
**ASSESSING THE RESILIENCE OF EUROPEAN FARMING SYSTEMS
TO CONSEQUENCES OF GLOBAL PEAK OIL
USING A DYNAMIC NITROGEN FLOW MODEL**

Thèse de Corentin **PINSARD**¹

Analysée par Chantal **GASCUEL**²

Directeur de thèse : François **LÉGER**, Ingénieur de recherche (ADR) INRAE, UMR SAD-APT (Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech)

Co-directrice de thèse : Sophie **MARTIN**, Chargée de recherche (HDR) INRAE, UMR SAD-APT (Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech)

Co-encadrement : Francesco **ACCATINO**, Chargé de recherche, INRAE, UMR SAD-APT (Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech)

L'analyse de la résilience des systèmes agricoles est généralement étudiée en réponse à des contraintes climatiques. La thèse de Corentin Pinsard prend un point de vue original, celui d'étudier l'effet de contraintes relatives à la baisse de la production mondiale de pétrole ou de contraintes découlant d'instabilités politiques et économiques de pays exportateurs, qui pourraient toutes entraîner une hausse des prix des intrants. Celle-ci entraînerait une diminution de leur approvisionnement, entraînant notamment des conséquences sur les systèmes agricoles européens qui en sont fortement dépendants, et, *in fine*, une baisse de la production agricole qui pourrait menacer la sécurité alimentaire. On peut être frappé par la clairvoyance à mettre, il y a quatre ans, ce sujet de recherche très actuel en chantier. Corentin Pinsard analyse ainsi la résilience de la production agricole face à la hausse des prix et aux pénuries d'approvisionnement en intrants, ici engrais minéraux et nourriture animale, en se focalisant sur des systèmes de productions végétales et de production animale ou mixtes. La résilience qu'il étudie est une résilience biotechnique, c'est-à-dire sans prendre en compte l'adaptabilité socio-économique des agriculteurs (formation, agilité...).

Pour se faire, Corentin Pinsard a développé un modèle dynamique des flux et stocks de biomasse au sein des systèmes agricoles, au pas de temps annuel, d'où sont extraits les flux et stocks d'azote annuel. Ce modèle n'est pas distribué (spatialisé). Il s'applique à l'échelle d'exploitations agricoles, ou de groupes d'exploitations définies sur de petits territoires, eux-mêmes pouvant être assemblés à l'échelle nationale. Ce modèle considère des usages des sols (cultures et prairies permanentes), au sein desquels un compartiment plante et un compartiment de sol sont distingués. Un compartiment animal interagit avec les usages des sols, en considérant l'alimentation animale et le devenir des déjections (effluents). Différentes

¹ Thèse préparée au sein de l'École doctorale 581 : agriculture, alimentation, biologie, environnement santé (ABIES), Spécialité de doctorat : Sciences agronomiques, Graduate School : Biosphera Référent : AgroParisTech, UMR SAD-APT (Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech), soutenue à Paris Saclay le 20 mai 2022.

² Membre de l'Académie d'agriculture de France, section 7 « Environnement et territoires ».

espèces animales et végétales peuvent être considérées. Le compartiment sol consiste en un stock d'azote organique et un bilan d'azote minéral. Une comparaison théorique entre ce nouveau modèle et différents modèles de la littérature : GRAFS, TYFA (*Ten Years For Agroecology*) est présentée et discutée, sans aller vers des comparaisons quantitatives, ce qui est toujours difficile, mais néanmoins éclairant, sur les impacts des choix de modélisation. L'atout de ce nouveau modèle est une représentation fine des systèmes agricoles fondée sur des données moyennes, prenant bien en compte des complémentarités animal-végétal, ce qui est bien mis en valeur ensuite dans la présentation et la discussion des résultats. On peut souligner l'importance de la réflexion et du travail réalisé par le seul fait de développer ce modèle. Celui-ci est utilisé tout au long du mémoire pour simuler l'effet de scénarios et estimer des indicateurs, parmi lesquels la robustesse, définie comme la capacité d'un système à résister à une perturbation, évaluée en intensité et en durée de perturbation, et le potentiel d'adaptation possible du système, évaluée par une capacité d'augmentation de la robustesse. Les scénarios simulés sont des scénarios de baisse progressive d'approvisionnement en intrants sur trente années (linéaire), sans changement de systèmes, puis avec changements de systèmes. Le potentiel d'adaptation est ensuite recherché en utilisant le modèle en mode optimisation, avec la visée de maximiser la production de nourriture et de minimiser les intrants, en faisant varier les compositions du cheptel et de la sole cultivée.

Trois petites régions agricoles françaises avec des compositions cultures-prairies-cheptel distinctes (« grandes cultures » – Plateau Picard, « élevage de monogastriques et de bovins laits intensifs » – Bretagne Centrale, et « élevages de ruminants semi-extensifs » – Bocage Bourbonnais) sont tout d'abord testées, en assimilant ces territoires (quelques centaines de km²) à des typologies d'exploitation partageant une certaine homogénéité (climatique, pédologique et agricole). A court terme (dix ans), les élevages de ruminants semi-extensifs sont les plus robustes, les élevages de monogastriques et de bovins laits intensifs les moins robustes. A long terme (trente ans), les deux systèmes d'élevages sont plus robustes que ceux en grandes cultures, avec une grande variabilité selon la composition cultures-prairies-cheptel, qui détermine la dépendance aux intrants et l'intégration entre cultures et élevage (fonction de l'autosuffisance en nourriture animale selon les animaux). La part de prairies permanentes et temporaires dans l'assolement comme la part de concentrés dans les régimes des ruminants expliquent moins les niveaux de robustesse des systèmes avec élevage, que la densité animale et la part d'engrais de synthèse dans la fertilisation. Un système d'élevage de bovins viande extensifs de la région agricole Alentejo est aussi étudié (cadre d'un projet européen). Ce système constitue un bon compromis entre la robustesse de la production de viande et l'atténuation du dérèglement climatique. Des améliorations sont suggérées pour augmenter la résilience des systèmes agricoles d'élevage et sont les suivantes : augmentation de la surface de prairies permanentes riches de biodiversité, riches en légumineuses et plus productives, engraissement à l'herbe des bouvillons plutôt qu'aux concentrés, réduction de la taille du troupeau et augmentation de la productivité animale.

Plus généralement, les adaptations suggérées par le modèle dépendent de la composition cultures-prairies-cheptel du système agricole. Un remplacement des élevages de ruminants par des élevages de monogastriques permettraient, ces derniers ayant une efficacité de l'usage de l'azote plus élevée, de légèrement baisser le recours aux intrants tout en maximisant un peu la production agricole. Sans recours aux intrants, la maximisation de la production agricole est possible avec une baisse de nombre d'animaux, monogastriques et ruminants, s'ils sont nombreux, et une augmentation des surfaces d'oléoprotéagineux pour l'alimentation animale et de légumes secs pour l'alimentation humaine, augmentant ainsi le

flux de fixation symbiotique de l'azote. Ainsi les changements qui diminuent la dépendance aux intrants sont, selon le modèle et scénarios testés : l'augmentation des surfaces de légumineuses, l'intégration des cultures à l'élevage, la baisse du besoin en azote minéral des cultures, c'est-à-dire des rendements agricoles objectifs, une baisse des concentrés dans les régimes des animaux. Ces changements font partie des transformations agroécologiques allant vers une déspecialisation des systèmes agricoles.

La discussion indique la complémentarité de cette approche de modélisation avec d'autres types d'approches (enquêtes, ateliers participatifs, analyses de la littérature grise...) afin de pouvoir élargir et de mieux spécifier les solutions possibles. Cette analyse s'est par ailleurs limitée à certaines conditions : scénario climatique optimiste, pas de prise en compte de la séquestration et du stockage de carbone nécessaire à la neutralité énergétique de l'agriculture.

Ce travail de thèse a montré, dans les systèmes agricoles étudiés, qu'une baisse d'approvisionnement en engrais de synthèse et nourriture animale entraînerait une baisse significative de la production agricole, avec ou sans changements de pratiques et de compositions des systèmes agricoles. Néanmoins, certains changements, comme la baisse de la compétition alimentation humaine-alimentation animale, l'intégration cultures-élevages, la baisse des rendements agricoles et l'augmentation des surfaces de légumineuses, permettraient de contenir la baisse de la production agricole tout en contribuant à l'atténuation du dérèglement climatique. La mise en place de changements devrait toutefois être accompagnée pour lever des verrous sociotechniques.

Le champ de recherche ouvert par ce travail est large, l'évaluation de la résilience apparaît comme complexe et longue, face à des enjeux urgents. Des perspectives importantes sont dessinées en fin de mémoire : scénarios de ruptures d'approvisionnements en intrants liés à des instabilités politiques et économiques ou encore considérer des perturbations liées au dérèglement climatique ; systèmes agricoles plus complexes, avec des cultures associées, des cultures intermédiaires. Plus généralement, une approche plus complète intégrant *ad minima* N et P, l'énergie.

Cette thèse s'est inscrite dans le cadre du projet Horizon 2020 SURE-Farm et dans le cadre de l'institut de convergence Cland. Quatre publications sont référencées sur le WOS (Web of Science), d'autres sont annoncées en préparation. La thèse est rédigée en anglais dans sa totalité, à l'exception d'un résumé étendu.

La thèse de Corentin Pinsard apporte une contribution originale et entre pleinement dans le champ d'intérêt de l'Académie d'agriculture de France. Le sujet traité, l'originalité scientifique, l'ampleur du travail et sa remarquable publication en font une thèse qui mérite de figurer sur le site de l'Académie, avec reprise par le Mensuel, à titre de valorisation.