, 1939.
- Hartmann, J. M., R. Levi Di Leon, et J. Taine, Line-by-Line and Narrow-Band Statistical Model Calculations for H_2O , *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 32(2), 119–127, 1984.
- Hasselmann, K., R. Hasselmann, R. Giering, V. Ocana, et H. Von Storch, Sensitivity study of optimal CO_2 emission paths using a simplified structural integrated assessment model (siam), *Climatic Change*, 37, 345–386, 1997.
- Haurie, A., Turnpikes in multi-discount rate environments and gcc policy evaluation, *NCCR Working Paper 4-10*, 2002.
- Haurie, A., Integrated assessment modeling for global climate change : An infinite horizon optimization viewpoint, *Environmental Modeling and Assessment*, 8, 117–132, 2003.
- Haurie, A., A two-timescale stochastic game framework for climate change policy assessment, *Working Paper*, 2005.
- Haurie, A., et F. Moresino, A stochastic control model of economic growth with environmental disaster prevention, *Working Paper*, 2004.
- Hicks, J., The cycle in outline, *A Contribution to the Theory of the Trade Cycle*, Oxford, Oxford University Press, Ch. 8, pp. 95–107, 1950.
- Hirschman, A., *The strategy of Economic Development*, Yale University Press., 1958.
- Hourcade, J.-C., et T. Chapuis, No regret potential and technical innovation : a viability approach to integrated assessment of climate policies, *Energy Policy*, 23(4), 433–445, 1995.
- Hu, Y., et K. Tung, Interannual and Decadal variations of planetary wave activity, stratospheric cooling, and northern hemisphere annular mode, *Journal of Climate*, 15, 1659–1673, 2002.
- IFRCRCS, World disaster report 2002, focusing on reducing risk, *International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies*, 2002.
- IPCC, *Special Report on Emissions Scenarios* [Nakicenovic, N. and Swart, R. (Eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New-York, NY, USA, 2000.
- IPCC, *Climate Change 2001 : The Scientific Basis* [J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. Van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C.A. Johnson], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New-York, NY, USA, 2001a.

- IPCC, *Climate Change 2001 : Impacts, Adaptation and Vulnerability* [McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D., White, K.S. (Eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New-York, NY, USA, 2001b.
- Jarsulic, M., A nonlinear model of the pure growth cycle, *Journal of Economic Behavior and Organization*, 22(2), 133–151, 1993.
- Jazwinski, A., *Stochastic Processes and Filtering Theory*, Academic Press, New-York, 376 pp., 1970.
- Jensen, M., Agency costs of free cash flow, corporate finance and takeovers, *American Economic Review*, 76, 323–329, 1986.
- Joshi, M., K. Shine, M. Ponater, N. Stuber, R. Sausen, et L. Li, A comparison of climate response to different radiative forcings in three general circulation models : towards an improved metric of climate change, *Climate Dynamics*, 20, 843–854, 2003.
- Kaldor, N., A model of the trade cycle, *Economic Journal*, 50, 78–92, 1940.
- Kalecki, M., A theory of the business cycle, *Review of Economic Studies*, 4, 77–97, 1937.
- Kang, I.-S., J.-Y. Lee, et C.-K. Park, Potential predictability of summer mean precipitation in a dynamical seasonal prediction system with systematic error correction, *Journal of Climate*, 17(4), 834–844, 2004.
- Katz, R., M. Parlange, et P. Naveau, Statistics of extremes in hydrology, *Advances in Water Resources*, pp. 1287–1304, 2002.
- Kendrick, D., Stochastic control for economic models : past, present and the paths ahead, *J. Econ. Dyn. & Control*, 29, 3–30, 2005.
- King, R., et M. Watson, Money, prices, interest rates and the business cycle, *The Review of Economics and Statistics*, 78(1), 35–53, 1996.
- Kontolemis, Z., Does growth vary over the business cycle? Some evidence from the G7 countries, *Economica*, 64(255), 441–460, 1997.
- Kothavala, Z., R. Oglesby, et B. Saltzman, Sensitivity of the equilibrium surface temperature of CCM3 to systematic changes in atmospheric carbon dioxide, *Geophysical Research Letters*, 26(2), 209–212, 1999.
- Kydland, F., et E. Prescott, Time to build and aggregate fluctuations, *Econometrica*, 50(6), 1345–1370, 1982.
- Lhomme, G., Les liaisons dangereuses de l'immobilier et de la finance en Allemagne et au royaume-uni, *Crédit Agricole, Département des Etudes Economiques et Bancaires*, available on <http://www.credit-agricole.fr/ca/kiosque-eco/index.shtml>, 2003.
- Lin, B., B. Wielicki, L. Chambers, Y. Hu, et K.-M. Xu, The iris hypothesis : a negative or positive cloud feedback?, *Journal of Climate*, 15, 3–7, 2002.

- Lindzen, S., Climate dynamics and global change, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 26, 353–378, 1993.
- Lindzen, S., M.-D. Chou, et A. Hou, Does the earth have an adaptive infrared iris?, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 82, 417–432, 2001.
- Liu, J. W. H., The multifrontal method for sparse matrix solution : Theory and Practice, *Society for Industrial and Applied Mathematics Review*, 34, 82–109, 1992.
- Lordon, F., *Formaliser la dynamique et les crises régulationnistes*, pp. 264–272, dans *Boyer et Saillard* [2002], 2002.
- Lucas, R., Adjustment costs and theory of supply, *Journal of Political Economy*, 75, 321–334, 1967.
- Lucas, R., An equilibrium model of the business cycle, *The Journal of Political Economy*, 83(6), 1113–1144, 1975.
- Maddison, D., *The Amenity Value of Climate*, Earthscan, London, U.K., 2001.
- Malinvaud, E., Wages and unemployment, *The Economic Journal*, 92(365), 1–12, 1982.
- Manabe, S., et R. Wetherald, The effects of doubling co2 concentration on the climate of a general circulation model., *J. Atmos. Sci.*, 32, 3–15, 1975.
- Manne, A., et R. Richels, The greenhouse debate : Economic efficiency, burden sharing and hedging strategies, *Econ. J.*, 105(4), 1–37, 1995.
- Martin, E., Modification de la couverture neigeuse, in *Impacts potentiels du changement climatique en France au XXIème siècle*, MATE (dir.), Paris, pp. 54–57, 2002.
- May, R., *Stability and Complexity in Model Ecosystems*, Princeton Landmarks in Biology, Princeton University Press, Princeton, 1974.
- McLeman, R., et B. Smit, Changement climatique, migration et sécurité, *Commentaire n°86*, Service Canadien du Renseignement de Sécurité, disponible sur http://www.csis-scrs.gc.ca/fra/comment/com86_f.html, 2003.
- Mendelsohn, R., et J. Neumann, *The Impact of Climate Change on the United States Economy*, Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- Mendelsohn, R., W. Morrison, M. Schlesinger, et N. Andronova, Country-specific market impacts of climate change, *available on* crga.atmos.uiuc.edu/publication/market_impacts/text.html, 1997.
- Mendelsohn, R., W. Morrison, M. Schlesinger, et N. Andronova, Country-specific market impacts of climate change, *Climatic Change*, 45, 553–569, 2000.
- Modigliani, F., et M. Miller, The cost of capital, corporation finance and the theory of investment, *American Economic Review*, 48, 261–97, 1958.

- Munich-Re, Topics. annual review : Natural catastrophes 2002, *Munich Reinsurance Group, Geoscience Research Group, Munich, Germany*, 2003.
- Munich-Re, Topics. annual review : Natural catastrophes 2003, *Munich Reinsurance Group, Geoscience Research Group, Munich, Germany*, 2004.
- Nicholls, R., F. Hoozemans, et M. Marchand, Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise, *Global Environmental Change*, 9 (Special Issue 'A new assessment of global effects of climate change'), 9, 69–87, 1990.
- Nordhaus, W., To slow or not to slow : The economics of the greenhouse effect, *Econ. J.*, 101, 920–937, 1991.
- Nordhaus, W., *Managing the Global Commons : The Economics of Climate Change*, MIT press, Cambridge, 1994.
- Nordhaus, W., et R. Boyer, *Warming the world : economics models of climate change*, MIT Press, Cambridge (MA, USA), 1999.
- Nordhaus, W., et R. Boyer, *Warming the world : economics models of climate change*, MIT Press, Cambridge (MA, USA), 2000.
- NRC, *Valuing Ecosystem Services : Toward Better Environmental Decision-Making*, National Research Council, Committee on Assessing and Valuing the Services of Aquatic and Related Terrestrial Ecosystems, USA, 313 pp., 2004.
- OECD, Lessons learned in dealing with large-scale disasters, *General Secretariat, Advisory unit on multi-disciplinary issues*, OECD, 2003.
- Oke, T., *Boundary layer climates*, 2nd edition. Routledge, 1987.
- Parmesan, C. e. G. Y., A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems, *Nature*, 421, 37–42, 2003.
- Parry, M., *Assessment of potential effects and adaptations for climate change in Europe : The Europe ACACIA project.*, Jackson Environmental Institute, University of East Anglia, Norwich, UK, 2000.
- Peck, S., et T. Teisberg, CETA : a model for carbon emissions trajectory assessment, *Econ. J.*, 103(1), 55–77, 1992.
- Peck, S., et T. Teisberg, Optimal carbon emissions trajectories when damages depend on the rate or level of global warming, *Climatic Change*, 28, 289–314, 1994.
- Phillips, A., The relation between unemployment and the rate of change of money wage rates in the United Kingdom, 1862-1957, *Economica*, 25(100), 283–299, 1958.
- Pigou, A., Economic progress in a stable environment, *Economica*, 14(55), 180–188, 1947.
- Rebelo, S., Long run policy analysis and long run growth, *Journal of Political Economy*, 99, 500–521, 1991.

- Reichlin, P., Equilibrium cycles in an overlapping generations model with production, *Journal of Economic Theory*, 40, 89–102, 1986.
- Root, T., J. Price, K. Hall, S. Schneider, C. Rozenzweig, et A. Pounds, Fingerprints of global warming on wild animals and plants, *Nature*, 421, 57–60, 2003.
- Rose, H., On the nonlinear theory of employment cycle, *Review of Economic Studies*, 34, 153–173, 1967.
- Rosenzweig, C., et W. Solecki, *Climate change and a global city : the potential consequences of climate variability and change*, Metro East Coast, Columbia Earth Institute, New-York (NY), 2001.
- Rosser, J., On the complexities of complex economic dynamics, *The Journal of Economic Perspectives*, 13(4), 169–192, 1999.
- Rostow, W., *World Economy History and Prospect.*, Mac Millan, London., 1951.
- Salby, M., *Fundamentals of Atmospheric physics*, International Geophysics Series, Edited by R. Dmowska and J.R. Holton, Academic Press, San Diego, California, United-States, 626 pp, 1996.
- Samuelson, P., A synthesis of the principle of acceleration and the multiplier, *Journal of Political Economy*, 47, 786–797, 1939.
- Schär, C., P. Vidale, L. D., C. Frei, C. Häberli, M. Liniger, et C. Appenzeller, The role of increasing temperature variability in european summer heatwaves., *Nature*, 427, 332–336, 2004.
- Schinasi, B., A nonlinear dynamic model of short-term fluctuation, *Review of Economic Studies*, 48, 649–656, 1981.
- Schneider, E., B. Kirtman, et R. Lindzen, Upper tropospheric water vapor and climate sensitivity, *J. Atmos. Sci.*, 56, 1649–1658, 1999.
- Schneider, S., *CO2, climate and society : a brief overview*, pp. 9–15, D. Reidel, Boston, MA, USA, 1983.
- Schumpeter, J., *Business Cycles*, two volumes, McGraw-Hill, 1939.
- Scimemi, G., *Environmental policies and anticipatory strategies*, Campus, New-York, 1987.
- Singer, H., Development projects as part of national development, *Formulation and Appraisal of Development Projects. As quoted in Joshi, B.M. (1990) opcit.*, 1951.
- Skott, P., Effective demand, class struggle and cyclical growth, *International Economic Review*, 30(1), 231–247, 1989.
- Slutsky, E., The summation of random causes as a source of cyclic processes, III(1), *Conjuncture Institute, Moscow, Reprinted in Econometrica*, 5, 105–146, 1927.
- Smith, J., et S. Hitz, *Estimating global impacts from climate change : background paper for the OECD/WPGSP project "Benefits of climate policy"*, Stratus Consulting Inc., Boulder (CO), 2002.

- Smith, V., Jeem and non-market valuation, *Journal of Environmental Economics and Management*, 39, 351–374, 2000.
- Solow, R., A contribution to the theory of economic growth, *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65–94, 1956.
- Solow, R., "the economics of resources or the resources of economics, *American Economic Review, American Economic Association*, 64(2), 1–14, 1974.
- Solow, R., Growth theory and after, *The American Economic Review*, 78(3), 307–318, 1988.
- Soufiani, A., J. M. Hartmann, et J. Taine, Validity of Band-Model Calculations for CO_2 and H_2O Applied to Radiative Properties and Conductive-Radiative Transfer, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 33(3), 243–257, 1985.
- Stewart, F., E. Fitzgerald, et associates, War and underdevelopment. vol. 1 : The economic and social consequences of conflict., *Oxford : Oxford University Press*, 2001.
- Stocker, T. F., R. Knutti, et G. Plattner, The future of the thermohaline circulation - a perspective, in *The Ocean and Rapid Climate Changes : Past, Present, and Future*, D. Seidov et al. (Eds.), *Geophysical Monograph 126, American Geophysical Union*, pp. 277–293, 2001.
- Süssmuth, B., National and Supranational Business Cycles (1960-2000) : A Multivariate Description of Central G7 and EURO15 NIPA Aggregates, *CESifo Working Paper Series No. 658*, 2002.
- Swiss-Re, Floods - an insurable risk?, *Swiss Reinsurance Company, Zurich, CH*, 1998.
- Swiss-Re, Natural catastrophes and man-made disasters in 2003 : many fatalities, comparatively moderate insured losses., *Swiss Reinsurance Company, Zurich, CH*, 2004.
- Talagrand, O., et P. Courtier, Variational assimilation of meteorological observations with the adjoint vorticity equation. part. 1 & 2, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 478, 1311–1347, 1987.
- Thomas, C., et al., Extinction risk from climate change, *Nature*, 427, 145–148, 2004.
- Titus, J., The cost of climate change to the united states, in *Global climate change : implications challenges and mitigation measures*, S.K. Majumdar, L.S. Kalkstein, B. Yarnal, E.W. Miller, L.M. Rosenfeld (dir.), *Pennsylvania Academy of Science, Easton (PA)*, 1992.
- Tobin, J., A general equilibrium approach to monetary policy, *Journal of Money, Credit and Banking*, 1, 1969.
- Tol, R., The damage costs of climate change : Toward more comprehensive calculations, *Environmental and Resource Economics*, 5, 353–374, 1995.

- Tol, R., The damage costs of climate change towards a dynamic representation, *Ecological Economics*, 19, 67–90, 1996.
- Tol, R., On the optimal control of carbon dioxide emissions : an application of fund, *Environmental Modeling and Assessment*, 2, 151–163, 1997.
- Tol, R., New estimates of the damage costs of climate change, Part I : Benchmark estimates, *Environmental and Resource Economics*, 21(1), 47–73, 2002a.
- Tol, R., New estimates of the damage costs of climate change, Part II : Dynamic estimates, *Environmental and Resource Economics*, 21(2), 135–160, 2002b.
- Tol, R., et H. Dowlatabadi, Vector-borne diseases, development and climate change, *Integrated Environmental Assessment*, 2, 173–181, 2002.
- Toman, M., Research frontiers in the economics of climate change, *Environmental and Resource Economics*, 11(3-4), 603–621, 1998.
- Vörösmarty, C., P. Green, J. Salisbury, et R. Lammers, Global water resources : Vulnerability from climate change and population growth, *Science*, 289, 284–288, 2000.
- Wang, P.-F., et Y. Wen, Endogenous money of sticky prices ? – comment on monetary non-neutrality and inflation dynamics, *J. Econ. Dyn. & Control*, 2004.
- WBGU, *Targets for Climate Protection, 1997 : A study for the third Conference of the Parties to the Framework Convention on Climate Change in Kyoto*, WBGU (German Scientific Advisory Council on Global Change), Bremerhaven (Germany), 1997.
- Weller, G., et M. Lange, *Impacts of global change in the Arctic regions*, International arctic science committee, Centre for global change and arctic system research, University of Alaska, Fairbanks (AK), 1999.
- West, J. J., M. Small, et H. Dowlatabadi, Storms, investor decisions, and the economic impacts of sea level rise., *Climatic Change*, 48, 317–342, 2001.
- Wetherald, R., et S. Manabe, Cloud feedback processes in a general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, 45, 1397–1416, 1988.
- World Bank, Turkey : Marmara earthquake assessment, *World Bank Working Paper*, 1999.
- Yang, F., A. Kumar, M. Schlesinger, et W. Wang, Intensity of hydrological cycles in warmer climates, *Journal of Climate*, 16, 2419–2423, 2003.
- Yun, T., Nominal price rigidity, money supply endogeneity, and business cycle, *Journal of Monetary Economics*, 37, 345–370, 1996.
- Zarnovitz, V., Recent work on business cycle in historical perspective : A review of theories and evidence, *Journal of Economic Literature*, 23(2), 523–580, 1985.
- Zhang, M., J. Hack, J. Kiehl, et R. Cess, Cloud feedback processes in a general circulation model, *Journal of Geophysical Research*, 99, 5525–5537, 1994.

Annexe A

**Le Formalisme d'Evolution
par Transfert**

Sommaire

A.1 L'analyse du Système Linéaire Tangent	293
A.2 Solution numérique du Formalisme d'Evolution par Trans-	
fert	295
A.2.1 Equivalence entre la transformée de Borel et le schéma de	
Crank-Nicolson	295
A.2.2 Evolution temporelle du système	296
A.2.3 Analyse du SLT	297

La simulation vise à reproduire une réalité simplifiée et à traiter d'aspects peu accessibles à l'observation. A l'opposé, la modélisation met l'accent sur l'interprétation d'une réalité plus complexe qui articule des aspects théoriques variés. Or, dès qu'un système dépasse une certaine complexité - en particulier dès qu'il est mis en conditions réalistes - le développement de modèle requiert la mise en oeuvre de méthodes numériques ayant pour effet d'opacifier l'accès à l'analyse des mécanismes.

La collaboration TEF a mis au centre de son approche la problématique de restitution de l'intelligibilité des systèmes dynamiques par la modélisation. Dans cette approche, l'étape même de construction du modèle prend une importance cruciale, alors que la démarche usuelle se satisfait de l'écriture des équations fondamentales régissant les divers processus élémentaires, suivie de la résolution numérique des équations du modèle. Il est alors souvent difficile d'utiliser les résultats de simulation pour en induire une intelligibilité globale du comportement du modèle (stabilité, sensibilité aux forçages, etc).

La méthodologie de modélisation que nous explorons repose sur le développement d'un formalisme, le TEF (Transfer Evolution Formalism) qui a pour principal objectif d'explicitier cette maïeutique de la modélisation pour répondre aux interrogations qui se manifestent. L'accent est mis sur l'analyse de couplage, dont l'élément clef repose sur la notion de découpage-raccordement. Le modèle est construit par morceaux, chaque modèle partiel comprend une expression de sa sensibilité aux variables d'interface, et chaque interface est associée à un modèle spécifique, de telle manière que l'ensemble de ces deux types de modèle soit mathématiquement équivalent au système originel non partitionné. La simulation est effectuée dans un environnement de modélisation associé (les logiciels ZOOM ou Mini_Ker), et fournit des éléments supplémentaires à la trajectoire, permettant d'analyser le fonctionnement du système. Ces éléments supplémentaires sont largement tirés de l'analyse du Système Linéaire Tangent, comme l'explique la section suivante.

A.1 L'analyse du Système Linéaire Tangent

On considère un modèle qui peut être représenté mathématiquement par un ensemble d'équations de deux types :

1. les cellules :

$$\begin{aligned}\frac{\partial \eta_\alpha}{\partial t} &= \mathbf{G}_\alpha(\eta_\alpha, \varphi_1, \varphi_2, \dots) \\ \frac{\partial \eta_\beta}{\partial t} &= \mathbf{G}_\beta(\eta_\beta, \varphi_1, \varphi_2, \dots) \\ &\dots\end{aligned}\quad (\text{A-1})$$

2. les transferts :

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \mathbf{f}_1(\eta_\alpha, \eta_\beta, \dots, \varphi) \\ \varphi_2 &= \mathbf{f}_2(\eta_\alpha, \eta_\beta, \dots, \varphi) \\ &\dots\end{aligned}\quad (\text{A-2})$$

η est le vecteur d'état du système complet, et φ est le vecteur des conditions aux limites de chaque cellule, dépendante que l'état de chacune des cellules. Si on se donne des conditions initiales en t_0 , le système complet est un problème bien posé, c'est-à-dire qu'il a une unique solution.

La méthode consiste ici à construire le développement au premier ordre du système dynamique autour de son état courant ($\eta(t_n)$). Pour chaque cellule α , il vient :

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\eta_\alpha(t_n) + \delta\eta_\alpha(t))}{\partial t} &= G_\alpha(\eta_\alpha(t_n), \varphi(t_n)) + \frac{\partial G_\alpha}{\partial \eta_\alpha}(\eta_\alpha(t_n), \varphi(t_n)) \cdot \delta\eta_\alpha(t) \\ &\quad + \frac{\partial G_\alpha}{\partial \varphi}(\eta_\alpha(t_n), \varphi(t_n)) \cdot \delta\varphi(t) + \mathcal{O}((t - t_n)^2)\end{aligned}\quad (\text{A-3})$$

où $\delta\eta_\alpha(t) = \eta_\alpha(t) - \eta_\alpha(t_n)$, et $\delta\varphi(t) = \varphi(t) - \varphi(t_n)$.

Le système linéaire tangent (SLT) correspondant au système (A-3) est, pour chaque cellule α :

$$\begin{cases} \frac{\partial \delta\eta_\alpha(t)}{\partial t} = \mathbf{G}_\alpha|_{t_n} + \frac{\partial G_\alpha}{\partial \eta_\alpha} \Big|_{t_n} \delta\eta_\alpha(t) + \frac{\partial G_\alpha}{\partial \varphi} \Big|_{t_n} \delta\varphi(t) \\ \delta\varphi(t) = \sum_\beta \frac{\partial f}{\partial \eta_\beta} \Big|_{t_n} \delta\eta_\beta(t) + \frac{\partial f}{\partial \varphi} \Big|_{t_n} \delta\varphi(t) \end{cases}\quad (\text{A-4})$$

où β parcourt les cellules.

Sur un pas de temps, on approxime l'évolution temporelle exacte du modèle ($\delta\eta_\alpha(t)$ et $\delta\varphi(t)$) par $\delta\dot{\eta}_\alpha(t)$ et $\delta\dot{\varphi}(t)$, les évolutions des variables du SLT, car elles ne diffèrent que de $\mathcal{O}((t - t_n)^2)$.

Dans la formulation (A-4), les matrices Jacobiennes contiennent des informations essentielles à l'analyse des interactions entre les variables. Le SLT

peut être résolu par de multiples méthodes, par exemple par transformée de Laplace. Ici, plutôt que la transformée de Laplace, on utilise la transformée de Borel, qui s'écrit :

$$f(t) \xrightarrow{\mathcal{B}} \mathcal{B}[f](\tau) = \frac{1}{\tau} \int_0^{\infty} e^{-t/\tau} f(t) dt = \frac{1}{\tau} \tilde{f}\left(\frac{1}{\tau}\right) \quad (\text{A-5})$$

où $\tilde{f}(p)$ est la transformée de Laplace de $f(t)$. Contrairement à la variable de Laplace, la variable de Borel τ est réelle et homogène à un temps.

Comme $\mathcal{B}[\partial f/\partial t] = (1/\tau)\mathcal{B}[f]$, la transformée de Borel de l'Eq. (A-4) donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{B}[\mathring{\delta}\eta_{\alpha}] = \overbrace{\left[1 - \tau \frac{\partial G_{\alpha}}{\partial \eta_{\alpha}} \Big|_{t_n} \right]^{-1}}^{\mathcal{B}[\mathring{\delta}\eta_{\alpha, dec}]} \tau \mathbf{G}_{\alpha} \Big|_{t_n} + \tau \overbrace{\left[1 - \tau \frac{\partial G_{\alpha}}{\partial \eta_{\alpha}} \Big|_{t_n} \right]^{-1} \frac{\partial G_{\alpha}}{\partial \varphi} \Big|_{t_n}}^{\underline{\mathcal{F}}} \mathcal{B}[\mathring{\delta}\varphi] \\ \mathcal{B}[\mathring{\delta}\varphi] = \sum_{\beta} \frac{\partial f}{\partial \eta_{\beta}} \Big|_{t_n} \mathcal{B}[\mathring{\delta}\eta_{\beta}] + \frac{\partial f}{\partial \varphi} \Big|_{t_n} \mathcal{B}[\mathring{\delta}\varphi] \end{array} \right. \quad (\text{A-6})$$

Si les variables des cellules (c'est-à-dire les variables d'état) $\mathring{\delta}\eta$ sont éliminées de la deuxième équation, le système complet d'équation se réduit à :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{B}[\mathring{\delta}\eta] = \mathcal{B}[\mathring{\delta}\eta_{dec}] + \underline{\mathcal{F}} \mathcal{B}[\mathring{\delta}\varphi] \\ [1 + \underline{\mathcal{C}}] \mathcal{B}[\mathring{\delta}\varphi] = \mathcal{B}[\mathring{\delta}\varphi_{ins}] \end{array} \right. \quad (\text{A-7})$$

où $\mathcal{B}[\mathring{\delta}\eta_{dec}]$, $\underline{\mathcal{F}}$, $\underline{\mathcal{C}}$, et $\mathcal{B}[\mathring{\delta}\varphi_{ins}]$ dépendent de τ et peuvent être calculées à partir des matrices Jacobiennes et des vecteurs d'état au temps t_n .

La première équation de (A-7) décrit l'évolution des variables d'état. Les variables d'état sont dirigées par :

(i) leur évolution inertielle propre $\mathring{\delta}\eta_{dec}$, où *dec* signifie *découplé*, qui serait l'évolution réelle si tous les transferts étaient constants ($\mathring{\delta}\varphi = \mathbf{0}$).

(ii) l'évolution de leurs conditions aux limites ($\mathring{\delta}\varphi \neq \mathbf{0}$). La matrice $\underline{\mathcal{F}}$ décrit l'influence des variables de transfert sur les variables d'état. Cette influence, et donc $\underline{\mathcal{F}}$, est indépendante du modèle de la variable de transfert ($\mathring{\delta}\varphi$).

Dans la seconde équation, $\mathring{\delta}\varphi_{ins}$ représente la variation des variables de transfert si $\mathring{\delta}\eta = \mathring{\delta}\eta_{dec}$, c'est-à-dire si toutes les cellules suivent leur évolution *découplée*, ce qui revient à poser $\underline{\mathcal{F}} = 0$ (pas d'influence des conditions aux limites sur l'évolution des cellules).

En conséquence, $\underline{\underline{C}}$ décrit l'effet du couplage entre les cellules et les transferts.

L'expression développée de la matrice $\underline{\underline{C}}$ montre comment les dérivées partielles définies au niveau des cellules et des transferts se combinent pour mener à la dynamique du système complet. Les coefficients de cette matrice de couplage sont des fractions rationnelles de la variable τ .

A.2 Solution numérique du Formalisme d'Evolution par Transfert

Pour les grands systèmes, les matrices définies ci-dessus sont grandes et creuses et ont une structure qui dépend du découpage du système en cellules et transferts. ZOOM est un solveur développé spécifiquement pour résoudre de tels problèmes en utilisant la *méthode hyper-multi-frontale à super-noeuds relaxés* [Liu, 1992]. Mini_Ker est une version de ZOOM plus simple, qui inverse les matrices sans tenir compte de leur structure particulière et qui est donc limitée à un nombre de variable inférieur à quelques centaines. Ces outils sont présentés de manière complète, avec des exemples, sur le site : http://www.lmd.jussieu.fr/ZOOM/site_zoom_home.html.

On présente ici le principe de la résolution qui montre comment la dynamique du système est décrite par les coefficients de couplage.

A.2.1 Equivalence entre la transformée de Borel et le schéma de Crank-Nicolson

Il peut être facilement démontré que la résolution du système (A-4) par le schéma de Crank-Nicolson avec un pas de temps δt est identique à sa transformation de Borel (A-7), avec la correspondance $\tau \longleftrightarrow \frac{\delta t}{2}$.

Pour démontrer cette équivalence, on pose $\hat{\delta}X$, l'évolution temporelle de la variable X, approximée par un schéma de Crank-Nicholson et on considère le système linéaire suivant :

$$\frac{\partial \eta(t)}{\partial t} = A \cdot \eta(t) \quad (\text{A-8})$$

Avec $\eta(t) = \eta_0 + \delta\eta(t)$ et $\delta\eta(0) = 0$, il peut être réécrit :

$$\frac{\partial(\eta_0 + \delta\eta(t))}{\partial t} = A \cdot (\eta_0 + \delta\eta(t)) \quad (\text{A-9})$$

Si on applique un schéma de Crank-Nicholson au système (A-9), avec un pas de temps δt , les équations discrétisée s'écrivent :

$$\frac{\hat{\delta}\eta(\delta t)}{\delta t} = A \frac{1}{2} (2\eta_0 + \hat{\delta}\eta(\delta t)) \quad (\text{A-10})$$

Ce qui donne l'évolution temporelle de η , puisque $\hat{\delta}\eta(\delta t) \approx \delta\eta(\delta t)$ pour δt petit. Quelque soit $t > 0$, $\hat{\delta}\eta(t)$ est donné par :

$$\hat{\delta}\eta(t) = \left(1 - \frac{t}{2}A\right)^{-1} A\eta_0 \cdot t \quad (\text{A-11})$$

Et la transformée de Borel du système (A-9) s'écrit :

$$\begin{aligned} \mathcal{B}\left(\frac{\partial\delta\eta(t)}{\partial t}\right) &= \frac{1}{\tau}\mathcal{B}(\delta\eta)(\tau) \\ &= \mathcal{B}(A \cdot (\eta_0 + \delta\eta(t))) \\ &= A\mathcal{B}(\eta_0) + A\mathcal{B}(\delta\eta)(\tau) \end{aligned} \quad (\text{A-12})$$

Qui peut se réécrire (car $\mathcal{B}(k) = k$) :

$$\mathcal{B}(\delta\eta)(\tau) = (1 - \tau A)^{-1} A\eta_0 \tau \quad (\text{A-13})$$

Les équations (A-11) et (A-13) montrent que l'intégration par Crank-Nicolson est équivalente à la transformée de Borel du système, via la relation :

$$\hat{\delta}\eta(t) = 2 \cdot \mathcal{B}(\delta\eta)\left(\frac{t}{2}\right) \quad (\text{A-14})$$

A.2.2 Evolution temporelle du système

Pour chaque pas de temps, le solveur ZOOM résout la seconde équation matricielle de (A-7) pour $\mathcal{B}[\dot{\delta}\varphi]$. La première équation est ensuite résolue pour $\mathcal{B}[\dot{\delta}\eta]$. Grâce à la propriété (A-14), on obtient alors une approximation de l'évolution temporelle des variables entre t_n and $t_n + \delta t$.

A.2.3 Analyse du SLT

Les pôles de la transformée de Laplace des solutions du SLT sont les valeurs propres du système. C'est la même chose pour la transformée de Borel : déterminer les pôles de la transformée de Borel donne la dynamique complète du système.

ZOOM et Mini_Ker sont capables de calculer numériquement la transformée de Borel des solutions du SLT ($\mathcal{B}[\delta\eta](\tau)$ et $\mathcal{B}[\delta\varphi](\tau)$) sur l'axe réel $\tau > 0$. Le problème de la caractérisation de la dynamique du système est donc réduite à la détermination des pôles de la transformée de Borel des solutions du SLT à partir de sa valeur numérique du l'axe réel positif.

En particulier, dans l'Eq. (A-7), on voit que les pôles de $\mathcal{B}[\delta\varphi](\tau)$ sont i) les pôles de $\mathcal{B}[\delta\varphi_{ins}]$, c'est-à-dire les pôles du modèle sans prendre en compte les interactions entre sous-systèmes ; et ii) les pôles de $(1 + \underline{\underline{C}})^{-1}$, c'est-à-dire les pôles correspondant aux interactions entre sous-systèmes.

La transformée de Borel inverse de l'Eq. (A-7) est obtenu par identification d'éléments simples, et donne la dynamique complète du modèle. La méthode consiste en une identification de la transformée de Borel à une combinaison linéaire de sigmoïdes et de bosses, qui correspondent aux seules transformées de Borel possibles de solutions d'équations différentielles linéaires. A partir des temps caractéristiques de ces fonctions élémentaires, on reconstruit les temps caractéristiques des pôles et on peut reconstruire la fonction originale dans l'espace réel sans faire une transformée de Borel inverse explicite, qui est techniquement difficile.

