





# ÉCOLOGIE INTENSIVE



MICHEL GRIFFON

---

# ÉCOLOGIE INTENSIVE

La nature, un modèle  
pour l'agriculture et la société

*Préface d'Erik Orsenna*

BUCHET • CHASTEL  
LA  
VERTE

© Libella, Paris, 2017.  
ISBN : 978-2-283-03007-3

*À Jacques Weber, anthropologue et économiste  
qui dirigea l'Institut de la biodiversité,  
avec qui les discussions, toujours passionnantes,  
sur la matière de ce livre nourrissaient notre amitié,  
dont je crois qu'elle dure au-delà de sa disparition.*



## SOMMAIRE

Préface de Erik Orsenna .....	11
Introduction : Concilier biosphère et expansion humaine.....	15
I. LA BIOSPHERE : UN IMMENSE STOCK POTENTIEL DE TECHNOLOGIE .....	25
II. LA BIOSPHERE EN DANGER .....	59
III. LA PRESSION DE LA POPULATION MONDIALE SUR LA BIOSPHERE .....	81
IV. LA BIOSPHERE : TROP PETITE POUR LES SOCIÉTÉS HUMAINES ? .....	91
V. L'ÉQUATION SUPRÊME DE LA BIOSPHERE .....	105
VI. DE LA RÉPARATION ÉCOLOGIQUE À LA RÉSILIENCE .....	121
VII. DE LA RÉSILIENCE À L'INTENSIFICATION ÉCOLOGIQUE ....	137
VIII. L'AGRICULTURE ET LA GESTION DES AGROÉCOSYSTÈMES DANS LE MODE DE LA COMPLEXITÉ ....	165

## ÉCOLOGIE INTENSIVE

IX. UN OPTIMUM VIABLE POUR L'INTENSIFICATION ÉCOLOGIQUE .....	181
X. S'INSPIRER DE LA NATURE COMME MODÈLE ? .....	195
XI. CHANGER DE MODE DE PENSÉE .....	219
Conclusion : S'inspirer de la nature pour accéder à la viabilité .....	227
Lexique .....	235
Bibliographie sommaire .....	239

## PRÉFACE

Voici l'histoire d'une philosophie devenue réalité concrète.

Une histoire commencée il y a trois décennies en Amérique latine et aux États-Unis, portée alors par quelques universitaires.

Et défendue en France, dès le début, par un jeune agronome : Michel Griffon.

Une histoire de réconciliation entre l'agriculture et l'environnement.

Une histoire qui raconte une volonté de pouvoir, un fantasme de maîtrise peu à peu changés en proposition d'alliance.

Une histoire d'explorateurs qui donnent ses deux sens au formidable mot d'inventeur. L'inventeur n'est pas seulement celui qui imagine ce qui n'existait pas avant lui. Il est aussi celui qui découvre une richesse du Réel jusqu'alors inconnue; ce faisant, il en accroît les possibilités.

Si l'on veut relever ce défi de résumer cette école de pensée, elle part de deux constatations, toutes simples.

La première c'est la richesse de la vie, oui : LA VIE. Une vie qui nous a précédés et dont nous, animaux humains, sommes loin de détenir le monopole. Apprenez cette vérité que les plantes, aussi, sont *vivantes*. De même que les insectes. Avant de raconter l'histoire des moustiques, j'ai dû apprendre que ces petites bêtes piquantes existaient bien avant nous, 250 millions d'années, et en bien plus grand

nombre : 3 564 espèces cataloguées à ce jour. Alors l'économiste que je suis a bien été forcé d'admettre, éberlué, que notre chère *croissance* n'est rien comparée à l'aventure de la vie, si diverse et si durable. S'il faut prendre le langage d'aujourd'hui, la vie est une *start up* vieille de quatre milliards d'années.

Alors surgit la deuxième constatation. Qui est en même temps stupéfaction. Pourquoi utilisons-nous si peu cette formidable richesse? N'est-il pas temps d'admettre que la vie est une affaire qui a *réussi*? N'est-il pas temps de demander des conseils à ce phénomène qu'est la vie? N'est-il pas temps d'aller chercher chez elle, la vie, certaines recettes qui ont si bien, depuis si longtemps, fait leur preuve? Ainsi l'économie circulaire. Figurez vous que dans la Nature, il n'y a *pas de déchets*. Tout est ressource car tout est recyclé. Intéressant, dans notre civilisation du *jetable*, non? Griffon donne dix autres exemples de ces ressources disponibles et que pourtant nous dédaignons. Nous marchons sur des trésors. La biosphère, qui rassemble toutes les formes de la vie, est un catalogue infini de solutions à grand nombre de nos «problèmes».

Et c'est ainsi que Griffon est devenu un incomparable *inventeur* de la Nature. Un explorateur d'un genre particulier. Ce savant là connaît la biosphère comme personne mais ce savoir ne lui suffit pas. Il ressemble à ces professeurs jamais satisfaits de leurs élèves. «Allez, tu peux mieux faire.» C'est cette exigence agacée qui donne tout le sel de ce livre. «Allez, la Nature, arrête de bailler! Pas possible d'être si douée et de gâcher tant de dispositions.» De page en page, on découvre ce que pourrait offrir la biosphère, si on la stimulait. Tant de partenariats sont possibles entre les agents du vivant, tant d'associations virtuellement si fertiles. Regardez nos alliées coccinelles : pas besoin d'insecticides, elles ne demandent pas mieux que de dévorer nos ennemis pucerons!

## PRÉFACE

Tel est le pari de l'*écologiquement intensif*.

Ou de l'*agroécologie*.

C'est le pari du *potentiel* de la vie.

Non, l'agronomie n'est pas forcément un mal nécessaire qui détruit la planète pour alimenter ses habitants.

Oui, une nouvelle agriculture est possible, productrice à haut rendement, et pourtant saine et respectueuse de l'environnement.

Ce livre, magnifique, est le récit, et la preuve, de cette *possibilité*.

Chacun sait bien que les anciennes pratiques productivistes et dangereuses ont atteint leurs limites. Et, en même temps, une population sans cesse croissante doit être nourrie. Une seule solution : réveiller la Nature, au lieu de la polluer.

Voilà pourquoi Griffon me fait si souvent penser au grand Edgar Morin. Loin de s'effrayer de la complexité du social ou du vivant, les deux chercheurs la prennent à bras le corps. Car le complexe est signe de vie. Seule la mort est simple. Simple comme la paresse. Qui est une forme de mort.

ERIK ORSENNA  
*de l'Académie française*



## INTRODUCTION

# CONCILIER BIOSPHÈRE ET EXPANSION HUMAINE

La progression rapide de la population humaine et de ses besoins a conduit, longtemps aveuglé, à une utilisation sans précaution de nombreuses ressources de la planète. L'histoire de cette utilisation des écosystèmes<sup>1</sup> et de leurs ressources est celle d'une longue course à la possession, au contrôle de l'accès et à une exploitation sans retenue. Une surexploitation en a résulté, d'abord par la chasse et la pêche, puis par l'élevage, l'agriculture et la déforestation. Les conséquences sur la biosphère<sup>2</sup> – la sphère de la vie – sont d'une très grande importance, en particulier à cause de la perte brutale de diversité biologique. Avec la révolution industrielle et l'avènement d'une économie fondée sur l'exploitation du charbon et du pétrole, le recours au bois a diminué. Mais les sociétés humaines ont contribué, et contribuent encore, au réchauffement climatique qui bouleverse lui aussi les écosystèmes. Pour répondre à la progression démographique rapide de l'humanité, la nécessité de produire toujours plus d'aliments a transformé

---

1. Un écosystème est une communauté dynamique d'êtres vivants sur un substrat minéral, et qui échangent de la matière et de l'énergie.

2. La biosphère est, à la surface de la Terre et dans les océans, l'ensemble de toutes les formes organiques, c'est-à-dire l'ensemble total des écosystèmes.

les pratiques agricoles de la seconde moitié du <sup>xx</sup>e siècle. Les agriculteurs ont accédé à cette demande pour être au rendez-vous des besoins de production du nouveau siècle. L'agriculture est notamment devenue intensive en intrants chimiques, en particulier en produits phytosanitaires, destinés à contrôler les ravageurs des cultures ainsi que les maladies et les « mauvaises herbes » en compétition avec les plantes cultivées. Cette agriculture est toutefois de plus en plus décriée en raison de ses effets négatifs sur l'environnement et sur la santé. Elle évolue dès lors sous la pression de la société et des pouvoirs publics qui procèdent par interdiction successive de techniques. Certes, elle présente des risques. Elle a pourtant connu un immense succès en termes de performances productives. Ainsi, l'agriculture asiatique a, par exemple, pu produire les quantités suffisantes pour nourrir sa population, en très forte croissance au sortir de la Seconde Guerre mondiale, et faire oublier les famines. Mais, pour répondre à la vague démographique africaine qui s'annonce plus grande encore, il faudra trouver un modèle différent, à la fois moins polluant et moins coûteux en énergie fossile. On ne peut plus, en effet, d'une part créer des techniques à grande efficacité productive mais à risques, d'autre part y mettre fin rapidement au nom de principes d'élimination de ces risques. Un chemin nouveau est à découvrir.

L'enjeu est considérable. Il faut accroître la production agricole dans des proportions inédites, et donc augmenter les rendements des plantes cultivées par unité de surface (car les surfaces cultivables sont limitées), tout en évitant de produire des nuisances environnementales. Après des tentatives aussi nombreuses que diverses, l'idée s'impose d'utiliser au maximum les mécanismes du vivant, en essayant de les « amplifier » tout en respectant les lois fondamentales qui garantissent la viabilité, écologique et environnementale,

## INTRODUCTION

des systèmes de production. Il ne s'agit plus de promouvoir une agriculture intensive en intrants chimiques mais une agriculture intensive en intrants appropriés et en solutions écologiques. Il a donc été proposé d'intensifier les mécanismes productifs naturels dans une perspective écologique. De là est né le terme « écologie intensive » ou « agriculture intensive en écologie<sup>1</sup> ».

L'expérience montre que cette idée est féconde et l'on s'interroge alors sur son application dans d'autres domaines que l'agriculture. En élargissant le concept, il est possible de définir un modèle plus général inspiré par la nature, d'où le terme « bio-inspiration », c'est-à-dire « inspiré par les mécanismes du vivant », qui rejoint d'autres notions connues comme celles de l'économie circulaire, des processus de recyclage « en cascade » et du principe général de viabilité.

Précisément, ce principe oblige à respecter les multiples lois de la nature. Ne pas le faire engendrerait désordres et dégradations. Nos sociétés doivent donc, avant tout, obéir aux lois fondamentales de viabilité de la nature, ce qui ne signifie pas qu'elles ne doivent rien modifier. Ne pas accroître la production nous condamnerait à des pénuries et des famines. Vivre très nombreux, en utilisant obligatoirement la nature comme ressource, nous contraint également à la contrôler, à la transformer, à en utiliser les fonctionnalités, en un mot, à la commander au moins partiellement, c'est-à-dire à la gérer. « Lui obéir tout en la commandant<sup>2</sup> », voilà le paradoxe central de cet essai. Ou, en des termes moins brutalement contradictoires, utiliser la nature tout en respectant ses lois, ou encore, en termes scientifiques, faire produire à la nature autant qu'il nous est nécessaire

---

1. Du même auteur : *Qu'est-ce qu'une agriculture écologiquement intensive ?*, Quae, 2014.

2. Voir p. 128 et 229 cet emprunt à la pensée de Francis Bacon.

(avec retenue) en restant dans son domaine de viabilité. Voilà qui méritait bien l'apparent oxymore : « agriculture écologiquement intensive ».

Nous sommes face à un enjeu capital dont dépend l'avenir des sociétés humaines : il s'agit en effet de les penser en interaction profonde avec la nature, donc de les considérer comme parties d'un ensemble qui unifie la nature et la culture et non comme un pouvoir externe à la nature, qui asservirait la culture.

Mais il est d'autres questions importantes. Outre la nourriture, l'agriculture est appelée à produire de l'énergie, notamment du carburant à substituer au pétrole dont les réserves diminuent. L'agriculture peut aussi fournir la base des plastiques qui remplaceront ceux issus de la pétrochimie, pour les mêmes raisons de raréfaction du pétrole. La biosphère ne doit pas être contrainte à produire une grande quantité de biomasse pour la bioénergie et les biomatériaux, en plus des ressources alimentaires. À trop la solliciter, on risquerait de la détruire. Il faudra donc identifier une énergie renouvelable suffisamment abondante et bon marché afin de ne pas surexploiter la biosphère.

Désormais, gérer la biosphère devrait donc être l'une des plus grandes préoccupations des sociétés, tout comme éliminer la pauvreté et assurer équitablement des moyens d'existence durables pour tous. Ce sont d'ailleurs des objectifs très liés car la pauvreté oblige les plus démunis, qui constituent une partie importante du monde, à exploiter les ressources de la biosphère au-delà de leur capacité de renouvellement. Plus largement, se posent des questions sur les sociétés elles-mêmes et leur emballement démographique, ainsi que leur course à la consommation. Pour penser un développement viable, respectueux de la biosphère, il est par conséquent indispensable de ne pas dissocier nature et société, ni les différents usages de la

## INTRODUCTION

biosphère : l'alimentation, l'énergie et les biomatériaux. Avec ce raisonnement émerge une nouvelle façon de voir la nature et la société, établissant une continuité entre l'économie et le vivant.

### L'OBLIGATION D'ASSURER À TOUS UN MONDE VIABLE

Désormais, chacun peut savoir que les conditions de la vie future des sociétés sur la planète sont menacées par le réchauffement climatique, la montée des eaux des mers, la désertification de vastes territoires, la perte générale de diversité biologique, la déforestation, l'érosion et la déstructuration des sols, ainsi que par la libération dans l'environnement de molécules chimiques dangereuses pour la santé... La liste des désordres en cours alimente une sourde anxiété générale et nourrit la colère et la radicalité des plus impatientes. Fort heureusement, elle détermine aussi ceux qui sont animés par la raison à chercher des solutions.

Il faut donc réagir, mais les sociétés sont lentes à se mettre en mouvement. Pendant presque toutes les générations antérieures, elles ont utilisé sans compter la biosphère pour se nourrir, se vêtir, se soigner, construire et s'abriter, produire de l'énergie... Au cours de l'histoire, l'accroissement de la population dans certaines parties du monde, comme en Chine ou en Europe, a abouti assez rapidement à la surexploitation du milieu physique et à des crises écologiques et environnementales. En Europe, ces crises ont été analysées par Malthus dès le XVIII<sup>e</sup> siècle. Il concluait à un destin fatal, en raison des famines touchant les sociétés trop peuplées et installées sur des espaces trop étroits et sans possibilité de migration. En fait, beaucoup de sociétés ont échappé à ce destin funeste précisément grâce à la

migration. Ou bien, les crises se sont résolues localement, dans la plupart des cas, avec l'avènement et la diffusion de technologies permettant d'augmenter à la fois la productivité du sol et la production. L'histoire a néanmoins été émaillée de crises malthusiennes d'importances diverses.

La fin de la grande vague démographique mondiale qui s'annonce au cours du présent siècle va-t-elle créer une ultime situation malthusienne générale que nous aurions des difficultés à éviter ? La réponse mérite un raisonnement prudent et non des partis pris d'optimisme fondé sur la technologie, ou de pessimisme défaitiste. Ce raisonnement fait appel à l'histoire. L'espèce humaine est restée longtemps marginale dans la biosphère et, à ses débuts, elle pouvait compter sur les ressources qui l'entouraient. Puis elle a colonisé une grande partie de la planète exploitable, vraisemblablement toujours à la recherche de ressources facilement accessibles. Cette errance a-t-elle été liée à l'espérance de trouver une terre plus féconde et des riches pâturages ? Reste-t-il, aujourd'hui, des sociétés et des populations dans cette situation ? Il est en effet possible que les besoins nés de la croissance démographique en cours augmentent plus vite que la capacité à produire dans certaines régions. Les pénuries récurrentes qui en résulteraient motiveraient à nouveau des mouvements de population. Certes, après une montée à caractère exponentiel, la vague démographique mondiale a commencé à s'atténuer au milieu du XX<sup>e</sup> siècle. L'humanité a donc amorcé une adaptation aux limites de la capacité d'accueil de la planète. Mais rien ne dit que ce processus « d'envahissement biologique » de la biosphère par notre espèce se déroulera sans drames. Il est inévitable que la pression des sociétés sur la biosphère devienne plus importante, mais elle ne doit pas la détruire. Pour comprendre ce qui est en jeu, les chapitres suivants s'articulent autour d'une argumentation en faveur de la nécessité

## INTRODUCTION

d'une nouvelle réponse technologique. À chaque étape de la progression démographique, les sociétés ont migré ou inventé des techniques. Aujourd'hui, il est nécessaire d'en créer d'autres car les actuelles ne suffisent plus. Il est donc proposé ici un ensemble de technologies directement inspirées des mécanismes naturels mais les utilisant de manière plus intensive : l'« intensification écologique ».

Pour justifier ce choix, il faut d'abord définir la biosphère et, plus généralement, le théâtre de l'aventure humaine, le système « planète Terre » qui est de plus en plus menacé. La connaissance de la biosphère est un préalable au raisonnement qui propose de l'utiliser plus intensivement. Pour cela, l'histoire de la biosphère est un excellent moyen de classement des connaissances. Cette histoire est celle d'un extraordinaire déploiement de la vie débouchant sur un très grand nombre de processus fonctionnels biologiques (par exemple, la synthèse de la matière vivante, la digestion, la respiration...) que l'on qualifie ici de « fonctionnalités ». Ces fonctionnalités sont des structures animées dont la dynamique dépend en grande partie du génome des êtres vivants (l'ensemble des gènes). Elles sont autant de processus qui peuvent se révéler utiles pour des applications amplifiées et élargies répondant aux besoins des sociétés. Par exemple, la consommation de l'herbe par les bovins permet la production de lait ; les sociétés peuvent consommer ce lait, c'est-à-dire de l'herbe transformée, alors que l'herbe n'est pas digestible par l'homme. La succession des processus biologiques, qui va de l'herbe à l'alimentation en lait, correspond à des fonctionnalités utiles et amplifiables. L'élevage des bovins est l'une des manières par lesquelles les sociétés ont, très tôt dans l'histoire, su domestiquer des fonctionnalités naturelles.

Il faut ensuite préciser de quelle manière la biosphère est en danger. Comment et pourquoi notre espèce a-t-elle

progressivement créé cette situation ? Jusqu'où ira cette dégradation ? Il en résulte une équation qu'il nous faut résoudre pour concilier la vie des sociétés et maintenir la viabilité de la biosphère. Ou, pour le dire autrement : pourra-t-on augmenter le rendement des écosystèmes tout en conservant leur intégrité ? Ou bien la capacité de charge maximale des écosystèmes suffira-t-elle à couvrir les besoins des sociétés ?

Dans cette perspective, nous serons amenés à constater que les sociétés n'ont pas cessé d'artificialiser la nature et les écosystèmes. Depuis l'invention de l'agriculture, il y a environ 12 000 ans, elles ont en réalité « hybridé » les processus naturels avec des inventions technologiques. Par exemple : associer dans un même espace diverses plantes cultivées complémentaires et utiles en espérant que la densité d'occupation de ces plantes associées empêche les plantes indésirables (autrement dit, les « mauvaises herbes ») de proliférer, ce qui est une utilisation technologique de la fonctionnalité naturelle « compétition-coopération ». Mais les inventions technologiques ont proliféré selon leur logique propre dans de nombreuses directions et ont quelquefois produit des solutions dangereuses. C'est le cas, par exemple, des molécules herbicides. Le nombre des impasses technologiques ne cesse d'augmenter. Alors, plutôt que de continuer à inventer des mécanismes susceptibles d'avoir des effets insoupçonnés, demandons-nous si les mécanismes existants de la vie eux-mêmes ne pourraient pas constituer une sorte de modèle et la base de nouvelles réponses technologiques par bio-inspiration ? Pourrait-on élargir le concept à une économie « bio-inspirée » qui serait un nouveau modèle pour les sociétés ? Les transformations qui s'annoncent vont-elles dans ce sens ?

Ces interrogations fondamentales s'inscrivent dans une éthique d'obligation de trouver des solutions pour équilibrer

## INTRODUCTION

les besoins des sociétés avec les capacités productives durables de la biosphère, pour les générations actuelles et pour les générations futures. Bien sûr, il n'est pas interdit de limiter l'évolution de la population, ni d'inciter cette population à modérer sa consommation des ressources naturelles mais l'objet de cet essai se limite à la nécessité de garantir une production durable de biens issus de la biosphère.



## CHAPITRE I

# LA BIOSPHERE : UN IMMENSE STOCK POTENTIEL DE TECHNOLOGIE

Grâce à la biosphère, les sociétés pourraient disposer de nombreuses technologies pour résoudre les problèmes qu'elles devront affronter. La biosphère est, de fait, un ensemble immense de processus physiques et chimiques élaboré tout au long de l'histoire de la vie, et consigné dans le génome et les mécanismes métaboliques<sup>1</sup> des êtres vivants. Pour avoir une idée des technologies susceptibles de s'inspirer du fonctionnement du vivant, il faut comprendre le fonctionnement de la planète dans sa totalité. En effet, la biosphère n'est pas la seule sphère qui soit concernée par la vie et les processus vitaux. D'autres sphères du système général dénommé « planète Terre » interviennent dans son fonctionnement et font partie du substrat des sociétés, comme l'atmosphère ou la lithosphère (voir ci-après). L'intensification écologique a donc la possibilité de faire appel à des processus issus de ces différentes sphères. On les différencie de la biosphère car elles n'ont pas le caractère vivant de celle-ci mais y participent.

---

1. Le métabolisme est le système des réactions chimiques qui caractérise le monde vivant.

## ÉCOLOGIE INTENSIVE

### LES SPHÈRES QUI SONT LE SUPPORT ET LES COMPOSANTES DE NOS VIES

Outre la biosphère, qui est le système vivant, la planète Terre comprend principalement la géosphère, c'est-à-dire l'ensemble du substrat minéral (non vivant) dont la partie externe appelée lithosphère est susceptible d'être exploitée par les sociétés. La géosphère inclut aussi l'atmosphère et l'hydrosphère (l'eau et ses mouvements), toutes deux indispensables à la vie. La géosphère, directement issue de la création du système solaire, est pour l'essentiel constituée par un magma central liquide à très haute température, dont l'activité est entretenue par des réactions nucléaires, ce qui représente des réserves d'énergie géothermique considérables.

La lithosphère<sup>1</sup> comprend les roches de l'enveloppe externe provenant de l'encroûtement du magma initial, auxquelles s'ajoutent les roches sédimentaires issues des processus vitaux : en majorité des roches calcaires résultant de l'accumulation d'organismes fabriquant principalement du carbonate de calcium. S'y ajoutent aussi les roches issues de la biomasse végétale d'ères géologiques antérieures, comme le charbon et le pétrole, ou les roches issues de la concentration de produits de décomposition, comme les phosphates, ou encore de résidus biologiques comme le guano<sup>2</sup>. La lithosphère fournit les matériaux, roches et métaux, qui constituent l'essentiel de l'infrastructure urbaine ainsi qu'une grande partie des engrais minéraux (phosphate, potasse, azote) qui alimentent la fertilité des sols. Sous l'action du climat et des êtres vivants, la lithosphère crée les sols, qui sont à la fois des écosystèmes

---

1. De *lithos* : pierre.

2. Roche faite de fientes d'oiseaux côtiers du Pérou.

et des substrats. Les ressources du substrat sont quelquefois abondantes, quelquefois rares et, dans tous les cas, limitées, même si la majorité de l'humanité ne s'en est pas encore rendu compte. Leur utilisation aura donc une fin, sauf si nous apprenons à les recycler, c'est-à-dire les récupérer et les rendre réutilisables.

L'atmosphère et l'ionosphère sont des substrats gazeux, eux aussi nécessaires à la vie. Au-delà de ces sphères gazeuses se situent l'astre solaire et son rayonnement. Grâce à l'effet de serre, entretenu par les gaz de l'atmosphère, la vie est protégée contre une température qui, sans lui, serait sidérale la nuit et brûlante le jour. L'atmosphère n'est donc favorable aux formes de vie actuelles que dans une gamme limitée de températures déterminée par un vaste dôme gazeux.

À propos de l'atmosphère, on pourrait dire qu'il existe une sphère du climat où se réalisent des interactions entre les mouvements de l'atmosphère et les courants marins en relation avec la rotation de la Terre sur elle-même et autour du Soleil. La circulation atmosphérique est également influencée par les reliefs montagneux. La circulation des eaux océaniques est, quant à elle, liée à leur température mais aussi à leur degré de salinité ainsi qu'au relief des fonds marins. Les mouvements interactifs complexes, des océans et de l'atmosphère, qui en résultent, déterminent les profils temporels (calendriers) ainsi que les profils de températures et de pluies des grandes régions du monde. Il en découle une géographie des conditions des milieux qui donnent à la biosphère continentale et marine sa très grande diversité. Cette diversité est l'une des bases de la diversité des agricultures du monde.

L'hydrosphère est le système hydrique de la planète. Très liée au climat, l'hydrosphère est le circuit complet de l'eau planétaire : évaporation, nébulosité, précipitations,

ruissellement et infiltration, stockage, écoulement dans le réseau hydrographique selon les reliefs, absorption par les plantes et les animaux, passage dans les circuits urbains et industriels... Ce circuit complexe est vital pour la biosphère. L'action maladroite des sociétés peut l'altérer très gravement et faire localement disparaître l'eau des écosystèmes, les condamnant à la désertification. Lorsque les sociétés savent gérer l'eau, celle-ci peut au contraire être retenue dans les écosystèmes et garantir une production abondante de biomasse.

Pour en terminer avec les sphères naturelles, la biosphère est l'ensemble des écosystèmes locaux. Elle résulte des différents substrats évoqués ci-dessus : la géosphère, source de minéraux, l'atmosphère, qui est le lieu de régulation du climat, c'est-à-dire la température, l'humidité et l'ensoleillement, et l'hydrosphère, qui apporte l'eau. La biosphère comprend la biosphère continentale et la biosphère marine. La biosphère continentale est la mince pellicule de vie végétale, animale et microbienne dont l'épaisseur va des racines des plantes au sommet des arbres. Son fonctionnement est d'une immense complexité. En simplifiant à l'extrême, on peut le résumer ainsi : les photons solaires, le dioxyde de carbone de l'atmosphère, l'eau et les minéraux des sols sont les ressources avec lesquelles les végétaux produisent de la biomasse grâce à la photosynthèse<sup>1</sup>. Cette biomasse est consommée par des animaux dits « autotrophes » qui sont, à leur tour, consommés par d'autres organismes dits « hétérotrophes<sup>2</sup> ». Les relations de consommation entre animaux, végétaux et micro-organismes peuvent être vues

---

1. Voir plus bas, p. 33.

2. Les autotrophes se nourrissent, directement et de manière autonome, de biomasse exclusivement, et les hétérotrophes se nourrissent des autotrophes. On peut dire que les hétérotrophes se nourrissent aussi de biomasse végétale, mais indirectement. Les autotrophes sont des êtres

comme des chaînes et des réseaux alimentaires, aussi appelés « réseaux trophiques », dans lesquels sont inclus les parasites, les maladies, les virus. Ces végétaux, animaux et micro-organismes une fois morts, leur décomposition est l'œuvre de cortèges d'êtres vivants, principalement des bactéries du sol. Au final, ne restent que des molécules organiques qui séjournent dans les sols et des ions qui sont absorbables par les racines des plantes. La biosphère est donc un système constitué de flux cycliques où interagissent des centaines de milliers d'espèces diverses et dont le sol est vraisemblablement le substrat central. Il est le lieu où se concentrent des centaines de milliards de micro-organismes par microvolume de terre. Le moteur de l'ensemble est le soleil qui, par son apport en énergie, induit la dynamique métabolique, c'est-à-dire la succession des processus, de la photosynthèse jusqu'à la décomposition. Par ailleurs, dans ce grand ensemble, chacun des êtres vivants de la biosphère a son rôle propre, contrôlé par un code génétique (les acides nucléiques) qui rassemble la mémoire informationnelle de son fonctionnement et qui est tributaire des conditions de l'environnement. Ce code est évolutif et accumule au fil du temps la mémoire de l'évolution des capacités de chaque espèce.

L'une d'entre elles, qui s'est elle-même baptisée « *Homo sapiens* » – l'homme qui sait –, est singulière, c'est la nôtre. Elle a acquis le langage, l'écriture et a créé l'information écrite qui est un ensemble de signes universels exprimant les connaissances acquises par apprentissage. Cette écriture a la vocation de décrire la totalité du monde et d'en être le miroir complet. Elle peut exprimer ce que nous comprenons de la biosphère et modifier cette représentation selon notre

---

vivant des ressources minérales et de la photosynthèse. Les hétérotrophes sont des êtres vivants qui mangent les autotrophes.

volonté. L'ensemble des connaissances acquises forme la « noosphère », terme créé par Vladimir Vernadski et Pierre Teilhard de Chardin. Cette noosphère est donc la traduction du monde réel en signaux d'information reconnaissables, elle permet aux sociétés humaines d'avancer sans cesse dans la compréhension de la planète et d'acquérir l'expérience de sa gestion. Cette sphère a été celle de la parole, puis du livre, et elle devient celle des réseaux physiques (le Web) et des réseaux d'organisation des connaissances (les réseaux scientifiques et les bases de données, les moteurs de recherche et les encyclopédies).

La planète tout entière, y compris la noosphère, contribue donc au fonctionnement de la biosphère. Comme siège des processus vitaux et, en particulier, de l'expansion explosive de l'espèce humaine, la biosphère est un lieu majeur d'évolution de l'ensemble du système Terre<sup>1</sup>. La chasse et la pêche des hominidés, puis de l'homme de Neandertal et de *Homo sapiens*, ont constitué une première déformation d'origine humaine notable dans ce fonctionnement de la biosphère, d'abord faible, puis de plus en plus importante au fur et à mesure que disparaissaient les espèces chassées. Un peu plus tard, il y a 12 000 ans environ, l'agriculture et l'élevage ont transformé plus substantiellement encore la biosphère. Ce qui a été l'inclusion initiale discrète de l'espèce humaine dans la biosphère (des hominidés vivant dans les arbres) est aujourd'hui un bouleversement massif, notamment parce que l'agriculture modifie profondément les écosystèmes. Mais il n'est pas possible de comprendre et de résoudre les problèmes agricoles de la planète sans en avoir une vision globale, en termes d'histoire longue et de

---

1. D'autres « lieux » d'évolution sont possibles : les catastrophes naturelles, celles venues de l'univers, les pandémies, les guerres et les effondrements de civilisations...

géographie complète de la transformation de la biosphère. Pour cela, il est nécessaire de savoir en décrire, d'une manière simplifiée, le fonctionnement.

COMMENT LE CŒUR DE LA « SPHÈRE VIVANTE »  
FONCTIONNE-T-IL ?

Comprendre le fonctionnement de la sphère vivante nous permettra d'avoir une vision élargie de l'évolution de l'agriculture et des autres usages, condition nécessaire si nous voulons garantir la viabilité de ces activités à long terme. Pour appréhender les bases du fonctionnement de la biosphère et de sa transformation par les sociétés, le mieux est d'essayer d'en raconter l'histoire à très grands traits. Bien que ces connaissances soient encore très lacunaires, la science en a identifié les grandes lignes.

Tout a commencé, à l'échelle du système solaire, avec la baisse progressive de la température de la planète. Ce refroidissement a créé des conditions favorables à la constitution d'atomes légers, puis d'atomes lourds, puis d'ensembles plus complexes jusqu'à des « arrangements » moléculaires de base. Ces molécules et, plus généralement, les espèces chimiques résultent de la correspondance entre les pertes d'électrons de l'une (oxydation) et les gains équivalents d'électrons de l'autre (réduction). Ces potentiels de réactivité mutuelle sont appelés « potentiels redox ». La circulation électronique qui en résulte serait animée en amont par l'énergie du soleil. Si cette représentation est conforme à la réalité, ce mécanisme serait général. Des auto-assemblages d'objets moléculaires de plus en plus complexes se seraient ainsi constitués, parmi lesquels les plus stables auraient perduré puis occupé progressivement l'espace des possibles. Ainsi, les « préférences » d'assemblage

## ÉCOLOGIE INTENSIVE

structurel seraient devenues répétitives et invariantes, les mêmes états du milieu (ensembles locaux de molécules) engendrant les mêmes réactions. Selon cette conception, l'apport en énergie externe serait déterminant pour lier des molécules entre elles et former des macromolécules. Le milieu aquatique a pu faciliter ces interactions moléculaires. La vie serait donc un enchaînement, répété et permanent, de transformations et d'élaborations moléculaires résultant de complémentarités structurelles entre les objets moléculaires.

### LE MÉTABOLISME : L'ÉLABORATION DES PROCESSUS DU VIVANT

La logique de construction des mécanismes de la vie apparaît comme des suites d'opportunités d'agencement de molécules, qui se répètent et se stabilisent. Il en résulte des processus métaboliques enchaînés et répétitifs. C'est un mécanisme de sélection physico-chimique : la rencontre de molécules, dont les structures permettent des agencements, aboutit en quelque sorte à la « cristallisation » de molécules nouvelles et plus complexes, inaugurant de possibles nouvelles fonctions. Ces fonctions résulteraient donc d'un mécanisme évolutif tel que, à chaque stade de configuration moléculaire, se présenteraient des champs des possibles pour des agencements moléculaires nouveaux, et des situations préférentielles dans ces agencements. Il en résulterait des suites d'événements intégrés et autoreproductibles. Ces suites métaboliques sont des processus physico-chimiques éventuellement utilisables par bio-imitation pour des applications bio-industrielles. Les situations de préférence structurelle, dans les agencements de molécules, constitueraient

progressivement le « métabolome », c'est-à-dire l'ensemble des enchaînements de réactions physico-chimiques<sup>1</sup>.

Toujours lors de l'évolution, l'intégration de ces suites d'évènements au sein des cellules, après l'apparition de parois, aurait aussi contribué à construire leur pérennité en les protégeant. C'est de cette manière que des ensembles complexes de fonctions – formant des fonctionnalités remarquables – seraient apparus dans certaines bactéries, par exemple la production de nitrate par décomposition de matière organique. Autre exemple, celui de bactéries photosynthétiques<sup>2</sup> devenues des organes de cellules végétales, les chloroplastes, capables de combiner les ressources en dioxyde de carbone, en eau et en minéraux pour produire, avec l'apport de l'énergie solaire, les sucres, des molécules complexes constituées de carbone, d'oxygène et d'hydrogène. Ces sucres peuvent se polymériser et former des structures de très grande dimension comme la cellulose. Ces structures moléculaires ont, par conséquent, transformé l'énergie en matière. Dit autrement, cette fonctionnalité a traduit l'énergie solaire intermittente en molécules de réserve métabolique stables et stockables. Elle a aussi, de façon massive, permis de séquestrer du carbone atmosphérique et de produire de l'oxygène. La réplication et l'extension du phénomène ont conduit à l'accumulation d'immenses quantités d'oxygène dans l'atmosphère terrestre, ce qui a induit « la grande oxygénation », un changement majeur dans la biosphère. Les cellules se sont alors développées jusqu'à l'avènement d'organismes pluricellulaires. Un nouveau mécanisme s'est institué : la respiration. Elle permet de transformer, grâce à l'oxygène, les sucres accumulés dans

---

1. Voir p. 34.

2. Les bactéries photosynthétiques sont capables de fabriquer des sucres par photosynthèse.

## ÉCOLOGIE INTENSIVE

les êtres vivants en énergie (en restituant de l'oxyde de carbone). C'est l'inverse de la photosynthèse. En utilisant les sucres pour produire de l'énergie, cette fonctionnalité diffère l'utilisation de cette énergie et ouvre des possibilités nouvelles. Par ce moyen, les bactéries consommant l'oxygène abondant et l'énergie des sucres ont pu prospérer. Se sont ainsi constituées les bases d'un métabolisme complexe, c'est-à-dire un ensemble de biosynthèses et de dégradations moléculaires symétriques, de construction de structures et de déconstruction, des processus de vie combinés à des processus de mort. Ce métabolisme s'est réalisé dans des entités autonomes unicellulaires.

### LA SPÉCIALISATION DES ORGANES DES PLANTES PUIS LEUR SPÉCIATION

Sont ensuite apparus des mécanismes de coordination entre cellules, au sein d'êtres pluricellulaires organisés. Les cellules possédaient un noyau, ce noyau étant le siège des mécanismes de reproduction. Le métabolisme s'est complexifié. Des enchaînements variés ont créé des voies métaboliques stables que l'on retrouve chez de nombreuses espèces, en raison de leur ancienneté dans l'arbre de l'évolution, ce qui indique que la formule était robuste, efficace et adaptée à l'environnement. Avec la complexification, sont apparus des organes spécialisés, coordonnés par des messagers chimiques circulant dans les vaisseaux. Des mécanismes autonomes de régulation des voies métaboliques en fonction des états du milieu se sont également mis en place.

Au fur et à mesure de l'évolution, des espèces se sont distinguées et elles ont divergé en conservant les fonctionnalités communes et en en acquérant de nouvelles. Ainsi s'est développé l'arbre de l'évolution dont nous ne connaissons que

les rameaux fins actuels qui portent les gènes gouvernant ces phénomènes. L'ensemble de l'édifice des fonctionnalités est resté animé, comme aux premiers temps de l'émergence de ces mécanismes, par l'apport d'énergie solaire. Le soleil diffuse son énergie partout dans les processus vitaux.

Après les micro-organismes, les végétaux se sont multipliés et diversifiés en ramifications évolutives, et ont conquis des espaces nouveaux. Ils sont autotrophes, c'est-à-dire vivant des ressources minérales et de la photosynthèse. Parallèlement, sont apparus des animaux se nourrissant des végétaux. Eux aussi se sont multipliés et diversifiés en ramifications évolutives. Par extension, se sont créés des chaînes alimentaires puis des réseaux alimentaires complexes.

Les édifices écosystémiques, que sont les relations trophiques et métaboliques entre espèces, ont été violemment détruits dans l'histoire de l'évolution. Cinq catastrophes naturelles de très grande ampleur (vraisemblablement des impacts de météorites ou de très grandes éruptions volcaniques) ont éliminé une grande partie des espèces vivantes, notamment à la fin du permien où la vie a failli disparaître<sup>1</sup>. Après chacune d'elles, les espèces qui persistaient ont continué des trajectoires d'évolution et se sont à nouveau diversifiées. La vie a recommencé, car l'énergie solaire est restée le moteur de la construction des enchaînements moléculaires biologiques, mais en créant de nouvelles voies. Au final, c'est un échafaudage complexe de voies métaboliques, cinq fois refondé, alimenté par le moteur solaire et la photosynthèse, qui a assuré la pérennité de la vie sur Terre. Le fonctionnement évolutif crée en permanence de la diversité biologique. Telle est la dynamique naturelle

---

1. D'après Jean-Sébastien Steyer, 2017, *L'Essentiel de la Science*, n° 36, p. 6.

de la biosphère à laquelle va s'adjoindre la dynamique créée par les sociétés.

La diversité de la biosphère d'aujourd'hui est donc le résultat d'un très long foisonnement créatif. Après la cinquième extinction massive au crétacé, il y a 44 millions d'années, et la reconstitution d'une biodiversité, la destruction a repris<sup>1</sup>. Sa nature est différente des précédentes. C'est l'espèce humaine qui transforme en profondeur et détruit les écosystèmes, d'une manière sans cesse accélérée, depuis plus de 13 000 ans au fur et à mesure qu'elle s'accroît et s'étend territorialement. *Homo sapiens* procède ainsi à une « sixième extinction<sup>2</sup> ». C'est un événement tellement considérable qu'il revêt un sens très important à l'échelle des temps géologiques. Il atteint les bases de la vie. Nous en sommes très difficilement conscients car les conséquences ne nous touchent pas encore directement dans nos vies quotidiennes. Pourtant, avec les extinctions d'espèces, ce sont de nombreux processus métaboliques qui peuvent disparaître, alors qu'ils pourraient éventuellement constituer des sources d'imitation ou d'inspiration pour inventer des processus énergétiques, sanitaires, alimentaires, industriels futurs. En ce sens, la vie est un immense stock potentiel de technologies. Nous le dilapidons rapidement sans même savoir ce que nous perdons, peut-être à jamais.

Il est donc essentiel de comprendre le fonctionnement de la vie des écosystèmes, le plus rapidement possible. Pour cela, il existe bien des façons de voir et d'interpréter. Le réel ne se laisse comprendre qu'à travers des représentations diverses. Nous ne le connaissons que par

---

1. Voir Gilles Boeuf, « Biomimétisme et bio-inspiration », *Vraiment durable*, n° 5 et 6, 2014.

2. Selon le mot de Paul Ehrlich.

l'intermédiaire de concepts opératoires permettant des analyses, au moyen de ce que l'on appelle des « disciplines ». Un des drames de la connaissance est le cloisonnement des disciplines. De surcroît, chacune est enseignée et, souvent, défendue comme un monopole non collaboratif. Il faut donc, au contraire, accepter (et même souhaiter) que chaque discipline apporte une vision particulière et soit susceptible de mener à des conclusions variées, qui sont toutes légitimes. Or il existe de nombreuses disciplines pour expliquer la biosphère. Citons-en quatre qui présentent un grand intérêt pour la compréhension : l'écologie fonctionnelle, la chimie, l'information génétique et la thermodynamique.

L'ÉCOLOGIE VOIT UN ÉCOSYSTÈME  
COMME UN ENSEMBLE SYSTÉMIQUE FONCTIONNEL

On peut considérer les écosystèmes comme des entités physiques vivantes locales comprenant des substrats, des végétaux, des animaux et des interrelations. Une vision plus analytique permet de discerner un très grand nombre d'entités internes elles aussi liées par des interrelations. La plus connue est, comme on l'a vu, la photosynthèse ; dans les chloroplastes des cellules végétales, elle associe un ensemble de relations faisant intervenir l'énergie solaire, le dioxyde de carbone, des ressources en eau et en éléments minéraux, et des enzymes catalyseurs, l'ensemble produisant de la biomasse et de l'oxygène. Autre exemple très différent d'interaction : la prédation d'un pathogène par un auxiliaire des cultures, soit une larve de coléoptère qui consomme des pucerons porteurs de virus. Ou encore une bactérie, le *Rhizobium*, qui, en présence d'azote gazeux,

produit du nitrate dans les nodules racinaires des légumineuses<sup>1</sup>, créant une source importante de fertilité azotée. Dans ces trois cas, la description du processus nomme des entités (végétal, insecte, bactérie...) et définit des relations entre ces entités (processus d'oxydation ou de réduction, relation de prédation, symbiose entre deux espèces...). Ces relations peuvent être représentées sous forme de schémas liant les entités entre elles. Ces descriptions schématiques sont qualifiées de « fonctionnalités », en l'occurrence « la photosynthèse », « la prédation », ou « la fixation symbiotique de l'azote ». Cette représentation fonctionnelle apparaît comme relativement simple à visualiser et à manipuler intellectuellement.

Une fonctionnalité est donc un ensemble de fonctions, ou de processus, formant une unité dont on identifie clairement le début et la fin et qui correspond à un rôle dans un organisme ou un écosystème, que ce rôle soit considéré comme positif ou négatif pour la société. L'ensemble des fonctions qui caractérise une fonctionnalité est structuré par des relations de causalité.

Les évènements qui s'y succèdent respectent « un ordre causal aussi nécessaire qu'une inférence logique<sup>2</sup> ». Par exemple, la fonctionnalité « feu bactérien » (une maladie bactérienne foudroyante) est représentée par une variable – la présence d'un foyer bactérien – qui a une influence sur une autre – la destruction, de proche en proche, du feuillage d'un végétal. Autre exemple : la fonctionnalité « fragmentation de la biomasse » associe, dans un même ensemble, les variables exprimant les rôles des organismes concernés (insectes, champignons du sol...)

---

1. Les légumineuses sont des végétaux capables de fixer l'azote grâce à la symbiose avec des bactéries fixées sur leurs racines.

2. André Pichot, *Expliquer la vie*, Quae, 2011, p. 129.

qui font passer la biomasse tombée au sol d'un état physique complet à un état fragmenté. Mais il est clair que cette représentation ne qualifie que « l'enveloppe » des phénomènes et ne précise pas les informations qui permettraient de pénétrer plus profondément dans les mécanismes du vivant, ici le processus de nécrose induit par le feu bactérien, et là, les nombreux modes d'action des décomposeurs. Pour comprendre plus finement, il faut passer par la compréhension que permettent la physique et la chimie.

L'ÉCOLOGIE VOIT UN ÉCOSYSTÈME  
COMME UN ENSEMBLE D'ÉQUATIONS CHIMIQUES

On peut voir ces fonctions et fonctionnalités comme un monde beaucoup plus complexe qui se représente à l'échelle moléculaire. La chimie, science nécessaire pour comprendre le vivant, traduit celui-ci en expressions chimiques et en successions d'équations. Ainsi, pour reprendre l'exemple de la photosynthèse, celle-ci peut se résumer par la formule :  $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{énergie} \rightarrow [\text{CH}_2\text{O}] + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$  qui évoque un bilan simplifié de la transformation de la matière initiale (gaz carbonique et eau) en d'autres matières (sucres, eau et oxygène), transformation induite par l'énergie reçue. Mais la réalité est beaucoup plus complexe. Dans les cellules des plantes, des lieux particuliers – les chloroplastes – contiennent de la chlorophylle qui est un pigment. Sans entrer dans le détail, on peut, à titre d'exemple, évoquer le fonctionnement de cette fonctionnalité dont dépend toute la vie sur Terre... L'énergie lumineuse reçue par la végétation excite les électrons de l'eau présente dans les cellules des feuilles et contribue à produire deux molécules

(NADPH et ATP<sup>1</sup>). Ces molécules interviennent dans le « cycle de Calvin » qui aboutit à produire la brique de base de la biomasse végétale, C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>. Tout cela se passe en présence de nombreux catalyseurs. Sous sa forme d'équations en cascade, cette représentation chimique évoque bien le niveau de complexité de cette fonctionnalité.

Comme le montre l'histoire de la vie à l'échelle moléculaire, il existe de très nombreuses fonctionnalités représentables en successions d'équations chimiques. Leur nombre est du même ordre de grandeur que celui des gènes. Ces équations décrivent donc le « métabolisme » des êtres vivants.

Le métabolisme peut, de ce fait, être compris comme une suite de réactions chimiques qui s'exécutent dans les cellules des êtres vivants ainsi que dans l'organisation plus générale de ces êtres vivants (comme le tube digestif des animaux). L'enchaînement et la répétition de ces équations définissent des « interactions métaboliques ». L'ensemble de ces interactions métaboliques forme un vaste système à l'échelle de chaque être vivant et à l'échelle de chaque écosystème. Dans ce vaste système, les entités chimiques se transforment mais les briques de base de ces transformations restent des « molécules froides et éternelles<sup>2</sup> ».

Ainsi la vie des bactéries, des plantes, des animaux (plus généralement de tout ce qui vit), et, par conséquent, la vie des écosystèmes elle-même, peut être considérée comme un immense ensemble de processus chimiques. Ces derniers peuvent être traduits en suites d'équations de transformation utilisant quelques molécules de base (comme l'eau, le

---

1. NADPH = nicotinamide adénine dinucléotide phosphate, ATP = adénosine triphosphate.

2. Formule utilisée par Marc Fontecave lors de la leçon inaugurale du 26 février 2009 au Collège de France, « Chimie des processus biologiques ».

dioxyde de carbone, l'azote et l'oxygène) activées par des ions métalliques.

Cette vision de l'écologie par le regard de la chimie est de nature à surprendre ceux pour qui chimie est synonyme de danger. En réalité, la connaissance fine du fonctionnement écologique et l'utilisation de cette connaissance pour répondre aux questions émergentes passent et passeront par la chimie, car les lois de la biologie sont aussi des lois de la chimie.

#### L'ÉCOLOGIE VOIT UN ÉCOSYSTÈME COMME RÉSULTANT D'UN FONCTIONNEMENT GÉNÉTIQUE

Le fonctionnement de l'ensemble des processus vitaux relève d'un ordre parfaitement codifié. Les acides nucléiques contenus dans le noyau des cellules portent des séquences de molécules – les gènes – qui sont à l'origine des processus métaboliques en cascade (les voies métaboliques). C'est leur capacité à être des « matrices de fabrication » de molécules, à partir d'éléments moléculaires divers, qui crée l'ordre fondamental de la vie des plantes et des animaux. Ces gènes, que l'on peut qualifier de « matriciels », sont assimilables à une information à caractère programmatique. Ils assurent la production *via* les ARN<sup>1</sup> des premières molécules des voies métaboliques. Puis ces molécules sont recombinaées lors de la succession des événements qui caractérisent les voies métaboliques. Il en résulte d'autres molécules qui, dans ce cadre, apparaissent comme « finales ». Elles ont la qualité d'être adaptées aux conditions de l'environnement dans lequel elles exercent des fonctions biologiques précises.

---

1. Les ARN, ou acides ribonucléiques, sont les molécules répliquant les gènes codés dans l'ADN (acide désoxyribonucléique).

Cette possibilité d'adaptation à l'environnement résulte du fait que des mécanismes de régulation autorisent ou refusent l'expression d'un gène. C'est l'objet d'étude de l'épigénétique<sup>1</sup>.

L'apparition de mutations dans le génome et l'addition progressive de gènes issus de bactéries ou l'inclusion de virus, ainsi que l'apparition de régulations épigénétiques dans une espèce, correspondent à une augmentation de mémoire et « d'équipement » des êtres vivants, leur permettant de faire face à des évolutions de leurs environnements. Le génome d'une espèce constitue donc, en grande partie, la mémoire des fonctionnalités dont il a hérité. Les espèces en interaction permanente (par exemple, une proie et son prédateur) possèdent l'empreinte de leur interaction dans leur mémoire génétique. Chacun détient une partie de la mémoire d'un phénomène qui leur est commun : leur coadaptation et leur coévolution.

On peut donc considérer un écosystème pris dans son ensemble comme un système d'information agrégé dont la mémoire est distribuée entre chacune de ses espèces constitutives. On pourrait en déduire que conserver le génome d'une espèce n'a qu'un sens limité car il est en permanente évolution du fait de ses interactions avec le génome d'autres espèces et sous l'influence des variations de l'environnement. Ce qui reviendrait à dire que, pour ne rien perdre en matière d'information, il faudrait tout garder dans un écosystème donné car c'est le métagénome, ou la somme des génomes de l'écosystème, qui est le détenteur du fonctionnement global des espèces de l'écosystème. La « mémoire » de l'écosystème est donc évolutive. Elle peut, par ailleurs, conserver la trace de l'évolution génétique des espèces et

---

1. Un changement épigénétique est un changement héréditaire adaptatif sans changement de la structure génétique de l'ADN du noyau.

des populations qu'il abrite, en même temps qu'elle est la bibliothèque des processus vitaux. Dès lors que l'on adopte cette représentation, le fonctionnement d'un écosystème peut être vu comme un échange permanent d'informations entre êtres vivants : transferts naturels de gènes, transferts de molécules avertissant de dangers, transferts de mécanismes de défense naturelle... Conserver les potentialités que l'histoire de la vie a créées, et qui sont présentes dans cette mémoire distribuée, demande donc de l'intelligence et de la prudence. La déforestation brutale et massive sous les tropiques, où chaque arbre et même chaque branche ont des spécificités génétiques, apparaît ainsi comme un massacre de la mémoire locale du vivant.

Cette vision de la nature comme système d'information est bien différente de l'idée qui circule généralement. Cette immense variété génétique du vivant, au sein même des espèces, est peu connue. La composition génétique d'une espèce est naturellement très variable car la nature sait opérer elle-même de nombreuses modifications du génome. Des mutations significatives, mais limitées à une seule base d'une séquence d'acide nucléique caractérisant un gène<sup>1</sup>, sont fréquentes ; ainsi, contrairement aux apparences, un champ de blé est un ensemble assez diversifié de phénotypes<sup>2</sup>. La nature produit en permanence, et spontanément, des organismes qui sont naturellement génétiquement modifiés (des OGM) : il s'agit d'un mécanisme d'adaptation aux variations de l'environnement. On peut donc considérer que la science et la technologie peuvent prolonger cette capacité de modification naturelle pour rendre encore plus efficaces

---

1. Un gène est une séquence d'une molécule d'ADN. L'ADN se présente sous forme d'une double hélice composée de séquences de paires de bases.

2. Le phénotype est l'ensemble des caractères génétiques exprimés et observables.

et rapides les adaptations aux nouvelles variations de l'environnement que subit la biosphère. Le changement climatique, qui est l'une des causes de la sixième extinction des espèces, demande des adaptations rapides que le génie génétique pourrait faciliter. En effet, les plantes génétiquement modifiées ou celles résultant du *gene editing*, c'est-à-dire de l'expression préférentielle d'un caractère déjà existant, sont susceptibles de fournir des réponses. Mais ce que la nature accomplit, ponctuellement et lentement, ne comporte sans doute pas le même degré de risque que ce que la technologie peut faire massivement et rapidement ; entre les deux, se trouve le risque de généraliser, par manque de précaution, des modifications porteuses de dangers cachés.

### L'ÉCOLOGIE VUE COMME UN FONCTIONNEMENT THERMODYNAMIQUE DES ÉCOSYSTÈMES

Le métabolisme d'un être vivant comprend deux types de fonctionnalités : celles qui réalisent des biosynthèses et celles qui effectuent des dégradations. D'une part, des structures sont créées, d'autre part, il s'en détruit. La destruction des biomolécules fournit de l'énergie et restitue des molécules qui sont réutilisées dans d'autres biosynthèses ou mises en réserve. Il y a, dans chaque écosystème, un cycle complexe de la matière qui est une succession « circulaire » de synthèses et de décompositions. Au cœur de ces processus, certains éléments chimiques remarquables décrivent ces cycles : le carbone, l'oxygène, l'hydrogène, l'azote, le phosphore, la potasse, et de nombreux oligoéléments. La photosynthèse, comme on l'a vu, est une fonctionnalité qui crée des structures biologiques ayant la forme de glucides ( $C_6H_{12}O_6$ ) ou de polymères de glucides. La respiration est la fonctionnalité inverse : elle dégrade le glucide en  $CO_2$

et H<sub>2</sub>O. La première utilise l'énergie du soleil pour réaliser une synthèse biologique, la deuxième dégrade cette même structure pour la transformer en source d'énergie. Ainsi, le glucide apparaît comme de l'énergie « cristallisée », donc comme une structure qui se forme et se dissipe en permanence. Le terme « dissipe » est ici employé au sens thermodynamique de dissipation d'énergie sous forme de chaleur<sup>1</sup>. Cette structure biologique qui est créée et se dissipe est complexe. Tout être vivant autotrophe<sup>2</sup> de la biosphère dépend de la photosynthèse : il naît, se renouvelle et s'entretient grâce à la photosynthèse. Les hétérotrophes consomment les structures autotrophes (glucides, protides, lipides animaux), et bénéficient ainsi d'un approvisionnement qui leur fournit l'énergie nécessaire pour constituer métaboliquement leurs propres structures biologiques. Dans les chaînes alimentaires, les êtres qui sont en troisième et quatrième positions se nourrissent des maillons antérieurs et s'approvisionnent de la même manière en énergie. Au total, c'est donc tout un réseau trophique, ou réseau alimentaire, qui utilise l'énergie structurée et qui la dissipe. Pour l'essentiel, le moteur principal de l'ensemble est l'énergie solaire et, à chaque stade, toutes les formes de cette énergie (en biomasse végétale ou en biomasse animale) qui alimentent les chaînes alimentaires sont des moteurs auxiliaires.

Un écosystème est un système ouvert. Il peut, de ce fait, être vu comme un ensemble de structures sans cesse traversées par de l'énergie qui se dissipe et dont l'origine est le Soleil. C'est une « structure dissipative<sup>3</sup> » qui se renouvelle constamment grâce à l'énergie qui la traverse. Toute analyse d'un écosystème n'est qu'un instantané et ne propose

---

1. François Roddier, *Thermodynamique de l'évolution : un essai de thermobio-sociologie*, Éditions Parole, 2012.

2. Voir p. 28 et 33.

3. Au sens de Prigogine. Voir Roddier, *op. cit.*

qu'une forme passagère entre un long passé et un futur largement indéterminé.

Au total, la matière se transforme en énergie et l'énergie se transforme en matière. La combinaison de « l'aggradation<sup>1</sup> » (création de structures) et de la dégradation (destruction de structures) définit le renouvellement permanent des systèmes vivants. La composition de chaque être vivant se renouvelle donc selon une cinétique qui le fait évoluer dans le sens de la croissance, pendant les périodes favorables, puis de l'obsolescence vers la mort. Chaque entité garde peu ou prou la même structure, mais ses atomes sont remplacés.

La composition d'un écosystème évolue tendanciellement vers une utilisation maximale de l'énergie reçue, ce qui permet de définir un maximum théorique de production dans les conditions où il se trouve : le climax. Le climax est un état dynamique – donc instable – sans cesse renouvelé. Chacune des composantes de l'écosystème dispose d'une mémoire de ses capacités propres et l'ensemble constitue une mémoire distribuée (voir ci-dessus) de cette « auto-organisation » qu'est l'écosystème, laquelle maximise la vitesse de dissipation de l'énergie (selon le troisième principe de la thermodynamique). Tout écosystème – système thermodynamiquement ouvert – tend donc spontanément à utiliser le maximum possible d'énergie solaire. Une vision thermodynamique des écosystèmes est donc intéressante et utile. Elle n'est pas sans rappeler l'image d'une construction permanente associée à une destruction elle aussi permanente, l'édifice reconstruit étant légèrement

---

1. Le terme « aggradation » est un néologisme proposé par le professeur Lemieux de l'université Laval (Québec). Il traduit bien le concept d'inverse des mécanismes de dégradation.

mais continuellement modifié en fonction des bifurcations internes de structure. La biosphère est cet édifice sans cesse renouvelable et renouvelé.

TOUTES LES REPRÉSENTATIONS ISSUES  
DES DIFFÉRENTES DISCIPLINES SONT LÉGITIMES

Ces quatre représentations se complètent. La description qualifiée d'« écologie fonctionnelle » (des entités et des interrelations) apparaît comme une approche simple car limitée à ce qui nous est facilement perceptible dans un écosystème, par exemple une proie et ses prédateurs, un sol tassé ou aéré selon le degré d'apport de matière organique... La vision chimique, quant à elle, n'est pas si facilement perceptible. Ainsi, la relation proie-prédateur fait intervenir des signaux chimiques de reconnaissance de la proie par le prédateur et elle peut être chimiquement représentée par des équations de digestion de la seconde par la première. La vision génétique établit qu'il existe une mémoire permettant la reconnaissance de la proie par le prédateur, et constate que cette interaction existe aussi dans la mémoire distribuée de l'écosystème. La vision thermodynamique établit les circuits d'énergie.

La description fonctionnelle simple des relations internes à l'écosystème – comme : « les coccinelles mangent les pucerons » – peut donc apparaître pauvre en information, mais le fait qu'elle soit tributaire en grande partie de l'observation commune et du langage courant facilite l'accès à la compréhension de la complexité des écosystèmes par un grand nombre de personnes, en particulier les producteurs agricoles. Bien que différentes et présentant des visions distantes, chacune de ces quatre représentations est légitime du point de vue des savoirs.

Chacune constitue une approche différenciée et utile de la même réalité.

On peut dès lors en tirer des conséquences inattendues. Chaque représentation d'un écosystème véhicule des hypothèses implicites qui sont souvent considérées, par habitude, comme des vérités révélées. La principale d'entre elles porte sur le caractère automatiquement régulé des systèmes vivants. Leur auto-organisation entraînerait leur convergence naturelle vers une sorte d'équilibre. Les équations chimiques peuvent en effet donner cette impression car elles sont construites sur le principe que rien ne s'y perde et que rien ne s'y crée<sup>1</sup>. Or, la vision thermodynamique inciterait plutôt à penser qu'en écologie la notion d'équilibre n'existe pas, et encore moins celle d'équilibre général, et que, au contraire, tout est en déséquilibre permanent. C'est une question fondamentale. Selon la manière dont on y répond, on opte pour une gestion où l'on attend que tout s'équilibre automatiquement, ou bien on intervient pour éviter les déséquilibres menant à des catastrophes...

### IL N'Y A PAS D'ÉQUILIBRE GÉNÉRAL DANS LA NATURE

Un équilibre général dans un système naturel (donc dynamique, par définition) serait caractérisé par un régime de fonctionnement continuellement stable, autrement dit, constitué de flux invariablement renouvelés. Or, il est clair que les écosystèmes sont des systèmes dynamiques constitués de flux instables. Tout au contraire, les écosystèmes sont en transformation permanente. On peut même

---

1. En référence à la formule attribuée à Lavoisier : « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme. »

supposer que, à chaque instant, ils connaissent des déséquilibres, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'égalité instantanée des flux entrants et sortants pour chacune des équations exprimant la transformation de la matière : les écosystèmes peuvent connaître des transformations structurelles et des bifurcations importantes.

Par ailleurs, on pense souvent que les situations d'équilibre correspondraient à une perspective, à une tendance, à une attraction. Mais elles ne se réaliseraient jamais, les facteurs de déséquilibre étant nombreux et permanents et ne laissant jamais suffisamment de temps pour l'installation d'un régime stable. Il y aurait, dans cette vision, une contradiction permanente entre une tendance à un ordre immuable et une tendance au désordre.

La sensation d'équilibre vient vraisemblablement du fait qu'en voyant fonctionner un écosystème sur une très courte période, nous avons l'impression qu'il est stable, et peut-être même le souhaiterions-nous car cette situation serait sans doute plus tranquille pour l'esprit ! Sans aller jusque-là, l'équilibre est plus facilement appréhendé par le cerveau que le déséquilibre. Par simplification, nous comprenons aisément un système quand il se présente comme un « système d'équations » où les flux sont symbolisés, pour chaque équation, par une égalité : ce qui entre est égal à ce qui sort. C'est un peu comme si, afin de comprendre un système dynamique, nous faisons un arrêt sur image pour mieux en observer l'intelligence complète, car il nous est impossible d'intégrer simultanément tout ce qui change dans un système dynamique en déséquilibre. Ce sont vraisemblablement les limites de nos capacités cérébrales qui nous amènent, pour comprendre les systèmes dynamiques, à les figer comme des photographies et à les « rêver » en équilibre. Mais, ce faisant, nous nous privons de les comprendre en dynamique.

Il reste une ambiguïté. En effet, en regardant fonctionner un écosystème, on a à la fois l'impression qu'il respecte bien des lois d'équilibre et qu'il évolue avec des déséquilibres. La notion d'évolution apparaît comme inconciliable avec la notion d'équilibre. La théorie de la viabilité<sup>1</sup> offre alors peut-être une porte de sortie. Un système dynamique peut évoluer et revêtir des formes différentes, avec des transitions possibles de l'une à l'autre forme. Ces transformations sont liées à des dynamiques de déséquilibre (dans le sens d'une progression ou d'une régression). À chaque transformation, l'écosystème sort d'un cadre de viabilité (l'ensemble des états viables du système) qui autorise des petits déséquilibres par flexibilité pour passer à un autre cadre (celui résultant des variables ajoutées ou supprimées). À chaque forme correspond un ensemble d'états possibles, éphémères car en permanence en déséquilibre. Mais rien n'empêche de penser qu'il peut exister, pour chaque forme, un état « limite », lui aussi éphémère, qui serait caractérisé par une dynamique d'équilibre stable et renouvelé, autrement dit, un attracteur. Cet état, sans doute local dans un système, pourrait être celui qui est partiellement à l'équilibre lorsque aucune perturbation n'intervient dans la dynamique de fonctionnement. Dans cette vision, l'équilibre général ne serait donc qu'un cas limite, parmi de nombreux états de déséquilibre, au sein d'un même régime de fonctionnement. Par exemple, dans un écosystème cultivé, un peuplement végétal est envahi par des adventices (plantes non désirées). Chaque année, se produisent des changements de flore : envahissement de certaines espèces, régression d'autres. On passe donc d'une forme à une autre. Concrètement, chacune de ces formes est une famille d'états de peuplement dans

---

1. Jean-Pierre Aubin, *La Mort du devin, l'émergence du demiurge*, Éditions Beauchesne, Paris, 2010.

le cadre d'un régime de fonctionnement général (plantes cultivées ayant une certaine densité de semis, émergence d'espèces adventices, climat...). Il se peut que plusieurs années successives soient caractérisées par le même régime de fonctionnement. Il existe alors une dynamique qui se renouvelle, mais selon un état d'équilibre stable du peuplement. Cet état d'équilibre ne peut être que temporaire en raison de la variabilité du climat et des successions de cultures qui induisent des perturbations.

TOUT N'EST QUE DÉSÉQUILIBRE,  
L'ÉQUILIBRE EST UN CAS PARTICULIER DE DÉSÉQUILIBRE

Dès lors qu'il est nécessaire de comprendre la dynamique des écosystèmes, il faut s'intéresser aux déséquilibres et à leurs développements, ce qui n'est pas toujours facile. L'approche thermodynamique nous y invite. Tout écosystème varie en fonction de la variation de ses paramètres de contrôle, comme par exemple le climat, les rythmes d'alternance de la lumière, la dynamique de compétition et de coopération entre êtres vivants... L'immense complexité des interactions entre les variables écosystémiques se traduit par des variations d'ensemble des écosystèmes, elles-mêmes très diverses. De petites variations, comme celles des températures au cours d'une même saison, induisent des conséquences minimales qui ne changent pas la nature de l'écosystème. Des chocs plus importants, comme un gel tardif, induisent des transformations légères mais qui peuvent durer (par exemple, dans un même milieu, la réduction de l'effectif de certaines espèces ou le remplacement par d'autres). De grands chocs, tels des incendies, modifient en profondeur le paysage écologique et peuvent créer des irréversibilités. Dans ce cas, la capacité de résilience,

c'est-à-dire de retour à la situation antérieure, est fortement atteinte. Que dire alors des chocs de météorites, comme à la fin du crétacé, ou des explosions volcaniques géantes qui peuvent priver les écosystèmes de soleil pendant de longues périodes, en raison des émissions de cendres stratosphériques et atmosphériques ? Ces perturbations et ces chocs peuvent à tout moment réduire très fortement la production de biomasse et amputer définitivement certaines branches de l'arbre de l'évolution.

Les atteintes aux écosystèmes comme les conséquences en termes de résilience et de dommages sont donc d'importance très variable, depuis un retour à un état de faible instabilité dynamique, en passant par des situations de « cicatrisation », jusqu'à des transformations majeures, générant un nouveau régime de fonctionnement caractérisé par un nouvel état de faible instabilité dynamique, ou encore allant vers des situations de chaos. Non seulement l'équilibre n'existe que comme cas éphémère, mais on peut considérer que la notion opposée d'accident n'existe pas non plus puisqu'elle est tributaire de la notion d'équilibre stable, et que la nature profonde d'un écosystème est le déséquilibre, les bifurcations, les accidents et donc l'évolution.

### LA TRANSFORMATION DE LA BIOSPHERE EST PERMANENTE

L'histoire de la vie terrestre est donc une succession permanente d'états en déséquilibre, ceux-ci étant plus ou moins importants. Lorsqu'un choc intervient, une sécheresse par exemple, un écosystème subit des transformations, certaines réversibles comme le renforcement de quelques espèces résistantes au manque d'eau, d'autres irréversibles comme la disparition d'espèces sensibles. Il en résulte une

cascade de changements, chaque nouvel état instantané résultant de l'état instantané antérieur ainsi que de l'évolution des variables de commande externes (ici, le climat). Après un choc climatique, le retour à un régime de variations plus régulier continue à faire évoluer l'écosystème, ce dernier peut avoir l'opportunité de reconstituer certains compartiments réversibles. L'ensemble de l'évolution sur une période de perturbation majeure apparaît donc comme un « cycle adaptatif<sup>1</sup> » connaissant des phases successives de destruction partielle, de réorganisation et de consolidation.

Ces termes sont utilisés par la théorie de la « panarchie » en écologie<sup>2</sup>. Cette vision renvoie implicitement à une évolution faite de périodes régulières et d'accidents. Le déroulement de grands faits écologiques, comme la succession glaciation-déglaciation, peut faire penser à l'existence de tels régimes. Mais il n'y a aucune raison pour que les mécanismes de résilience produisent un état qui soit le même que l'état antérieur. Dans une forêt, une sécheresse peut détruire des espèces, ce qui provoque des îlots de perturbation, notamment dans le circuit de l'eau et la distribution spatiale des températures locales dans l'écosystème. Si, à la suite du choc, s'établit un nouveau régime de pluies, celui-ci pourrait permettre de remplacer les arbres morts, dans les espaces laissés libres, par de nouvelles espèces climatiquement plus adaptées. Cela rétablirait progressivement des circuits hydriques locaux et une nouvelle distribution locale des températures. Mais,

---

1. Terme utilisé en écologie lié à la panarchie (voir ci-après). Voir Ahjond S. Garmestani & Melinda Harm Benson, 2013, d'après Lance Gunderson & C.S. Holling, 2002, sur le site panarchie, //www.resalliance.org/index.php/panarchy.

2. La panarchie est un cycle naturel de transformation d'un écosystème. Le terme est particulièrement bien décrit dans *Résilience & Environnement* de Raphaël Mathevet et François Bousquet, Buchet/Chastel, 2015.

même si le nouvel écosystème ressemblerait au système antérieur, il serait différent car mieux adapté à une éventuelle nouvelle perturbation (sécheresse), grâce à la présence de nouvelles espèces.

En cas de choc plus important, les transformations peuvent comprendre la disparition complète de certaines fonctionnalités. Le choc gigantesque de la fin du crétacé a provoqué une extinction massive des espèces et un profond changement de biodiversité végétale et animale, au point que la biosphère a alors connu une bifurcation très importante dans sa composition. Mais certaines des fonctionnalités fondamentales, la photosynthèse par exemple, ont persisté et d'autres sont apparues, comme l'émergence des mammifères parmi lesquels les futurs hominidés. Le stock des fonctionnalités a donc été endommagé mais il a repris sa diversification.

### LA BIOSPHERE : UN STOCK ÉVOLUTIF DE FONCTIONNALITÉS

Les relations des entités vivantes avec leur milieu et entre elles, leur déterminisme génétique, leur métabolisme chimique et leur contenu énergétique sont autant de mécanismes fonctionnels qui caractérisent « le vivant », en fait l'ensemble des écosystèmes, c'est-à-dire la biosphère. Ces mécanismes peuvent être vus comme des processus apparus localement grâce à la conjonction, à tout instant, d'un univers des possibles (le champ des changements), d'une énergie localement disponible (la force motrice de la transformation), et d'une « utilité », c'est-à-dire une fonction qui a un rôle dans l'ensemble. Si un tel événement est reproductible et s'il bénéficie d'un espace d'expansion potentiel, il dispose d'un avantage sélectif par rapport à d'autres ; il peut

devenir un élément stable d'une voie métabolique qui se répète puis est installé, ou un mécanisme épigénétique, ou encore un élément inscrit dans le génome s'il résulte d'une mutation. Cet évènement répété peut être considéré comme s'il était une technique innovante. S'il avait été inventé par une entreprise, il aurait ce statut. La biosphère dans son ensemble, grâce aux innombrables évènements évolutifs, peut donc être considérée comme un immense stock d'opportunités technologiques. Plus qu'un simple stock, c'est un ensemble de techniques liées entre elles. Une voie métabolique, par exemple, est une succession de réactions chimiques, enchaînées en présence de catalyseurs, qui ressemble à ce que pourrait être un processus productif dans un réacteur ou, plus largement, une filière technologique.

Cet ensemble est-il optimal en termes de ressources rares et d'énergie ? Il peut donner cette impression car, à chaque processus, celui qui est sélectionné est vraisemblablement le plus efficace. Mais, en réalité, il n'y a aucune raison qu'il le soit. Il est en effet le résultat d'opportunités successives qui se sont « cristallisées » par répétition, et non le résultat de ce qui serait une sorte de mise en concurrence de tentatives parallèles que la nature aurait mises en compétition. Il y a certainement, pour toutes les voies métaboliques existantes, d'autres chemins possibles qui n'ont pas été explorés par le vivant dans son évolution. L'évolution des structures semble s'opérer par tâtonnements exploratoires construisant des fonctions. Et, même s'il n'est pas « localement optimal », le système lui-même peut l'être plus globalement puisqu'il fonctionne selon un algorithme où l'énergie disponible bénéficie de nombreuses autres opportunités d'utilisation possibles.

Ce mécanisme « d'invention » naturelle est à l'origine du stock de technologies que recèle le vivant. Sa connaissance est aussi une source d'inspiration fondamentale, la

bio-inspiration, pour résoudre des questions que posent aujourd'hui les sociétés. Par exemple, les mécanismes métaboliques qui, au sein d'une plante, inhibent la croissance d'une plante voisine – ce que l'on appelle l'« allélopathie négative » – constituent une base d'invention pour des herbicides futurs en imitant ces mécanismes (biomimétisme) ou en s'en inspirant (bio-inspiration<sup>1</sup>).

En résumé, l'histoire de la vie montre que tous les processus vitaux sont une construction sans cesse en évolution, ayant subi et subissant toujours des dégradations ou des chocs, mais qui prend inlassablement de nouvelles voies. Cette construction est poussée par les disponibilités en énergie solaire et en énergie cristallisée sous forme de molécules biologiques. Elle explore en permanence des formes nouvelles au sein du champ des possibles. Ce sont des « structures dissipatives » qui se renouvellent et se transforment en permanence et qui forment les écosystèmes de la biosphère. On peut les représenter comme un ensemble intégré de fonctionnalités. C'est aussi un capital naturel, une mine de processus qui sont imitables ou peuvent servir de source d'inspiration pour innover. Ce capital actuel constitue donc une immense base de connaissances utiles pour l'avenir. On comprend bien, dès lors, que préserver la biodiversité des espèces et des écosystèmes revêt une exceptionnelle importance car chaque espèce, et quelquefois des exemplaires particuliers de ces espèces (phénotypes), ou chaque écosystème, doivent être envisagés comme une ressource potentielle unique. Ce stock de connaissances peut, en effet, permettre de résoudre rapidement des problèmes importants, telle la production de biomatériaux nouveaux, de formes très performantes d'énergie issues

---

1. Voir p. 158.

## LA BIOSPHÈRE : UN IMMENSE STOCK...

de la biomasse, de molécules médicamenteuses... Or, les sociétés humaines détruisent à grande vitesse cette biodiversité et renoncent ainsi à d'éventuelles solutions vitales pour l'avenir !



## CHAPITRE II

# LA BIOSPHÈRE EN DANGER

Il est saisissant de prendre conscience que les écosystèmes terrestres sont tous atteints par l'action des sociétés et que celles-ci semblent s'être habituées à cette marche vers un désastre. La biosphère est de plus en plus artificialisée, transformée et menacée. Faudra-t-il toucher du doigt les conséquences extrêmes de sa dégradation pour que nos réactions soient à la mesure des enjeux ? Le temps qui s'écoule sans catastrophe majeure au niveau planétaire semble nous anesthésier. Depuis l'aube des temps historiques, notre espèce prend possession de la biosphère dans une attitude de lutte pionnière contre le substrat qui la fait vivre ! Pourquoi ce comportement incroyablement paradoxal ?

### LA COLONISATION DE LA BIOSPHÈRE PAR LES SOCIÉTÉS HUMAINES

L'évolution des écosystèmes de la biosphère est très discontinue au sens où, sur longue période, les changements n'ont jamais été réguliers ni dans le rythme ni dans l'intensité. Des époques climatiques régulières et continues ont eu lieu entre les grands chocs, qu'ont été les extinctions massives

de biodiversité. Ces dernières furent notamment causées par divers aléas, en particulier des phases volcaniques aiguës induisant l'obscurcissement atmosphérique périodique et réduisant, en conséquence, la production de biomasse. La dérive des continents a lentement déplacé les plaques continentales qui ont donc vu leur climat changer en raison de la modification de l'incidence du rayonnement solaire. Les alternances glaciation-déglaciation dues aux variations de l'orbite terrestre ont été une source supplémentaire de modification des écosystèmes. À ces facteurs géophysiques, se sont ajoutées les transformations dues à la compétition territoriale entre les espèces. Les grands zonobiomes (grands types d'écosystèmes régionaux<sup>1</sup>) de l'ère géologique actuelle sont donc le résultat de multiples événements géoclimatiques et écologiques de différentes natures. Mais ils sont aussi le résultat de l'arrivée, très récente à l'échelle des temps géologiques, d'une espèce particulière : *Homo sapiens*.

L'évolution imprimée par les sociétés humaines sur les écosystèmes est marquée par le caractère invasif et profondément transformateur de notre espèce. L'homme de Neandertal et *Homo sapiens* ont d'abord été des chasseurs, des pêcheurs et des cueilleurs comme le sont beaucoup d'animaux supérieurs. Vers - 200 000 ans, *Homo sapiens*, originaire d'Afrique, a dû affronter une très forte glaciation qui l'a vraisemblablement contraint à se réfugier au sud de ce continent. La population aurait alors très fortement diminué, ce qui aurait induit un goulot d'étranglement génétique. Puis, avec la déglaciation et une nouvelle période de croissance démographique, il aurait traversé l'Afrique et le Moyen-Orient actuel pour arriver, vers - 45 000 ans, en Europe où il aurait rencontré l'homme de Neandertal,

---

1. Un biome est un ensemble homogène de végétaux et d'animaux dans une même aire géographique contrôlée par le climat.

lequel a progressivement disparu. Les sociétés de chasseurs-cueilleurs, après avoir, vraisemblablement, en partie épuisé les ressources des espaces qu'elles occupaient, ont inventé l'agriculture en Mésopotamie et dans différentes régions du monde. Puis l'agriculture a progressivement colonisé une grande partie de la biosphère et continue aujourd'hui à s'étendre sur des fronts pionniers au détriment des grandes forêts tropicales. Avec l'avènement de l'agriculture, ce n'est plus notre espèce qui s'adapte au milieu mais le milieu qui s'adapte à nos besoins. Et, environ 12 000 à 14 000 ans après cet événement majeur, la population humaine aura dépassé 9 milliards d'individus et transformé radicalement la quasi-totalité des écosystèmes de la planète. Elle aura, en particulier, éradiqué massivement des écosystèmes forestiers et leur aura substitué des écosystèmes simplifiés jusqu'à devenir des monocultures quelquefois non viables. Les sociétés humaines pourraient atteindre un effectif maximum compris entre 9,5 et 11 milliards d'individus vers la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, ce devrait être le sommet de la courbe démographique. Les écosystèmes actuels vont-ils résister à la colonisation de la vague démographique humaine ? Vont-ils résister à la pression exercée par la montée des besoins de subsistance des sociétés ?

### NOTRE ESPÈCE ET LES CONSÉQUENCES DE SES ACTES

Notre espèce s'est autoproclamée intelligente<sup>1</sup> – *Homo sapiens* – mais elle ne contrôle pas les conséquences de ses actes. L'espèce humaine, comme les autres, a trouvé dans

---

1. Remarque orale empruntée à Gilles Boeuf dans une conférence au Collège de France en 2014.

la biosphère les ressources pour sa subsistance et sa survie. Pour s'alimenter, elle s'est comportée en prédateur et a eu l'intelligence d'inventer des armes et des stratégies de chasse collectives. Pour se vêtir, elle a utilisé les peaux des animaux puis a tissé leurs poils et des fibres végétales. Pour s'abriter et se défendre, elle a inventé les toitures et les murs en chaume, en bois et en pierre. Pour se chauffer et cuire les aliments, elle a utilisé le bois de feu. Pour se déplacer et porter des charges, elle a inventé la roue et domestiqué bœufs et chevaux auxquels elle a fourni une nourriture énergétique indispensable. Pour se soigner, elle a utilisé les vertus de certaines plantes... Pour tous ces besoins des sociétés humaines, la biosphère a été la ressource presque exclusive comme elle l'est pour tous les animaux.

La chasse s'est étendue à de grands espaces et elle est devenue de plus en plus intense au point de décimer certaines espèces, particulièrement celles de grande taille ; parmi cette mégafaune, les mammoths, mais aussi 57 espèces de grands mammifères en Amérique, et de nombreuses espèces d'oiseaux des îles du Pacifique<sup>1</sup>. Les arbres ont aussi été particulièrement atteints par la destruction, qu'ils soient abattus pour cultiver de nouveaux espaces ouverts ou simplement pour utiliser le bois. Les Celtes ont déforesté l'Ouest européen dès - 2200. Dans cette même région, les XI<sup>e</sup>, XII<sup>e</sup> et XIII<sup>e</sup> siècles ont connu de très grands défrichements. À partir du XVII<sup>e</sup> siècle, les marines européennes ont détruit beaucoup d'arbres des forêts anciennes mais, pour l'essentiel, la forêt était destinée au bois de chauffage. En Afrique sahélienne, depuis un demi-siècle, la forêt sèche a disparu dans les hinterlands des villes pour fournir de l'énergie en bois de feu aux ménages

---

1. Robert Barbault & Jacques Weber, *La Vie, quelle entreprise !*, Seuil, 2010.

urbains. Ces exemples montrent que les sociétés puisent des ressources dans la nature comme si elles étaient infinies, la finitude n'étant pas une catégorie spontanément présente dans les représentations de la nature que se font, en général, les sociétés. La course vers l'Ouest, lors de la colonisation de l'Amérique du Nord par les pionniers européens, est une parfaite illustration de la fascination pour la conquête de grands espaces vierges, et de leurs ressources, pour une appropriation individuelle sans que leurs limites soient prises en compte. En quelque sorte, la notion de limite n'existait pas, ou, comme toute frontière, elle appelait simplement à être repoussée.

Les ressources étaient certes renouvelables au sens où les prélèvements sur les écosystèmes étaient d'abord ponctuels, et donc susceptibles de « cicatriser » grâce au remplacement assuré par la nature environnante. En effet, un prélèvement de faible importance fait partie de la variabilité naturelle de la dynamique d'un écosystème : la mort d'un grand arbre ou un faible incendie sont vite compensés ; de même les clairières, comme celles actuellement cultivées par les Indiens d'Amazonie, sont rapidement réoccupées par des arbres, et le couvert forestier se reconstitue en trente ans environ. Lorsque le prélèvement est plus important, le remplacement devient plus difficile jusqu'à mettre en péril le renouvellement de la ressource, notamment lors des vastes incendies et, surtout, pour les fronts pionniers agricoles d'aujourd'hui. C'est aussi le cas pour les espèces animales qui font l'objet de chasse intensive : elles se raréfient et finissent par s'éteindre. C'est encore le cas pour les espèces d'arbres surexploitées qui disparaissent, comme par exemple en Amazonie dans les zones de frontière forestière, malgré la législation et la surveillance de l'œil des satellites... La prise de conscience lente et tardive de ces phénomènes a amené les sociétés à s'imposer des lois et des règlements

limitant les prélèvements intensifs et la prédation systématique. Mais ces règles sont très souvent enfreintes, l'État n'ayant pas les moyens de les faire respecter.

Mais, même si les prélèvements des ressources naturelles de la biosphère ont été et restent importants, les plus grandes perturbations et transformations des milieux naturels sont provoquées par les cultures (agriculture, aquaculture...) destinées à l'alimentation. En effet, tout au long de l'histoire, il ne s'est pas simplement agi d'utiliser des espaces nouveaux en allant de plus en plus loin, au fur et à mesure qu'augmentait la population ; chaque fois que certaines limites géographiques étaient atteintes, il fallait bien s'installer et se fixer, puis cultiver en permanence les mêmes sols. Autrement dit, il a fallu passer de l'errance et du nomadisme à l'établissement pérenne, et gérer la production végétale de la biosphère plutôt que de n'en récolter que les surplus. De même, au lieu de chasser les animaux, on a commencé à les élever pour les consommer et à les domestiquer pour utiliser leurs services, et, pour ce faire, on leur a installé un habitat clôturé et assuré une alimentation de proximité. Passer du prélèvement à la culture des plantes et de la chasse à l'élevage domestique était inévitable pour garantir la survie de sociétés plus nombreuses. Cela s'est d'abord produit dans les régions où se manifestait l'accroissement des contraintes des milieux. Ainsi, fuyant les épisodes de sécheresse, les populations pastorales ont migré vers les fleuves où elles ont développé l'irrigation ; ce fut le cas en Égypte il y a près de 10 000 ans et c'est ce qui se passe aujourd'hui au Sénégal. Autre exemple, la migration historique des populations d'Asie centrale où les pâturages étaient insuffisants vers l'Ouest européen. Puis, dans la plupart des régions, la transition vers l'agriculture s'est faite par abattis-brûlis : la forêt a été abattue et brûlée afin de laisser place aux cultures (la percée dans les forêts européennes par

les sociétés moyen-orientales venues de l'Est). Aujourd'hui encore, la déforestation, venue du fond des âges, se perpétue et reste à l'origine de l'essentiel de la dégradation contemporaine de la biosphère. Pourquoi a-t-on mis si longtemps à prendre la mesure des conséquences dangereuses de cette dégradation et pourquoi continue-t-elle aujourd'hui ? Pourquoi une telle inconscience persiste-t-elle ? Tout cela résulte d'une très longue histoire<sup>1</sup>...

### LES MIGRATIONS SONT DANS LA NATURE PROFONDE DES SOCIÉTÉS HUMAINES

Chasser, pêcher, cueillir, toujours au même endroit en étant de plus en plus nombreux, finit par raréfier les ressources et par mettre en concurrence les humains pour l'accès à ces ressources. S'installe alors, dans une société, une situation dite « malthusienne » : localement, les besoins d'une population excèdent les ressources<sup>2</sup>. Cela peut aller jusqu'à la famine et la mort quand aucune issue n'est en vue. Ce fut le cas chaque fois que des régions entières, voire des civilisations, ont connu la rareté alimentaire. À l'aube de l'histoire, les populations humaines étant peu importantes, leur solution était la migration. Lorsque des régions où l'agriculture s'était implantée tendaient à connaître un plafonnement – voire une réduction de la production, la première des solutions était, là encore, la migration. D'autant plus que les peuples de chasseurs-cueilleurs dont toutes nos civilisations sont issues étaient originellement migrants. On peut donc

---

1. La référence principale dans ce domaine est le livre de Marcel Mazoyer et Laurence Roudart, *Histoire des agricultures du monde*, Seuil, 1997.

2. Du nom de Thomas Malthus, économiste anglais du XVIII<sup>e</sup> siècle, qui publia en 1798 un *Essai sur le principe de population*.

supposer que l'histoire ancienne des sociétés humaines a été une succession de migrations, d'installations et de constitutions de mîles de population<sup>1</sup>, de crises de rareté par épuisement de ressources renouvelables et dégradation de la fertilité des milieux cultivés, puis à nouveau de migrations vers des lieux encore inhabités donc inexploités. Chaque fois que les migrations entraînaient une concurrence pour l'espace, la guerre était inévitable. Le sentiment d'appropriation de l'espace et des ressources trouve sans doute là une de ses origines. Beaucoup d'espèces animales se sont adaptées et s'adaptent aux variations d'environnement en migrant et aussi en défendant des espaces d'appropriation, attitude en lien avec leur sécurité. De ce point de vue, l'humanité s'est comportée comme de nombreuses espèces animales.

Ainsi, la population première de l'Europe aurait occupé largement le territoire, en petits groupes humains de chasseurs-cueilleurs. Dans une période débutant vers - 2000 ans, des populations celtes venues de l'Est, connaissant vraisemblablement des crises de ressources, ont occupé à leur tour les mêmes espaces. Les Celtes ont établi une civilisation qui a développé une agriculture sophistiquée : déforestation, maîtrise de la traction attelée bovine et travail du sol, entretien des plantes cultivées pour limiter la concurrence des herbes et, même, récolte mécanique des céréales à l'aide de grands peignes roulants. Des villes ont été érigées et ont atteint, dès avant le commencement du premier millénaire avant Jésus-Christ, un haut niveau d'organisation économique et institutionnelle. Un plafonnement démographique se serait manifesté vers le II<sup>e</sup> siècle av. J.-C. La montée en puissance de l'Empire romain et l'établissement d'une domination progressive de cet empire sur les Celtes ont encore renforcé

---

1. Un « mîle de population » est une concentration par progression démographique.

l'organisation des sociétés existantes : écriture, droit, institutions... L'Europe, devenue gallo-romaine, a alors subi les assauts de nouvelles populations migrantes, en grande partie nomades, elles aussi venues de l'Est et vraisemblablement en situation de crise alimentaire. Ces populations issues des « Grandes Invasions » se sont rapidement mélangées avec le fond celto-romain sédentaire pour former les royaumes européens du haut Moyen Âge<sup>1</sup>.

L'Amérique centrale précolombienne a également connu des successions de migrations hybridant les nouveaux venus du Nord, et de tradition nomade, avec le fond des sociétés agraires déjà présentes. De même, en Chine, les môles démographiques surchargés, issus de la grande migration venue de l'Asie centrale, ont très tôt alimenté à leur tour des migrations vers l'Asie du Sud-Est. En même temps, les empires chinois du Nord s'abritaient derrière la Grande Muraille pour empêcher les peuples d'Asie centrale, qui manquaient de ressources, de migrer vers l'est. Les exemples historiques sont nombreux et de plus en plus documentés. L'histoire aurait donc été une longue bousculade des peuples désireux d'accéder aux écosystèmes prometteurs ainsi qu'aux ressources naturelles, et de les contrôler.

AVEC L'AGRICULTURE, LES POPULATIONS  
SE SONT ANCRÉES DANS DES TERRITOIRES

L'accroissement de la densité humaine dans les lieux colonisés rendant les migrations plus difficiles, celles-ci ont progressivement diminué avec le temps. Les populations ont été conduites à inventer des techniques pour produire

---

1. Voir Arnold J. Toynbee, *La Grande Aventure de l'humanité*, Payot, 1994.

davantage sur les mêmes étendues de terre. On entrainait alors dans la dynamique de l'intensification de l'usage des facteurs de production naturels : maîtriser l'eau pour irriguer, utiliser les déjections animales pour apporter au sol de la fertilité, travailler plus pour protéger des récoltes sans cesse menacées par la concurrence des herbes et les ravageurs...

Avec l'agriculture, les hommes sont entrés dans un processus de plus en plus étendu d'artificialisation de la nature où ils préparent le sol physiquement pour cultiver, où ils apportent la graine ou le plant, où ils combattent les plantes concurrentes, et duquel ils récoltent les fruits. L'apport en travail humain et animal augmente de plus en plus au fil du temps, aussi bien pour améliorer les rendements que pour étendre les surfaces cultivées. Le travail fourni (labour, binage, irrigation...) permet d'aménager considérablement le milieu de production, quelquefois d'une manière spectaculaire : c'est le cas des montagnes sculptées en terrasses dans les pentes et en diguettes pour retenir l'eau, ou des fleuves endigués pour maîtriser les crues et guider l'eau dans des parcelles plus larges ou plus éloignées. Pour préparer le sol, il a vite été nécessaire de passer de la houe à l'araire attelé, une charrue primitive, puis à la charrue avec des attelages de deux, au Moyen Âge, puis quatre ou six bœufs au XVII<sup>e</sup> siècle. On comprend alors que le travail obstiné et inévitable d'artificialisation des écosystèmes, pour les faire produire, ne pouvait être vu que comme une sorte de lutte contre la nature pour la maîtriser et garantir la survie des sociétés.

Se sont ainsi constituées des concentrations géographiques de phénomènes d'innovation et d'accroissement de rendement permettant de fixer des populations sans cesse plus nombreuses. Ces populations se sont attachées aux territoires où elles se sont installées, qui sont autant de lieux d'investissement et de prospérité permettant d'échapper au

destin migratoire et aux disettes. Les agronomes romains et arabes sont par exemple restés célèbres dans l'aire méditerranéenne pour leur accumulation de connaissances techniques ancrées dans les écologies locales. De même, les techniques d'irrigation d'Égypte, de l'Inde, d'Asie centrale, les terrasses indonésiennes et chinoises, sont des techniques qui ont contribué à fixer les sociétés dans l'espace et à installer des civilisations.

Ainsi, d'une occupation nomadique de la biosphère fondée sur le seul prélèvement, le peuplement humain a progressivement accédé à une occupation fixe et transformatrice des écosystèmes fondée sur la culture. Mais cette dynamique n'est pas terminée ; elle s'achèvera lorsque la croissance de la population se terminera aussi et que seront épuisées – ou interdites – toutes les possibilités de migration vers des « terres neuves ». Par ailleurs, toujours sur longue période, cette dynamique historique combine la technicisation de l'agriculture avec la diversification des techniques industrielles et de services, en même temps qu'elle combine la transformation des espaces ruraux et des espaces urbains.

### LA RÉVOLUTION INDUSTRIELLE ET LES ÉCOSYSTÈMES

La révolution industrielle et les villes ont piloté la transformation des écosystèmes dans leur zone d'influence. Une fois les diverses sociétés installées, de manière plus ou moins stable, dans des espaces d'appropriation, la dynamique démographique locale a eu des effets différenciés sur les écosystèmes en fonction des densités de population. Toutes les sociétés ont connu cependant une même évolution, celle de l'urbanisation, mais à des rythmes différents. Celle-ci s'est beaucoup amplifiée partout dans le

monde après la Seconde Guerre mondiale, et elle continue à s'accroître fortement. La concentration villageoise, puis urbaine, puis celle des mégapoles, ont engendré de manière toujours accélérée un écosystème particulier d'un type nouveau.

La concentration humaine implique que les ressources soient importées depuis l'hinterland (zone d'influence de la ville) vers le centre urbain. On transporte ainsi l'alimentation, l'eau, les matériaux de construction et l'énergie. À l'inverse, on évacue les déchets biologiques, les emballages et les objets non consommés. Par ailleurs, l'agglomération urbaine est le lieu des productions à caractère artisanal et industriel qui se diffusent dans l'hinterland. Par rapport aux civilisations essentiellement rurales et villageoises (ce que furent longtemps la Chine et les « empires asiatiques<sup>1</sup> » par exemple), les sociétés à fort tropisme urbain, comme celles d'Amérique du Sud dès le XIX<sup>e</sup> siècle, ont eu besoin de beaucoup d'énergie pour organiser les circuits physiques des échanges. Dans ces écosystèmes urbains, la circulation des flux n'a que rarement été anticipée, ce qui a eu pour conséquences, entre autres, la création de décharges ou l'utilisation des rivières comme exutoires. Plus généralement, l'organisation des espaces à forte densité a presque toujours été improvisée.

La problématique de la gouvernance et de l'efficacité des circuits, dans les milieux à forte concentration humaine, est en effet complexe. C'est toute une « physiologie » territoriale qui doit être imaginée. La concentration physique ne doit pas gêner les transports des personnes et des biens, afin que la circulation soit fluide. Cette fluidité est nécessaire

---

1. Au sens de « mode de production asiatique » de Karl Marx associant de multiples petites concentrations villageoises à un seul centre organisateur, lieu d'accumulation du pouvoir et du capital.

pour faire correspondre, territorialement et continûment, les offres et les demandes de biens et de services. Les mécanismes décentralisés de marché le font de manière généralement efficace, car l'offre et la demande se stimulent mutuellement. Cependant, certains pays connaissent encore des périodes difficiles pour connecter efficacement les capacités productives de la campagne avec la consommation de la ville. C'est le cas en Afrique subsaharienne ou en Amérique centrale où l'offre sur les marchés urbains reste très fractionnée.

La révolution industrielle, par la maîtrise de l'énergie du charbon puis du pétrole, a permis l'avènement de sociétés à plus grande mobilité et à plus grande vitesse de circulation des flux de produits et de facteurs de production. En conséquence, des écosystèmes urbains de plus grande taille se sont établis, associés à leur banlieue et leur hinterland. Une des grandes lois en ayant émergé dit que l'influence économique d'une ville sur le territoire avoisinant est inversement proportionnelle à la distance au centre<sup>1</sup>. L'intensité de transformation des écosystèmes antérieurs obéit vraisemblablement à la même loi. Autrement dit, plus on se rapproche du cœur des concentrations urbaines, plus l'écosystème initial est transformé et artificialisé, mais l'ensemble reste un écosystème. On y retrouve, comme dans un « écosystème biologique », des entités organisées et des flux qui les relient, des moteurs qui créent des structures dissipatives et des déperditions entropiques, donc des processus d'amélioration et de dégradation.

---

1. Voir la théorie de la localisation de J.H. von Thünen, *Der Isolierte Staat in Beziehung auf Landwirtschaft und Nationalökonomie, oder Untersuchungen über den Einfluss, den die Getreidepreise, der Reichtum des Bodens und die Abgaben auf den Ackerbau ausüben*, Partial translation into English by Carla M. Wartenberg in 1966 as *Isolated State*, New York: Pergamon Press.

Cette écologie des systèmes urbains peut se concevoir comme la continuation de celle des écosystèmes agricoles qui sont eux-mêmes en continuité avec celle des écosystèmes naturels. Entre ces trois « étages », les différences viennent de la création par les sociétés de fonctionnalités artificielles qui s'ajoutent et s'hybrident avec les fonctionnalités naturelles. Par conséquent, l'usage du mot « écosystème » n'a pas à être limité à ce qui a un contenu naturel : l'ensemble des structures et fonctionnalités de l'espace rural et de l'espace urbain, et l'ensemble des structures et fonctionnalités correspondant à la nature et aux technologies forment un écosystème. Le mot écosystème, et le concept, couvrent l'ensemble, ce qui élargit le champ de vision de l'écologie. On peut, dans le même esprit, utiliser le terme « anthropoécosystème<sup>1</sup> » qui exprime bien la double nature d'un écosystème : son caractère naturel et son caractère artificiel et technologique créé par les sociétés humaines. La carte de la planète apparaît de plus en plus marquée par les concentrations urbano-industrielles et leurs conurbations. Ces concentrations variées permettent de définir toute une gradation de l'anthropisation des écosystèmes, depuis l'authentiquement rural jusqu'à l'ultra-urbain. L'agriculture s'inscrit dans cette même logique de gradation : de l'écosystème très peu transformé jusqu'aux jardins urbains et à l'agriculture motorisée qui sont des écosystèmes résultant de multiples transformations et à haut niveau d'artificialisation. C'est dans ce cadre que s'est jouée l'une des plus grandes transformations technologiques de ces écosystèmes : l'industrialisation de l'agriculture.

---

1. Du grec *anthrôpos* : relatif à l'homme.

## LA BIOSPHÈRE EN DANGER

### LE XX<sup>e</sup> SIÈCLE, CELUI DES GRANDES FAMINES PUIS DU REDRESSEMENT AGRICOLE

À l'issue de la Seconde Guerre mondiale, le tableau alimentaire du monde était devenu catastrophique : l'Europe était dévastée, désorganisée, déficitaire en production alimentaire, et des millions de personnes étaient déplacées, sans emploi. L'agriculture du Japon, toujours structurée sur un mode féodal, était en situation de pénurie et de pauvreté rurale. La Chine et l'Inde connaissaient des famines très étendues.

La réaction des États-Unis a été très rapide car les famines pouvaient favoriser la montée de régimes communistes comme dans la Chine de Mao Zedong. Cela se passait dans le nouveau contexte géopolitique qui fut une sorte de troisième guerre mondiale : la guerre froide, guerre de concurrence géographique d'influence économique et politique fondée sur la capacité militaire mutuelle des parties à s'éliminer totalement. L'Europe, sous l'impulsion d'un gigantesque plan d'aide américain, le plan Marshall, a rapidement et naturellement opté pour un modèle technique et économique imitant le modèle américain : une agriculture à haute productivité, motorisée grâce à l'abondance du pétrole, utilisant des semences sélectionnées, des engrais chimiques azotés, toujours grâce au pétrole, avec des financements à crédit, des prix agricoles garantis, des achats par l'État... Deux décennies plus tard, le Japon, puis l'Inde et, enfin, presque tous les pays d'Asie ont connu le déploiement de la même politique qui a pris le nom de « Révolution verte ». Toujours avec le financement des États-Unis, elle était bâtie sur les mêmes principes que l'aide Marshall avec, en plus, de très grands investissements dans l'irrigation. Dès 1957, Cuba avait montré qu'une révolution armée due à une grande iniquité sociale pouvait également déboucher

sur l'avènement d'un régime communiste. La Révolution verte devait donc aussi être proposée aux petits agriculteurs d'Amérique latine. La décennie suivante, l'Amérique latine suivra et donnera de la terre aux « sans-terre », pour moderniser les petites exploitations sur les mêmes principes d'intensification, et les faire entrer dans l'économie de marché, tout ceci dans le cadre de « l'alliance pour le progrès ». Les investissements massifs des États-Unis dans cette technologie de Révolution verte en Asie, en Amérique latine, et enfin en Afrique, ont été une décision géopolitique majeure en période de guerre froide clairement destinée à éviter le développement de l'emprise communiste dans les pays pauvres<sup>1</sup> appelés alors le « tiers-monde ».

Une mutation agricole capitale s'est donc produite et a conduit à l'intensification de la production agricole principalement à base d'amélioration génétique, d'intrants chimiques et de crédit. Dans les pays industriels, s'y sont ajoutées la motorisation et la mécanisation. Les hausses de production ont été rapides et importantes. En peu de temps, presque tous les pays ayant suivi ce modèle sont sortis des pénuries, beaucoup sont devenus autosuffisants, voire même exportateurs de leurs excédents. Ce succès d'intensification massive en facteurs de production industriels semble avoir réduit fortement le rythme de colonisation de la biosphère car il permettait de produire beaucoup plus sans augmenter les surfaces déjà mises en culture. La Révolution verte a donc protégé la forêt tropicale d'un abattage rapide. Mais, en contrepartie, les régions devenues « chimiquement intensives » ont connu de plus en plus de problèmes environnementaux<sup>2</sup>.

---

1. Communication personnelle de Robert McNamara en 1996.

2. Pour une synthèse sur la Révolution verte, voir Griffon (dir.), « Succès et limites des révolutions vertes », *Actes du séminaire*, 6 septembre 1995, Montpellier, Cirad.

## LA BIOSPHÈRE EN DANGER

À LA FIN DU XX<sup>e</sup> SIÈCLE, MONTÉE D'UNE CRISE  
ENVIRONNEMENTALE GÉNÉRALE

Le modèle de la grande modernisation agricole de l'Europe et celui, équivalent, de la Révolution verte de l'Asie s'inspiraient de l'expérience nord-américaine et de celle des pays colonisés par l'Europe ayant de grandes exploitations : Australie, Rhodésie, Maghreb... La motorisation était permise par les bas prix et l'abondance du pétrole. L'utilisation d'engrais puis de produits phytosanitaires ne rencontrait pas de limites. En matière d'élevage, l'alimentation des bovins à partir de grains, et non plus uniquement d'herbe, ainsi que le recours systématique aux médicaments ont permis, de la même manière, d'accroître rapidement les performances.

Mais, dès le début des années 1970, ces modèles ont commencé à être contestés. La liste des griefs est longue. Pour les productions alimentaires, les critiques ont porté sur les risques de toxicité associés aux produits phytosanitaires (cancers, perturbations endocriniennes), les risques de pollutions des sols, des eaux et de l'atmosphère par les mêmes produits et quelquefois aussi les engrais, l'érosion des sols, leur tassement sous le poids des matériels et leur dégradation, les pertes de biodiversité, la contribution au changement climatique par les émanations d'oxyde d'azote, la déforestation massive pour produire des aliments destinés au bétail alors que l'excès de consommation de viande est condamné pour des raisons diététiques et médicales... Pour les productions animales, elles ont porté sur l'excès de médicaments et leur passage éventuel dans le corps humain, l'excès de cholestérol résultant de la consommation de viandes grasses, la présence de produits toxiques dans les aliments, le non-respect du bien-être animal, la contribution

à l'effet de serre par les émissions de gaz dues à la digestion chez les ruminants...

Au total, la biosphère continentale apparaît comme menacée sous deux angles : d'une part, la déforestation détruit rapidement des écosystèmes d'une grande richesse en matière d'espèces, d'autre part, l'agriculture dégrade fortement l'espace cultivé. Il en résulte une perspective de crise générale de la biosphère.

### LE PILOTAGE DE LA BIOSPHERE PAR LE MARCHÉ

Au XXI<sup>e</sup> siècle, la grande transformation de la biosphère sous l'influence de la déforestation, de l'intensification agricole et de la progression urbaine s'accélère. Par ailleurs, elle est permise par l'utilisation sans retenue du pétrole et des autres énergies. Cette transformation se traduit par l'explosion des transports. La mobilité générale des sociétés s'est accrue. Les villes et les conurbations créent des espaces nouveaux ayant à la fois des caractères urbains (l'habitat, la voirie) et des caractères ruraux (la production agricole, les jardins, les espaces verts)<sup>1</sup>. Ces nouveaux espaces connaissent une forte mobilité des biens et des personnes. Ils se caractérisent à la fois par une intégration économique autocentrée et par une intégration économique progressive dans l'économie internationale, au fur et à mesure que sont négociés des accords de libre-échange et abaissées les barrières douanières. Sauf abandon des politiques de libre-échange<sup>2</sup>, il se constitue donc un réseau

---

1. Voir p. 72.

2. Cet essai a été rédigé peu après l'élection, en 2016, d'un partisan résolu du protectionnisme à la présidence des États-Unis.

international intégré d'espaces « rurbains<sup>1</sup> » et d'hinterlands au sein duquel les transports internationaux permettent de distribuer des produits de provenances lointaines sur un même marché mondial unifié et réticulé.

Dans ce contexte, pour les produits agricoles, les espaces productifs qui ont de faibles coûts de production par unité de surface se révèlent compétitifs sur les marchés mondiaux. Les pays concernés accroissent leurs exportations soit en défrichant (cas de l'Amazonie pour produire et exporter en Asie), soit en intensifiant l'utilisation d'intrants chimiques (engrais, produits phytosanitaires) et de machines agricoles. Les pays dont l'agriculture est très intensive en intrants et en capital, et dont le coût de main-d'œuvre est élevé, sont bien évidemment moins compétitifs que ceux qui disposent de très grandes exploitations mécanisées bénéficiant d'effets d'échelle, et de faibles coûts de main-d'œuvre. Ainsi, les agriculteurs des pays d'Europe de l'Ouest, moins compétitifs que ceux du Brésil, de l'Argentine ou de l'Australie, tendent à perdre des places dans le classement en termes d'avantages comparatifs et sont à la recherche d'autres modèles techniques et organisationnels pour restaurer leur agriculture.

Cette compétition entre les agricultures nationales, sur les prix et sur la qualité, gouverne désormais l'évolution de toutes les agricultures. Le groupe des agricultures à haute compétitivité a dominé les négociations commerciales internationales depuis les années 1980 et obtenu une baisse générale des tarifs douaniers agricoles. L'Europe, comme on vient de le voir, est moins compétitive et fait survivre ses agricultures avec des subventions. Les agricultures pauvres

---

1. Selon la qualification de la DATAR dans la décennie 1970 définissant l'intégration des villages dans l'hinterland des grandes villes en progression rapide.

sont faiblement productives et souvent concurrencées sur leurs marchés urbains locaux par des importations. Certes, les quelques lignes qui précèdent sont très loin de pouvoir décrire, autrement que par la caricature, le fonctionnement de l'économie mondiale agricole. Mais il est clair que la constitution progressive d'un espace mondial sans tarifs douaniers, ou avec de faibles tarifs pour les produits agricoles, est la force qui a tendanciellement gouverné l'évolution de l'agriculture et donc de la biosphère. En 2017 s'est posée la question du choix des régimes d'échanges internationaux à l'initiative des États-Unis.

### UNE DYNAMIQUE D'EFFONDREMENT ?

Si l'on observe l'évolution en cours de la biosphère depuis nos origines, en essayant d'en saisir la dynamique « en accéléré », que distingue-t-on ? À partir du néolithique, on voit une population humaine, prédatrice des ressources, qui se répand dans le monde à partir de l'Afrique. Une deuxième vague venue d'Afrique a ensuite prospéré et s'est concentrée un temps en Mésopotamie où elle a commencé à transformer les écosystèmes en profondeur. Le même phénomène s'est produit dans d'autres régions. Une partie des populations moyen-orientales a migré vers l'est et a colonisé l'Inde actuelle jusqu'à la mer de Chine, toujours en modifiant en profondeur les écosystèmes. Puis une branche a poursuivi vers l'Asie du Sud-Est et l'Océanie. Une autre branche, franchissant le détroit de Béring, a colonisé les Amériques, du nord au sud. Partant aussi de Mésopotamie, une autre part de la population a suivi le soleil couchant, colonisant le pourtour de la Méditerranée ou entrant en Europe de l'Ouest par le Danube. Une dernière fraction a occupé progressivement toute l'Afrique.

La densification des populations tout au long de l'histoire et les accidents et effondrements subis par certaines civilisations (dégradation de l'environnement, famines, guerres, pandémies) ont contribué à redistribuer en permanence les peuplements humains. Les hautes densités et les crises européennes à partir du XVI<sup>e</sup> siècle ont débouché sur la conquête démographique des Amériques et l'effondrement de sa population indigène, principalement en raison de la diffusion de la variole dans ce « nouveau monde » sans défenses immunitaires. Les populations natives ne possédaient pas les anticorps nécessaires car elles n'avaient jamais été exposées à cette pandémie. Les hautes densités européennes ont aussi débouché sur la colonisation partielle de l'Afrique et marginale de l'Asie.

Aujourd'hui, les migrations sont plus diffuses, plus nombreuses et liées à de nouvelles causes de nature économique. Mais un double mouvement de distribution des populations continue à transformer la biosphère : d'une part, la densification et l'expansion d'immenses espaces urbains, d'autre part la colonisation des derniers espaces de la biosphère où les sociétés humaines étaient soit absentes, soit en très faible effectif : l'Amazonie, le bassin du Congo, les forêts d'Asie du Sud-Est. Sans oublier la conquête, pour des motifs énergétiques, des espaces arctiques et antarctiques.

Au final, la double progression, à la fois du domaine urbain et des surfaces cultivées, liée à l'évolution démographique se faisant au détriment de l'environnement, et les solutions tardant à se mettre en place, on peut se demander si nous ne sommes pas dans une logique générale de dégradation, voire d'effondrement.

La chronologie commune de la biosphère et de l'agriculture vaut la peine d'être connue. On comprend l'extraordinaire inertie historique et géographique des phénomènes en cours.

## ÉCOLOGIE INTENSIVE

On prend la mesure des responsabilités des sociétés, et l'on débouche sur une interrogation vitale : la vague destructrice des écosystèmes par la population humaine, qui est héritée depuis ses origines, pourra-t-elle être maîtrisée à temps et éviter « l'effondrement » de la biosphère comme l'observe Jared Diamond<sup>1</sup> dont la parole a, semble-t-il, été écoutée internationalement ? Ou bien peut-on considérer qu'il n'y a pas lieu d'envisager des scénarios dramatiques et faire confiance à la capacité des sociétés humaines à trouver des solutions ?

---

1. Jared Diamond, *Effondrement*, NRF essais, 2005.

### CHAPITRE III

## LA PRESSION DE LA POPULATION MONDIALE SUR LA BIOSPHERE

La perspective démographique mondiale est celle d'une grande vague dont on a du mal à évaluer le volume maximal et l'éventuel reflux. La capacité des écosystèmes et de leurs ressources à faire face à l'accroissement de consommation que suppose cette explosion démographique n'est pas une question nouvelle. L'un des premiers grands débats sur l'avenir de la planète a porté sur la capacité à long terme de nourrir de manière satisfaisante la population mondiale. Abandonnée pendant plus de trois décennies, cette question est revenue sur le devant de la scène des prospectivistes. Depuis 2015, elle rebondit encore mais avec de nouveaux enjeux : ceux d'une utilisation importante de la biomasse pour produire de l'énergie et des biomatériaux. Qu'en sera-t-il alors de la pression des besoins sur les écosystèmes et les ressources ?

## ÉCOLOGIE INTENSIVE

### LA PROSPECTIVE DÉMOGRAPHIQUE DANS L'INTERROGATION

Au tout début du XXI<sup>e</sup> siècle, les différentes hypothèses d'évolution de la population humaine étaient relativement rassurantes. Elles tablaient sur la confirmation d'un ralentissement. On pouvait espérer, dans une hypothèse moyenne, que la population plafonnerait à un peu plus de 9 milliards d'habitants. C'est ce que proposaient les démographes des Nations unies. Beaucoup d'auteurs et de commentateurs ont repris ces chiffres. Ils étaient fondés sur la généralisation rapide de la « transition démographique », maintes fois observée. On la résume généralement ainsi : partant d'un taux de natalité et d'un taux de mortalité élevés, les sociétés – grâce notamment à la médecine – connaissent une diminution du taux de mortalité, ce qui accroît la population totale. Se produit alors une baisse de la natalité qui réduit le rythme de progression de la population totale. Puis la transition s'achève avec l'établissement de taux de mortalité et de taux de natalité tous les deux bas, ce qui entraîne aussi un faible accroissement naturel. On aboutit alors à un plafonnement de la population totale. La courbe d'évolution de la population s'illustre par un profil en S. Les sociétés semblent toutes connaître ce processus, à un moment ou un autre de leur développement.

Les variables qui commandent le rythme de cette transition sont connues mais leur influence reste peu prévisible : la généralisation de la médecine améliorant l'état de santé (antibiotiques, prévention, meilleure nutrition des enfants...), l'éducation des jeunes générations et l'existence du planning familial, la réduction de la pauvreté et l'émergence de classes moyennes ayant de nouveaux comportements en matière de naissances, le montant des dépenses relatives aux

enfants dans les budgets familiaux, les politiques publiques natalistes ou de contrôle des naissances... Aujourd'hui, la variabilité entre pays est sans doute plus importante que ce qui avait été envisagé antérieurement : certains pays du Moyen-Orient ont connu une transition plus rapide que prévu alors que certains pays africains semblent avoir une transition très lente. Au final, la prévision de population humaine totale à la moitié du siècle semble moins stable que l'estimation prévue. Cette instabilité est notamment liée à la lenteur de la transition en Afrique subsaharienne qui pourrait ainsi être à l'origine d'une progression démographique tardive et importante faisant plafonner la population autour de 11 milliards vers la fin du siècle.

La répartition géographique de la population mondiale pourrait aussi évoluer d'une manière qui peut apparaître relativement surprenante. En termes très résumés, l'Afrique sera le continent de l'accroissement le plus fort ; l'Inde poursuivra sa croissance alors que la Chine plafonnerait (si la natalité ne change pas, ce qui n'est qu'une hypothèse car la politique chinoise de l'enfant unique peut être modifiée<sup>1</sup>). On considère comme une certitude le fait que la population va continuer à se concentrer dans les villes et les très grandes conurbations. La colonisation des terres vierges des forêts tropicales va aussi déplacer des populations, mais en faibles effectifs si elle ne concerne que de très grandes exploitations mécanisées, ce qui est le modèle dominant chez beaucoup d'élites politiques (rares sont ceux qui rêvent d'inventer un modèle d'agriculture familiale durable dans un paysage forestier adapté). Pourtant, l'entrée dans la forêt

---

1. Une étude publiée dans *Science*, le 10 janvier 2013, révèle que la politique de l'enfant unique a rendu les Chinois « plus pessimistes, moins compétitifs et moins consciencieux » (résumé dans *Le Monde* par H. Thibault), conséquences non anticipées qui pourraient induire des changements également imprévus.

pourrait s'accroître dans les régions forestières proches de zones à forte densité de population comme cela existe en Asie (colonisation indonésienne des îles) et dans l'Afrique des hautes terres. Des migrations climatiques liées à la montée des eaux sont également probables. On parle peu de l'hypothèse de la mise en culture de terres nouvelles, en Sibérie par exemple, avec des migrants venus de Chine comme c'est dès à présent le cas. Et surtout, il existe une grande incertitude sur la localisation des populations africaines qui se caractérise par une grande hétérogénéité géographique. À l'occasion de guerres ou de troubles civils, des populations issues de zones à forte densité pourraient migrer massivement vers des zones à densité plus faible, comme ce fut le cas au Rwanda vers l'est du Congo en 1994. L'Afrique, comme le Maghreb et le Moyen-Orient, pourrait aussi constituer une source de migration permanente vers l'Europe pour des raisons économiques et géopolitiques, même si l'Europe tend à se fermer à cette perspective. La proximité géographique d'une Europe à la démographie stagnante et d'une Afrique en explosion démographique rend plausible l'hypothèse d'importants mouvements Sud-Nord. Au total, il est difficile de bâtir des scénarios sur l'évolution de la localisation des populations et la pression sur la biosphère qui en résulterait. Il reste que la rapidité et le volume de la progression africaine vers plus de 3 milliards de personnes, et l'impact potentiel sur les écosystèmes, sont très inquiétants.

UNE QUESTION RÉCURRENTÉ : LA CAPACITÉ  
DE LA BIOSPHÈRE À NOURRIR LE MONDE

La croissance démographique entraîne une augmentation des besoins alimentaires qui exige d'accroître les surfaces cultivées et surtout les rendements par unité de surface. Les transformations des écosystèmes qui en résultent sont considérables. L'empreinte de la population sur les paysages devrait être accrue.

Les besoins alimentaires fondamentaux de l'humanité augmentent plus que proportionnellement aux effectifs démographiques. Depuis environ un demi-siècle, près d'un milliard de personnes sont sous-alimentées et la satisfaction de leurs besoins fondamentaux exige un accroissement de la production. Mais, au commencement de ce même siècle, on peut aussi dénombrer environ un milliard de suralimentés qui devraient, pour leur bien, changer significativement de régime alimentaire. Par ailleurs, les pays connaissant une croissance rapide accèdent à des régimes plus carnés qui demandent un accroissement de la production de nourriture pour bétail. Ce sont les viandes de volaille et de porc qui sont principalement sollicitées, mais aussi la viande de bœuf. Toutes sont produites presque uniquement à partir de maïs et de soja. L'Asie a tenté de cultiver ces plantes pour le bétail mais la grande place du riz dans les surfaces agricoles, aliment de base des humains, limite les possibilités de diversification. Ce sont donc le Brésil et l'Argentine qui assurent principalement l'approvisionnement des élevages asiatiques en céréales et légumineuses. Au total, l'accroissement de la demande effective totale, y compris en alimentation du bétail, est plus rapide que l'accroissement démographique.

L'évolution des régimes vers un contenu plus carné démultiplie donc les besoins en surface agricole pour produire le maïs et le soja nécessaires. Les proportions deviennent

inquiétantes car près de la moitié des surfaces cultivées sont déjà consacrées à nourrir des animaux qui, à leur tour, nourrissent les humains. Il y a donc une hypertrophie de la chaîne alimentaire [maïs + soja] → [volailles + porcs + bovins] → [consommation humaine] qui se traduit par une accélération historique des défrichages. Cette évolution n'est pas viable car elle ampute la biosphère de réserves importantes de biodiversité, notamment dans les forêts tropicales, elle fragilise les sols et elle détériore le climat. En outre, la généralisation d'un régime fortement carné altère l'état de santé des populations concernées. Les viandes grasses contribuent en effet à accroître la prévalence de maladies cardiovasculaires.

Ce macrophénomène écologique qu'est l'évolution de *Homo sapiens* vers un régime carné<sup>1</sup> pose le problème d'un risque d'insuffisance des ressources alimentaires, principalement pour les populations pauvres. Selon plusieurs scénarios, les solutions viables de concordance de la production et des besoins alimentaires humains exigeaient d'abandonner les régimes très carnés pour d'autres laissant plus de place aux légumes et aux protéines végétales<sup>2</sup>.

Il faut aussi signaler que certains régimes et techniques alimentaires, ou modes de cuisson traditionnels, sont de moins en moins justifiés dans le contexte technologique actuel. Par exemple, l'usage systématique de la friture se comprenait lorsque les risques de contamination alimentaire étaient élevés : la température de l'huile bouillante stérilise les aliments infectés. De surcroît, l'utilisation actuelle de

---

1. Tout comme les premiers chasseurs-cueilleurs, à la différence qu'ils n'étaient que quelques centaines de milliers alors que nous serons plus de 10 milliards.

2. Voir notamment *Agrimonde*, Cirad INRA, Quae, 2010 [<http://www.inra.fr/Chercheurs-etudiants/Securite-alimentaire-mondiale/Tous-les-dossiers/Agrimonde-nourrir-le-monde-en-2050>].

l'huile de palme, à grande échelle, représente une menace pour les forêts tropicales humides.

LES DÉTÉRIORATIONS  
DE LA BIOSPHERE CONTINENTALE

Les sociétés humaines sont-elles à la source de ces détériorations ? L'alimentation et les autres usages habituels de la biosphère (coton pour les textiles, bois de feu, matériaux de construction...) se traduisent par une sollicitation de plus en plus grande de ses capacités de production. Cette sollicitation prend quatre formes principales : l'extension de la surface cultivée au détriment de la forêt, l'utilisation plus intensive des terres déjà exploitées, les pollutions agricoles par excès d'apports d'intrants, et la pauvreté des populations qui les accule à une utilisation sans renouvellement des ressources.

La déforestation est peut-être la cause la plus grave de détérioration de la biosphère. On sait depuis plus de deux mille ans – Platon<sup>1</sup> le signalait déjà –, à partir de l'exemple de la Grèce antique, que la déforestation induit le ruissellement des eaux au détriment de leur infiltration et de l'alimentation des nappes phréatiques. On sait également qu'elle favorise l'assèchement des horizons supérieurs des terres, qu'elle réduit la fertilité organique des sols et contribue à les fragiliser, qu'elle favorise donc l'érosion et par conséquent la perte de matière organique et d'éléments fertilisants, et *in fine* qu'elle risque, dans les zones de pente, de dégrader les sols de manière irréversible. Les sols, qui demandent

---

1. Platon, *Critias*, texte établi par Émile Chambry, Garnier Flammarion, 1969. Cité par Griffon dans *Qu'est-ce que l'agriculture écologiquement intensive ?*, p. 161.

des millénaires d'élaboration, peuvent ainsi disparaître en quelques décennies et souvent moins. Or, la déforestation induite par l'agriculture est rapide dans plusieurs régions du monde : l'Amazonie, le bassin du Congo et l'Asie du Sud-Est. Elle pourrait s'accélérer aussi en Sibérie.

La deuxième cause est l'utilisation plus intensive des terres cultivées. Là aussi se déroule une évolution dangereuse. Le travail du substrat en profondeur réduit la quantité de matière organique, réduit l'activité biologique et, partant, n'assure plus une bonne structuration des sols, lesquels subissent donc souvent un tassement encore accentué par l'utilisation de matériels lourds. Pour lutter contre l'induration des sols, il faut des matériels plus puissants, donc plus d'énergie, d'où une escalade à la puissance des tracteurs. Pour compenser les pertes de matière organique, il faut plus d'engrais. La dégradation des sols et leur entretien de compensation par des moyens mécaniques coûtent donc de plus en plus cher.

La troisième cause recouvre l'ensemble des pollutions agricoles. La généralisation de certains herbicides pose des problèmes de toxicité pour les opérateurs. Par ailleurs, des plantes résistantes à ces herbicides apparaissent par mutations. La culture de plantes génétiquement modifiées pour résister aux herbicides – ce qui permet d'éliminer toutes les herbes indésirables sans tuer les plantes OGM – incite par nature à utiliser plus d'herbicides, en particulier le glyphosate dont la toxicité est débattue. D'autres produits phytosanitaires, comme des insecticides, sont également toxiques, particulièrement pour les pollinisateurs. Les fongicides, destinés à lutter contre les maladies dues aux champignons microscopiques, induisent en permanence des résistances de ces organismes aux mutations incroyablement rapides. Depuis un demi-siècle, nombre de familles de produits insecticides se sont succédé et ont été

interdites pour des raisons de toxicité : organochlorés, organophosphorés, carbamates, pyréthriinoïdes, nicotinoïdes, néonicotinoïdes.

Enfin, les émanations d'oxyde d'azote, dues aux engrais nitriques, et de méthane, dues aux animaux ruminants<sup>1</sup>, contribuent de manière significative à l'effet de serre, lequel a en retour des conséquences négatives sur la production agricole et sur la biodiversité. De ces difficultés rencontrées par les produits issus de synthèses chimiques est née une grande hostilité de l'opinion publique.

Une quatrième cause est liée à la pauvreté d'une proportion importante des populations agricoles dans le monde. Parmi le milliard des mal nourris, les trois quarts sont agriculteurs, soit près du quart de la population agricole dans le monde qui compte environ 2,7 milliards de personnes. Au sein de celle-ci, la petite agriculture de subsistance représente plus de 2 milliards de personnes. En termes de population, l'agriculture se trouve donc très fréquemment entre les mains de pauvres, voire de très pauvres, vivant le plus souvent sur des terres de faible qualité. En termes de surfaces, ce sont les grandes exploitations qui sont majoritaires. Les pauvres disposent de très peu de moyens pour entretenir la fertilité de leurs lopins. Leur production est dès lors limitée. Dans les nombreuses régions où la population agricole est dense, les terres sont fortement sollicitées et se dégradent. On peut citer les zones collinaires du Maghreb, les secteurs à haute densité du Sahel, les collines du Rwanda, les îles surpeuplées comme Haïti, les montagnes d'Amérique centrale aux pentes très cultivées... Ce sont à la fois des lieux de pauvreté et de croissance démographique sur un

---

1. Les ruminants sont des animaux qui, comme les bovins, ont la capacité de consommer l'herbe qui est digérée dans un système stomacal à quatre étages, en particulier avec intervention de bactéries méthanogènes.

## ÉCOLOGIE INTENSIVE

espace limité (une crise malthusienne), lesquels aboutissent à la dégradation rapide des agroécosystèmes.

Ces quatre causes atteignent la biosphère sous quatre modalités différentes. Mais, dans chacun des cas, la dégradation de la biosphère résulte de l'action des sociétés.

## CHAPITRE IV

### LA BIOSPHÈRE : TROP PETITE POUR LES SOCIÉTÉS HUMAINES ?

Tout semble se passer comme si l'espèce humaine « qui sait et qui est sage », ainsi que l'indique le terme « *sapiens* », n'avait pas conscience qu'elle risque d'endommager gravement, voire de détruire son propre milieu de vie. Comme si elle n'avait pas conscience qu'elle abat l'arbre de l'évolution dont elle fait pourtant partie. Cette interrogation est récente à l'échelle de notre histoire. Et à peine vient-elle d'être formulée que se profilent de nouveaux usages de notre substrat vital, dont les conséquences risquent d'être gigantesques. La biosphère pourra-t-elle tout faire ?

#### LA BIOSPHÈRE SOLLICITÉE POUR DE NOUVEAUX USAGES : LA BIOÉNERGIE ET LES BIOMATÉRIAUX

La nécessité de réduire les émissions de dioxyde de carbone devrait logiquement conduire à diminuer notre consommation de pétrole, mais seulement si une taxation mondiale des émissions de CO<sub>2</sub> est mise en place et si les produits de ces taxes sont utilisés pour inciter les compagnies pétrolières à investir elles-mêmes dans les énergies alternatives afin d'en devenir les principales productrices ;

sinon, tant qu'il restera du pétrole et du gaz, il est difficile d'imaginer quelles forces seraient capables de limiter l'activité de ces entreprises. La réduction de l'utilisation du pétrole pourrait provenir aussi de l'épuisement des ressources, d'abord le pétrole léger, puis les pétroles difficiles à extraire, et enfin le pétrole de schiste. Mais cet épuisement n'est pas encore si proche et l'échéance reste même suffisamment lointaine pour que les scénarios d'emballement de la hausse des températures, dus à l'importante exploitation pétrolière, soient tout à fait crédibles. Pourtant, d'une manière ou d'une autre, les entreprises devraient finir par admettre la nécessité de contribuer au contrôle de l'élévation de la température de l'atmosphère terrestre, donc de réduire l'exploitation pétrolière.

Parmi les énergies de substitution au pétrole, l'utilisation de la biomasse est envisagée à plusieurs titres. Tout d'abord, par la combustion directe et traditionnelle du bois mais dans des proportions limitées au renouvellement de la ressource afin que le carbone émis en brûlant le bois soit compensé par le carbone fixé par la photosynthèse. Mais le bois de feu est l'énergie des pauvres et l'on ne peut les inciter à réduire leur consommation qu'en leur proposant des solutions de substitution à faible coût. Ensuite, par l'utilisation des ressources en lignocellulose issues de cultures dédiées à cette fonction (comme le miscanthus), de résidus de culture ou encore de déchets biologiques. Il faut cependant respecter une condition importante : restituer au sol produisant la biomasse les quantités de carbone nécessaires à l'entretien de la matière organique qui lui assure une bonne structure et une bonne fertilité. Entretenir les sols en leur intégrant les résidus de culture est une priorité plus importante, car plus vitale, que d'utiliser ces résidus pour produire de l'énergie. La biomasse est également susceptible de produire de l'énergie sous forme

d'alcool liquide facilement utilisable par les automobiles et les divers transports. Toutefois, si les conditions de production exigent elles-mêmes beaucoup d'énergie, l'opération est peu (ou pas) utile. Il est donc risqué de solliciter fortement la biosphère pour produire du carburant liquide. La photosynthèse serait excessivement utilisée pour produire directement de l'énergie et risquerait ainsi de se transformer en une sorte de grande machinerie de fabrication de biocarburants alors que sa fonction première est de convertir l'énergie solaire en matière alimentaire.

À ce nouvel usage potentiellement important s'ajoute la production de biomatériaux. Le pétrole alimente la création de plastiques. À terme, sa raréfaction progressive obligera la chimie à trouver des alternatives. Là encore, la biomasse constitue une ressource de substitution susceptible d'alimenter des voies de synthèse de polymères relativement directes.

En résumé, la généralisation d'un régime alimentaire carné qui exige de très grandes surfaces pour alimenter le bétail, le remplacement du carburant issu du pétrole par de la biomasse et l'utilisation de cette dernière pour fabriquer des biomatériaux peuvent-ils être compatibles avec la capacité de la biosphère à nourrir notre espèce ? Pour répondre, il faut mesurer les effets des mécanismes de détérioration qui en résulteraient car la biosphère serait profondément transformée.

#### LA VOIE PRINCIPALE : L'ÉRADICATION RADICALE D'ÉCOSYSTÈMES

Depuis que les sociétés ont découvert le défrichage par abattis-brûlis, il y a environ 10 000 ans, elles n'ont pas cessé de le pratiquer. Cet usage éradique tout simplement les

écosystèmes forestiers anciens. La forêt primaire est constituée d'une seule strate de grands arbres, lesquels captent une partie importante de la lumière, ce qui ne permet pas l'existence d'une strate herbacée. Le sol est donc seulement recouvert d'une litière de feuilles. La hache et le feu des défricheurs d'autrefois, la tronçonneuse aujourd'hui, font table rase des vieux arbres et laissent un sol nu dans lequel on peut directement semer des céréales ou des oléagineux. Dans cette pratique, le sol est considéré avant tout comme un substrat, non comme un système vivant dont il faudrait renouveler les fonctionnalités. C'est une solution radicale, très coûteuse en énergie, et qui fait écho à la représentation de la nature massivement produite à travers le temps par les sociétés et qui repose sur un affrontement. En détruisant la forêt, les sociétés humaines établissent pleinement leur maîtrise complète du milieu.

Pourtant, une autre voie est possible pour l'agriculture, celle de la substitution progressive, au sein de la forêt, d'espèces arborescentes « non utiles » par des espèces « utiles » : arbres à fruits, arbres fourragers, arbres à pirogues, arbres pour les constructions, arbres précieux comme épargne à long terme... De cette manière, la forêt reste un écosystème forestier, avec sa strate arborescente et son sol à litière, mais il est cultivé sous la forme d'une foresterie profitable aux sociétés. La forêt peut aussi être gérée de manière à présenter des strates de végétation arborescente, arbustive et herbacée afin d'élargir les possibilités de diversification des espèces. C'est le cas, par exemple, en Afrique de l'Ouest où l'on trouve une combinaison de grands arbres, de strate moyenne café et cacao, et de strate plantes à tubercules et plantains. Le système productif demeure alors proche de l'écosystème initial ; il reste assez directement régi par les lois de base de l'écologie qui permettent sa durabilité. Les sociétés qui ont ainsi « domestiqué » les écosystèmes forestiers

(en Afrique centrale et en Indonésie) ne s'affrontent pas à eux mais, au contraire, les respectent. Certes, la productivité par hectare est faible et incompatible avec de fortes densités de population. Cependant, la recherche ne s'y est pas encore intéressée et n'a pas essayé d'accroître les rendements en imaginant des formules d'agroforesterie combinant efficacement les différentes strates de végétation.

La déforestation, au contraire, change radicalement l'écosystème. À la place de la forêt, on installe une culture qui occupe la place de la strate herbacée et qui est immédiatement concurrencée par les espèces d'adventices locales, inévitablement vues comme des ennemies des cultures. Les sociétés sont ainsi amenées à s'affronter aux « mauvaises herbes », ce qui est très coûteux en temps et en énergie car il faut arracher ces herbes en retournant le sol. C'est le prix à payer pour continuer à cultiver. Ce prix étant trop élevé en termes de travail humain, les sociétés qui pratiquent l'abattis-brûlis ont toutes été conduites à abandonner rapidement les espaces envahis et à défricher plus loin pour profiter du sol nu laissé par la forêt calcinée. La répétition de cette pratique, année après année, et de proche en proche, a défini une agriculture itinérante. Tant que les sociétés n'ont pas eu besoin de beaucoup d'espace, la forêt a réussi à « cicatriser » et à retrouver en trois décennies son aspect et ses fonctionnalités initiales<sup>1</sup>. C'est encore le cas en Amazonie. Mais, avec la croissance démographique, les surfaces déforestées s'étendent, la forêt est mitée par des clairières grandes et nombreuses. La saturation de l'espace conduit les sociétés à revenir défricher au même endroit avant que les trois décennies de cicatrisation soient écoulées, la forêt n'a plus le temps de rétablir son paysage initial ni

---

1. Voir Marcel Mazoyer & Laurence Roudart, *Histoire des agricultures du monde*, Seuil, 1997.

son régime de fertilité antérieur qui aboutissait à un sol riche de litière. Ce retour accéléré sur les mêmes emplacements oblige à cultiver des sols de moins en moins riches et, surtout, progressivement envahis par la strate herbacée. Les sociétés sont ainsi condamnées à un important surcroît de travail pour maîtriser cette strate. Les lois naturelles qui régissaient la fertilité du milieu ont disparu avec la régression de la forêt en tant qu'écosystème<sup>1</sup>. Aujourd'hui, le phénomène est toujours plus brutal : la forêt est incendiée et dessouchée pour être cultivée continûment, et la strate herbacée est maîtrisée par de gros matériels qui travaillent le sol en utilisant intensivement de l'énergie, ou par des herbicides. Au Sénégal, en Casamance, cette pratique a stérilisé et endurci les sols<sup>2</sup> durant l'entre-deux-guerres.

En termes écologiques, la substitution d'un écosystème forestier par un autre signifie avant tout la perte d'un milieu qui résultait de l'évolution biologique et écologique naturelle, et qui était bien adapté aux conditions climatiques et aux conditions de substrat. Cet écosystème était donc susceptible de bénéficier d'un rendement général en biomasse satisfaisant. Le nouvel écosystème, bien que bénéficiant des mêmes ressources (lumière solaire, eau, température), tendra tout autant à amplifier la biomasse de remplacement, mais celle-ci sera en proie à une compétition aiguë entre les espèces locales – grâce aux graines dispersées naturellement – et les espèces cultivées introduites. Ces dernières ne peuvent qu'être concurrencées très sévèrement par les plantes autochtones qui sont mieux adaptées.

Cette substitution signifie également la perte d'un grand nombre d'espèces animales, végétales et sans doute

1. Pour une description référencée, voir Mazoyer & Roudart, *op. cit.*

2. C'est l'exemple célèbre de la Compagnie générale des oléagineux tropicaux.

microbiennes qui faisaient partie de l'écosystème antérieur. En effet, tout écosystème local est aussi un ensemble de relations entre différentes composantes : entre animaux et plantes hôtes, entre plantes elles-mêmes (compétition, coopération), entre animaux (prédation, parasitisme, commensalisme, synergie, symbiose)... Ces relations sont faites de signaux moléculaires de reconnaissance et d'interaction. Chaque écosystème est donc une construction complexe unique, où chaque être dispose d'un code génétique, élaboré à travers le temps, et qui permet de mettre en œuvre une sorte de « dialogue » moléculaire entre espèces. Chaque écosystème local est donc une construction susceptible de contenir des informations utiles pour créer de nouvelles techniques adaptées au cadre local. La perte de ces écosystèmes et de toutes ces informations, que nous n'avons pas encore su décrypter, est en partie irréversible. À l'échelle d'un massif forestier comme l'Amazonie, la déforestation est une véritable amputation de l'aventure de la vie sur la planète.

### LA VOIE DE LA DÉGRADATION LENTE

Le non-renouvellement des capacités des écosystèmes et la perte d'options seraient une lente voie de dégradation. Comme nous l'avons vu, tout écosystème peut être considéré comme un système thermodynamiquement ouvert traversé par de l'énergie et qui produit de l'entropie. Lors de son passage, cette énergie est convertie en biomasse : elle est cristallisée en molécules hydrocarbonées qui entrent dans le métabolisme des êtres vivants de l'écosystème. Un écosystème peut fonctionner en régime d'accumulation de biomasse tant que son fonctionnement n'a pas atteint son climax. Il peut être, à l'inverse, en état de dégradation lente

et même aller vers l'effondrement, suite à une exploitation continue et systématique, et sans précautions de renouvellement. Par exemple, un sol peut s'enrichir en carbone, sous forme de matière organique, ce qui accroît ses capacités de production de biomasse, mais le contraire, c'est-à-dire un déstockage qui réduit les mêmes capacités, est également possible.

Le déstockage de capacités se produit quand un agro-écosystème local exporte plus d'éléments qu'il n'en importe. Le bilan entrées-sorties devient alors négatif. Par exemple, une récolte de céréales exporte du phosphore hors de l'écosystème local. Celui-ci est un constituant des graines et part avec elles pour nourrir des populations. Les pailles et rafles contenant du phosphore, qui restent par terre après la moisson, sont éventuellement restituées au sol mais, sans un apport externe pour compenser la quantité de phosphore exporté, un régime déficitaire s'installe. Lors de la campagne suivante, le stock de phosphore du sol sera à nouveau sollicité par les céréales et diminuera d'autant. Dans un tel cas, sur longue période, la ressource non renouvelée s'épuise car il est très rare que le sol ait les réserves de phosphore nécessaires. Ce phénomène concerne aussi tous les autres éléments nutritifs des plantes. Leur non-renouvellement fait baisser les rendements, décapitalise le stock de fertilité des sols et induit la dégradation de ces derniers. La jachère, c'est-à-dire le repos de la terre pendant quelques années, est destinée à recapitaliser des états de fertilité. Mais, lorsque la population humaine qui vit d'un territoire se trouve en situation de pénurie alimentaire permanente, elle cultive un maximum de surface et, si l'espace total est limité, la seule solution est de réduire la durée de la jachère, ce qui restreint la reconstitution de la fertilité. On entre alors dans une trajectoire cyclique de dégradation qui va vers l'effondrement de l'agroécosystème sol. Généralement, la

lenteur de ce phénomène empêche la prise de conscience de l'urgence à renouveler constamment la fertilité grâce à des apports externes.

Le mécanisme est équivalent en ce qui concerne le non-renouvellement des stocks d'eau. Dans les régions agricoles, les cultures se font encore souvent sur des sols nus ne retenant guère les eaux de pluie. Il en résulte une limitation de l'infiltration et de la réalimentation des stocks dans les nappes phréatiques et, donc, une limitation des ressources en eau pour les cultures. Le régime de renouvellement du circuit n'a pas été entretenu.

Ce mécanisme de lente déficience de renouvellement des ressources est très répandu dans l'agriculture de nombreuses régions du monde. Il aboutit notamment à l'assèchement des sols, à la dégradation de leur biologie, à la diminution de leur fertilité et à la limitation de la production de biomasse. Cette limitation, à son tour, réduit les restitutions aux sols, ce qui réduit à nouveau leur fertilité et altère leur structure. Cette boucle négative mène à un effondrement.

### LES IMPASSES ET LES LIMITES DE LA GÉOSPHERE

Beaucoup de ressources de la biosphère sont renouvelables, mais pas toutes, ce qui pose un problème. C'est principalement le cas du phosphate qui est la source du phosphore utile à l'agriculture et dont les gisements sont, semble-t-il, tous connus et par nature limités. Le phosphore est l'un des constituants essentiels de la vie végétale car il intervient dans le métabolisme énergétique et il est présent dans les acides nucléiques, ainsi que dans les membranes cellulaires. Dans le monde animal, il se trouve en quantité importante dans le cerveau. Il limite notablement

la croissance d'un organisme en cas de carence. Son rôle est donc capital. Biologiquement, nous sommes particulièrement dépendants du phosphore. Or, depuis une vingtaine d'années, des scientifiques s'interrogent sur les réserves géologiques de phosphate. Certains annoncent une pénurie mondiale dans quelques décennies, et d'autres, au cours du prochain siècle. La question est suffisamment importante pour que des estimations aient été réalisées avec soin. Les résultats – fort difficiles d'accès en raison des enjeux géopolitiques – semblent confirmer la nécessité d'une mobilisation rapide pour trouver des solutions. Il faut recycler, limiter les pertes et modérer notre consommation. Des entreprises ont été jusqu'à imaginer des techniques pour récupérer le phosphore contenu dans les urines urbaines (par exemple dans les latrines des grands stades de football), ce qui représente une source importante. Plus généralement, tout le système des eaux usées des grandes cités est à l'étude afin d'élaborer un processus de récupération de cet élément minéral vital et de le réintroduire, de manière circulaire, dans les écosystèmes. S'il n'est pas capté dans ce circuit, le phosphore suivra le cours des rivières et disparaîtra dans les estuaires.

D'autres éléments, comme la potasse, pourraient se trouver, à long terme, dans des situations similaires. Les oligoéléments<sup>1</sup> ne créent pas d'inquiétude, bien qu'il ne faille pas négliger les besoins des générations futures à très long terme. Mais la toute première priorité est de s'intéresser aux ressources renouvelables car, dans bien des cas, la vitesse de sortie du circuit habituel est plus rapide que la vitesse de reconstitution. La menace, qui nous paraît encore lointaine pour ce qui concerne les ressources, est celle

---

1. Les oligoéléments sont des minéraux indispensables, mais en quantité infime, aux organismes.

## LA BIOSPHÈRE : TROP PETITE...

d'une limitation des capacités de croissance de la biomasse cultivée. Elle resserrerait les contraintes d'alimentation des sociétés humaines.

### LA TOXICITÉ DE CERTAINES INVENTIONS CHIMIQUES

L'agriculture biologique s'est déclarée hostile à toute intervention de nature chimique et n'a recours qu'à des produits naturels. Mais ce n'est pas parce qu'un produit est naturel qu'il serait exonéré de tout danger, et, réciproquement, ce n'est pas parce qu'un produit est issu d'une synthèse chimique qu'il est obligatoirement dangereux.

Tuer sélectivement les végétaux indésirables, les champignons et les bactéries responsables de maladies ainsi que les insectes et autres animaux qui nuisent à la production, grâce à des produits chimiques de synthèse, pose des problèmes de remplacement difficiles à résoudre. Dans ce domaine, la recherche publique a rapidement été dépassée par les firmes chimiques attirées par un marché potentiellement important. Les entreprises ont longtemps misé sur le hasard en essayant de très nombreuses molécules (sels arsenicaux, gaz de combat, acide sulfurique...) et en espérant que certaines se révéleraient efficaces. Elles ont assez vite essayé de copier les molécules toxiques naturelles comme la nicotine ou le pyrèthre. Mais beaucoup de ces familles de molécules prometteuses ont été retirées du marché en raison des risques de toxicité pour les humains et les animaux.

Il reste que de nombreuses molécules existantes sont porteuses de risques sanitaires. Ce sont les utilisateurs, agriculteurs et jardiniers, qui sont le plus exposés ainsi que les riverains. Mais on peut plus largement s'interroger sur les risques pour la biosphère tout entière. Plus les surfaces

de production sont limitées, pour éviter d'entamer la forêt, plus il faut maîtriser la concurrence des adventices et les attaques de maladies et de ravageurs. Plus on tend, par conséquent, à utiliser des produits phytosanitaires. Mais les effets sont importants et quelquefois cumulatifs, par exemple en ce qui concerne la concentration des molécules dans le sang humain. La généralisation des produits insecticides a considérablement diminué la pression des insectes en général, ce qui est l'effet recherché mais qui constitue, par ailleurs, un risque de perte de biodiversité. Certains produits contribuent notamment – non intentionnellement – à décimer les pollinisateurs, par des effets « cocktail ». Pour les abeilles, l'action de certaines substances se combine avec les effets des discontinuités des calendriers de ressources en pollens, discontinuités qui fragilisent les colonies et rendent plus dangereuses les attaques de certains acariens. Un autre type d'effet cocktail a été repéré à l'échelle moléculaire : deux composés peuvent se lier de manière « coopérative » à un récepteur, ce qui provoque un effet toxique à des niveaux de concentration beaucoup plus faibles que lorsque chaque composant agit seul. Si l'on considère que, dans l'environnement humain, quelques dizaines de milliers de composés sont susceptibles d'avoir une action combinée sur la santé, il s'agirait là d'un risque majeur. Lourdes seraient les conséquences sur la capacité de nos sociétés à trouver des solutions non toxiques aux problèmes phytosanitaires.

### LES MOTEURS DES DÉGRADATIONS ET L'ACCÉLÉRATION

La pression des sociétés sur les différents écosystèmes de la biosphère résulte de plusieurs forces motrices :

- la croissance démographique ;

## LA BIOSPHÈRE : TROP PETITE...

- le phénomène comportemental de la transition vers un régime alimentaire plus carné des nouvelles classes moyennes mondiales, qui entraîne une accélération de la déforestation pour mettre en culture des surfaces nouvelles destinées à nourrir les animaux d'élevage ;
- l'effet moteur de la persistance d'une grande pauvreté rurale qui contraint les petits producteurs à surexploiter les terres et les pâturages dont ils disposent ;
- à côté de cette agriculture pauvre, il existe une agriculture plus riche, mais polluante et non viable écologiquement à long terme, qui est un puissant moteur de dégradation ;
- la perspective d'une utilisation massive de la biomasse, pour produire de l'énergie et des biomatériaux, qui représente une accélération potentielle de la pression.

Cette impressionnante machinerie écologique, agricole, environnementale, industrielle et sociale qui dégrade la biosphère est déterminée par des besoins humains qui apparaissent comme de plus en plus importants. Ils émanent en partie de populations qui manquent de moyens pour se soustraire à cette situation. Ce sont pour l'essentiel les populations agricoles. Face à elles, la biosphère montre ses limites et son mauvais état. Pour tenter d'apporter des solutions, il est avant tout nécessaire de bien poser le problème pour en prendre la mesure et toutes les dimensions.



## CHAPITRE V

# L'ÉQUATION SUPRÊME DE LA BIOSPHERE

On peut évoquer la problématique de la biosphère en termes d'équation à résoudre. Il y a en effet des objectifs à atteindre, des contraintes à respecter, des choix à faire et des variables à estimer. Tout cela incite à une clarification indispensable avant d'aborder l'un des exercices, sans nul doute les plus difficiles pour anticiper l'avenir de la biosphère.

QUELS SONT LES OBJECTIFS,  
MAIS AUSSI LES CONTRAINTES ASSOCIÉES ?

On parlera d'objectifs pour tout ce qui relève des choix de consommation et d'usage de la biosphère par les sociétés humaines. Dès lors qu'il existe des alternatives, les objectifs peuvent être modifiés, adaptés, ajustés. Ils jouent un rôle déterminant pour l'avenir car leur niveau fixe le degré de sollicitation vis-à-vis de la biosphère. Comment cette dernière peut-elle réagir ?

Il y a tout d'abord des choses que seule la biosphère peut faire : la première est d'alimenter la population humaine et animale. Toutefois, les considérations qui précèdent concernant la concurrence potentielle pour l'espace productif

amènent à trier parmi les options possibles. La part de la viande dans le régime alimentaire humain est fondamentale et peut être qualifiée de choix anthropologique de grande envergure. Cette option relève d'abord de considérations nutritionnelles de santé. Il est bien évidemment difficile de définir une proposition de répartition optimale et universelle dans le régime alimentaire entre viandes, protéines végétales, céréales et dérivés, et légumes et fruits. Mais on peut affirmer que, en moyenne, le régime alimentaire des pays industriels est d'abord trop abondant, ensuite trop riche en viandes et en sucres par rapport aux légumes et fruits. Les scénarios alimentaires proposés par les milieux scientifiques réduisent donc, pour les catégories de population aisées, l'apport moyen mesuré en calories. Réciproquement, ces mêmes scénarios accordent des marges d'augmentation de la consommation de viande aux populations moins nourries et à celles qui sont sous-alimentées.

Le type de viande est également un paramètre important. La production de viande de bœuf demande plus de calories par kilogramme de viande finale que la production des viandes de porc et de volaille. Consommer ces derniers épargne donc d'importantes surfaces productives. Cependant, la production d'une grande part des viandes bovines utilise des prairies permanentes et des parcours qui ne peuvent pas être affectés à des cultures en raison de la fragilité des sols et de l'existence de pentes. Il serait donc logique de limiter la production de viande bovine, ovine et caprine aux capacités de production de ces seules prairies. Par ailleurs, afin de limiter la progression de la concurrence entre grains destinés aux humains et grains destinés aux animaux, il faudrait réduire globalement la production des viandes de porc et de volaille, animaux nourris grâce à des surfaces qui pourraient être consacrées directement à l'alimentation humaine. À ces viandes intensivement

utilisatrices de grains, seraient partiellement substituées des protéines végétales (haricots, pois, lentilles, fèves...).

Un autre domaine nécessiterait une production alternative qui ne peut être issue que de la biomasse : les biomatériaux. Aujourd'hui, ils proviennent presque uniquement du pétrole. Mais la mutation est inéluctable car il faudra remplacer les plastiques fabriqués à partir du pétrole, lequel deviendra de plus en plus rare. Une partie de la biomasse pourrait alors provenir des forêts à la condition qu'elles soient cultivées d'une manière durable. Il serait beaucoup plus discutable d'utiliser des terres agricoles, ou même, dans certains cas, des résidus de culture pour produire des biomatériaux, pour les mêmes raisons que celles mentionnées plus haut.

Nous avons évoqué les productions dont la biosphère est seule responsable, mais certaines peuvent avoir d'autres origines. C'est le cas de l'énergie. Le recours à la production d'énergie par l'agriculture peut être questionné car il existe potentiellement d'autres ressources énergétiques que la biomasse. Certes, en termes de disponibilité des techniques et de facilité de création des filières, la biomasse est une très bonne candidate pour produire de l'énergie liquide (alcools, biodiésels, kérosène) ou gazeuse (méthane). Ces énergies liquides sont indispensables, au moins pendant une période de transition, pour les transports automobiles et le camionnage. Mais la priorité, dans l'usage de la biosphère, doit être de produire des aliments. Il faudrait donc limiter la concurrence entre la dynamique productive alimentaire et la dynamique productive énergétique. Cependant, certaines niches importantes devraient revenir à la production d'énergie issue de biomasse. Tout d'abord, dans les régions où l'approvisionnement en carburant passe inévitablement par des importations, ce ravitaillement est long et coûteux. C'est le cas dans nombre d'îles du Pacifique, pour lesquelles

l'utilisation de la biomasse locale peut éventuellement être une bonne solution. Ensuite, là où l'usage alimentaire et l'usage énergétique ne sont pas en concurrence, car la terre est abondante, le recours à la biomasse dédiée à la production d'énergie peut aussi trouver une justification locale. Enfin, beaucoup de déchets agricoles, industriels et domestiques peuvent être utilisés pour produire de l'énergie. Cependant, restituer le maximum de résidus agricoles au sol pour en garantir la viabilité écologique, et pour contribuer à la séquestration, dans ces mêmes sols, du carbone présent dans les résidus est, comme nous l'avons vu plus haut, la condition *sine qua non* à l'utilisation de la biomasse pour produire de l'énergie. Épargner aux sols une trop forte sollicitation pour produire de l'énergie, en particulier du carburant ou des équivalents, suppose donc de l'innovation dans les autres domaines du secteur de l'énergie et non plus celui de la biomasse.

Au total, les objectifs pour la biosphère se résumeraient ainsi : d'abord, maîtriser la consommation humaine en veillant à ce que l'accès à la nourriture soit équitable quelle que soit la région. Par ailleurs, limiter la consommation des viandes et trouver les proportions optimales permettant d'utiliser au mieux les pâturages et les parcours. Cette maîtrise de la quantité d'aliments nécessaire permettrait d'enrayer puis de stabiliser la progression des terres cultivées et donc de la déforestation. Enfin, limiter fortement l'utilisation des sols cultivés pour la production d'énergie et de biomatériaux, mais aussi mieux utiliser la forêt dans l'ensemble de ces perspectives.

## L'ÉQUATION SUPRÊME DE LA BIOSPHERE

### LES AUTRES CONTRAINTES À RESPECTER

Par contraintes, on entend ici les obligations qui assurent le renouvellement du fonctionnement des écosystèmes. Ce sont des contraintes justifiées par la survie à long terme de la biosphère. Elles s'appliquent donc à notre substrat collectif. Faute de respecter ces contraintes, la trajectoire de certains agroécosystèmes irait vraisemblablement de dégradation en dégradation vers un lent effondrement.

Notre première obligation envers la biosphère est sa protection, c'est-à-dire la conservation de sa biodiversité qui est la caractéristique principale de la vie. Mais la biodiversité est davantage que ce que l'on croit souvent : en conservant la diversité des individus au sein des espèces, la biodiversité des espèces au sein des écosystèmes, et la biodiversité des écosystèmes au sein de la biosphère, nous conservons également la diversité des fonctionnalités biologiques et écologiques qu'elles contiennent, c'est-à-dire de la grande machinerie qu'est la vie. Si nous ne le faisons pas, nous perdons continuellement des options pour la vie du futur.

Pour conserver ces fonctionnalités, il faudrait étendre les réserves de biosphère, en priorité dans les zones riches en espèces et en écosystèmes, donc dans les zones remarquables de la planète. C'est ce que propose l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN). Conserver des zones sans êtres humains a un sens dans la mesure où existent encore des écosystèmes qui en sont dépourvus. Mais il deviendra de plus en plus difficile de résister à la pression des populations avoisinantes lorsque celles-ci atteindront de plus fortes densités. Par ailleurs, les populations humaines font également partie des écosystèmes. Il est légitime de concevoir des réserves les incluant car c'est non seulement inévitable mais aussi tout à fait nécessaire pour gérer les écosystèmes anthropisés (très liés aux sociétés)

qui résultent de cette présence à différents degrés. Il est cependant essentiel que les groupes autochtones maîtrisent leurs effectifs et soient conscients de la nécessité de constituer des réserves de biodiversité fixant et exprimant, à un moment donné de l'évolution, l'état d'un agroécosystème.

Enfin, dans des zones où l'agriculture a très profondément transformé l'écosystème initial, au point de le rendre méconnaissable, il est possible de restituer de la biodiversité au paysage pour éviter une évolution catastrophique. Là encore, des zones devraient être protégées et l'on y expérimenterait la compatibilité entre de fortes performances de production agricole et de biodiversité. L'intérêt général pourrait y gagner tout comme les agriculteurs. Plus généralement, l'agriculture doit devenir le moyen principal pour réaliser un aménagement écologique des territoires ruraux. On peut, par exemple, améliorer le fonctionnement des bassins hydrographiques. On peut aussi choisir les espèces végétales qui favoriseront l'implantation d'espèces animales utiles à l'agriculture, notamment les espèces antagonistes aux ravageurs des cultures. Ainsi, des politiques intelligentes de maîtrise des territoires peuvent combiner des formes de protection allant de la mise en réserve absolue sans occupation humaine, jusqu'à la réintroduction d'une biodiversité utile au sein des zones agricoles les plus transformées, voire dévastées par une surexploitation. Constituer des zones d'agriculture écologiquement intensive préfigurant le futur serait une bonne idée.

Protéger la biosphère, c'est aussi maîtriser les villes, leur fonctionnement et leur extension. Les villes s'étendent en raison de la progression démographique et de la migration des zones rurales vers les zones urbaines qui se traduisent, dans presque tous les cas, par l'occupation des meilleures terres, les zones plates et fertiles ayant toujours favorisé les regroupements. Les villes s'étendent, avec les bidonvilles

ou les immenses lotissements où la biodiversité est remplacée par des pelouses constituées généralement d'une seule espèce végétale. Quant à l'urbanisation, elle s'accompagne fréquemment d'un écoulement des eaux qui s'avère catastrophique en cas d'intempéries et endommage toutes les zones en aval. Les processus d'urbanisation échappent encore très largement à la pensée écologique et restent donc orientés – sauf exception – dans un sens anti-biosphère. Alors que, tout au contraire, la ville pourrait créer des écrins de biodiversité cultivée ; la concentration démographique et le potentiel pédagogique de la présence de la nature dans la ville constituent des éléments favorables si les politiques publiques correspondantes sont instaurées.

Outre protéger la biosphère, son intégrité et sa biodiversité, la deuxième grande contrainte à respecter est la séquestration de suffisamment de carbone dans les sols. C'est le seul moyen, actuellement identifié, pour retirer significativement du dioxyde de carbone de l'atmosphère, par l'intermédiaire de la photosynthèse, afin d'enrayer la progression du changement climatique. On peut espérer que l'ingénierie chimique permettra de trouver d'autres solutions dans l'avenir mais la biosphère offre une solution immédiate qu'il suffit de maximiser. On peut donc considérer que la séquestration du carbone incombe en premier rang à l'agriculture. Pour cela, elle doit approvisionner les sols le plus possible en résidus de culture, ce qui est la manière la moins onéreuse de stocker. De surcroît, le carbone s'y présente sous la forme de molécules organiques d'une grande utilité pour améliorer la structure et la fécondité de celui-ci. Cette fonction de séquestration est donc doublement gagnante : atténuation du climat et amélioration de la fertilité.

La troisième contrainte à respecter concerne une bonne circulation et une tout aussi bonne conservation de l'eau dans tout l'écosystème et, en particulier, dans le sol et le

sous-sol. Cette dernière est une garantie de résilience pour la biosphère. Il faut pour cela accroître la « rugosité » du tapis végétal (caractère conféré par de multiples micro-obstacles) par des couvertures végétales permanentes et par des micro-aménagements favorisant l'infiltration des eaux, de préférence aux ruissellements qui sont souvent catastrophiques. Favoriser l'infiltration grâce à la végétation de couverture permanente, c'est l'inverse de ce que l'agriculture fait très souvent en mettant les sols à nu. Quant aux grands barrages, ils n'empêchent pas les ruissellements ni l'érosion ; dans les régions érosives, ils sont rapidement envasés. Les micro-impluviums et les microretenues d'eau sont un préalable aux retenues de plus grande envergure. Un autre avantage des couvertures végétales est la réduction de l'albédo, soit, en simplifiant, la couleur du sol. Plus elle correspond à des longueurs d'onde élevées, plus le sol contribue à réfléchir la lumière et l'énergie vers l'atmosphère et, donc, à éloigner les pluies par les courants de convection atmosphériques ascendants qui en résultent et, au final, à diminuer les ressources locales en eau. Par ailleurs, plus le taux d'humidité entretenu au niveau du sol par la végétation est élevé, plus le cycle évaporation-condensation est alimenté et contribue à conserver en boucle une partie de l'eau des écosystèmes à des échelles locales. Dit autrement, la végétation et, surtout, la forêt appellent l'eau ; l'absence de végétation, au contraire, chasse les pluies et entraîne la sécheresse – ce qui est très visible dans l'Amazonie déforestée. Lorsque la forêt a disparu, il est nécessaire de recréer une rugosité et de l'albédo dans le paysage, par des aménagements appropriés, pour restaurer le cycle de l'eau.

Ne pas polluer les milieux est la quatrième contrainte. Les pollutions sont sources de dangers graves : des intoxications humaines et animales, des perturbations endocriniennes qui touchent notamment à la reproduction des espèces, la

disparition d'espèces et, partant, la disparition de mécanismes métaboliques qui pourraient être utiles, la disparition de pollinisateurs comme les abeilles... La recherche d'alternatives aux produits polluants doit donc être accélérée. Les espèces menacées devraient faire l'objet d'attentions particulières pour que leur protection soit assurée, les aires mellifères devraient notamment être multipliées pour sauvegarder les pollinisateurs.

Garantir le renouvellement des grands cycles des éléments est la cinquième contrainte pour assurer la survie des écosystèmes. Pour les ressources renouvelables, la vitesse des usages des éléments de la biosphère ne doit pas être plus rapide que celle du renouvellement des ressources ; par exemple, la vitesse d'utilisation des nappes phréatiques superficielles doit être compatible avec la préservation d'un niveau basique de ces nappes, donc de leur approvisionnement. Pour les ressources finies comme le phosphore, il convient de systématiser la récupération des pertes de manière à boucler un cycle complet et fermé afin qu'il n'y ait aucune perte. C'est une nécessité vitale que de pérenniser la continuité et le renouvellement des grands cycles biogéochimiques.

Enfin, on peut considérer que conserver ou restituer ou même créer de la beauté dans les paysages est une contrainte à respecter car un monde laid et dégradé ne serait pas agréable à vivre pour les sociétés du futur.

Le respect de toutes ces contraintes est destiné à garantir la viabilité de la biosphère. La viabilité définit des contraintes assurant la pérennité de la nature et des sociétés. Les objectifs définissent ce qu'il est possible de faire dans le cadre de ces contraintes. Telle est la logique de l'équation.

## ÉCOLOGIE INTENSIVE

### LA CONCEPTION THERMODYNAMIQUE DE LA BIOSPHERE

Cette conception propose une vision pertinente des obligations des sociétés en termes de viabilité. L'apport d'énergie solaire crée des structures biologiques et les renouvelle de manière permanente. Si le soleil disparaissait, celles-ci disparaîtraient également et l'entropie interne du système Terre augmenterait jusqu'à l'équilibre thermodynamique dit « parfait », c'est-à-dire la fin de toute vie. Comme on l'a vu, on peut utiliser le terme « structure dissipative<sup>1</sup> » pour évoquer la biosphère car, en théorie, elle se maintient en tant que structure grâce au flux permanent d'énergie qui la traverse. La biosphère peut donc être vue comme une construction biologique et écosystémique avec ses structures et ses fonctionnalités, qui ne cesse localement de se construire et peut se déconstruire. Cette structure – ou cette organisation – se crée en permanence par la photosynthèse, et elle se détruit en permanence par le catabolisme, c'est-à-dire la désorganisation<sup>2</sup>. En ce sens, elle dissipe de l'énergie et augmente l'entropie. Cela correspond à un principe thermodynamique : « les structures dissipatives s'auto-organisent de façon à maximiser le flux d'énergie qui les traverse<sup>3</sup> ».

En dégradant les écosystèmes, l'activité humaine contribue donc en partie à détruire les structures dissipatives de la biosphère. Par exemple, la déforestation amoindrit la capacité de création de la photosynthèse. La perte de biodiversité réduit l'efficacité de l'auto-organisation et la

---

1. Roddier, *op. cit.*

2. Le métabolisme (ensemble des transformations biologiques) comprend l'anabolisme (construction) et le catabolisme (déconstruction).

3. Roddier, *op. cit.*, p. 32.

## L'ÉQUATION SUPRÊME DE LA BIOSPHERE

capacité de diversification des écosystèmes. La dégradation du circuit de l'eau limite la production de biomasse...

Lorsque l'espèce humaine était tout à fait marginale, les états dynamiques de la biosphère étaient sans doute proches du climax biosphérique (maximum théorique) potentiel, c'est-à-dire du maximum de la biomasse naturelle vue comme structure dissipative. La biosphère actuelle, profondément transformée par l'espèce humaine, peut elle aussi atteindre un climax qui lui est propre et qui est inférieur. Celui-ci est mesuré par la quantité instantanée de biomasse atteinte dans l'état dégradé de sa couverture végétale qui limite la photosynthèse. La société humaine dégrade en permanence les structures de la biosphère, ce qui contribue à éloigner cette dernière du climax potentiel global qui serait obtenu au maximum possible de biomasse. Selon cette conception thermodynamique de la biosphère, l'objectif de la société humaine doit donc être, à tout moment, d'accroître et d'entretenir le caractère de structure dissipative de la biosphère, c'est-à-dire d'obtenir, avec le flux d'énergie disponible, le maximum de biomasse, le maximum de diversité, le maximum de fonctionnalités, en cohérence avec une satisfaction raisonnable des besoins des sociétés.

L'ANTHROPOBIOSPHERE, LE VRAI NOM  
QU'IL FAUDRAIT DONNER À LA BIOSPHERE

La vision thermodynamique, ainsi d'ailleurs que les autres visions (fonctionnelle, génétique-informationnelle et chimique), cesse de séparer, et plus encore d'opposer, les concepts de nature et de société. Jusqu'à présent, dans ce texte, nous avons d'ailleurs différencié la biosphère et les sociétés, comme il est habituel de séparer nature et société. En réalité, la planète ne peut plus être vue seulement comme

comportant une biosphère qui serait « malmenée » par la société humaine<sup>1</sup> (au sens habituel du mot et au sens de « mal gérée ») ; elle est tellement profondément transformée qu'elle doit être considérée comme étant un nouvel ensemble où « nature et société » sont intégrées ; il ne fait plus sens de les séparer, car c'est entretenir l'illusion d'un éventuel retour à une sorte de paradis perdu qui serait obtenu par une bonne gestion de la nature par les sociétés. La société n'est pas et n'a jamais été en dehors d'une biosphère qui serait vue comme objet à gérer par elle, mais à l'intérieur de ce même objet au sein duquel elle a une influence gestionnaire décisive. Elle doit donc gérer ses propres lois en même temps que celles de la biosphère s'imposent à elle et qu'elle peut les influencer. La biosphère doit être vue comme une anthropobiosphère, c'est-à-dire une biosphère régulée par la société humaine qui en est la composante principale. L'importance du phénomène de transformation de la biosphère sous la pression humaine atteint une telle dimension que l'on est donc conduit à parler d'anthropobiosphère de la même manière que Paul Crutzen<sup>2</sup> a été amené à parler d'anthropocène pour qualifier l'ère géologique des temps présents, dominée par les sociétés.

Il n'y a donc pas « d'aventure humaine » mais une aventure anthropobiosphérique. Il n'y a pas non plus d'aventure de la société humaine isolément, mais une aventure de la vie tout entière. Dans cette vision, l'objectif à atteindre n'est pas seulement de garantir la survie de l'espèce et de son organisation sociale, mais de tout l'ensemble du vivant.

---

1. On emploie le terme « société humaine » au singulier pour parler de l'espèce humaine et son organisation, et « sociétés humaines » au pluriel pour évoquer la diversité des sociétés.

2. Prix Nobel de chimie en 1995.

## L'ÉQUATION SUPRÊME DE LA BIOSPHERE

### L'OBJECTIF DE MAXIMISATION DES STRUCTURES DE L'ANTHROPOBIOSPHERE

Cet objectif est-il compatible avec l'aventure démographique de la planète ? L'équation présentée ne comporte pas véritablement d'objectifs de démographie, c'est-à-dire d'objectif de la société humaine d'autoréguler ses effectifs. Pourtant, on peut concevoir qu'une réduction volontaire, sur très longue période, des effectifs de notre espèce soit de nature à faire gagner des degrés de viabilité à l'anthropobiosphère. Bien évidemment, il ne s'agit pas de laisser dépérir les sociétés les plus fragiles, les moins puissantes, les moins à même de faire face à des périls tels que la montée des eaux marines, la submersion en cas de cyclone, les famines succédant à des sécheresses, des développements épidémiologiques exceptionnels de maladies graves... Cette conception diviserait la société humaine, entre ceux qui ont vocation à rester et ceux qui ont vocation à s'éteindre, elle serait aux antipodes de principes solidaristes et humanistes. Pendant les Trente Glorieuses, les pays du Nord ont financé l'Aide publique au développement dans cette perspective solidariste, mais ils l'ont fait dans des proportions très limitées et peu efficaces, dans tous les cas, sans que cela modifie fondamentalement l'échelle de la richesse et de la pauvreté. C'est la libéralisation économique, l'abaissement des barrières douanières et le jeu de la concurrence qui ont réduit significativement les inégalités au sein de la société humaine en faisant émerger des classes moyennes dans de nombreux pays, en particulier en Asie, et cela au nom de principes de liberté d'organisation des marchés. L'éthique propre de la solidarité ne va pas de soi, la fermeture des frontières aux réfugiés des guerres le montre clairement. Ce choix de ne pas traiter suffisamment la question des inégalités, donc de laisser la pauvreté se conjuguer avec une

forte croissance démographique, ne peut qu'abandonner la progression de la société humaine à des lois non régulées.

Durant la seconde moitié du <sup>xx</sup>e siècle, on a pensé que les politiques de limitation des naissances permettraient de juguler rapidement l'importance de la vague démographique des pays en retard de développement, par rapport aux plus riches, et d'atténuer les conséquences écologiques. Seule la Chine a eu recours à des voies autoritaires qui, avec le temps, ont permis d'infléchir significativement la courbe de population. Ces politiques s'appuyaient principalement sur des techniques contraceptives, de stérilisation, et d'éducation des jeunes filles. Au tournant des <sup>xx</sup>e et <sup>xxi</sup>e siècles, les projections démographiques avaient tendance à laisser penser que les « dés étaient jetés » et que la transition démographique se déroulerait selon un régime de changement relativement stable sans qu'il y ait une incidence déterminante des politiques démographiques. Comme on l'a vu, en réalité, les évolutions démographiques des trois dernières décennies ont été assez différentes d'une région à l'autre, allant selon les pays de réductions très rapides des naissances à un maintien à haut rythme. Depuis les années 2010, certains s'inquiètent des projections concernant l'Afrique subsaharienne : les dés ne seraient pas jetés... Certes, dans une grande partie du monde, la population tend à se stabiliser, mais en Afrique, elle va s'accroître considérablement. Ainsi, la boucle serait bouclée entre l'*Homo sapiens* qui serait originaire d'Afrique et aurait conquis le monde, et l'homme africain qui dominerait la démographie mondiale du <sup>xxi</sup>e siècle. Les conséquences imprévisibles d'une Afrique à plus de 3 milliards d'habitants incitent à penser que des politiques démographiques très volontaristes seraient indispensables.

La planète connaît assurément une distribution très inégale de la population et donc de la pression sur les écosystèmes. La Chine, l'Inde, Java ont saturé leur espace

## L'ÉQUATION SUPRÊME DE LA BIOSPHERE

géographique et les écosystèmes anthropisés atteignent des niveaux importants d'artificialisation. C'est aussi le cas de l'Europe, mais à un moindre degré, et de petites régions, comme l'Amérique centrale, ou des îles comme Haïti dans les Caraïbes. En contraste, l'Amazonie apparaît vide, de même qu'une grande partie de la Russie. Ces très grandes différences de peuplement n'entraîneront pas forcément des migrations des « zones pleines » vers les « zones vides ». On verra plutôt se constituer de très grandes exploitations dans les zones vides qui exporteront leur production. Mis à part les migrations inévitables, ce sont les produits alimentaires qui vont voyager, plus que les personnes. Le marché ignorant de plus en plus les frontières, c'est bien à l'échelle globale que se pose désormais la question des limites productives de la planète et de leur compatibilité avec l'effectif de la population. La hausse simultanée des prix alimentaires dans presque toutes les grandes villes du Sud en 2008, à la suite de baisses de production dans divers pays exportateurs, est bien la preuve que cette question est désormais mondiale.

Pour résumer, la compatibilité entre l'importance de la population et la viabilité de la biosphère définit une équation « suprême » que la société humaine doit résoudre. Le sort de l'anthropobiosphère, en termes de viabilité, en dépend. Cette viabilité est écologique, environnementale, économique et sociale. Pour cela il est nécessaire de promouvoir des politiques de maîtrise des besoins de la population. En même temps, il est indispensable d'améliorer le fonctionnement de l'ensemble de l'anthropobiosphère, et de le faire à un rythme tel que la vitesse d'aggradation soit supérieure à la vitesse de dégradation. C'est le but de l'intensification écologique.



## CHAPITRE VI

# DE LA RÉPARATION ÉCOLOGIQUE À LA RÉSILIENCE

L'équation étant posée, il faut trouver des solutions aux problèmes de la biosphère. Il s'agit là d'un enjeu considérable et d'une grande complexité qui nécessite à la fois des solutions techniques et un cadre de politique publique partagé par près de deux cents pays souverains ; tout cela alors que les niveaux de conscience des populations sont très inégaux, souvent négligés par des médias et des élites politiques qui manquent d'éthique de responsabilité. La science et la technologie sont certainement le premier des points de départ pour induire des solutions. Malgré les polémiques et les mises en doute de plus en plus fréquentes contre les scientifiques de l'écologie et de l'environnement – on pense aux frondeurs climatosceptiques –, le grand public leur fait confiance comme l'indiquent les enquêtes d'opinion. Il y a urgence à réparer et à protéger les agroécosystèmes, mais aussi à arrêter les processus de dégradation en mettant en place des pratiques de résilience, c'est-à-dire de résistance à la dégradation. Pour cela, la science doit d'abord faire un effort. Elle est en effet souvent peu compréhensible et traversée par des controverses. Et plus un problème est complexe, plus il fait appel à différentes disciplines,

alors que celles-ci ont très souvent des difficultés à travailler ensemble. La première des prescriptions est donc de concilier les disciplines.

### CONTRE UNE SCIENCE ET UNE TECHNOLOGIE EN ORDRE DISPERSÉ

La science et la technologie sont fortement sollicitées pour enrayer la dégradation de l'anthropobiosphère. Cette dégradation et ses risques pour les populations ne sont pas nouveaux pour les scientifiques. Dans les années 1960, certains ont commencé à essayer d'éveiller la conscience du public : ainsi, les frères Paddock et René Dumont<sup>1</sup> ont tiré la sonnette d'alarme sur l'un des points fondamentaux, la montée démographique et le risque de famine, puis Rachel Carson sur les pollutions<sup>2</sup>. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a alerté sur le changement climatique et l'Intergovernmental panel on biodiversity and ecosystems services (IPBES) sur les pertes de biodiversité. Depuis la Conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement à Rio, des diagnostics internationaux ont été réalisés concernant les différents aspects de la biosphère : la biodiversité, les écosystèmes, l'agriculture, l'alimentation, la démographie... Mais ces diagnostics sont séparés et invitent, inévitablement, à trouver des solutions séparées. Avec le risque que l'ensemble des propositions d'action manque de cohérence. Il y a en effet sur tous ces domaines de nombreuses oppositions de points de vue. Certains défenseurs de la nature peuvent, par

---

1. Par exemple le livre *Famine 1975* des frères Paddock, qui a marqué l'opinion aux États-Unis, ou celui de René Dumont & Bernard Rosier, *Nous allons à la famine*, Seuil, 1966.

2. Rachel L. Carson, *Silent Spring*, Mifflin, 1962.

exemple, privilégier l'extension des réserves de biosphère dans de grandes proportions, sans considération pour les besoins en terre pour l'agriculture et l'alimentation. De la même manière, les « énergéticiens » privilégient parfois les solutions énergétiques issues de la biomasse sans prendre en compte les risques de contradiction avec l'alimentation. Ou encore, certains considèrent que les OGM vont résoudre le problème du risque alimentaire à long terme et d'autres s'y opposent, tout cela sur des bases de discussion essentiellement idéologiques... Une vision d'ensemble de l'anthropobiosphère est donc indispensable, elle doit prendre en compte les différentes approches disciplinaires disponibles et viser à établir toutes les cohérences nécessaires.

Le diagnostic de la dégradation de la biosphère, qui est évoqué ici, a été fait selon quatre visions disciplinaires différentes faisant ressortir des points de vue et des analyses utiles et complémentaires : les fonctionnalités physiques, les mécanismes physicochimiques, la génétique et l'information, et la thermodynamique et l'énergie. Là aussi, bien que ces approches soient pertinentes, le risque est de rester tributaire d'une unique vision de la réalité, donc d'un seul angle de vue. La réalité ne s'emprisonne pas dans les disciplines, encore moins dans une seule. Mais chacune apporte une interprétation particulière des systèmes vivants.

Les voies d'analyse et de solution explorées jusqu'à présent sont donc inspirées par le quasi-monopole d'une seule approche disciplinaire. Ainsi, pour accroître fortement la production alimentaire sur des surfaces réduites, beaucoup pensent d'abord à accroître le potentiel productif propre des espèces cultivées par l'entrée génétique. D'autres raisonnent en termes de protection des plantes par la création de nouvelles molécules de traitement et entrent par la chimie. C'est le cas pour la défense contre les insectes. Certains recherchent des solutions qui font appel à des

prédateurs ou des parasites des insectes ravageurs, d'autres encore à des produits naturels... Les agronomes chercheront des solutions qui assurent une cohérence entre la structure du sol, les formes de la fertilité, le contrôle des plantes concurrentes... En outre, les choix technologiques obéissent souvent à des positions établies *a priori* : refus des produits chimiques ou, à l'inverse, des techniques biologiques, préférence pour les solutions issues de la pensée agronomique ou, d'emblée, pour des techniques chimiques ou génétiques. Il est indispensable que le diagnostic et les solutions soient transdisciplinaires car un seul angle de réflexion ne peut être efficace. Par ailleurs, la définition d'une stratégie d'aggradation est forcément scientifique et non idéologique étant donné que les solutions scientifiques sur l'anthropobiosphère ne peuvent qu'être complexes alors que les positions idéologiques sont par essence simplistes.

### S'INSPIRER DE LA DÉGRADATION POUR PENSER L'AGGRADATION

La recherche de solutions pour faire produire durablement et pour gérer la viabilité de l'anthropobiosphère est complexe et tend à le devenir encore plus. Il semble, par exemple, que le rythme des interdictions de certaines molécules de traitement des plantes soit, dans certains cas, plus rapide que le rythme de production de solutions alternatives satisfaisantes, ce qui tend à réduire le nombre des options disponibles ou, éventuellement, conduit à constater qu'il n'y a plus d'option réaliste. Or, les innovations sont peu fréquentes. Une famille nouvelle d'insecticides naît à peu près tous les quinze ans. Les grandes inventions en matière de machinisme agricole ou de sélection variétale ont un rythme

comparable. Leur succession suit des logiques diverses, souvent faites d'abord de hasard, toujours de recherche pouvant déboucher sur des ruptures technologiques, et faites d'innovations venues d'autres secteurs (notamment avec le numérique). Par ailleurs, la Recherche et développement (R&D) se mobilise et choisit des options d'orientation en fonction de l'apparition de nouveaux problèmes à résoudre. Le calendrier de l'ensemble de l'offre d'innovation n'est donc pas obligatoirement ajusté au calendrier de l'apparition des besoins. Actuellement, l'accumulation des problèmes environnementaux et des défis productifs crée un besoin de nouvelles solutions d'assez grande ampleur dans de nombreuses directions tandis que l'offre reste insuffisante. La R&D n'a pas toujours la chance d'identifier suffisamment de principes génériques d'innovation pour faire face à l'émergence des problèmes. Par exemple, l'interdiction en France des néonicotinoïdes (utilisés contre les pucerons, lesquels sont porteurs de virus) a créé une situation difficile en 2016 du fait de la complexité des solutions de remplacement.

Examiner l'évolution, sur longue période, de la succession des problèmes à résoudre et des solutions apportées peut, dans certains cas, aider à imaginer des solutions. Les problèmes actuels de production agricole sont connus et leur histoire aussi. Ils sont souvent anciens. Comme on l'a vu, lorsque les Celtes ont occupé l'Europe et commencé la déforestation, c'est grâce à cette dernière que s'est généralisée la strate des herbacées, dites « adventices », concurrentes des plantes cultivées. Ces herbacées adventices sont très bien adaptées au climat froid ; elles ont résisté aux dernières glaciations. À la suite, comme il a été dit plus haut, la maîtrise de ces adventices, bien qu'incomplète, a été obtenue par le désherbage manuel puis mécanique et le travail du sol grâce à la traction

animale. Plus tard encore, la réalisation de labours profonds, avec de puissants tracteurs, et l'usage intensif des herbicides ont poursuivi la lutte contre ces adventices. À la fin de cette séquence sont apparus les OGM, résistant aux herbicides, ce qui permet d'en utiliser de façon intensive tout en épargnant la plante cultivée OGM. Cette succession d'actions mécaniques aboutit fréquemment à un tassement des sols, à leur déstructuration et à de l'érosion. Le recours à la chimie crée des problèmes de toxicité et d'écotoxicité. Les OGM tolérants aux herbicides, dès lors qu'ils incitent à utiliser intensivement des désherbants, suscitent l'apparition d'adventices qui leur résistent, de telle sorte que tout le raisonnement est à reprendre.

Cette vision sur longue durée des problèmes actuels incite à penser que les trajectoires de dégradation sont pleines d'enseignement. Par exemple, celle qui a conduit progressivement l'agriculture vers les monocultures de cultures pures (une seule espèce et une seule variété de l'espèce cultivée) favorise la diversification des adventices ; une trajectoire aggradante, correspondant à cette trajectoire dégradante, chercherait, à l'inverse, à favoriser la diversification des espèces cultivées en ajoutant des « plantes compagnes » cultivées occupant tout l'espace et concurrençant, voire se substituant, aux adventices. Elle chercherait aussi à organiser des successions de cultures ayant des effets négatifs contre ce que l'on qualifie de « mauvaises herbes » et qui ne sont rien d'autre que des espèces locales bien adaptées. On prendrait ainsi une voie qui serait une alternative à celle, très ancienne, inaugurée dès que les Celtes ont cherché à éradiquer les adventices.

La connaissance des mécanismes biologiques et écologiques naturels et de l'histoire des agroécosystèmes peut donc aider à imaginer des solutions. Mais ces mécanismes

sont extrêmement nombreux et complexes. Les agroécosystèmes peuvent, par exemple, être considérés comme des réseaux d'interaction entre l'ensemble des entités du substrat (biotope) et des entités vivantes (biocénose). La connaissance de ces interactions est donc une étape nécessaire dans la recherche de solutions inspirées par la biologie. C'est un passage obligé nécessitant des connaissances étendues ; celles issues d'observations *in situ*, celles issues de l'analyse des génomes, ou du métabolisme. De cela devraient découler des opportunités d'innovation, mais leur identification risque d'être longue à venir. Or, il y a urgence. Les sociétés humaines comptent sur la science et sur la technologie, donc sur les activités de recherche et d'innovation, comme base des solutions à trouver pour résoudre les problèmes de l'agrobiosphère.

Plutôt qu'imaginer des réponses à de multiples questions, en ordre dispersé, au gré des événements, il faudrait peut-être chercher à entrer dans l'ordre existant de la nature et, avant tout, à bien comprendre le cheminement de l'évolution technologique au sein de cet ordre. Cela reviendrait à examiner l'évolution des agroécosystèmes, compartiment par compartiment, puis fonctionnalité par fonctionnalité pour examiner l'évolution de chaque compartiment. On mettrait ainsi en lumière, comme pour les adventices, la trajectoire explicative des invasions biologiques, des inversions de flore et de faune, de l'étiologie des maladies animales, des erreurs humaines dues à l'invention de solutions dépourvues de perspective. Ce cheminement mène à privilégier des innovations qui utilisent les mécanismes de la nature ou bien les imitent, ou encore s'en inspirent. Cela revient à prendre la nature comme modèle pour créer des innovations. C'est la voie ouverte par le philosophe anglais Francis Bacon, dès le XVI<sup>e</sup> siècle, avec la maxime célèbre

« *Natura non nisi parendo vincitur*<sup>1</sup> », soit « On ne commande à la nature qu'en commençant par lui obéir », ou « Pour faire servir la nature aux besoins de l'homme, il faut obéir à ses lois ». Lui obéir suppose de la comprendre, donc de l'étudier, sinon, toute action sans compréhension (se situant dans l'ignorance) risque de « désobéir », c'est-à-dire de ne pas respecter les principes de viabilité et d'entraîner des erreurs. La commander, c'est utiliser le fait de l'avoir comprise pour conduire une action intelligente. L'action productive durable, selon cette vision, découle donc directement de la connaissance fine des mécanismes naturels.

Cette maxime, si on l'applique, doit avoir d'importantes conséquences. Dans les conditions actuelles d'évolution écologique et environnementale de l'anthropobiosphère, la première des options scientifiques et technologiques ne peut être que celle de la réparation d'urgence des agro-écosystèmes. La connaissance des écosystèmes non dégradés nous renseigne sur leurs fonctionnalités, donc sur leurs mécanismes de fonctionnement. Par exemple, connaître le cycle de l'eau dans les bassins versants forestiers et herbagers naturels est indispensable pour rétablir une circulation assurant l'infiltration des eaux, calculer le remplissage des nappes phréatiques, gérer les pompages avec prudence, et assurer des retenues efficaces. Il ne s'agit pas d'imiter la nature au sens strict, mais de comprendre les mécanismes et de les utiliser comme base d'inspiration pour des applications diverses. C'est le cas pour appréhender les mécanismes de la résilience et les utiliser pour protéger les agroécosystèmes.

---

1. Francis Bacon, *Novum Organum*, 1620. Cette phrase longtemps méditée avec Jacques Weber nous a inspiré cette manière de concevoir une technologie ayant une productivité élevée et fondée sur les lois des écosystèmes. Voir aussi p. 12 et 229.

## DE LA RÉPARATION ÉCOLOGIQUE À LA RÉSILIENCE

### PENSER LA RÉSILIENCE COMME UNE ENDURANCE : GÉNÉRALISER LES STOCKS SYSTÉMIQUES

Pour obtenir une production qui dure et qui améliore les agroécosystèmes, il est avant tout nécessaire de se servir des propriétés de résilience, exactement comme l'on utilise les fonctionnalités des écosystèmes comme source d'inspiration. Dans les écosystèmes, la résilience, c'est-à-dire la résistance aux chocs, peut prendre différentes formes. La première est celle de la généralisation systémique des stocks et des réserves des différentes substances d'un processus, pour faire face aux pénuries momentanées. Toujours en poursuivant sur l'exemple de l'eau, on peut repenser son cycle local en termes de stockage à tous les niveaux et à tous les compartiments d'un circuit hydrographique : micro-impluviums et diguettes pour récupérer les pluies à l'échelle microlocale, microretenues, couvertures végétales limitant l'évaporation et favorisant l'infiltration, aménagement des berges pour ralentir les flux et alimenter les nappes...

La notion de stockage peut être généralisée : stockage d'ions dans le sol par augmentation du stock de matière organique (qui fixe les ions), stockage de graines et stockage alimentaire pour éviter les disettes, stockage monétaire dans le même but (épargne)... Le stockage systémique garantit que les processus ne s'arrêtent pas si l'une de leurs variables fait défaut, car un stock de cette variable est mobilisable et assure la continuité du fonctionnement. C'est le cas, notamment, lorsque les mammifères hibernants (qui se mettent donc en condition de sous-alimentation) mobilisent leurs réserves de graisse. Cela crée des marges de sécurité et évite aux systèmes de fonctionner en tension. Il peut s'agir aussi de fonctionnalités de remplacement comme la fabrication de glycogène par le foie en cas de fringale. Un système aux

multiples stocks est flexible car il peut supporter des accélérations momentanées, qui surconsommant des ressources dans le système (une période sèche qui utilise la « réserve utile » des sols), et des ralentissements qui permettent de reconstituer les marges locales de ressources (à l'inverse, une période de faible évaporation et de pluies régulières alimentant les nappes phréatiques).

Si les stocks favorisent la flexibilité, réciproquement, un manque de stocks induit des rigidités, donc des vulnérabilités (comme c'est le cas pour les systèmes de production industrielle à flux tendus dans les entreprises qui, cherchant à réduire les frais de stockage, deviennent vulnérables à toute rupture d'approvisionnement ou incapables de satisfaire une demande inattendue). Dans un système dynamique, la résilience résulte donc d'abord de la constitution de stocks tampon pour toutes les fonctions constitutives pour lesquelles c'est possible.

Cette forme de résilience peut par ailleurs rejoindre la notion de réparation. Dans certaines régions du Sahel, la généralisation de micro-aménagements de retenue des pluies, en association avec des stocks de graines dans les sols, et avec l'apport d'éléments fertilisants, peut faire redémarrer la dynamique écologique ancienne de l'écosystème local et le faire prospérer. Le paysage écologique obtenu favorise le retour de la végétation, et des arbustes peuvent être plantés là où se forment les nombreux petits stocks d'eau momentanés. Ce paysage reproduit artificiellement l'écosystème naturel local antérieur qui sert de modèle. Cette « brousse tigrée » assure à nouveau la production de ressources fourragères pour les troupeaux. Ce sont donc les multiples microstockages de l'eau de pluie et les multiples stockages des graines qui permettent la remise en fonctionnement du couvert végétal et sa résilience. Une technique équivalente est également appliquée pour

## DE LA RÉPARATION ÉCOLOGIQUE À LA RÉSILIENCE

cultiver les céréales sahéliennes (comme le mil) : des micro-impluviums retiennent les eaux à chaque pied de mil.

### PENSER LA RÉSILIENCE COMME LA MÉMOIRE DE PLANS DE RECONSTRUCTION

Pour les agroécosystèmes, la résilience peut aussi inspirer une autre option qui s'exprime en termes de disponibilité d'information. En effet, la résilience dépend également de la conservation de la mémoire des processus et des programmes de fonctionnement d'un agroécosystème qui lui permettra de se reconstituer en cas de destruction partielle. Dans les êtres vivants, c'est le rôle du génome qui conserve les matrices de fabrication d'un grand nombre de molécules indispensables au fonctionnement métabolique. Dans un écosystème, à la suite d'une catastrophe locale, ces mécanismes de reconstitution sont mis en œuvre à la fois pour les espèces atteintes et pour les mécanismes d'interaction entre ces espèces (coopérations, symbioses, redistributions des zones de conquête), grâce à la mobilisation de la mémoire distribuée de toutes les espèces concernées (voir plus haut). Ainsi, la dispersion de proche en proche des graines des différentes espèces est un mécanisme pionnier de recolonisation d'un espace où il y a eu éradication des espèces. L'ordre de leurs réapparitions est déterminé par les concurrences et les coopérations multiples entre les espèces. Les différentes composantes de l'écosystème antérieur se réapproprient l'espace : retour des strates herbacée, arbustive et arborescente, retour d'animaux hôtes des végétaux en cohorte (insectes, oiseaux), reconstitution locale et progressive des chaînes trophiques, transport de matériaux biologiques et de bactéries par des animaux... Comme les pièces d'un puzzle, les structures et l'articulation entre elles

des différentes fonctionnalités se reforment. Les génomes et les métabolismes retrouvent leurs complémentarités. Le déploiement de ces fonctionnalités successives se fait par reconnexion des processus, l'extrant de l'un constituant l'intrant de l'autre. Les formes naturelles de coopération et de complémentarité se rétablissent. Mais le retour à la situation antérieure (par exemple le retour de la forêt après la création d'une grande clairière) n'est pas toujours assuré en cas de grandes catastrophes. Des trajectoires de développement écosystémique, qui n'ont pas tout à fait les mêmes caractéristiques que l'écosystème original, peuvent apparaître. C'est le cas si un envahisseur biologique à déploiement rapide profite de l'opportunité d'occupation.

### LA RÉSILIENCE COMME RECONSTRUCTION INTELLIGENTE DES AGROÉCOSYSTÈMES

Une autre option, qui va dans le sens de la résilience, est de reconstituer de la complexité écosystémique dans les agroécosystèmes qui, à travers le temps, ont été simplifiés, voire extrêmement simplifiés. Ce sont les agroécosystèmes actuels issus des régions de culture intensive en intrants. La complexité recherchée est liée à la diversité des espèces et des interactions entre elles. Par exemple, les arbustes constitutifs des haies, dans des paysages agricoles, sont autant d'habitats et de refuges pour nombre d'insectes et d'oiseaux divers, lesquels peuvent constituer des prédateurs pour d'éventuelles espèces de ravageurs des cultures. On les appelle alors des auxiliaires. En plantant des haies dans les grandes cultures ainsi « calculées » pour leur effet de bio-diversité des habitats pour les auxiliaires, on développe un nouveau compartiment d'écosystème ; il est synthétique et apporte une complexité complémentaire à l'agroécosystème

initial, ce qui confère une forme de résilience nouvelle à l'ensemble. De même, si le labour a été arrêté pendant une durée assez longue – si cela est possible –, et si des intrants biologiques lui sont apportés, le sol devient le lieu d'une reconquête par des fonctionnalités vitales : extension du réseau des mycorhizes (champignons filamenteux transporteurs d'éléments fertilisants), et retour des colonies bactériennes assurant la transformation des résidus de culture (et fabriquant de la fertilité et les structures favorables des sols). Les exemples sont nombreux où l'on peut reconstituer de la complexité.

Des instruments de politique publique y incitent déjà. L'agriculture européenne est un bon exemple. Elle a besoin de subventions pour compenser ses coûts de production qui sont élevés, comparés à ceux de pays très compétitifs ayant une structure agricole composée de très grandes exploitations avec, quelquefois, des coûts de main-d'œuvre très bas. Pour obtenir ces subventions, les agriculteurs européens doivent respecter des « conditionnalités » sur la biodiversité : avoir au moins trois cultures dans leur assolement, respecter les haies, les cours d'eau ainsi que tout ce qui peut constituer un réservoir de biodiversité dans une proportion de surface normée. Un autre instrument est le Fonds français pour l'environnement mondial (FFEM) qui finance un complément dans des projets de développement de manière à ce que ces projets soient vertueux au titre de l'environnement : lutte contre le réchauffement climatique, contre les pertes de biodiversité, contre la désertification et les pollutions. Beaucoup de projets sont destinés à protéger les agroécosystèmes et les écosystèmes naturels dans des réserves de biosphère en favorisant un tourisme intelligent et amateur d'écologie dont les recettes alimentent la gestion des parcs et la durabilité des exploitations agricoles présentes. Mais de plus en plus souvent, sont financés des projets où l'on

enrichit les agroécosystèmes de manière systématique par la diversité des productions, les aménagements écologiques, le recours à des méthodes biologiques... Cette amélioration est dès lors rémunérée par les ventes de produits et peut donc faire du marché un mécanisme environnementalement vertueux.

### LA RÉSILIENCE PAR LA REDONDANCE

Une autre option, allant encore dans le sens de la résilience, est la redondance et la duplication des fonctionnalités utiles. Si l'une vient à être indisponible, une autre peut suppléer à la même tâche. Dans un écosystème, par exemple, plusieurs espèces peuvent avoir des fonctions identiques : il peut exister différents parasites pour une seule et même espèce. La disparition de l'une d'entre elles n'a pas d'effets d'ensemble significatifs dès lors qu'il y a remplacement par une autre. Cela peut être très utile dans le cas où l'on essaye de multiplier les possibilités de prédation des pucerons par des espèces variées et intervenant à des moments différents (coléoptères, hémiptères). En Bretagne, par exemple, dans des cultures de choux régulièrement attaquées par une variété de pucerons, des agriculteurs ont mis au point un dispositif écologique très intelligent<sup>1</sup>. Dans la parcelle de choux, ils cultivent aussi des féveroles qui attirent une autre variété de pucerons assez tôt dans la saison. Se développent alors des populations de punaises prédatrices de ces pucerons qui sont abritées dans des fossés voisins (infrastructure écologique à protéger comme habitat utile). Une fois ces pucerons détruits, les punaises se retournent

---

1. Voir Griffon, *Qu'est-ce qu'une agriculture écologiquement intensive ?*, Quae, 2014.

## DE LA RÉPARATION ÉCOLOGIQUE À LA RÉSILIENCE

contre les pucerons des choux dès qu'ils apparaissent et les détruisent à leur tour. Les punaises s'ajoutent aux autres prédateurs (c'est là que se trouve la redondance). On a ainsi évité l'emploi de molécules insecticides pouvant présenter certains dangers. Et un « compartiment complémentaire synthétique d'écosystème » (fossés-punaises-pucerons des féveroles-féveroles) a été créé qui engendre de la complexité et de la résilience. De plus, c'est un mécanisme biologique qui fonctionne comme une assurance, à la différence que l'assurance répare alors que, dans le cas d'espèce, elle permet d'éviter un dommage.

En résumé, la dégradation de l'anthropobiosphère exige la mise en place de processus de réparation quand il faut renverser une tendance, et des procédures de création de résilience pour éviter les risques. Dans tous les cas, on peut chercher parmi les très nombreux mécanismes du vivant des fonctions réparatrices, des fonctions amélioratrices et des fonctions d'assurance, l'ensemble concourant à la résilience. C'est là une première approche de l'intensification écologique.



## CHAPITRE VII

# DE LA RÉSILIENCE À L'INTENSIFICATION ÉCOLOGIQUE

Partant de la réparation et de l'amélioration des agro-écosystèmes, on a suivi le fil de leur résilience. Trois mécanismes concourent à la résilience : établir des stocks et des réserves pour constituer des marges de flexibilité en cas de choc dans l'environnement, multiplier les agents afin d'accroître la distribution de l'information entre eux et ainsi de faciliter la reconstitution naturelle des fonctionnalités, et établir de la complexité écosystémique et notamment de la redondance. Tous ces mécanismes – ou fonctionnalités – sont dans la nature. Il suffit d'en piloter les flux, et de s'en inspirer en imitant la nature par des innovations. En aggradant, c'est-à-dire en luttant contre la simplification et la dégradation des écosystèmes, on rétablit des fonctionnalités utiles qui étaient dégradées ou avaient disparu. Les fonctionnalités apparaissent donc comme une clé pour gérer la résilience des agroécosystèmes et leur niveau d'intensité de fonctionnement. C'est donc un concept central.

### LA FONCTIONNALITÉ : UN CONCEPT CLÉ

Pour représenter le fonctionnement d'un écosystème, le plus simple est de décrire ses différentes entités (sol, eau, plantes, insectes...), et leurs relations fonctionnelles (les relations entre les ions du sol et les racines des plantes, la relation de parasitisme d'une chenille par un autre insecte, les relations à l'origine de l'attaque des feuilles des plantes cultivées par des champignons microscopiques...). Cette représentation en entités et en relations décrit le fonctionnement de l'écosystème. Pour structurer toute l'information qui correspond à ces multiples relations de fonctionnement, on peut identifier des fonctions et des familles de fonctions et en faire un classement. Une fonction peut, par exemple, être le « parasitisme d'une espèce de champignon (comme une rouille) sur une espèce de céréales (comme le blé) », et cette fonction appartient à l'ensemble des « maladies cryptogamiques », terme que l'on peut qualifier de fonctionnalité. Autre cas de figure, l'ensemble des formes de décomposition de la biomasse au niveau du sol par des insectes et des champignons constitue une fonctionnalité que l'on peut appeler « décomposition de la biomasse ». On peut aussi identifier une catégorie plus générale qui agrège certaines fonctionnalités pour composer une « métafonctionnalité ». En l'occurrence, la métafonctionnalité « structuration du sol » comprend les fonctionnalités « effet matière organique », « effet litière », « effet prairie », « effet labour » qui concourent à la structuration permanente. Afin de faciliter la compréhension de l'ensemble d'un agroécosystème, on peut donc le décrire en termes de fonctionnalités et envisager trois niveaux de généralité, dans la description du fonctionnement, du plus spécifique au plus générique : fonction, fonctionnalité et métafonctionnalité. On peut aussi imaginer un quatrième niveau de classement renvoyant

classiquement aux compartiments d'un écosystème (sol, réseaux trophiques...). Inversement, il est toujours possible de descendre à des échelles de généralité plus fines renvoyant à la représentation en termes physico-chimiques, qui permettent de rendre compte de phénomènes avec précision. Par exemple, on peut représenter la photosynthèse – une fonctionnalité – par une série d'équations chimiques.

Le concept de fonctionnalité est une représentation commode pour l'esprit, plus qu'une réalité qui s'imposerait structurellement, mais le découpage en fonctionnalités correspond à des sous-ensembles des écosystèmes qui ont du sens. Une fonctionnalité peut donc être vue comme un ensemble de processus enchaînés, avec un commencement et une fin, et des frontières précises : la photosynthèse est classiquement représentée commençant avec les photons issus du soleil et le dioxyde de carbone de l'atmosphère, et se terminant par la constitution de macromolécules hydrocarbonées qui sont des « briques » pour les fonctionnalités suivantes.

Cette représentation permet de repérer les phénomènes de dégradation entropique d'une fonctionnalité. Par exemple, la fonctionnalité « structure du sol » se dégrade avec la destruction partielle de la matière organique associée aux argiles. De la même façon, cette représentation permet de qualifier les phénomènes d'aggradation : la remontée du taux de matière organique contribue inversement à associer l'argile et l'humus et à structurer le sol en lui conférant plus de porosité. On peut donc raisonner en termes de fonctionnement et de fonctionnalité. Mais, pour une même fonctionnalité, ce fonctionnement peut aller dans un sens soit avantageux, soit désavantageux pour la production recherchée. En termes thermodynamiques, la structure du sol – pour rester dans le même cas de figure – peut être vue comme une structure dissipative dont le contenu en énergie

s'élève, lorsqu'elle est de plus en plus approvisionnée en matière organique, en même temps que s'élève le niveau d'organisation du complexe argilo-humique ; au contraire, son entropie augmente en cas de réduction de l'apport en matière organique, ce qui se traduit par une déstructuration et un tassement.

Certaines fonctionnalités peuvent avoir des effets uniquement positifs ou des effets uniquement négatifs, par rapport aux objectifs des producteurs. Par exemple, toutes les plantes – y compris les plantes cultivées – sont des habitats *sensu lato* pour des espèces vivantes : animaux supérieurs comme les petits rongeurs, insectes, nématodes (vers), bactéries, champignons microscopiques... « Être un habitat » est une fonctionnalité naturelle mais ses effets (maladies dues aux champignons, dégâts des rongeurs...) peuvent contredire le sens que les producteurs veulent donner au fonctionnement de l'agroécosystème. Si l'objectif n'était pas de privilégier certaines espèces – les espèces cultivées –, ces fonctionnalités, qui sont combattues, ne seraient pas considérées comme ayant des effets négatifs. Dès que l'on fixe un objectif à l'agroécosystème, on lui donne un sens général et les fonctions existantes se positionnent comme positives ou négatives par rapport à ce sens.

Les fonctionnalités sont, par construction, liées entre elles. Elles s'enchaînent : à la fonctionnalité « décomposition de la biomasse dans le sol » succède la fonctionnalité « humification » qui produit des macromolécules humiques, et à celle-ci succède la fonctionnalité « minéralisation » qui produit les ions assimilables par les racines des plantes. En réalité, la totalité des fonctionnalités participe à des enchaînements, mais quelquefois aussi à des boucles et à des réseaux de relations. L'architecture générale de l'ensemble est une structure dynamique qui s'édifie grâce à la ressource énergétique fondamentale qu'est le soleil, et

se détruit par entropie. Entre les deux se construit et se déconstruit un échafaudage complexe de fonctionnalités. Ces enchaînements et ces boucles aident à comprendre les évolutions régressives générales, la dégradation d'une fonctionnalité pouvant entraîner la dégradation d'une autre. De même, l'aggradation d'une fonctionnalité peut entraîner l'aggradation d'une autre, ce qui est susceptible de concourir à une aggradation générale.

Dégradation et aggradation sont susceptibles de revêtir des intensités variées et, éventuellement, de traduire des variations de flux sans conséquences structurelles importantes. Par exemple, l'absorption d'ions du sol par les racines des plantes cultivées fluctue en fonction de la quantité d'ions disponible, en conséquence la croissance de la plante est plus ou moins forte mais sans rupture de continuité. Dégradation et aggradation peuvent au contraire traduire de fortes variations de flux provenant de l'environnement et ayant des conséquences structurelles importantes avec des effets de rupture. À la suite d'une surexploitation ayant entraîné le non-renouvellement de la fertilité d'un sol, il est possible qu'un processus se crée et débouche sur l'effondrement de la structure du sol, la réduction forte de la capacité de rétention en eau de ce sol, puis l'érosion. Cette notion d'« intensité » doit donc être ici comprise comme pouvant mettre en œuvre des variables continues et discontinues (effets de seuil).

Une fonctionnalité est donc un opérateur de raisonnement qui se révèle utile et efficace pour représenter la dynamique complexe d'un écosystème. Mais sur un plan scientifique, il ne s'agit là que d'une facilité (notre capacité cérébrale étant limitée) pour tenter d'appréhender simultanément la totalité de la dynamique fine d'un écosystème. On compartimente donc le fonctionnement détaillé en sous-ensembles, sans oublier que, pour aller plus loin au plan scientifique, il faut

savoir éventuellement s'affranchir de cette représentation « anatomique » des agroécosystèmes car, comme toute étude anatomique, elle décompose ce qui est uni et elle défait, d'une certaine manière, l'objet qui est examiné.

### UN AUTRE CONCEPT : L'INTENSIFICATION

La notion d'intensif et « d'intensivité » – c'est un néologisme – est souvent mal comprise. Dans le langage courant, on qualifie d'« intensive » une agriculture qui utilise beaucoup d'intrants chimiques et éventuellement beaucoup de matériel agricole et de capitaux. Elle est l'objet d'une mauvaise réputation en raison de ses effets externes<sup>1</sup> négatifs (pollutions environnementales, toxicité...).

Souvent, dans la littérature agronomique, l'intensivité se réfère à la taille de l'unité de surface utilisée en production : est intensif ce qui fait produire beaucoup à une terre de surface limitée ; réciproquement, est extensif ce qui fait produire peu sur de grandes surfaces. Quelque part entre les deux se situe une zone grise jamais qualifiée. Dans cette acception du terme, il est clair que l'agriculture devra être de plus en plus intensive car il faudra la faire produire plus en limitant son empreinte territoriale. En caricaturant : produire plus sur les mêmes surfaces.

Dans la littérature économique agricole, la notion d'intensivité revêt un sens un peu différent. Elle se réfère souvent à des facteurs de production : « intensif en travail » signifie que l'on parle d'une agriculture manuelle fortement utilisatrice de main-d'œuvre comme celle de l'Inde ; « intensif

---

1. « Effets externes » ou « externalité » est un terme emprunté à l'économie qui signifie qu'à une action ayant un objectif visé, correspondent des conséquences non visées « externes » au champ de définition de l'action.

en capital » signifie qu'il s'agit d'une agriculture utilisant beaucoup de matériel et de capitaux comme en Amérique du Nord. Parler d'une agriculture « intensive en écologie », c'est donc simplement dire qu'elle utilise beaucoup les fonctionnalités des écosystèmes. Pour être précis, on devrait dire « qui utilise beaucoup de mécanismes naturels » (décrits par la science écologique).

Plutôt qu'intensivité, on devrait plus simplement parler d'intensité. Le terme « intensité » renvoie à la notion de « degré de tension », plus exactement au degré d'activité d'une variable dans un processus. Lorsque les variables travail, capital, information, intrants chimiques sont à haut degré d'activité, la production est intensive pour chacune de ces variables. Le haut degré d'activité ne peut être défini que par rapport à une situation de référence que l'on peut qualifier de « nominale », terme utilisé pour désigner des situations neutres, ce qui est un concept flou. Ce serait, pour chaque agroécosystème, la situation de l'écosystème naturel type du zonobiome<sup>1</sup> primitif. C'est le cas d'un périmètre irrigué sahélien intensif en eau par rapport à la situation nominale qui serait celle d'un paysage sahélien typique où l'eau est rare (400 mm environ de pluies par an). De la même manière, le terme « intensité » peut renvoyer au degré d'activité d'une fonctionnalité tout entière (pas simplement un facteur de production) par rapport à une situation de référence. Par exemple, un système prairial intensif en légumineuses, comparé à une prairie naturelle, utilise beaucoup la fonctionnalité du même nom (légumineuses), caractérisée par des plantes qui, comme le trèfle ou la luzerne, ont la

---

1. Grande région écologique caractérisée principalement par les données fondamentales du climat : calendrier des précipitations, des températures et de la quantité de lumière. Exemples : zonobiome tropical sec, zonobiome méditerranéen, zonobiome boréal...

capacité de fixer l'azote de l'air pour le transformer en nitrate directement utilisable par les plantes.

La notion d'intensivité est proche de celle de productivité. La productivité mesure le rapport d'une production à un facteur de production : productivité du travail (production par heure de travail), du capital (production par euro investi), de la surface cultivée (production par hectare). L'intensivité mesure le rapport inverse : une quantité d'intrants par rapport au volume de la production : une agriculture intensive en travail se mesure en nombre d'heures pour produire une certaine quantité de biens. Une agriculture intensive en fonctionnalités écologiques a donc une utilisation élevée de fonctionnalités par unité de biens produits. Ces considérations devraient suffire pour que la notion d'intensif ne soit pas considérée comme péjorative, mais simplement comme évoquant un rapport entre des facteurs de production et un résultat. Mais l'anathème sur le mot risque d'être longtemps imprimé dans les esprits.

### INTENSIFIER ÉCOLOGIQUEMENT

Intensifier écologiquement, c'est d'abord amplifier le fonctionnement d'un agroécosystème. À ce point du raisonnement, on peut considérer comme acquis le fait qu'il est envisageable d'aggrader un agroécosystème en jouant sur le réseau des fonctionnalités qui le caractérisent. Cette aggradation consiste à établir autant que possible des stocks systémiques, à accroître dans le système les flux ayant des effets avantageux (flux de fertilité par exemple), à obtenir des améliorations structurelles en recréant les conditions nécessaires (comme en intégrant les déjections animales dans le processus productif), à enrichir le système en information, en espèces et en interrelations entre entités,

donc à enrichir la diversité et la complexité du système en vue d'une meilleure résilience et d'une meilleure capacité d'adaptation au changement.

Formulé autrement, l'ensemble des actions d'aggradation d'un agroécosystème dégradé tend à favoriser l'émergence de fonctionnalités qui avaient disparu dans l'histoire de ces agroécosystèmes à la suite de simplification et de déconstructions. Lors de l'aggradation, l'agroécosystème nouveau se reconstruit et se complète par l'émergence de fonctionnalités. C'est un mécanisme d'auto-organisation dans lequel il n'y a aucune nouveauté biologique ou écologique mais réélaboration d'une structure complète. Par exemple, l'apparition de macromolécules de matière organique dans le sol résulte de la dégradation de la biomasse végétale réalisée par des cohortes de macro et micro-organismes ; la rencontre de ces molécules avec la structure feuilletée des argiles permet l'émergence de constructions argilo-humiques améliorant la structure et la porosité du sol ; cette porosité est elle-même une propriété émergente. Dans une action d'aggradation, on se contente de créer les conditions favorables permettant à des structures, qui sont structurellement nécessaires, de se créer. Il se produit donc un phénomène de structuration qui n'est en réalité que la reconstitution d'un phénomène déjà établi dans l'histoire des mécanismes du vivant. Peut-être des conditions extrêmement favorables pourraient-elles créer de toutes pièces des processus nouveaux et inédits ? Il est difficile de l'imaginer, c'est pourtant ce que l'histoire de la vie sur Terre n'a cessé de faire tout au long de l'évolution, et il n'y a pas de raison que cela s'arrête.

Si ce qui précède est admis, l'amplification respectueuse des lois écologiques des flux d'un agroécosystème dégradé est un processus que l'on peut qualifier d'intensification écologique. Ce processus est en effet constitué, d'une

part, d'amplifications entraînant des améliorations des fonctionnalités en continu et, d'autre part, d'améliorations discontinues (émergences structurelles) dans la logique du développement des écosystèmes.

La nécessité d'accroître les rendements agricoles dans les zones cultivées, de manière à faire face à la montée des besoins et à éviter la déforestation, justifie donc cette amplification du fonctionnement des agroécosystèmes. Dès lors surgissent des questions nouvelles : dans quelles proportions cette amplification est-elle possible ? Y a-t-il des limites à l'aggradation, et donc à l'intensification, des fonctionnalités écologiques, c'est-à-dire à leur augmentation ?

### DES LIMITES À L'INTENSIFICATION ÉCOLOGIQUE ?

L'amplification ou l'augmentation des fonctionnalités, dans le cadre d'une intensification écologique, est bornée. Les doses de facteurs de production, qui sont à la fois viables et acceptables du point de vue de l'environnement, varient donc entre des bornes : des valeurs minimales qui risquent de limiter le fonctionnement et d'empêcher le renouvellement des systèmes, et des valeurs maximales au-delà desquelles débutent des effets toxiques. Le maximum viable et acceptable se situe donc avant le déclenchement de tout « effet externe » négatif. Comme exemples d'effets externes négatifs, citons toutes les formes de pollutions chimiques, les émissions de gaz à effet de serre, les excès d'eau dans le sol pouvant entraîner des glissements de terrain, l'excès de biomasse d'un pâturage par rapport à la capacité de broutage qui peut provoquer l'effondrement des plaques de neige en montagne, et même les atteintes à la beauté d'un paysage.

Pour aborder ces questions, il faut d'abord rappeler quelques fondements du fonctionnement des agroécosystèmes. Ces derniers, comme tous les systèmes dynamiques, comprennent des variables motrices, des variables de résultat, ou dites dépendantes, et des variables intermédiaires (qui dépendent d'autres et dont d'autres dépendent). Les variables motrices sont donc celles qui ne dépendent d'aucune autre : pour les agroécosystèmes, c'est le cas essentiellement de l'intensité radiative du soleil. Certaines variables sont des ressources, c'est-à-dire qu'elles sont présentes et mobilisables dans le cadre des processus fonctionnels des plantes. C'est le cas du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, des températures favorables et des ressources minérales du sol, nécessaires à la production de biomasse : eau, phosphate, potasse, nitrate, oligoéléments... Ces ressources sont internes à l'écosystème car elles sont mobilisées dans son fonctionnement, et bien qu'apparaissant comme externes, elles ne sont pas motrices. Seul le soleil constitue un moteur « externe<sup>1</sup> ».

Lorsque l'intensité solaire baisse, que les températures deviennent défavorables, et que les autres ressources arrivent à manquer, les plantes qui ne sont pas adaptées à ces changements sont agressées par leur environnement et meurent. De même, la concurrence entre végétaux pour l'accès à l'énergie solaire et aux ressources est défavorable à une partie des populations de plantes. Si une plante disposait d'énergie solaire en permanence et à forte intensité, si elle pouvait bénéficier des conditions et des ressources précitées sans contraintes ni limitations, elle ne connaîtrait (en théorie) pas de limite temporelle à sa croissance ni de limites à son développement sauf sa propre capacité à se sustenter. En effet, à partir d'une certaine hauteur,

---

1. En simplifiant car, en réalité, la géothermie intervient aussi.

les plantes rencontrent des limites internes tenant au manque de fonctionnalités adaptatives à la grande taille, par exemple, le « risque de verse » d'une céréale dont la tige n'est pas capable de supporter plus de poids ou le bris de branches d'arbre sous le poids des fruits. L'apoptose<sup>1</sup> (mort permanente programmée) n'est pas un mécanisme de mort par effondrement massif, ce n'est qu'une fonctionnalité complémentaire à la prolifération cellulaire. Il n'y a vraisemblablement pas de mécanisme général, dans un organisme, qui obéirait à une chronologie d'autodestruction programmée<sup>2</sup>. La mort résultant d'un mécanisme rapide et massif est souvent le résultat d'agressions externes. La sénescence, c'est-à-dire la progression lente de multiples changements et accidents irréversibles (vieillesse), entraîne la mort « naturelle ».

S'intéresser au vivant oblige donc à s'intéresser à la mort. La mort d'une plante survient comme conséquence normale de l'insuffisance de disponibilité d'énergie et de variables externes (climat, ressources), d'accidents, et de généralisation d'altérations irréversibles. Mais ce processus ne débouche pas que sur la mort, il débouche aussi sur la reproduction : le fléchissement de la température et le gel en hiver, l'intensité lumineuse trop faible en hiver, et des conditions externes de stress déclenchent la fonctionnalité de « montée à fleur » (pour les angiospermes) puis la « montée à graine » qui mobilise l'énergie pour produire en priorité des réserves (stocks) de survie jusqu'au retour de conditions favorables à la germination.

---

1. Mort des cellules qui est génétiquement programmée et qui est compensée dans les mêmes proportions par la prolifération cellulaire, ce qui est une illustration du caractère de structure dissipative des structures vivantes.

2. Ce point peut cependant être discuté, notamment pour les bambous (communication personnelle Cirad).

Un autre aspect des limites de l'intensification est celui de la vitesse de croissance. Il existe un rythme physiologique de croissance qui varie en fonction de la disponibilité de l'énergie solaire et des ressources. La limite supérieure à la vitesse de croissance et de développement tient au temps biologique nécessaire à la réalisation des nombreuses synthèses physico-chimiques par la plante elle-même.

Le rythme maximal de croissance d'une plante, pendant son cycle végétatif, est donc celui qui est permis à la fois par le maximum d'intensité solaire et par l'absence de limites quant aux ressources, ainsi que par le maximum de la vitesse des mécanismes métaboliques. Dans une serre où seraient totalement contrôlées des conditions maximales, le régime de croissance atteindrait donc une limite supérieure. À l'extrême inverse, dans les conditions peu maîtrisées d'une agriculture pluviale, de nombreux facteurs sont limitants : la durée du jour, la variabilité de l'intensité de l'ensoleillement, la variabilité de la température, la variabilité des disponibilités en eau et en ions nutritifs... Le facteur le plus limitant est celui qui fait plafonner les performances. La réaction naturelle des producteurs est de compenser le plus largement possible les déficits des facteurs limitants. Pourtant, les fournir en excès conduit au forçage<sup>1</sup> et aux désordres qu'il induit. En effet, lorsqu'ils sont apportés en trop grande quantité, des intrants peuvent avoir des effets de désordre et des effets de toxicité. Un excès d'engrais azoté augmente d'abord la teneur des plantes en protéines, puis un excès plus important peut entraîner une fragilisation des plantes devenues trop lourdes pour leur structure et une sensibilité à des maladies. L'excès d'engrais azoté (principalement) est

---

1. On parle de forçage quand l'un des facteurs de production, connu pour être des plus efficaces, est fourni en excès pour augmenter les rendements et entraîne, en même temps, des désordres environnementaux.

accusé de diminuer la qualité des sols, d'eutrophiser<sup>1</sup> les eaux douces, de contribuer à l'effet de serre en produisant un excès d'oxyde d'azote, d'apporter des minéraux lourds, toxiques pour les plantes cultivées et la faune, de favoriser une certaine fragilité vis-à-vis des attaques de maladies et de ravageurs, et de détériorer la qualité gustative des produits. Un excès de produits phytosanitaires passe aussi dans les eaux et dans l'atmosphère ; il accroît les risques d'exposition de la faune et des sociétés aux dangers.

On peut éviter ces situations et essayer de calculer, au plan théorique, les proportions efficaces entre facteurs de production de manière à ce qu'il n'y ait pas un seul facteur limitant et que, finalement, tous le soient, mais à un niveau de production élevé ou, à défaut, satisfaisant en prenant en compte les coûts. Mais gérer cette combinaison optimale de facteurs est techniquement difficile. L'algorithme qui vient le plus naturellement à l'esprit est celui qui permettrait de détecter à tout moment l'apparition de déficits à caractère limitant et de les réduire dans les proportions requises. Dans de telles conditions on pourrait obtenir un maximum soutenable admissible.

Ce maximum resterait un arbitrage entre le potentiel de la machine biologique de l'agroécosystème et le consentement des producteurs à maîtriser les techniques correspondantes et à en financer les coûts. C'est particulièrement clair pour ce qui concerne la défense des cultures : en plus des conditions ambiantes précitées, le potentiel maximal d'une espèce cultivée est aussi limité par les espèces végétales compétitrices ainsi que par les maladies et les ravageurs qui l'assaillent. Dans le cas d'un agroécosystème, le potentiel

---

1. L'engrais stimule le développement des plantes aquatiques et des algues qui consomment de l'oxygène et provoquent la mort d'une partie de la faune.

des plantes cultivées dépend donc souvent de la capacité des producteurs à maîtriser le contrôle des compétiteurs et des ravageurs. L'idée de leur éradication totale apparaît donc *a priori* comme logique, mais on sait aussi que c'est presque impossible dans la réalité. Aussi la réalisation du potentiel de biomasse cultivée reste-t-elle limitée par les compétiteurs. Il est donc raisonnable de se contenter d'une maîtrise partielle des compétiteurs, de telle sorte que leur effet négatif soit limité à des niveaux tolérables, ce qui est le choix de l'agriculture dite « raisonnée ».

Quels que soient les conditions réelles externes et le niveau d'artificialisation d'un agroécosystème, il existe donc, dans tous les cas, un maximum théorique de production de la biomasse dans des conditions naturelles. Dans le même zonobiome, un écosystème naturel atteint un maximum qui est contingenté par l'état du climat et de l'environnement. Dans cet état théorique maximal, il n'y a aucune perte thermodynamique dans la fabrication des structures de l'écosystème (vu comme structure dissipative). On peut le qualifier de climax théorique naturel. On se trouve dans une configuration nouvelle quand on artificialise cet écosystème pour créer un agroécosystème en lui faisant produire, de préférence à d'autres, certaines plantes cultivées et en amplifiant les variables ressources – que l'on qualifie dès lors de facteurs de production. Dans cette nouvelle configuration il y a aussi un climax, mais il est « technologique<sup>1</sup> ». Le climax technologique peut donc être augmenté si l'on amplifie le volume disponible des variables de commande qui lui sont spécifiques, c'est-à-dire les facteurs de production. Dans une serre, on peut amplifier la quantité de lumière en éclairant la nuit, et amplifier la quantité de dioxyde de carbone. Dans les conditions de

---

1. Plus exactement : un climax hybride naturel-technologique.

plein champ, on peut aussi amplifier certaines variables pour assurer, par exemple, un approvisionnement en eau supérieur à la normale saisonnière naturelle et apporter des intrants. On peut faire varier l'intensité des apports d'intrants de fertilité de manière soit à s'approcher du maximum de production du climax technologique, soit à se situer dans un volume de production intermédiaire que l'on estime satisfaisant.

### L'INTENSITÉ ÉCOLOGIQUE PERMET-ELLE DES PERFORMANCES PRODUCTIVES ÉLEVÉES ?

La première impression qui vient à l'esprit, pour tenter de répondre à cette question, provient de l'expérience historique de l'agriculture biologique et incite à penser que les performances de rendement et l'intensification écologique sont peu compatibles. Mais c'est une fausse impression. Elle est issue de l'idée ancienne que l'agriculture biologique, en renonçant à tout apport externe d'origine chimique (chimie industrielle de synthèse) et ne reposant que sur la capacité de régénération naturelle des milieux cultivés, renoncerait à accroître les rendements. En réalité, l'agriculture biologique, telle qu'elle est pratiquée dans des pays techniquement avancés, apporte des quantités d'intrants quelquefois importantes, mais ce sont des intrants biologiques. Par ailleurs, ce renoncement aux engrais chimiques de synthèse, aux produits phytosanitaires et aux médicaments l'a obligée à être très inventive en matière de technologie biologique. En cela, elle constitue une voie importante d'intensification écologique. Dans les meilleurs cas, elle atteint des niveaux de performance proches de l'agriculture conventionnelle. Mais ce n'est pas une généralité.

L'agriculture écologiquement intensive cherche à produire un maximum et ne se prive pas de solutions de tous ordres, mais environnementalement et écologiquement viables. Cela amène à privilégier les voies écologiques et biologiques, mais sans s'interdire celles issues de la chimie de synthèse, à la condition qu'elles soient compatibles avec les premières. La réponse à la question du niveau des performances, et de leur caractère suffisant ou non, reste donc difficile à documenter. Les modèles de prospective et les estimations existantes<sup>1</sup> concluent à une réponse positive à la question : « L'agriculture écologiquement intensive pourrait-elle nourrir le monde ? », mais à la condition de limiter les besoins alimentaires des sociétés et donc de réduire, à l'échelle mondiale, la consommation de viandes produites à partir de grains qui utilise beaucoup d'espace. À dire vrai, il n'y a pas encore, au cours des années 2010, d'estimation qui soit absolument indiscutable. Cependant, il existe de nombreuses situations de terrain qui incitent raisonnablement à l'optimisme comme certains projets l'ont démontré au Sahel. Dans les régions sèches, les techniques multiples de récupération de l'eau sont à la base de performances significatives. Dans les régions tropicales de savanes, les techniques agroécologiques<sup>2</sup> nouvelles peuvent exploiter les capacités productives élevées des terroirs, c'est le cas au Brésil. Dans les zones tropicales humides, les modèles de production en écologie intensive sont encore trop peu nombreux, mais ceux qui existent sont très prometteurs car les conditions de milieu sont extrêmement favorables aux techniques proposées. Enfin, dans les régions tempérées chaudes ou froides, la recherche met au point des solutions

---

1. Agrimonde de l'INRA et du Cirad, travaux de Solagro, « Nourrir la planète » (Griffon).

2. Agroécologie est le terme employé de plus en plus internationalement pour désigner les techniques agricoles fondées sur l'écologie.

## ÉCOLOGIE INTENSIVE

agroécologiques novatrices qui permettent d'espérer des rendements au moins équivalents à ceux de l'agriculture conventionnelle.

### DES TECHNOLOGIES COMPATIBLES AVEC L'ÉCOLOGIE

Amplifier écologiquement, c'est aussi créer des fonctionnalités artificielles. Dans un agroécosystème, à côté des fonctionnalités naturelles, ou hybrides entre naturelles et technologiques, coexistent des fonctions et des fonctionnalités totalement artificielles, créées par les producteurs. Elles sont destinées à privilégier les espèces « cultivées » par rapport aux autres espèces. Comparé à un écosystème naturel, un agroécosystème confère donc un sens de fonctionnement aux fonctionnalités, ce qui, comme on l'a vu, donne des valeurs positives (recherchées) et négatives (combattues) aux phénomènes naturels. Les fonctionnalités hybrides peuvent être des adaptations *a minima* des fonctionnalités naturelles : introduire des larves de coccinelles sur des invasions de pucerons, c'est utiliser une fonctionnalité naturelle manipulée au service des objectifs recherchés, autrement dit, éliminer les pucerons qui ravagent les plantes cultivées. On ne fait alors que créer, localement et artificiellement, des événements naturels qui sont aussi possibles ailleurs de manière naturelle. Autre exemple, pour lutter contre les insectes, l'utilisation de phéromones sexuelles (qui sont des hormones naturelles de reconnaissance entre mâles et femelles) en les associant à des pièges : les mâles sont attirés par les hormones femelles et se retrouvent fixés par une substance collante ; c'est un moyen de protection des cultures contre les insectes combinant une fonctionnalité naturelle et une technique (le piège collant). Dans ce cas,

il y a association opportune de fonctionnalités naturelles, ou quasi naturelles, et artificielles.

Des fonctionnalités artificielles peuvent toutefois être totalement inventées et non issues de fonctionnalités naturelles. Le labour avec charrue est ainsi un moyen artificiel de créer de la structure dans un sol – une certaine porosité – dans le but de favoriser l'installation des racines des plantes cultivées. La pratique du labour n'a pas été inventée en regardant œuvrer les vers de terre. Autre cas, la pose de filets sur les arbres fruitiers des vergers pour empêcher l'accès aux insectes ravageurs est aussi un moyen totalement artificiel. Les techniques et la technologie peuvent dès lors apparaître aussi comme des fonctionnalités, certes, mais des fonctionnalités artificielles.

Au total, l'ensemble des fonctionnalités naturelles, artificielles et hybrides naturelles-artificielles constitue une matrice de relations de fonctionnement entre toutes les entités des agroécosystèmes. Plus la technologie évolue, plus on passe d'un écosystème à fort contenu naturel, à un agroécosystème à fort contenu technologique. Cette transformation des écosystèmes en agroécosystèmes peut être considérée comme faisant partie du processus d'intensification car c'est la totalité de la transformation de l'écosystème qui est mise au service des objectifs de production.

Cependant, si la « déformation » de l'écosystème initial qui est imposée par la technologie est destinée à orienter le fonctionnement de certaines fonctionnalités naturelles dans le sens d'une aggradation, elle peut aussi aller dans le sens d'une dégradation. Par exemple, une irrigation en climat chaud est utile en riziculture, mais irriguer avec des eaux légèrement salées peut entraîner, au fur et à mesure de l'évaporation, la constitution lente d'une croûte salée superficielle au détriment des plantes irriguées, ce qui est le cas dans la plaine Indo-Gangétique.

## ÉCOLOGIE INTENSIVE

### PEUT-ON ASSOCIER TECHNIQUES ÉCOLOGIQUES AMPLIFIÉES ET APPORTS ARTIFICIELS ?

L'agriculture biologique considère généralement comme incompatibles les techniques « biologiques » et les techniques conventionnelles qualifiées de « chimiques ». L'écologie intensive pose les mêmes questions et entend y répondre, non sur la base de choix *a priori*, mais de résultats de recherche. Peut-on, par exemple, assurer la fourniture de nitrate par la voie naturelle (soit, les bactéries *Rhizobium* qui utilisent l'azote de l'air) en même temps qu'avec du nitrate issu de l'industrie chimique ? Si c'est non, on est dans l'univers de l'agriculture biologique qui est écologiquement intensive mais avec des intrants naturels exclusivement. Si c'est oui, on est aussi dans une agriculture écologiquement intensive, mais ouverte à toute solution à la condition qu'elle ne génère pas, ou peu, d'externalités négatives. Comme externalités négatives, citons les excès de nitrates dans les eaux quelle qu'en soit l'origine (biologique ou engrais), l'apport et l'accumulation de métaux lourds contenus dans des engrais phosphatés comme le cadmium, ou l'apport et l'accumulation de sels de cuivre dans les sols des vignes. D'une manière générale, toute espèce chimique subsidiaire apportée régulièrement dans un sol, ou dans un écosystème, où elle s'accumule est susceptible de devenir un polluant persistant. C'est dans ce problème de pollution que réside une éventuelle incompatibilité entre les apports issus de l'industrie chimique, ou des gisements minéraux, et le fonctionnement d'un agroécosystème utilisant les ressources locales (éléments issus des profondeurs du sol, azote issu de la fixation symbiotique naturelle). Il convient donc d'évaluer la situation au cas par cas. Mais

il n'y a pas de raisons scientifiques à refuser, par principe, les intrants d'origine chimique car la production chimique n'est pas un danger en elle-même.

### UNE CONCEPTION ÉLARGIE DES RESSOURCES POUR L'INTENSIFICATION ÉCOLOGIQUE : LE RECYCLAGE

Amplifier les fonctionnalités de manière à produire plus, à l'échelle de toutes les agricultures, pose un problème : pour amplifier il faut accroître les flux entrants dans les agro-écosystèmes et donc importer des ressources. Sinon, on est réduit à des performances nécessairement limitées aux éléments minéraux du sol. À moins d'inventer une intensification augmentée de la formation des sols, à partir de la roche mère – ce n'est pas impossible –, on est condamné à chercher des ressources ailleurs pour faire des transferts de fertilité. Quelle est l'ampleur des besoins ? Les ressources qui sont nécessaires pour l'amplification sont : l'eau là où elle manque, les principaux éléments nutritifs des plantes, c'est-à-dire l'azote, le phosphore et la potasse, des oligoéléments (magnésium, fer, manganèse, zinc, cuivre...) et le carbone pour structurer le sol. Il n'y a là rien de nouveau par rapport à l'agriculture conventionnelle. Ce qui est nouveau dans une agriculture écologiquement intensive, c'est la nécessité de limiter les exportations hors du système sol et les gaspillages en recyclant localement, le plus possible, les ressources.

Tout doit être pensé et aménagé pour que l'eau s'infilte. Elle doit être canalisée dans des impluviums ou fixée par des couvertures végétales au lieu de ruisseler et de repartir rapidement dans les rivières, les fleuves et les océans. C'est encore plus vrai pour ce qui concerne le carbone. Fixer le carbone dans les sols devrait devenir une obligation vitale. La première raison est que la photosynthèse, en produisant

de la biomasse, retire du dioxyde de carbone à l'atmosphère et contribue à réduire le réchauffement climatique. La deuxième raison est que le carbone du sol, le plus souvent sous forme de matière organique, fixe l'eau et les ions, évite leur lessivage et confère aux agroécosystèmes une certaine fertilité résiliente.

Au total, les agroécosystèmes devraient concentrer le recyclage des éléments qui assurent leur renouvellement de manière à amplifier leurs flux. Dans certains cas, cela devrait se traduire par une accumulation : accumulation sur longue période de carbone-matière organique dans le sol, accumulation d'ions et d'eau renouvelables dans une couche fixatrice à base de matière organique (un nouvel horizon pédologique). Cependant, une partie des ressources sera systématiquement exportée vers les humains et les animaux. Cette partie-là devra elle aussi être recyclée au maximum. L'agriculture devrait donc être pensée, à l'échelle de l'anthropobiosphère, comme s'inscrivant dans les grands cycles biogéochimiques de la planète.

### ALLER PLUS LOIN DANS L'INTENSIFICATION ÉCOLOGIQUE : LA BIO-INSPIRATION

Comme on l'a vu, il n'est pas certain que l'intensification écologique fondée sur la simple amplification des fonctionnalités productives utiles soit pleinement suffisante pour produire les quantités de biomasse nécessaires aux sociétés du futur. Il faut donc essayer de trouver des solutions complémentaires. C'est ce que permet la bio-inspiration, qui n'est rien d'autre que l'utilisation des fonctionnalités naturelles comme source d'inspiration pour créer des solutions nouvelles. Pourquoi cette voie ? La nature est le résultat, après plus de 700 millions d'années, de l'enchaînement

de solutions adaptatives qui ont été sélectionnées parmi quantité d'autres possibilités. Il s'agit, avec la bio-inspiration, d'explorer essentiellement des solutions proches de ce qui existe et non des modifications importantes et aventureuses de génome par exemple. Cela n'est vraisemblablement pas nécessaire. On sait d'ailleurs qu'une légère variation dans un gène existant peut améliorer le rendement d'une fonctionnalité ou en créer une autre qui serait utile. On peut donc penser que la variabilité spontanée de la nature aurait pu produire elle-même certaines solutions qui auraient pu être sélectionnées par l'évolution, mais ne l'ont pas été sans raison apparente. Si l'on prenait l'ensemble des génomes du vivant et que l'on envisage, sur 700 millions d'années, le nombre des possibilités de mutation génétique qui auraient pu se produire, ce nombre des possibles serait tellement immense que, comme le dit Christian de Duve<sup>1</sup>, si la nature jouait à la loterie, le nombre de fois où elle jouerait serait si élevé qu'elle serait assurée de gagner souvent. On peut donc estimer que, dans des cas où l'on ne trouve pas d'autres solutions, il n'est pas téméraire d'explorer des modifications de génome inspirées par ce qui existe déjà dans la nature. Ce qui serait bien moins que marginal. Mais leur proximité avec des mécanismes du vivant existant ne peut, bien évidemment, en aucun cas les exonérer de respecter les procédures de prudence et de précaution nécessaires pour leur invention.

Les hypothèses d'invention par bio-inspiration sont nombreuses. Un premier exemple emprunté au domaine de la défense des cultures est l'allélopathie. C'est une propriété qu'ont certaines plantes d'empêcher le développement d'autres plantes dans leur très proche voisinage, ou sur le même lieu, pendant au moins un cycle végétatif. De

---

1. Christian de Duve, *Singularités*, Odile Jacob, 2005.

nombreuses observations et inventaires ont été faits en Inde sur ce phénomène. Le nombre d'espèces concernées est très important ; il s'agit donc d'une fonctionnalité très répandue. L'un des mécanismes de l'allélopathie repose vraisemblablement sur l'émission d'une substance par la partie aérienne, ou par la partie racinaire, de la plante qui se protège ainsi de la concurrence des autres plantes pour la lumière ou pour les éléments minéraux du sol. Cette substance doit donc être reconnue par la plante candidate à l'installation voisine ou à une installation ultérieure, et doit déclencher chez celle-ci un processus d'inhibition de la croissance ou un autre processus à caractère toxique. Ce processus, dès lors qu'il est identifié pour certaines espèces, est quelquefois directement utilisable comme tel. Entre autres, on sait depuis longtemps qu'une culture d'avoine « nettoie » une parcelle d'une part notable des plantes adventices. En Inde, les cultures légumières utilisent beaucoup ces propriétés. L'usage de cette fonctionnalité qu'est l'allélopathie, et particulièrement cette fonction désherbante de l'avoine, peut être vu comme faisant partie du concept d'augmentation écologique décrit plus haut, dès lors qu'on l'utilise pour favoriser les plantes cultivées par rapport à d'autres. Mais, outre cet usage connu, ce mécanisme peut inspirer la recherche d'autres usages. Si, par exemple, on identifie le mécanisme chimique en cause ainsi que les molécules qui le caractérisent, on peut espérer trouver par imitation un nouveau produit herbicide efficace, ou découvrir dans la structure moléculaire utile une fonction chimique qui pourrait être à la source d'une nouvelle famille de produits de synthèse.

Un deuxième exemple du domaine de la défense des cultures est celui des relations entre les insectes ravageurs et les plantes qu'ils attaquent. Il est vraisemblable qu'il existe un mécanisme produisant une substance chimique propre

à la plante, reconnue par l'agresseur, et qui déclenche son attaque sur la plante. Mais il existe certainement aussi un mécanisme interne à la plante agressée qui reconnaît l'agression (qui produit généralement une molécule spécifique) et qui déclenche un processus métabolique aboutissant à chasser ou à tuer l'agresseur. L'agression a alors stimulé l'activation d'une défense naturelle. On peut espérer identifier les différentes molécules en cause dans de tels mécanismes et tenter de les reproduire ou de créer des molécules possédant une fonction équivalente. La gamme des solutions possibles inspirées par les mécanismes biologiques est sans doute très large. Elle permettrait, en autres, d'utiliser une molécule attirant les agresseurs dans un lieu donné, ce lieu étant une zone où on les tue par un moyen classique mais très limité dans l'espace (approche « chirurgicale » du traitement dans des « killing zones »). On peut aussi espérer recréer la molécule, dite « molécule élicitrice », déclenchant la réaction de défense de la plante, et l'utiliser en cas de début d'épidémie des agresseurs pour l'enrayer. On peut encore espérer produire la molécule qui chasse ou tue directement l'agresseur, c'est-à-dire un nouvel insecticide.

Un troisième exemple, lui aussi issu de la défense des cultures, est celui des relations entre les agresseurs des plantes et leurs prédateurs. Il y a, là encore, un véritable « langage chimique » entre proies et prédateurs. La proie est reconnue grâce à un mécanisme chimique par le prédateur qui l'attaque. Le seul fait d'identifier proies et prédateurs permet déjà d'organiser une lutte biologique, c'est-à-dire élever des prédateurs et les lâcher quand sortent leurs proies, lesquelles sont les agresseurs des plantes. On peut aussi « installer » les prédateurs dans l'écosystème en leur assurant l'habitat qu'ils reconnaissent (des plantes spécifiques) et l'alimentation qui leur correspond (les proies). Mais on

peut également espérer identifier les molécules d'attraction des prédateurs et les reproduire pour les « convoquer ».

L'histoire des espèces étant une suite d'élaborations de mécanismes d'attaque et de défense naturelles, il existe vraisemblablement de nombreux processus disponibles pour inspirer une nouvelle solution aboutissant à une production industrielle de synthèse. Il faut seulement espérer qu'il s'agisse de processus récents dans l'histoire de l'évolution, donc diversifiés et nombreux, car s'il s'agissait de mécanismes anciens, ils seraient dès lors moins nombreux<sup>1</sup>, ils auraient un caractère plus générique (atteignant beaucoup d'espèces) et seraient donc potentiellement plus dangereux. Ils constitueraient donc une source d'inspiration limitée.

Un quatrième exemple de bio-inspiration, d'une tout autre nature, est l'invention de molécules de synthèse capables de fixer des volumes très importants d'eau. Leur caractère « d'éponge » synthétique devrait permettre de constituer, en mélange dans les sols, une couche active de mise en réserve d'eau qui pourrait être chargée d'ions nutritifs. Cette couche pourrait également accueillir du carbone séquestré, comme du « biocharbon », issu de la pyrolyse ou de la torréfaction de biomasse, et dont les composés fixent aussi les ions fertilisants. Il sera peut-être ainsi possible de fabriquer un nouvel horizon pédologique hydrophile à caractère nutritif et anti-lessivage des sols.

Les produits de synthèse qui résulteraient d'une simple imitation présenteraient l'avantage d'exister déjà dans la nature, ce qui signifie que les processus métaboliques permettant leur décomposition existent vraisemblablement. Ce n'a pas été le cas pour de nombreuses molécules destinées à l'agriculture produites *ex nihilo* et dont on ne

---

1. Il y a moins de branches, donc de gènes, quand on se rapproche du tronc ancien de l'arbre de l'évolution.

connaît toujours pas aujourd'hui les effets potentiels. La bio-inspiration est de ce point de vue plus rassurante que l'invention « tous azimuts » ; pourtant, même naturels, les produits bio-inspirés peuvent être dangereux. En effet, la nature n'est pas fondée sur un principe de non-toxicité pour les humains ; elle a produit les plus épouvantables des poisons. L'industrie chimique est consciente des avantages potentiels de la bio-inspiration et l'utilise déjà, de préférence à la recherche issue d'explorations aléatoires d'autrefois. En matière d'insecticides, les entreprises ont produit des pyrèthri-noïdes imitant les pyrèthres, des pyrèthrines issues de plantes, ou les nicotinoïdes et néonicotinoïdes issus de la nicotine du tabac, utilisée autrefois. Cependant, ces produits sont peu à peu retirés du marché en raison des risques : la bioinspiration qui a présidé à la découverte des néonicotinoïdes n'a pas empêché leur toxicité pour les abeilles.

Enfin, il faut signaler le potentiel exceptionnel de la chimie bio-organique pour proposer des solutions à de nombreux problèmes. En effet, les équations qui caractérisent le vivant ne sont pas seulement faites de constituants majeurs comme l'eau, le dioxyde de carbone, l'azote, le phosphore... mais aussi de métaux qui, même en très faibles quantités, sont des constituants des enzymes, lesquels possèdent les capacités de transformation étendues de la biomasse<sup>1</sup> et sont souvent oubliés. De ces très nombreuses équations peuvent émerger des idées utiles.

---

1. Marc Fontecave, « Chimie des processus biologiques : une introduction », leçon inaugurale au Collège de France du 26 février 2009. « Sans magnésium, calcium et manganèse qui constituent des éléments essentiels de la photosynthèse des végétaux et des algues, il n'y a pas l'oxygène et la matière organique qui nous alimentent en énergie, et c'est grâce au fer et au cuivre de nos oxydases que nous savons, par la respiration, utiliser cette ressource pour notre propre compte, tout en redonnant à la nature le dioxyde de carbone qui lui est nécessaire. »

## ÉCOLOGIE INTENSIVE

Imiter la nature est donc une opportunité pour développer de nouvelles idées. La connaissance du génome des plantes et des animaux, ainsi que des métabolismes en cause, va multiplier les opportunités d'invention. Il s'agira donc bien d'une amplification des moyens d'action biologiques et écologiques. Mais tout cela restera contrôlé par la nécessité d'évaluer des molécules par les procédures habituelles d'Autorisation de mise en marché (AMM).

Amplifier et augmenter les flux des agroécosystèmes n'est pas tout ce qui peut être fait pour obtenir une production plus importante. D'autres phénomènes plus complexes peuvent être activés.

## CHAPITRE VIII

# L'AGRICULTURE ET LA GESTION DES AGROÉCOSYSTÈMES DANS LE MODE DE LA COMPLEXITÉ

Lorsque l'on évoque les structures dissipatives à propos des écosystèmes, il ne s'agit pas seulement de structures qui lient des fonctionnalités l'une à l'autre, à un même plan d'interaction et d'agrégation. Se trouvent aussi des relations à un niveau plus agrégé, comme celles qui existent entre le vaste ensemble des fonctionnalités relatives aux végétaux et le vaste ensemble des fonctionnalités d'un troupeau. Ce qui se passe à ce niveau d'agrégation (par exemple du surpâturage par un troupeau) est déterminant pour ce qui se passe à un niveau désagrégé (perte de productivité de l'herbage pour ce qui touche au peuplement végétal, et sous-alimentation du troupeau pour ce qui touche aux animaux). On rencontre aussi des phénomènes en boucle (comme on l'a vu) conférant des propriétés particulières intéressantes, comme une boucle d'accumulation de fertilité d'un sol. Il peut s'agir de boucles à effets positifs et négatifs, mais aussi de boucles de rétroaction qui induisent des régulations, telle la régulation du nombre des surmulots en cas de surcharge démographique par le suicide<sup>1</sup>. L'ensemble de ces « étages »

---

1. Edward T. Hall, *La Dimension cachée*, Seuil, 1971.

de mécanismes est une forme de complexité. L'utilisation intelligente de cette complexité, quand elle est possible, fait partie de la notion d'intensification. À condition de pouvoir simplifier.

### UN GRAND NOMBRE DE VARIABLES DE COMMANDE IMPLIQUE DE LES CLASSER

La complexité d'un agroécosystème tient d'abord au grand nombre des variables et des fonctions qui sont en jeu. La représentation en termes de fonctionnalités est destinée à limiter le nombre des objets à prendre en compte. Cela correspond à une recherche dite de « simplicité<sup>1</sup> », c'est-à-dire une déconstruction de la réalité complexe pour la ramener à des représentations intellectuellement accessibles. Pour cela on a distingué, dans l'ensemble des fonctionnalités, trois niveaux de généralité : les fonctionnalités elles-mêmes, les métafonctionnalités, et les fonctions. Le tableau 1, page ci-contre, dresse une liste simplifiée de métafonctionnalités (environ 50) et de fonctionnalités (ici environ 130 mais on pourrait vraisemblablement en dénombrer plusieurs centaines). Il n'est pas complet car limité aux fonctionnalités qui sont le plus souvent citées ou à des ensembles de fonctionnalités, mais il donne une idée de la variété des mécanismes<sup>2</sup>. Les métafonctionnalités et les fonctionnalités sont présentées par grand compartiment.

---

1. Alain Berthoz, *La Simplicité*, Odile Jacob, 2009.

2. Un inventaire des fonctionnalités est en cours en 2016.

## L'AGRICULTURE ET LA GESTION...

Tableau 1 : EXEMPLES DE FONCTIONNALITÉS DES AGROÉCOSYSTÈMES

COMPARTIMENT	MÉTAFONCTIONNALITÉ	FONCTIONNALITÉ
Atmosphère	Influence du climat	Influence de la température
		Influence de la variabilité de la température
		Influence de la disponibilité pluviale
		Influence de l'ensoleillement
	Influence du paysage sur le climat	Influence de l'albédo
		Influence du couvert
	Influence des pratiques de production sur le climat régional	Effet du labour sur l'effet de serre
		Effet des émissions dues aux carburants
		Effet des pertes d'oxyde d'azote
		Effet des émissions entériques
		Effet des résidus de culture
		Effet de séquestration du carbone dans les sols
	Sol	Dynamique de la fertilité organique

## ÉCOLOGIE INTENSIVE

COMPARTIMENT	MÉTAFONCTIONNALITÉ	FONCTIONNALITÉ
	Dynamique de la fertilité organique	Constitution d'une litière par décomposition
		Humification
		Minéralisation
	Dynamique de la fertilité minérale : flux, cycles, stocks...	Rôle de la rhizosphère dans l'exploitation des réserves du sol
		Disponibilité de l'azote nitrique
		Disponibilité du phosphore
		Disponibilité de la potasse
		Disponibilité de chaque oligoélément...
	Dynamique de la structuration physico-chimique du sol utilisable	Dynamique de la constitution des complexes humus argiles
		Dynamique du potentiel redox
	Dynamique pédologique	Dynamique de l'horizon A superficiel
	Dynamique de la structure mécanique	Effet du travail du sol ou du non-travail

## L'AGRICULTURE ET LA GESTION...

COMPARTIMENT	MÉTAFONCTIONNALITÉ	FONCTIONNALITÉ
Eau	Dynamique infiltration ruissellement circulation	Effets des rugosités des couverts végétaux
		Effets des aménagements
		Effets de la circulation de l'eau sur la stabilité du sol
	Dynamique de stockage et de la disponibilité	Effets nappe phréatique
		Effets capacité rétention des sols
		Effets ETP des couverts végétaux
Plantes : physiologie	Germination Organogenèse Croissance Morphogenèse	Effets environnement sur le développement
		Effets sur la morphologie aérienne et racinaire
		Effets de catalyse
	Métabolisme de la nutrition	Nutrition hydrique
		Nutrition minérale
		Nutrition carbonée, Photosynthèse
	Catabolisme	Respiration
	Métabolisme des défenses naturelles	Dialogues moléculaires plantes bioagresseurs

## ÉCOLOGIE INTENSIVE

COMPARTIMENT	MÉTAFONCTIONNALITÉ	FONCTIONNALITÉ
		Dialogues moléculaires entre végétaux
	Métabolisme de la survie et de la reproduction	Marcottage
		Induction florale
		Fécondation Pollinisateurs
		Montée à graine
		Constitution des stocks et réserves
		Dissémination
	Sélection	Sélection darwinienne
Transfert de gènes		
Peuplement végétal	Dynamique compétition coopération	Compétition pour la lumière
		Compétition des rhizosphères
		Envahisseurs biologiques végétaux
		Allélopathie
		Holoparasitisme
		Effets de toxines de synthèse

## L'AGRICULTURE ET LA GESTION...

COMPARTIMENT	MÉTAFONCTIONNALITÉ	FONCTIONNALITÉ
Bioagresseurs	Effets de défense naturelle	Dynamique de la vigueur
	Résilience et résistance maladies cryptogamiques	Effets du climat
		Effets des successions culturales
		Effets structure du couvert
		Effets des états du milieu
		Effets fongicides
	Résilience et résistance maladies bactériennes	Effets des gènes
		Effets pH
		Effets bactéricides
	Résilience et résistance maladies virales	Effets des gènes de résistance
	Résilience et résistance aux nématodes	Effets des plantes pièges
		Effets nématocides
	Résilience et résistance aux arthropodes	Action des prédateurs et auxiliaires
		Effets des phéromones
		Effets des parasites des ravageurs
Effets insecticides		
Résistance contre les oiseaux	Action des prédateurs	
Physiologie animale	Métabolisme de la nutrition végétale	Digestion
		Préférences

## ÉCOLOGIE INTENSIVE

COMPARTIMENT	MÉTAFONCTIONNALITÉ	FONCTIONNALITÉ
	Métabolisme de la nutrition à partir de protéines animales	Digestion
	Métabolisme musculaire	Respiration et métabolisme aérobie
		Métabolisme anaérobie et fermentation lactique
		Métabolisme de l'ATP et de la créatine
		Fonctionnalité glycogénique
	Métabolisme squelettique	Fixation du calcium
	Respiration	Échange O <sub>2</sub> et CO <sub>2</sub> Hémoglobine
		Respiration cellulaire Cycle de Krebs
		Oxydoréduction et pH sanguin
	Métabolisme sympathique et régulations endocriniennes : homéostasie	Régulation de la glycémie et de l'énergie
		Régulation des voies motrices
		Régulation des voies sensibles

## L'AGRICULTURE ET LA GESTION...

COMPARTIMENT	MÉTAFONCTIONNALITÉ	FONCTIONNALITÉ
		Régulation de l'activité cardiaque et du débit sanguin
		Thermorégulation
		Régulation de la prolifération et différenciation cellulaire
		Régulation de l'immunité
	Système circulatoire	Hématopoïèse
	Métabolisme de l'excrétion	Métabolisme urinaire
		Métabolisme sudoral
	Reproduction	Naturelle
		Sélection
	Résilience et résistance aux affections et maladies	Effets de la nutrition
		Écologie des épidémies
Affections environnementales		
Troupeau et populations	Démographie	Dynamique natalité mortalité
		Dynamique démographie ressources

## ÉCOLOGIE INTENSIVE

COMPARTIMENT	MÉTAFONCTIONNALITÉ	FONCTIONNALITÉ
	Comportement et éthologie	Hierarchie et régulations
		Localisation Mouvements
	Dynamique génétique	De la sélection naturelle au brassage génétique et aux croisements
Agroécosystème	Boucle de fertilité Association agriculture élevage	Rôle des excréments
		Transferts de fertilité
	Compatibilité travail animal et fourniture d'énergie aux animaux	Assolement pour l'alimentation des animaux et pour les besoins en énergie
		Effets des travaux des animaux
Unité de production	Compatibilité alimentation humaine et ressources	Production alimentaire et stock pour les besoins

Cette liste donne une représentation éclatée de l'ensemble des fonctionnalités. En réalité, toutes ces fonctionnalités sont liées entre elles et interactives. Ces interactions peuvent être représentées sous forme de matrice ou de diagramme sagittal<sup>1</sup>.

1. Pour simplifier, une matrice est « carrée » : les fonctionnalités sont présentées verticalement et horizontalement, et les intersections comportent un 1 lorsqu'une fonctionnalité  $i$  influence une fonctionnalité  $j$ . Un diagramme sagittal exprime la même chose mais chaque fonctionnalité est représentée par une étiquette et les étiquettes sont reliées entre elles par des flèches.

Mais le grand nombre des fonctionnalités rend l'exercice pratique difficile car les agroécosystèmes sont vastes et complexes, et difficiles à symboliser sur papier. Bien qu'utile, cette représentation reste finalement assez banale. Sa principale vertu est de donner une vue d'ensemble des objets complexes qu'il faut piloter en termes d'intensification écologique. Plus qu'une liste de fonctionnalités, et même plus qu'une matrice des interrelations entre fonctionnalités, il faudrait pouvoir transcrire un diagramme dynamique de l'ensemble, conçu comme un simulateur capable de montrer les changements résultant du maniement des variables de commande. Autrement dit, c'est une figuration dynamique (images animées et tableaux de bord) qui permettrait de se rapprocher d'une représentation évoquant, pour un poste de pilotage, le fonctionnement réel des agroécosystèmes. C'est sans doute une nécessité pour l'avenir, de la même manière que, dans l'industrie, on illustre déjà les processus productifs sur écran par des schémas de flux complexes de manière dynamique.

### L'INTENSIVITÉ VUE COMME UNE SYNERGIE ENTRE FONCTIONNALITÉS AMPLIFIÉES

On a vu que les fonctionnalités étaient liées entre elles par des enchaînements. En généralisant, l'ensemble des fonctionnalités forme un réseau. Quelques-unes de ces fonctionnalités sont en position de commande du système, certaines sont en position de résultat (dépendantes), et beaucoup sont en position intermédiaire. Toutes les fonctionnalités sont susceptibles d'être amplifiées, certaines plus que d'autres. Par exemple, l'amplification de la fonction de commande « apport organique » amplifie la fonctionnalité « fertilité organique » ; l'amplification de la fonctionnalité « couverture du sol » amplifie la fonctionnalité « rugosité des couverts ». Les

fonctionnalités étant liées entre elles, toute action d'amplification sur une variable a ainsi des effets qui se répercutent à l'échelle de l'ensemble de la structure.

Une première remarque vient du nombre très élevé des leviers d'action (commandes d'entrée) pour piloter un agro-écosystème. Chacun des leviers a un (ou des) effet direct et des effets indirects. Par exemple, la fonctionnalité « nutrition » en élevage a des effets directs dans le domaine de la croissance, de la santé des animaux et de la qualité de leurs produits, ainsi que des effets indirects sur la sociologie d'un troupeau. La combinaison de nombreuses actions donne des effets complexes que nous avons du mal à percevoir. Notre cerveau a des difficultés à intégrer et à suivre toute la cinétique de ce qui se développe dans un agroécosystème, et à discerner dans ce mouvement d'ensemble les cheminements les plus efficaces pour arriver aux objectifs recherchés. Alors, faut-il investir principalement dans la nutrition ou dans le bien-être animal ou encore dans la médecine classique, pour obtenir de meilleures performances d'un troupeau ? Cela pose un véritable problème de gestion. On ne peut pas « mettre tous les leviers au maximum » d'amplification sans connaître les éventuelles externalités. Il faut savoir, notamment, si tel ou tel levier implique des décisions subsidiaires en cohérence pour d'autres leviers. Chaque levier est tributaire des autres pour les conséquences : introduire des légumineuses en grande quantité dans des successions culturales (variable principale) entraînera un apport d'azote dans le sol important, donc éventuellement polluant, ce qui impliquera de réduire les autres apports (variable subsidiaire). Le réglage d'une variable d'action a donc une influence sur le champ d'action d'autres variables, ce qui rend complexe leur maniement en particulier dans des situations de performances élevées. Des modèles de simulation utilisés « aux limites » permettraient d'explorer différents

scénarios et d'établir un inventaire de cas présentant des risques, ou des cas favorisant la résilience.

Deuxièmement, chacun des leviers étant susceptible d'avoir des effets indirects en cascade, il sera extrêmement difficile d'identifier toutes les conséquences induites. Par exemple, semer des céréales – enrobées d'insecticide – en automne peut nuire aux abeilles que l'on a voulu favoriser par des cultures à floraison tardive.

La succession des effets enchaînés peut dans certains cas provoquer une boucle de rétroaction se traduisant par une synergie. Par exemple, « un apport de compost » a un effet direct de « fertilité ». Cette fertilité, ainsi amplifiée, va contribuer à un surcroît de « biomasse » ; ce surcroît augmentera la quantité de résidus retournant au sol, ce qui fournira plus d'activité aux décomposeurs, puis aux producteurs d'humus, puis à la minéralisation de la matière organique, laquelle amplifiera la fertilité... ce qui ferme la boucle. Dans des cas de boucles amplificantes (ou synergies), comme dans ce cas présent, l'impulsion de départ aura des effets différés décrivant à plusieurs reprises la même boucle. La répétition peut créer un mécanisme d'accumulation vertueux.

Dans les agroécosystèmes, il y a au moins deux boucles importantes à effet d'accumulation. La première est celle décrite ci-dessus, qui fait que la production de biomasse et son retour partiel au sol constituent une source de fertilité organique et de structuration des sols qui sont favorables, en retour, à la production de biomasse. La boucle est particulièrement amplificatrice. Le succès est souvent au rendez-vous, en particulier dans les pratiques du jardinage en permaculture<sup>1</sup>, pratique qui est tout à fait appropriée aux contextes urbains où la biomasse recyclable est très

---

1. En permaculture, de multiples espèces de plantes sont cultivées en synergie, particulièrement dans les jardins.

importante en raison de la concentration de population et donc de la concentration des déchets.

Une autre boucle vertueuse est celle qui est introduite par l'élevage dans un système de production végétal. L'élevage consomme des végétaux en concurrence avec les humains (sauf l'herbe) mais constitue aussi un apport fonctionnel clé par l'énergie mécanique fournie permettant le travail (bœufs, chevaux de trait) pour stopper le développement des adventices (binage), pour améliorer la structure du sol (différents types de labours), pour accroître la fertilité par apport de déjections... Ce qui définit plusieurs boucles de rétroaction efficaces souvent qualifiées de « complémentarité agriculture-élevage » et particulièrement utiles dans les pays en développement où la traction attelée est importante.

Une troisième remarque tient à l'importance de la fonctionnalité concurrence-coopération au sein du peuplement végétal. Le contrôle des végétaux indésirables est une des variables clés principales de la production. Ce contrôle constitue un enjeu considérable dans la formation du résultat, c'est-à-dire le niveau de la récolte des espèces qui sont privilégiées. Ce contrôle est l'objet de vives controverses entre les partisans des herbicides et les opposants. D'importants produits herbicides efficaces, et diffusés depuis les années 1990, se sont révélés à l'origine de risques sanitaires et de risques de mutation de plantes par induction de résistances. Trouver des solutions durables fondées sur l'écologie est donc une priorité. La première voie d'application écologique qui s'impose est celle de la mise au point d'associations d'espèces cultivées, chacune ayant son utilité propre et l'ensemble ayant des propriétés synergiques, en particulier celle d'occuper tout l'espace au point d'empêcher les adventices de se développer, ce que l'on pourrait qualifier de couvertures végétales à effet « herbifuge » sélectif.

Une quatrième remarque est liée à l'importance des fonctionnalités de prédation et de parasitisme à l'encontre des espèces cultivées. Privilégier une espèce cultivée en lui consacrant de grandes surfaces, c'est déformer fortement l'écosystème initial en offrant aux ravageurs naturels, de l'espèce cultivée, un champ d'activité très étendu les amenant à proliférer, à s'installer et éventuellement à devenir des envahisseurs biologiques. Cela amène donc à entreprendre des actions d'envergure pour contrôler leur développement et défendre les cultures. Historiquement, cette défense a été pensée comme radicale au sens où elle raisonnait en termes d'élimination totale des ravageurs. Les actions d'éradication massives qui ont résulté de cette conception, comme par exemple celles qui sont permises par des produits phytosanitaires à spectre large, ne sont que des « victoires temporaires » car les ravageurs peuvent s'adapter et devenir résistants aux produits, ou bien d'autres ravageurs peuvent prendre leur place dans la niche écosystémique<sup>1</sup> laissée libre.

Une cinquième remarque découle des deux dernières. Les réseaux trophiques qui caractérisent les écosystèmes naturels tendent à s'autoréguler car l'histoire de l'évolution produit toujours des situations complexes où l'ensemble des relations de prédation, de parasitisme et de résistance aux maladies et ravageurs a pu acquérir ces mécanismes. Dès qu'un agroécosystème augmente les surfaces en cultures et perd en biodiversité, l'ensemble des réseaux trophiques concerné devient plus fluctuant. L'autorégulation est une fonctionnalité qui devient alors moins efficace, et est remplacée par des cycles de successions de pullulations (envahissements biologiques), voire d'évolutions chaotiques. Le retour à une

---

1. Pour une espèce donnée, la niche écologique est définie par le rôle et la place de cette espèce dans l'écosystème, en termes de relations avec les autres espèces (habitat, prédation, parasitisme...).

## ÉCOLOGIE INTENSIVE

biodiversité efficace est une condition nécessaire pour la réémergence de fonctionnalités d'autorégulation.

À ce point du raisonnement, nous avons décrit trois familles de méthodes d'intensification écologique : l'amplification raisonnée des flux constitutifs des agroécosystèmes, l'édification progressive d'émergences et de synergies, et l'intervention de processus artificiels bio-inspirés. Ces différentes voies doivent permettre d'accroître la production de manière durable. L'agroécosystème que l'on veut faire produire plus doit donc suivre une trajectoire viable pour aboutir à une situation cible qui soit viable elle aussi. Comment définir cette situation viable ?

## CHAPITRE IX

# UN OPTIMUM VIABLE POUR L'INTENSIFICATION ÉCOLOGIQUE

L'intensification écologique n'obéit pas à la loi du toujours plus. Elle cherche à produire raisonnablement plus, là où c'est raisonnablement nécessaire pour les populations, en respectant les lois écologiques de la viabilité. Au-delà de ces lois, produire plus, c'est polluer et risquer la destruction d'un écosystème.

### LES PERFORMANCES DE PRODUCTION DES AGROÉCOSYSTÈMES

La tendance des sociétés est de tirer les performances de production des agroécosystèmes vers l'extrême. La décision économique tend spontanément à maximiser (les marges ou le chiffre d'affaires) en reléguant au second plan les autres performances (comme la qualité) ou les obligations de viabilité (comme la sauvegarde de l'environnement). Dans le domaine de l'agriculture, la maximisation est un comportement bien ancré. Il provient vraisemblablement de la perpétuelle course de vitesse entre l'augmentation des besoins, liée à la croissance démographique, et la progression de la production. Il est aussi, bien évidemment, lié à la recherche

de profit et, plus généralement, à ce désir qui se trouve au fondement de nos besoins et qui est par nature infini. Cette tendance à la recherche irrépressible d'un maximum est de nature à favoriser le forçage des agroécosystèmes (voir p. 149) et, d'autre part, à occulter l'obligation de respecter les conditions de renouvellement des ressources naturelles et, donc, le fonctionnement de la nature. Les exemples sont nombreux. Ainsi, en 1984, à la veille de l'adoption des quotas laitiers en Europe, les éleveurs bretons s'attendaient à obtenir des quotas proportionnels à leur production courante. Ils ont donc accru leur production et, pour ce faire, ils ont « forcé » les rendements laitiers en augmentant fortement l'alimentation des vaches en énergie, entraînant dans certains cas des œdèmes et des inflammations des mamelles. De la même façon, en Inde, dans un contexte historique de risques de pénurie alimentaire, la Révolution verte a conduit à irriguer les cultures sans retenue (car l'accès à l'eau était gratuit) en puisant dans les nappes phréatiques jusqu'aux niveaux salés, ce qui a provoqué la salinisation des sols et la réduction des rendements. Autre exemple : l'excès de poids des épis de blé, à la suite d'apports trop importants d'engrais, a pu déclencher la verse du grain en raison de la fragilité de la tige, ce qui a amené, en réaction, à produire des blés à paille courte...

La maximisation par fourniture de fortes doses d'intrants a tendance à pousser le fonctionnement des systèmes biologiques, des écosystèmes et des systèmes économiques vers des situations extrêmes. Cette notion d'extrême se réfère à l'obtention de niveaux très élevés de performances de production, lesquels tendent cependant à plafonner, même si les apports d'intrants sont élevés. À l'opposé se situe la notion de minimum. Celle-ci tient à l'insuffisance de tel ou tel facteur de production qui devient dès lors limitant dans son contexte. Par exemple, le manque de certains

oligoéléments fertilisants limite la production. Le minimum peut aussi se définir comme une situation sans apports pour le renouvellement. Entre minimum et maximum, le champ est vaste et l'on peut toujours essayer de l'élargir vers des performances plus hautes. Mais, aux niveaux élevés de rendement se rencontrent des risques. C'est le cas des pertes par lessivage des intrants non utilisés et des pollutions qui en résultent, ou encore, de la croissance trop rapide des volailles qui provoque la fragilisation de leur charpente osseuse. Les agricultures à haut rendement par unité de surface ou par animal se situent donc près des « frontières de viabilité » des agroécosystèmes : plus on s'en rapproche, plus on accroît les risques et plus on s'expose à des dangers associés à la production. Pour atteindre le volume maximal qu'un agroécosystème peut produire, il faut donc d'abord commencer par respecter ses frontières de viabilité.

### AU SEIN DU CHAMP DE VIABILITÉ SE TROUVE L'OPTIMUM

On comprend aisément que le respect de « la contrainte de viabilité » soit vital pour un producteur. Il est indispensable de rester dans le champ de viabilité mais, dans beaucoup de cas, l'objectif réside dans la recherche d'un maximum. Le maximum étant risqué, car proche des frontières de viabilité, l'objectif résulte obligatoirement d'un arbitrage à faire, au sein du champ de viabilité, entre maximisation et risque. L'arbitrage n'est pas simple car le champ de viabilité d'un agroécosystème comprend de nombreuses possibilités qui sont toutes des états particuliers du système. Parmi ces états, certains, bien que différents, peuvent être équivalents en termes de performances. Mais, au plan théorique, parmi

les nombreux états possibles, certains sont plus intéressants que d'autres, notamment du point de vue du raisonnement économique ; les facteurs de production ont un coût et les productions ont un prix. Pour une production donnée, obtenue avec une certaine quantité de facteurs de production, on calcule la marge économique qui est la différence entre le prix de la production et le coût des facteurs de production. Or, la relation entre le prix de la production et le coût total des facteurs n'est pas linéaire. La production augmente avec la quantité de facteurs de production mais, dans les zones de rendement physique élevé, avec de moins en moins d'efficacité : la courbe est concave. Au sein du champ de viabilité, il existe donc un point qui est un optimum théorique d'efficacité économique. C'est l'un des critères de la décision les plus connus en économie.

### L'OPTIMUM DOIT ÊTRE CONJUGUÉ AVEC LA NOTION DE RISQUE

Tout d'abord, comme on l'a vu, il existe, au sein de l'ensemble des solutions viables, des situations où le risque d'externalités négatives (pollutions, maladies...) est important. Plus on est proche de ces dangers, plus l'exposition est importante et le risque élevé<sup>1</sup>. Il y a donc une gradation du champ des possibles en fonction des risques et des gains. Parmi ces états possibles, on recherche un optimum économique. Or, certaines situations optimales sont dangereuses pour des raisons de fluctuations de prix des facteurs de production qui risquent de faire franchir au système ses limites de viabilité. C'est le cas, dans un pays

---

1. Niveau de risque = niveau de danger x niveau d'exposition au danger.

en développement, d'une exploitation agricole qui vise une situation viable et économiquement optimale et qui, pour cela, doit accroître le recours aux engrais (facteur limitant principal) et faire un emprunt. Elle peut se retrouver en mauvaise posture : le prix des engrais peut s'envoler et la marge économique s'effondrer, ce qui lui fait franchir les frontières de viabilité si elle est incapable de rembourser le prêt. Cette situation est fréquente en Inde. Il en va de même pour un éleveur de porcs français qui voit s'effondrer les prix de la viande alors qu'il a des coûts fixes rigides. Dans les deux cas, l'exploitation sort du domaine de viabilité pour des raisons de fluctuations des prix. De même, dans un pays en développement, une exploitation familiale qui pratique une agriculture manuelle a un facteur limitant, la main-d'œuvre, qui est donc utilisé à l'optimum économique. Cette exploitation est mise en danger en cas de maladie invalidante : les opérations culturales critiques, comme la lutte contre les adventices ou contre les ravageurs, ne peuvent être faites en temps voulu et la production, concurrencée par les adventices, s'effondre. L'exploitation sort alors du domaine de viabilité pour un risque de santé. Un optimum fondé sur un facteur de production rigide peut donc placer le système dans un état proche d'une frontière de viabilité dangereuse.

Au total, si l'on prend en compte les différents risques (climat, maladies et ravageurs, maladie du producteur, variabilité des prix...), on peut établir, au sein de l'ensemble des situations viables, une hiérarchie des cas possibles. Le but est d'atteindre un optimum qui intègre la notion de risque. Pour augmenter le niveau d'optimalité, il faut réduire le risque. Ce problème est résolu classiquement par les systèmes d'assurance ou par une gestion stratégique des stocks (facteurs de production, produits, épargne...).

## ÉCOLOGIE INTENSIVE

### LE RISQUE VIENT EN PARTIE DE L'INSTABILITÉ PERMANENTE DU CADRE DE VIABILITÉ

Le domaine de définition de la viabilité d'un agroécosystème est sans cesse instable. La notion d'équilibre étant fausse<sup>1</sup>, il n'existe donc pas de régime de fonctionnement dynamique stable du système : le climat est instable par nature, le stock de graines d'adventices d'un sol étant évolutif, le couvert végétal des adventices peut être très différent d'un cycle végétatif à l'autre, la présence de ravageurs varie également selon le milieu, les états du sol changent... Les frontières de viabilité sont donc, elles aussi, mobiles en permanence en raison de variables externes : les disponibilités en eau oscillent de la sécheresse jusqu'à l'inondation, selon la nébulosité et l'énergie liée à l'ensoleillement... Viser un objectif raisonnable et stable par nature dans un univers contextuel qui est si inconstant peut, malgré toutes les précautions, amener à sortir du domaine de viabilité<sup>2</sup>.

En conclusion, il faut donc rechercher, dans le domaine de viabilité, un noyau relativement stable au regard des fluctuations des paramètres externes. C'est là que l'on trouvera un objectif acceptable au titre des différents types de risques et de la volonté d'optimisation. Entre autres, un noyau de stabilité peut être obtenu en diversifiant, en associant ou en mélangeant les espèces cultivées, en liant culture et élevage et en souscrivant des assurances.

---

1. Voir p. 48 et 196.

2. Certaines régions du monde sont très instables comme les zones sèches, d'autres plus stables principalement pour des raisons de régularité du climat.

LA DIFFICULTÉ D'AGGRADER,  
LA FACILITÉ DE DÉGRADER

Les choix des performances qui sont visées sont toujours à mettre en perspective avec les visées à longue échéance. Espère-t-on une augmentation rapide de la production avec beaucoup de chance dans la succession d'éléments favorables, ou envisage-t-on une accumulation plus lente mais moins risquée ? Tout dépend d'abord de l'état initial de l'agroécosystème au moment où se pose la question. Par exemple, une exploitation agricole qui doit accomplir d'importants efforts pour améliorer ses revenus aura obligatoirement des trajectoires possibles très différentes de celles d'une exploitation voisine prospère qui doit, avant tout, chercher à réduire ses pollutions, ou encore d'une exploitation voisine soumise à certaines fluctuations environnementales sévères (comme une forte sensibilité des sols à la sécheresse en raison d'une faible capacité de rétention en eau). Cette diversité rend capitale la notion de trajectoire d'un agroécosystème car chaque exploitation agricole est susceptible d'avoir une trajectoire spécifique. D'une certaine manière, le choix de la trajectoire est plus important que le choix du point final visé. Il s'agit, dans beaucoup de cas, de passer de trajectoires de dégradation ou de stagnation à des trajectoires d'aggradation.

Il est facile de laisser se dégrader des situations et de laisser s'installer des trajectoires de dégradation. Pendant longtemps, les excès de nitrates ou de phosphates ont alimenté les pollutions des nappes phréatiques et des rivières. La suppression des pollutions agricoles est intervenue dès lors qu'elle est devenue obligatoire. De même, l'interdiction progressive d'un bon nombre de molécules phytosanitaires devrait tendre à limiter les risques sanitaires pour les producteurs eux-mêmes. Le prix élevé du pétrole est un autre

exemple d'incitation pour que les agriculteurs limitent le labour, donc leurs émissions de gaz à effet de serre (en réduisant la quantité de carburant utilisé et, par conséquent, l'émission de CO<sub>2</sub> par les sols). Au contraire, lorsque le prix du pétrole est bas, il incite à émettre beaucoup de gaz à effet de serre. Les contraintes de viabilité s'exercent donc de plus en plus par la voie réglementaire. La taxation des émissions de gaz à effet de serre va également jouer un rôle. Stopper la dégradation n'est donc pas une chose simple.

Les objectifs d'aggradation sont encore moins simples, mais ils sont de plus en plus présents dans les choix des agriculteurs. Par exemple, le renoncement au labour (qui est très coûteux en énergie et souvent générateur d'érosion) relève aussi d'une démarche d'aggradation des sols, comme l'aménagement de haies pour abriter les insectes auxiliaires qui contrôlent les ravageurs. Dans les deux cas, il s'agit de modifications profondes des pratiques agricoles qui nécessitent un apprentissage et des investissements. De plus, le risque de ne pas pouvoir maîtriser les maladies et les ravageurs avec la lutte biologique<sup>1</sup> aussi sûrement qu'avec les produits chimiques n'est pas négligeable. L'aggradation est donc un processus difficile. Cependant, elle a l'avantage de construire des fonctionnalités qui améliorent durablement la résilience des agroécosystèmes, et cette résilience permet d'éloigner certains risques. Comme nous l'avons déjà évoqué, améliorer la structure du sol en activant sa biologie peut augmenter la capacité de rétention en eau par l'accumulation de matière organique, peut donc accroître la résistance des cultures à la sécheresse, éviter des dépenses de travail du sol, et majorer la fertilité et les rendements.

---

1. Utilisation de prédateurs et de parasites pour maîtriser les ravageurs.

Aussi l'aggradation progressive peut-elle être vue comme un investissement.

L'intensification écologique amène donc à changer radicalement la manière de penser les objectifs : viabilité d'abord, conscience des risques, arbitrage entre optimum et risques plutôt que maximum, trajectoire plutôt qu'objectif... Entrer dans une gestion agroécologique, c'est donc renoncer à des solutions simplistes, ce qui provoquera des résistances, notamment auprès des producteurs. Pourtant, les pratiques proposées résultent de la nature même des écosystèmes. Et la mutation se fera vraisemblablement.

VERS UNE AGRICULTURE ENVIRONNEMENTALEMENT SAINTE  
ET À HAUT RENDEMENT

L'équation générale, qui doit rendre compatible la production de la biosphère continentale avec son renouvellement biologique, ne peut pas échapper au raisonnement suivant :

- D'abord, il faut conserver des espaces naturels peu transformés (telles les réserves de biosphère) pour maintenir une collection d'écosystèmes peu anthropisés, chacun étant une composition particulière de ressources résultant de l'histoire, au sein d'un zonobiome donné. Cela implique de stabiliser les fronts pionniers agricoles qui détruisent ces espaces naturels.
- Il faut dimensionner l'élevage des herbivores aux espaces dont les ressources en herbe constituent le meilleur usage écologique envisageable. Il faut aussi dimensionner la production de grains destinés à l'élevage de monogastriques (porcs, volaille) à des niveaux raisonnables afin de limiter les surfaces cultivées correspondantes car il est plus logique d'utiliser ces surfaces pour

alimenter directement les humains en protéines végétales que les animaux d'élevage.

– Il faut limiter le recours à la biomasse pour produire l'énergie de demain.

– Il faut contrôler l'usage de la biomasse pour fabriquer les biomatériaux. Mais sur ce point, les marges de manœuvre sont faibles, la biomasse étant pour le présent la seule alternative aux plastiques issus du pétrole.

– Il faut utiliser toutes les possibilités pour accroître la biodiversité dans les zones cultivées, et ne pas réserver cette fonction aux seules zones protégées.

Compte tenu de ce raisonnement, l'espace qui reste pour alimenter la population humaine et satisfaire d'autres besoins doit faire l'objet d'une augmentation des rendements proportionnée à la croissance démographique, à l'évolution raisonnée des comportements de consommation, à la disponibilité des surfaces et à leur fertilité.

L'augmentation de rendements doit donc répondre à de nouvelles obligations : la diversification des productions en vue d'accroître la biodiversité, la réduction des dépenses énergétiques (en particulier le travail du sol) en vue d'éviter la production de biocarburants et de réduire des émissions de gaz à effet de serre (en particulier en réduisant l'usage d'engrais azoté, le labour et les émissions des ruminants) qui fragilisent l'agriculture. À cela s'ajoute la nécessité de réduire les pollutions, principalement celles qui sont dues à certains produits phytosanitaires et médicamenteux. En résumé, l'agriculture doit accroître les rendements et, en même temps, modifier le travail du sol, réduire la consommation énergétique des matériels, diversifier les assolements et les pratiques de défense des cultures et de protection des troupeaux qui sont liées à des produits chimiques souvent peu nombreux et insatisfaisants pour des raisons de risques sanitaires.

LE RAISONNEMENT D'INTENSIFICATION  
EST DONC INÉVITABLE

Faire produire un écosystème plus qu'il produit dans son environnement habituel conduit inévitablement à le transformer profondément. Avant l'intervention de la chimie agricole et de la motorisation permises par le pétrole, dans les régions où la demande excédait la capacité naturelle de production des écosystèmes, l'agriculture avait déjà été conduite à intensifier la production avec les moyens alors disponibles.

Cette intensification existe donc un peu partout. En Europe, elle s'est faite historiquement par plusieurs entrées. La fertilité a d'abord été améliorée grâce à l'apport des fumiers animaux, le retour à la terre des débris végétaux et le « repos » du sol avec la jachère. Parallèlement, les animaux de trait (chevaux et bœufs) ont permis une meilleure maîtrise de la préparation des semis et un contrôle partiel des adventices. Une portion importante du territoire était utilisée pour leur alimentation, mais ils fournissaient aussi des ressources fertilisantes sous forme de fumiers. Il y a donc eu intensification à la fois de la fertilité organique et du travail humain et mécanique. Dans la seconde partie du XX<sup>e</sup> siècle, la fertilité a été intensifiée avec de nouveaux moyens : des intrants naturels (tels que le guano, la potasse) puis artificiels (tels que les scories de déphosphoration, les phosphates), puis chimiques avec l'enchaînement d'une série de familles de produits herbicides, fongicides et insecticides. La motorisation agricole, avec les tracteurs, les moissonneuses-batteuses et de multiples outils tractés, a créé une intensification du travail mécanique et de l'énergie. En même temps, la part des produits issus de l'industrie (produits chimiques, énergie, matériels) a augmenté dans

l'agriculture qui est devenue de plus en plus tributaire des autres secteurs.

Dans le futur, de nouvelles formes d'intensification vont apparaître. L'intensification écologique substitue des intrants naturels à certains intrants chimiques et amplifie les fonctionnalités. La bio-inspiration élargit la gamme des solutions d'origine biologique. Pour accroître le volume de ce qui sort d'un agroécosystème, il faudra continuer à accroître ce qui entre, et donc intensifier l'action des constituants des agroécosystèmes. Produire plus étant souvent inévitable, l'intensification doit l'être également. Le tout est qu'elle soit viable.

### DES MOTEURS DE CHANGEMENT PUISSANTS

Or, des moteurs de changement puissants s'annoncent : l'épuisement progressif et inéluctable des réserves de pétrole (malgré la possibilité de nouvelles réserves), l'interdiction de plus en plus pressante de produits de traitement et l'arrivée de la révolution numérique. La nécessité de réduire la dépense en énergie et l'usage des produits issus du pétrole et de l'industrie conduit à utiliser davantage les fonctionnalités des écosystèmes. Certaines vont s'intensifier et de nouveaux intrants vont apparaître. Par exemple, la fonctionnalité « légumineuses » augmentera en substitution partielle aux engrais azotés, et des auxiliaires (des prédateurs) remplaceront des insecticides afin de contrôler les insectes ravageurs. Les connaissances vont aussi augmenter car, face à un problème donné, les solutions disponibles seront plus nombreuses que par le passé. Le remplacement des herbicides chimiques suppose notamment d'être informé de la liste des solutions alternatives et des raisonnements qui leur sont attachés. Il s'agit donc

là d'une intensification en savoir et en information. Ces moteurs ont un caractère inévitable. Ils généreront des changements.

LA RÉVOLUTION NUMÉRIQUE  
AU SERVICE DE L'ÉCOLOGIE

La révolution numérique est un changement surprenant. Elle consiste en un enchaînement de différents volets : la généralisation de capteurs permettant de suivre l'activité biologique (maladies et ravageurs des cultures, état biologique des animaux d'élevage), l'enregistrement automatique et le transfert, à des plates-formes de données, de ces enregistrements (comme les performances laitières par animal), le traitement de ces données grâce à des logiciels d'aide à la décision, et la conduite de robots à partir des résultats de ces logiciels (alimentation automatique de chaque animal d'élevage). Cette succession, de la capture de données à la décision adaptée, permet potentiellement de gérer des systèmes de production de grande taille (grandes parcelles et grands troupeaux, grandes unités de production) : si le suivi et la surveillance sont automatisés, le volume des tâches est réduit et exige moins de personnel. Le numérique permet donc une amplification et une intensification du travail humain dans l'agroécosystème. Mais cette informatisation de la production améliore aussi la précision ; elle optimise donc les processus dans le détail et augmente la productivité. Il y a, là encore, une intensification, celle de l'information.

On devrait ainsi passer d'une intensification de l'énergie et de la chimie à une intensification des fonctionnalités écologiques et de l'information. C'est un changement

## ÉCOLOGIE INTENSIVE

considérable. Il établit l'écologie fonctionnelle et le numérique au centre de mécanismes nouveaux d'intensification.

On peut dès lors s'interroger sur la capacité de cette transformation à gagner d'autres secteurs de l'économie. Comme on l'a vu, l'anthropobiosphère (pour l'alimentation, l'énergie et les matériaux), l'atmosphère (pour le changement climatique), et la lithosphère (pour les énergies actuelles et futures) constituent le substrat des sociétés humaines. L'agriculture, quelquefois encore considérée comme une activité du passé et sans grands enjeux, joue en réalité un rôle-clé dans la gestion de l'anthropobiosphère ; c'est donc une activité capitale pour l'avenir de la planète. Nous devons la regarder autrement. Il ne s'agit plus de l'ordre éternel des champs et des troupeaux, il s'agit du pilotage de l'anthropobiosphère, couverture vitale de la planète Terre. Il est donc légitime de se demander comment les nouveaux concepts de gestion, que sont l'intensification écologique et l'intensification numérique, pourraient impacter d'autres activités économiques.

## CHAPITRE X

### S'INSPIRER DE LA NATURE COMME MODÈLE ?

Le fonctionnement des sociétés fait souvent penser au fonctionnement des écosystèmes. Mais est-ce simplement une ressemblance ou y a-t-il une continuité structurelle entre écosystème et société, qui dépasse le stade d'une simple métaphore ? Pour aborder cette question, il faut s'interroger sur la dynamique des écosystèmes et celle des sociétés. Sont-elles de même nature ou de natures différentes ? On entre souvent dans cette problématique par la notion d'équilibre qui, au premier abord, semble commune au fonctionnement économique et écologique. Nous avons vu que cette notion est trompeuse et que, dans la nature, tout est déséquilibre. Serait-ce aussi le cas en économie ? Ce point conditionne en partie notre représentation de l'évolution des sociétés et, par conséquent, la manière dont nous concevons le développement économique, social et environnemental.

### L'ÉQUILIBRE EST-IL LA CLÉ DES SOCIÉTÉS ?

L'équilibre est une notion très présente dès que l'on traite d'un système complexe. Pourtant la nature est en perpétuel déséquilibre, nous avons déjà mis en cause la notion d'équilibre dans la biosphère (voir chapitre I). Cette mise en cause se poursuit ici.

L'approche de l'anthropobiosphère par l'écologie fonctionnelle nous a amenés à nous représenter la nature en termes de dynamique et comme un ensemble de fonctionnalités. Celles-ci sont liées en réseau permettant des synergies, l'ensemble formant une architecture à différents niveaux d'agrégation fonctionnelle. Au niveau le plus agrégé, cet ensemble de fonctionnalités est l'anthropobiosphère elle-même qui forme avec les autres sphères qui lui sont liées le « système Terre ». En regardant depuis l'anthropobiosphère vers les niveaux de désagrégation géographiques, on voit une sorte de structure gigogne, d'abord les grands zonobiomes, puis des ensembles d'écosystèmes variés (montagnes, plaines cultivées, forêts, littoraux, espaces urbanisés...), puis des agroécosystèmes. Chaque agroécosystème est constitué d'entités individuelles qui appartiennent aux biotopes et aux biocénoses locales. De l'anthropobiosphère aux agroécosystèmes, il y a, pour chaque niveau de désagrégation géographique, une diversité qui va croissant : celles des grands zonobiomes, des familles d'écosystèmes, des écosystèmes, des espèces et, au sein des espèces, des individus (phénotypes)... La biosphère se caractérise donc par une incommensurable biodiversité. Elle a pourtant connu des chocs si considérables qu'ils ont menacé l'existence de la vie. Mais, dans tous les cas, des processus vitaux (récurrents ou nouveaux) se sont redéployés, reprenant l'aventure de l'évolution précisément grâce à cette incommensurable diversité des formes de vie. Les solutions évolutives ont

foisonné et divergé dans toutes les directions. De ce fait, l'évolution des espèces apparaît comme un buissonnement permanent qui aboutit à la complexité de l'anthropobiosphère d'aujourd'hui.

Cette diversité dans l'évolution permanente des écosystèmes suffit pour rejeter la notion d'équilibre, qui converge toujours vers des solutions stables. La notion d'équilibre signifierait la stabilisation de l'évolution des écosystèmes. Tout au contraire, ce sont les notions de dynamique évolutive, d'instabilité et de divergence qui s'imposent. Cela est bien connu pour les évolutions génétiques et épigénétiques, moins en termes de métabolisme. Pour tout processus métabolique de la biosphère, cette dynamique évolutive peut être vue, en tout lieu et à tout instant, d'abord comme un foisonnement des voies dans le champ des possibles et une sélection des voies les plus adaptées. Tout le vivant serait un immense réseau de flux de matière et de flux d'énergie, simultanément exploratoires et contingentés. Cet enchaînement des champs des possibles et des solutions serait à la fois poussé par le flux d'énergie entrant et entretenu par l'inertie répétitive du système lui-même.

Ce qui se passe à l'échelle du métabolisme se produit aussi à l'échelle des écosystèmes : celle des relations trophiques (prédation, parasitisme...) entre espèces, ainsi qu'entre espèces et biotopes (substrat). C'est de cette succession à la fois exploratoire et contingentée que résulte la dynamique de l'évolution.

Certes, en tout lieu et à tout instant, les processus ne peuvent pas utiliser plus que le volume des flux entrants disponibles. De même, ils ne peuvent pas produire plus de flux sortants que ce qui est permis par la transformation des flux entrants. On a donc l'impression d'avoir une succession d'égalités immuables entre ce qui entre et ce qui sort,

et donc un équilibre général dynamique intertemporel, ce qui semble inexact dans une vision instantanée mais juste une fois lissée sur longue période. En réalité, comme nous l'avons vu, l'ensemble du métabolisme est localement et temporellement flexible, de sorte qu'il se déforme en permanence et que rien ne permet de dire que ses changements sont localement et perpétuellement viables face aux variations de l'environnement. L'évolution écosystémique est une succession de bourgeonnements locaux et momentanés de l'arbre général de la vie qui s'installent ou échouent. Au total, depuis les premières molécules ayant une dynamique évolutive, la vie serait, par son caractère de flexibilité, un déséquilibre permanent.

Cette conception ne peut qu'interroger les représentations systémiques en économie, lesquelles sont massivement inspirées de la notion d'équilibre général. Or, on peut considérer que cette notion de dynamique évolutive est d'essence différente de celle d'équilibre général utilisée en économie.

### LES RAISONNEMENTS ÉCONOMIQUES

Le modèle de la nature peut-il encore inspirer des raisonnements économiques ? La nature, dont on essaye quelquefois de s'inspirer pour comprendre le fonctionnement des sociétés sur une base écologique, existe-t-elle encore vraiment ? Dans l'histoire de l'évolution, nous, *Homo sapiens*, sommes l'espèce dominante et nous avons presque terminé la colonisation de la biosphère, même si quelques peuples vivent encore isolés du reste de l'histoire humaine en Amazonie. Notre intelligence nous a permis d'être l'espèce la plus dangereuse pour toutes les autres, l'espèce capable de dominer la biosphère et de l'exploiter, ce qu'elle fait depuis très longtemps sans être

## S'INSPIRER DE LA NATURE COMME MODÈLE ?

encore totalement consciente de la nécessité de la renouveler, ni de l'obligation de ne pas la dégrader. En même temps, nos sociétés ont inventé et inventent sans cesse de nouvelles techniques qui sont des fonctionnalités artificielles. Nous apportons de plus en plus de processus technologiques qui s'ajoutent aux processus écologiques. Les écosystèmes sont, désormais, comme munis de prothèses qui augmentent leurs performances et deviennent partie intégrante du fonctionnement de la biosphère. Dès lors, on ne peut penser la biosphère que comme un ensemble « hybride de fonctionnalités naturelles et de fonctionnalités technologiques », un « hybride nature-culture », autrement dit, comme une anthropobiosphère.

### LES LOIS DE FONCTIONNEMENT DE L'ÉCOLOGIE ET DE L'ÉCONOMIE

Ces lois sont-elles les mêmes ? L'anthropobiosphère se transforme toujours plus en faisant émerger des écosystèmes urbanisés et industriels, et bientôt numériques et virtuels. Cette « bulle » urbano-industrielle, bien que gigantesque, obéit encore à certaines lois écologiques qui en restent le substrat. Or, comme dit précédemment, une grande part du sens de l'évolution de l'anthropobiosphère est déterminée par les marchés. Celui de la viande en Chine détermine, par exemple, le volume des importations de maïs et de soja provenant en partie du Brésil, et influe donc sur le défrichement de l'Amazonie. Un autre exemple qui pourrait exister dans le futur concerne la demande en carburant issu de biomasse. Si elle s'accroît fortement, les prix agricoles augmenteront à cause de la raréfaction de l'espace productif destiné à l'alimentation, ce qui relancera la déforestation. Sur certains marchés, l'offre et la demande peuvent avoir

des effets plus importants que des politiques publiques, surtout si celles-ci se trouvent entre les mains d'acteurs privés peu soucieux de l'intérêt général<sup>1</sup>.

Le fonctionnement économique de la société mondiale s'est donc greffé sur celui des écosystèmes et le domine progressivement grâce à la mondialisation. Or, l'offre et la demande mondiale sont dans un déséquilibre permanent évoluant autour d'un attracteur qui est donné par le prix théorique d'équilibre. Ce dernier est par définition instable car l'offre et la demande réagissent sans cesse au prix qui, à son tour, s'ajuste aux mouvements de l'offre et de la demande, ce qui crée une boucle permanente d'instabilité. Les marchés étant interconnectés et leurs interactions étant nombreuses, ils réagissent de manière complexe à cette instabilité. De plus, les principaux prix sont géopolitiquement manipulés ; c'est le cas pour le pétrole. Il y a donc en permanence un déséquilibre général plutôt qu'un équilibre général, sauf à considérer qu'il existe un équilibre intertemporel, certes fictif, mais actif s'il est en permanence calculé et diffusé.

Cependant, ce déséquilibre, qui tient au fonctionnement du marché, n'a rien à voir avec les déséquilibres de fonctionnement des écosystèmes. Le marché est rendu nécessaire par l'échange qui est lui-même rendu nécessaire par la spécialisation des entreprises. Cela donne lieu à un ajustement complexe de l'offre et de la demande avec les prix. Un écosystème fonctionne différemment. Dans tous les mécanismes et processus métaboliques, il y a rencontre entre

---

1. Par exemple, la forte influence politique de firmes pétrolières et charbonnières relancerait les émissions carbonées et l'effet de serre. En effet, les lobbies du charbon peuvent faire pression pour maintenir la production ; de même, les firmes exploitant le pétrole de schiste ont intérêt à poursuivre tout en se tenant prêtes à basculer vers les énergies alternatives.

des disponibilités en amont et des utilités en aval<sup>1</sup>, sans possibilité d'ajustement automatique entre les deux comme c'est le cas avec les mécanismes de prix. La rencontre d'une disponibilité et d'une utilité permet la réalisation d'une relation métabolique ou trophique. Tant qu'existent des disponibilités, la relation est assurée ; quand il n'y en a plus, le processus s'arrête. Le marché, lui, fait monter le prix en cas de rareté de la disponibilité et/ou d'essor de l'utilité ; et il fait baisser le prix dans la configuration inverse. Puis les variables s'ajustent. S'il y a ajustement dans un système, celui-ci résulte donc d'une décision humaine. Or il y a peu de décisions humaines d'ajustement en écologie. Dans les anthropoécosystèmes, cela devrait s'imposer. On pourrait, par exemple, imaginer ajuster des quotas de production pour tout ce qui a une forte incidence sur les milieux naturels, par rapport à leur capacité de renouvellement, comme la déforestation pour produire de l'huile de palme, ou la culture de plantes dédiées aux bioplastiques pour faire face aux besoins d'emballages.

Les forces motrices des dynamiques écologique et économique sont, par ailleurs, bien différentes. En écologie, l'énergie solaire « pousse » la dynamique de l'écosystème et cette force s'impose, elle est permanente et inépuisable à notre échelle historique ; en économie, c'est le désir de consommation qui « tire » la dynamique de l'économie et, bien qu'impérieux, il peut être contrôlé, contrairement à la production d'énergie solaire. La nature des forces motrices est donc différente ; chez la première, la propulsion de l'énergie solaire crée une sorte de mouvement nécessaire à caractère rigide que l'on nommera « *push* », chez la seconde,

---

1. Par « disponibilité en amont » on entend, par exemple, l'existence de molécules et d'énergie ; par « utilité en aval » on entend la molécule qui résulte de la réaction et qui est la destination. Autre exemple : la disponibilité en proies rencontre l'utilité de ces proies pour le prédateur.

l'aspiration est instable car contingentée par d'autres forces, ce qui introduit de la flexibilité dans la force dite « *pull* ». La première crée un foisonnement irrépissible, la deuxième est propice aux crises d'ajustement.

Il y a pourtant une ressemblance dans les deux dynamiques, qui tient à la diffusion des forces principales *push* et *pull* dans l'ensemble du système vivant, et qui se traduit par une certaine inertie interne de l'anthroposystème. Les écosystèmes – comme on vient de le voir – fonctionnent avec une énergie interne qui se distribue en leur sein, et est donc fondée sur des lois naturelles ; l'économie, quant à elle, fonctionne par la nécessité de la survie des sociétés et l'inertie de l'échange née de la division du travail, donc sur une convention sociale. Toutefois, dans les deux cas, c'est comme si chacun des micro-fonctionnements jouait un rôle moteur local, l'agrégation de l'ensemble créant l'inertie et la dynamique du système.

Au total, la dynamique des écosystèmes et celle de l'économie des sociétés ont des points communs : l'absence d'équilibre et l'existence de variables motrices (*push* ou *pull*). Elles montrent aussi des différences dans les processus de régulation. Néanmoins, il y a suffisamment de résonances entre les deux pour que le fonctionnement de la nature puisse inspirer celui de l'économie.

### LES FONCTIONNALITÉS DE L'ÉCONOMIE DE MARCHÉ NE SONT QUE DES THÉORIES

Pourtant, elles sont des fonctionnalités au même titre qu'en écologie mais, quand on parle d'économie, on limite le champ de la réflexion aux activités de production, d'échange, de distribution et de consommation des ressources, des biens et des services. On peut considérer que

ce sont des fonctionnalités des sociétés. L'une d'entre elles, l'échange, se fait massivement sous la forme de marchés utilisant une monnaie (mais aussi de trocs ou de dons). Au cœur de ces fonctionnalités d'échange se situent les comportements des acteurs sociaux et, notamment, le comportement d'achat et de vente à travers les marchés. Dans la théorie économique, ces comportements sont supposés rationnels – pourrait-on bâtir une théorie sur l'irrationalité des comportements ? – et les acteurs cherchent à maximiser leur utilité, c'est-à-dire la satisfaction qu'ils obtiennent en utilisant ou en consommant une ressource, un bien ou un service. Pour cela, sur les marchés, ils offrent ce qu'ils produisent et demandent ce que d'autres offrent. Tout au long de l'histoire, chacun des acteurs a spécialisé son offre dans les productions pour lesquelles il avait un avantage comparatif (offre de produits alimentaires, d'énergie, de produits médicinaux, de travail...).

Au plan théorique, on démontre que cette spécialisation est mutuellement bénéfique. L'échange, puis sa traduction institutionnelle sous la forme d'un marché utilisant des monnaies, est donc devenu une fonctionnalité fondatrice des sociétés. Pour la théorie économique la plus reconnue<sup>1</sup>, l'ensemble des comportements de marché fait émerger une situation d'« équilibre général ». Ainsi, la combinaison des actions individuelles, toutes tournées vers l'intérêt individuel, ferait apparaître une situation commune de richesse et de bien commun. Cette propriété émergente des marchés a été qualifiée, à l'origine, de « main invisible » par Adam Smith<sup>2</sup>, ce qui traduit son caractère bénéfique contre-intuitif puisque la combinaison des intérêts individuels fait émerger

---

1. Formalisée par Léon Walras (1834-1910) puis Kenneth J. Arrow & Gérard Debreu, 1954, « Existence of an equilibrium for a competitive economy », *Econometrica*, 22 (3) : 265-290.

2. Adam Smith, *Théorie des sentiments moraux* (1759), PUF, 1999.

l'intérêt général. Selon la démonstration mathématique correspondante, pour atteindre l'équilibre général, il faut que certaines conditions soient respectées, parmi lesquelles, par exemple : le fait que l'offre de produits soit « atomisée » (entre de multiples petits producteurs), que les producteurs fonctionnent sans rendements d'échelle croissants (car il y aurait de grandes entreprises plus compétitives que d'autres), qu'il s'agisse de produits homogènes sur un même marché, que l'information soit parfaite et que la formation des prix soit transparente... Ces conditions – elles sont en réalité plus nombreuses – sont des conditions dites de concurrence « parfaite ». Cet équilibre « automatique » fait du marché « pur et parfait » un mécanisme (théorique) fonctionnel efficace car c'est la seule structure d'échanges qui soit mutuellement autant avantageuse.

Ce qui est fascinant dans cette théorie, c'est qu'elle démontre qu'une situation pure et parfaite (ensemble de conditions) génère une solution efficace, unique et stable. De là, aussi, est venue la croyance qu'il suffit de supprimer toute règle (et notamment l'intervention de l'État) pour se rapprocher d'une situation « pure et parfaite » où se fait naturellement la convergence vers un équilibre général. La réalité n'a bien évidemment que très peu à voir avec la théorie, à tel point qu'elle peut même se situer à l'opposé<sup>1</sup>. Dans l'agriculture par exemple, de très grandes entreprises modernes, lourdement mécanisées et avec de hauts niveaux de productivité, se trouvent en concurrence sur les mêmes marchés mondialisés avec de très petits producteurs utilisant des techniques du néolithique<sup>2</sup>. Cette concurrence

---

1. Pour une déconstruction détaillée de la théorie, voir Emmanuelle Bénicourt & Bernard Guerrien, 2008, *La Théorie économique néoclassique*, La Découverte.

2. Voir Michel Mazoyer & Laurence Roudart, *Histoire des agricultures du monde*, *op. cit.*

aboutit à faire disparaître les exploitations agricoles les moins compétitives, et la propriété de la terre se concentre dans de nombreux pays alors que l'agriculture est numériquement le secteur où se concentrent le plus de pauvres dans le monde. Il n'y a pas non plus de transparence de l'information. La dynamique des marchés réels apparaît donc comme très différente de celle de la théorie. De ce fait, il n'y a pas d'équilibre général au sens de la théorie, mais des déséquilibres, des ajustements, des fluctuations et des changements de structure qui sont permanents.

Cette situation induit des conséquences négatives sur l'anthropobiosphère. Comme déjà dit, une grande partie de la planète est cultivée par des paysans pauvres, voire très pauvres. Ils représentent près de 4 habitants sur 10 et ont des moyens limités pour entretenir les agroécosystèmes et les maintenir dans leur domaine de viabilité. Compter sur ces petits paysans pour être des acteurs actifs des politiques d'aggradation environnementale demandera un effort considérable de la communauté internationale afin de les y aider. Par ailleurs, de très grandes entreprises agricoles ne se comportent pas mieux vis-à-vis de l'environnement ; en Amérique latine, certaines exploitent des terres à la recherche de bons rendements pendant quelques années puis les abandonnent et vont en louer ailleurs. D'autres n'hésitent pas à faire du dumping écologique<sup>1</sup> pour présenter des prix très compétitifs et remporter les marchés, ce qui en fait des lieux d'inéquité et de déstabilisation.

---

1. Le dumping écologique consiste à dégrader la viabilité de l'agroécosystème en limitant les coûts environnementaux, procédé qui permet de proposer des prix bas.

### SUPPRIMER LES RÈGLES ?

Au contraire, la gestion de l'anthropobiosphère demande des régulations. La réalité des fonctionnalités économiques et sociales est donc loin de correspondre à cette perfection qu'est une théorie. Les « imperfections » – c'est-à-dire la réalité – sont même si nombreuses que l'on ne se trouve jamais en situation d'équilibre général, mais en situation d'évolution et de transformation permanente. En ce sens, le fonctionnement systémique de l'économie rejoint celui de l'écologie et de la biologie. Ces transformations permanentes résultent d'instabilités, par exemple des excédents et des pénuries, des variations de prix, de l'inflation ou de la déflation, de la croissance ou de la récession, du chômage ou de la rareté de main-d'œuvre, de la pauvreté ou de l'accumulation de richesse, et souvent enfin de la violence. Ces situations apparaissent donc, paradoxalement, à la fois comme des dérèglements passagers et exceptionnels (donc anormaux), mais aussi comme de véritables fonctionnalités permanentes. Qui peut nier que l'inflation, par exemple, soit une fonctionnalité structurelle ? Il est donc nécessaire, en économie, de créer des fonctionnalités de « régulation » en nombre important, c'est-à-dire des ensembles de règles destinées à éviter les violents déséquilibres et les situations non viables. Il en existe déjà beaucoup. Le système bancaire, notamment, bénéficie d'accords d'autorégulation (connus sous le nom d'accords de Bâle) pour éviter la faillite à certaines banques – quel exemple flagrant de nécessité de régulation ! L'Union européenne a des dispositifs de régulation des budgets nationaux pour limiter les déficits... (tout comme, dans le domaine de la biologie, la nature a créé des régulations permettant de faire face à des situations dangereuses, par exemple la fièvre pour lutter contre les virus). Dans le champ de l'économie, les fonctionnalités qui

nous apparaissent comme des imperfections irréductibles nécessitent d'être régulées par d'autres fonctionnalités pour que le système économique s'adapte en permanence et ne sorte pas de ses bornes de viabilité.

Les politiques de régulation, dans l'acception politique courante, continuent cependant à revêtir un caractère d'exception. En effet, beaucoup partagent la conviction qu'il est nécessaire de limiter au maximum le nombre de règles<sup>1</sup>. Pour éviter les chaos, il ne reste alors qu'à espérer voir émerger des autorégulations vertueuses. Pourtant, dès lors qu'elles corrigent en permanence les trajectoires non acceptables, des règles sont indispensables. Contrairement à la pensée libérale extrême, elles ne sont pas un mal en soi, mais représentent des fonctionnalités inhérentes aux systèmes dynamiques. Il n'y a pas de dynamique sans contrôle de la dynamique ; celui-ci fait partie de la dynamique. En fait, les politiques de régulation sont des politiques courantes de gestion de la viabilité sur la longue durée. Ce sont donc des composantes des politiques dites de développement ou des stratégies à longue anticipation. Par conséquent, elles concernent non seulement des réglages économiques, comme le taux du crédit ou le montant des déficits publics, mais aussi des changements structuraux comme ceux qui font évoluer les comportements des acteurs économiques. Une politique de régulation peut alors désigner aussi bien les « réglages » que la « gestion des règles ». Pour intégrer cette dernière dimension, il faut dépasser le seul cadre de l'économie pour embrasser l'ensemble des sciences sociales, ou, à tout le moins, constituer une discipline reposant sur

---

1. Ce que l'on appelle le socialisme libéral a développé l'idée qu'il fallait, au-delà des institutions économiques du marché libre, constituer des régulations publiques. Voir la pensée de John Stuart Mill (1806-1873), de Leonard Trelawny Hobhouse (1864-1929), et la pensée solidariste de Léon Bourgeois (1851-1925).

le jeu des règles et la morphologie adaptative et évolutive des systèmes.

Dans les sciences sociales, le mot « règle », volontiers utilisé en langue anglaise, ne l'est pas beaucoup en français. Il n'exprime, dans notre langue, ni la profondeur anthropologique qui est nécessaire pour traduire cette idée fondamentale pour la gestion des sociétés, ni le caractère opératoire qu'il peut avoir en modélisation. Routines, us et coutumes, principes, tabous, traditions, conventions, ententes, contrats, règlements, décrets, lois, lois fondamentales et organiques, constitution... sont des termes qui expriment un phénomène fondamental dans les sociétés : celui de l'organisation coordonnée des comportements. Un autre mot-clé, qui évoque cette organisation coordonnée, est le terme « institution ». Il vient du latin *institutio* qui exprime « la chose établie » et signifie « ce qui est institué ». Gouverner la viabilité ne se réduit donc pas à de simples réglages adaptatifs, c'est aussi choisir le corpus des règles des sociétés afin que leur action soit viable, cohérente, rationnelle et efficace. L'ensemble de ces règles de toutes natures constitue le poste de commande du devenir de l'anthropobiosphère, à partir duquel se gèrent la nécessaire intensification de son fonctionnement et le respect de sa viabilité. De ce fait, il ne s'agit pas de « laisser faire » pour que tout aille bien, mais de se garantir contre les externalités négatives, dans le cadre d'un projet viable et vivable.

Concrètement, on peut décrire le fonctionnement de l'anthropobiosphère comme la dynamique d'un ensemble de fonctionnalités de natures écosystémique, technologique, économique et sociale. La notion de fonctionnalité revêt le même sens que celui qui est utilisé dans la vie courante, c'est-à-dire qu'elle évoque un ensemble cohérent de fonctions qui font sens. Par exemple, on pourra parler de fonctionnalités en matière de formation

## S'INSPIRER DE LA NATURE COMME MODÈLE ?

des prix, d'inflation, de comportement d'épargne. Ces fonctionnalités sont interactives. Leur pilotage se fait à la fois par le réglage de variables continues ou par des choix institutionnels.

### PEUT-ON PARLER DE FONCTIONNALITÉS ÉCONOMIQUES ET SOCIALES ?

Avant tout, comment décrire les fonctionnalités économiques et sociales ? Comme en écologie, on distingue d'abord les agents ou acteurs (individuels et classés par espèces). On y ajoute les relations entre agents, l'ensemble constituant des fonctionnalités. Celles-ci fonctionnent selon des cohérences que l'on qualifie de « régimes de fonctionnement », par exemple le régime de fonctionnement du déficit public permanent et de l'endettement public, ou celui fondé sur la compétitivité, l'innovation et les exportations assurant une accumulation de capital. Les agents évoluent en permanence en relation avec l'ensemble du fonctionnement de la société. C'est un premier niveau de fonctionnalité. Leurs relations, présentées sous le prisme des échanges, constituent un deuxième niveau de fonctionnalité défini par la circulation des biens, des services et de la monnaie et par les problématiques associées. Ces échanges et cette circulation induisent l'émergence d'un troisième niveau constitué des caractéristiques comportementales des agents et les effets de composition qui en résultent et qui sont les régimes de fonctionnement. Ce sont donc des sous-ensembles ordonnés de comportements, comme les cas évoqués ci-dessus le montrent. Ces régimes appellent des régulations et des contrôles qui sont essentiellement des politiques publiques. C'est le quatrième niveau.

L'encadré ci-dessous présente un classement possible de ces fonctionnalités. En bas du tableau se situent les différents types d'agents (ou acteurs) qui sont constitués de personnes liées à ces agents par des règles : droit de la famille, salariat, association libre, clientèle... Ces agents sont des organisations qui évoluent dans une morphogenèse permanente liée à la dynamique du circuit économique (essentiellement le marché). En remontant, on trouve les régimes de fonctionnement économiques et sociaux (concurrence, place de l'économie publique...) puis les régimes de régulation (relances, répartition...).

*Exemples de fonctionnalités des sociétés*

RÉGIMES :

- Morphogenèse des agents, dynamique d'évolution
- Circuit économique, circulation, marché, impôts
- Régimes de fonctionnement de l'économie et des sociétés
- Régimes de régulation

AGENTS :

- Individus
- Familles : ménages/autres
- Entreprises : coopératives/sociétés
- Associations
- Banques, assurances
- État : services publics/administrations
- Organisations internationales

Chacune des quatre catégories de régimes de fonctionnement peut être considérée comme une métafonctionnalité, il est ainsi possible de les représenter en un tableau équivalent à celui des fonctionnalités écologiques (voir tableau 2).

## S'INSPIRER DE LA NATURE COMME MODÈLE ?

Tableau 2 : TABLEAU DE FONCTIONNALITÉS ÉCONOMIQUES ET SOCIALES

COMPARTIMENT	MÉTAFONCTIONNALITÉ	FONCTIONNALITÉ
Mondial	Concurrence commerciale	Avantages compétitifs
		Politiques douanières, tarifs, ouverture <i>vs</i> protection
	Coopération commerciale	Accords de libre-échange
	Jeu des négociations commerciales et économiques	Grandes régulations commerciales
		Accords sur les normes
		Arbitrages, OMC
	Autres régulations économiques mondiales	Aide publique au développement
		Régulations bancaires
		Accords sur le travail
	Régulations environnementales mondiales	Convention sur le climat
		Convention sur la biodiversité
		Autres conventions...
	Circuit économique	Production, délocalisations
Consommation, acculturation		
Morphogenèse	Émergence de firmes mondiales	

## ÉCOLOGIE INTENSIVE

COMPARTIMENT	MÉTAFONCTIONNALITÉ	FONCTIONNALITÉ
		Émergence G8, G20, G77
		Émergence d'ONG mondiales
Européen	Régulations économiques	Marché unique
		Politique agricole commune
		Régulation budgétaire
		Régulation du marché interbancaire
	Régulations environnementales	Directives diverses
	Régulations commerciales	Concurrence
		Mobilité de la main-d'œuvre
Régulation sociale	Espace Schengen	
Morphogenèse	Partis, syndicats européens	
Espaces régionaux	Régulations commerciales	Accords de libre-échange
	Circuit économique	Intégration géographique
	Morphogenèse	Institutions régionales
Espaces nationaux	Régulations commerciales	Politique commerciale, ouverture commerciale et protectionnisme
		Régulations économiques
		Politique fiscale
	Politique monétaire	

## S'INSPIRER DE LA NATURE COMME MODÈLE ?

COMPARTIMENT	MÉTAFONCTIONNALITÉ	FONCTIONNALITÉ
		Politique budgétaire
		Politique budgétaire de relance
		Politiques sectorielles
	Régulations démographiques	Politiques natalistes <i>vs</i> contrôle des naissances
	Régimes de fonctionnement	Accumulation économique
		Crises (différents types)
		Régimes de croissance
		Inflation, vitesse de circulation de la monnaie
		Emploi et chômage Régime salarial
		Régime d'innovation
		Régime de répartition
		Régime de planification et de programmation
		Régime égalités <i>vs</i> inégalités et pauvreté
		Conflits sociaux
		Circuit économique

## ÉCOLOGIE INTENSIVE

COMPARTIMENT	MÉTAFONCTIONNALITÉ	FONCTIONNALITÉ
		Comportements d'épargne
		Formation des prix
		Comportement d'investissement
	Morphogenèse	Création d'entreprises <i>vs</i> dissolution
		Rôle du mouvement associatif
Agents	Individus	Comportement économique
	Ménages	Comportement économique
	Entreprises	Régime économique et social
		Régime de propriété du capital
		Régime de participation des salariés
	Administrations	Efficacité
Tous agents	Dynamique de viabilité économique et sociale	

## S'INSPIRER DE LA NATURE COMME MODÈLE ?

### INTENSIFIER LES FONCTIONNALITÉS ÉCONOMIQUES ET SOCIALES ?

On conçoit que ces fonctionnalités puissent être amplifiées ou réduites, comme c'est le cas en écologie. Ainsi, il est possible qu'un régime de répartition (salaires et mesures sociales) soit amplifié au bénéfice des moins bien nantis. De même, la demande des ménages peut, elle aussi, être amplifiée par des mesures favorables au pouvoir d'achat.

Les fonctionnalités du domaine économique et social sont également liées entre elles, ce qui crée des synergies, comme en écologie. Par exemple, une synergie bien connue, ici négative, est la défiance des responsables d'entreprise vis-à-vis des employés : dans un régime de concurrence ouverte, les employés défendent leur pouvoir d'achat avec une grande vigilance et font pression sur l'entreprise qui, faute de gains de productivité, peut s'éloigner de son noyau central de viabilité et risquer la faillite. Une autre synergie classique – cette fois positive – est le gain d'avantages compétitifs grâce aux investissements, à la R&D et à l'innovation.

On retrouve donc les mêmes concepts qui mettent en avant la fonctionnalité plutôt que la propriété. De ce fait, cette notion rejoint le concept « d'économies de fonctionnalité » qui consiste à vendre un service plutôt que l'objet qui le produit. Ainsi, on vend des kilomètres de trajet en voiture plutôt qu'une voiture. Celle-ci n'est plus la propriété de l'utilisateur ; elle continue à appartenir au garagiste qui a intérêt à l'entretenir. Mettre en avant la fonctionnalité plutôt que la propriété, c'est fixer l'attention sur l'intensification et la rationalisation de l'usage des objets.

Cette rapide excursion dans l'univers des phénomènes économiques et sociaux montre qu'il n'est pas impossible d'utiliser le concept de fonctionnalité pour les décrire.

Utiliser ce concept dans les deux univers (écologie et société), c'est faciliter les couplages entre phénomènes écologiques et sociétaux, et disposer d'un cadre intellectuel transdisciplinaire. Ce cadre permet d'explorer des « régimes généraux de viabilité ». Ce serait, par exemple, un régime qui combinerait différentes transitions (énergétique, agro-écologique, climatique...), avec une relance par les investissements et des incitations à l'innovation. Pour fonctionner, cette relance devrait s'opérer dans un contexte de facilitation des investissements des ménages pour plus d'efficacité énergétique et pour une amélioration future des revenus.

Cette approche, simplement ébauchée ici, peut surprendre ou ne pas être comprise. Substituer les notions de fonctionnalité et d'évolution-déséquilibre au modèle de l'équilibre général, c'est vouloir remplacer une merveille d'intelligence (mais hors du réel) par un outil assez sommaire (mais qui peut embrasser tout). Par ailleurs, la théorie de l'équilibre général est séduisante, rigoureuse au plan mathématique et psychologiquement rassurante (dans un monde parfait, l'équilibre se fait seul), mais peut-être incite-t-elle à une certaine paresse intellectuelle puisque, après avoir dissous les règles, il suffit de regarder ce qui se passe ? L'approche par l'évolution et les déséquilibres ne bénéficie pas de représentations mathématiques et informatiques aussi élaborées, ni d'un tel confort intellectuel. L'usage en est difficile puisqu'il faut réguler en permanence ! Il n'est cependant pas impossible d'élaborer un algorithme rendant compte des effets de synergie et assurant les cohérences de flux comme on le fait dans les Matrices de comptabilité sociale<sup>1</sup>.

---

1. Les Matrices de comptabilité sociale regroupent l'ensemble des relations de flux économiques entre agents au titre de la production et de la consommation, ce qui permet de visualiser un cadre réaliste de description de l'économie. Elles servent, entre autres, à l'établissement d'un équilibre général calculé.

## S'INSPIRER DE LA NATURE COMME MODÈLE ?

Pourtant, utiliser la notion de fonctionnalité, c'est un peu renoncer à la macroéconomie dans la mesure où l'on fragmente la vision économique et sociale d'une société en sous-ensembles. C'est aussi renoncer à la microéconomie dans la mesure où l'on ne traite pas uniquement des comportements des acteurs. En fait, en mettant en avant la notion de fonctionnalité, on prend en compte à la fois des acteurs à l'échelle micro et des agrégats économiques à une échelle intermédiaire. On pourrait dire que c'est une « mésoéconomie » à la fois compatible avec la micro et la macroéconomie. La modélisation mathématique de cette représentation est certainement malaisée, mais pas sa modélisation numérique : en effet, celle-ci permet de traiter, dans un même exercice, des phénomènes économiques et sociaux ainsi que des phénomènes écologiques et environnementaux.

Il reste qu'aujourd'hui cette méthode n'est pas simple, mais elle est réaliste dans son fondement et nécessaire pour gérer l'anthropobiosphère. Sa vraie difficulté réside sans doute moins dans la possibilité de calculer des trajectoires de changement des anthropoécosystèmes, et des sociétés qui leur sont liées, que dans le changement de forme d'esprit qu'elle requiert.



## CHAPITRE XI

# CHANGER DE MODE DE PENSÉE

L'écologie intensive implique un changement de mode de pensée. Comme on vient de le voir, dire qu'il est nécessaire de piloter la trajectoire de l'anthropobiosphère, c'est arrêter de croire que l'absence de règles permet de rejoindre l'univers pur et parfait de l'équilibre, parce que celui-ci serait spontané dès lors que chacun cherche à maximiser son utilité. Passer de l'équilibre au déséquilibre, du point parfait ou de l'ajustement permanent à la notion de trajectoire de viabilité, implique un changement copernicien.

### UN DEVOIR : ÉVITER LE PIRE

Les trajectoires futures de l'anthropobiosphère vont vraisemblablement évoluer plus ou moins près des limites de viabilité, essentiellement en raison du réchauffement climatique, de la sixième extinction des espèces et de la déforestation. Sortir du domaine de viabilité ce serait, par exemple, laisser se développer de nouvelles pénuries alimentaires, aggraver la diminution déjà forte des stocks de poissons, pérenniser des sécheresses locales, multiplier le nombre des réfugiés... Ce ne serait pas la mort complète de l'anthropobiosphère (l'entropie maximale), mais l'accumulation de

## ÉCOLOGIE INTENSIVE

catastrophes et une tendance continue à l'effondrement avec, à la clé, l'augmentation de la pauvreté, des drames sociaux locaux, des migrations et de la violence. Les signaux catastrophiques de non-viabilité sont nombreux. Les principaux sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3 : PRINCIPAUX SIGNAUX DE NON-VIABILITÉ DE L'ANTHROPOBIOSPHERE

DOMAINE		SIGNAUX ÉCOSYSTÉMIQUES	SIGNAUX SOCIÉTAUX
Agroécosystème	Changement climatique	Fortes sécheresses récurrentes Pluviosité catastrophique récurrente Montée des eaux marines, inondations et amputation des surfaces cultivables	Pénuries alimentaires récurrentes Hausse mondiale des prix des aliments Troubles sociaux, réfugiés climatiques
	Perte de biodiversité	Extinction d'espèces Disparition d'écosystèmes Plus grande vulnérabilité de l'agriculture aux ravageurs et aux maladies	Perte de solutions génétiques et écosystémiques pour résoudre des problèmes de santé
	Mauvaise gestion quantitative de l'eau	Érosion des sols Salinisation des sols Perte de capacité de rétention des sols	Pénuries alimentaires Abandon de territoires et migrations

## CHANGER DE MODE DE PENSÉE

DOMAINE		SIGNAUX ÉCOSYSTÉMIQUES	SIGNAUX SOCIÉTAUX
	Mauvaise gestion du phosphate	Pénurie de phosphore	Pénuries alimentaires
	Mauvaise gestion du pétrole et des ressources énergétiques	Report de la demande énergétique et de matériaux sur l'agriculture Excès d'utilisation de la biosphère	Instabilité économique Augmentation des prix alimentaires
	Épuisement des écosystèmes marins (ressources)	Disparition de ressources	Pénuries en protéines de poissons
	Mauvaise gestion des forêts	Pertes de biodiversité Pertes de réserves d'eau douce	Désordres climatiques
	Pollutions aux engrais	Excès d'engrais dans les eaux	Problèmes sanitaires
	Pollutions phytosanitaires et médicamenteuses	Excès de produits à risque	Cancers Perturbations endocriniennes
Système économique	Instabilité des marchés alimentaires	Désincitations ou surincitations à produire entraînant des désordres environnementaux	Désordres sociaux dus aux variations de prix

## ÉCOLOGIE INTENSIVE

DOMAINE		SIGNAUX ÉCOSYSTÉMIQUES	SIGNAUX SOCIÉTAUX
	Instabilité des marchés énergétiques	Risques d'excès de recours à la biomasse (bois de feu)	Difficulté des pauvres pour accéder à l'énergie
	Instabilité des marchés financiers et boursiers	Désordres dans les investissements	Risque financier des entreprises Chômage
	Abaissements tarifaires et compétition économique exacerbée	Surincitations à produire entraînant des désordres environnementaux	Inégalités sociales exacerbées Inégalités géographiques et nationalismes Migrations
	Nonaccès à la terre pour des raisons malthusiennes	Installations illégales et surexploitation locale des ressources	Risques de violence sociale
	Surdensité de population rurale	Surexploitation des écosystèmes	Pénuries alimentaires Migrations
	Antagonismes géopolitiques dus aux raretés	Abus sur les ressources naturelles et concurrence dans l'accès	Tensions internationales

Éviter le pire, c'est donc anticiper la résolution des problèmes afin d'éviter les drames, notamment écologiques. Éviter le pire, c'est aussi anticiper la résolution des problèmes économiques et sociaux en relation avec la biosphère et agir avec continuité sur de longues périodes pour les résorber. Ainsi, il faut réduire les inégalités dans l'accès à la terre, diminuer la pauvreté de la grande majorité des agriculteurs dans le monde (source d'usage excessif des ressources naturelles), ou traiter les questions migratoires liées aux situations d'excédent de population. Éviter le pire, c'est donc piloter la viabilité.

### UNE PRIORITÉ : PILOTER LA VIABILITÉ

Pour anticiper la gestion durable de la planète et des sociétés, il faut mettre au point de nouvelles procédures. Stabiliser demande un ralentissement des mécanismes dont le fonctionnement est trop rapide ou qui accélèrent les anthropoécosystèmes. La rapidité menace les acteurs économiques de sidération, c'est-à-dire d'incapacité de réagir en temps nécessaire. Par exemple, l'abaissement rapide des barrières douanières ne permet pas aux exploitations agricoles d'adapter leur compétitivité au même rythme, ce qui entraîne des faillites. De même, les lois environnementales et les interdictions d'utilisation de produits toxiques posent souvent des problèmes d'adaptation difficiles aux agriculteurs (tout comme aux industriels). L'enjeu est d'optimiser les transitions, c'est-à-dire de les organiser dans le temps. Pour cela, il est nécessaire de mettre en place des systèmes d'assurance susceptibles de réduire l'angoisse liée aux incertitudes, et des aides aux mutations qui correspondent aux enjeux.

Anticiper, c'est aussi désigner le sens des transformations et garder le cap, afin de permettre aux agents économiques de disposer d'une certaine sécurité dans la permanence des choix. Cela requiert des stratégies longues pour chacun des différents domaines du développement durable : transition climatique, transition écologique, transition énergétique, transition démographique, transition alimentaire, transition agroécologique dans l'agriculture, transition du commerce international, transition du droit de propriété afin de garantir un accès à la terre et à un toit à tous dans les pays de grande pauvreté rurale...

Mais stabiliser et anticiper n'est pas tout. Il faut aussi réussir à financer les investissements de viabilité relatifs aux différentes transitions nécessaires. Cela demande d'opérer des choix d'investissements publics privilégiant l'offre dans les domaines qui vont générer les activités de demain.

### FAIRE DES CHOIX DE SAUVETAGE

Les enjeux sont tels que la compréhension du monde doit être la priorité absolue. Des sociétés peu conscientes des risques peuvent prendre des décisions suicidaires. Ce fut le cas lorsque, par nationalisme, certains ont décrété que, l'Amazonie étant brésilienne, c'était au seul Brésil de décider de l'avenir de cette forêt et que cet avenir était essentiellement agricole. Les classes politiques, qu'elles soient démocrates ou autoritaires, ont une responsabilité considérable dans la gouvernance des trajectoires de viabilité de la portion d'anthropobiosphère qui fait partie des territoires qu'ils administrent.

Tout repose sur leur capacité à inciter les populations à adopter les comportements nécessaires. L'investissement dans l'éducation est donc central bien qu'insuffisant, en

raison de la lenteur des processus éducatifs à produire les changements de comportement espérés. Préparer les générations futures est essentiel mais déjà très tardif. Convaincre les générations présentes est donc indispensable et urgent. Dans cette perspective, le rôle des médias est capital pour étendre la connaissance sur les enjeux et la nécessité de faire un effort d'adaptation. L'une des voies à promouvoir est très certainement celle des réseaux sociaux transnationaux dédiés à l'action citoyenne, l'information et l'autoéducation. Le monde politique doit, pour sa part, donner l'exemple de la cohérence des objectifs économiques, sociaux et environnementaux. Opposer, dans des partis différents, des priorités écologiques et des priorités économiques est souvent contre-productif quand il est nécessaire de rechercher les cohérences.

### LA TRANSITION AGRICOLE EST EMBLÉMATIQUE DE LA VOIE À SUIVRE

L'agriculture est l'activité qui se trouve le plus en interaction avec la biosphère. Le destin écologique de la planète dépend presque totalement d'elle. Si elle continue à déforester, à détruire la biodiversité des écosystèmes et des espèces, à déstructurer les sols et à favoriser l'érosion, à polluer l'environnement, à ne pas renouveler les cycles des ressources, à ne pas restreindre l'utilisation des ressources limitées... les coûts de réhabilitation seront peut-être trop élevés pour que les sociétés puissent les financer. En effet, l'agriculture dans le monde, c'est presque 3 milliards de personnes vivant pauvrement sur de très petites exploitations. Et sans doute moins de 50 millions vivant sur des exploitations hautement capitalistiques ou de petit capitalisme familial. Si, au contraire, on intensifie écologiquement, à vitesse raisonnable et de manière durable en ménageant

## ÉCOLOGIE INTENSIVE

la transition nécessaire, alors on peut espérer un succès. L'agrobiosphère pourrait devenir un « jardin planétaire<sup>1</sup> » au sens où elle bénéficierait d'une attention exceptionnelle alliant la nature et la société des humains.

De nombreux mouvements de producteurs ont déjà pris cette orientation d'intensification écologique. C'est d'abord le cas de « l'agriculture biologique » qui, dès lors qu'elle renonce à utiliser des intrants chimiques, n'a pas d'autre alternative que d'intensifier les fonctionnalités écologiques. C'est le cas aussi de « l'agriculture durable » qui est plus souple sur les utilisations de produits issus de la chimie industrielle mais qui va dans la même direction. C'est encore le cas de « l'agriculture raisonnée » dont les partisans cherchent à diminuer fortement les achats d'intrants et qui aborde l'intensification écologique. De nombreuses initiatives vont dans cette direction.

---

1. Terme utilisé dans le cadre de l'association Prospective 2100 (qui a piloté un groupe de travail éponyme jusqu'à sa disparition en 2016) en 1990 par Thierry Gaudin, Michel Griffon et Hervé Bichat [[//2100.org/asso/25-ans-de-reflexion/](http://2100.org/asso/25-ans-de-reflexion/)].

## CONCLUSION

# S'INSPIRER DE LA NATURE POUR ACCÉDER À LA VIABILITÉ

Cet essai a un point de départ : l'observation de la dégradation progressive et étendue de la biosphère. L'agriculture joue un rôle premier dans cette dégradation car, depuis 12 000 ans, elle défriche et déforeste, et, depuis un demi-siècle, elle est polluante dans sa version intensive en chimie de synthèse. Le mot biosphère prête d'ailleurs à confusion car l'on ne peut s'empêcher d'y voir l'image positive d'une nature sauvage, inviolée ou à peine transformée par nos sociétés humaines. Beaucoup de documentaristes s'évertuent encore à nous la montrer comme telle alors qu'elle n'est parfois plus qu'un épiderme pelé, tant son couvert végétal est souvent réduit en lambeaux, là où la forêt est le plus attaquée. À l'inverse, nombreux sont les cinéastes et chroniqueurs qui la décrivent, dans un registre pessimiste et avec un ton accusateur contre les auteurs des dégradations. En effet, la situation de la biosphère est grave. Néanmoins, l'utiliser pour faire rêver à une nature immaculée devenue mythique serait tout autant réducteur que de s'en servir pour annoncer une inévitable apocalypse écologique : elle mérite mieux.

## CHANGER DE VISION

Cet essai a un point d'arrivée : l'ambition de changer notre regard et changer de trajectoire. L'objectif est de produire une nature viable – car désormais c'est nous qui produisons la nature, en partie – et des sociétés vivables. Pour cela, nous devons d'abord être réalistes. La biosphère est devenue une anthropobiosphère. Le mot anthropobiosphère a la vertu de rappeler que la biosphère a énormément changé, au point que ses paysages portent presque tous, définitivement, la marque de l'homme et que beaucoup sont méconnaissables par rapport à ce qu'ils devaient être avant l'explosion de la démographie humaine. Nous parlons aussi d'agroécosystèmes, de préférence aux « systèmes de production agricole », pour rappeler que l'agriculture est avant tout une manipulation d'écosystèmes plutôt qu'une exploitation de substrats sans conscience des conséquences. Entrons complètement dans la perspective de l'anthropocène pour évoquer les temps géologiques présents où le destin de la planète apparaît totalement dépendant de l'action de l'homme.

Grâce à un tel langage, nous ne voyons plus la nature ni comme un objet mythique qui pourrait redevenir paradisiaque ni, au contraire, comme un objet de scandale et de catastrophes. Car ces visions ont en commun *in fine* d'envisager nos sociétés comme extérieures à la nature. Depuis des temps très anciens, nous avons posé (au moins dans la société occidentale) une dualité comme principe, la nature d'une part, les sociétés d'autre part. Cette dissociation peut donner à penser que nous sommes les maîtres de la nature et que, en étant distincts, nous sommes devant des choix à faire. Tout au contraire, il est devenu nécessaire de considérer que l'avenir de la biosphère se confond avec le nôtre, et que l'homme appartient centralement à la nature

## CONCLUSION

dont il est totalement solidaire (au sens d'interdépendance). Cependant, comme l'espèce humaine est devenue la clé de voûte de l'ensemble et que, désormais, tout dépend d'elle, elle est *de facto* responsable de la destinée de l'anthropobiosphère et même, en grande partie, du système Terre tout entier.

Dans cette destinée, ce que deviendra l'agriculture est central. L'agriculture mondiale reste encore sur une trajectoire de dégradation. Pourtant, on commence à penser qu'elle pourrait inverser la tendance. Au lieu de contraindre la nature et de maîtriser les milieux, on chercherait une sorte de « connivence avec le fonctionnement des écosystèmes<sup>1</sup> ». L'action des sociétés deviendrait améliorante. Cette attitude avait été définie dès le XVI<sup>e</sup> siècle par Francis Bacon<sup>2</sup> qui assurait que l'on ne pouvait prétendre « commander à la nature qu'en lui obéissant ». Cette maxime féconde est de celles qui devraient être prononcées dans toutes les écoles car elle bouleverse les fondements anthropologiques de la relation homme-nature établis dans l'un des plus vieux textes de l'histoire : « Soyez féconds, multipliez, remplissez la Terre, et l'assujettissez<sup>3</sup>. » Assujettir d'un côté, obéir de l'autre. Nous avons ici choisi d'abord d'obéir. L'expérience montre que l'on peut développer de nouveaux concepts technologiques allant dans le sens de l'obéissance et du

---

1. Michel Griffon & Jacques Weber, « La Révolution doublement verte : économie et institutions », *Fondation Prospective et Innovation*, Nogent-sur-Marne, Cirad-URPA, 1996, 120-126.

2. Voir p. 17.

3. Genèse, I,1,28. On peut certes débattre de l'interprétation et de son sens réel à travers les traductions qu'il a traversées. On peut par exemple le lire comme « Dieu donnant la responsabilité du devenir de la nature à l'homme ». Mais, bien évidemment, mis à part d'éventuels exégètes, tout le monde y a vu un devoir de domination sans partage sur la nature, associé à une expansion démographique sans limites, ce qui est suicidaire.

respect des lois de viabilité de la nature. C'est ce qu'on appelle l'« agroécologie », c'est-à-dire une agriculture « écologiquement intensive » obtenant de bons rendements, résiliente et sans effets environnementaux adverses.

Dès lors, la question se pose de savoir si l'on peut étendre le concept d'intensification écologique à d'autres secteurs. Certes, la production agricole représente l'essentiel de l'utilisation de l'anthropobiosphère ; son importance est d'ailleurs telle que l'on a inventé le mot « agrobiosphère<sup>1</sup> » pour l'exprimer. Mais il faut également s'intéresser à l'ensemble du système Terre, y compris ce qui n'est pas vivant mais qui permet de vivre.

L'intensification écologique s'appuie sur les très nombreuses fonctionnalités existant dans la nature. Ces fonctionnalités sont en mémoire dans les gènes, dans les structures moléculaires et dans les mécanismes d'enchaînement des voies métaboliques, qui créent une sorte de mémoire distribuée. L'intensification consiste d'abord à les amplifier et à organiser leur synergie. Cela définit un stock potentiel de techniques rapidement mobilisables. Ensuite, si l'on considère les innombrables fonctions productives que recouvre le vivant comme des sources d'inspiration (la bio-inspiration), le potentiel technologique est encore beaucoup plus grand. Le vivant est non seulement un modèle pour inspirer l'innovation, mais aussi une solution pour gérer la viabilité générale de la planète. Du côté des processus non vivants, on trouve également, à l'échelle moléculaire, d'innombrables phénomènes physico-chimiques susceptibles de constituer des sources d'inspiration. Le monde

---

1. Voir le programme « Agrobiosphère » de l'Agence nationale de la recherche [[//www.agence-nationale-recherche.fr/suivi-bilan/editions-2013-et-anterieures/environnement-et-ressources-biologiques/viabilite-et-adaptation-des-ecosystemes-productifs-territoires-et-ressources-aux-changements-globaux/](http://www.agence-nationale-recherche.fr/suivi-bilan/editions-2013-et-anterieures/environnement-et-ressources-biologiques/viabilite-et-adaptation-des-ecosystemes-productifs-territoires-et-ressources-aux-changements-globaux/)].

## CONCLUSION

vivant recèle des processus en nombre incalculable impliquant des molécules carbonées, le monde inerte également avec des molécules non carbonées. Par ailleurs, l'existence de grands cycles biogéochimiques, comme ceux de l'azote et du phosphore, est aussi une source d'inspiration pour réutiliser les ressources limitées qui deviendront inévitablement rares. L'imitation de ces cycles est la base de l'économie circulaire et du recyclage. Ces très nombreuses ressources technologiques ne sont accessibles que si l'on finance généreusement la connaissance, à la fois du vivant et de l'inerte. Elles peuvent apporter des solutions aux nombreux problèmes que la science et la technologie devront résoudre, dans les décennies qui viennent, pour assurer un avenir viable à l'anthropobiosphère.

### DE L'ANTHROPOBIOSPHERE À LA NOOSPHERE

L'intensification écologique suppose donc une intensification des efforts de recherche d'exploration, d'application et d'innovation, soit une intensification de l'intelligence. Cela donne à penser que l'ampleur de la tâche nécessite de mieux structurer la « noosphère », c'est-à-dire la sphère de la pensée humaine.

Cette structuration est déjà en cours mais selon un ordre très imparfait. La connaissance s'accumule dans des revues scientifiques et de vulgarisation comme dans des films documentaires. Dans la grande majorité des cas, la pensée est présentée par discipline. Bien que lues par un petit nombre de scientifiques, les revues remplissent leur rôle d'accumulation des savoirs et d'animation des débats. Elles révèlent des travaux qui se situent à la frontière des connaissances, qui est très évolutive. L'enseignement supérieur actualise ces connaissances et les transmet de manière à former

des chercheurs qui prennent le relais de l'aventure de la connaissance et font évoluer cette frontière en permanence.

L'une des grandes difficultés que rencontrent les sociétés est l'accélération du rythme de croissance du volume des connaissances. Aujourd'hui, il devient difficile, dans une équipe de recherche et encore plus à l'échelle d'un chercheur, de maîtriser les volumes des savoirs indispensables pour traiter de sujets de synthèse et de sujets transversaux. Cette difficulté se traduit par une tendance à développer des recherches de plus en plus pointues, ce qui conduit à une forme de parcellisation. Il va donc falloir inventer une gestion de la connaissance qui permette de concilier la multiplication des domaines pointus et disciplinaires avec les nécessaires synthèses larges et surtout transdisciplinaires.

De plus en plus, les infrastructures informatiques mondiales, comme l'Internet, constituent le substrat physique de cette connaissance. Ce substrat devient rapidement celui de la future noosphère au sens où il permet l'accumulation et la circulation du savoir. Toutefois, la structuration de la connaissance et les processus de recherche par mot-clé sont très loin d'être satisfaisants. Les mots y fonctionnent comme des fermetures littérales et épistémiques alors qu'il serait nécessaire de favoriser des approches analogiques et métaphoriques, d'ouvrir les réflexions afin d'identifier les concepts nécessaires, lesquels sont souvent difficiles à exprimer dans les langues existantes. L'architecture de la sélection des sources, par les outils de navigation sur l'Internet, favorise les idées déjà majoritaires et pénalise le discernement. La liberté de diffusion d'informations transforme les réseaux en lieux de manipulation où tout contenu est présenté comme étant d'égale valeur avec tout autre en termes de qualité. On prononce même l'éloge du mensonge (qualifié scandaleusement dans des cercles intellectuels de « post-vérité ») pour manipuler l'opinion. La valeur des

## CONCLUSION

travaux scientifiques sur le changement climatique est ainsi contestée par des « menteurs volontaires » pour des raisons qui tiennent à la défense d'intérêts privés. Le risque est donc de produire une tour de Babel apportant de la confusion plus que de la clarification. Une noosphère confuse serait peut-être ce qu'il y aurait de pire pour la gestion de l'anthropobiosphère, alors que, nous l'avons vu, la connaissance est la bouée de sauvetage de l'évolution planétaire. Il faut donc ouvrir les réflexions pour permettre à tous d'avoir accès à une connaissance qui soit débarrassée de ces risques et fondée sur une pensée dialectique ainsi que sur le discernement, plutôt que sur une pensée rhétorique et manipulatrice. L'outil reste à construire. Peut-être, là encore, faut-il s'inspirer du vivant ?



## LEXIQUE

**AGGRADATION** : néologisme, proposé par le professeur Lemieux de l'université Laval (Québec), qui traduit le concept d'inverse des mécanismes de dégradation.

**AGROBIOSPHERE** : ensemble de la biosphère concerné par les activités agricoles, au sens large.

**AGROÉCOLOGIE** : terme employé de plus en plus internationalement pour désigner les techniques agricoles fondées sur l'écologie.

**AGROÉCOSYSTÈME** : écosystème transformé par l'agriculture.

**ANTHROPOBIOSPHERE** : ensemble de la biosphère où le caractère transformé par les sociétés humaines est mis en avant, autrement dit, un ensemble « hybride de fonctionnalités naturelles et de fonctionnalités technologiques », un « hybride nature-culture ».

**APOPTOSE** : mort des cellules génétiquement programmée et compensée dans les mêmes proportions par la prolifération cellulaire, ce qui est une illustration du caractère de structure dissipative des structures vivantes.

**BIOCÉNOSE** : « groupement d'êtres vivants dont la composition, le nombre des espèces et celui des individus reflètent certaines conditions moyennes du milieu ; ces êtres sont liés par une dépendance réciproque » (d'après Möbius).

**BIO-INSPIRATION** : méthode de création scientifique et technologique fondée sur la biologie, la bio-inspiration n'est rien d'autre que l'utilisation des fonctionnalités naturelles comme source d'inspiration pour créer des solutions nouvelles.

**BIOME** : ensemble homogène de végétaux et d'animaux dans une même aire géographique contrôlée par le climat.

## ÉCOLOGIE INTENSIVE

**BIOSPHERE** : ensemble du monde vivant (microbes, plantes, animaux) et du monde minéral qui lui est lié (notamment les ions utilisés par l'ensemble du monde vivant).

**BIOTOPE** : littéralement « lieu de vie », pour les écologistes, c'est le milieu d'accueil de la biocénose peuplant un écosystème (d'après le dictionnaire de l'écologie).

**ÉCOSYSTÈME** : ensemble formé par l'environnement physique (biotope) et le monde vivant (biocénose) qui lui est lié, dans un cadre donné.

**ÉPIGÉNÉTIQUE** : se dit d'un changement héréditaire adaptatif sans changement de la structure génétique de l'ADN du noyau.

**EXTERNALITÉ (ou EFFET EXTERNE)** : terme emprunté à l'économie qui signifie qu'à une action ayant un objectif visé, correspondent des conséquences non visées, « externes » au champ de définition de l'action.

**FORÇAGE** : excès d'un des facteurs de production réputé comme le plus efficace pour augmenter les rendements, entraînant des désordres environnementaux. (Larousse : traitement que l'on fait subir à certaines plantes pour les obliger à se développer, à fleurir ou à fructifier en dehors des périodes normales.)

**LUTTE BIOLOGIQUE** : utilisation de prédateurs et de parasites pour maîtriser les ravageurs.

**MÉTABOLISME** : ensemble des transformations biologiques, qui comprend l'anabolisme (construction) et le catabolisme (déconstruction). (Larousse : ensemble des réactions chimiques de transformation de matière et d'énergie, catalysées par des enzymes, qui s'accomplissent dans tous les tissus de l'organisme vivant.)

**NATURE** : ensemble des milieux physiques et du monde vivant ainsi que de tous les phénomènes qui leur sont liés. Ce terme évoque aussi leur état premier, avant les transformations induites par les sociétés humaines.

**NICHE ÉCOLOGIQUE** : pour une espèce donnée, c'est le rôle et la place de cette espèce dans l'écosystème en termes de relations avec les autres espèces (habitat, prédation, parasitisme...).

## LEXIQUE

- OLIGOÉLÉMENTS** : minéraux indispensables aux organismes, mais en quantité infime.
- PERMACULTURE** : type de culture associant de multiples plantes en recherchant les synergies, particulièrement dans les jardins. Fréquemment pratiquée en agriculture bio.
- PLANÈTE TERRE** : dans les milieux scientifiques, cette expression est employée essentiellement pour désigner la planète comme un objet physique et écologique mais cela n'empêche pas de la voir aussi comme un objet social.
- SOCIÉTÉ HUMAINE** : au singulier, l'expression désigne l'espèce humaine et son organisation, tandis que « sociétés humaines » au pluriel évoque la diversité des sociétés.
- ZONOBIOME** : grande région écologique caractérisée principalement par les données fondamentales du climat, calendrier des précipitations, des températures et de la quantité de lumière. Exemples : zonobiome tropical sec, zonobiome méditerranéen, zonobiome boréal...



## BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

des ouvrages qui ont inspiré cet essai

- ALTIERI MIGUEL ANGEL, *L'Agroécologie*, Éditions Charles Corlet, 2013.
- AUBIN JEAN-PIERRE, *Viability Theory*, Birkhäuser, 1991.
- AUBIN JEAN-PIERRE, *La Mort du devin, l'émergence du démiurge. Essai sur la contingence, la viabilité et l'inertie des systèmes*, Beauchesne, 2010.
- BALANDIER GEORGES, *Le Désordre. Éloge du mouvement*, Fayard, 1988.
- BARBAULT ROBERT, *Écologie générale. Structure et fonctionnement de la biosphère*, 5<sup>e</sup> édition, Dunod, 2000.
- BARBAULT ROBERT & WEBER JACQUES, *La Vie, quelle entreprise!*, Seuil, 2010.
- BOSERUP ESTER, *Évolution agraire et pression démographique*, Flammarion, 1970.
- BURELLIER FRANÇOISE & BAUDRY JACQUES, *Écologie du paysage, Concepts, méthodes et applications*, Tec & Doc Lavoisier, 1999.
- CHEVASSUS-AU-LOUIS BERNARD, *Biodiversité, un nouveau regard. Refonder la recherche agronomique*, ESA éditions, Angers, 2007.
- CONWAY GORDON R., *The Doubly Green Revolution : Food for All in the Twenty-First Century*, Cornell University Press, 1999.
- DALY HERMAN E., *Steady-State Economics : second edition*, Island Press, Washington, 1991.
- DESCAMPS HENRI & ODILE, *Au printemps des paysages*, Buchet/Chastel, 2004.

- DIAMOND JARED, *De l'inégalité parmi les sociétés. Essai sur l'homme et l'environnement dans l'histoire*, Gallimard, 2000.
- DIAMOND JARED, *Effondrement*, Gallimard, 2006.
- DUVE CHRISTIAN DE, *Singularités, jalons sur les chemins de la vie*, Odile Jacob, 2005.
- KELLER EVELYN FOX, *Expliquer la vie. Modèles, métaphores et machines en biologie du développement*, Gallimard, 2005.
- FRONTIER SERGE & PICHOT-VIALE DENISE, *Écosystèmes. Structure, fonctionnement, évolution*, Elsevier Masson, 1997.
- GEORGESCU-ROEGEN NICHOLAS, *La Décroissance. Entropie, écologie, économie*, Sang de la terre, 2004.
- GLIESSMAN STEPHEN R., *Field and Laboratory Investigations in Agroecology*, 3<sup>e</sup> édition, CRC Press, New York, 2014.
- GRIFFON MICHEL, *Pour des agricultures écologiquement intensives*, Éditions de l'Aube, 2010.
- GRIFFON MICHEL, *Qu'est-ce qu'une agriculture écologiquement intensive?*, Quae, 2013.
- GRIFFON MICHEL & GRIFFON FLORENT, *L'Homme viable. Du développement au développement durable*, Odile Jacob, 2010.
- GRIFFON MICHEL & GRIFFON FLORENT, *Pour un monde viable. Changement global et viabilité planétaire*, Odile Jacob, 2011.
- GUERRIEN BERNARD, *L'Illusion économique*, Omnisciences, 2007.
- HEINRICH DIETER & HERGT MANFRED, *Atlas de l'écologie*, LGF, 1993.
- ISAMBERT FRANÇOIS-ANDRÉ, «La physiologie sociale», *Revue française de sociologie*, vol. 7, 1966.
- KRUGMAN PAUL R., *L'Économie auto-organisatrice*, De Boeck, 2008.
- LEFEUVRE JEAN-CLAUDE, *Les Invasions biologiques*, Libella, 2013.
- LEFROY E.C., HOBBS R.J., O'CONNOR M.H. & PATE J.S. (EDS), *Agriculture as a Mimic of Natural Ecosystems*, Springer, 1999.
- LÉVÊQUE CHRISTIAN, *Écologie*, Dunod, 2001.
- MATAGNE PATRICK, *Comprendre l'écologie et son histoire*, Delachaux et Niestlé, 2002.
- MAZOYER MARCEL & ROUDART LAURENCE, *Histoire des agricultures du monde. Du néolithique à la crise contemporaine*, Seuil, 1997.

## BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- MCNEELY JEFFREY A. & SCHERR SARA J., *Ecoagriculture : Strategies to Feed the World and Save Wild Biodiversity*, Island Press, Washington, 2002.
- ORSENNA ERIK ET LE CERCLE DES ÉCONOMISTES, *Un monde de ressources rares*, Perrin, 2007.
- PÉDRO GEORGES (sous la direction de), *Cycles biogéochimiques et écosystèmes continentaux*, EDP Sciences, 2007.
- PITTE JEAN-ROBERT, *Histoire du paysage français, de la préhistoire à nos jours*, Tallandier, 2012.
- PRETTY JULES, « Agriculture sustainability : concepts, principles and evidence », *Philosophical Transactions of the Royal Society B.*, 2008, 363 : 447-465.
- RODDIER FRANÇOIS, *Thermodynamique de l'évolution. Un essai de thermo-bio-sociologie*, Éditions Parole, 2012.
- SHUMPETER JOSEPH A., *Capitalisme, socialisme et démocratie*, 1942, trad. française de Gaël Fain, Petite bibliothèque Payot, n° 55 [//dx. doi : 10.1522/cla. scj. cap].
- SMITH ADAM, *Recherches sur la nature et les causes de la richesse des nations*, Economica, nouvelle trad., 2000 [//dx. doi.org/doi : 10.1522/cla. sif. sma. rec6].
- TAINTER JOSEPH A., *The Collapse of Complex Societies*, Cambridge University Press, 1990.
- TOYNBEE ARNOLD J., *La Grande Aventure de l'humanité*, Payot, 1994.



## TABLE

INTRODUCTION : CONCILIER BIOSPHÈRE ET EXPANSION HUMAINE .....	15
L'obligation d'assurer à tous un monde viable .....	19
I. LA BIOSPHÈRE : UN IMMENSE STOCK POTENTIEL DE TECHNOLOGIE .....	25
Les sphères qui sont le support et les composantes de nos vies .....	26
Comment le cœur de la « sphère vivante » fonctionne-t-il ? .....	31
Le métabolisme : l'élaboration des processus du vivant .....	32
La spécialisation des organes des plantes puis leur spéciation .....	34
L'écologie voit un écosystème comme un ensemble systémique fonctionnel .....	37
L'écologie voit un écosystème comme un ensemble d'équations chimiques .....	39
L'écologie voit un écosystème comme résultant d'un fonctionnement génétique .....	41
L'écologie vue comme un fonctionnement thermodynamique des écosystèmes .....	44

## ÉCOLOGIE INTENSIVE

Toutes les représentations issues des différentes disciplines sont légitimes .....	47
Il n'y a pas d'équilibre général dans la nature .....	48
Tout n'est que déséquilibre, l'équilibre est un cas particulier de déséquilibre ....	51
La transformation de la biosphère est permanente .....	52
La biosphère : un stock évolutif de fonctionnalités .....	54
<b>II. LA BIOSPHERE EN DANGER .....</b>	<b>59</b>
La colonisation de la biosphère par les sociétés humaines .....	59
Notre espèce et les conséquences de ses actes .....	61
Les migrations sont dans la nature profonde des sociétés humaines .....	65
Avec l'agriculture, les populations se sont ancrées dans des territoires .....	67
La révolution industrielle et les écosystèmes .....	69
Le xx <sup>e</sup> siècle, celui des grandes famines puis du redressement agricole .....	73
À la fin du xx <sup>e</sup> siècle, montée d'une crise environnementale générale .....	75
Le pilotage de la biosphère par le marché .....	76
Une dynamique d'effondrement ? .....	78

TABLE

III. LA PRESSION DE LA POPULATION MONDIALE SUR LA BIOSPHERE .....	81
La prospective démographique dans l'interrogation .....	82
Une question récurrente : la capacité de la biosphère à nourrir le monde .....	85
Les détériorations de la biosphère continentale .....	87
IV. LA BIOSPHERE : TROP PETITE POUR LES SOCIÉTÉS HUMAINES ? .....	91
La biosphère sollicitée pour de nouveaux usages : la bioénergie et les biomatériaux .....	91
La voie principale : l'éradication radicale d'écosystèmes .....	93
La voie de la dégradation lente .....	97
Les impasses et les limites de la géosphère .....	99
La toxicité de certaines inventions chimiques .....	101
Les moteurs des dégradations et l'accélération .....	102
V. L'ÉQUATION SUPRÊME DE LA BIOSPHERE .....	105
Quels sont les objectifs, mais aussi les contraintes associées ? .....	105
Les autres contraintes à respecter .....	109
La conception thermodynamique de la biosphère .....	114
L'anthropobiosphère, le vrai nom qu'il faudrait donner à la biosphère .....	115
L'objectif de maximisation des structures de l'anthropobiosphère .....	117

VI. DE LA RÉPARATION ÉCOLOGIQUE À LA RÉSILIENCE .....	121
Contre une science et une technologie en ordre dispersé .....	122
S’inspirer de la dégradation pour penser l’aggradation .....	124
Penser la résilience comme une endurance : généraliser les stocks systémiques .....	129
Penser la résilience comme la mémoire de plans de reconstruction .....	131
La résilience comme reconstruction intelligente des agroécosystèmes .....	132
La résilience par la redondance .....	134
VII. DE LA RÉSILIENCE À L’INTENSIFICATION ÉCOLOGIQUE .....	137
La fonctionnalité : un concept clé .....	138
Un autre concept : l’intensification .....	142
Intensifier écologiquement .....	144
Des limites à l’intensification écologique ? .....	146
L’intensité écologique permet-elle des performances productives élevées ? .....	152
Des technologies compatibles avec l’écologie .....	154
Peut-on associer techniques écologiques amplifiées et apports artificiels ? .....	156
Une conception élargie des ressources pour l’intensification écologique : le recyclage .....	157
Aller plus loin dans l’intensification écologique : la bio-inspiration .....	158

## TABLE

VIII. L'AGRICULTURE ET LA GESTION DES AGROÉCOSYSTÈMES DANS LE MODE DE LA COMPLEXITÉ .....	165
Un grand nombre de variables de commande implique de les classer .....	166
L'intensivité vue comme une synergie entre fonctionnalités amplifiées .....	175
IX. UN OPTIMUM VIABLE POUR L'INTENSIFICATION ÉCOLOGIQUE....	181
Les performances de production des agroécosystèmes .....	181
Au sein du champ de viabilité se trouve l'optimum .....	183
L'optimum doit être conjugué avec la notion de risque .....	184
Le risque vient en partie de l'instabilité permanente du cadre de viabilité .....	186
La difficulté d'aggrader, la facilité de dégrader .....	187
Vers une agriculture environnementalement saine et à haut rendement .....	189
Le raisonnement d'intensification est donc inévitable .....	191
Des moteurs de changement puissants .....	192
La révolution numérique au service de l'écologie .....	193

<b>X. S'INSPIRER DE LA NATURE</b>	
<b>COMME MODÈLE ?</b> .....	195
L'équilibre est-il la clé des sociétés ? .....	196
Les raisonnements économiques .....	198
Les lois de fonctionnement de l'écologie et de l'économie .....	199
Les fonctionnalités de l'économie de marché ne sont que des théories .....	202
Supprimer les règles ? .....	206
Peut-on parler de fonctionnalités économiques et sociales ? .....	209
Intensifier les fonctionnalités économiques et sociales ? .....	215
<b>XI. CHANGER DE MODE</b>	
<b>DE PENSÉE</b> .....	219
Un devoir : éviter le pire .....	219
Une priorité : piloter la viabilité .....	223
Faire des choix de sauvetage .....	224
La transition agricole est emblématique de la voie à suivre .....	225
<b>CONCLUSION : S'INSPIRER DE LA NATURE</b>	
<b>POUR ACCÉDER À LA VIABILITÉ</b> .....	227
Changer de vision .....	228
De l'anthropobiosphère à la noosphère .....	231
<b>LEXIQUE</b> .....	235
<b>BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE</b>	
des ouvrages qui ont inspiré cet essai .....	239

CHEZ BUCHET/CHASTEL  
DANS LE DOMAINE DE L'ÉCOLOGIE

COLLECTION DANS LE VIF

PIERRE ATHANAZE, 2015.

*Le Retour du sauvage.*

SYLVIE BRUNEL, 2017.

*Plaidoyer pour nos agriculteurs.*

FLORENCE BURGAT, 2015.

*La Cause des animaux, pour un destin commun.*

VALÉRIE CABANES, 2017.

*Homo natura, en harmonie avec le vivant.*

MARINE JOBERT & FRANÇOIS VEILLERETTE, 2015.

*Perturbateurs endocriniens, la menace invisible.*

VALÉRY LARAMÉE DE TANNENBERG, 2017.

*Le Changement climatique, menace pour la démocratie ?*

VALÉRY LARAMÉE DE TANNENBERG & YVES LEERS, 2015.

*Menace sur le vin, les défis du changement climatique.*

JEAN-MICHEL LECERF, 2016.

*La viande, un peu, beaucoup, passionnément ou pas du tout ?*

FRANCELYNE MARANO, 2016.

*Faut-il avoir peur des nanos ?*

JEAN-MARC MORICEAU, 2015.

*Le Loup en questions, fantasme et réalité.*

PASCAL YIOU, 2015.

*Le temps s'est-il détaché ?*

*Comprendre les catastrophes climatiques.*

## COLLECTION LA VERTE

ROBERT BARBAULT, 2014.

*Au nom du vivant,  
plaidoyer pour réconcilier l'homme et la nature.*

TIM BIRKHEAD, 2014.

*L'Oiseau et ses sens.*

FRANK CÉZILLY, 2006.

*Le Paradoxe de l'hippocampe,  
une histoire naturelle de la monogamie.*

FRANK CÉZILLY, 2014.

*De mâle en père, à la recherche de l'instinct paternel.*

DANIEL CHAMOVITZ, 2014.

*La Plante et ses sens.*

TIM FLANNERY, 2013.

*Penser la Terre,  
plaidoyer optimiste pour notre futur.*

TIM FLANNERY, 2015.

*Sauver le climat,  
tout est encore possible.*

PHILIPPE GRANDJEAN, 2016.

*Cerveaux en danger, protégeons nos enfants.*

THOR HANSON, 2017.

*Le Triomphe des graines.*

JEAN-CLAUDE LEFEUVRE, 2013.

*Les Invasions biologiques,  
un danger pour la biodiversité.*

FRANCELYNE MARANO, ROBERT BAROUKI & DENIS ZMIROU, 2015.

*Toxique ?  
Santé et environnement : de l'alerte à la décision.*

VIRGINIE MARIS, 2016.  
*Philosophie de la biodiversité,  
petite éthique pour une nature en péril.*

RAPHAËL MATHEVET & FRANÇOIS BOUSQUET, 2014.  
*Résilience & Environnement,  
Penser les changements socio-économiques.*

SERGE MORAND & GILLES PIPIEN (DIR.), 2013.  
*Notre santé et la biodiversité,  
tous ensemble pour préserver le vivant.*

JEREMY NARBY, 2017.  
*Intelligence dans la nature,  
en quête du savoir.*

GUILLAUME SAINTENY, 2012.  
*Plaidoyer pour l'écofiscalité.*

GAIA VINCE, 2015.  
*Planète en marche,  
construisons ensemble le monde de demain.*

## L'ÉCOLOGIE EN IMAGES

FARID ABDELOUAHAB & FRÉDÉRIC DENHEZ, 2014.  
*Les Colères du temps,  
réalités et imaginaires des désordres climatiques.*

JACQUES BLONDEL, GUY BARRUOL & RÉGIS VIANET (DIR.),  
2013.  
*L'Encyclopédie de la Camargue.*

ANNE-FRANCE DAUTHEVILLE, 2016.  
*Miscellanées des plantes.*

FLEUR DAUGEY, 2017.  
*Miscellanées des animaux.*

YVES LEERS & JEAN-LUC FESSARD, 2017.  
*Ça chauffe dans nos assiettes.*  
*Des recettes pour sauver le climat.*

FRANÇOIS LETOURNEUX, 2016.  
*Le Mouvement des lieux,*  
*petites histoires de paysages.*

FRANÇOIS LETOURNEUX & NATHALIE FONTREL, 2014.  
*Chroniques du vivant,*  
*les aventures de la biodiversité.*

NICOLAS TOURNADRE, 2017.  
*Méditations végétales et pensées minérales.*

## ET AUSSI...

JACQUES BLONDEL, 2012.  
*L'Archipel de la vie,*  
*essai sur la diversité biologique et une éthique de sa pratique.*

MARK BOWEN, 2008.  
*Fragiles glaciers, la disparition des archives du climat.*

GIORGOS CATSADORAKIS, 2009.  
*Prespa, au cœur des Balkans, une histoire naturelle et humaine.*

LAURENT CHAZÉE & ÉTIENNE GÉHIN, 2012.  
*Say, femme poussang,*  
*peuple de la forêt, de la montagne à la plaine, au Laos.*

PHILIPPE CLAIRE, 2005.  
*Faire la pluie ou le beau temps.*

HENRI & ODILE DÉCAMPS, 2004.

*Au printemps des paysages.*

ÉRIC FEUNTEUN, 2012.

*Le Rêve de l'anguille, une sentinelle en danger.*

*Petite encyclopédie sur un poisson extraordinaire.*

MICHEL GAUTHIER-CLERC, 2011.

*Une mouette est morte à l'Assemblée nationale !*

LINDA GARDELLE, 2010.

*Pasteurs nomades de Mongolie.*

*Des sociétés nomades et des États.*

LINDA GARDELLE, 2010.

*Pasteurs touaregs du Sahara malien.*

*Des sociétés nomades et des États.*

MICHEL GAUTHIER-CLERC, 2007.

*Pôles en péril.*

DAVID GOODSTEIN, 2005.

*Panne sèche,*

*la fin de l'ère du pétrole.*

PAUL ISENMANN (DIR.), 2004.

*Les Oiseaux de Camargue et leurs habitats,*

*une histoire de cinquante ans (1954-2004).*

LUCIEN LAUBIER, 2008.

*Ténèbres océanes,*

*le triomphe de la vie dans les abysses.*

JACQUES LESLIE, 2008.

*La Guerre des barrages.*

RAPHAËL MATHEVET, 2004.

*Camargue incertaine, sciences, usages et natures.*

MARIE-LAURE DE NORAY-DARDENNE, 2006.  
*Le Livre des Imraguen,  
pêcheurs du Banc d'Arguin en Mauritanie.*

THYMIO PAPAYANNIS (DIR.), 2010.  
*Un patrimoine à préserver, les zones humides méditerranéennes.*

ALEXIS SCHWARZENBACH, 2011.  
*WWF, cinquante ans au service de la nature.*



COMPOSITION ET MISES EN PAGES  
NORD COMPO À VILLENEUVE-D'ASCQ

ACHEVÉ D'IMPRIMER PAR XXX  
À XXX EN 201X

Dépôt légal :  
*Imprimé en France*