

# Une recherche dé-coïncidente

pour se préparer aux crises  
environnementales et alimentaires

Stéphan Marette, Caroline Lejars, coord.

Postface de François Jullien



# 2084 : UN SCÉNARIO FICTIF DU PIRE ET DES PISTES DE SOLUTIONS

Christophe Chassard, Mariette Ducatez, Pierre Pétriacq, Juliette Riquet,  
Sloan Salètes, Alexia Stokes

Le chapitre précédent s'intéressait aux conditions institutionnelles pouvant renouveler certaines pratiques de recherche. Ce nouveau chapitre se focalise sur un autre aspect de ce renouvellement, à savoir la mise en chantier d'un questionnement dé-coïncidant, en abordant la thématique de l'alimentation telle qu'elle pourrait être dans soixante ans. La forme que prendra la future production agricole en 2084 reste largement inconnue, car elle dépendra grandement des évolutions climatiques, géographiques et politiques. Face aux très nombreuses inconnues concernant tout ce qui pourrait se passer, le court récit qui est maintenant proposé revêt la forme d'un récit d'anticipation, en prenant le parti d'une crise environnementale majeure. Un certain angle de vue y est développé, tant il est difficile de prévoir la configuration que pourrait prendre une crise majeure. Cette crise proviendra-t-elle d'un rayonnement solaire extrême, d'une sécheresse continue, de pluies acides à répétition, ou d'un brouillard intense constitué de polluants ? Il est impossible de répondre à de telles questions. En fait, nous en savons très peu sur les crises environnementales extrêmes et leurs conséquences concrètes, même si les diagnostics scientifiques se précisent et laissent présager un futur noir.

*De facto*, il n'est pas évident de savoir ce que nous pouvons faire face à une exacerbation et une répétition des crises climatiques, géopolitiques et économiques. Seuls la littérature et l'art semblent s'être intéressés jusqu'alors aux scénarios du « pire », oscillant entre science-fiction et *climate-fiction* (« fiction climatique »), terme proposé en 2011 par le journaliste américain Dan Bloom. Il est même surprenant que la recherche scientifique n'ait pas encore traité collectivement et en profondeur la question brûlante des crises systémiques à long terme. Il semblerait pourtant que l'imagination du pire futur possible pourrait profiter à la créativité et au questionnement des chercheurs. Ce chapitre 3 se situe dans la lignée de deux grands récits d'anticipation dystopiques, dans lesquels la dégradation de l'environnement et l'alimentation occupent une place primordiale. Dans le roman *Sécheresse* de James Graham Ballard (1964), une pollution extrême empêchant l'évaporation des océans est à l'origine de l'arrêt des pluies depuis une décennie, avec comme conséquence des populations qui meurent lentement de soif et qui sont en conflits permanents. Dans le film *Soleil vert* (*Soylent Green*) réalisé par Richard Fleischer (1973), l'alimentation se trouve au cœur d'un terrible drame. Dans un monde où les ressources naturelles sont épuisées, il existe une unique forme d'aliment, à savoir le « soleil vert », petite plaquette distribuée par un monopole peu transparent et contrôlant la distribution alimentaire. La fin traumatique du film renvoie à une circularité quasi parfaite – mais totalement terrifiante – de la production alimentaire, dans un monde dans lequel les ressources, les humains et l'espérance semblent totalement épuisés.

Plusieurs décennies après ces productions, nous envisageons un nouveau et court récit d'anticipation, centré sur la fragilité de la production alimentaire dans soixante ans.

Nous revenons également sur les innovations à mettre en place pour rendre possible ce scénario de production agricole en univers extrême.

Dans les lignes qui suivent, le contexte environnemental y est particulièrement inquiétant et, pour tout dire, déprimant. En 2084, l'humanité connaît à nouveau un renversement de certaines vérités. Il ne s'agit pas de vérités politiques ou sociales mais, avant tout, 2084 est témoin d'un bouleversement profond et sûrement inexorable des réalités écologiques, qui perturbent en tout premier lieu l'agriculture mondiale, alors incapable de fournir l'alimentation nécessaire pour nourrir l'humanité.

## **2084 : UN SCÉNARIO FICTIF DU PIRE**

Nous sommes donc en 2084. Même les études les plus pessimistes relatives à l'environnement, conduites il y a longtemps par les centres de recherche, n'avaient pas prévu la situation catastrophique dans laquelle se trouve plongée la planète Terre (de Menthière *et al.*, 2016). Si seulement nous avions écouté les experts du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) il y a soixante ou quatre-vingts ans, peut-être n'en serions-nous pas arrivés là ? Mais ces mêmes experts pensaient-ils à l'époque que les pires scénarios qu'ils avaient pourtant prédits seraient à ce point sous-estimés dans l'intensité de leur répétition ? Le GIEC avait bien annoncé un scénario SSP3-7.0 de rivalités régionales, dans lequel les pays devenaient plus compétitifs les uns par rapport aux autres, privilégiant leur sécurité nationale et alimentaire. Mais avait-il imaginé que ce scénario se combinerait avec l'arrivée au pouvoir dans plusieurs de nos démocraties occidentales de dictatures ayant maintenu un

développement économique basé sur les seules énergies fossiles (comme le scénario SSP5-8.5, avec un descriptif des scénarios SSP donné par Lepousez et Aboukrat, 2022) ? Rien n'a pu enrayer la croissance mondiale alimentée par l'exploitation jusqu'à épuisement des combustibles fossiles. Cet emballement a conduit en l'espace de vingt ans seulement à un doublement de nos émissions de CO<sub>2</sub> et de méthane. Doit-on dès lors s'étonner que la température moyenne de la planète ait augmenté de 7 °C sur cette même période ?

Contre toute attente, l'élévation moyenne des mers et océans a dépassé 5 mètres. Les calottes glaciaires du Groenland et de l'ouest de l'Antarctique ont fondu à 90 %, entraînant, avec l'effet stérique et la dilatation de l'eau des océans, la disparition de plus de 50 % des terres agricoles mondiales. Il y a dix ans, suite à une série d'ouragans dramatiques au mois d'octobre 2074, l'ensemble des Pays-Bas, du Bangladesh et des pays du delta du Mékong a été englouti sous les eaux. Jakarta, New York, Londres, Paris et Rome, tout comme 2 500 villes de plus d'un million d'habitants ont été abandonnées en l'espace d'une semaine, entraînant la mort de plus de 500 millions de personnes et une migration forcée de 2 milliards d'individus tentant d'échapper à la montée soudaine des eaux. Seuls 10 % d'entre eux ont pu trouver refuge sur d'autres territoires pendant que la grande majorité périssait dans leurs camps ou bateaux de fortune, rejetés par les autres pays.

C'est lors de sa conférence en 2042 à Panama City que l'Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services<sup>9</sup> (IPBES) avait entériné dans son

---

9. Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques.

communiqué le libellé de sixième crise d'extinction majeure et effective sur Terre. Presque 96 % de la variabilité génétique des plantes cultivables a d'ores et déjà été perdue et 100 % de tous les grands poissons océaniques ont disparu sous l'effet de la surpêche et de la pollution des eaux. Les experts scientifiques de l'IPBES ont estimé que 90 % des populations d'insectes ont disparu depuis le début du XXI<sup>e</sup> siècle. L'IPBES souligne que 6,5 millions d'espèces sur un total possible de 8 millions se sont au final éteintes. Dans le monde, près de 800 millions d'hectares de terres agricoles (dont 450 millions en Afrique) ont été irrémédiablement dégradés du fait de la déforestation, de l'agriculture intensive, du surpâturage, des activités minières, des espèces invasives ou du réchauffement climatique. Une seule diversité génétique s'est accrue au cours de cette même période : celle des virus à ARN, et notamment l'apparition de nouveaux coronavirus émergents dont le SARS-CoV-2 en 2020 et son variant Omicron, ayant entraîné la pandémie de COVID-19 provoquant la mort de plus d'un milliard de personnes par infections respiratoires sévères.

Depuis le début de la Troisième Guerre mondiale en 2025, avec l'élargissement international du conflit russo-ukrainien et l'utilisation massive de l'arme nucléaire ayant entraîné la disparition de 450 millions d'individus et la disparition de 155 millions d'hectares agricoles en Europe et en Asie, de nombreux habitants vivent dans des bunkers souterrains pour échapper aux radiations nucléaires mesurées à 10 000 mSv, de l'Europe de l'Ouest jusqu'en Asie Mineure. Peut-on dire avec le recul que l'éruption solaire de 2037 a été une bonne nouvelle ? En étant responsable d'une panne électrique mondiale, mettant hors service les satellites et les systèmes de GPS, elle a mis indirectement fin à la guerre nucléaire en 2039. Le rayonnement solaire a été terriblement

perturbé par l'expérience de géo-ingénierie solaire chinoise lancée en 2037. Destinée au départ à refroidir la surface de la Terre par injection de milliards de particules de soufre au-dessus de la région du Xinjiang, cette expérience malheureuse a non seulement perturbé le régime des moussons en Asie du Sud, augmentant ainsi les pluies dévastatrices, mais elle a également profondément affecté la couche d'ozone laissant passer les terribles rayons UVC, qui sont les ultraviolets les plus nocifs avec de très petites longueurs d'onde. Tout autour de la planète, de nombreux habitants ont donc trouvé refuge dans des grottes, des bunkers ou des souterrains pour échapper à ces redoutables radiations. Ce scénario catastrophique a vu la surface de la Terre se transformer en déserts totalement infertiles.

Dans ce contexte extrêmement hostile, l'alimentation de 2084 est uniquement produite en sous-sol et dans des conditions très précaires, notamment en utilisant des systèmes de filtration de l'air et de l'eau plus ou moins fiables, ainsi que des panneaux solaires relativement efficaces et positionnés en surface pour produire un minimum d'énergie et de lumière artificielle. L'alimentation y est peu diversifiée, constituée le plus souvent de quelques végétaux, de spiruline, ou d'aliments sans saveurs et composés à partir de nutriments simplifiés ou de micro-organismes. Dans de nombreuses grottes et souterrains, les produits d'origine animale, les céréales ou les fruits sont inexistantes. Ce manque de variété entraîne de nombreux problèmes de monotonie alimentaire et de malnutrition à l'origine de diverses maladies et dépressions. Ce scénario est bel et bien celui du pire et il touche l'humanité entière.

En ce début d'année 2084, un groupe de scientifiques a réussi à se retrouver dans les souterrains de Theix. Dans les sous-sols de cette ancienne ville du Massif central située

à 850 m d'altitude et sur un ancien centre de recherches agronomiques abandonné depuis 2061, cette coalition de scientifiques européens tente de trouver des solutions pour une meilleure alimentation, en se réappropriant des concepts scientifiques dé-coïncidants imaginés il y soixante ans. Cette recherche de solutions est destinée à nourrir quelques 650 millions de Terriens survivants, répartis sur les hautes contrées de la planète Terre et tentant de vivre dans des souterrains et abris de fortune en préparant la colonisation d'une nouvelle planète... Dans leur malheur, ces scientifiques ont trouvé des sources d'eau souterraines leur permettant de survivre. Ceci nous rappelle encore que l'eau est une ressource précieuse mais « bafouée » depuis le dépassement des neuf limites planétaires (Richardson *et al.*, 2023). Bien heureusement, les rescapés de Theix ont su récupérer de vieux panneaux solaires qu'ils ont alors recyclés pour produire un minimum d'énergie destinée à leur survie : culture de plantes, chauffage de fortune, filtration de l'eau et de l'air... Face à cette urgence de 2084, ces scientifiques s'inspirent notamment d'anciennes réflexions conduites en 2024 pour imaginer de nouvelles formes d'alimentations. Nous opérons donc un flashback en 2024, afin de comprendre le contexte des réflexions menées lors de cette période révolue durant laquelle une nature vivante et fertile couvrait encore la surface de la Terre.

## **RETOUR EN 2024 : ANTICIPER LES CHANGEMENTS...**

En 2024, les instituts de recherche se sont saisis de nouvelles questions et revoient leurs orientations stratégiques face à l'urgence climatique annoncée. En s'appuyant

sur les conclusions des réflexions de plusieurs groupes d'experts internationaux, comme le GIEC, l'IPBES (2024), le Committee on World Food Security (2024) et la EAT-Lancet Commission (2024), les recherches sont menées pour répondre aux besoins de transformation qui permettraient de respecter les limites de la planète, de maintenir le réchauffement climatique en dessous de + 2 °C à l'horizon 2100 et de nourrir durablement 10 milliards d'individus en 2050, tout en contribuant à une meilleure résilience des systèmes.

Quels sont donc les aspects techniques de cette agriculture innovante et résiliente face au pire des contextes climatiques ? Tout d'abord, l'optimisation des ressources est essentielle, avec l'utilisation d'énergies alternatives et le recyclage circulaire des ressources, notamment l'eau, les minéraux et les gaz indispensables aux plantes et aux animaux (CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>). Il y a près d'un siècle (par rapport à 2084), c'est-à-dire en 1987, l'Agence spatiale européenne (ESA) a été la première à mener des recherches sur les systèmes de survie régénératifs. MELiSSA (Micro-Ecological Life Support System Alternative) est un projet européen sur les systèmes de survie circulaires, mis en place pour acquérir des connaissances sur les systèmes régénératifs, visant le plus haut degré d'autonomie et, par conséquent, exploité pour produire de la nourriture, de l'eau et de l'oxygène à partir des déchets des missions. Ces travaux étaient initialement destinés à la recherche sur les activités spatiales, mais ils peuvent s'adapter directement à l'agriculture terrestre faisant face à des conditions extrêmes, et nécessitant une circularisation en milieu contraint. Un tel mécanisme circulaire permet de recycler l'azote contenu dans la matière organique en engrais biosourcé, de transformer par les plantes le CO<sub>2</sub> dégagé par les animaux en O<sub>2</sub> respiré par ces

derniers, de récupérer l'eau contenue dans les déchets en tout genre, etc.

Ces solutions seront très vraisemblablement onéreuses en infrastructures. Le recyclage des ressources nécessitera des dispositifs hautement sophistiqués et technologiquement avancés. Ces dispositifs devront être partagés par les nations afin de limiter les contrastes liés au développement technologique et technique. Pour cela, des consortiums devront se mettre en place afin de partager à la fois les ressources et les technologies indispensables pour adapter l'agriculture du futur.

Il est également vraisemblable que notre agriculture doive s'adapter aux changements systémiques avec une évolution du type de productions. Si la betterave sucrière cultivée dans le nord de l'Europe semble « bénéficier » du réchauffement climatique en voyant ses rendements augmenter (elle est peu sensible à une diminution des ressources en eau) et pourrait en principe continuer à être cultivée, ce n'est pas le cas d'autres cultures pour lesquelles les rendements chutent. Certaines régions françaises ont commencé à limiter la production de maïs par exemple (très gourmand en eau) pour exploiter des céréales plus classiquement cultivées sur le continent africain comme le sorgho. Même si la France est bien moins touchée que de nombreux autres pays en termes de disponibilité des ressources en eau (Fernandes, 2023), ces solutions proposées à l'échelle nationale semblent relativement « timides » par rapport au défi à relever.

Aujourd'hui, en 2024, le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires met en avant des solutions à court terme : « 1) adaptation des itinéraires techniques (décalage de la date de semis, choix de variétés, etc.) ; 2) irrigation (si la ressource en eau et les équipements sont

disponibles) ; 3) rotations plus diversifiées ; 4) adaptation des productions de fourrage (stockage) », et à moyen/long terme : « 1) nouveaux systèmes de production comme l'agroforesterie ; 2) choix de nouvelles cultures... et abandon d'autres... ; 3) projets collectifs sur la gestion de l'eau (réserves, etc.) ; 4) évolution des filières agroalimentaires, comme les appellations d'origine contrôlée » (ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2023). La transition reste cependant à l'heure actuelle très dépendante des politiques européennes de subventions et des prix de vente (marges) des différentes productions.

En production animale, des réflexions sont menées depuis des décennies déjà sur un élevage moins générateur de gaz à effet de serre. L'élevage bovin est montré du doigt en premier, vu sa contribution au réchauffement climatique. Cette contribution négative est toutefois à nuancer car l'élevage bovin joue un rôle dans le maintien des pâturages et des prairies, et son élevage extensif contribue à la protection des sols et des eaux de surface, ainsi qu'à la biodiversité.

Plusieurs solutions sont développées pour limiter ces émissions de gaz à effet de serre par les bovins : 1) changement de l'alimentation avec, par exemple, l'intégration d'algues rouges, de lin, de lipides, etc., dans les rations alimentaires ; 2) travail sur la génétique des animaux. Les autres solutions étant bien sûr d'agir sur la consommation humaine de viande bovine (en la limitant mais aussi en réduisant le gaspillage alimentaire) et sur la conduite d'élevage (notamment en jouant sur le taux de renouvellement d'animaux en élevage) (Mottet *et al.*, 2015).

Toutes ces réflexions de 2024, certes prospectives, restent insuffisantes pour apporter des solutions à l'alimentation des habitants vivant en sous-sol en 2084 (selon notre scénario

pessimiste). Dans le cadre d'un scénario sombre tel que proposé ci-dessus, d'autres concepts scientifiques doivent être imaginés dès aujourd'hui. Quelques exemples d'alternatives ambitieuses sont proposés ci-dessous.

## **L'AGRICULTURE CELLULAIRE POUR SURVIVRE, BIEN PLUS QUE POUR RÊVER**

Si en 2024 les perceptions sociétales sur la production de viande synthétique sont sujettes à controverse, l'agriculture cellulaire souterraine pourrait devenir dans le futur une pratique acceptable dans un contexte désespéré de survie des populations. En 2024, le besoin stratégique n'apparaît pas évident (ni la rentabilité économique par ailleurs), et ces nouveaux aliments semblent très éloignés des attentes des consommateurs. Au départ, centrés sur le développement de viandes artificielles, de nouveaux projets émergent pour produire d'autres types de protéines animales comme des substituts de lait, ou plus spécifiquement des protéines laitières (D. J. Smith *et al.*, 2022). Les fonds investis dans quelques start-up américaines (Perfect Day notamment avec plus de 350 millions de dollars de capitaux levés) (World Bio Market Insights, 2022) ou encore israéliennes (ImaginDairy, 2024) pour contribuer à leur développement sont colossaux. Pour l'heure, les bases scientifiques concernant ces technologies sont limitées (on trouve plus de papiers d'opinion que de la recherche originale) et peu de brevets ont été déposés pour le moment.

L'agriculture cellulaire à base de plantes aura sans doute plus de succès auprès de l'opinion publique dans un avenir proche, et tant la pandémie de COVID-19 que la guerre

Ukraine-Russie ont accéléré ce changement dans l'innovation alimentaire. Le Centre de recherche technique de Finlande Ltd (VTT) est un leader européen dans le développement de cultures cellulaires de plantes comestibles, telles que le café à base de cellules (Ercili-Cura et Barth, 2021) ou les baies cellulaires qui ont un profil nutritionnel équivalent ou supérieur à celui des vrais fruits. La vision du VTT selon laquelle, à l'avenir, chaque foyer aura sa propre « micro-brasserie » (un bioréacteur domestique produisant 500 g de cellules végétales fraîches en une semaine selon Eibl *et al.*, 2018) est une première étape vers des cultures cellulaires à grande échelle qui alimenteront la population se protégeant sous terre en 2084. Dans le monde entier, les scientifiques et les industriels sont prêts à lancer une nouvelle révolution alimentaire, avec des investissements dans l'industrie mondiale des aliments cultivés estimés à 5 milliards de dollars (D. J. Smith *et al.*, 2022).

Les centres de recherche en agronomie, en alimentation et en environnement ne sont pas à l'avant-garde de cette révolution, alors qu'elle pourrait apporter une solution efficace aux famines liées au climat et à la guerre, à très long terme. À court terme, Horizon Europe soutient ces recherches en proposant des appels d'offres dédiés au développement de nouvelles approches de fermentation, plus économes et avec des milieux de culture optimisés pour la production cellulaire. Ces programmes apporteront des connaissances à tous les secteurs de la biotechnologie et bien avant un éventuel bénéfice majeur à l'horizon 2084. Dans le cadre des compétences actuelles en biologie des systèmes qui existent déjà, les instituts de recherche et les universités disposent des connaissances nécessaires pour exploiter les données « omiques » et pathologiques à grande échelle.

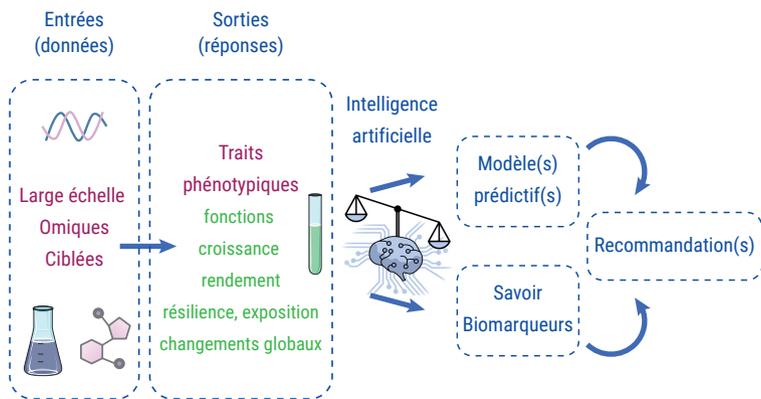
L'étude métabolomique des plantes comme outil de phénotypage permet aujourd'hui de générer des données très riches qui, lorsqu'elles sont analysées par intelligence artificielle, permettent de prédire des traits phénotypiques d'intérêt (résistance aux stress, rendements, quantité et qualité des molécules, etc.) (Fernandez *et al.*, 2021 ; Luna *et al.*, 2020 ; Defossez *et al.*, 2021 ; Dussarrat *et al.*, 2022).

Le métabolome, c'est-à-dire l'ensemble des petites molécules composant un organisme vivant, généralement inférieures à 2 000 Da, intègre parfaitement l'influence du génome, l'expression des gènes, l'abondance et l'activité des protéines, mais aussi l'impact des variations environnementales (figure 4). Appliquée à des conditions extrêmes telles que des systèmes fortement contraints, la métabolomique prédictive peut s'avérer essentielle pour l'innovation et l'accélération du processus de sélection de cultivars et de variétés, végétales ou autres (micro-organismes, animaux), plus résilients au changement climatique et adaptables aux scénarios catastrophes qui nous rappellent la vie dans l'espace : températures extrêmes, rayonnements ionisants intenses, manque d'eau, de minéraux et de gaz.

Dans un contexte moins dystopique que celui de 2084, la métabolomique prédictive pourrait être appliquée à des espèces cultivées dans d'autres climats moins favorables, afin d'identifier les mécanismes qui leur permettent de s'adapter aux stress environnementaux (Dussarrat *et al.* 2022). La même stratégie pourrait également servir à identifier les meilleures combinaisons d'espèces (animales, végétales et microbiennes) et les meilleures conditions et pratiques de culture afin de prédire puis d'optimiser les services écosystémiques qui rendent la vie humaine possible (aliments nutritifs et eau propre, régulation des maladies

et du climat, pollinisation des cultures, formation des sols, etc.). Cette stratégie de biologie prédictive permettra également de proposer des outils de diagnostic, afin de formuler des recommandations en vue d'anticiper les crises ou les changements pressentis, voire d'identifier des cellules, des micro-organismes ou des organismes alternatifs pour le développement de nouveaux produits. Grâce à la modélisation mathématique et à l'apprentissage automatique des voies métaboliques et des bioprocédés, le développement de solutions alimentaires concrètes sera plus rapide. La production de briques alimentaires plus ou moins complexes, pour enrichir des aliments, n'est pas utopique mais deviendra rapidement une réalité scientifique et technologique.

**La biologie prédictive pour étudier les systèmes complexes sous contraintes**



**Figure 4.** Biologie prédictive

Les approches de biologie prédictive sont étroitement liées à la nature interdisciplinaire croissante de la science, à l'explosion des *big data* et aux changements importants qui accompagnent le passage à la technologie numérique et à l'intelligence artificielle. Elles contribuent non seulement à la compréhension globale des systèmes biologiques et écologiques complexes, mais aussi à la prévision de leurs réactions aux changements globaux, dynamiques et incertains. Figure adaptée d'après Hajjar *et al.* (2023).

## SCIENCE-FICTION OU RÉALITÉ ?

En 2024, un des axes de recherche destinés à répondre au risque de malnutrition à travers le monde est l'exploitation des insectes comestibles comme nouvelle source de protéines, de vitamines et de sels minéraux. L'entomophagie faisant partie de la culture alimentaire traditionnelle dans certaines régions d'Afrique, d'Asie ou d'Amérique latine, les insectes apparaissent alors comme la solution permettant de relever le défi de nourrir la planète en 2030 et au-delà. En 2021, l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) recommande l'élevage d'insectes à grande échelle (FAO, 2021c). Néanmoins, au même titre que pour d'autres sources de nutriments, les insectes peuvent être porteurs de contaminants biologiques (bactéries, virus, parasites) et chimiques (mycotoxines, pesticides, métaux, allergènes) ainsi que de dangers physiques qui peuvent nuire à la santé des hommes et des animaux. Dans son rapport, la FAO recommande donc également le développement de recherches supplémentaires afin de garantir l'innocuité pour l'homme, le bétail et l'environnement de ces nouvelles sources alimentaires. En complément des travaux à mener dans ces domaines, l'alternative pourrait être de s'intéresser à l'utilisation d'organismes unicellulaires, donc moins complexe à étudier, comme usine à nutriments. Une solution pourrait reposer sur le « blob », être vivant tout à fait original tirant son nom du film *The Blob*, réalisé en 1958 par I. S. Yeaworth Jr et R. S. Doughten Jr, avec Steve McQueen. Le blob donc (nous ne l'appellerons pas *Physarum polycephalum*) est un organisme unicellulaire, ni champignon, ni animal, ni végétal ! C'est un mycétozoaire

qui fait partie du règne des amibozoaires et serait apparu il y a un milliard d'années. Cette sagesse lui confère une adaptation à des climats très différents (y compris très secs pour certaines souches), une préférence pour l'obscurité, et un régime alimentaire sain : des champignons (avec un ratio protéines/sucres de 2/1) ou même des algues. Autre point important, le blob « grandit » : il double voire triple de taille chaque jour à raison de quelques millimètres à quelques centimètres gagnés par heure. Enfin, il entre en dormance lorsqu'il est desséché, ce qui permet sa survie en conditions extrêmes et sa « résurrection » quand les conditions sont plus propices. Bref, cet organisme original pourrait entrer dans le régime alimentaire de 2084, avec une culture en sous-sol, des besoins en lumière limités et une adaptabilité à des différences d'hygrométrie (même s'il est plutôt heureux en milieu humide). Seule difficulté réelle : en 2024, il reste indigeste (Dussutour, 2017). De la recherche est donc nécessaire pour sélectionner une souche comestible... tout en espérant en parallèle que le tractus digestif humain évolue également pour faire un pas vers le blob ! Heureusement, le blob est déjà bien vu par la population depuis son passage dans l'ISS (International Space Station) en 2021 et la participation de nombreux élèves à des projets éducatifs à son sujet : les grands-parents de 2084 en garderont un excellent souvenir ! En tous cas, si ce ne sont les blobs, des unicellulaires usines à protéines pourraient être utilisés pour nourrir la population.

Outre le besoin direct de denrées alimentaires, il est très probable que nous manquions de biomolécules pharmaceutiques en 2084. Une solution prometteuse a été développée depuis 2005 par la start-up PAT (*Plant Advanced Technologies* [2024]), avec un brevet initial détenu

par INRAE et l'Université de Lorraine). La technologie développée chez PAT, avec le procédé PAT Exudative®, peut brièvement se résumer à l'ingénierie de plantes génétiquement modifiées, cultivées en serres et en hydroponie, et produisant des molécules à haute valeur ajoutée par une sécrétion racinaire directement dans l'eau (et donc directement purifiables sans avoir besoin de sacrifier les plantes). En effet, les méthodes actuelles d'extractions de produits naturels nécessitent une quantité non négligeable de matière végétale. La technologie derrière ce procédé repose sur des expertises en (hémi-)synthèse et en chimie médicinale. PAT s'intéresse particulièrement à la production de molécules d'origine naturelle mais en optimisant leur synthèse (développement de nouvelles voies de synthèses pour optimiser les fonctionnalités de molécules produites naturellement). En 2024, cette technologie ingénieuse est principalement utilisée pour les industries pharmaceutique et cosmétique en raison du coût de production. Dans un scénario *dark*, le coût/bénéfice serait à réévaluer (mais sans doute plus favorable) et elle pourrait tout à fait être adaptée pour des alicaments (ou compléments alimentaires) afin de rééquilibrer un régime alimentaire potentiellement altéré. Ainsi, le régime alimentaire de demain pourrait être qualifié de « bon pour la santé » ! Des évolutions/adaptations semblent également possibles en utilisant des plantes résistantes à un climat plus sec, tout comme une culture en hydroponie avec des étagères de plantes superposées pour optimiser l'espace. Des biomolécules à haute valeur ajoutée pourraient donc vraisemblablement toujours être produites grâce à la technologie PAT. L'enjeu est surtout d'optimiser l'ingénierie de plantes génétiquement modifiées pour s'adapter au mieux aux conditions de 2084.

## **AGRICULTURE 6.0 : L'AQUAPONIE COMME MODÈLE DE SYSTÈME FERMÉ**

L'aquaponie, contraction des termes « aquaculture » et « hydroponie », permet d'associer dans un seul système alimentaire la culture de végétaux et la production piscicole en circuit fermé. Cette technologie permet de produire des protéines végétales et animales avec un minimum de consommation d'eau et sans utilisation de produits phytosanitaires.

En 2024, les recherches en aquaponie sont en émergence avec des programmes portés principalement par les USA, la Chine et quelques pays européens (principalement la Suisse, l'Allemagne, la Belgique et les Pays-Bas) (Hao *et al.*, 2020). La France est quant à elle en retrait, avec peu de programmes structurants. Il est important de noter le projet APIVA® (Aquaponie Innovation Végétale et Aquaculture), qui a rassemblé des chercheurs pour développer des pilotes aquaponiques fonctionnels et étudier leur faisabilité économique, leur impact environnemental et la qualité des produits obtenus, tout en modélisant les flux se produisant entre les compartiments (bassins d'élevage, surfaces de culture, filtre biologique) (Foucard *et al.*, 2019). Cette thématique de recherche nécessite beaucoup plus de moyens pour optimiser les processus, du choix des poissons (tilapia et truite, principalement) aux cultures végétales les plus adaptées. Économes en eau comme en énergie, ces productions sont stratégiques pour les pays en développement mais aussi pour les pays développés. Quelques start-up émergent en France mais le secteur a besoin d'un soutien scientifique plus important. Une communauté émergente, appuyée par

quelques experts actifs sur les réseaux sociaux, promeut aussi l'installation de systèmes aquaponiques à toute petite échelle pour une production familiale. Cette thématique propose un champ d'étude transdisciplinaire et pourrait mobiliser plus de chercheurs, et ce, quels que soient les objectifs technologiques ciblés.

En 2084, l'aquaponie souterraine pourrait fournir une partie des protéines animales et végétales nécessaires aux populations retranchées sous terre, mais en mobilisant très peu d'eau et aucun phytosanitaire. Les recherches qui pourraient être entamées en 2025 par INRAE et le CIRAD vont contribuer à développer de nouveaux systèmes autonomes, testés dans les conteneurs marins et dans un espace clos, pour une agriculture urbaine. Ces systèmes développés en quelques dizaines d'années pourront être transférés sous terre, et combinés à des productions de protéines alternatives (blob, insectes, algues, etc.), pour nourrir la ressource piscicole. Les rendements de production de poissons devront être préservés (une truite peut croître de 30 % tous les mois, dans des conditions optimisées), et la matière première végétale produite devra permettre de compenser une grande partie des dépenses énergétiques de l'installation. La multiplication de ces systèmes autonomes permettra alors d'équiper de nombreuses colonies souterraines et de nourrir les survivants humains.

## **UNE NOUVELLE ALIMENTATION ACCEPTABLE POUR LES CONSOMMATEURS ?**

La plupart des produits évoqués ci-dessus restent peu voire non encore disponibles à la consommation. Par conséquent, les consommateurs ne peuvent les évaluer, et aucune

expérience directe ne permet d'enrichir leur ressenti et leur réflexion. Leurs avis sont pour l'heure basés sur des images mentales de ce que pourrait être l'alimentation de demain. La recherche sur les perceptions de l'agriculture et l'alimentation du futur nécessite de prendre en compte différents « futurs possibles » (comme notre scénario de 2084), différents modèles de recherche, des opinions généralement basées sur des préjugés ou des menaces imaginaires et souvent sujettes à changement (Ercili-Cura et Barth, 2021). En parallèle des innovations technologiques, la recherche de solutions innovantes en rupture doit donc s'accompagner de travaux en sciences sociales afin d'identifier les craintes et points de blocage à lever, ou, *a contrario*, les envies et avantages identifiés qui permettront d'accompagner les consommateurs dans cette transition.

Nous venons de voir qu'il est possible d'imaginer des solutions en rupture afin de produire sainement et efficacement la nourriture du futur. Mais qu'en est-il (et qu'en sera-t-il) de l'acceptabilité sociale et environnementale de telles innovations ? Serons-nous prêts à manger des insectes, recycler notre urine pour boire ou encore suivre ce que les innovateurs nous conseilleront ? Il existe de nombreuses études sur l'acceptabilité des consommateurs pour de nouveaux aliments en 2020. Il est montré que la répartition entre les attitudes intéressées et réticentes (voire très opposées), dépend du type d'innovation alimentaire (Siegrist et Hartmann, 2020). Cependant, il est très difficile de savoir ce que pourrait devenir l'acceptabilité des citoyens dans un contexte désespéré de survie des populations en 2084. En effet, en réponse à l'arrivée brutale d'un accident de grande ampleur, l'acceptabilité des consommateurs « par temps calme » sera vraisemblablement court-circuitée par la nature

inopinée et soudaine de cette crise. En d'autres termes, et comme nous en avons été témoins lors de la pandémie de COVID-19, la société serait apte à accepter des changements radicaux de par la nécessité vitale d'accepter ces changements : lorsqu'il faut survivre, on accepte des produits ou des pratiques au-delà des limites « classiques » d'acceptabilité. Quoi qu'il en soit, dès 2024, les perceptions et préoccupations environnementales grandissantes impliquent que les grands changements qui s'opéreront pour transformer notre agriculture devront s'inscrire dans une démarche écoresponsable, préservant l'intégrité des espaces agricoles.

## CONCLUSION

Ce chapitre est une illustration d'une démarche permettant le renouvellement de notre questionnement scientifique, à savoir la mise en chantier de recherches dé-coïncidentes, en abordant la thématique de l'alimentation telle qu'elle pourrait être dans soixante ans. Cette réflexion s'est construite sur la base d'un scénario fictif « du pire », combinant science-fiction et *climate-fiction*, nous obligeant à supprimer de notre réflexion de très nombreuses recherches menées actuellement dont les solutions ne seraient pas soutenables dans le contexte décrit. Cette démarche de *design-fiction* (« design spéculatif »), développée à la fin des années 2000, est utilisée et a permis de renouveler la manière d'innover dans de très nombreux domaines, entreprises, institutions, associations ou armées (Michaud, 2023). En 2019, le ministère des Armées a mis en place la Red Team Défense, équipe de scénaristes et d'auteurs de science-fiction dont le rôle est d'imaginer des scénarios combinant menaces

militaires et défis technologiques pour anticiper et préparer les conflits à venir. Ici, nous nous sommes interrogés sur les procédés agronomiques et techniques qui pourraient émerger d'un scénario volontairement pessimiste. Des propositions de recherche à développer aujourd'hui en 2024 (date de rédaction de ce livre), en imaginant un cadre conceptuel extrême, sont intéressantes, même si 2084 ne s'avérerait pas aussi catastrophique que ce qui vient d'être décrit. On peut aussi imaginer que la répartition inéquitable des ressources ne menacera plus la santé de la planète ni la croissance démographique, qui ont été largement anéanties dans ce scénario catastrophe. Comment se passera donc la distribution aux consommateurs ? Est-ce que la situation de crise fera ressortir l'instinct du plus fort, et que de nouvelles inégalités apparaîtront ?

Globalement, nous espérons que ce scénario « 2084 » n'arrivera pas, ou du moins que la transition ne sera, d'une part, pas aussi rapide – ou brutale – et, d'autre part, de moins grande ampleur. Cependant, cette réflexion peut aider de trois manières : 1) envisager des solutions en amont pour qu'un tel scénario ne se produise pas ; 2) imaginer comment certaines solutions techniques présentées dans ce chapitre peuvent être développées et diffusées dès aujourd'hui ; 3) anticiper et gérer d'autres crises possibles, comme celles présentées dans le chapitre suivant, qui se concentre sur ce que nous pouvons faire *dès maintenant* pour essayer d'éviter certaines crises alimentaires et environnementales.