

---

## **MODÉLISATION DES TRANSITIONS EN AGRICULTURE : ÉNERGIE, AZOTE ET CAPACITÉ NOURRICIÈRE DE LA FRANCE DANS LA LONGUE DURÉE (1882-2016) ET PRÉMICES POUR UNE GÉNÉRALISATION À L'ÉCHELLE MONDIALE**

Thèse de Souhil **HARCHAOUI**<sup>1</sup>

Analysée par Jean-Louis **RASTOIN**<sup>2</sup>

**Directeur de thèse** : Petros CHATZIMPIROS, Maître de conférences en géographie, Université de Paris

La recherche de Souhil Harchaoui est à la fois originale et pertinente. Originale, car elle s'intéresse à un thème encore peu travaillé par la communauté scientifique. Le sujet de la thèse se situe en effet au carrefour de trois mondes sous fortes tensions internes, sécantes et externes : les secteurs de l'agriculture, de l'alimentation et de l'énergie. Ces trois secteurs sont étudiés en relation avec l'objectif d'autonomie alimentaire à l'échelle d'un pays (la France), puis de la Planète. L'analyse diachronique menée en France (1882-2016) est solide et permet de déboucher sur un éclairage prospectif mondial à partir d'un modèle quantitatif construit sur la période 1961-2013.

La problématique de recherche est également pertinente, car en phase avec les préoccupations croissantes, voire les urgences, suscitées par la crise polysémique qui frappe le monde contemporain. Cette crise est marquée par trois composantes interdépendantes : 1) les inégalités sociales, notamment dans le domaine vital de l'alimentation, avec plus du tiers de l'humanité en situation de malnutrition quantitative et surtout qualitative ; 2) la dégradation, jusqu'à l'épuisement dans certains cas, des ressources naturelles dont certaines — la terre et l'eau — sont essentielles à la production de biomasse et donc d'aliments ; 3) le changement climatique qui menace gravement les écosystèmes et au premier chef l'agriculture.

En résumé, Souhil Harchaoui, en faisant l'hypothèse que la production alimentaire est fondée sur les matières premières agricoles, se pose la question centrale de la capacité nourricière de la Terre et, conséquemment, celle des facteurs qui la déterminent, c'est-à-dire les ressources naturelles ou industrielles. Pour traiter cette question, il identifie et mesure les impacts négatifs de l'industrialisation à partir du cas de l'azote et établit le bilan énergétique de l'agriculture.

La méthodologie adoptée est robuste du fait d'une question de recherche bien ciblée. L'auteur mobilise le concept de « métabolisme agricole » combiné à celui de « métabolisme social » issu des écrits de Marx et Engels remontant aux années 1870. Le métabolisme est un cycle biologique décrivant le processus chimique d'assimilation de molécules d'origine externes par

---

<sup>1</sup> Thèse de doctorat de géographie, spécialité géographie et environnement, Université de Paris, École doctorale Science des Sociétés 624, Laboratoire Interdisciplinaire des Énergies de Demain UMR 8236, soutenue le 9 décembre 2019.

<sup>2</sup> Jean-Louis RASTOIN, membre de l'Académie d'agriculture de France, section 10, « Économie et politique ».

les organismes vivants pour croître, se reproduire et interférer avec leur environnement. Dans la thèse, le cycle de l'azote sert de base pour analyser le cas de l'agriculture et de ses échanges avec l'extérieur (utilisation de la synthèse de l'azote par les légumineuses ou épandage d'engrais issus d'un processus industriel d'une part, émission de dérivés de l'azote par les animaux et l'homme, d'autre part). Dans un second temps, la recherche est élargie au cycle de l'énergie absorbée et produite par l'agriculture. Il s'agit alors de coupler azote, énergie et matières au sein du « métabolisme agricole » en tant que marqueur biophysique des transitions techniques. Enfin, le bilan énergétique est envisagé du point de vue de la « capacité nourricière » de l'agriculture. L'analogie entre biologie et sociétés humaines imaginée par les marxistes, puis les structuralistes, est ici féconde, car elle permet de relier les flux de production agricole et de consommation alimentaire. C'est l'objet d'un modèle statistique utilisant la base de données Faostat, la plus complète (et la plus ergonomique) disponible aujourd'hui sur ces questions<sup>3</sup>. On aborde ainsi le sujet des transitions sociales du point de vue des transitions technologiques et des contraintes biophysiques à travers une modélisation systémique, seul outil permettant de dépasser l'approche verticale, « en silo », qui connaît aujourd'hui des limites tant opérationnelles que théoriques.

La thèse est organisée en quatre chapitres à partir d'articles publiés par l'auteur dans des revues scientifiques. Cette pratique est aujourd'hui courante dans les doctorats, mais elle rend délicate la mise en cohérence du corpus de recherche.

Le chapitre 1 (Modélisation de la production agricole), que l'on doit considérer plutôt comme une introduction apportant les données de cadrage, est consacré à la France. Il montre que sur la longue période (1882-2016), la production nette agricole a plus que triplé, mais n'a décollé qu'à partir de 1950. C'est la résultante d'une augmentation considérable des rendements et de l'efficacité de conversion énergétique des aliments pour animaux. L'innovation technique, l'industrialisation et l'urbanisation expliquent dès lors la diminution de 25 % de la superficie agricole en 134 ans. Une analyse en termes de « terres virtuelles » montre que si la France reste exportatrice nette de terres du fait de ses produits végétaux (céréales et boissons alcoolisées principalement), elle est fortement dépendante de l'étranger pour l'alimentation de ses troupeaux de bovins et porcins et de ses volailles en maïs et soja (équivalent de près de trois millions d'ha d'importations nettes).

Le chapitre 2 (Moyens de production : équipements des fermes et entrées d'azote et d'énergie) établit les bilans azotés et énergétiques de l'agriculture française. Si ces bilans étaient équilibrés dans le système de production traditionnel à base de polyculture-élevage et de traction animale, ils deviennent négatifs avec l'industrialisation à partir des années 1950. Cette industrialisation se manifeste par l'utilisation d'énergie fossile (dérivés du pétrole) pour les équipements mécanisés ; la fertilisation par des engrais azotés de synthèse (eux-mêmes très exigeants en gaz) ; l'expansion des produits phytosanitaires tirés du carbone fossile par l'agrochimie ; l'utilisation abondante de plastiques dans les bâtiments agricoles, la protection physique des cultures et les emballages. L'agriculture produisait en énergie 2 fois ce qu'elle consommait il y a un siècle, alors qu'elle « brûle » aujourd'hui l'équivalent de 4 fois sa production énergétique. On est passé d'un métabolisme agricole pré-industriel, réinvestissant le surplus azoté (prairies à légumineuse, fumier, etc.) dans son fonctionnement (bioéconomie circulaire à nouveau d'actualité), à un métabolisme artificialisé provoquant un déficit. Comme le souligne Souhil Harchaoui, on est en présence d'une « *substitution des forces musculaires*

---

<sup>3</sup> La plupart des bases de données agricoles dans le monde (notamment Agreste en France comme vient de le souligner le rapport 2020 de la Cour des Comptes) sont loin d'avoir ces qualités (note du rédacteur).

*qui se nourrissaient de biomasse renouvelable par un système mécanisé nourri d'énergie fossile* ».

Le chapitre 3 (Caractérisation des transitions agricoles et implications pour la capacité nourricière) montre le lien entre production agricole et consommation alimentaire en mobilisant l'indicateur du retour sur investissement énergétique (EROI, *energetic return on investment*, production agricole nette/quantité d'énergie utilisée) dans une démarche prospective. Les calculs sophistiqués de l'auteur permettent de tirer la conclusion suivante : « *Les transitions agricoles se sont traduites par une multiplication par 4 du surplus agricole et par une réduction à quasi zéro de l'autosuffisance en énergie et en azote pour l'agriculture. Avec un EROI de 2 jusqu'en 1950, l'agriculture préindustrielle consommait autant d'énergie pour fonctionner qu'elle en fournissait en surplus agricole exportable pour soutenir les populations non agricoles* ». Durant la période d'industrialisation de l'agriculture, l'EROI a été multiplié par 4, ce qui a permis d'améliorer la ration alimentaire moyenne de la population en France comme dans l'ensemble du monde.

Le chapitre 4 (Capacité nourricière mondiale en fonction du métabolisme azote et rapport aux limites planétaires) propose un changement d'échelle géographique — du cas français au Monde — pour estimer le degré potentiel d'une autosuffisance alimentaire globale. Pour cela, l'auteur élabore un modèle physique à l'aide d'équations calculant les bilans azotés, énergétiques et nutritionnels de la planète reliant des variables de production (superficies, productivité, intrants, échanges internationaux) aux calories consommées. La croissance démographique attendue à l'horizon 2050 est importante (+ 2,3 milliards d'habitants entre 2016 et 2050 pour avoisiner 10 milliards de personnes à cet horizon). Associée à l'asymptote déjà constatée de la productivité des végétaux cultivés et des animaux d'élevage du fait des pressions environnementales (sol, eau, climat), cette situation implique une nouvelle transition agricole et alimentaire, c'est-à-dire un changement de modèle socio-technique. Une telle transition passe notamment par la substitution des énergies fossiles et de ses produits dérivés par des énergies renouvelables, des molécules de synthèse par des molécules issues de la biomasse et par une optimisation de l'usage des sols.

Souhil Harchaoui avertit en conclusion : « ... *En mettant en perspective les taux de croissance requis pour relever le défi d'une agriculture mondiale qui, à l'horizon 2050, respecte à la fois les critères de sécurité alimentaire et la limite de soutenabilité planétaire (...), il est urgent d'accélérer (la conception) et la mise en œuvre de meilleures pratiques de gestion des systèmes agricoles...* ».

Ce travail de recherche est remarquable par son ampleur et sa profondeur, à la fois théorique et empirique. Il apporte de précieux matériaux pour renouveler la compréhension des enjeux et des phénomènes à l'œuvre dans les systèmes agricoles et ouvrir des pistes de construction de résiliences face aux chocs attendus à moyen et long terme. Les résultats de la recherche débouchent logiquement sur un appel à rectifier des trajectoires technologiques initiées il y a six décennies, désormais confrontées à des impasses, et à ouvrir des perspectives pour atteindre un objectif d'alimentation durable pour tous.

Finalement, on relèvera que la thèse, si elle possède les qualités requises pour un diagnostic scientifiquement solide et éclairant sur le sujet des systèmes agricoles, aurait bénéficié d'une recension plus complète de la littérature consacrée aux systèmes alimentaires. On mentionnera notamment les travaux de l'école francophone d'économie agroalimentaire fondée à Rennes par le professeur Louis Malassis et poursuivis dans le cadre des laboratoires

d'Agropolis à Montpellier<sup>4</sup>. Le recours au concept de système alimentaire défini par cette école comme un « *ensemble interdépendant d'acteurs concourant à la satisfaction des besoins alimentaires d'une population dans un espace géographique donné* »<sup>5</sup> aurait permis d'analyser sans incomplétude le lien entre agriculture (sous-ensemble d'un système alimentaire) et consommation alimentaire.

En amont et en aval de l'agriculture, il existe en effet de nombreux et incontournables opérateurs privés et publics qui permettent — des intrants agricoles à l'assiette des mangeurs — d'élaborer, d'acheminer, puis de consommer les aliments. Dans la configuration agroindustrielle des systèmes alimentaires, ces opérateurs contribuent à un approvisionnement régulier de la population avec des aliments à bas prix dotés d'une sûreté alimentaire et d'une praticité en phase avec les modes de vie. En contrepartie, ces activités représentent une fraction importante des coûts énergétiques, des émissions des gaz à effet de serre, des pollutions environnementales et surtout génèrent des externalités négatives sanitaires très préoccupantes. D'un point de vue économique, la part des matières premières agricoles dans le prix final des aliments décroît dans le processus d'industrialisation et ne représente plus aujourd'hui en moyenne que 6 % de ce prix dans un pays comme la France<sup>6</sup>. Il est en conséquence nécessaire de prendre en compte la totalité des filières agroalimentaires lorsque l'on traite de diagnostic et prospective de la « capacité nourricière » d'un territoire régional, national ou international<sup>7</sup>.

Un projet stimulant pour prolonger la recherche de Souhil Harchaoui par une approche renforçant la transversalité par la multidisciplinarité, qui mérite que cette analyse figure sur le site de l'Académie à titre de valorisation.

---

<sup>4</sup> Malassis L., 1979, *Économie agroalimentaire, tome 1. Économie de la consommation et de la production agroalimentaire*, Cujas, Paris : 437 p.

<sup>5</sup> Rastoin J.L., Ghersi G., 2010, *Le système alimentaire mondial : concepts et méthodes, analyses et dynamiques*, éd. Quae, Paris : 565 p.

<sup>6</sup> Boyer P., Butault J.-P., 2013, L'Euro alimentaire : que rémunèrent nos dépenses alimentaires ? La lettre de l'observatoire de la formation des prix et des marges des produits alimentaires, n°2, FranceAgriMer, Paris : 6 p.

<sup>7</sup> Voir à ce sujet le récent rapport du groupe de travail « Transition alimentaire, filières et territoires » de l'Académie d'agriculture de France (AAF, 2019)

<https://www.academie-agriculture.fr/publications/publications-academie/avis/rapport-transition-alimentaire-pour-une-politique-nationale>