



**HAL**  
open science

## L'intégration, art ou science ?

Bernard Chevassus-Au-Louis, Michel Génard, Jean-Christophe Glaszmann,  
Robert Habib, Francois Houllier, Renaud Lancelot, Eric Malézieux, José  
Muchnik

► **To cite this version:**

Bernard Chevassus-Au-Louis, Michel Génard, Jean-Christophe Glaszmann, Robert Habib, Francois Houllier, et al.. L'intégration, art ou science?. Colloque international Inra-Cirad. Partenariats, Innovation, Agriculture, Jun 2008, Paris, France. hal-01193581

**HAL Id: hal-01193581**

**<https://hal.science/hal-01193581v1>**

Submitted on 3 Jun 2020

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

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

## L'intégration, art ou science ?

Communication au colloque « Partnerships, Innovation, Agriculture »  
Paris, 3 juin 2008

*Bernard Chevassus-au-Louis<sup>1</sup>, Michel Génard<sup>2</sup>, Jean-Christophe Glaszmann<sup>3</sup>,  
Robert Habib<sup>3</sup>, François Houllier<sup>2</sup>, Renaud Lancelot<sup>3</sup>, Eric Malézieux<sup>3</sup>, José Muchnik<sup>2</sup>*

1 Ministère de l'Agriculture et de la Pêche (correspondance : bernard.chevassus@jouy.inra.fr)

2 Institut National de la Recherche Agronomique (INRA)

3. Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD)

### Résumé

*Nous défendons dans cette étude l'idée que l'intégration doit jouer à l'avenir un rôle central dans les recherches sur l'agriculture, l'alimentation et la gestion des territoires ruraux.*

*En partant de définitions de l'intégration fondées sur l'importance d'un inventaire exhaustif des composantes d'un système, sur l'existence d'interactions nombreuses et complexes entre ces composantes et sur l'émergence de propriétés originales liées à ces interactions, nous soulignons tout d'abord les limites des approches « réductionnistes », qui n'étudient, et de manière séparée, que les composantes considérées comme « majeures » d'un système agricole ou agroalimentaire.*

*Nous analysons ensuite les raisons qui poussent aujourd'hui à renforcer cette approche, en distinguant celles liées à la dynamique de la science et celles issues de nouvelles interrogations de la société. Dans le premier cas, la possibilité d'étudier de nouveaux niveaux d'organisation du vivant, en particulier cellulaires et moléculaires, se combinent aux progrès des sciences de l'information pour inciter à intégrer les connaissances issues de ces niveaux dans les modèles existants. Mais ces évolutions, en particulier les travaux sur les systèmes non-linéaires, soulignent également, à chaque niveau d'organisation, l'émergence de phénomènes spécifiques, qui doivent donc être étudiés à ce niveau. Les évolutions de la société poussent quant à elles à prendre en compte des dimensions nouvelles – comme les conséquences des changements climatiques – ou négligées par les approches agronomiques classiques, comme la dynamique des territoires ou les impacts de l'agriculture sur l'environnement.*

*Trois domaines où cette question de l'intégration nous semble particulièrement stratégique sont ensuite examinés. Le premier est celui des différentes échelles spatio-temporelles auxquelles se déroulent les processus agronomiques. Nous insistons sur le potentiel d'innovation que présente la combinaison pertinente d'actions à ces différents niveaux. Le second est celui de l'intégration des disciplines « biotechniques » et « sociétales » pour prendre en compte le caractère « hybride » de nombreux objets agronomiques, qu'il s'agisse de l'alimentation, des OGM ou du génie écologique. Le dernier domaine évoqué est celui des acteurs impliqués dans les processus agricoles au sens large – ou concernés par eux – et de leur diversité croissante, qui oblige à comprendre les logiques d'action de ces différents acteurs pour analyser des phénomènes comme le développement d'espèces invasives, les conflits d'usage pour la gestion d'une ressource ou pour faire interagir savoirs profanes et savoirs experts dans la production d'innovations.*

*La dernière partie de cette étude propose cinq interrogations-clés pouvant baliser une démarche d'intégration. La première concerne les finalités, c'est-à-dire les enjeux visés par une telle approche. Elle s'articule autour du dilemme entre l'optimisation agronomique classique, en univers prévisible et, souvent, monocritère, et la recherche d'autres propriétés, viabilité en univers incertain ou critères du développement durable. La seconde interrogation porte sur les composantes que l'on souhaite intégrer, avec la question de l'usage pertinent du principe de parcimonie et celle d'une anticipation du comportement de composantes biologiques ou sociales, et donc évolutives, lorsqu'elles seront impliquées dans un processus d'intégration. Vient ensuite la question de la définition de « l'architecture » choisie, c'est-à-dire de l'organisation spatio-temporelle des différentes composantes, qui conditionnera au moins autant les propriétés du système intégré que les caractéristiques propres à chaque composante. La quatrième interrogation porte sur la conduite d'un processus d'innovation, avec la préoccupation d'identifier et de prendre en compte l'émergence, au cours du processus, de propriétés imprévues. Enfin, nous posons la question de l'évaluation d'une telle démarche. Nous insistons sur la nécessité de juger de son efficacité avec des critères adaptés, qu'il s'agisse du recul temporel nécessaire, de l'appropriation effective par les utilisateurs visés ou des conséquences en termes d'amélioration du « capital humain ».*

*En conclusion, nous soulignons combien le fait de présenter l'intégration comme un aspect, et une responsabilité, de la démarche scientifique – et non comme un « art » se pratiquant en aval de la recherche – conditionnera l'implication effective des chercheurs dans de telles approches. Nous nous interrogeons enfin sur la contribution de cette réflexion à celle, déjà ancienne, sur l'élaboration d'une véritable « technologie », considérée comme un « discours épistémologique » sur les techniques et les pratiques.*

La notion d'intégration n'est pas nouvelle dans les sciences agronomiques – le terme de lutte intégrée remonte aux années cinquante – mais semble, sous différentes déclinaisons – démarche intégrée, approches ou disciplines intégratives – connaître actuellement un regain d'intérêt, voire être présentée comme une source de progrès majeure pour l'avenir.

Après avoir proposé une définition générale de cette notion d'intégration et énoncé ses enjeux, nous examinerons différentes situations concrètes où cette question se pose. Nous tenterons ensuite de formuler quelques questions générales que pose cette démarche, afin de proposer les éléments d'une problématique et une réponse à la question : l'intégration est-elle un « art », c'est-à-dire une pratique subjective et intuitive réservée à quelques « virtuoses » et difficilement transmissible, ou une « science », à savoir une démarche structurée, explicite, critiquable et enseignable ?

## **I. Définition et enjeux**

### **I.1. Définitions**

On peut proposer trois définitions – ou plutôt trois approches – complémentaires de la notion d'intégration, l'une étant du registre de la connaissance et de l'analyse, la seconde du registre de l'action et de la synthèse et la dernière reliée au sens mathématique de ce terme.

Dans le registre de la connaissance, on définira l'intégration comme la prise en compte du caractère intégré de nombreux « objets » de la recherche agronomique, c'est-à-dire de la nécessité de ne pas les étudier seulement en les décomposant en entités plus simples pouvant être décrites indépendamment, parfois par des disciplines différentes. Cette attitude « holistique » – également souvent qualifiée de « systémique » – s'oppose donc à celle, « réductionniste », qui, souvent, simplifie les objets pour n'en étudier que certains aspects considérés comme seuls pertinents et explicatifs du fonctionnement de l'ensemble. Sans développer davantage ce point, nous soulignerons la nécessité de distinguer un réductionnisme « pragmatique », à savoir l'intérêt – qui nous semble très souvent légitime – d'étudier les composantes d'un objet pour mieux le comprendre, et le réductionnisme « idéologique », qui verrait dans cette seule décomposition la clé de la compréhension de cet objet.

Dans le registre de l'action, on peut définir l'intégration comme une démarche visant à associer des composantes et à les faire interagir dans un ensemble ayant des propriétés « émergentes », c'est-à-dire des propriétés différentes de celles que l'on pourrait attendre de la simple addition des propriétés de ses différentes composantes. L'exemple le plus classique est celui d'un avion, qui acquiert la propriété de voler alors qu'aucune de ses composantes n'en est capable. Indiquons d'emblée que cette notion d'émergence n'est pas nécessairement liée à un système complexe ayant de nombreuses composantes : les molécules d'eau ont incontestablement des propriétés originales et émergentes par rapport à l'oxygène et à l'hydrogène, comme le fait de former un liquide à température ambiante et d'avoir une densité maximale à 4°C, ce qu'aucune étude fine de ces deux éléments ne permet de prédire.

Pour ces deux premiers registres, l'intégration peut concerner non seulement des objets et des techniques mais également des critères et des objectifs. Ainsi, le passage d'une approche centrée sur la rentabilité microéconomique des productions agricoles à une approche « multifonctionnelle », prenant en compte les externalités positives ou négatives, environnementales ou sociales, de ces productions relève à l'évidence de cette préoccupation d'intégration.

Enfin, on a parfois une utilisation du terme qui évoque le concept mathématique de calcul intégral – c'est-à-dire de cumulation dans le temps ou l'espace de multiples effets élémentaires dont on veut estimer l'impact global – mais qui s'en distingue en fait assez nettement. On peut, en effet, avoir parfois, comme en calcul intégral, des effets additifs, comme lorsque l'on considère le débit d'un fleuve comme intégrant la pluviométrie sur l'ensemble du bassin versant. Mais, le plus souvent, la notion d'intégration suppose que ces effets élémentaires ne s'additionnent pas simplement et que des interactions complexes peuvent conduire à des effets globaux inattendus. C'est par exemple le cas lorsque l'on parle d'espèce intégratrice en écotoxicologie, susceptible de révéler les effets conjoints de nombreuses molécules chimiques présentes à faible dose dans un écosystème.

### **1.2. De nouveaux enjeux ?**

Pourquoi considérer que l'intégration constitue aujourd'hui un enjeu majeur pour la recherche agronomique ? On peut tout d'abord souligner que cette préoccupation renoue, de fait, avec l'ambition fondatrice de l'agronomie (au sens large utilisé en français) en tant que discipline scientifique. En effet, le champ cultivé ou la population animale d'élevage, en tant qu'agrosystèmes, sont des objets originaux, à la fois « écosystèmes » et « sociosystèmes », et l'agronomie se donne comme objectif d'intégrer ces deux dimensions. Il convient donc d'appréhender à la fois le fonctionnement physique, biologique et écologique d'un écosystème « modifié » et les pratiques des acteurs, insérés dans une société qui apporte non seulement des savoirs mais aussi des représentations culturelles particulières de la nature et de l'homme.

Ce paradigme fondateur est aujourd'hui conforté par deux groupes de raisons complémentaires. Le premier est lié à la dynamique interne des sciences, c'est-à-dire à l'apparition de nouvelles méthodes, de nouveaux outils, voire même de nouvelles disciplines qui permettent d'étudier les objets « classiques » de la recherche agronomique sous un jour nouveau, d'en révéler de nouvelles dimensions à partir de connaissances générées à des niveaux d'organisation inférieurs. On peut citer l'exemple des apports de la biologie moléculaire à l'étude des sols et de la rhizosphère (compréhension des interactions entre les microorganismes et le système racinaire, échanges d'éléments nutritifs entre plantes, etc.), qui interrogent l'agronomie sur sa capacité à prendre en compte cette nouvelle vision de la structure et de la dynamique de la biocénose souterraine.

Ce progrès des sciences conduit à chercher des outils permettant d'intégrer ces nouvelles informations, pour vérifier par exemple s'il est possible de rendre compte ou, au moins, de mieux comprendre des phénomènes macroscopiques (par exemple la morphogénèse d'un système racinaire) à partir des connaissances acquises à des niveaux d'organisation microscopiques, d'ordre cellulaire ou moléculaire. Par rapport à cette préoccupation, les progrès des sciences de l'information (modélisation, simulation, représentation experte des connaissances) permettent aujourd'hui – et invitent même à – l'exploration du comportement de systèmes complexes à partir de connaissances plus ou moins élaborées sur des composantes ou des processus : la modélisation de la morphogénèse des plantes ou de la propagation d'agents pathogènes dans des milieux hétérogènes en sont des exemples. Ces approches révèlent parfois des phénomènes insoupçonnés : ainsi, on a pu montrer qu'un changement a priori minime de l'apport de sucres vers un fruit pouvait avoir des conséquences importantes sur l'accumulation de carbone et d'eau dans ce fruit et sur sa teneur en sucres.

Autre aspect lié à la dynamique des sciences, le caractère non prévisible du comportement de certains systèmes, qualifiés globalement de non-linéaires, à partir d'une connaissance quasi-parfaite de leurs composantes et de leurs processus élémentaires est admis depuis de nombreuses années par les physiciens et a été popularisé par des métaphores comme celle du battement de l'aile du papillon déclenchant, à distance et plus tard, un cyclone. La nécessité de compléter les approches analytiques par des démarches

étudiant directement ces niveaux intégrés auxquels les phénomènes s'observent est donc maintenant reconnue et rompt avec une vision réductionniste très dominante au vingtième siècle.

Cette idée a pénétré peu à peu les sciences biologiques, même si le fait que des phénomènes importants – comme l'extension inattendue de l'épizootie actuelle de fièvre catarrhale ovine en Europe du Nord et de l'Ouest – ne puissent être reliés à des causes décelables continue à heurter l'intuition de nombreux scientifiques. On touche en effet à un débat épistémologique central sur l'usage pertinent du principe de parcimonie : dès lors qu'un phénomène peut être « expliqué », ou au moins « représenté » par le simple jeu d'effets aléatoires, l'introduction d'une hypothèse complémentaire sur une « cause » sous-jacente doit, en toute rigueur, être qualifiée de superflue. C'est par exemple le cas des débats autour des modèles neutralistes en génétique des populations, qui rendent compte de certaines évolutions sans introduire la sélection naturelle, ou des modèles chaotiques en démographie, qui « expliquent » les fluctuations importantes de populations de rongeurs sans faire appel à des changements de l'environnement.

Le second groupe de raisons est plutôt lié aux sollicitations externes vis-à-vis de la recherche agronomique, c'est-à-dire aux demandes de « prise en compte » de nouvelles questions ou d'aspects méconnus de ses objets familiers, voire à l'émergence de nouveaux « objets », comme, par exemple, le paysage. Ainsi, les changements globaux qui s'annoncent demandent de pouvoir prédire quantitativement leurs conséquences, ce qui suppose l'intégration de connaissances parfois qualitatives dans des modèles de simulation. Dans un autre domaine, le fait que de nombreux acteurs, souvent non agriculteurs, aient aujourd'hui une influence majeure sur le devenir des espaces ruraux oblige les chercheurs s'intéressant à la dynamique de ces territoires à étudier et à comprendre les attentes, les motivations mais aussi le mode d'influence de ces nouveaux acteurs et la manière dont ces acteurs conduisent *in fine* à telle ou telle modification des territoires.

On peut avoir d'ailleurs une conjonction de ces deux sollicitations interne et externe. Ainsi, la nécessité pour l'agronomie de prendre désormais en compte non seulement les produits marchands mais l'ensemble des impacts et des services assurés par les agro-écosystèmes résulte à la fois des progrès de l'écologie – qui a pu révéler l'importance de ces services et leur caractère vulnérable – et de la pression de l'opinion publique exprimant de nouvelles attentes vis-à-vis de l'agriculture.

## **II. Quelques chantiers concrets**

Sans prétendre ni à un inventaire exhaustif, ni à une véritable typologie des situations, nous présenterons trois types de « chantiers » où la recherche agronomique se confronte concrètement à la question de l'intégration.

### **II.1. L'intégration des échelles spatio-temporelles**

L'agronomie a aujourd'hui la possibilité d'étudier les phénomènes et de décliner son action à des échelles spatiales très diverses. Ainsi, la protection intégrée des cultures amène à combiner des processus très locaux au niveau de la plante (gènes de résistance, architecture) ou de son microenvironnement (physico-chimie et biocénose du sol, microclimat de la canopée), des processus à l'échelle de la parcelle (structure du peuplement végétal, avec éventuellement des mélanges de variétés ou d'espèces), d'autres à l'échelle des paysages (aménagements écologiques régulant les populations d'auxiliaires ou de bioagresseurs), ou enfin à des échelles plus vastes, comme la surveillance de la progression d'espèces invasives. Aucun de ces niveaux d'action ne peut à lui seul assurer une protection totale et durable des cultures et il faut donc les combiner de manière pertinente pour obtenir ce résultat : c'est ce que nous qualifions, en nous inspirant du vocabulaire militaire, « d'innovation en profondeur ».

On retrouve une problématique similaire au niveau des échelles temporelles. En effet, il apparaît de plus en plus clairement que les propriétés fonctionnelles d'un agrosystème à un moment donné résultent en grande partie de son histoire, cette histoire combinant des phénomènes très lents (comme la genèse des sols ou l'évolution des génomes des plantes), des phénomènes à l'échelle décennale (comme la dynamique de la matière organique des sols), annuelle (effet des cultures antérieures ou des intercultures sur la flore du sol) et d'autres à pas de temps très court (dynamique d'une épidémie de mildiou ou d'une prolifération de pucerons). Il est donc nécessaire de comprendre les interactions entre ces différentes échelles temporelles, en particulier en quoi des processus rapides, généralement les plus spectaculaires, peuvent être modulés par des phénomènes se déroulant sur des pas de temps plus lents.

Ainsi, l'étude des invasions biologiques montre souvent que la phase d'invasion est précédée d'une phase de latence pouvant s'étendre sur de longues années et que les phénomènes qui se déroulent au cours de cette phase de latence – évolutions génétiques ? modifications de l'environnement ? – sont très mal connus. Intervenir lors de la phase « explosive » de l'invasion oblige à des stratégies de défense « curative », souvent coûteuses et peu efficaces, alors qu'un contrôle « prophylactique » de la phase de latence pourrait se révéler fructueux. De même, l'épidémie majeure de fièvre de la vallée du Rift – arbovirose des ruminants transmissible à l'homme – qui a touché la vallée du fleuve Sénégal en 1987 a-t-elle été précédée d'une intensification progressive de la circulation virale qui s'est déroulée sur plusieurs années, sans manifestation évidente dans le contexte sanitaire local. Le déclenchement d'une alerte pendant cette phase d'amplification, et la mise en œuvre d'une campagne de vaccination du bétail à l'échelle de la sous-région, auraient sans doute permis d'éviter plusieurs centaines de décès humains, des dizaines de milliers de malades et de lourdes pertes économiques pour les éleveurs.

Nous ferons trois remarques complémentaires sur cette question de l'intégration des échelles spatio-temporelles. La première est que le changement d'échelle n'est pas un simple « zoom » à effectuer dans un espace-temps homogène, à l'image des questions qui se posent en dynamique des fluides lorsque l'on veut utiliser des maquettes : on sait que, même dans ce cas, les équations de changement d'échelles sont parfois complexes.

L'espace-temps agronomique n'est pas « fractal », chaque échelle à des propriétés particulières, met en œuvre des processus différents, et il s'agit donc beaucoup plus d'intégrer des niveaux d'organisation ou des niveaux hiérarchiques que des échelles au sens strict du terme.

La seconde remarque est que cette possibilité d'appréhender des échelles d'espace et de temps variées conduit à pouvoir utiliser l'hétérogénéité comme une variable d'action. Cette approche peut apparaître comme antagoniste d'une vision classique de l'agronomie – au moins celle des grandes cultures annuelles et des élevages hors sol – qui s'est souvent attachée, via des pratiques souvent coûteuses en énergie, à uniformiser l'espace et à rendre les situations répétables dans le temps. L'agronomie, dans une logique proche de celle de l'industrie, a en effet longtemps eu pour objectif unique de maximiser une simple fonction de production (le rendement, le profit), mettant au point un ensemble de techniques largement transférables dans des conditions environnementales et socioéconomiques variées pour atteindre cet objectif. La recherche de nouveaux objectifs visant en particulier à limiter les impacts négatifs de l'agriculture intensive sur l'environnement (limitation des pertes chimiques, des pertes de biodiversité), et la complexité de cahiers des charges qui en découlent à des échelles variées, ont conduit à revoir largement les démarches consistant à simplifier le système pour le maximiser. Les solutions reposent aujourd'hui beaucoup plus sur une compréhension fine des processus à l'œuvre dans les agrosystèmes, mobilisant ainsi les démarches et outils de l'écologie. Ainsi, en s'appuyant sur l'écologie des perturbations, on peut imaginer jouer sur des « régimes de perturbations temporelles » pour réguler une population de ravageurs – comme dans le cas du contrôle des séquences d'assèchement et d'inondation des gîtes larvaires de moustique en Camargue –, conserver la biodiversité ou améliorer la résistance d'une prairie à la sécheresse, mais cela s'oppose à une vision cherchant à définir et maintenir des conditions optimales. Il en est de même au niveau spatial lorsque l'on envisage des peuplements végétaux composites plutôt que la monoculture d'un génotype « idéal ».

Enfin, les nouveaux défis auxquels est confrontée la planète dans son ensemble obligent à une intégration de niveaux hiérarchiques de plus en plus grands : la conservation de la biodiversité questionne les pratiques agricoles et leur agencement à l'échelle de la biosphère et la question du changement climatique oblige à replacer les pratiques de culture et d'élevage par rapport à leurs impacts (et leur capacité de mitigation) sur l'atmosphère. L'agriculture est susceptible de séquestrer du carbone ou de produire des flux de gaz à effet de serre (gaz carbonique, méthane, oxyde nitreux, etc.) de la biosphère vers l'atmosphère. Les termes du bilan sont complexes et obligent à une analyse des processus à plusieurs échelles : l'agronomie, science du local, se doit de devenir également science du global.

## **II.2. L'intégration des disciplines**

Pour répondre à ses nouveaux défis, la recherche agronomique est amenée à la fois à faire davantage interagir ses disciplines « traditionnelles » et à mobiliser de nouvelles disciplines jusque là peu représentées, qu'il s'agisse de l'écologie, de la géographie, des sciences de l'information, du droit ou des sciences politiques. Cette intégration peut concerner un ensemble de disciplines proches ou impliquer à la fois des disciplines biophysiques, biotechniques et « sociétales ». Donnons quelques exemples pour illustrer ces différents aspects :

- l'écotoxicologie des milieux aquatiques impose de coupler, d'une part, des approches physico-chimiques permettant d'établir, à partir d'une connaissance de l'utilisation des produits phytosanitaires par les agriculteurs, une chronique temporelle des arrivées, puis de la spéciation et de la dynamique de ces produits ou de leurs métabolites dans les milieux naturels et, d'autre part, des études en mésocosmes permettant de tester la réponse d'écosystèmes simplifiés à ces apports.

- l'évolution des comportements alimentaires amène à mobiliser les approches de l'économie, de la sociologie et de l'anthropologie pour comprendre des phénomènes comme le développement très inégalement réparti de l'obésité infantile. En effet, les analyses économiques peinent par exemple à expliquer l'existence de cas de surpoids et de cas de sous-nutrition au sein d'une même famille, et seulement dans certaines populations.

- la compréhension des processus de rejets d'innovations, comme les OGM ou l'irradiation des aliments, impose de faire interagir les sciences biotechniques à l'origine de ces innovations et les sciences sociétales susceptibles d'explicitier les déterminants de ces refus.

- la lutte anti-vectorielle contre les trypanosomiasés africaines humaines et animales oblige à combiner une connaissance fine de la biologie et de l'écologie des glossines pour rechercher des mesures de contrôle efficaces et respectueuses de l'environnement et une approche sociale et économique, pour faciliter l'appropriation des méthodes de contrôle par les gestionnaires du risque et les groupes exposés à ce risque.

La question générale du dialogue entre disciplines et des difficultés des approches interdisciplinaires fait l'objet d'une abondante littérature et nous nous limiterons ici à évoquer deux aspects qui nous semblent plus spécifiques de la recherche agronomique.

Le premier est celui du non-recouvrement des espaces d'étude et d'action des différentes disciplines. Pour prendre l'exemple de la ressource en eau, l'espace pertinent pour un hydrologue sera le bassin versant, entité intégratrice de l'ensemble des flux. L'hydrobiologiste étudiant la structure des peuplements aquatiques pourra être amené à considérer les grandes provinces biogéographiques, qui regroupent souvent plusieurs bassins versants, mais aussi à scinder un bassin versant en plusieurs entités écologiquement différenciées. Les sciences économiques et sociales prendront comme ensemble d'étude le collectif des acteurs impliqués dans la production et l'utilisation de l'eau, qui peuvent être répartis sur un vaste territoire, avec parfois des interactions au niveau international. L'existence de ces différentes échelles et niveaux d'organisation se traduit par exemple par la difficulté à mettre en place des enquêtes ou des bases de données pluridisciplinaires ou de développer des modèles communs.

Le second aspect est l'émergence de plus en plus fréquente dans le champ de la recherche agronomique d'objets « hybrides » au sens de Bruno Latour, à savoir des objets qui sont un mélange complexe d'aspects techniques et d'aspects sociétaux et qui doivent être étudiés comme tels. Nous avons cité le cas des OGM, pour lesquels il apparaît assez clairement qu'une partie importante du débat ne porte pas sur les éventuelles imperfections techniques de ces inventions mais sur les conséquences économiques et sociétales de leur diffusion éventuelle. Il en résulte, notamment, que ce n'est pas le perfectionnement technique de ces produits (les OGM de 2<sup>ième</sup> ou 3<sup>ième</sup> génération) qui changera notablement les termes du débat. Un autre exemple a été la mise en place en France de la directive européenne Natura 2000, qui visait à désigner des territoires d'intérêt écologique et s'est accompagnée de vives oppositions des agriculteurs dans de nombreuses régions. Nous considérons que ces tensions sont liées en grande partie au fait d'avoir considéré cette opération essentiellement sous l'angle du génie écologique et d'avoir sous-estimé la nécessité de développer en même temps un « génie sociétal » adapté à l'appropriation de ce nouvel objet par les acteurs des territoires concernés.

Enfin, le rapprochement observé de disciplines pour répondre à de nouveaux défis, tel qu'il est illustré ci-dessus, peut contribuer à l'émergence de nouvelles disciplines, fruit de cette problématique de rapprochement et d'interaction, débouchant ainsi sur une intégration durable des disciplines d'origine : C'est le cas par exemple de l'agroécologie, qui se propose de combiner agronomie et écologie, et, pour certains auteurs, des éléments d'économie et de sociologie, pour répondre aux enjeux de durabilité écologique, économique et sociale des agrosystèmes.

### **II.3. L'intégration des acteurs, des pratiques et des usages**

Comme nous l'avons indiqué précédemment, les objets de la recherche agronomique apparaissent de plus en plus « investis » par des acteurs nombreux qui vont exprimer, en tant que consommateurs, citoyens ou contribuables, des attentes nouvelles. Ainsi, les évolutions des sols, de la biodiversité, des zones humides, des paysages sont considérées aujourd'hui comme ne pouvant être la simple résultante de logiques micro-économiques indépendantes des propriétaires ou des utilisateurs de ces ressources. Les demandes de signes de qualité, de développement de systèmes alimentaires localisés, d'information sur les conditions de production (bien-être animal, certifications environnementales, etc.) manifestent également cet élargissement du cercle des « porteurs d'enjeux » et des attentes associées.

Cet élargissement peut avoir une portée et une action locale (la défense d'un patrimoine régional) mais elle peut être également largement mondialisée. A titre d'exemple, il est ainsi possible que la volonté par les consommateurs européens ou nord-américains d'une labellisation ou certification « bio » ou « éthique » pour un produit comme le chocolat ait un réel impact sur la conservation de la biodiversité dans le corridor mésoaméricain, un des lieux de production du cacao, à travers le maintien de pratiques agroforestières pour la culture du cacaoyer qui permettent la conservation d'un habitat forestier favorable à de nombreuses espèces animales menacées.

Cependant, faire participer ces nouveaux acteurs suppose l'élargissement d'un certain nombre de cercles qui, même s'il apparaît positif à long terme, ne va pas sans difficulté. Par exemple, associer des citoyens à la définition des objectifs et des méthodes d'amélioration génétique d'une race animale peut permettre d'améliorer la perception sociale de ces pratiques mais pourra heurter le cercle des éleveurs et des techniciens responsables de l'évolution de « leur » race.

La recherche agronomique a une certaine expérience de l'intégration des acteurs mais cette expérience concerne essentiellement la mise en place de filières de production, associant dans une logique économique tout ou partie des opérateurs de la production, de la transformation et de la distribution des produits et des services associés. Même s'il peut exister des conflits entre ces opérateurs, on peut considérer qu'ils partagent tous une même finalité, à savoir d'alimenter le marché avec des produits présentant un rapport qualité/prix attractif pour les acheteurs et rémunérateur pour les vendeurs.

Par contre, l'analyse des « filières de pollution », c'est-à-dire de la chaîne reliant l'ensemble des acteurs aboutissant à la production d'une externalité négative, est moins classique et révèle des situations complexes. On peut citer par exemple le développement d'espèces invasives sur un territoire, qui associe *de facto* des transporteurs, des marchands de containers, des jardineries, des amateurs alors qu'aucun de ces opérateurs n'a la volonté délibérée d'introduire de telles espèces. C'est pourtant à travers l'organisation de cette « filière » que peut se réaliser la maîtrise des invasions biologiques sur un territoire donné. Dans le même esprit, le développement des analyses de cycle de vie (ACV), qui examinent en particulier les impacts environnementaux d'un produit, depuis sa conception jusqu'à son élimination, permet de reconsidérer des bilans basés uniquement sur le « segment » le plus visible du cycle de vie, comme dans le cas du bilan énergétique des agrocarburants ou de divers modes de production et de distribution alimentaire.

Autre cas, l'utilisation d'une même ressource (un plan d'eau, une forêt, une lande) par des utilisateurs variés (agriculteurs, pêcheurs ou chasseurs, touristes et sportifs, sylviculteurs, aquaculteurs) ayant des attentes différentes et parfois antagonistes est une question déjà ancienne mais qui devrait se poser avec une acuité croissante dans de nombreux lieux où se combinent ressources attractives et croissances démographiques (zones littorales, grands lacs de barrages, zones rurales périurbaines). L'intégration de ces différentes attentes, confrontées aux impératifs de gestion durable de ces ressources et des

risques associés, appelle l'élaboration de nouveaux outils qui, sans éliminer la dimension politique de ces arbitrages, permettra de les éclairer.

Enfin, la question de l'intégration de nouveaux acteurs investit aujourd'hui la pratique même de la recherche agronomique, dès lors qu'est mise en avant dans de nombreux contextes l'importance des « savoirs profanes », en particulier vis-à-vis d'objets ou de processus naturels, et les capacités d'innovation endogène liées à ces savoirs. Elaborer de nouveaux modes de recherche associant les savoirs « experts » et les savoirs « profanes » – ou, plutôt, les « modes de connaissance et d'innovation » propres à ces deux approches – et recherchant une synergie entre elles représente donc un enjeu majeur pour la dynamique future de l'innovation agronomique.

### **III. Vers une problématique de l'intégration ?**

En revenant à nos définitions initiales et en nous appuyant sur les exemples que nous venons de décrire, il nous semble possible d'identifier un certain nombre de questions transversales qui, sans constituer une approche totalement structurée, permettent d'esquisser les étapes d'une démarche d'intégration. Nous examinerons successivement :

- la question des finalités, c'est-à-dire des propriétés recherchées ;
- la question des composantes à intégrer et de leur mode d'étude ;
- l'organisation de la dynamique des interactions, c'est-à-dire de l'architecture fonctionnelle dans laquelle s'inséreront ces composantes ;
- la conduite d'un processus d'innovation basé sur l'intégration ;
- l'évaluation de l'efficacité de ces démarches par rapport à des approches « conventionnelles ».

#### **III.1. Quelles finalités ?**

Les propriétés que l'on souhaite obtenir dans une démarche d'intégration constitue un point majeur, que nous retrouverons au niveau de l'évaluation. On peut identifier deux options principales.

S'agit-il de rester dans le cadre d'une optimisation de performances agronomiques, dans un système de contraintes considéré comme connu et stable ou, au moins, prévisible ? Dans ce cas, il s'agit de prendre acte du fait qu'une approche cloisonnée, visant à améliorer indépendamment différents paramètres à partir de « courbes de réponse » obtenues expérimentalement, n'exploite qu'une partie de la variabilité totale du système, c'est-à-dire sa dimension « linéaire ». Par exemple, définir le rendement d'une culture en fonction des dates de semis, des apports d'eau, d'engrais, de produits phytosanitaires peut se faire dans un premier temps en étudiant séparément les effets de ces différents facteurs mais il apparaît que des interactions nombreuses, avec des effets antagonistes ou synergiques, obligent à considérer les effets conjoints de ces facteurs pour définir effectivement la combinaison optimale.

Le problème est dans ce cas essentiellement technique, à savoir le caractère rapidement irréalisable de dispositifs expérimentaux visant à identifier cet optimum. Par exemple, un plan d'expérience complet étudiant deux variables ayant chacune cinq modalités possibles (avec trois répétitions) nécessite 75 parcelles mais il en faut 1875 si l'on veut étudier simultanément quatre variables et près de 50.000 dans le cas de six variables ! C'est là que des approches alternatives, notamment par modélisation, peuvent apporter des solutions, à condition d'être alimentées par une bonne connaissance des processus impliqués.

S'agit-il au contraire de se placer dans un autre cadre de référence et de rechercher des réponses à de nouveaux défis, de s'intéresser à d'autres propriétés des systèmes de production ? Dans ce cas, le problème est à la fois technique et conceptuel. On peut citer plusieurs situations où cet élargissement du cadre apparaît nécessaire.

La première est le passage d'un univers connu, stable ou prévisible dans ses évolutions à un univers incertain. Cette incertitude peut concerner aussi bien des paramètres climatiques (pluviométrie, événements extrêmes), écologiques (arrivée d'espèces invasives, mutations d'agents pathogènes) que socio-économiques (fluctuations des prix, changement de comportement des consommateurs). Dans ce cas, on recherchera à élaborer un système intégré non pour ses performances optimales mais pour des paramètres comme la résistance (minimisation de l'impact des perturbations), la résilience (capacité de retrouver

rapidement un bon niveau de performance après perturbation) ou l'adaptabilité (capacité à s'adapter rapidement à un nouveau système de contraintes).

La notion de viabilité offre un cadre conceptuel global pour cette réflexion : elle s'interroge à la fois sur la performance immédiate d'un système de production (il peut s'agir de productions agricoles, forestières, de pêcheries, etc.) et sur les conséquences différées des choix technico-économiques effectués pour obtenir cette performance. Ces choix peuvent en effet constituer des atouts ou, à l'inverse, des handicaps pour la performance ultérieure dans un autre ensemble de contraintes. Cette recherche de compromis et de complémentarité entre les performances successives peut notamment conduire à s'écarter d'un optimum instantané lorsqu'il implique des choix fragilisant le système.

Seconde situation, celle où la performance doit prendre en compte des externalités négatives jusque là négligées. C'est par exemple le cas lorsque l'on étudie l'effet d'une fertilisation ou de l'utilisation d'un produit phytosanitaire en prenant en compte non seulement les rendements ou la qualité de la production mais les conséquences de ces produits sur les écosystèmes ou la santé humaine. Ces conséquences peuvent être très importantes, y compris sur des pas de temps très longs : ainsi, l'emploi du chlordécone dans les bananeraies aux Antilles dans les années 70 et 80 a permis un contrôle efficace des charançons, remplissant ainsi son rôle d'insecticide ; mais cette molécule, très stable, très peu soluble dans l'eau, et d'une grande affinité pour la matière organique des sols a entraîné une contamination durable des sols. La gestion des risques de contamination des eaux, des productions agricoles, des produits de la pêche requiert aujourd'hui une démarche intégrée de nombreuses disciplines (chimie des sols, agronomie, hydrologie, etc.), à des échelles variées, dans la perspective de limiter les risques et de proposer des solutions.

Autre exemple, lorsque l'on étudie le bilan énergétique de l'alimentation animale non seulement au niveau des élevages mais en prenant en compte les coûts énergétiques liés à la production et au transport de ces aliments, on passe d'une vision selon laquelle on a amélioré – par les recherches en nutrition et en génétique – l'efficacité énergétique de l'alimentation à une vision soulignant au contraire une dégradation de ce bilan. On retrouve ici les problématiques plus générales du « cycle de vie » ou de « l'empreinte écologique ».

La dernière situation que nous évoquerons est celle où l'on souhaite prendre en compte les critères sociaux du développement durable, c'est-à-dire une efficacité mesurée non en termes uniquement économiques mais en termes d'augmentation du « capital humain ». Un exemple emblématique est celui des démarches d'innovation participative, dans lesquelles on cherche à associer les agriculteurs à la conception et à la production d'innovations agronomiques (nouvelles variétés végétales, nouvelles pratiques agronomiques). Par rapport à une vision technocratique privilégiant l'élaboration d'innovations par des chercheurs « professionnels », une telle démarche n'ambitionne pas seulement de produire ces innovations plus rapidement ou à moindre coût, critère pour lequel elle ne sera pas forcément plus efficace ; elle prend en compte la construction d'un réseau d'acteurs susceptible à long terme et dans des situations variées de continuer à élaborer les innovations qui lui seront nécessaires. Ceci prend une dimension d'autant plus forte que la mise en œuvre d'une agriculture basée sur une gestion durable des ressources naturelles (et limitant l'emploi d'intrants chimiques) reposera sur une connaissance élaborée et partagée par les acteurs des régulations à l'œuvre dans les agrosystèmes : recyclage des éléments minéraux et fixation symbiotique de l'azote, réseaux trophiques et contrôle des bioagresseurs, couverture du sol et érosion, régulation des processus hydrologiques locaux, etc.

### **III.2. Les composantes et leurs propriétés**

La question des composantes que l'on souhaite intégrer se décline en plusieurs préoccupations complémentaires.

La première est celle de l'inventaire de cet ensemble, qu'il s'agisse de la définition des acteurs socio-économiques que l'on souhaite associer à l'élaboration d'un nouveau « signe de qualité » d'un produit alimentaire, des disciplines que l'on veut mobiliser pour comprendre l'évolution d'un territoire ou des entités – de l'individu au paysage – que l'on veut combiner pour élaborer des stratégies de protection intégrée des cultures ou des élevages. Cette question n'est pas spécifique de la recherche agronomique. Elle pose le problème déjà évoqué de l'utilisation appropriée du principe de parcimonie, à savoir se limiter à l'intégration des seuls éléments susceptibles de rendre compte de l'essentiel des propriétés du phénomène considéré. Pour prendre un exemple concret, celui de la consommation de viande de bœuf, les modèles économétriques prenant en compte le pouvoir d'achat et les prix relatifs par rapport à d'autres viandes rendaient compte jusque dans les années quatre-vingt de l'essentiel des fluctuations observées. Il a fallu ensuite développer des approches psychosociologiques pour comprendre des diminutions de consommation que les modèles économétriques n'expliquaient plus. Cet exemple illustre l'enjeu d'une grande réactivité pour identifier rapidement la nécessité d'intégrer de nouvelles composantes.

Cette question de la parcimonie se pose notamment dans le cas de la modélisation, où il convient d'arbitrer entre une option pragmatique n'intégrant – parfois en les simplifiant – que des processus bien compris et se présentant comme une « aide au raisonnement » et des ambitions plus exhaustives.

Une préoccupation connexe concerne le « niveau » d'organisation choisi comme point de départ « explicatif », qui conditionne en partie le niveau d'organisation d'arrivée, c'est-à-dire celui qui sera effectivement mieux « expliqué » à l'issue de l'exercice. Sans prétendre théoriser ce point de vue, il semble en effet que la compréhension, même fine, d'un niveau d'organisation donné n'éclaire souvent que le niveau d'organisation immédiatement supérieur. Il convient donc d'adopter un « point de vue », c'est-à-dire d'identifier les utilisateurs concernés par une telle approche et de privilégier leur questionnement.

Nous prendrons l'exemple de la qualité des fruits, dont l'élaboration dépend de processus complexes contrôlés par l'environnement (climat, sol, etc.), les pratiques agricoles et le génotype. Deux types d'approches contrastées peuvent être *a priori* suivies :

- une approche ascendante (*bottom-up*) intégrant les acquis de la génomique et autres techniques associées, mais qui, d'un point de vue opérationnel, ne permet pas de dépasser l'échelle cellulaire et n'est pas applicable à l'échelle du fruit ; elle peut cependant orienter les travaux des physiologistes.

- une approche descendante (*top-down*), de type « boîte noire », lorsque le système est analysé par ses performances (ici les traits de qualité), mises en relation globalement avec les contrôles agronomiques, environnementaux et génétiques, et qui peut satisfaire les agronomes, les agriculteurs et les améliorateurs des plantes.

L'enjeu est donc d'explorer les possibilités et l'intérêt d'une approche mixte (*middle-out*) combinant les deux approches précédentes, dans laquelle le système est analysé à un niveau intermédiaire, plus fonctionnel que dans la deuxième approche mais évitant l'extrême complexité que sous-tend la première approche.

Une troisième problématique est celle du choix, voire de l'adaptation de ces composantes en fonction du rôle que l'on souhaite leur faire jouer dans un système intégré. Ainsi, l'utilisation d'une culture de crucifères comme culture intercalaire, dans le but de fixer les excédents d'azote ou de réduire la population de champignons pathogènes du sol, fera appel à des espèces ou variétés différentes de celles utilisées pour des cultures de production. Cette question doit, de plus, être examinée en gardant à l'esprit que ces composantes seront choisies non seulement pour leur valeur propre mais pour les interactions qu'elles généreront au sein du système : en prenant l'exemple des réactions enzymatiques, l'introduction dans un milieu donné d'une protéine en très faible quantité peut

suffire à induire des modifications majeures de la composition chimique de ce milieu. Tout en se gardant des analogies entre systèmes biologiques et sociaux, on pourrait utiliser cette même image dans le cas des acteurs sociaux, quelques individus ou un groupe de faible importance pouvant induire des changements majeurs.

La dernière préoccupation est plus spécifique de la recherche agronomique, ou plutôt de l'intégration d'entités biologiques ou sociales. C'est celle des propriétés adaptatives de ces entités, c'est-à-dire de leur capacité – contrairement à des entités physiques – à évoluer et à modifier leurs propriétés lorsqu'elles sont en interaction avec d'autres. Ainsi, l'introduction d'une résistance génétique à un ravageur dans une culture crée une pression de sélection susceptible de favoriser des mutations contournant cette résistance ; le développement d'une dynamique pour différencier un produit de terroir amène les acteurs partisans d'une approche banalisante (un camembert, c'est un camembert ; une banane, c'est une banane) à reconsidérer leur stratégie. Enfin, et nous l'avons déjà souligné, les pratiques des acteurs interagissent de manière complexe avec les variations de l'environnement et ces interactions peuvent parfois limiter, ou à l'inverse amplifier les conséquences de ces variations, comme dans le cas des crises de sécheresse au Sahel. Le caractère assez difficilement prévisible de ces adaptations pose le problème, que nous évoquerons plus loin, du pilotage de ces approches intégratives.

### **III.3. Quelle architecture ?**

Selon quelle « architecture fonctionnelle » doit-on faire interagir les composantes précédemment définies ? Cette question est sous-tendue par le postulat, qui nous semble intuitif pour tout système organisé, que l'association des mêmes composantes peut conduire à des propriétés très différentes selon cette architecture.

Cette question peut se poser au niveau de l'organisation de l'espace. Ainsi, la mise en place d'unités d'aménagement écologique (haies et talus, bandes enherbées, zones humides, zones « refuges », etc.) dans un territoire pour obtenir diverses fonctionnalités (lutte contre l'érosion, dépollution, conservation de la biodiversité) suppose d'identifier les points sensibles de ce territoire où ces unités seront efficaces. En outre, ces unités devront être reliées fonctionnellement pour jouer pleinement leur rôle. C'est toute la thématique des infrastructures écologiques, popularisée par le Grenelle de l'environnement sous le terme de « trame verte et bleue ». De même, à l'échelle de la parcelle, l'utilisation d'un mélange de variétés pour limiter la propagation de maladies dans une monoculture de blé ou celui d'un mélange plurispécifique d'arbres pour lutter contre les incendies pose des problèmes similaires de structuration. On sait, en effet, que ces phénomènes de propagation sont conditionnés, souvent avec des effets de seuil, par la distribution spatiale des hétérogénéités (il en est de même pour la percolation de polluants dans un sol).

Cette idée de raisonner la structuration spatiale au sein même d'une parcelle agricole peut sembler une curiosité théorique, dans la mesure où il semble difficile de s'écarter dans la pratique d'options simples comme un mélange aléatoire ou un semis en lignes ou bandes alternées. C'est en réalité un changement de paradigme majeur qui consiste à explorer la structure hétérogène et le fonctionnement des mélanges plurispécifiques propres à la plupart des écosystèmes naturels pour construire des agrosystèmes durables ayant les propriétés de résilience des écosystèmes naturels. Les perspectives de l'agriculture de précision permettent par exemple d'envisager la mise en place, à partir d'un « patron numérique », d'organisations spatiales beaucoup plus sophistiquées, prenant éventuellement en compte les micro-hétérogénéités de cet espace (nature des sols, humidité, etc.). D'une manière plus générale, il s'agit de s'inspirer du fonctionnement des écosystèmes naturels pour concevoir des agrosystèmes basés sur une valorisation plus efficiente des ressources internes du système, limitant ainsi les entrées et sorties non désirées.

On retrouve des questionnements similaires au niveau de « l'architecture temporelle » du système, c'est-à-dire du séquençage et de la durée des différentes

interventions possibles : une haie, une ripisylve ou une prairie ont des propriétés fonctionnelles qui évoluent avec le temps et il est important de prendre en compte ces évolutions pour permettre une certaine gestion dynamique des paysages. Il est en effet vraisemblable que la thématique de la trame verte se heurtera à des réticences si elle apparaît comme un gel définitif de certaines surfaces pour des fonctions non directement productives. Il faut donc rechercher des stratégies permettant de conserver les propriétés fonctionnelles recherchées, qui permettront par exemple la conservation du sol, la conservation de la biodiversité, la qualité des eaux de profondeur et de surface, tout en permettant une certaine fluidité de la mosaïque territoriale (rotation des cultures, localisation des jachères, exploitation forestière, substitution entre prairies et cultures). Dans ce registre de l'architecture temporelle, nous avons évoqué précédemment les perspectives d'actions qu'offrait le cadre théorique de l'écologie des perturbations. Il apparaît d'ailleurs pertinent de raisonner conjointement et de manière complémentaire ces aspects spatiaux et temporels et de parler d'architecture spatio-temporelle du système.

Les questions récentes posées par les maladies animales et leur propagation illustre un niveau de complexité complémentaire de cette question de l'organisation spatio-temporelle. Il faut en effet considérer que les activités humaines ont contribué à « déformer » considérablement l'espace-temps physique et biologique : certaines distances sont considérablement réduites – voir la propagation rapide des agents pathogènes par les transports aériens –, d'autres deviennent quasi-infinies, les infrastructures routières et ferroviaires introduisant des obstacles infranchissables pour certaines espèces ; enfin, des connections nouvelles apparaissent et prennent le pas sur les connections naturelles, comme par exemple la circulation est-ouest de la grippe aviaire, via les transports routiers, qui semble prédominante par rapport aux flux naturels nord-sud des oiseaux migrateurs.

On pourrait prendre également l'exemple du cycle de l'eau, avec le rôle que jouent aujourd'hui les drainages, pompages, retenues, réseaux de collecte et autres canalisations dans l'accélération, le ralentissement ou la réorientation de certains flux, avec tous les risques émergents liés à cette nouvelle architecture. Cette « anamorphose » de l'espace-temps est donc un phénomène majeur à prendre en compte.

Cette question de l'architecture est également posée aux sciences sociales : selon quels processus, dans quel cadre, faut-il faire interagir les acteurs pour contribuer à l'élaboration d'un produit de qualité ou à la prise en compte d'enjeux environnementaux ? Quels sont les flux d'information pertinent à mettre en place entre ces acteurs ? Quel positionnement des chercheurs « professionnels » dans ces dispositifs ?

#### **III.4. La conduite du processus**

Nous souhaitons aborder maintenant la question de la mise en place d'une démarche d'intégration, en particulier lorsqu'elle vise des finalités comme la capacité d'adaptation à un univers incertain. En effet, nous avons évoqué à plusieurs reprises les limites prédictives des approches du comportement de systèmes complexes, notamment les limites de la démarche expérimentale en milieu contrôlé. Il est donc nécessaire de développer d'autres approches – modélisation, recherche-action (c'est-à-dire implication des chercheurs dans un processus de changement pour en comprendre la dynamique – qui devront se développer de manière itérative avec les données empiriques recueillies sur le terrain et non selon un schéma linéaire de recherche-développement-diffusion. Ces dispositifs d'apprentissage devront notamment se doter d'observatoires appropriés, cette notion d'appropriation combinant la pertinence technique (capacité d'observer les phénomènes) et la pertinence sociale (appropriation par l'ensemble des acteurs concernés, gage de la durabilité de tels observatoires). Ces observatoires devront également être capables d'observer des externalités imprévues – positives ou négatives – de ces innovations, pour prendre en compte le caractère par nature difficilement prédictible de l'émergence de propriétés dans un système complexe.

Cette démarche rejoint le concept « d'innovation précautionneuse » développé notamment par Bruno Latour, à savoir une démarche où l'application du principe de précaution n'intervient pas *a posteriori*, pour des innovations déjà élaborées, mais interagit en permanence avec le processus d'innovation. Elle implique également une analyse particulière de l'adéquation entre les échelles auxquelles se déroulent les processus biologiques et physiques en jeu et celles où s'observent les dynamiques humaines et s'appliquent les politiques.

### **III.5. Quelle évaluation ?**

Nous avons commencé à évoquer cette question à propos des finalités d'un processus d'intégration. En effet, sauf à affirmer de manière dogmatique la supériorité systématique de cette démarche, la recherche agronomique ne peut se soustraire à la question de l'efficacité comparée de ces approches par rapport à d'autres, plus conventionnelles, qu'il s'agisse du coût financier ou du temps nécessaire, lié notamment à l'investissement souvent élevé qu'impose la construction d'un dialogue véritable entre disciplines ou entre acteurs. Nous nous bornerons ici à trois remarques.

La première est la nécessité d'évaluer cette efficacité sur des pas de temps suffisamment longs et des espaces suffisamment étendus, et donc d'intégrer des critères de résilience et de durabilité plutôt que des performances instantanées et localisées : on sait par exemple qu'en génétique, des stratégies privilégiant un fort progrès à court terme – et donc favorisées par des opérateurs privés pour des raisons évidentes de compétitivité – peuvent se révéler moins efficaces à long terme que des approches plus complexes, intégrant la conservation d'une forte variabilité génétique, en particulier lorsque les objectifs d'amélioration peuvent être amenés à changer ou qu'une trop forte homogénéité génétique rend le système particulièrement vulnérable aux agents pathogènes. D'une manière plus générale, l'agriculture conventionnelle intensive s'est focalisée sur des gains à court terme, aux échelles de l'exploitation agricole et de l'agro-industrie. Les impératifs de durabilité ont aujourd'hui modifié ces échelles, nécessitant l'évaluation à long terme des fonctionnalités des agro-écosystèmes sur des mailles paysagères ou régionales.

Deuxième remarque, il sera indispensable de mesurer l'efficacité au niveau des utilisateurs finaux et de l'appropriation effective de ces innovations et non pas au niveau de la performance à la sortie du laboratoire, de la station expérimentale ou des essais multilocaux : cette distinction entre l'évaluation des « inventions » et l'évaluation de leurs impacts peut là aussi aboutir – mais il faut s'en assurer – à des inversions de classement entre les différentes approches. En particulier, si l'on admet que toute innovation se traduit, lorsqu'elle est largement diffusée, par des externalités imprévues, positives ou négatives, il conviendra de prendre en compte l'ensemble de ce bilan et pas seulement la réalisation effective de la performance visée. La question des OGM est ici particulièrement illustrative : le riz doré, à haute teneur en vitamine A est-il efficace pour résoudre les cécités résultant de carences chez les plus pauvres ? Le généticien l'a longtemps pensé, mais le débat international sur cette question (et surtout la position des nutritionnistes et des sociologues) a bien montré la multiplicité des causes à considérer pour résoudre ce problème majeur de santé publique. Intégrer les points de vue de disciplines différentes conduit ici à proposer des solutions différentes.

Enfin, et c'est à notre avis l'aspect le plus important, cette évaluation devra intégrer les critères du développement durable, qu'il s'agisse de l'amélioration du « capital humain » que représente un réseau d'acteurs effectivement capable de produire les innovations qui lui sont nécessaires ou du capital social et culturel que constitue le système d'échanges mis en place pour gérer des ressources, système d'échange qui peut être le support de bien d'autres formes de solidarité et de diffusion des connaissances. L'échec des stratégies passées visant à améliorer la productivité de filières clés pour résoudre les questions de développement dans les pays du Sud traduit en grande partie l'absence de prise en compte

des besoins et opportunités des paysans pauvres de même que le contexte écologique et social dans lequel s'inscrit leur action. La mise en œuvre d'une gestion « intégrée » des ressources naturelles, qui prend en compte (intègre) des interactions entre des systèmes écologiques et des systèmes sociaux devient dès lors une priorité. On peut relier à cette préoccupation les notions de « construction de compétences » ou de renforcement des « capacités d'apprentissage », qui sont souvent promues – au moins dans les discours – comme critères d'évaluation de la recherche agronomique pour le développement.

### **Conclusion**

A l'issue de cette exploration, est-il possible de répondre à la question initiale, à savoir le caractère d'un art – au sens artisanal et empirique où nous l'avons défini – ou d'une science de la démarche d'intégration ?

Auparavant, il convient de souligner l'enjeu concret – et non seulement intellectuel – de cette interrogation, qui est à notre avis celui de l'implication forte des chercheurs dans de telles démarches. En effet, dans une conception « classique » de la recherche, on peut défendre une vision selon laquelle l'intégration est un processus qui se situe « à l'aval » et relève donc de la dynamique des acteurs économiques ou sociaux. La recherche a donc comme mission d'alimenter ce processus, en produisant des « éléments de connaissance », voire des méthodes et outils d'intégration, ces productions élémentaires étant élaborées et évaluées selon des démarches scientifiques reconnues. Quand on connaît le rôle déterminant des critères et processus d'évaluation dans la dynamique scientifique, on mesure aisément combien l'affirmation que l'intégration ne relève pas de la science ne peut que légitimer cette vision classique et dissuader les chercheurs de s'y impliquer.

Que peut-on donc dire sur la « scientificité » de la démarche d'intégration ? Assurément, l'analyse et les exemples qui précèdent montrent que la démarche d'intégration a largement dépassé le statut de pratique subjective et intuitive, réservée à quelques « virtuoses » ou experts. Elle constitue souvent une démarche organisée et explicite de l'ingénieur. Elle constitue aussi une tendance forte, largement opposée au réductionnisme idéologique, dans l'évolution des sciences. Assimiler la démarche d'intégration à une « démarche scientifique » reste néanmoins à confirmer : Il convient pour cela de distinguer les dimensions inductive et déductive de la démarche scientifique.

Dans sa phase inductive – élaboration d'une hypothèse, d'une théorie – la science fait appel à une créativité, à des intuitions qui relèvent à notre avis du même registre que la démarche artistique. L'intégration, qu'il s'agisse d'identifier les composantes pertinentes et leur complémentarité éventuelle ou de formuler une hypothèse sur l'organisation spatiale ou temporelle adéquate, a une dimension inductive évidente, peut-être plus marquée que des approches plus analytiques. En reprenant l'analogie mathématique, on sait l'intuition que nécessite la recherche d'une fonction intégrale, comparée au caractère besogneux de la définition d'une fonction dérivée ! Mais cet aspect ne permet pas, comme nous venons de le dire, de trancher notre question initiale.

Au niveau déductif, la science se caractérise par la volonté de tester de manière objective une théorie ou une hypothèse, ce caractère testable – et donc réfutable – étant pour certains un critère nécessaire et spécifique des hypothèses et théories scientifiques. Par rapport à cette exigence, nous avons esquissé dans la troisième partie de cette note les étapes d'un processus d'intégration qui nous semblent donner prise à un examen critique de sa pertinence et donc à une évaluation de ceux qui la pratiquent.

Mais nous laisserons ouverte la question suivante : peut-on parler de l'émergence d'une « science de l'intégration » ou convient-il plus modestement d'évoquer « les sciences et techniques de l'intégration » ? Par rapport à cette question, et pour montrer que ces interrogations d'aujourd'hui nous relient à des réflexions déjà anciennes, nous nous demanderons seulement si nous ne parlons pas en fait de la « technologie », au sens de

Leroi-Gourhan et d'Haudricourt, c'est-à-dire d'un « discours épistémologique » sur les techniques et les pratiques. En effet, les objets créés ou utilisés par les hommes, et en particulier ceux de l'agronomie, ne sont-ils pas en fait, et depuis toujours, les fruits de processus d'intégration empirique, combinant des facteurs physiques, biologiques, sociaux et culturels, processus dont nous avons essayé ici de comprendre la dynamique et les enjeux ?