

XXXIV UNIVERSITAT D'ESTIU D'ANDORRA
DEL 4 AL 7 DE SETEMBRE DEL 2017

Sessió del 6 de setembre del 2017

**NOUS N'AVONS QU'UNE SEULE PLANÈTE —
L'INNOVATION DANS LES SYSTÈMES ALIMENTAIRES
POUR FAIRE FACE AUX DÉFIS PLANÉTAIRES**

Olivier Le Gall

Enginyer agrònom i doctor en biologia
Institut Nacional de la Recerca Agronòmica (INRA)

Ingeniero agrónomo y doctor en biología
Instituto Nacional de la Investigación Agronómica (INRA)

Ingénieur agronome et docteur en biologie
Institut National de la Recherche Agronomique (INRA)

Per citar aquest article / Para citar este artículo / Pour citer cet article :

LE GALL, Olivier. « Nous n'avons qu'une seule planète – L'innovation dans les systèmes alimentaires pour faire face aux défis planétaires » [en línia], a: Universitat d'Estiu d'Andorra (34a : 4 - 7 set., 2017 : Andorra la Vella). *Tecnologia i humanitat, llums i ombres = Tecnología y humanidad, luces y sombras = Technologie et humanité, lumières et ombres*. Andorra: Govern d'Andorra. Ministeri d'Educació i Ensenyament Superior. Universitat d'Estiu d'Andorra, 2018, p. 57-82 (978-99920-0-857-7) <<http://www.universitatestiu.ad/UEA2017>>

S'alimenter est l'un de nos besoins les plus fondamentaux. Même si cela nous ramène – désagréablement ? – à notre animalité, on conçoit aisément que face aux défis auxquels fait face la planète, l'alimentation a une place particulière. Imaginons un instant que nous, humains, décidions à l'extrême limite de tout arrêter (transports, communications, et même éducation, etc.) : un tel sevrage d'humanité serait sans aucun doute insurmontable pour chacun et collectivement. Et pourtant même ainsi, il est un besoin auquel on n'échappera pas : s'alimenter. Refermons cette brève escapade dans un monde apocalyptique heureusement virtuel aujourd'hui, et revenons dans notre monde de confort et de progrès, pour mieux réaliser que notre mode de vie citoyen tend à nous faire oublier ou en tout cas négliger notre relation primordiale à l'alimentation.

L'exigence alimentaire conditionne plus que tout l'organisation des sociétés humaines. Cela a toujours été un objet d'innovation et un moteur de l'innovation : c'est pour s'alimenter que l'humanité a « inventé » le commerce, l'agriculture, et même probablement le langage. *A contrario*, les difficultés d'accès à la ressource alimentaire ont toujours été un objet de fractures, de révolutions et de guerres. Il y a un enjeu de paix à accorder aux systèmes alimentaires toute la place qu'ils méritent dans notre esprit. C'est particulièrement crucial à notre époque où l'Humanité, et même la planète, font face à des défis sans précédents connus, qui appellent impérativement à des transitions dont on sait qu'elles ne seront pas aisées à engager collectivement.

Les systèmes alimentaires, de l'environnement à la santé, face à des défis sans précédent

Tout d'abord, pour aborder cette question, il nous faut poser que c'est un système très cohérent qui doit s'engager dans ces transitions. Amont (agriculture, environnement, climat) et aval (transformation, approvisionnement, nutrition, santé) font système : ce système que nous appellerons par la suite « système alimentaire » (« food system » en anglais). Les solutions à des questions posées dans un des compartiments du système alimentaire trouvent souvent une solution dans un autre compartiment. Inversement, les externalités d'un des compartiments posent fréquemment des questions dans les autres compartiments. Il ne faut surtout pas les opposer malgré la tendance générale (les agriculteurs

seraient des pollueurs, alors même qu'ils nous nourrissent) ; il faut même les mettre en solidarité et en synergie parce que c'est l'ensemble du système qui entre dans des cycles qui peuvent être vertueux ou vicieux. L'évaluation internationale de la connaissance, la science et la technologie en agriculture pour le développement (*International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development, IAASTD*¹) le rappelait en 2009, en évoquant l'interconnexion inévitable des rôles et des fonctions de l'agriculture (« *The inescapable interconnectedness of agriculture's roles and functions* »).

En ce début de troisième millénaire, les systèmes alimentaires font face à des défis planétaires sans précédents : sociaux, économiques, environnementaux et notamment climatiques.

Des défis sociaux d'abord. La population humaine est en forte croissance. Les démographes prévoient que cette croissance ne va se stabiliser que dans plusieurs décennies durant lesquelles, après l'Asie aujourd'hui, c'est l'Afrique qui verra sa population croître rapidement. En 2009, l'organisation des Nations Unies pour l'agriculture et l'alimentation (FAO) prévoyait la nécessité d'un accroissement de 70% de la disponibilité alimentaire d'ici à 2050². Cette croissance s'effectue dans un contexte à la fois de globalisation et d'accroissement des disparités locales, sources de tensions sociales. L'exode rural se généralise au niveau planétaire : comme nous l'avons connu en Europe depuis la révolution industrielle et notamment au ^{xx}e siècle, de moins en moins de mains doivent nourrir de plus en plus de bouches.

Des défis économiques ensuite. La part de l'alimentation dans le budget des ménages a diminué environ de moitié en deux générations selon l'INSEE³. Cela est le résultat d'une concentration des activités de production, de transformation et de distribution de l'offre alimentaire : grandes exploitations en monoculture, multinationales alimentaires, grande distribution. Difficile d'imaginer, quand on voit une publicité pour de la viande de porc à un prix dérisoire, que pour cela un éleveur a trouvé moyen de vivre dignement, et que les porcs ont été élevés dans les standards minimaux de bien-être animal. Si

1 Agriculture at a crossroads: synthesis report ; <http://hdl.handle.net/20.500.11822/7862>

2 Comment Nourrir le Monde en 2050 ; <http://www.fao.org/wsfs/forum2050/wsfs-forum/fr/>

3 « Cinquante ans de consommation alimentaire : une croissance modérée, mais de profonds changements » <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1379769>

un ré-équilibre des approvisionnements vers plus de « locavorie » est souhaitable pour éviter des transports inutiles et stimuler les économies locales et le tissu humain qui les sous-tend, un rapide calcul indique que pour nourrir les 12 millions d'habitants de l'agglomération parisienne, il faudrait six fois la surface agricole de l'Île-de-France : les productions locales ne suffisent déjà plus pour nourrir des métropoles toujours plus gigantesques (et Paris n'est ni la plus grande des métropoles, ni celle qui est située dans la région la moins cultivable du monde !). De surcroît, l'interrogation croît quant à l'usage de terres arables pour un usage non-alimentaire : un questionnement légitime mais qu'il faut remettre dans son contexte. Outre qu'une partie importante de la production agricole n'est pas directement destinée à l'alimentation de première nécessité mais à l'alimentation « plaisir » (par exemple les vignobles), de tout temps l'agriculture a produit d'autres denrées qu'alimentaires. La règle des quatre F (« *food-feed-fiber-fuel* » pour « nourriture humaine et animale, fibres, énergie ») se traduit mal en français mais se perpétue dans le temps : une partie importante des surfaces cultivées sert toujours à l'alimentation animale, à la production de biomatériaux plus diversifiés aujourd'hui qu'hier, ou à la production de biocarburants (autrefois, une partie importante de la production était destinée aux animaux de travail et de transport).

Des défis environnementaux enfin. Alors que les systèmes alimentaires contribuent largement à l'empreinte écologique de l'Humanité, nos sociétés prennent conscience de la valeur de l'environnement (mais pas toujours de la place qu'a joué l'agriculture pour le façonner). La crise de la biodiversité est sans doute la première dont nous ayons pris conscience, dans la seconde moitié du siècle dernier, et cette conscience a émergé en partie *via* un livre qui mettait en cause l'agriculture et notamment l'usage de pesticides, « *Silent Spring* », de Rachel Carson (1962). Cependant, les intrants chimiques ne sont pas la seule voie par laquelle la production alimentaire impacte la biodiversité : de manière générale aucune pratique agricole n'est neutre pour l'environnement, y compris les moins intensives. La recherche d'un équilibre entre préserver les espaces et les partager (« *land sparing* » vs. « *land sharing* ») entre production et biodiversité, entre produire de manière plus intensive en préservant des espaces naturels, ou plus extensive en préservant de la biodiversité dans les zones cultivées, relève d'un choix stratégique et politique crucial bien que rarement explicite. En fait, collectivement on voudrait les deux !

Parmi ces défis, une place particulière pour la crise climatique

Parmi les défis environnementaux, la crise climatique est particulièrement préoccupante. Du fait de leur place centrale dans la vie de nos sociétés, il n'est pas étonnant que les systèmes alimentaires subissent le dérèglement climatique et que d'autre part ils y contribuent ; en réalité ils peuvent faire partie des solutions, comme on le verra plus loin. Il convient donc d'innover pour les adapter aux excès climatiques à venir, pour atténuer leur potentiel d'émission de gaz à effets de serre, et – c'est encore plus ambitieux – de « miner » le dioxyde de carbone atmosphérique au profit des cultures et de l'enrichissement durable des sols en matières organiques.

Les aléas climatiques ont toujours mis en danger la production agricole et l'équilibre de la société, de même que les invasions biologiques l'ont fait principalement dans la période post-colombienne⁴. Les climatologues prévoient, et c'est ce qu'on observe déjà, non seulement un réchauffement global de la planète mais aussi, et c'est ce qui aura sans doute l'impact le plus fort sur l'agriculture, une augmentation de la fréquence et de la gravité de ces aléas climatiques : sécheresses, gels, tempêtes, etc. La Lloyd's of London a publié en 2015⁵ une analyse économique des conséquences possibles de ces crises liées aux aléas climatiques, qui montrait à quel point l'effet amplificateur des marchés sur les fluctuations de disponibilité des produits alimentaires pourrait induire des effets catastrophiques sur les prix des denrées alimentaires – notamment le riz –, et en cascade des risques d'émeutes et de chocs boursiers. C'est une urgence que de s'adapter à ce dérèglement en grande partie inéluctable aujourd'hui, et pour cela d'imaginer des systèmes alimentaires plus résilients dans chaque région du monde et globalement.

4 Il n'y a qu'à songer à la grande famine en Irlande au milieu du XIX^e siècle, causée par une épidémie foudroyante de mildiou de la pomme de terre (*Phytophthora infestans*) débarqué du Nouveau Monde dans une société britannique mal organisée pour y résister, qui a provoqué une mortalité et une émigration massives ; 170 ans plus tard, l'Irlande est toujours loin d'avoir retrouvé sa population du début du XIX^e siècle. Sans compter qu'aujourd'hui encore, le mildiou de la pomme de terre est un des « grands comptes » en ce qui concerne l'usage de pesticides.

5 Food system shock: The insurance impacts of acute disruption to global food supply ; <https://www.lloyds.com/news-and-insight/risk-insight/library/society-and-security/food-system-shock>

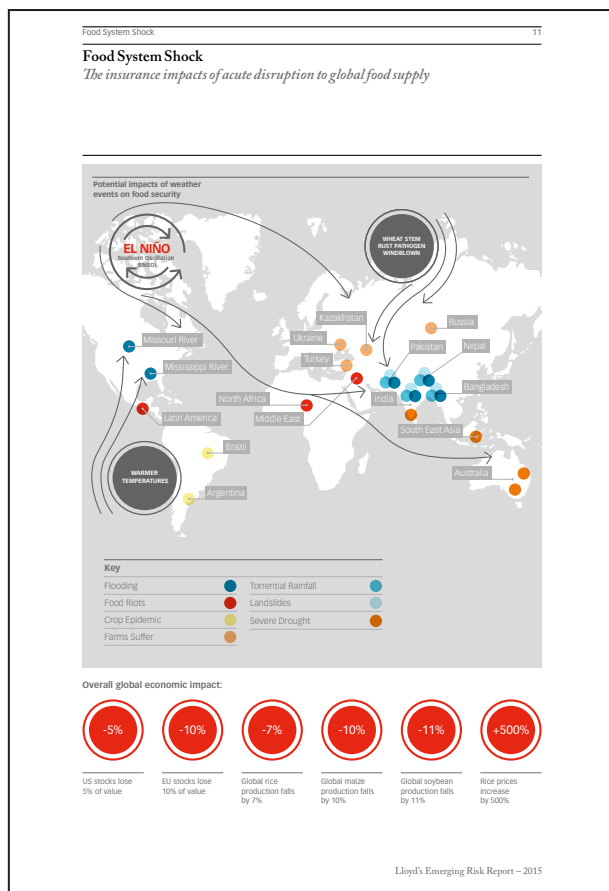


Figure 1 : les impacts d'une crise aigüe sur les approvisionnements globaux de nourriture.
Source : Lloyd's of London

À l'inverse, les systèmes alimentaires sont une source importante de gaz à effets de serre (GES), notamment au travers de l'agriculture et dans une moindre mesure du transport des denrées. L'agriculture se caractérise, parmi les autres activités humaines, par la diversité des GES qu'elle émet⁶ : un tiers environ des GES, avec des parts sensiblement égales venant du dioxyde de carbone (CO₂), du méthane (CH₄) et de l'oxyde nitreux (N₂O). Plus précisément,

6 Baumert, K.A., Herzog, T., and Pershing, J. (2005). Navigating the numbers: greenhouse gas data and international climate policy (Washington, D.C: World Resources Institute) <https://www.wri.org/publication/navigating-numbers> & <https://www.wri.org/resources/charts-graphs/world-greenhouse-gas-emissions-2005>

les changements d'affectation des sols (principalement la déforestation) provoquent l'émission de 10% du CO₂ d'origine anthropique : il faut réguler les changements d'affectation des sols par exemple en contrôlant l'urbanisme et sa voracité de terres arables, et aussi renverser la tendance à la déforestation (on revient à l'équilibre entre land sparing et land sharing évoqué précédemment). L'élevage de ruminants et la riziculture, par deux processus différents, provoquent l'émission de la moitié du CH₄ d'origine anthropique : il faut limiter ces émissions par une alimentation adaptée des ruminants, ou la récupération du CH₄ dans les élevages avant sa dispersion dans l'atmosphère. Enfin la fertilisation azotée provoque l'émission de 90% d'origine anthropique de N₂O : il faut travailler sur le cycle de l'azote dans le sol, et utiliser des légumineuses dans les rotations (ce qui implique d'identifier un marché pour en commercialiser les récoltes).

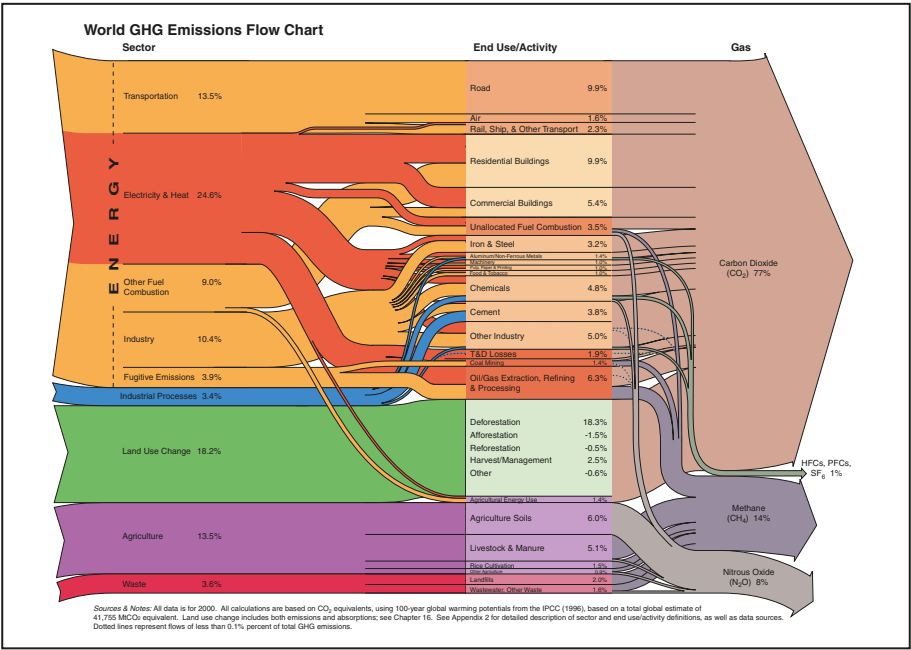


Figure 2 : émissions mondiales de gaz à effet de serre (données 2000 normalisées en équivalents CO₂), par secteur d'activité. Source : World Resources Institute ;
Note : l'actualisation 2012 de l'estimation ne montre pas de changement significatif

Au-delà de la « simple » atténuation de l'émission des GES liés aux systèmes alimentaires (pas si simple en réalité...), les terres arables et les forêts peuvent

contribuer à séquestrer le carbone atmosphérique dont l'excès cause l'effet de serre. Il y a même là un enjeu « gagnant-gagnant ». La production primaire sur notre planète, dans laquelle s'inscrit l'agriculture, repose fondamentalement sur la transformation du CO₂ atmosphérique en biomasse et en matière organique sous l'effet de l'énergie solaire. Un agronome peut donc légitimement considérer l'excès de CO₂ atmosphérique comme une « mine gazeuse à ciel ouvert », dont il pourrait tirer utilement profit pour compenser partiellement les pertes de rendements qu'il constate suite au dérèglement climatique, et pour enrichir durablement les sols en matière organique. Un calcul simple indique que si les sols capturaient chaque année dans l'atmosphère 0,4% de leur teneur en carbone, cela équilibrerait les émissions actuelles de GES d'origine anthropique (tous secteurs confondus). C'est le sens de l'initiative mondiale « 4 pour 1000 »⁷ que la France a initiée dans le sillage de la 21^{ème} conférence des parties sur le climat (COP21) qui s'était tenue à Paris.

Ce n'est bien entendu pas si simple. Les difficultés sont à la hauteur des enjeux, c'est-à-dire grandes, parce que si l'on peut assez facilement établir les pratiques les mieux adaptées pour séquestrer localement du CO₂, encore faut-il que ces pratiques aient une viabilité économique pour qu'elles soient adoptées : dans certains cas cela dépend de la création de nouvelles filières commerciales et donc d'une révision du système alimentaire dans son ensemble, à l'échelle locale ou au-delà. Plus fondamentalement, transformer le CO₂ atmosphérique en biomasse et en matière organique requiert de l'eau et des minéraux (azote, phosphore, potassium, etc.) qui ne sont pas tous aussi disponibles « atmosphériquement » et donc de manière indolore que le CO₂ ou même l'azote.

7 Bienvenue sur le site de l'Initiative « 4 pour 1000 » ; <https://www.4p1000.org/>

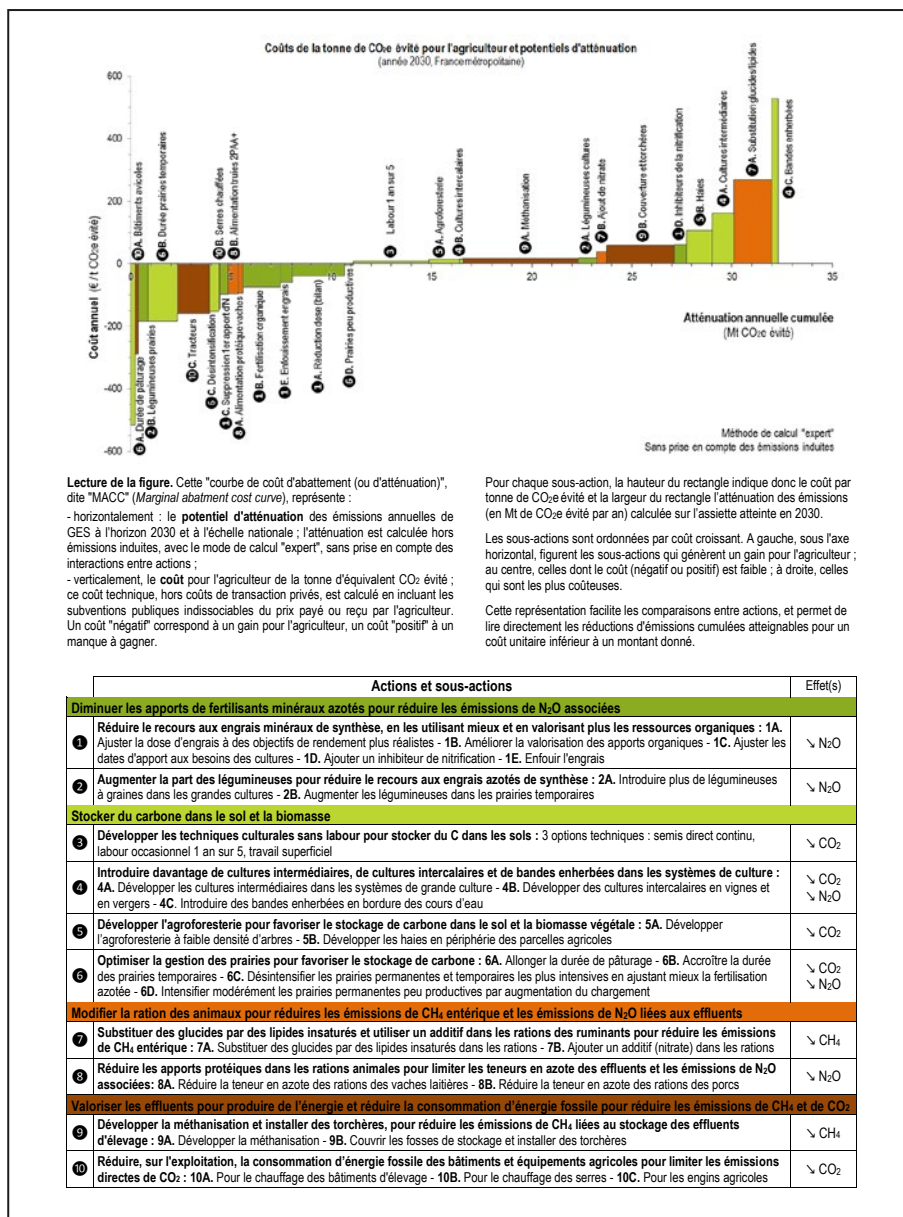


Figure 3 : estimation du coût – négatif en cas de bénéfice – et du potentiel de réduction d'émission de CO₂ pour différentes pratiques agricoles en France. Source : INRA⁸

8 Expertise scientifique collective « Réduire les émissions de gaz à effet de serre du secteur agricole en France ; Potentiels d'atténuation et coûts de 10 actions techniques », INRA (2013) ; <https://www6.paris.inra.fr/depe/Projets/Agriculture-et-GES>

Face à ces défis historiques, d'une ampleur sans précédent à l'échelle de l'Humanité et sans doute de la planète, il est nécessaire et urgent de transformer assez radicalement nos systèmes alimentaires. Développer des innovations techniques et des innovations d'organisation n'est pas facultatif ; combiner et croiser toutes ces innovations de l'amont à l'aval des systèmes alimentaires non plus. Mais c'est très complexe.

L'innovation et les systèmes alimentaires

Tout d'abord, cherchons à comprendre comment fonctionne l'innovation, de manière générale puis en particulier dans les systèmes alimentaires, dans ce processus et la place de la production de nouvelles connaissances par la recherche scientifique. Une conception assez simple de la relation entre la production des connaissances et leur impact sociétal sous forme d'inventions et d'innovations s'est longtemps contentée de distinguer recherche fondamentale et recherche appliquée. Selon cette vision encore très présente plus ou moins implicitement dans beaucoup de propos sur le sujet, la recherche appliquée viendrait puiser dans les connaissances produites de manière très libre et spontanée par la recherche fondamentale, la société viendrait à son tour piocher dans les produits de la recherche appliquée, et tout irait pour le mieux dans le meilleur des mondes sans que les chercheurs aient vraiment à se préoccuper des processus « aval » de transfert, ou même des chances que transfert il y ait. De nombreux exemples démontrent que ce processus fonctionne parfois, même si le principe dit de « sérendipité »⁹ sur lequel il repose de manière implicite laisse généralement moins de place au pur hasard que la lecture des quelques lignes (caricaturales !) ci-dessus ne pourrait le laisser penser. Ce processus « invention-innovation-diffusion » a été formalisé par Joseph Schumpeter en 1934, ouvrant un courant encore actif aujourd'hui en économie de l'innovation, tandis que cette vision du monde était largement reprise par les politiques de développement économique de nombreux pays, qui visent à stimuler le passage de la connaissance à l'invention et de l'invention à l'innovation.

9 Le fait de trouver autre chose que ce que l'on cherchait, et par extension le fait que ce qu'on a trouvé serve finalement à autre chose que ce qu'on imaginait initialement.

En particulier, Schumpeter a formalisé le concept dit « d'innovation destructive » : des innovations technologiques ou organisationnelles peuvent parfois provoquer des transitions de rupture vers un « nouveau monde » ne laissant pas de place à l'ancien. Les ampoules électriques qui ont remplacé il y a une dizaine d'années les ampoules à incandescence sous l'appellation pourtant évocatrice de « à basse consommation » sont probablement vouées à l'extinction du fait de leur consommation excessive par rapport à la technologie des diodes électroluminescentes (*Light-emitting diodes*, LED). En quelques années, la photographie numérique a remplacé rapidement et totalement la photographie argentique. Le disque vinyl, qui avait remplacé les rouleaux de cire, a été tué par le compact-disc lui-même remplacé par les lecteurs MP3 puis par les sites de streaming. Ces révolutions technologiques ont à chaque fois causé des déboires industriels mais aussi un meilleur service pour l'utilisateur final, et la montée en puissance de nouveaux acteurs économiques porteurs de ce service. Ces acteurs du « nouveau monde » ne sont pas toujours ceux de « l'ancien monde » : ceux-ci, par définition puissants dans l'ancien monde, sont donc susceptibles de se positionner en réaction à l'innovation pour, si possible, la bloquer avant qu'il ne soit trop tard pour eux. Cette force conservatrice quasiment automatique est susceptible de compromettre la mise en place de l'innovation elle-même. On pense par exemple à la manière dont les taxis ont remplacé les fiacres, transformant profondément à la fois la relation des citadins à la ville, et la sociologie des métiers du transport urbain qui s'y opposaient fortement à l'époque : aujourd'hui, ce secteur vit un changement qui est probablement d'une ampleur comparable, et qui suscite en tout cas des réactions comparables des acteurs de l'ancien monde, avec l'irruption du « numérique pour tous » qui permet des services de voitures de transport avec chauffeur (VTC), et la colère des chauffeurs de taxis ; en attendant qu'un futur service cause celle des chauffeurs de VTC ?

Que la célèbre citation d'Henry Ford, « *If I had asked people what they wanted, they would have said faster horses* » (« si j'avais demandé aux gens ce qu'ils voulaient, ils auraient répondu des chevaux plus rapides »), soit authentique ou apocryphe, elle illustre bien la difficulté – pour ne pas dire l'impossibilité – pour les acteurs (ici les citoyens, sous-entendu consommateurs) à envisager les possibilités ouvertes dans monde d'après l'innovation, et donc par la transition elle-même et par les innovations nécessaires pour l'engager. Les gens qu'il aurait interrogés n'allaient en effet sans doute pas lui recommander

de ne pas omettre de doter la Ford T d'un frein efficace, d'un embrayage et d'une boîte de vitesses – sans parler des clignotants, des ceintures de sécurité et des airbags qui arriveraient après plusieurs décennies d'accidents mortels –, ne visualisant sans doute pas beaucoup mieux que lui ce que serait un véhicule automobile, et encore moins les contraintes d'une conduite sécurisée dans un trafic urbain.

Les systèmes alimentaires, tels que nous les avons définis dans un sens large ci-dessus, ont toujours été un creuset d'innovations et de transitions sociétales. L'invention de l'agriculture au néolithique a permis d'accéder à une certaine sécurité alimentaire et a conduit les sociétés humaines à se sédentariser, à payer le prix d'épidémies issues des troupeaux pour certaines et propagées facilement dans ces petites sociétés sédentaires, à inventer la monnaie, le calcul et l'écriture, et toutes autres choses qui nous semblent naturelles aujourd'hui. En parallèle à la révolution industrielle engagée au ^{xix}^e siècle, de nouvelles révolutions y ont vu le jour, associées à la réorganisation de la société tout entière que cela a occasionné : l'exode rural requiert une industrialisation de la production alimentaire (plus de bouches en ville, moins de mains dans les campagnes) et des modes de distribution à distance. Comme dans d'autres domaines et peut-être même plus que dans d'autres domaines, l'innovation s'est accélérée dans les systèmes alimentaires, et notamment dans leur fonction de production portée par l'agriculture. Pourtant l'ensemble de la société, aujourd'hui urbaine, ignore souvent l'ampleur de ces transitions ou même les rejette au nom d'une mémoire collective d'un passé rural relativement récent mais qui ne correspond plus à la réalité d'aujourd'hui. On peut voir là une forme particulière du phénomène de rejet de l'innovation par les acteurs de « l'ancien monde ». Dans ce domaine particulier, les valeurs de « l'ancien monde », rural, ne sont plus tant portées par lui-même que par les sociétés urbaines qui en gardent la mémoire familiale récente. Le rejet de l'innovation en agriculture se trouve donc être plutôt le fait non pas de « l'ancien monde », qui n'existe déjà virtuellement plus, mais du « monde d'à côté », urbain, qui en porte la mémoire collective et constitue une opinion publique puissante. Or ce « monde d'à côté » représente aussi l'aval du système alimentaire : les acteurs de la fonction de consommation du système alimentaire se retrouvent donc à représenter la force de réaction conservatrice opposée à l'innovation dans la fonction de production. Notons qu'il ne s'agit pas de juger ici, ni même de le discuter, du bien-fondé de cette force de réaction ou des formes qu'elle

prend ; il s'agit de constater que ces tensions engendrent un danger de rupture citoyenne, dans un secteur pourtant central pour notre survie : l'alimentation. Certains lisent par exemple ce syndrome dans les débats sur les OGM ou plus récemment en France sur le glyphosate.

Un exemple d'innovation révolutionnaire : la sélection génomique des bovins

Pour mieux visualiser ce que représente l'innovation et sa capacité transformatrice en agriculture, prenons un exemple : la sélection génomique en élevage bovin.

La perception partagée implicitement dans l'opinion publique de l'élevage repose sur l'image de vaches normandes ruminant paisiblement sous des pommiers (une forme d'agroforesterie avant la lettre, qui se raréfie aujourd'hui) ; la réalité est quant à elle celle d'une activité agricole très pointue, d'élevages de plus en plus spécialisés et faisant appel à des technologies modernes. Le contrôle laitier donne quotidiennement des informations sur l'état de santé et de performance du troupeau français et de chaque individu qui le compose. L'insémination artificielle permet à chaque éleveur de bénéficier des meilleurs taureaux. Cela mène assez naturellement, dans le domaine de la génétique, à un « star-system » dans lequel le dénommé Jocko-Besné s'est particulièrement illustré.

Jocko-Besné (1992-2012) était un taureau de la race Prim'Holstein, qui transmettait à sa descendance des performances exceptionnelles en termes de conformation, de fertilité, de santé, de longévité et de production laitière. Grâce à l'insémination artificielle, chaque éleveur pouvait faire bénéficier son troupeau des gènes de Jocko-Besné : on estime qu'il a eu 400.000 filles dans 60 pays, et que sa descendance est présente dans un quart des élevages français de Prim'Holstein. Comme d'autres stars, Jocko-Besné a sa page Wikipédia et sa statue sur un rond-point de la ville où il a passé sa vie de géniteur (Blain, en Loire-Atlantique).



Figure 4 : la statue de Jocko-Besné une de ses filles et une de ses petites-filles, sur un rond-point à proximité de son lieu de vie.

Source : Evolution via Web-Agri¹⁰

La révolution qu'a apportée l'insémination artificielle par des taureaux sélectionnés dans l'élevage a permis de disséminer le progrès génétique dans tous les élevages, et elle a profondément transformé le métier des éleveurs, la conduite des troupeaux, l'organisation des filières et *in fine* la qualité de notre alimentation carnée et lactée. L'approche présente toutefois quelques limites évidentes, et notamment le délai de réponse et la consanguinité. Pour connaître la valeur laitière d'un veau mâle, il faut en effet attendre plusieurs années qu'il soit adulte, qu'il se soit reproduit, que ses filles soient adultes et se soient elles-mêmes reproduites, ce qui permet alors de mesurer les paramètres de qualité de leur lait. De tels délais expliquent le fort investissement collectif dans un petit nombre de reproducteurs mâles, et s'accompagnent mécaniquement des risques associés à la consanguinité. Le nombre de filles de Jocko-Besné et la considérable proportion des élevages français qui les hébergent en sont des illustrations frappantes : s'il avait porté des gènes délétères sans qu'on le sache, ceux-ci seraient aujourd'hui présents partout en France et au-delà.

10 Jocko Besné – Le taureau de fer trône au milieu du rond-point de Blain ; <http://www.web-agri.fr/conduite-elevage/genetique-race/article/le-taureau-de-fer-trone-au-milieu-du-rond-point-de-blain-1175-94630.html>.

Le décryptage du génome bovin en 2009 d'une part, le développement concomitant d'autre part de technologies d'analyse de l'ADN individuel à bas coût, et enfin l'existence de la solide organisation professionnelle qui avait été mise en place entre autres pour l'insémination artificielle et pour le contrôle laitier, ont permis de concrétiser l'espoir de prédire la performance d'un animal d'après son ADN et de baser la sélection non plus sur les performances réelles de quelques animaux « champions » mais sur l'ensemble des gènes – le génome – de chacun de ceux du troupeau. Pour démarrer par un exemple simple, prenons la race bovine charolaise : elle est caractérisée, comme la race blonde d'Aquitaine et la race de chevaux Fjord, par une robe crème liée à une mutation unique, appelée « Silver », dans le gène qui code la couleur. Évidemment, l'expression de cette mutation est facilement visible dès la naissance et cela réduit l'intérêt de la recherche dans l'ADN, mais cet exemple illustre que de la même façon, on peut rechercher dans l'ADN d'un jeune veau telle ou telle forme de tel ou tel gène, dont on sait qu'elle est associée à un caractère qu'on recherchera chez l'adulte, comme par exemple la capacité laitière. Étendre ce principe pour prédire la valeur reproductive pour l'ensemble des caractères recherchés, en cherchant sur l'ensemble du génome et pour l'ensemble des naissances devient alors techniquement envisageable : c'est la sélection génomique, mise en œuvre depuis le début des années 2010 dans certaines races bovines et qui s'étend aujourd'hui à des races de plus petits effectifs et à d'autres espèces.

La sélection génomique, en raccourcissant les délais de sélection et l'investissement associé à un reproducteur donné, permet aujourd'hui aux éleveurs de disposer d'un plus grand choix de taureaux, en connaissance de cause par rapport à une plus grande diversité de caractéristiques génétiques. Cette rupture technologique entraîne une rupture intellectuelle puisqu'elle permet une baisse de consanguinité dans le troupeau et, au-delà, une gestion fine de la diversité génétique du troupeau qui ne figurait pas, ou presque, dans la palette des leviers d'action de l'éleveur il y a encore quelques années. L'éleveur peut mettre en œuvre des plans d'accouplement beaucoup plus complexes et plus riches. Il peut adapter les critères de sélection à chaque individu. Il peut se mettre à faire de la sélection sur les femelles, quasiment inenvisageable jusqu'ici. L'utilisation de semence sexée permet de gérer le sexe de la descendance d'une mère en fonction de ses qualités individuelles à présent caractérisées : vaut-il mieux lui faire avoir des veaux mâles et dans ce cas utiliser de la semence à bonnes

capacités bouchère, ou des veaux femelles et dans ce cas utiliser de la semence à bonnes capacités laitières ? La sélection génomique bovine a sifflé la fin du « star system », qui avait fait progresser le cheptel mais touchait parfois ses limites. Le rythme du progrès génétique a alors doublé, et s'est tourné vers des caractères jusqu'ici difficilement accessibles (santé, qualité du lait, efficacité alimentaire, émissions de gaz à effet de serre par la rumination, etc.).

Dans les races Montbéliarde, Prim'Holstein ou Normande, l'approche conventionnelle a entièrement cédé le pas à la sélection génomique entre 2008 et 2015, et cette transition très rapide a révolutionné le métier de l'éleveur, à présent acteur à part entière de la génétique de son troupeau, au niveau le plus fin. La valeur ajoutée cumulée de la sélection génomique pour les seuls bovins laitiers est estimée à plusieurs milliards d'Euros, après seulement quelques années de mise en œuvre. Les facteurs qui ont permis cette transition rapide, outre l'intérêt évident pour les éleveurs qui a été un formidable moteur pour l'adoption de l'innovation, qui en a été la clé, ont été :

- La pré-existence d'une organisation professionnelle performante, habituée à mutualiser l'information sur les pédigrées, sur les performances individuelles et la santé des animaux, et à élaborer ensemble des cibles de sélection prioritaires ;
- L'existence d'innovations hors du champ concerné lui-même : la technologie des puces à ADN, l'évolution des technologies du séquençage, de l'informatique et du numérique, etc. ;
- L'acquisition de connaissances de base, fondamentales, en génétique bovine : le séquençage du génome bovin et même à une grande diversité de génomes bovins, la capacité à prédire les performances individuelles à partir de l'information génétique, en calculant des index de sélection adaptés aux cibles et/ou synthétiques.

L'innovation, un processus linéaire du savoir à l'impact ?

Cet exemple en tête, revenons aux processus d'innovation eux-mêmes. Une version plus fine de la théorie linéaire de l'innovation a été proposée par la NASA à la fin des années 1980. À la demande du président Reagan suite à la désintégration au décollage de la navette Challenger en 1986, la NASA révisait alors l'ensemble du processus d'innovation et de conception d'un objet

complexe (une fusée), impliquant la coopération de partenaires nombreux et divers : militaires ou civils, publics ou commerciaux, nationaux ou internationaux et articulant des technologies développées spécialement à cette fin mais aussi à des technologies et des connaissances amont, développées sans idée précise de leur utilisation future. Le concept de niveau de maturité technologique (*Technology Readiness Level*, TRL), reposant sur une échelle à neuf niveaux, rend bien compte de cette organisation des partenariats, des savoirs et des technologies pour le domaine aéronautique et spatial, et de fait il s'adapte assez bien à de nombreux autres domaines en y remplaçant les termes spécifiques à celui de l'aéronautique spatiale.

L'échelle TRL de la NASA¹¹ est la suivante, dans une traduction libre ; elle décrit une montée en opérationnalité du composant technologique concerné :

- TRL 1 : Principes de base observés et décrits
- TRL 2 : Formulation du concept de la technologie et/ou de l'application
- TRL 3 : Preuve de concept analytique et expérimentale de la fonction critique ou de la caractéristique
- TRL 4 : Validation du composant ou du circuit en laboratoire
- TRL 5 : Validation du composant ou du circuit dans un environnement significatif
- TRL 6 : Démonstration du modèle ou du prototype du système / sous-système dans un environnement significatif (au sol ou dans l'espace)
- TRL 7 : Démonstration du prototype du système dans un environnement spatial
- TRL 8 : Système réel complet « qualifié pour le vol » à travers des tests et des démonstrations (au sol ou dans l'espace)
- TRL 9 : Système réel prouvé à travers des missions réussies

Ce principe permet de sortir par le haut de la forte limitation liée à la dualité classique entre recherche fondamentale et recherche appliquée. En effet

¹¹ Technology Readiness Level ; https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/txt_accordion1.html ; voir aussi https://www.nasa.gov/pdf/458490main_TRL_Definitions.pdf

il décrit le processus plutôt comme un continuum entre des niveaux bas et des niveaux hauts de maturité technologique, tous également indispensables à l'innovation. Les niveaux bas et les niveaux hauts sont l'affaire d'acteurs distincts (plutôt public dans les niveaux bas, plutôt privés dans les niveaux hauts), ils ont des propriétés différentes, et ils doivent être développés selon des processus différents. L'échelle détaillée décrit comment ils s'articulent entre eux à chaque niveau : qu'attendre de ce niveau plutôt que des autres, quels nouveaux partenariats introduire, quel type de compétences mobiliser, quels moyens financiers dégager, etc.

Les deux extrémités de l'échelle des TRL tendent à agir conjointement comme un « pousseur d'innovation » pour les niveaux bas, et comme un « attracteur d'innovation » pour les niveaux hauts. Le milieu de l'échelle, parfois surnommé « vallée de la mort », se caractérise souvent par une difficulté à mobiliser des financements puisqu'on n'est plus dans le domaine « bas » qui est plus propre au financement public et à la valorisation par des publications, et pas encore tout à fait dans le domaine « haut » qui est plus propre au financement privé et à la protection par des brevets ou du secret industriel.

Ce schéma s'applique bien dans le domaine de l'aéronautique spatiale, mais pas toujours aussi bien ailleurs. Envoyer une fusée capable de mettre sur orbite un équipage et de le ramener sain et sauf constitue un attracteur unique d'innovation, dont la visibilité et la compréhension partagée par toute la chaîne TRL aide à franchir la « vallée de la mort ». Il peut toutefois en être différemment dans d'autres domaines : dans celui des systèmes alimentaires comme on l'a vu avec l'exemple de la sélection génomique, l'innovation de rupture transitionnelle suit souvent des cheminements plus sinueux. Elle fait souvent appel à des technologies et des acteurs initialement non prévus voire non prévisibles, qui ne savent pas forcément au début du processus qu'ils auront à se parler pour innover ensemble, ou même qui ne savent pas qu'ils sont concernés. Elle ne se cantonne pas à l'innovation technologique mais invite aussi des volets d'innovation sociale et/ou organisationnelle. Ses impacts sont divers, et ils sont diversement appréciés par ses acteurs et par ceux qui sont impactés.

Dans les systèmes alimentaires, des chemins plus complexes vers l'impact de l'innovation

L'Inra a publié en 2016 les résultats d'une étude menée sur fonds propres, pour mieux comprendre les tenants et les aboutissants de l'innovation dans les systèmes alimentaires, et surtout le rôle qu'y joue la recherche : c'est l'étude « Analyse des Impacts de la Recherche Publique Agronomique » (ASIRPA)¹², basée sur l'examen d'une grande série (40 cas) de recherches de l'Inra qui se sont traduites par des innovations adoptées et dont les résultats sont tangibles. ASIRPA, basée sur trois piliers (chronologie, chemin d'impact, vecteur d'impact), donne aujourd'hui lieu à une méthode standardisée, appliquée en routine dans l'Institut pour décrire et mieux comprendre l'impact des recherches effectuées.

Pour autant, une des conclusions du rapport est que cette approche ne saurait être prédictive : il n'est pas concevable de sélectionner *ab initio* les recherches à conduire pour provoquer une innovation plusieurs années plus tard, parce qu'on ne peut prédire ni le résultat de la production de connaissances, ni quelles connaissances seront nécessaires et seraient manquantes. Sur ce point, les résultats de l'étude rejoignent les observations qui avaient fondé la conception du principe TRL et la notion générale de « sérendipité ».

Les principaux enseignements d'ASIRPA sont¹³ :

- Les impacts de la recherche s'inscrivent dans plusieurs dimensions : économique, environnemental, politique, territorial / social, sanitaire ;
- En moyenne, près de vingt ans séparent les recherches et leurs premiers impacts (un décalage du même ordre que celui observé dans d'autres domaines que l'agronomie et les systèmes alimentaires) ; les impacts politiques sont toutefois souvent plus rapides à s'exprimer ;

12 ASIRPA – Impact sociétal de la recherche ; <https://www6.inra.fr/asirpa>

13 Colinet L., Joly P. B., Gaunand A., Matt M., Laredo P. & Lemarié S. (2014). *ASIRPA - Analyse des Impacts de la Recherche Publique Agronomique. Rapport final*. Paris, FRA : INRA. 61 pp. <https://prodinra.inra.fr/record/265649>

Joly P.-B., Colinet L., Gaunand A., Lemarié S., Laredo P. & Matt, M. (2015). Évaluer l'impact sociétal de la recherche pour apprendre à le gérer : l'approche ASIRPA et l'exemple de la recherche agronomique. *Gérer et Comprendre* **122**, 31-42. <http://www.annales.org/gc/2015/resumes/decembre/04-gc-resum-FR-AN-AL-ES-decembre-2015.html>

- Les recherches mobilisées sont de grande qualité, aux interfaces disciplinaires, et s'inscrivent dans un contexte international très compétitif ;
- Les infrastructures de recherche jouent un rôle crucial : il s'agit d'équipements mutualisés (par exemple des fermes expérimentales, des collections végétales, etc.) autour desquels peuvent se retrouver des équipes de chercheurs d'origines diverses ;
- Les contributions de l'Inra à la construction de l'impact sont plurielles : production de connaissances de base, coordination et/ou structuration de consortium, intermédiation ;
- Les partenariats sont d'importance majeure ; les partenaires de la production de connaissance ou du développement ne sont pas nécessairement ceux qui assurent la diffusion de l'innovation ; dans tous les cas, la stabilité des partenariats sur le temps long est primordiale.

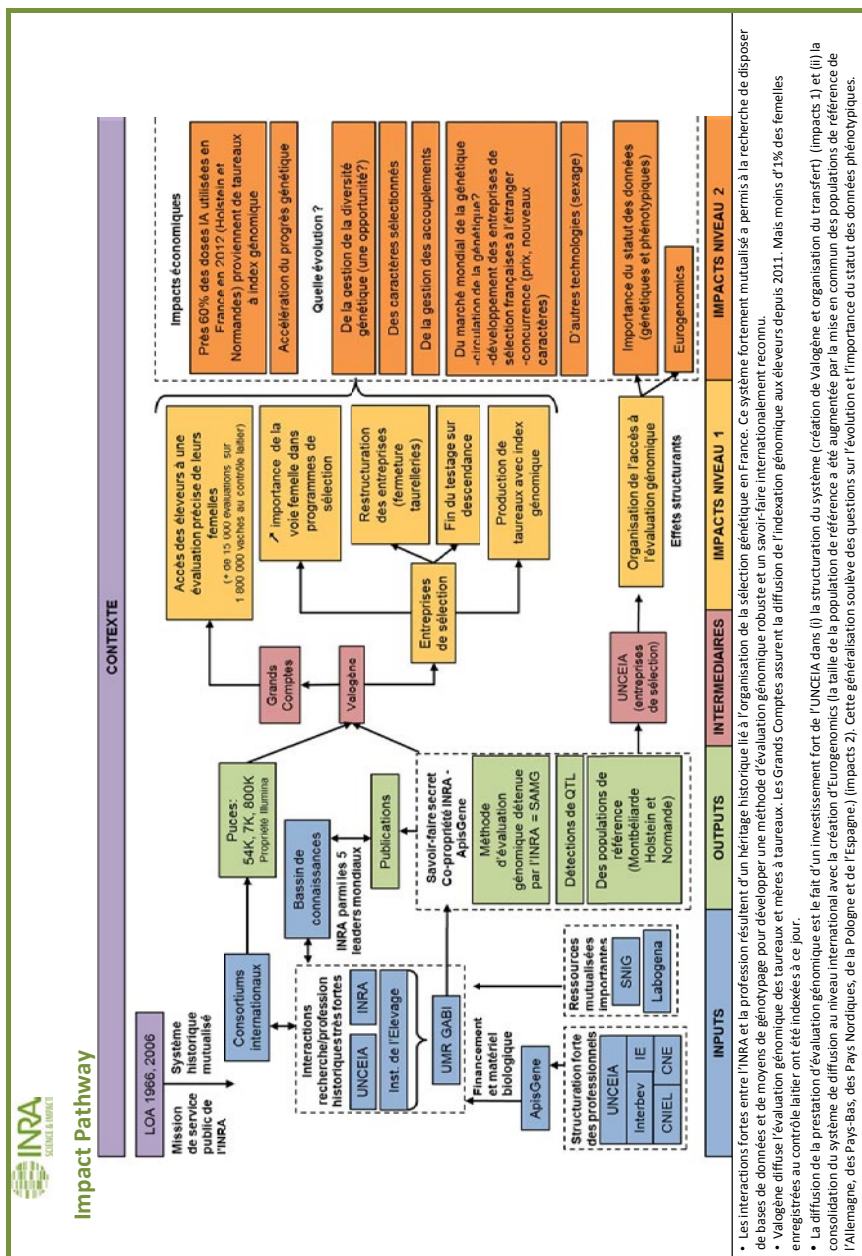


Figure 5 : la complexité d'un chemin d'impact, ici celui du cas de la sélection génomique bovine.
Source INRA¹⁴

14 La sélection génomique bovine, étude de cas ASIRPA ; <https://www6.inra.fr/asirpa/Les-cas-etudes/Etudes-de-cas/Elevage/Selection-genomique-bovine>

Ces grandes propriétés des chemins d'impact ont été une des sources d'inspiration pour dessiner les orientations stratégiques de l'Inra à l'horizon 2025, #Inra2025¹⁵. La partie la plus fondamentale – les TRL les plus bas – de la recherche de l'Institut est mieux assumée, dès lors qu'il est établi qu'il n'est pas possible de déterminer par avance quelles recherches seront impliquées quelques années plus tard dans une innovation et un impact positif. Elle fait l'objet de partenariats académiques inscrits dans les territoires via les pôles universitaires. Nécessaire à la montée en TRL autour de neuf grandes thématiques finalisées, son caractère interdisciplinaire est stimulé par des dispositifs internes de programmation, les métaprogrammes. Un grand chantier réorganise par ailleurs le dispositif des infrastructures de recherche, physiques comme numériques. Dans le même temps, la politique institutionnelle de partenariat pour le transfert et l'innovation est entièrement refondée ; elle imprègne la culture d'établissement et des moyens spécifiques y sont dédiés, en interne ou via les filiales de droit privé. Les moteurs d'innovation exogène sont recherchés (numérique, robotique, etc.). Les partenariats s'ouvrent aussi sur la société via des sciences citoyennes ou participatives.

Le territoire, un attracteur d'innovation pour les systèmes alimentaires

Un des domaines où l'innovation de rupture est particulièrement nécessaire est celui de la transition agro-écologique. Le terme « agro-écologie » est polysémique : il peut désigner pour les uns un mouvement social, pour les autres un ensemble de pratiques agricoles conciliant les performances économiques, environnementales et sociales de l'agriculture, et pour les chercheurs il désigne une discipline scientifique en émergence aux confins de l'Écologie scientifique et de l'agronomie¹⁶. L'agro-écologie – dans le second de ces sens – a été le fil rouge de la politique du ministère français de l'agriculture de 2013 à 2017¹⁷. Alors que pour certains observateurs de terrain ce soutien relevait du

15 Orientations stratégiques de l'Inra à l'horizon 2025 ; <http://2025.inra.fr>

16 L'agroécologie, vous connaissez ? <http://www.inra.fr/Grand-public/Agriculture-durable/Tous-les-dossiers/L-agroecologie-vous-connaissiez>

17 Le projet agro-écologique en 12 clés <http://agriculture.gouv.fr/le-projet-agro-ecologique-en-12-cles>

pur discours politicien, il est clair que, du fait de sa constance et son caractère appuyé et répétitif, il a contribué au début de l'émergence d'un ensemble d'acteurs et de partenariats stables autour de la recherche et de l'innovation (on a vu plus haut avec ASIRPA que la stabilité des partenariats est propice à l'innovation). De la même façon qu'on l'a vu avec la conquête spatiale qui, partant d'une commande politique qui pouvait paraître insensée en 1961 (le président JF Kennedy annonçant au congrès son intention qu'avant la fin de la décennie des hommes aillent sur la lune et en reviennent sains et saufs), a conduit à un incroyable bouquet d'innovations technologiques qui a servi toute la société jusqu'à nos jours encore, la commande politique de l'agro-écologie est une formidable stimulation pour la recherche et l'innovation dans le domaine des systèmes alimentaires. La recherche a pu tisser sa toile et se développer vers quatre finalités qui constituent les axes stratégiques de l'agro-écologie : non seulement préserver, mais même reconquérir et valoriser la biodiversité dans les espaces agricoles, fermer les cycles biogéochimiques pour éviter les pertes et les gaspillages tout au long de la chaîne qui va de l'environnement à la consommation, diversifier les usages de la biomasse, et gérer les paysages et les territoires.

On a vu plus haut, dans le domaine aéronautique et spatial, l'importance que joue un grand attracteur unique de l'innovation pour tirer vers le haut la montée en TRL, et plus généralement organiser l'organisation de tous les acteurs de l'innovation vers un but unique qui allie complexité de la conception, diversité des compétences en partenariat et inscription dans la durée. La transition des systèmes alimentaires rassemble bien ces caractéristiques, mais il y manque généralement deux choses : d'une part un objet final identifiable (une fusée est un objet identifiable, mais une pratique agronomique l'est beaucoup moins), et d'autre part cet attracteur unique. Notamment, il y manque généralement une gouvernance capable de redessiner régulièrement le but à atteindre collectivement, et que les décisions nécessaires soient prises et mises en œuvre ensemble. C'est assez clairement le territoire qui peut jouer ce rôle. C'est dans le territoire, le pays, la circonscription que des acteurs très divers peuvent, sous l'impulsion de collectivités qui en assurent la gouvernance, imaginer ensemble leur place dans le monde de demain et se retrouver dans le même « bac à sable » pour l'atteindre.

Le dispositif des « Territoires Innovants – Grande Ambition » (TIGA)¹⁸, qui émergent en France sous l’impulsion du Secrétariat Général pour l’Investissement (SGPI, un service du Premier Ministre) et de la Caisse des Dépôts et des Consignations, ont notamment vocation à relever ce défi de la gouvernance territoriale de l’innovation en réseau, dans le domaine agro-alimentaire ou dans d’autres domaines où il est nécessaire de « penser globalement et agir localement ». Il n’est pas étonnant de constater que parmi les vingt-quatre TIGA pré-sélectionnés par le SGPI, au moins sept concernent les systèmes alimentaires. D’autres expériences de type « Laboratoires Vivants » (« Living Lab ») ancrés dans les territoires voient le jour, labélisés TIGA ou non : c’est par exemple le cas du Laboratoire d’Innovation Territorial « Grandes Cultures en Auvergne »¹⁹, dans la Limagne et le Val d’Allier, qui allie organismes de recherche, université, chambre d’agriculture, institut technique agricole et coopérative agricole dans une démarche d’innovation ouverte et participative.

En guise de conclusion

Depuis les années 1980, l’empreinte environnementale de l’Humanité dépasse la capacité de la planète Terre et continue de s’accroître. En prendre conscience incite plus que jamais à sécuriser la durabilité des systèmes alimentaires, et leur faire engager une transition globale (« au niveau du globe »), dont les déclinaisons sont nécessairement locales. Cette transition ne se fera pas sans innovations techniques mais aussi organisationnelles. L’innovation dans les systèmes alimentaires, comme dans d’autres domaines, fait appel à l’ensemble de la chaîne de valeurs depuis la création de connaissances nouvelles jusqu’à la diffusion dans l’ensemble de la société. Comme dans d’autres domaines et sans doute même plus encore que dans d’autres domaines du fait du caractère diffus des cheminements de l’impact, l’innovation dans les systèmes alimentaires bénéficie des apports d’innovations exogènes, de l’engagement des acteurs dans des partenariats parfois inattendus, et elle s’inscrit dans la

18 Territoires d’Innovation – Grande Ambition ; <https://www.caissedesdepots.fr/territoires-dinnovation-grande-ambition>

19 Laboratoire d’Innovation Territorial (Grandes cultures en Auvergne) ; <https://www.lit-gca.com/>

durée. Les territoires sont sans doute, du fait de leur gouvernance habituée à engager des acteurs divers et parfois divergents vers des buts communs, un niveau d'organisation adapté au développement des innovations les plus pertinentes. C'est aussi un enjeu de réconciliation citoyenne, un facteur indispensable pour aborder solidement les transitions ambitieuses dont ont besoin nos systèmes alimentaires.