

Impact économique du changement climatique sur l'alimentation animale et l'élevage dans l'Union Européenne

P. Aghajanzadeh-Darzi^{1, 2}, P.A. Jayet¹

1 : INRA, UMR 210 Economie Publique, INRA-AgroParisTech, F-78850 Grignon

2 : ADEME, Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, F-49004 Angers, France

Correspondance : jayet@grignon.inra.fr

Résumé

Avec le changement climatique, il est admis que les variations de température et de précipitations sont susceptibles d'affecter significativement les systèmes naturels tout autant que les systèmes de production de l'agriculture et de l'élevage. L'objectif de la présentation est d'illustrer l'évaluation des impacts du changement climatique sur les productions végétales et de ses interactions avec les productions animales, en particulier *via* les changements d'utilisation des sols agricoles et l'alimentation animale. Une évaluation des émissions directes de gaz à effet de serre affectées par les changements au sein des systèmes de production est réalisée. L'étude repose sur les résultats obtenus avec le couplage d'un modèle de culture (STICS) et d'un modèle agro-économique (AROPAj), sous différents scénarios climatiques résultant de simulations du climat à long terme (scénarios "A2H2" et "B1H2" de l'AR4¹ de l'IPCC). Les résultats obtenus montrent que l'adaptation des pratiques agricoles dans le futur lointain atténue voire renverse les effets négatifs que pourrait causer le changement climatique sur les systèmes de culture. Lorsque l'on généralise cette analyse aux prairies et aux cultures fourragères, les résultats apparaissent plus mitigés et les systèmes d'élevage pourraient moins bien résister et évoluer moins favorablement que les systèmes de culture si les prairies devaient subir une diminution significative de leur surface.

Abréviations :

ARn : Assessment Report (de l'IPCC, « n » étant l'indexation des différentes éditions)

AROPAj : modèle agro-économique

GES : gaz à effet de serre

IIASA : Institut International pour l'Analyse des Systèmes Appliqués

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change (acronyme français : GIEC)

RICA : Réseau d'Information Comptable Agricole

UE : Union Européenne

SRES : Special Report on Emissions Scenarios

¹ Le quatrième rapport d'évaluation de l'IPCC destiné à évaluer les informations scientifiques, techniques et socio-économiques concernant le changement climatique, ses effets, ainsi que des options pour l'adaptation et l'atténuation.

Introduction

L'accroissement de la population humaine et de la solvabilité d'un plus grand nombre de consommateurs exerce une pression croissante sur les marchés alimentaires, y compris ceux de la viande et des produits de l'élevage. Il est par conséquent essentiel de travailler sur les facteurs susceptibles d'influencer la production. Le changement climatique est l'un des éléments qui devrait conjointement avoir un impact significatif sur les systèmes alimentaires, la vulnérabilité de l'agriculture et la sécurité alimentaire dans le monde [10]. L'agriculture connaît particulièrement ces effets depuis les années 1980, lorsque les premiers signes de la perturbation des équilibres naturels et environnementaux sont enregistrés. La relation entre l'élevage et le changement climatique est soumise à un processus complexe. L'élevage contribue aux changements climatiques ; il est dans le même temps affecté par ces changements, avec des conséquences négatives sur la santé des animaux, sur la production économique qui leur est associée, ainsi que sur la qualité et la quantité des aliments tels que les fourrages et les céréales.

De nombreux travaux ont été réalisés pour étudier les impacts du changement climatique sur l'agriculture. CAIRISTIONA [4] montre qu'une augmentation de rendement annuel des graminées, sous haute température et niveau élevé d'émission de CO₂, conduit à une hausse de rendement laitier moyen par vache. A l'inverse, HANSON [13] fait état d'une baisse de la production animale, provoquée par l'augmentation de la température ambiante et la baisse de la qualité des plantes fourragères. Le changement du climat pourrait aussi influencer la répartition spatiale des espèces : selon l'étude de BAKKED *et al.* [3], plus de 50 % des espèces au nord de l'Europe seraient invasives et environ 25 % dans le sud de l'Europe disparaîtraient sous l'effet du climat simulé pour 2100. Certaines études sont essentiellement structurées autour des effets des changements climatiques sur l'agriculture française. MOREAU et LORGEOU [15] montrent des effets divergents sur les systèmes fourragers français. Ils montrent que le changement climatique entraîne une possibilité de repousse de l'herbe en automne et peut aussi avoir des effets négatifs sur la croissance de l'herbe et le système d'élevage, effets négatifs générés par des périodes de sécheresse estivale plus intenses et plus durables. SOUSSANA *et al.* [17] estiment probable l'accroissement du rendement des prairies (+20 %) dans le Massif central par un réchauffement global modeste (+2 %). Ceci contraste avec le travail de RUGET *et al.* [16], reposant sur une double approche combinant simulations et expérimentation, qui montre une forte baisse de la production fourragère dans l'ensemble des régions de France.

L'étude proposée ici combine la modélisation agro-économique (AROPAj) déjà utilisée pour l'étude des relations entre agriculture européenne et climat (voir par exemple [14]) et une approche économétrique très simple mobilisant des résultats en cours d'élaboration à l'IIASA [2, 1]. L'approche économétrique utilise ces résultats comme des pseudo-données permettant d'associer changement climatique et productions fourragères. Ceci permet d'étendre à ces productions les facteurs d'impact du climat que la modélisation (AROPAj et STICS) avait permis de déterminer pour les principales cultures de vente [14].

La suite de l'article est développée en trois sections. Dans un premier temps, nous présentons les modèles utilisés et la méthodologie d'ensemble. Puis, nous interprétons les résultats et, enfin, nous concluons.

1. Méthodologie

Ce travail repose sur la méthode de couplage entre le modèle économique de l'offre agricole (AROPAj) et le modèle de croissance de culture (STICS) développée et utilisée dans différents articles [12]. L'attention est portée sur le fait que le changement climatique affecte simultanément les productions animales et les productions végétales qui, à l'échelle de l'exploitation agricole, sont en interaction par l'alimentation animale et par la production d'amendements organiques (riches en azote). Les productions de céréales à paille sont particulièrement bien représentées dans le modèle agro-économique AROPAj (blé tendre, blé dur, orges, maïs grain, avoine, seigle, autres céréales) et le modèle STICS a été utilisé pour les principales d'entre elles (blé tendre, maïs, orges).

Par ailleurs, le modèle prend explicitement en compte le fait que ces productions céréalières peuvent être collectées et vendues ou utilisées sur la ferme pour l'alimentation animale. Dans le modèle, la situation des prairies et fourrages est à la fois plus simple (la production est entièrement consommée à

la ferme) et plus complexe (le modèle STICS est moins développé sur ces productions, et l'ajustement AROPAj-STICS est compliqué par le fait que nous ne disposons pas de "prix")².

Dans notre étude, nous ajoutons les productions fourragères comme productions explicitement sensibles au climat. Ce qui en soi et en principe n'est pas nouveau, mais le devient dans la modélisation quantitative malgré le fait que nous ne disposons pas de l'évaluation des facteurs d'impacts du climat sur les productions fourragères, à l'image de ce qui avait été réalisé précédemment avec AROPAj pour les productions de grande culture. L'idée est ici d'utiliser les évaluations faites à l'IIASA dans le cadre du programme FP7 AnimalChange [1] en matière d'impact du climat sur les rendements des différentes productions, fourrages compris. Même si ces évaluations ont été réalisées à l'échelle d'un pays membre de l'UE, alors que les agents économiques à la base du modèle AROPAj sont les « exploitations type » définies à l'échelle régionale, elles ont le mérite d'offrir la possibilité d'une évaluation de l'impact du climat sur les rendements fourragers. Ceci permet donc d'améliorer la sensibilité du modèle agro-économique à différents scénarios de changement de politique agricole et de changement climatique.

1.1. Modèle économique de l'offre agricole (AROPAJ)

Développé par l'INRA, AROPAj est un modèle de programmation linéaire annuel qui simule l'offre agricole de l'Union Européenne à une échelle infrarégionale ("exploitations agricoles type") en fonction de différents paramètres décrivant le contexte économique [7, 8, 9, 5, 11]. AROPAj calcule les choix individuels effectués par les agents (*i.e.* les exploitations type) en termes d'allocation des surfaces, de production animale, de collecte végétale et d'intra consommation. Il optimise la marge brute des agriculteurs en fonction des prix des produits, des taxes, des aides directes et du coût des intrants. Dans la mise en œuvre d'AROPAJ, il est important de noter que la superficie agricole utilisée par chaque exploitation est constante (le changement de la surface agricole utile -SAU- est exogène) et les éleveurs ont la possibilité de modifier leur capital animal dans un intervalle choisi (on opte le plus souvent pour l'intervalle +/- 15 % du capital animal initial).

Le premier objectif du modèle AROPAj a été d'évaluer les impacts de la Politique Agricole Commune (PAC) [11]. Il a par la suite été utilisé pour traiter des problèmes agroenvironnementaux, en particulier pour étudier les émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine agricole, ainsi que pour évaluer les coûts de réduction des GES dans les régions de l'UE [6, 9]. Les paramètres du modèle sont obtenus principalement par estimation à partir des données du RICA européen. La typologie en "groupes type d'exploitations" est réalisée par classification automatique à partir de l'échantillon des exploitations agricoles du RICA principalement orientées sur les cultures annuelles et l'élevage, et à partir des trois critères que sont (i) les catégories "OTEX"³, (ii) l'altitude et (iii) la dimension économique. Nous utilisons la version V2 du modèle AROPAj fondée sur les données du RICA 2002, couvrant 101 régions RICA de l'UE-15, y compris la France avec 22 régions.

1.2. Variation du rendement des prairies et fourrages

Le couplage AROPAj-STICS adapté aux systèmes de culture de vente (céréales, oléo-protéagineux, betterave, pomme de terre) n'a pas encore été développé pour les prairies. Pour intégrer les variations de rendement des prairies en rapport avec le changement climatique, nous avons donc fait appel à des résultats obtenus avec un autre système de couplage (GLOBIOM-EPIC) traitant conjointement quelques productions de grande culture et de fourrages selon différents scénarios d'évolution du climat. A l'aide du modèle économique global en équilibre partiel GLOBIOM, développé à l'IIASA et couplé avec le modèle de culture EPIC⁴, pour différentes années et dans le

² Le couplage AROPAj-STICS, permet d'élaborer un ensemble de fonctions « dose-réponse » associant l'apport d'azote et le rendement des cultures. La méthode de sélection de ces fonctions, développée par GODARD (2008) [12], repose en particulier sur la connaissance des rapports de prix du produit (de la culture) et du facteur (le fertilisant azoté).

³ Orientation technico-économique ; nomenclature en 14 types, proposée par le RICA et fondée sur la décomposition de la marge brute selon les principales productions.

⁴ Voir par exemple <http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/FOR/globiom/crops.html>

cadre de deux scénarios "AR5" (faisant référence au « *Fifth Assessment Report* » de l'IPCC), et pour tous les pays de l'UE, les rendements des prairies et fourrages ont été estimés avec le même mode opératoire que pour les autres productions végétales [2]. Nous avons alors utilisé ces résultats pour corrélérer, par régression linéaire, le rendement potentiel des prairies et fourrages à celui d'autres productions végétales (Tableau 1).

TABLEAU 1 – Résultats de la régression linéaire : rendements des fourrages « expliqués » par les rendements des cultures de vente et par le temps. Erreur standard résiduelle : 16,12 ; nombre d'observations : 168 ; R^2 ajusté : 0,8415 ; Significativité : *** : 0,001 ; ** : 0,01 ; * : 0,05.

Variable explicative (rendement ou période)	Valeur estimée	Significativité
Orge	0,427118	***
Maïs	0,259602	***
Pomme de terre	0,581457	***
Colza	-0,376261	***
Bettrave	-0,160456	.
Blé	-0,473850	***
Avoine	0,146138	*
Seigle	-0,156582	*
Riz	2,757583	***
Coton	-11,309497	***
Année	0,009226	***

Ce calcul de corrélation fait état d'un effet "temporel" significatif (nous disposons des résultats GLOBIOM-EPIC pour les années 2010, 2020 et 2030), l'effet "scénario" (AR5-SSP1 et SSP3) quant à lui ayant été estimé peu significatif.

A partir de ces corrélations et des calculs réalisés par ailleurs pour l'évolution des rendements en grande culture, nous estimons les rendements en prairies et fourrages chez les différentes exploitations type du modèle AROPAj dans le contexte climatique étudié pour l'horizon 2070-2100 ("H2") et pour lequel ont été estimés les rendements des grandes cultures (l'analyse est présentée en détail dans [14]).

1.3. Protocole de simulation

Plusieurs scénarios ont été étudiés à l'aide du modèle AROPAj, à partir de la combinaison de deux jeux d'hypothèses (Tableau 2) : (i) les données climatiques sont fondées sur un scénario de contrôle "CTL" (1976-2005) et deux scénarios climatiques à horizon 2070-2100 ("H2") de type "SRES-AR4", dénommés respectivement "A2H2" et "B1H2", avec pour le scénario CTL un niveau de 352 ppm de concentration de CO₂ et pour les deux scénarios de climat futur une concentration de CO₂ de 724 ppm et 533 ppm respectivement ; (ii) l'adaptation des pratiques agricoles vue à travers le choix de la culture précédente, de la gestion du cycle des cultures et de la disponibilité de l'eau d'irrigation [14] est prise en compte dans les deux SRES, dans des scénarios respectivement dénommés "A2H2-A" et "B1H2-A".

TABLEAU 2 – Les scénarios étudiés.

Scénario	Climat	Année	Concentration en CO ₂ (ppm)	Adaptation des pratiques agricoles
Référence	CTL	1976-2005	352	-
Futur	A2H2	2070-2100	724	non
	B1H2	2070-2100	533	non
	A2H2-A	2070-2100	724	oui
	B1H2-A	2070-2100	533	oui

Le modèle AROPAj permet aux éleveurs de modifier leur capital animal dans la limite d'une amplitude de variation exogène. Un ajustement de ce capital de +/- 30 % a été retenu pour tous les scénarios. Nous intégrons de la sorte une possibilité supplémentaire d'adaptation des systèmes de production face aux changements climatiques.

2. Résultats à l'échelle européenne et discussion

2.1. Marge brute agricole

Le Tableau 3 présente la variation de la marge brute agricole de différents Etats membres de l'UE pour les scénarios à l'horizon 2100 comparés au scénario de référence. Les résultats mettent en lumière que l'agriculture de la plupart des pays européens pourrait bénéficier du changement climatique. L'effet « fertilisant » du CO₂ est déterminant. La marge brute européenne augmenterait de 3,5 % dans le scénario A2H2 pour lequel la concentration de CO₂ est plus élevée que dans le scénario B1H2 pour lequel la marge brute diminuerait de 0,8 %. L'adaptation des pratiques agricole a un effet positif, avec une hausse moyenne de 17,5 % de la marge brute européenne comparée avec la marge "CTL". La marge de la plupart des pays évolue dans une fourchette de +5 % à +20 %.

TABLEAU 3 – Variation relative (%) de la marge brute agricole par rapport au scénario de référence (CTL).

Scénario	A2H2	B1H2	A2H2-A	B1H2-A
Belgique	-2,4	-10,5	7,9	6,7
Danemark	4,8	7,8	18,2	25,9
Allemagne	9,5	11,5	23,3	26,9
Grèce	-4,1	-1,6	9,8	13,6
Espagne	2,2	-13,6	27,8	13,5
France	2,9	-5,1	25,5	25,1
Grande Bretagne	0,0	-0,1	14,1	15,6
Irlande	1,4	-4,7	4,4	3,6
Italie	-1,4	0,6	7,6	7,5
Luxembourg	8,5	5,3	19,3	12,9
Pays-Bas	9,8	-5,6	11,0	8,0
Autriche	30,7	-5,1	39,3	21,7
Portugal	5,8	-6,5	16,5	13,2
Finlande	7,2	7,4	7,4	10,5
Suède	2,3	6,3	5,7	11,3
UE-15	3,5	-0,8	17,9	17,2

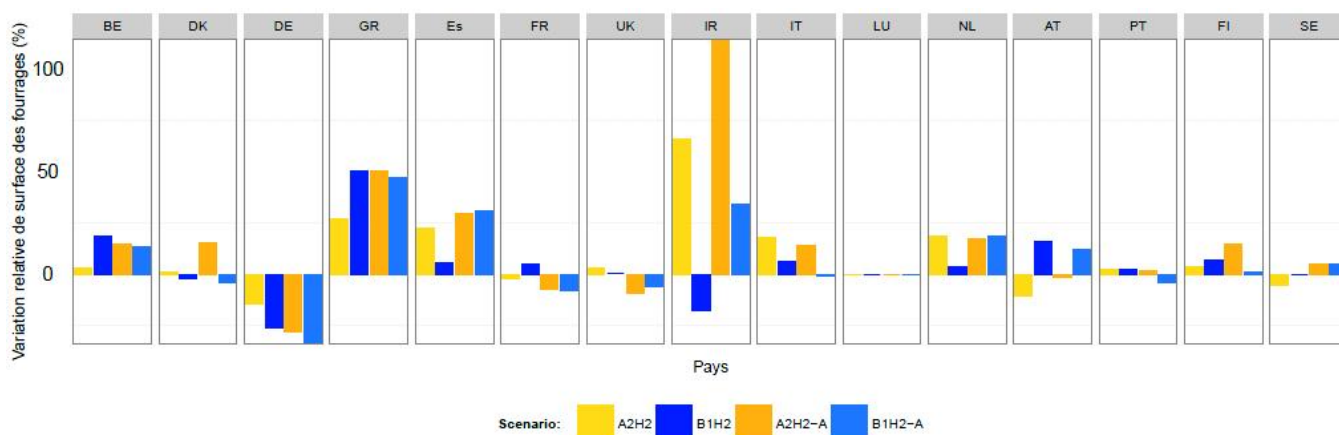
2.2. Réallocation des terres, productions agricoles et élevage

Le changement climatique et le doublement du taux de CO₂ influenceront les systèmes d'élevage de façons directe et indirecte. Nous nous intéressons ici aux seuls impacts indirects sur les animaux, *via* la sensibilité des productions végétales au changement climatique, lesquelles sont à la base de l'alimentation animale. Les résultats présentés sur la Figure 1 montrent que l'augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique et l'adaptation des pratiques agricoles provoqueraient un accroissement des surfaces en cultures fourragères de l'ordre respectivement de 7,0% et 6,5%, sans et avec l'adaptation des pratiques agricoles. Le blé tendre (+36,8%), le riz (+13,6%) et la betterave à sucre (+16,5%) seraient les principales cultures favorisées par le climat futur avec l'adaptation des pratiques agricoles.

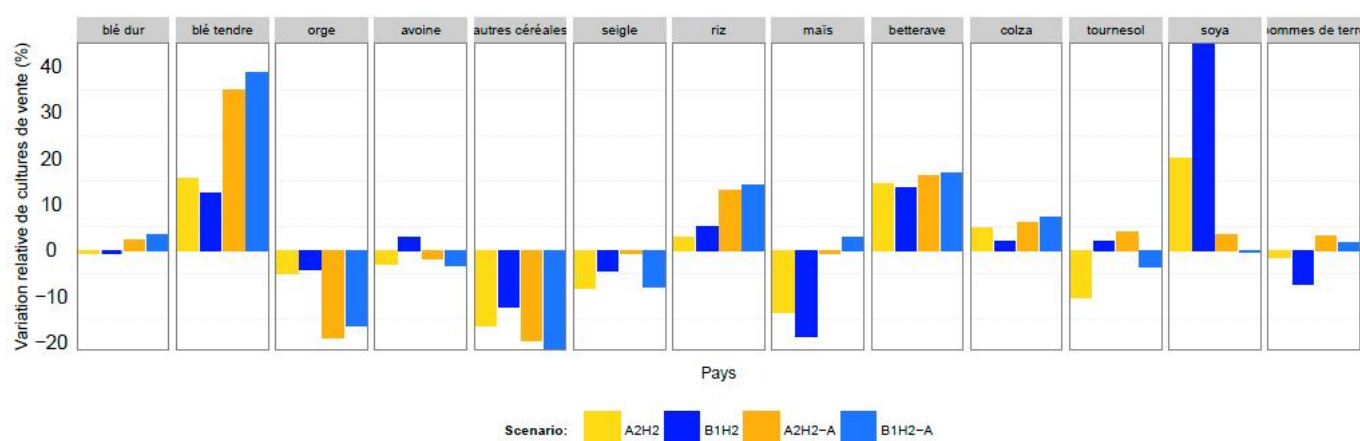
A contrario, le changement climatique aurait des effets négatifs sur la part de surface dévolue aux prairies, de l'ordre respectivement de -5,9 % et -20,7 %, sans et avec l'adaptation des pratiques agricoles (Figure 1). Une tendance similaire est calculée pour l'orge (-11,2 %), le seigle (-5,3 %) et le maïs (-7,6 %). L'une des raisons que l'on peut avancer pour expliquer ces modifications est la diminution prévue des précipitations de 10 à 50 mm et de 10 à 25 mm dans les régions du centre et du sud de l'Europe.

FIGURE 1 – Variation relative (%) des surfaces en a) cultures fourragères, b) cultures de vente et c) prairies, par rapport au scénario de référence (CTL) dans les pays de l’UE-15.

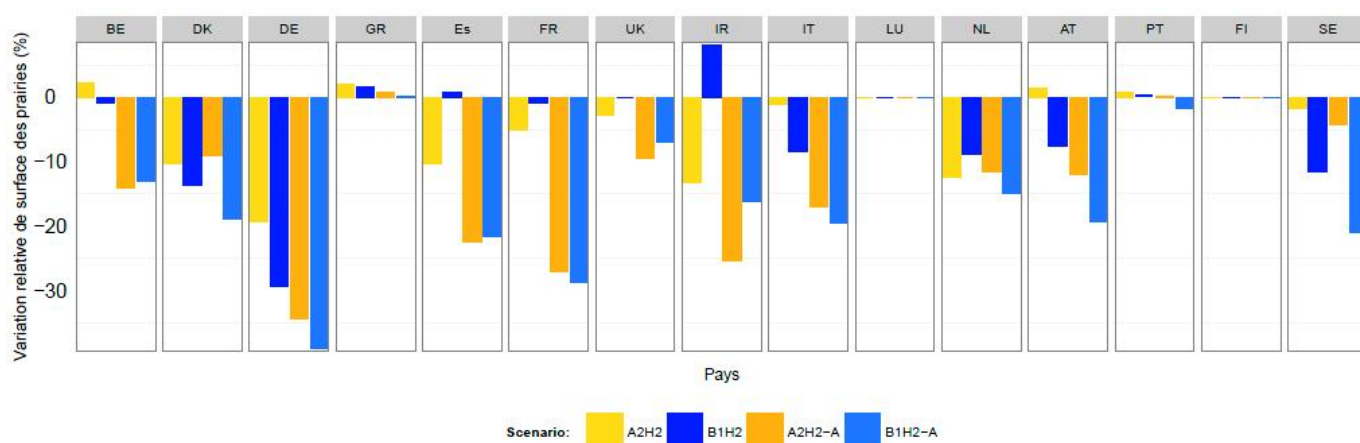
a) Fourrages cultivés selon les pays



b) Cultures de ventes dans l’UE-15



c) Prairies selon les pays



Le Tableau 4 montre la variation des activités du modèle en rapport avec la production animale, comparée avec le scénario de référence. Avec un changement faible des effectifs animaux calculés à long terme en situation de changement climatique, les activités animales verraient leur produit brut évoluer faiblement (environ +1 % dans la plupart des cas). La part de céréales et de fourrages produits sur l'exploitation augmenterait dans l'alimentation des animaux et les dépenses d'achats d'aliments concentrés baisseraient en moyenne de 4,2 et 1,4 sans et avec l'adaptation des pratiques agricoles respectivement. Rappelons que ces simulations sont réalisées par un modèle d'offre, à prix constants dans nos scénarios.

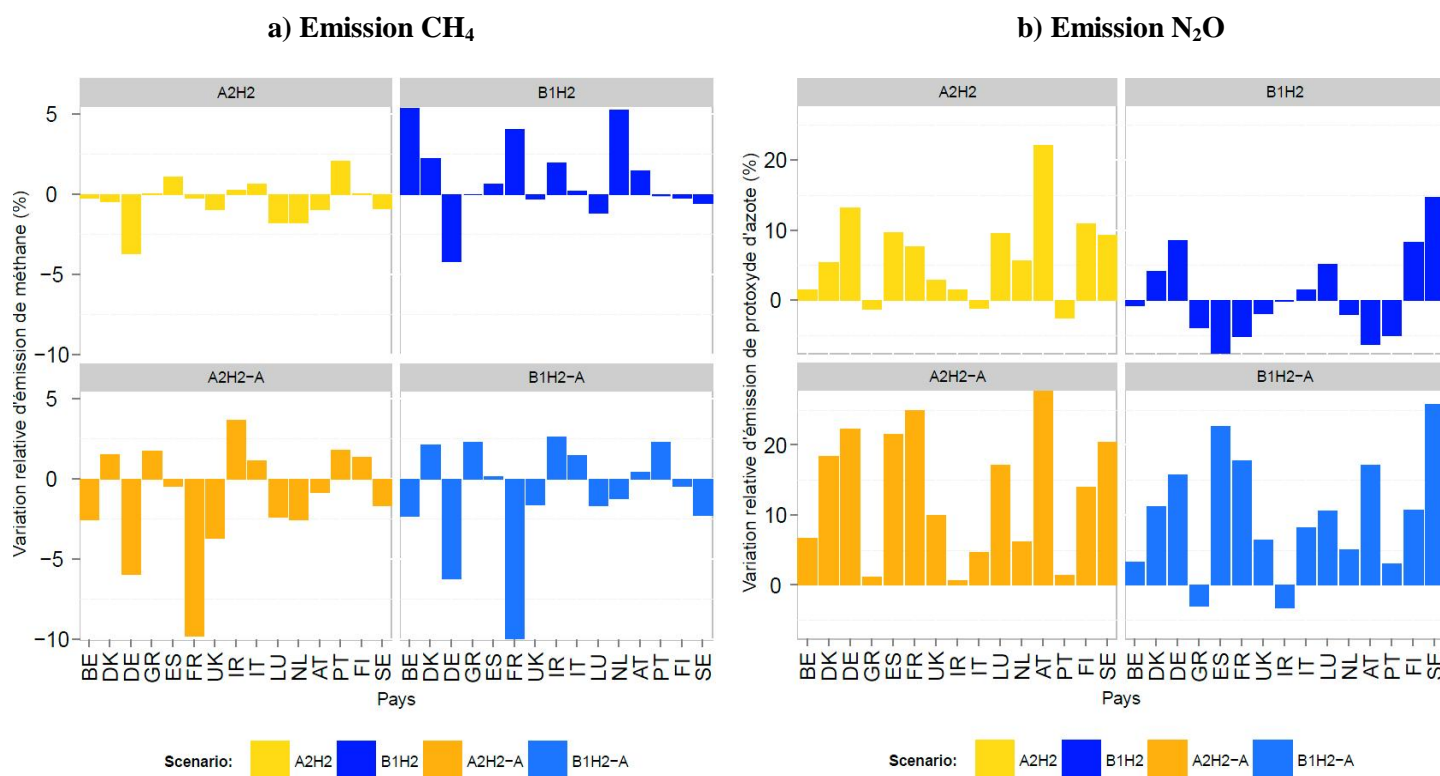
TABLEAU 4 – Variation relative (%) des activités animales dans les scénarios de changement climatique comparés au scénario de référence (CTL).

Scénario	Effectif animaux	Produit brut animal	Dépense alimentaire
A2H2	0,2	0,9	-2,4
B1H2	-0,4	-0,1	-0,3
A2H2-A	0,3	1,7	-4,2
B1H2-A	0,4	1,7	-4,2

2.3. Émissions de GES

Toutes choses égales par ailleurs, le changement climatique à horizon "H2", conduirait à augmenter les émissions de protoxyde d'azote de façon significative et à diminuer faiblement les émissions de méthane. Ce résultat est simulé dans la plupart des pays, avec néanmoins des écarts importants (Figure 2). Cet effet serait accru par l'adaptation et on peut l'expliquer de la façon suivante.

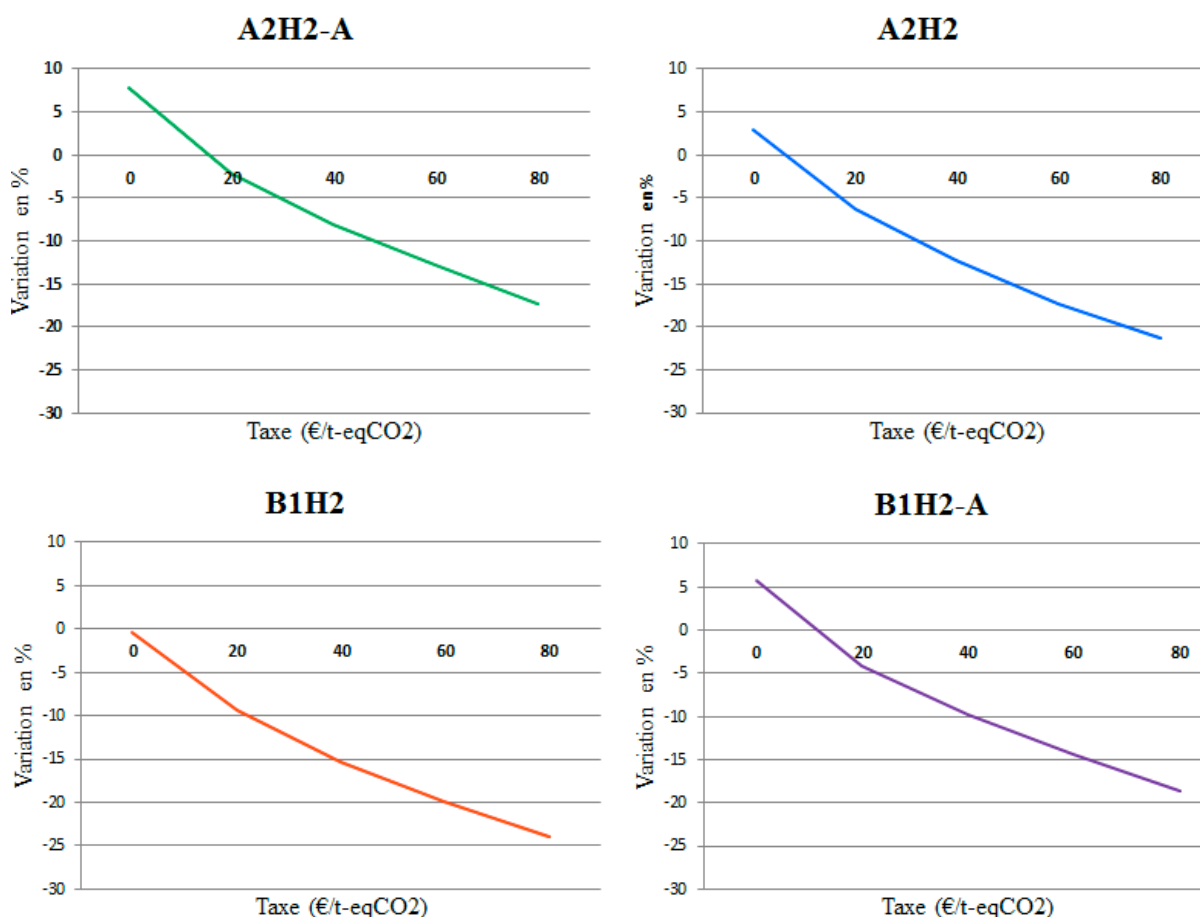
FIGURE 2 – Variation relative (%) des émissions a) de méthane et b) de protoxyde d'azote par rapport au scénario de référence (CTL), calculées pour les pays de l'UE dans les SRES "A2" et "B1" à horizon "H2", sans et avec adaptation des pratiques agricoles.



La hausse des émissions de N₂O est liée à la consommation d'intrants azotés, qui augmente avec les rendements et une productivité marginale plus favorable. Sans variation notable des prix relatifs (prix des intrants par rapport à ceux des produits), on pourrait assister à la poursuite de la tendance observée ces dernières décennies avec une consommation mondiale d'engrais azotés multipliée par sept entre 1960 et 1995 [18]. La faible baisse simulée des émissions de CH₄ s'explique dans le modèle par le fait que les productions fourragères, en particulier les prairies, sont en baisse et sont compensées par des aliments moins méthanogènes, même si la consommation d'aliments concentrés -de plus grande efficacité énergétique- baisse. S'y ajoute la légère baisse des effectifs animaux. La hausse des productions de céréales profite aussi à l'alimentation animale "sur la ferme". Compte tenu de leurs pouvoirs radiatifs respectifs, les émissions totales de GES d'origine agricole augmenteraient significativement, d'autant plus que serait intégrée l'adaptation des systèmes vis-à-vis du changement climatique.

L'effet d'une taxe (de 0 à 80 €/t-eq CO₂ sur les émissions de GES d'origine agricole a été étudié, afin de simuler la combinaison de l'atténuation des émissions par la régulation économique, d'une part, et des capacités d'adaptation des systèmes de production agricole, d'autre part. La régulation économique prend ici la forme d'une taxe directe sur les émissions. Illustrés par les Figures 3 et 4, les résultats de simulation montrent que les baisses d'émissions de GES attendues suite à l'introduction de la taxe diffèrent fortement, selon le scénario, avec de surcroît des différences importantes qui peuvent se dessiner d'un pays à l'autre. Les variations moyennes européennes montrent le caractère déterminant de l'adaptation.

FIGURE 3 – Variation relative (%) des émissions totales européennes de GES par rapport au scénario de référence (CTL) pour différents niveaux de taxe sur les émissions (€/t-eqCO₂) pour les 4 scénarios étudiés.



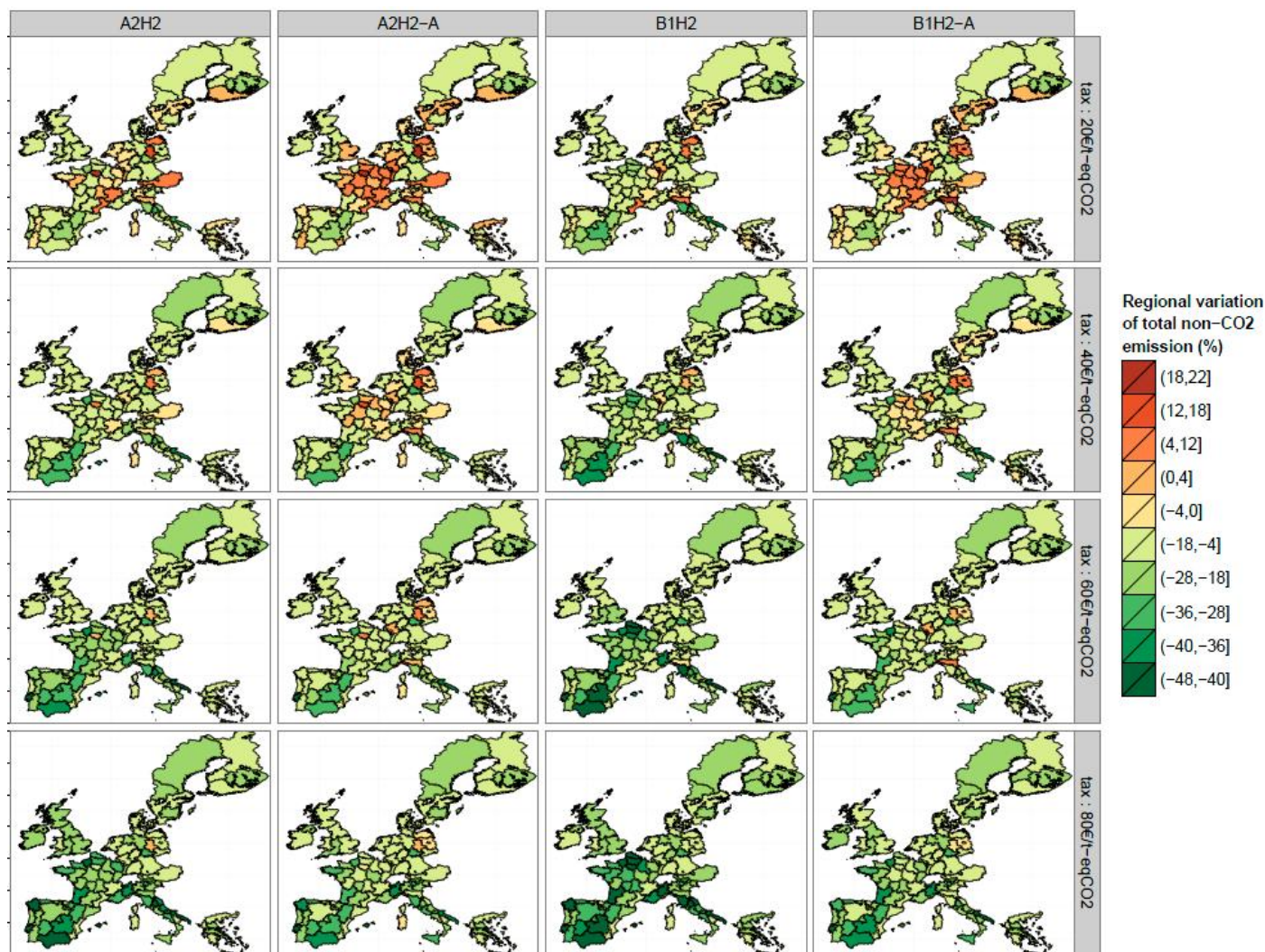
Conclusion et perspectives

Le changement climatique affectera de manière générale le développement de l'agriculture et de l'élevage, par ses effets sur la température, le rayonnement, les précipitations et la concentration CO₂ dans l'atmosphère, ce que nous avons analysé dans le cadre de scénarios climatiques de long terme (période 2070-2100).

Le couplage entre les modèles économique AROPAj et agronomique STICS utilisés dans la présente étude permet de prendre en compte les fonctions physiologiques des plantes ainsi que le fonctionnement économique des systèmes de production agricole dans leurs capacités d'adaptation au changement climatique. L'approche est néanmoins encore insuffisamment développée pour les prairies. Nous avons donc proposé une mise en œuvre du couplage, en le complétant par un calcul statistique appliqué à des "pseudo-données" issus des résultats d'un couplage entre modèles économique et biophysique réalisé à un niveau de résolution spatiale inférieure (*i.e.* association des modèles GLOBIOM et EPIC). On obtient par régression linéaire une évolution du rendement potentiel des prairies à un horizon rapproché, évolution dont on extrapole les effets à un horizon compatible avec ce

qui a été réalisé pour les cultures. En réintégrant l'impact du climat sur les prairies et fourrages, en phase avec les cultures, on espère améliorer la cohérence du modèle agro-économique d'ensemble.

FIGURE 4 – Variation relative (%) des émissions totales de GES selon les régions européennes, par rapport au scénario de référence (CTL), en fonction de différents niveaux de taxe sur les émissions (€/t-eqCO₂) pour les quatre scénarios étudiés.



En regard avec les productions animales, le principal résultat serait que l'adaptation des systèmes de production agricole accroîtrait fortement l'impact négatif du changement climatique sur la part de surface dédiée aux prairies. Cela tient à l'amélioration de la productivité marginale de la terre que le modèle de culture confère aux principales cultures de vente, laquelle induit une réallocation des terres en leur faveur. En conséquence, les émissions de GES sont fortement affectées, à la hausse. Quant aux productions animales proprement dites, sans que soient pris en compte les impacts directs du climat (dont on ne disposait pas), les effectifs animaux varieraient peu, toujours toutes choses égales par ailleurs. Mais les grands postes de l'alimentation animale seraient modifiés, avec une baisse de l'autoconsommation de fourrages, une hausse de l'autoconsommation de céréales et une baisse de l'alimentation concentrée achetée.

Remerciements

La recherche conduisant à ces résultats a été financée par le projet « VALIDATE » de l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR/2008-2012) dans le cadre de l'accord de subvention n° ANR-07-VULN-11-011, et par le projet européen « AnimalChange » financé, dans le cadre du 7^e programme cadre de la Communauté Européenne – FP7/2007-2013, par l'accord de subvention n°266018.

Références bibliographiques

- [1] AGHAJANZADEH-DARZI P., FRANK S., HAVLIK H., JAYET P.A. (2012): "Global change challenges for the European agricultural sector: A multi-scale model analysis", *Séminaire EcoProd*, Montpellier.
- [2] ANIMALCHANGE-FP7. (2012): "Model linkages between GLOBIOM, CAPRI, AROPAj for simulations of long-term climate change scenarios", Technical report, *Joint Research Centre (JRC)*, Institute for Environment and Sustainability.
- [3] BAKKENED M., EICKHOUT B., ALKEMADE R. (2006): "Impacts of different climate stabilization scenarios on plant species in Europe", *Global Environmental Change*, 16, 19-28.
- [4] TOPP CAIRISTIONA F.E., DOYLE CHRISTOPHER J. (1996): "Simulating the impact of global warming on milk and forage production in Scotland: 1. the effects on dry-matter yield of grass and grass-white clover swards", *Agricultural Systems*, 52, 213-242.
- [5] CANTELAUBE P., JAYET P.A., CARRE F., ZAKHAROV P., BAMPS C. (2012): "Geographical downscaling of outputs provided by an economic farm model calibrated at the regional level", *Land Use Policy*, 29, 35-44.
- [6] DE CARA S., HOUZE M., JAYET P.A. (2005): "Methane and nitrous oxide emissions from agriculture in the EU: a spatial assessment of sources and abatement costs", *Environmental and resource economics*, 32(4), 551-583.
- [7] DE CARA S., JAYET P.A. (1999) : Evaluation et régulation de l'effet de serre d'origine agricole, *L'Actualité Economique*, 75(4), 597-623.
- [8] DE CARA S., JAYET P.A. (2000) : "Régulation de l'effet de serre d'origine agricole: puits de carbone et instruments de second rang", *Economie et Prévision*, 143, 37-46.
- [9] DE CARA S., JAYET P.A. (2011): "Marginal abatement costs of greenhouse gas emissions from European agriculture, cost effectiveness, and the EU non-ETS burden sharing agreement", *Ecological Economics*, 70, 1680-1690.
- [10] FISCHER G., SHAH M., VAN VELTHUIZEN H. (2002): "Climate change and agricultural vulnerability, special report to the UN world summit on sustainable development, Johannesburg 2002. Technical report, *International Institute for Applied Systems Analysis*.
- [11] GALKO E., JAYET P.A. (2011): "Economic and environmental effects of decoupled agricultural support in the EU", *Agricultural Economics*, 42, 605-618.
- [12] GODARD C., ROGER-ESTRADE J., JAYET P.A., BRISSON N., LE BAS C. (2008): "Use of available information at a European level to construct crop nitrogen response curves for the regions of the EU", *Agricultural Systems*, 97, 68-82.
- [13] HANSON J.D., BAKER B.B. (1993): "Comparison of the effects of different climate change scenarios on rangeland livestock production", *Agricultural Systems*, 41, 487-502.
- [14] LECLERE D., JAYET P.A., DE NOBLET DUCOUDRE N. (2013): "Farm-level autonomous adaptation of European agricultural supply to climate change", *Ecological Economics*, 87, 1-14.
- [15] MOREAU J.C., LORGEOU J. (2007) : "Premiers éléments de prospective sur les conséquences des changements climatiques: impacts sur les prairies, le maïs, et les systèmes fourragers", *Fourrages*, 191, 285-295.
- [16] RUGET F., CLASTRE P., MOREAU J.C., CLOPPET E., SOUVERAIN F., LACROIX B., LORGEOU, J. (2012) : "Conséquences possibles des changements climatiques sur la production fourragère en France. ii. exemples de quelques systèmes d'élevage", *Fourrages*, 211, 243-251.
- [17] SOUSSANA J.F., TESSONNEYRE F., PICON-COCHARD C., CASELLA E., BESLE J.M., LHERM M., LOISEAU P. (2002) : "Impacts des changements climatiques et atmosphériques sur la prairie et sa production", *Fourrages*, 169, 3-24.
- [18] TILMAN D., CASSMAN K., MATSON P., NAYLOR R., POLASKY S. (2002): "Agricultural sustainability and intensive production practices nature", *Nature*, 418, 671-677.