

Chapitre 7

La bioéconomie en 2030

A quoi la bioéconomie pourrait-elle ressembler en 2030 ? Le présent chapitre décrit une bioéconomie « probable » à cette date, ainsi que deux scénarios fictifs qui envisagent l'effet des interactions entre différents facteurs sur les futurs possibles. La bioéconomie « probable » s'appuie sur les types de produits susceptibles d'arriver sur le marché d'ici 2015. Dans la région de l'OCDE, les biotechnologies pourraient assurer 2.7% du PIB en 2030, leur apport économique se manifestant surtout dans l'industrie et la production primaire. La contribution des biotechnologies pourrait même être encore plus grande dans les pays en développement, compte tenu de l'importance de ces deux secteurs dans leur économie.

Les scénarios présentés envisagent un monde de plus en plus multipolaire, dans lequel aucun pays ou région ne domine les affaires mondiales à lui seul. Ils prévoient des événements plausibles, susceptibles d'influencer la bioéconomie naissante. Les résultats montrent que l'avenir est influencé par la qualité de la gouvernance, dont relève la coopération internationale, et par la compétitivité technologique. Des obstacles scientifiques difficiles à surmonter et une mauvaise conception de la réglementation risquent de limiter la capacité des biotechnologies industrielles à concurrencer d'autres solutions. Par exemple, une diminution rapide du coût de l'électricité renouvelable conjuguée à une amélioration technique notable des batteries pourrait donner naissance à des véhicules électriques plus performants que les systèmes de transport utilisant les biocarburants. Le potentiel de certaines biotechnologies pourrait ne pas être réalisé du fait des réactions de la population. Il en va ainsi de la médecine prédictive et préventive, dont les progrès peuvent être limités par la résistance du public à des systèmes de soins intrusifs et mal maîtrisés.

Introduction

Nous avons recensé jusqu'à maintenant les types de procédés biotechnologiques utilisés et les produits présents sur le marché aujourd'hui (chapitre 3) ou susceptibles de percer d'ici à 2015 (chapitre 4). Dans le chapitre 5, nous nous sommes penchés sur le rôle de la réglementation, les droits de propriété intellectuelle et les réactions de l'opinion à l'apparition de la bioéconomie et, dans le chapitre 6, sur les nouveaux modèles économiques qui permettraient de surmonter certains obstacles et de tirer parti des débouchés nouveaux.

Le présent chapitre va plus loin, en s'appuyant sur deux méthodes pour évaluer la forme que pourrait prendre la bioéconomie en 2030. La première, qui fait l'hypothèse d'une poursuite des conditions actuelles, consiste à mettre en évidence les biotechnologies susceptibles d'arriver sur le marché d'ici à 2030 et estimer le poids potentiel de la bioéconomie. La deuxième recourt à une analyse de scénarios pour étudier les facteurs qui pourraient conduire à des formes de bioéconomie très différentes à l'horizon 2030.

La bioéconomie probable en 2030

Quelle probabilité différentes biotechnologies ont-elles de connaître un succès commercial d'ici à 2030 ? Le rythme auquel la recherche biotechnologique produit des innovations probantes et les modifications apportées aux politiques réglementaires et institutionnelles constituent à cet égard deux facteurs essentiels, mis en évidence par la simulation des scénarios décrits ci-après. Pour chacun de ces facteurs, l'estimation de la bioéconomie probable repose sur des hypothèses prudentes. Premièrement, nous postulons qu'il faut beaucoup de temps pour qu'une découverte donne lieu à une application commercialement viable, comme en témoigne l'histoire des biotechnologies (voir chapitre 1). Deuxièmement, nous considérons que les modifications apportées aux politiques réglementaires et institutionnelles relèvent pour la plupart de l'adaptation. Les réformes qui nécessitent des changements économiques profonds ou déstabilisants sont beaucoup plus difficiles à mettre en œuvre et, par voie de conséquence, moins probables.

Le tableau 7.1 répertorie (sans les classer dans un ordre particulier) les types de biotechnologies qui existeront vraisemblablement en 2030. La probabilité de résoudre les problèmes scientifiques et technologiques que soulèvent ces biotechnologies est élevée, elles ont des chances d'être commercialement viables, et l'environnement réglementaire et institutionnel est d'ores et déjà propice sur plusieurs marchés importants. Nombre de ces biotechnologies sont déjà viables commercialement sous une forme ou une autre, ou bien proches de la commercialisation.

Tableau 7.1. Biotechnologies ayant une probabilité élevée d'arriver sur le marché d'ici à 2030

Production primaire	Santé	Industrie
Utilisation généralisée de la SAM dans les cultures, l'élevage et l'aquaculture.	De nombreux produits pharmaceutiques et vaccins nouveaux, en partie conçus grâce aux connaissances en biotechnologie, reçoivent chaque année leur autorisation de mise sur le marché.	Amélioration des enzymes dans un éventail de plus en plus large d'applications dans le secteur de la chimie.
Variétés de plantes cultivées et d'arbres génétiquement modifiées de façon à améliorer leur teneur en amidon, en huile et en lignine, leur transformation industrielle et leur taux de conversion.	Progression du recours à la pharmacogénétique dans les essais cliniques et les prescriptions, et diminution du pourcentage de patients éligibles à un traitement par une thérapie donnée.	Microorganismes améliorés capables de produire un nombre croissant de produits chimiques en une seule étape, dont certains s'appuient sur les gènes découverts dans le cadre de la bioprospection.
Plantes et animaux modifiés génétiquement pour leur faire produire des molécules pharmaceutiques et d'autres composés intéressants.	Amélioration de la sécurité et de l'efficacité des traitements thérapeutiques grâce à la mise en relation des données pharmacogénétiques, des données de prescription et des résultats à long terme sur la santé.	Biocapteurs pour la détection en temps réel des polluants environnementaux et biométrie pour l'identification des personnes.
Variétés améliorées des principaux végétaux destinés à la consommation humaine et/ou animale, présentant un rendement supérieur, une meilleure résistance aux ravageurs et parasites, et une plus grande tolérance au stress, grâce à la transgénèse, à la SAM, à l'intragenèse ou à la cisgénèse.	Dépistage à grande échelle de multiples facteurs génétiques de risque de maladies communes comme l'arthrite, où la génétique joue un rôle.	Biocarburants à forte teneur énergétique produits à partir de la canne à sucre et de sources celluloseuses de biomasse.
Nouveaux diagnostics des maladies et caractères génétiques des animaux d'élevage (mammifères, poissons, mollusques et crustacés).	Amélioration des systèmes de vectorisation des médicaments grâce à la convergence entre biotechnologies et nanotechnologies.	Accroissement de la part de marché des biomatériaux comme les bioplastiques, en particulier dans les créneaux étroits où ils procurent un avantage.
Clonage d'animaux reproducteurs à forte valeur.	Nouveaux nutraceutiques, dont certains sont produits par des microorganismes génétiquement modifiés et d'autres à partir d'extraits végétaux ou marins.	

Tableau 7.1. **Biotechnologies ayant une probabilité élevée d'arriver sur le marché d'ici à 2030** (suite)

Dans les pays en développement, enrichissement en vitamines et minéraux des principales cultures de base grâce aux techniques de transgénèse.	Tests génétiques bon marché des facteurs de risque de maladies chroniques comme l'arthrite, le diabète de type 2, les maladies cardiaques et certains cancers.
	La médecine régénérative permet une meilleure prise en charge du diabète et le remplacement ou la réparation de certains types de tissus endommagés.

Production primaire

Dans le secteur de la production primaire, les biotechnologies sont déjà très répandues, tant pour la mise au point de diagnostics pour les maladies des végétaux et des animaux que pour la création de nouvelles variétés d'arbres, de plantes cultivées, d'animaux d'élevage et d'espèces aquacoles présentant des caractères intéressants. Les applications à la sélection ne comprennent pas seulement la transgénèse, mais aussi beaucoup d'autres techniques comme la recombinaison aléatoire de gènes (« gene shuffling »), l'intragenèse et la sélection assistée par marqueurs (SAM). D'ici 2030, les biotechnologies risquent donc d'être omniprésentes dans la production primaire, qu'il s'agisse des aliments d'origine végétale et animale ou des sources végétales d'aliments du bétail et de fibres. La séparation de l'agriculture entre disciplines biotechnologiques et non biotechnologiques sera dépassée, compte tenu de l'adoption rapide des biotechnologies pour la mise au point de diagnostics plus performants et de variétés améliorées de plantes cultivées et d'animaux d'élevage.

Trois utilisations des biotechnologies dans le secteur de la production primaire sont confrontées à des obstacles économiques ou sociaux : le clonage des animaux, l'application des techniques transgéniques aux cultures de niche, et l'application de la transgénèse au développement d'aliments fonctionnels. D'ici 2030, le clonage animal servira probablement surtout à produire des animaux reproducteurs à forte valeur et des composés comme les molécules pharmaceutiques. Le principal obstacle à l'essor du clonage sera sans doute le refus de consommer de la viande provenant d'animaux clonés. En ce qui concerne l'application de la transgénèse aux cultures de niche, elle ne se heurte pas à des difficultés techniques très importantes, mais pourrait être entravée par les coûts de la réglementation et par le fait que les quelques groupes semenciers internationaux existants continuent de s'intéresser uniquement aux plantes offrant des débouchés substantiels. Quant aux aliments fonctionnels génétiquement modifiés, ils subissent eux aussi dans les pays

développés des contraintes de coût par rapport à d'autres produits meilleur marché comme les aliments enrichis. Le plus probable est donc que la production biotechnologique d'aliments fonctionnels aura lieu dans les pays en développement, où les programmes de sélection pourraient tabler sur les biotechnologies pour accroître la teneur en minéraux et vitamines essentiels des principales cultures de base.

Santé

Dans le domaine de la santé, presque toutes les recherches axées sur le développement ou l'application de nouveaux diagnostics et de nouvelles molécules pharmaceutiques s'appuieront sur les biotechnologies, par exemple pour identifier des cibles pharmacologiques, améliorer la vectorisation des médicaments ou adapter les pratiques de prescription aux particularités génétiques des patients. Feront exception les médicaments génériques mis au point avant 2015, mais même pour ces derniers, la pharmacogénétique servira de plus en plus à affiner les pratiques de prescription. Les examens de dépistage des maladies génétiques graves seront généralisés et peu onéreux. Ceux destinés à détecter les profils génétiques augmentant le risque de maladies chroniques comme l'arthrite, de diabète de type 2, les maladies cardiaques et certains cancers seront eux aussi bon marché, mais leur usage dans la pratique médicale pourrait être restreint aux personnes âgées à risque ou aux sujets qui présentent déjà d'autres facteurs de risque les exposant à ces maladies.

La pharmacogénétique associée à l'analyse des dossiers médicaux améliorera la sécurité et l'efficacité des traitements thérapeutiques, ce qui permettra aux chercheurs d'établir des liens entre, d'une part, les prescriptions, les facteurs comportementaux et les données génétiques et, d'autre part, les résultats sanitaires à long terme. La santé publique s'en trouvera sensiblement améliorée grâce à la mise en évidence des mauvaises réactions aux médicaments, des interactions indésirables entre molécules pharmaceutiques, et d'autres facteurs ayant une incidence négative ou positive sur la santé. Par ailleurs, cette évolution réduira le marché potentiel des thérapies qui ne sont efficaces ou sûres que pour certains sous-groupes, et pourrait entraîner une multiplication des retraits de médicaments après leur autorisation de mise sur le marché. Plusieurs centaines de biomarqueurs génétiques pourraient être validés pour la prescription de médicaments.

La médecine régénérative, tout comme la médecine prédictive et préventive, ne tiendront qu'en partie leurs promesses. Bien que beaucoup des techniques dont ont besoin ces deux biotechnologies soient en cours de développement et que bien des découvertes scientifiques nécessaires soient en passe d'aboutir, de nombreux problèmes techniques, économiques et sociaux restent en suspens. Néanmoins, plusieurs types de traitements régénératifs

seront disponibles en 2030, par exemple pour soigner le diabète ou réparer les tissus endommagés. Le remplacement d'organes complexes comme le cœur, le poumon ou le foie ne sera probablement possible que plus tard.

Industrie

Dans l'industrie, l'utilisation des procédés biotechnologiques connaît un essor rapide et continuera probablement de se développer jusqu'en 2030, mais plusieurs voies d'évolution sont possibles. À terme, il n'est pas certain que les biotechnologies serviront à fabriquer des produits chimiques de base, des polymères et des combustibles ou des carburants, en partie parce que leur compétitivité économique sera tributaire des investissements publics consentis pour créer des marchés. Les biotechnologies industrielles devront par ailleurs rivaliser avec d'autres technologies issues d'autres domaines. Par exemple, les biocombustibles seront en concurrence avec d'autres sources durables d'énergie (énergies houlomotrice, géothermique, éolienne, solaire et nucléaire, notamment) et avec les énergies fossiles associées à la capture et au stockage du carbone. Dans le domaine des transports, les biocarburants ont un avantage évident, puisqu'ils sont la seule source renouvelable et que certains d'entre eux ne nécessitent pas d'apporter des modifications importantes aux infrastructures existantes. Néanmoins, des bouleversements techniques dans la technologie des batteries et dans la production d'électricité renouvelable pourraient donner l'avantage aux véhicules électriques propulsés à l'énergie solaire ou d'autres sources d'électricité.

En 2030, les biotechnologies devraient très probablement être utilisées pour la production d'enzymes utiles à différents procédés industriels, la synthèse en une seule étape de produits chimiques et de plastiques à forte valeur dans des bioréacteurs mettant en jeu des microorganismes, et la production de biocarburants à forte teneur énergétique à partir de canne à sucre ou de cultures cellululosiques. Par contre, la production commerciale à grande échelle de produits chimiques de base ou de biocarburants et biocombustibles à partir de microorganismes ou d'algues, sans recourir à la biomasse, est moins certaine en raison des difficultés techniques à résoudre pour porter la production à des niveaux commercialement compétitifs.

Intégration

Le niveau d'intégration de la bioéconomie en 2030 dépendra de la compétitivité des solutions biotechnologiques par rapport aux autres technologies. La production, la culture et l'utilisation futures de la biomasse font partie des grandes inconnues. Si la biomasse parvient à fournir une matière première économiquement et écologiquement durable pour la fabrication de produits chimiques et la production d'énergie, on assistera à une large intégration entre

production primaire et biotechnologies industrielles. À l'inverse, si d'autres technologies (comme la biologie synthétique) démontrent leur supériorité, le niveau d'intégration sera moindre. Il est cependant hautement probable qu'un certain degré d'intégration sera atteint dans la mesure où les bioraffineries devraient être compétitives dans les régions tropicales et subtropicales humides, où la production végétale est abondante. Le Sud-Est des États-Unis fait partie de ces régions.

En 2030, la bioéconomie sera intégrée avec d'autres technologies durables permettant de réduire les contraintes de ressources et les problèmes environnementaux, dans le cadre d'une évolution globale en faveur de la viabilité sociale et économique des activités. Les analyses du cycle de vie seront largement utilisées pour mettre en évidence les produits et les méthodes de fabrication les plus durables du point de vue environnemental. Certains produits chimiques pourraient être fabriqués à partir de pétrole ou de gaz naturel, alors qu'il sera plus performant d'en produire d'autres à base de biomasse. La production d'énergie fera quant à elle appel à tout un éventail de sources renouvelables, qui sera fonction des ressources disponibles localement.

Un déplacement vers les pays en développement

L'accroissement de la population, qui atteindra 8.3 milliards d'habitants en 2030, se répercutera sur la demande d'aliments pour les humains et pour le bétail, d'énergie, d'engrais et d'eau potable. En 2030, une grande partie de la production et de la consommation de produits biotechnologiques, industriels ou primaires se situera dans les pays en développement comme le Brésil, l'Inde, la Chine et l'Afrique du Sud, sous l'effet de l'augmentation de leur population et de la progression des revenus.

Plusieurs de ces pays seront aussi, probablement, des foyers mondiaux de recherche biotechnologique car ils disposeront de nombreux chercheurs très qualifiés, notamment la Chine. Le rôle croissant des pays en développement dans le secteur des biotechnologies aura une incidence sur la localisation des ressources humaines qualifiées, la R-D, les marchés, la concurrence et les échanges.

Quelles que soient les applications des biotechnologies, les entreprises adopteront de plus en plus des stratégies mondiales pour tirer parti des capacités de recherche, des progrès technologiques et des marchés, tant dans les pays développés que dans les pays en développement.

Tableau 7.2. Part potentielle maximum des biotechnologies dans la valeur ajoutée brute et l'emploi

	Pourcentage de la valeur ajoutée brute (%)				Pourcentage de l'emploi total (%)			
	PIB ¹ (milliards USD)	(Santé) Produits pharmaceutiques ²	Production primaire ³	Secteurs indus- triels ou les bio- technologies ont des applications ^{4,5}	Emploi total (milliers) ⁶	Produits pharmaceutiques ²	Production primaire ³	Secteurs industriels ou les biotechnologies ont des applications ^{4,5}
UE-25	16379	0.66	1.77	3.13	171247	0.31	1.87	1.96
États-Unis	13790	1.24	1.83	2.71	141216	0.23	1.04	1.25
Australie	890	0.27	3.08	3.83	8741	0.13	2.06	1.41
Canada	1406	0.36	2.21	3.99	15314	0.19	2.65	-
Islande	20	-	9.34	1.52	0.159	-	6.88	-
Japon	5103	0.62	1.34	1.94	52935	0.21	0.82	1.73
Corée	982	-	3.78	4.91	21557	-	8.82	-
Mexique	886	0.73	3.79	6.23	-	-	-	-
Nlle-Zélande	124	-	9.19	-	1443	-	0.65	-
Norvège	369	0.23	1.46	-	2310	-	3.60	-
Suisse	414	-	1.36	-	-	-	-	-

Sources :

1. PIB 2007 au taux de change officiel selon le « CIA Factbook ».

2. Base de données EU-KLEMS pour l'UE-25, les États-Unis, l'Australie, et le Japon, données de 2005 ; Base de données pour l'analyse structurelle (STAN) de l'OCDE pour tous les autres pays, année 2004, sauf dans le cas du Canada (2002 pour la valeur ajoutée et 2003 pour l'emploi), du Mexique (2003 pour la valeur ajoutée) et de la Norvège (2002 pour la valeur ajoutée). Ces deux bases de données ne sont pas absolument comparables. Il n'existe pas de données sur la Turquie.

3. Base de données EU-KLEMS pour l'UE-25, les États-Unis, l'Australie, et le Japon, données de 2005 ; Base de données pour l'analyse structurelle (STAN) de l'OCDE pour tous les autres pays, année 2003, sauf dans le cas du Canada et de la Nouvelle-Zélande (2001 pour la valeur ajoutée et 2003 pour l'emploi), de l'Islande (2002 pour la valeur ajoutée et 2003 pour l'emploi), et de la Suisse (2002 pour la valeur ajoutée). Ces deux bases de données ne sont pas absolument comparables.

4. Base de données EU-KLEMS pour l'UE-25, les États-Unis, l'Australie, et le Japon, données de 2005 ; Base de données pour l'analyse structurelle (STAN) de l'OCDE pour tous les autres pays, année 2004, sauf dans le cas du Canada (2001), de l'Islande (2002), du Japon, de la Corée et du Mexique (2003). Ces deux bases de données ne sont pas absolument comparables.

5. Secteurs concernés par les applications biotechnologiques : extraction de métaux (1314), textiles (17), pâte et papier (21), produits chimiques sauf produits pharmaceutiques (24) et instruments (3345). Le code NACE de chacun des secteurs est donné entre parenthèses. Des données ne sont pas disponibles pour le Canada (instruments), l'Islande (extraction) et le Mexique (textiles et pâte et papier).

6. Base de données EU-KLEMS pour l'UE-25, les États-Unis, l'Australie, et le Japon, données de 2005 ; Base de données pour l'analyse structurelle (STAN) de l'OCDE pour tous les autres pays, année 2003 sauf dans le cas de l'Australie (2001). Ces deux bases de données ne sont pas absolument comparables.

La bioéconomie et son impact économique

Évaluer l'impact des biotechnologies dans les pays de l'OCDE ou sur l'économie mondiale en 2030 nécessiterait de disposer de données sur la dynamique tendancielle de chaque catégorie de produits et procédés biotechnologiques, ainsi que d'estimations sur l'évolution possible de l'éventail des produits – par exemple, sur l'ampleur de l'essor du marché des biopolymères en 2030 par rapport au marché des aliments de base. Cette tâche nécessiterait un rapport complet à elle seule. Il est toutefois possible d'estimer grossièrement l'impact économique futur de la bioéconomie en postulant que le poids économique de chacune des grandes applications restera approximativement le même qu'aujourd'hui. A titre d'exemple, la production primaire représentait 1.77 % de la valeur ajoutée brute totale de l'Union européenne en 2005, et nous faisons l'hypothèse qu'il en ira de même en 2030.

La première étape de cette démarche est illustrée dans le tableau 7.2, qui indique l'impact économique maximum que sont susceptibles d'avoir les biotechnologies dans leurs trois principaux domaines d'application. Ce résultat n'est obtenu qu'à la condition que *toutes* les activités économiques, dans ces trois grands secteurs, recourent aux biotechnologies : fabrication de produits pharmaceutiques (principale application en santé), production primaire et activités industrielles où les biotechnologies peuvent s'appliquer. Dans cette hypothèse, la part maximale des biotechnologies dans la valeur ajoutée brute de l'UE-25 et des États-Unis atteindrait respectivement 5.6 % et 5.8 %. Ces secteurs représentent plus de 4 % de l'emploi dans l'UE-25 et 2.5 % aux États-Unis.

S'il est naturellement peu probable que la part des biotechnologies dans l'activité économique atteigne ces proportions en 2030, elle pourrait toutefois s'en approcher à une date ultérieure. En 2030, de nombreux procédés industriels continueront de reposer sur les technologies existantes, les biotechnologies contribuant peut-être à hauteur de 35 % à la production chimique globale de la zone de l'OCDE¹. Dans le secteur pharmaceutique, les biotechnologies interviendront dans le développement et la production de la quasi-totalité des nouvelles molécules, mais les génériques existant dès avant la révolution biotechnologique continueront d'occuper une partie du marché. En 2005, ces derniers totalisaient entre 10 % et 40 % du marché dans les pays européens (Perry, 2006). La part des génériques non biotechnologiques devrait diminuer au fil du temps pour se situer en 2030, selon une estimation optimiste, à 20 % de la valeur ajoutée brute du secteur pharmaceutique, la part des biotechnologies s'établissant quant à elle à 80 %. En ce qui concerne le secteur de la production primaire, les biotechnologies ne seront guère employées dans la filière forestière des régions boréales, mais elles pourraient représenter la moitié de la production agricole et la quasi-totalité de la production aquacole et sylvicole, soit au total quelque 50 % de la production du secteur. Il en

ressort *grosso modo* que la part potentielle des biotechnologies dans la valeur ajoutée brute par secteur des pays de l'OCDE et de quelques pays européens non membres s'élèverait globalement, si l'on se fonde sur les proportions d'aujourd'hui et la valeur ajoutée brute actuelle par application, à 1 062 milliards USD, dont 259 milliards pour la santé, 381 milliards pour la production primaire et 422 milliards pour l'industrie, soit environ 2.7 % de la valeur ajoutée brute totale de ces pays².

Ces chiffres sous-estiment le potentiel des biotechnologies à l'horizon 2030, car ils excluent les biocarburants, les nouvelles applications inimaginables aujourd'hui et les impacts difficiles à mesurer en termes monétaires. Ces derniers comprennent, dans le domaine de la santé, l'effet des biotechnologies sur la durée et la qualité de vie et, dans celui de l'environnement, les avantages procurés par les biotechnologies agricoles et industrielles. De plus, ces chiffres ne prennent pas en compte l'augmentation de la valeur ajoutée brute de chacune des applications, par exemple la hausse de la production agricole en réaction à une progression de la demande de biomasse utilisée comme matière première dans l'industrie.

Ces estimations approximatives signifient notamment que l'apport économique des biotechnologies va sans doute concerner avant tout les applications industrielles, soit 39 % de la valeur ajoutée brute totale potentiellement imputable aux biotechnologies, suivies des applications dans la production primaire (36 %), puis des applications en santé (25 %). Elles contrastent sensiblement

Tableau 7.3. Dépenses de R-D aujourd'hui et marchés futurs des biotechnologies par application

	Part des dépenses totales des entreprises de l'OCDE dans la R-D biotechnologique en 2003	Part potentielle estimée de la valeur ajoutée brute totale imputable aux biotechnologies ¹ dans la zone de l'OCDE ² en 2030
Santé	87 %	25 %
Production primaire	4 %	36 %
Industrie	2 %	39 %
Autres	7 %	-
	100 %	100 %

1. Se reporter au tableau 7.2 et au texte d'accompagnement au sujet de la part potentielle estimée de la valeur ajoutée brute totale imputable aux biotechnologies par application.

2. Pays membres de l'OCDE et plusieurs pays de l'UE-25 non membres. Faute de données, la Turquie n'est pas prise en compte.

Source : OCDE (2006) pour la répartition des dépenses de R-D dans le secteur des biotechnologies.

avec l'estimation donnée par l'OCDE pour la répartition des dépenses de R-D des entreprises en 2003 (voir tableau 7.3). Cette année-là, les applications en santé s'étaient vu octroyer l'essentiel des investissements du secteur privé dans la R-D, à savoir 87 %, alors que les applications industrielles n'avaient bénéficié que de 2 % des dépenses de R-D dans les biotechnologies.

Il ressort de ces résultats que les investissements du secteur privé dans la R-D ne correspondent pas aux débouchés commerciaux potentiels des biotechnologies par application. Il est possible que cela soit dû à une plus grande productivité de la R-D biotechnologique dans la production primaire et l'industrie que dans le secteur de la santé, mais le manque d'incitations, de réglementations propices, de chercheurs qualifiés ou d'investissements complémentaires dans la R-D publique pourrait aussi jouer un rôle. Cependant, il n'est pas exclu qu'une modification des priorités du secteur privé soit d'ores et déjà en cours, comme en témoigne la récente progression des investissements dans les énergies propres (Dellenbach, 2008).

Les biotechnologies pourraient représenter une part encore plus grande du PIB des pays en développement, car la production primaire et industrielle y occupe une place plus importante que dans les pays de l'OCDE. À l'inverse, la part du PIB imputable à l'utilisation des biotechnologies pour développer et fabriquer des produits pharmaceutiques et dispositifs médicaux sera probablement plus élevée dans les pays développés compte tenu de la concentration des capacités de recherche et des marchés dans la zone de l'OCDE. Par ailleurs, la plupart des nouvelles technologies de santé sera trop onéreuse pour une grande partie de la population mondiale. De ce fait, les bienfaits de nombreux produits biotechnologiques ne bénéficieront en 2030 qu'à une population d'un milliard de personnes dans les pays développés, où les revenus par habitant sont suffisants, à laquelle s'ajouteront peut-être 500 millions à 1 milliard de citoyens aisés des pays en développement.

Scénarios appliqués à la bioéconomie en 2030

Telle qu'elle est décrite ci-dessus, la bioéconomie probable en 2030 est le résultat d'un scénario de statu quo. Néanmoins, elle pourrait être très différente si des événements imprévisibles se produisaient ou sous l'effet des interactions entre choix technologiques, économiques et politiques.

Deux scénarios, décrits à l'annexe 7.A1 de ce chapitre, s'intéressent à l'incidence que différents facteurs et événements *pourraient* avoir sur l'avenir de la bioéconomie, tant dans les pays de l'OCDE que dans le reste du monde. Il convient de noter que les scénarios ne permettent ni de prédire l'avenir, ni d'obtenir un consensus sur les résultats les plus probables. Contrairement aux estimations présentées dans le chapitre 2 sur la population mondiale, la

structure par âge et la consommation d'énergie en 2030, ils ne résultent pas d'extrapolations et, par conséquent, ils sont sans intérêt pour la planification économique ou technologique. En revanche, ils peuvent étayer la réflexion sur les conséquences de diverses décisions politiques et privées.

Dans un premier temps, six scénarios ont été construits : deux pour chacun des domaines d'application des biotechnologies, à savoir la production primaire, l'industrie et la santé³. Une analyse de ces six scénarios a montré que les deux facteurs clés pour l'avenir de la bioéconomie étaient la réussite de la commercialisation des procédés et produits biotechnologiques (tributaire des progrès scientifiques et technologiques et de la compétitivité des biotechnologies par rapport aux autres technologies) et la qualité de la gouvernance, définie comme le système de réglementations et de mesures qui influencent le développement et l'utilisation des biotechnologies. Ces six scénarios ont été fondus dans deux scénarios composites décrits dans l'annexe : « Réussir tant bien que mal » et « Développement irrégulier ». Contrairement à beaucoup d'opérations de prospective, qui ont tendance à aboutir à des résultats invariablement positifs ou invariablement négatifs⁴, ces deux scénarios donnent des résultats tantôt positifs, tantôt négatifs. Toutefois, le scénario « Réussir tant bien que mal » donne davantage de résultats positifs que le scénario « Développement irrégulier ».

Ces deux scénarios s'appuient sur les estimations des déterminants de la bioéconomie (chapitre 2) et sur les prévisions à court terme des biotechnologies qui devraient trouver un marché d'ici à 2015 (chapitre 4). Ils envisagent un monde de plus en plus multipolaire, dans lequel aucun pays ou région ne domine les affaires mondiales à lui seul (Zoellick, 2008), ainsi que les événements naturels ou politiques plausibles qui pourraient influencer sur la bioéconomie. Outre les effets possibles de la crise financière mondiale de 2007-2010, ces événements plausibles sont la dégradation de l'environnement, la sécheresse, des conditions météorologiques défavorables, les maladies et le bioterrorisme. Les scénarios ne prévoient pas d'événements très improbables, comme une pandémie mondiale faisant plusieurs centaines de millions de morts. Nous rappelons au lecteur que ces deux scénarios sont tout à fait fictifs. Ils sont écrits au passé, comme s'il s'agissait de « l'histoire » racontée en 2030. Les références qu'ils contiennent ne sont données que pour étayer la plausibilité de certains des événements fictifs décrits.

La section suivante donne un résumé succinct de chaque scénario et esquisse les enseignements à en tirer pour l'action des pouvoirs publics.

Scénario 1 : Réussir tant bien que mal

Entre 2009 et 2013, la recherche et les investissements des entreprises dans les applications biotechnologiques utiles à la production primaire et à l'industrie ont continué de croître, notamment en prévision d'un retour à des prix élevés des produits de base après la crise financière mondiale de 2007-10. Les pouvoirs publics ont aussi soutenu les investissements et la recherche dans les biotechnologies dans le cadre de leurs plans d'action en faveur de la relance économique. Cependant, après 2010, il ne faisait plus de doute que l'époque où l'argent bon marché abondait pour financer les investissements à risque dans les entreprises technologiques était révolue. Les jeunes pousses pharmaceutiques ont été particulièrement touchées, les investissements étant réorientés vers des domaines moins risqués offrant un retour plus rapide, comme les dispositifs médicaux, les diagnostics, la bioénergie et les biotechnologies agricoles. Le tarissement du capital bon marché a en partie encouragé la recherche de nouveaux modèles d'entreprise susceptibles de réduire les coûts grâce au partage des connaissances.

Les investissements dans la médecine prédictive et préventive ont continué, mais le concept s'est heurté à des obstacles difficiles à surmonter du fait de la hausse des coûts, la destination des fonds consacrés à la santé faisant de plus en plus débat : fallait-il privilégier les changements de mode de vie bon marché ou les interventions médicales onéreuses ? La première de ces deux stratégies a été en partie étayée par la réponse apportée à la pandémie de grippe de 2014, où il est apparu que les mesures de santé publique comme les quarantaines et la limitation des voyages étaient plus efficaces que les nouveaux médicaments antiviraux. L'épidémie de grippe a aussi renforcé la capacité des institutions internationales comme l'OMS à réagir aux menaces sanitaires. Des progrès ont été faits sur le front réglementaire ; ainsi, un accord a été passé entre la Food and Drug Administration (FDA) des États-Unis et l'Agence européenne du médicament sur la validation des biomarqueurs. La FDA a aussi adopté des réglementations sur l'évaluation en continu des produits pharmaceutiques après leur autorisation de mise sur le marché, et les pouvoirs publics des États-Unis ont affecté des fonds aux essais cliniques afin de comparer l'efficacité de différents médicaments utilisés pour traiter une même maladie. Les autorités sanitaires chargées d'une juridiction de taille intermédiaire ont mis sur pied des systèmes généraux de dossiers médicaux qui ont permis aux chercheurs d'étudier les effets à long terme de l'usage des produits pharmaceutiques et des facteurs environnementaux sur la santé. Ces études ont mis en avant les avantages de la médecine pratiquée comme une discipline scientifique objective sur la médecine pratiquée comme un « art », mais les changements de comportement des praticiens et des patients ont été inégaux.

Deux années consécutives de sécheresse et de canicule dans les grandes régions céréalières du monde, en 2016 et 2017, ont provoqué un effondrement de la production et une flambée des prix sans précédent. Dans les régions les plus pauvres, une famine meurtrière a été évitée de justesse grâce à l'action entreprise par les Nations Unies afin d'obtenir un accord mondial restreignant l'utilisation des céréales pour nourrir le bétail. Cet épisode a montré l'utilité des plantes transgéniques résistant à la sécheresse, ce qui a amené l'Europe à mettre fin à son moratoire. Il est aussi venu rappeler qu'il fallait prendre le changement climatique au sérieux et a conduit à l'adoption d'un accord mondial sur l'introduction de taxes sur le carbone suffisamment dissuasives pour entraîner une réduction sensible des émissions de GES. Cette mesure a stimulé les économies d'énergie et fait bondir les investissements dans les énergies bas carbone, dont les biocarburants.

En 2019, plusieurs facteurs se sont conjugués pour transformer les systèmes d'incitation et de financement de la recherche médicale, les brevets et la détermination par le marché des prix des médicaments brevetés laissant la place à un système mondial de rétribution financière en vertu duquel les brevets expirent une fois obtenue l'autorisation de mise sur le marché. Tous les médicaments nouveaux étaient donc produits au prix des génériques. Lorsqu'ils découvraient une nouvelle molécule, les laboratoires étaient « récompensés » au moyen d'une rétribution dont le montant était fonction du service médical rendu par la molécule. L'industrie pharmaceutique a accepté ce nouveau système, parce qu'il apportait une solution à la baisse inexorable de ses profits due à la réduction de la taille du marché de chaque médicament (provoquée en partie par la pharmacogénétique) et parce qu'un système international de prélèvements assis sur le PIB par habitant alimentait un fonds suffisamment doté pour rémunérer généreusement les investissements risqués dans la recherche médicale. Pour leur part, les pouvoirs publics nationaux ont accepté ce système, parce qu'il réduisait les coûts de la santé, en particulier dans les pays à revenus moyens ou bas. Le système de rétribution financière a aussi stimulé les investissements dans la recherche sur les dispositifs médicaux et la médecine régénérative. Les investissements dans la médecine régénérative avaient pâti du régime des brevets parce que les brevets ne pouvaient pas protéger correctement les thérapies basées sur les cellules souches et le génie tissulaire.

Les années 2025 à 2030 ont été celles de l'affirmation de la bioéconomie, caractérisée par la généralisation des biotechnologies dans la production primaire. Cette montée en puissance n'a pas été sans quelques échecs, comme la libération d'énormes quantités de carbone dans l'atmosphère du fait de la conversion de la savane et de la forêt tropicale en terres cultivables en Amérique du Sud et en Afrique. La cause en a été l'absence d'accord international concernant les normes sur le cycle de vie des produits agricoles, des produits chimiques issus de la biomasse et des biocarburants à forte teneur

énergétique. Ces biocarburants étaient produits à partir de canne à sucre ou de graminées et d'arbres à croissance rapide, en particulier dans les régions tropicales et subtropicales. Les biocarburants algaux auraient pu réduire les besoins de vastes espaces cultivables, mais des problèmes techniques ont retardé leur mise au point. Pénalisés par leurs coûts de production, ils n'ont commencé à devenir compétitifs que vers 2030, mais leur avenir reste incertain à cause de la concurrence des autres sources d'énergie renouvelables.

Le centre d'intérêt de la recherche médicale s'était quelque peu déplacé, les produits pharmaceutiques reculant devant la médecine régénérative, les techniques de diagnostic et les techniques chirurgicales. Les recherches en médecine prédictive et préventive avaient beaucoup progressé et permettaient de prévenir ou de retarder certains types de cancer. Le dépistage génétique, chez l'embryon, des maladies héréditaires et des risques élevés d'autres maladies graves était devenu courant. Cependant, le grand public restait opposé à la réalisation de tests prédictifs chez l'enfant et chez l'adulte lorsqu'il n'existait pas de thérapies efficaces contre les maladies concernées. Dans ces conditions, les tests prédictifs engendraient davantage d'anxiété et de détresse que de mieux-être. La pratique médicale était à la fois de plus en plus automatisée et de plus en plus personnalisée, les traitements s'appuyant sur des logiciels d'analyse des résultats des tests génétiques et d'autres examens diagnostiques, des antécédents médicaux et des données sur le comportement et l'environnement. La possibilité que les médecins s'écartent des protocoles correspondant aux meilleures pratiques avait été réduite grâce à un meilleur encadrement des systèmes de soin.

Utilité du scénario « Réussir tant bien que mal » pour l'action publique

La conjugaison d'une bonne gouvernance et d'une compétitivité technologique élevée des biotechnologies dans diverses applications a donné les résultats bénéfiques décrits plus haut. La bonne gouvernance internationale a été stimulée par des expériences positives de coopération, par exemple une réaction coordonnée à une grande épidémie de grippe. Dans les années qui ont suivi, ces initiatives ont aidé les pays à conclure des accords sur d'autres questions importantes comme les pénuries alimentaires et le changement climatique. La confiance ainsi engendrée a aussi facilité la coopération internationale sur une nouvelle structure incitative dans le secteur de la santé. Tous les contentieux n'ont pas disparu pour autant, et la mobilisation de tous les acteurs restait nécessaire pour parvenir à un consensus mondial.

Les crises graves peuvent ouvrir aux gouvernements une fenêtre d'opportunité pour procéder à des ruptures ou à des changements radicaux. Par exemple, dans ce scénario, il a fallu que des pénuries alimentaires mondiales

suscitent une véritable frayeur pour qu'une approche coordonnée de la problématique du changement climatique soit adoptée. Une approche non coordonnée et mal encadrée (qui n'est pas envisagée dans ce scénario), dans laquelle chaque pays défend séparément ses propres intérêts, aurait pu mener au désastre en multipliant les différends commerciaux engendrés par le manque de ressources et un changement climatique rapide.

Dans ce scénario, les biotechnologies se sont développées lorsqu'elles étaient compétitives technologiquement, mais dans certains cas, comme celui des biocarburants, la réglementation a joué un rôle important. La compétitivité et la recherche de solutions ont aussi été influencées par des facteurs économiques. La perte de rentabilité du secteur pharmaceutique a été mise à profit pour mettre en place une nouvelle structure d'incitation en faveur de la recherche médicale. Ces changements ont encouragé les investissements dans les technologies qui, à l'instar de la médecine régénérative, assuraient un retour socioéconomique supérieur. Plusieurs technologies prometteuses, dont la médecine prédictive et préventive et les biocarburants algaux, cités à titre d'exemples dans ce scénario, n'ont pas connu le succès espéré à cause de problèmes scientifiques complexes. Les biocarburants algaux étaient également confrontés à la concurrence pressante d'autres sources d'énergie propres, sans que l'une ou l'autre des technologies en présence ne l'emporte nettement à la fin du scénario. En ce qui concerne la médecine prédictive et préventive, c'est la résistance du public aux soins intrusifs qui a limité sa progression.

Scénario 2 : Développement irrégulier

Entre 2009 et 2014, les biotechnologies agricoles, contrôlées par cinq grands groupes, ont continué d'engranger des succès, avec un flux régulier de variétés améliorées de maïs, blé, riz et soja transgéniques. L'Europe n'a pas autorisé les OGM, mais la production de biocarburants a beaucoup progressé aussi bien aux États-Unis que sur le Vieux Continent. L'obligation d'incorporer des biocarburants aux carburants classiques a favorisé les investissements dans la production de biocarburants de première génération, au détriment des biocarburants cellulosiques. Conjugué aux difficultés techniques, le faible niveau de subvention accordé aux biocarburants cellulosiques a entraîné une baisse des investissements dans cette technologie, les investisseurs verts se tournant vers l'énergie solaire et la géothermie. En Europe, les pressions exercées par les ONG ont entraîné un arrêt des subventions à tous les biocarburants en 2014.

Dans le domaine de la santé, deux des plus grands groupes pharmaceutiques mondiaux, une entreprise de TIC et un prestataire privé de soins de santé aux États-Unis ont créé une entreprise conjointe pour tirer parti de l'obligation, imposée par la FDA, d'assurer un suivi après commercialisation

et d'utiliser les données pharmacogénétiques dans les essais cliniques. Le prestataire de soins de santé a offert aux groupes pharmaceutiques l'accès à ses membres et à son vaste système de bases de données médicales en échange d'une réduction des prix des médicaments.

Aucun accord international n'a pu être conclu sur les GES. Le changement climatique suscitait beaucoup moins d'intérêt parce que les températures avaient très peu augmenté depuis 2007. Les climatologues avaient prévu qu'un cycle long de l'orbite terrestre ne provoquerait qu'une accalmie temporaire du changement climatique pendant une décennie, mais leurs avertissements ont été ignorés.

En septembre 2016, des terroristes ont disséminé à Londres une bactérie synthétique qui a causé de graves douleurs intestinales chez des milliers de personnes. On n'a déploré aucun décès, mais l'idée même que des terroristes puissent créer une bactérie ou un virus meurtrier a provoqué un électrochoc dans toute la zone de l'OCDE. Les pouvoirs publics ont immédiatement redonné la priorité à la sécurité intérieure, notamment en imposant des normes de sécurité très strictes aux recherches sur les formes de vie synthétiques et sur les OGM. En raison des coûts élevés à engager pour se mettre en conformité avec ces normes, beaucoup d'entreprises industrielles et agricoles ont abandonné leurs projets de recherche dans ces domaines. Elles ont eu de plus en plus de mal à retenir leurs chercheurs attirés par des postes mieux rémunérés dans la recherche sur la biosûreté. Les problèmes de sécurité ont encouragé les pays de l'OCDE à promouvoir les économies d'énergie et à accélérer le remplacement des énergies fossiles par de nouvelles sources d'énergie, notamment en construisant des centrales nucléaires. En Amérique du Nord, la production de GES a continué à augmenter.

Les recherches en biosûreté ont eu plusieurs effets bénéfiques. Elles ont permis de mettre au point des puces de diagnostic bon marché pour les parasites et les maladies des animaux, des plantes et des humains. Les médecins ont pu déterminer rapidement si les symptômes du rhume étaient dus à un virus ou à une bactérie, ce qui a limité la prescription abusive d'antibiotiques et, partant, le développement de souches bactériennes résistantes. Les banques de données sur l'ADN des plantes et des animaux, constituées dans le cadre des mesures en faveur de la biosûreté, ont été utilisées dans les années 2020 pour empêcher le commerce illégal de biomatériaux.

Le secteur de la santé est en grande partie resté à l'abri des problèmes rencontrés par les biotechnologies agricoles et industrielles grâce à des salaires plus compétitifs et au financement de la recherche aux États-Unis pour identifier et traiter rapidement les nouveaux pathogènes. L'entreprise conjointe a été supprimée en 2020 et remplacée par la fusion des partenaires fondateurs, la nouvelle entité étant dominée par l'entreprise de TIC et le prestataire de soins de santé. Ce nouveau modèle d'entreprise a été appelé

« prestataire de santé en réseau » (PSR). Des différends nés entre les partenaires au sujet de l'utilisation de médicaments coûteux, mais peu innovants, et du peu d'empressement des deux groupes pharmaceutiques à se lancer dans la médecine régénérative, qui menaçait certains de leurs marchés, ont été à l'origine de la fusion. La nouvelle entreprise a pu exploiter les nouvelles technologies, constituer de nouveaux types d'expertise et surmonter les obstacles réglementaires à l'innovation. Le modèle PSR est devenu très rentable, notamment grâce à l'adoption de nouveaux dispositifs médicaux et de thérapies régénératives, et il a été copié en Inde et en Chine.

Étant donné que l'accès des produits de santé au marché passait de plus en plus par les PSR, les petites entreprises ont pu créer une gamme de produits de santé beaucoup plus étendue. Le développement de molécules a cessé de jouer un rôle prépondérant dans les biotechnologies de santé, les techniques de diagnostic et la médecine régénérative accaparant près de la moitié des fonds investis dans la recherche privée.

La période de 2022 à 2030 a été marquée par une reprise partielle du recours aux biotechnologies dans la production primaire et l'industrie. En 2025, le Brésil et quelques autres pays non membres de l'OCDE avaient créé des bioraffineries économiquement compétitives pour produire des bio-carburants à forte teneur énergétique et des bioplastiques, en s'appuyant au départ sur le savoir-faire de producteurs d'enzymes européens qui avaient délocalisé une partie de leurs activités pour échapper aux restrictions imposées à la recherche en Europe et aux États-Unis.

Les préoccupations engendrées par les GES et le changement climatique se sont accentuées et ont pris une dimension mondiale en 2027, après sept années consécutives d'accélération du changement climatique. Elles ont suscité un regain d'intérêt pour l'utilisation des OGM et d'autres technologies aux fins de développement de variétés végétales résistant aux stress. La Chine et l'Inde ont été les premières à s'engager dans cette voie. Les entreprises industrielles et agricoles ont fait pression sur les gouvernements des pays de l'OCDE afin qu'ils assouplissent certaines des restrictions imposées aux biotechnologies.

Le succès éclatant du modèle des PSR a provoqué un malaise grandissant, car il a donné naissance à un système de santé clairement à deux vitesses : les adhérents des PSR, qui pouvaient payer des cotisations élevées, bénéficiaient de meilleurs soins que le reste de la population, qui devait se tourner vers d'autres prestataires. Les pays qui, en Europe ou ailleurs, avaient des systèmes de santé publics, ont tardé à adopter le système des PSR, et il leur a donc été plus difficile de mettre en place un système intégré de prestations de soins. Ils ont aussi dû acheter beaucoup de thérapies nouvelles aux PSR à des prix élevés. Confrontés à un dilemme politique, plusieurs pays dotés d'un système de santé financé par les fonds publics

ont menacé, en 2030, d'invoquer les clauses dérogatoires de l'accord sur les aspects des droits de propriété intellectuelle qui touchent au commerce (ADPIC) pour pouvoir produire à bas coût des thérapies brevetées.

Utilité du scénario « Développement irrégulier » pour l'action publique

Quelques-uns des problèmes décrits dans ce scénario sont dus à des variations de la compétitivité technologique des biotechnologies, souvent accentuées par des décisions politiques peu judicieuses, telles qu'un soutien insuffisant à des technologies prometteuses. Les mesures de sécurité adoptées à la suite des attaques bioterroristes ont certes donné lieu à plusieurs innovations bénéfiques, mais elles ont aussi étouffé la croissance des biotechnologies agricoles et industrielles. La situation a été aggravée par les effets involontaires d'un meilleur niveau de rémunération dans le domaine de la biosûreté. Des stratégies globales soigneusement conçues pour promouvoir non seulement la biosûreté, mais aussi les biotechnologies agricoles et industrielles, auraient peut-être permis d'éviter certains de ces problèmes. Le progrès des biotechnologies de santé a été stimulé par une innovation organisationnelle majeure, qui a consisté à associer étroitement la recherche sur les thérapies et la prestation de services de santé. Cependant, tout le monde n'en a pas profité. A la fin du scénario, des tensions croissantes liées à l'accès aux soins auraient pu conduire plusieurs pays à saper le système des brevets qui constituait la principale incitation à investir dans la recherche en santé.

Ce scénario met aussi en évidence l'incapacité à réagir aux problèmes mondiaux tels que le changement climatique. Une décennie de hausse modérée des températures mondiales a fait retomber l'inquiétude suscitée par ce phénomène. La prise de conscience de la gravité du problème n'est intervenue que vers la fin du scénario, lorsque le changement climatique s'est de nouveau manifesté avec force. Les solutions adoptées, qui s'attaquaient aux symptômes et non pas aux causes du changement climatique, étaient inadaptées. La principale réponse a consisté à développer de nouvelles variétés végétales adaptées à un climat plus chaud et plus sec, alors qu'il aurait fallu réduire les émissions de GES.

Conclusions

Les biotechnologies pourraient représenter quelque 2,7 % de la valeur ajoutée brute des pays de l'OCDE en 2030, voire davantage en fonction des progrès technologiques et des politiques mises en œuvre. Le principal intérêt qu'elles sont susceptibles de présenter pour les pouvoirs publics réside dans leur capacité à accroître la productivité et dans leur utilité dans les domaines du changement climatique, du stress hydrique, de la pénurie alimentaire, de la

sécurité énergétique et de la santé. Tous ces domaines sont pris en considération dans les scénarios.

Les descriptions de la bioéconomie probable contenues dans ce chapitre, de même que les deux scénarios aux projections différentes, montrent que la bioéconomie émergente sera influencée par de multiples facteurs, dont les découvertes fortuites, aussi bien dans les biotechnologies que dans les technologies concurrentes. Les grands problèmes auxquels le monde sera confronté, comme la pénurie alimentaire due au changement climatique et à la sécheresse ou les pandémies frappant les animaux d'élevage, exerceront eux aussi leur influence.

Plusieurs des événements décrits dans les scénarios provoquent des crises politiques qui ouvrent aussi des fenêtres d'opportunité. Les réponses des pouvoirs publics aux crises financières, à la pénurie alimentaire ou aux pandémies peuvent influencer sur l'évolution future de la bioéconomie. Il en va de même de la coopération internationale, en particulier avec les pays en développement, et de la structure des incitations en faveur de la recherche et des marchés. Les incitations ont une incidence sur les types de biotechnologies viables commercialement et sur la distribution de leurs avantages. Selon leur structure, les incitations peuvent aussi être plus favorables aux technologies écologiquement viables qu'aux solutions moins respectueuses de l'environnement, ou inversement.

Bien que les événements décrits dans les scénarios soient complètement fictifs, ils nous apprennent que la bonne gouvernance joue un rôle fondamental. Elle passe par des politiques judicieusement conçues pour conforter la trajectoire actuelle de la bioéconomie, mais aussi suffisamment souples pour pouvoir anticiper les crises imprévisibles et y répondre efficacement. Les options que les pouvoirs publics peuvent envisager pour promouvoir la bioéconomie sont examinées dans le chapitre suivant.

Notes

1. Cette estimation de 35 % résulte d'une extrapolation linéaire, à l'horizon 2030, des estimations hautes de l'USDA concernant la place des biotechnologies dans la production chimique mondiale en 2005, 2010 et 2025 (voir le tableau 4.6 dans le chapitre 4). Une extrapolation des estimations basses de l'USDA donnerait un chiffre de 27 %. Nous utilisons l'estimation haute pour les pays de l'OCDE, parce que nous postulons que le progrès technique sera plus important dans ces pays que dans les pays en développement.
2. Ces estimations sont établies à partir des données présentées dans le tableau 7.2 pour chaque pays de l'OCDE et postulent que les biotechnologies assureront 80 % de la production pharmaceutique, 50 % de la production primaire et 35 % de la production industrielle dans les secteurs où elles ont des applications potentielles (voir la note 5 du tableau 7.2). Les données manquantes, par exemple sur la valeur ajoutée brute du domaine de la santé en Nouvelle-Zélande, sont estimées à partir du plus proche voisin par la structure économique. Ainsi, les pourcentages de la valeur ajoutée brute du Japon sont appliqués à la Corée et ceux de l'Australie à la Nouvelle-Zélande ; le pourcentage de la valeur ajoutée brute des produits pharmaceutiques aux États-Unis est appliqué à la Suisse et le pourcentage de la valeur ajoutée brute de la production industrielle dans l'UE est appliqué à la Suisse et à la Norvège.
3. Trois rapports décrivent les scénarios sur la santé, la production primaire et l'industrie. Voir Tait *et al.*, 2008 pour les scénarios sur les biotechnologies relatives à la santé ; Murphy *et al.*, 2008 pour les scénarios sur les biotechnologies relatives à la production primaire ; et MacRae, 2007 pour les scénarios sur les biotechnologies industrielles. Tous les scénarios peuvent être téléchargés à l'adresse www.oecd.org/futures/bioeconomy.
4. Les autres scénarios de la bioéconomie analysés pour cette étude ont des horizons compris entre 2015 et 2056. Voir USDA, 2005 ; Ministère allemand de l'Éducation et de la Recherche, 2004 ; Bezold et Peck, 2005 ; EC, 2007 ; MoRST, 2005 ; IBM, 2006 ; Neild et Pearson, 2005 ; WBCSD, 2000.

Annexe 7.A1

Scénarios fictifs de la bioéconomie à l'horizon 2030

Scénario 1 – Réussir tant bien que mal

2010 à 2013 : changements progressifs

En 2010, les investissements dans la recherche biotechnologique étaient dominés par les applications de santé, qui représentaient 85 % des dépenses de R-D. Les biotechnologies agricoles ont continué sur la lancée de leurs succès passés, avec la mise sur le marché de plusieurs nouvelles variétés OGM de plantes de grande culture avant 2012, dont des variétés de maïs et de soja de meilleure qualité et tolérant mieux la sécheresse. En 2011, la Chine a commencé à cultiver à grande échelle du riz transgénique résistant aux ennemis des cultures. Les biotechnologies industrielles ont gagné en visibilité grâce à la production de biocarburants, qui représentait un débouché important pour les enzymes génétiquement modifiées.

Le secteur des biocarburants a rencontré des problèmes d'approvisionnement en biomasse et des problèmes de commercialisation. L'accroissement de la demande de biomasse a fait bondir le prix de ce qui n'était jusque là qu'un déchet bon marché, tandis que la surabondance des sous-produits de la production de biocarburants a fait chuter le prix de ce qui procurait auparavant de confortables sources de revenus. La hausse des coûts de la biomasse a aussi majoré le coût de production des biopolymères.

La flambée des prix des produits agricoles de base et du pétrole, avant 2008, avait donné le coup d'envoi d'une modification progressive de la structure du secteur des biotechnologies. Après 2008, les prix des produits de base ont chuté brutalement sous l'effet d'une hausse de la production céréalière et d'un ralentissement de l'augmentation de la demande de pétrole dû à la crise financière de 2007-2010, mais les prix sont néanmoins restés supérieurs à la moyenne des années 90. Les investisseurs s'attendaient à ce que les prix des produits agricoles de base et du pétrole redécroissent après 2010 du fait de la hausse de la demande à long terme, d'où une progression soutenue de l'investissement dans les biotechnologies agricoles et dans l'énergie. Ces tendances ont été confortées par les investissements publics que divers pays de l'OCDE et plusieurs pays en développement ont consacrés à la R-D et aux infrastructures dans le domaine des biotechnologies appliquées à la production primaire et à l'industrie dans le cadre des plans de relance de la croissance économique face à la crise financière mondiale.

Scénarios fictifs

Les capital-risqueurs ont investi dans de petites entreprises qui travaillaient sur les sources celluloses de biomasse, comme les graminées à faible teneur en lignine. Les grands semenciers ont étendu leurs programmes de recherche pour développer des végétaux porteurs de caractères qualitatifs améliorés, capables de réduire les coûts de transformation de la biomasse et d'accroître les rendements de transformation en biocarburants et en produits chimiques à forte valeur ajoutée. Les recherches sur des utilisations nouvelles et plus efficaces des déchets végétaux et animaux pour la production d'énergie se sont intensifiées elles aussi.

Le refus de plusieurs pays européens d'autoriser la culture d'OGM s'est heurté à une opposition de plus en plus vive de la part des éleveurs qui payaient des prix élevés pour importer des États-Unis et d'Amérique du Sud des aliments du bétail transgéniques. Cependant, les consommateurs européens restaient hostiles aux OGM. Dans l'ensemble, les analystes européens s'accordaient à dire que l'opinion publique ne changerait pas aussi longtemps que les consommateurs ne tireraient aucun avantage direct des OGM, comme des aliments meilleurs pour la santé, par exemple. Il était peu probable que les consommateurs profitent d'une baisse des prix, la diminution des coûts bénéficiant presque exclusivement aux semenciers et aux agriculteurs. En Australie, l'opinion publique s'était largement convertie aux OGM, car la longue sécheresse endurée dans les années 2000 lui avait fait craindre pour la sécurité alimentaire du pays. En 2012, l'Australie était déjà un gros producteur de plusieurs plantes transgéniques, dont le colza, l'orge résistant à la sécheresse et différentes céréales fourragères.

Dans le secteur de la santé, l'utilisation des biotechnologies s'est répandue rapidement. Les biotechnologies comme la technique de l'ARN interférent ont été largement utilisées dans la recherche sur les médicaments, qu'il s'agisse de grandes ou de petites molécules. Plus de la moitié des essais cliniques faisaient appel à des données pharmacogénétiques sur les patients ; les laboratoires cherchaient à réduire la prévalence des effets indésirables des médicaments et expérimentaient l'identification de sous-groupes de patients répondant bien aux thérapies, notamment dans le traitement du cancer. De nouveaux diagnostics des facteurs génétiques de risque, ciblant de plus en plus de gènes, apparaissaient continuellement sur le marché, et le coût des tests génétiques diminuait sensiblement année après année.

Les laboratoires pharmaceutiques, les capital-risqueurs et les analystes spécialistes de la santé se sont de plus en plus intéressés au concept de la médecine prédictive et préventive, mais les progrès sont restés lents. Ce concept supposait que les patients particulièrement susceptibles de développer une maladie précise, en raison d'une prédisposition génétique ou de facteurs environnementaux, prennent des mesures pour empêcher cette maladie de se développer. Selon la maladie, les patients devaient changer de mode de vie, de régime alimentaire ou de traitement médical bien avant l'apparition des symptômes. Les tests diagnostiques des facteurs de risque de nombreuses maladies chroniques, comme le cancer, les maladies cardiaques, l'arthrite et le diabète de type 2, constituaient une bonne partie de la composante prédictive de la médecine préventive, mais la plupart d'entre eux n'étaient capables de détecter que les niveaux de risque relativement faibles. Il existait peu de tests prédictifs permettant de déterminer si des facteurs génétiques ou environnementaux conduiraient effectivement à des maladies spécifiques et ne se traduiraient pas simplement par une aggravation des risques théoriques. Ces tests prédictifs nécessitaient des marqueurs validés, comme les protéines sanguines, qui permettent de détecter une maladie en développement bien avant l'apparition des symptômes.

Scénarios fictifs

Les experts en soins de santé qui s'intéressaient à la médecine prédictive et préventive savaient qu'il était difficile d'obtenir des patients qu'ils s'investissent activement dans une modification de leur mode de vie. C'était encore plus difficile lorsque des changements de comportement étaient suggérés longtemps avant l'apparition du moindre symptôme. Une étude a montré les effets très bénéfiques des programmes de sevrage tabagique et des changements de régime alimentaire pour réduire le taux de cholestérol (Kay-Tee *et al.*, 2008). Ce faisant, elle a démontré que les individus, s'ils étaient suffisamment motivés, modifiaient leur comportement lorsqu'ils étaient confrontés à des risques à long terme. Mais elle a aussi révélé qu'il était très difficile de modifier des habitudes très anciennes et que les changements, quels qu'ils soient, prenaient du temps. D'autres recherches ont montré que les gens n'aimaient pas les mesures de prévention qui faisaient appel à l'autosurveillance, parce qu'elle accroissait l'anxiété et, par conséquent, diminuait leur qualité de vie (Gulliford, 2008).

La contribution potentielle des biotechnologies aux soins de santé était largement reconnue, mais ni les responsables politiques, ni les dirigeants des entreprises du secteur de la santé, ni ceux des services de soins, publics ou privés, ne savaient comment résoudre les problèmes cruciaux de l'augmentation des coûts de la santé, de la baisse de la productivité de la recherche et de la dégradation manifeste du rapport coûts-avantages des nouvelles technologies. Beaucoup de produits biopharmaceutiques, commercialisés à des prix supérieurs à 50 000 USD par an, n'amélioraient que modestement la survie médiane des patients¹. Ces résultats ont relancé le débat sur la question de savoir s'il fallait consacrer davantage de fonds publics aux changements de mode de vie peu coûteux et moins aux interventions médicales onéreuses.

Le financement de la caractérisation et de la validation de plus de 2 000 biomarqueurs potentiels était un problème difficile à surmonter. Pour sortir de l'impasse, une dizaine de grands groupes pharmaceutiques et d'organismes scientifiques à but non lucratif ont créé un consortium de recherche au milieu des années 2000. De nouveaux membres le sont rejoints au fil des années.

La validation a nécessité plusieurs années d'essais cliniques précis ; il fallait établir le lien entre l'état de santé du patient sur une longue durée, d'une part, et les biomarqueurs et les traitements, d'autre part. En 2009, l'Agence européenne du médicament (EMEA) et la FDA ont conclu un accord sur des normes de reconnaissance mutuelle de la validation des biomarqueurs, étape essentielle pour aider la recherche dans ce domaine. Ce travail de normalisation s'est appuyé sur des projets antérieurs menés en collaboration par l'EMEA et la FDA pour harmoniser la soumission des données pharmacogénétiques dans le cadre des essais cliniques.

Pour évaluer les risques présentés par les produits pharmaceutiques, la FDA a adopté une approche fondée sur le cycle de vie qui allait bien au-delà de l'autorisation de mise sur le marché. Elle a considérablement durci les règles de suivi post-commercialisation dans l'optique de mettre en évidence les problèmes de sûreté à long terme et institué l'enregistrement obligatoire de tous les résultats des essais cliniques. En complément, les National Institutes of Health (NIH) des États-Unis ont affecté 500 millions USD par an aux essais comparatifs de différents produits pharmaceutiques ou traitements chirurgicaux destinés au même problème médical.

Scénarios fictifs

2014 à 2025 : les années de transition

La pandémie de grippe cambodgienne de 2014 a renforcé la nécessité de mettre en place un système mondial de veille sanitaire placé sous la supervision de l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Cette épidémie mondiale de grippe a été la plus grave depuis 1918, mais l'expérience acquise dix années plus tôt à l'occasion de l'épidémie de SRAS (2003) s'est révélée précieuse et a permis de limiter le nombre de morts à 20 millions dans le monde, alors que l'on avait déploré 40 millions de victimes en 1918, à une époque où la population mondiale était beaucoup moins nombreuse (Smith, 2006). L'utilisation de médicaments antiviraux n'a eu qu'un effet limité sur la pandémie. Dans leur majorité, les survivants ont dû la vie sauve à des mesures de santé publique telle que les quarantaines et la limitation des voyages. Estimés à 3 % du PIB mondial, les coûts économiques totaux de la pandémie ont été élevés. Beaucoup de scientifiques se sont réjoui que l'événement ne se soit pas produit quelques années plus tard, car il avait été question, peu de temps auparavant, de réduire le système mondial de veille sanitaire pour soulager le budget de l'ONU déjà sollicité à l'excès.

Consécutivement à la pandémie de grippe cambodgienne, les pays membres de l'ONU ont approuvé une forte augmentation du budget que l'OMS consacrait à la veille sanitaire et entamé des discussions en vue d'établir un fonds destiné à soutenir la recherche sur le développement de nouveaux antibiotiques, dans l'espoir de parer à l'antibiorésistance persistante des souches bactériennes. Plusieurs années après, les Nations Unies ont également obtenu des fonds spécifiquement destinés à financer le remplacement, en Asie du Sud-Est, des méthodes traditionnelles d'élevage des volailles et du bétail par des méthodes modernes qui réduisaient sensiblement les contacts entre les humains et les animaux. L'objectif était de limiter le risque de transmission des agents zoonotiques, comme les virus de la grippe, des animaux aux humains (Smith et Alvarez, 2008).

En 2013, il était largement admis que la surabondance de capital bon marché qui finançait depuis 25 ans les investissements de capital-risque dans des projets technologiques à long terme et très risqués avait pris fin en 2010².

L'une des causes majeures était qu'il y avait des possibilités croissantes d'investissement rentable à court et moyen termes dans les pays en développement, en particulier après la crise financière mondiale de 2007-2010, ce qui s'est traduit par une forte chute des pétrodollars et des excédents commerciaux asiatiques investis aux États-Unis. Les investissements dans les hautes technologies procuraient des rendements plus élevés dans le domaine de l'énergie – qui bénéficiait de l'essor mondial des sources d'énergie à faible teneur en GES – et dans celui des biotechnologies agricoles, car les prix des aliments destinés tant à la consommation humaine qu'animale se maintenaient à des niveaux élevés. En comparaison, il est devenu plus difficile aux petites entreprises biotechnologiques spécialisées dans les produits pharmaceutiques de lever des capitaux. Une part croissante des investissements en capital-risque dans la santé, eux-mêmes en diminution, était consacrée aux dispositifs médicaux et aux diagnostics, dont le développement prend moins de temps que celui des produits pharmaceutiques.

Les prix élevés des produits agricoles de base ont provoqué une augmentation du taux de conversion des pâturages et des forêts en surfaces cultivées, notamment en Amérique du Sud,

Scénarios fictifs

en Indonésie et dans les régions d’Afrique où les précipitations sont abondantes (Bruinsma, 2003). Compte tenu des prix mondiaux, la production de céréales en Afrique était désormais compétitive. En 2014, le débat « production alimentaire contre production de biocarburants » était retombé, et 15 % de la production végétale était destinée aux biocarburants, qui étaient produits à partir de canne à sucre et de variétés OGM de céréales modifiées de manière à réduire les coûts de transformation et à accroître les rendements énergétiques.

La Biobricks Foundation, qui avait identifié les composants génétiques nécessaires à la production chimique et dont les ressources étaient en accès libre (« open source »), connaissait une réussite qui a éveillé l’intérêt pour les modèles économiques fondés sur le partage des connaissances et les consortiums de recherche publics/privés. Plusieurs petites entreprises de biotechnologie industrielles ont été créées pour tirer parti des résultats du mouvement Biobricks. Elles ont développé des microorganismes sur mesure capables de produire des produits chimiques intéressants sans avoir besoin d’enchaîner de multiples opérations de synthèse. Ces organismes étaient vendus à de grandes entreprises chimiques, dont quelques-unes seulement avaient la capacité de développer des microorganismes en interne. La constitution de communautés de brevets et de consortiums de recherche regroupant des instituts publics de recherche et des petites entreprises de biotechnologie agricoles dans des pays en développement et dans des petites économies développées comme la Nouvelle-Zélande, l’Australie et la Corée a engendré de nouveaux modèles d’entreprise et attiré des investissements importants.

En 2014, le World Business Council on Sustainable Development (Conseil mondial des entreprises pour le développement durable) a organisé une conférence pour débattre d’un système d’incitation financière à la recherche médicale (Love et Hubbard, 2007). L’intérêt suscité par un tel système allait croissant depuis une réunion du World Business Council consacrée à ce sujet en 2001. Le succès de modèles économiques différents comme les communautés de brevets ou la Biobricks Foundation encourageait lui aussi à trouver de nouveaux types de systèmes d’incitation à la recherche. L’organisation de la conférence était également motivée par le rétrécissement inquiétant du marché de chaque médicament dû à l’essor de la pharmacogénétique. Cette conférence n’a abouti à aucun accord sur un système d’incitation financière. Cependant, elle a permis aux grands et petits laboratoires pharmaceutiques et fabricants de dispositifs médicaux, ainsi qu’aux prestataires publics et privés de services de santé, de débattre de mesures propres à stimuler l’innovation dans le domaine de la santé. L’OMS a décidé de parrainer une nouvelle réunion en 2017.

L’enthousiasme qu’avaient suscité les aliments fonctionnels transgéniques dans les pays développés est retombé, des études de marché indiquant que dans leur majorité, les consommateurs n’étaient pas disposés à payer plus cher des aliments de base enrichis en nutriments. En revanche, les marchés plus étroits des nutraceutiques spécialisés connaissaient un franc succès, en partie à cause de l’intérêt du public pour les régimes alimentaires qui prévenaient les cancers et d’autres maladies chroniques. Par exemple, la production d’acides gras oméga 3 dans des algues génétiquement modifiées suscitait de plus en plus d’intérêt. Le principal débouché des aliments fonctionnels était l’Afrique, où les organismes de recherche agronomique faisaient appel aux biotechnologies pour mettre au point des variétés de manioc, de maïs et de sorgho affichant une teneur plus élevée en minéraux et vitamines essentiels.

Scénarios fictifs

En 2014, compte tenu des prix élevés des aliments du bétail, tous les États membres de l'Union européenne ont adopté une proposition de la Commission visant à autoriser les agriculteurs à cultiver des variétés obtenues au moyen de l'intragenèse³, mais plusieurs grands pays ont maintenu leur opposition aux OGM. L'autorisation de l'intragenèse a amélioré les conditions d'activité des semenciers, qui étaient désormais en mesure d'exploiter les techniques de modification génétique pour transférer des gènes des formes sauvages d'une espèce dans des variétés élitaires cultivées. La même année, un accord international sur les règles de sécurité applicables aux cultures transgéniques a réduit à son tour les coûts imputables à la réglementation, ce qui a renforcé la capacité des PME à développer des constructions géniques pour les cultures qui n'avaient pas un gros débouché, comme les légumes.

Les systèmes de traçabilité conçus au tournant du siècle en réponse à la crise de l'encéphalopathie spongiforme bovine (ESB) au Royaume-Uni ont conduit à développer des techniques modernes de suivi pour les produits agricoles. Des puces et les lecteurs idoines fournissaient des informations sur la santé et les déplacements de tous les animaux depuis leur naissance jusqu'à leur mort. Ces applications étaient généralisées dans les pays développés et de plus en plus employées dans les pays en développement, de manière à maintenir l'accès aux marchés ou à l'obtenir. Dans certains cas, le renforcement des mesures de sécurité et de traçabilité a été facilité par des accords conclus dans le cadre de l'Organisation mondiale du commerce (par exemple, des accords imposant aux pays d'exportation de conserver des dossiers complets sur les animaux destinés à l'exportation).

Dans le domaine de la sécurité des aliments, les progrès des biotechnologies, comme les puces de diagnostic qui changent de couleur en présence d'une contamination bactérienne, permettent aux accords de l'OMC sur les mesures sanitaires et phytosanitaires et sur les obstacles techniques au commerce de continuer à fonctionner efficacement. Ces technologies ont été adoptées par des pays en développement, comme la Chine et l'Indonésie, qui avaient connu plusieurs épisodes de contaminations alimentaires graves. L'efficacité des technologies de sécurité des aliments, l'amélioration des technologies de localisation et de traçabilité et le renforcement de l'hygiène dans les usines de transformation des aliments se sont traduits par une réduction considérable du nombre de contaminations alimentaires.

Les années malthusiennes

Deux années consécutives de sécheresse extrême et de canicule dans les grandes régions céréalières du monde, en 2016 et 2017, conjuguées à des événements météorologiques extrêmes dans beaucoup d'autres régions, ont entraîné un effondrement sans précédent de la production mondiale de maïs, de riz, de sorgho, de soja et de blé destinés à la consommation humaine ou animale. Les prix alimentaires ont explosé, atteignant des sommets difficiles à supporter, même dans les pays développés. Deux facteurs ont aggravé la situation : le faible niveau des réserves de céréales depuis plus d'une décennie et les ravages causés aux récoltes de blé en Europe et en Ukraine par une forme de rouille due à une nouvelle souche de champignon apparue dans la région du Punjab pakistanais et indien.

Scénarios fictifs

Les « années malthusiennes », comme les journalistes les ont rapidement appelées, ont stimulé les investissements dans les biotechnologies agricoles et dans la fermentation cellulosique pour la production de biocarburants. Dans les pays développés, la consommation quotidienne moyenne de calories a diminué de 5 %, ce qui a entraîné une baisse du pourcentage d'obèses et du nombre de nouveaux cas de diabète de type 2. Dans les pays pauvres, la famine généralisée n'a été évitée que grâce aux actions entreprises par les Nations Unies pour parvenir à un accord mondial de limitation de l'utilisation des céréales et des oléagineux pour la production de viande et de biocarburants.

Par ailleurs, les années malthusiennes ont mis fin au moratoire européen sur les OGM. L'opposition faiblissait depuis plusieurs années déjà face à la prise de conscience progressive des avantages environnementaux des OGM, qui réduisaient les besoins de pesticides et toléraient mieux les stress. Les chercheurs ont estimé que les années malthusiennes auraient été bien pires sans l'adoption généralisée des variétés transgéniques de maïs et de soja tolérant la sécheresse et la chaleur, qui avaient été mises sur le marché en 2015 sur tout le continent américain, en Inde et en Chine.

Les innombrables données qui étayaient la théorie du changement climatique n'étaient pas parvenues à convaincre les pays développés et les pays en développement de prendre le phénomène au sérieux, et les accords antérieurs n'étaient pas assortis des mécanismes nécessaires pour garantir leur application. Dans presque tous les grands pays émetteurs, la production de GES a continué à augmenter année après année. Les années malthusiennes ont favorisé l'adoption à l'échelle mondiale, en 2019, d'un accord contraignant en vertu duquel les pays signataires s'engageaient à augmenter fortement les taxes sur le carbone pour les porter progressivement à 500 USD par tonne dans un délai de dix ans. Les économistes de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) et de l'OCDE avaient estimé qu'en dessous de ce niveau, le prix du carbone n'encouragerait jamais les changements sociaux profonds et les investissements privés indispensables pour faire face au changement climatique.

Les taxes sur le carbone ont eu pour effet immédiat de faire bondir les investissements dans les économies d'énergie. Même si la consommation ostentatoire d'énergie était devenue socialement inacceptable, le gaspillage était loin d'avoir disparu. L'augmentation des taxes sur le carbone ont aussi dopé les investissements dans les technologies énergétiques à bas carbone.

Plusieurs grandes entreprises agricoles et industrielles américaines et brésiliennes ont investi dans des entreprises conjointes pour développer des cultures pérennes à croissance rapide nécessaires à la fermentation cellulosique. Le procédé restait plus onéreux que l'utilisation des plantes amylacées comme le maïs, mais une technologie nouvelle a été mise au point pour déshydrater à bon marché la biomasse, ce qui a considérablement réduit les coûts de transport.

Au Brésil, une autre percée technologique a permis de produire à grande échelle et à des coûts compétitifs des biocarburants liquides à forte densité énergétique à partir de la canne à sucre. Ces biocarburants présentaient plusieurs avantages importants par rapport au bioéthanol. Leur densité énergétique par litre était très proche de celle de l'essence, alors qu'elle était de 69 % pour l'éthanol ; ils pouvaient être utilisés dans des moteurs ordinaires et n'étaient pas

Scénarios fictifs

hydrophiles. Ils pouvaient donc être exportés à bon marché depuis le Brésil dans des navires citernes et transportés dans les oléoducs existants.

Plusieurs services de santé publics couvrant des populations de l'ordre de 4 à 5 millions d'habitants avaient développé de vastes systèmes d'archives médicales électroniques. Les dossiers médicaux contenaient les données sur les traitements thérapeutiques administrés tout au long de la vie, les caractéristiques génétiques et les facteurs environnementaux et comportementaux (exercice, régime alimentaire, logement, etc.), lesquels étaient mis en relation avec l'état de santé sur le long terme. La complexité des systèmes informatiques nécessaires pour gérer toute la panoplie des soins de santé a favorisé les prestataires de petite à moyenne taille. L'un des pionniers en la matière aux États-Unis a été l'entreprise privée Kaiser Permanente, forte de 9 millions de patients. Les recherches effectuées par ces prestataires de soins ont apporté d'abondantes informations sur les effets indésirables des médicaments, sur l'efficacité de diverses thérapies et sur les interactions, positives ou négatives, entre thérapies différentes. Les premiers résultats ont enrichi les connaissances médicales sur les interventions les plus efficaces pour tout un éventail de maladies chroniques. Tous ces éléments ont contribué à renforcer les avantages d'un système médical fondé sur la « science objective », par opposition aux systèmes fondés sur « l'art de la médecine », qui laissent souvent la responsabilité du choix du traitement à chaque médecin. Dans les juridictions concernées, la fourniture de soins de santé était de plus en plus souvent liée à l'élaboration de protocoles de traitement obligatoires. Néanmoins, l'introduction de la médecine fondée sur des données objectives n'a pas toujours été couronnée de succès. Les médecins acceptaient difficilement de ne plus pouvoir décider librement de la solution « la plus adaptée à l'individu ». Quant aux patients, ils considéraient que certaines directives visaient à leur imposer l'option la moins chère et non pas « la meilleure ».

La rentabilité du secteur pharmaceutique diminuait peu à peu, à cause de la pharmacogénétique et des méthodes de traitement fondées sur des données objectives qui avaient sensiblement réduit le marché de nombreux médicaments. Sous l'effet de la hausse des revenus en Chine et en Inde, les marchés pharmaceutiques connaissaient une croissance à deux chiffres qui compensait en partie la perte de vitesse de ces mêmes marchés dans les pays développés (Pharma Futures, 2007). Dès 2010, la Chine était devenue le septième marché des produits pharmaceutiques dans le monde. Avant les années malthusiennes, la Chine et l'Inde étaient les deux pays du monde qui comptaient le plus grand nombre de patients atteints de diabète et d'obésité. Cependant, dans ces deux pays, la classe moyenne aisée n'était pas assez nombreuse pour compenser la contraction des marchés des différents médicaments dans les pays développés. En 2018, les revenus moyens s'établissaient à peu près à 1 800 USD en Inde et à 3 500 USD en Chine⁴. Les solutions peu onéreuses en matière de santé publique y étaient donc privilégiées à l'échelle nationale.

Les coûts de fabrication élevés des produits biopharmaceutiques obligeaient les laboratoires à faire payer très cher les médicaments de cette catégorie. La biologie synthétique a permis de réduire quelque peu les coûts de production, mais elle nécessitait encore des bioréacteurs onéreux. Après 2014, les coûts de production de la plupart des produits biopharmaceutiques ont chuté de 60 % à 90 %, grâce à une production à grande échelle par des plantes transgéniques cultivées sous serre. Ces dernières étaient protégées par des systèmes de sécurité

ultramodernes pour empêcher les contrefaçons de médicaments à partir de semences OGM volées.

En Chine et en Inde, les pouvoirs publics avaient créé des agences de réglementation inspirées de la FDA. En effet, ils étaient très désireux d'aider leurs laboratoires pharmaceutiques à être compétitifs sur le marché international et à être capables de vendre leurs produits sur les deux grands marchés qu'étaient les États-Unis et l'Union européenne. En Chine, un « triangle » biotechnologique disposant d'atouts dans les applications agricoles, pharmaceutiques et industrielles s'était constitué dans trois provinces côtières (Zhejiang, Shanghai et Jiangsu) ; il s'appuyait sur des universités, des stations agricoles, des usines de transformation et des hôpitaux à Shanghai, Nanjing et Hangzhou. Dans ces trois provinces, le PIB moyen par habitant s'élevait à plus de 12 500 USD en 2015⁵. Le triangle biotechnologique chinois réussissait à attirer des scientifiques éminents, chinois ou non, qui travaillaient dans les pays de l'OCDE, grâce à plusieurs atouts : niveau de vie relativement élevé, proximité de l'aéroport international de Shanghai, infrastructures développées, bons établissements scolaires, salaires compétitifs à l'échelle internationale dans le secteur des biotechnologies et zones de loisirs attractives dans les environs. L'un des avantages du triangle biotechnologique était l'expertise dans les plates-formes technologiques utiles à chacun des trois principaux domaines d'application.

Le passage aux RFDM (rétributions financières pour les découvertes médicales)

En 2018, une entreprise biopharmaceutique de taille moyenne a obtenu aux États-Unis et dans l'Union européenne l'autorisation de mettre sur le marché l'Amespira, produit biopharmaceutique destiné à traiter la forme la plus courante du cancer du poumon. Première percée importante dans le traitement de ce type de cancer, ce médicament augmentait de neuf mois la survie médiane des malades par rapport aux meilleurs traitements existants.

Cependant, le fabricant de l'Amespira a fixé son prix à 200 000 USD par an, ce qui en faisait le médicament le plus cher de l'histoire, abstraction faite de quelques médicaments contre des maladies très rares. Beaucoup d'assureurs, publics comme privés, ont refusé de le rembourser. Aux États-Unis, la facture annuelle de l'Amespira prescrit pour traiter tous les cas nouveaux de cancers du poumon a été estimée à 10 % de la totalité des dépenses au titre des médicaments délivrés sur ordonnance. Plusieurs pays d'Amérique latine et d'Asie ont invoqué les dispositions de l'ADPIC relatives aux situations d'urgence et aux licences obligatoires pour fabriquer des versions biosimilaires de l'Amespira destinées au marché intérieur.

Cette affaire a fait grand bruit dans les pays développés. L'Amespira n'était pris en charge que par quelques programmes d'assurance-maladie privés s'adressant à des employés du secteur tertiaire, chez lesquels le tabagisme était rare et les cas de cancer du poumon peu nombreux. Les autres patients devaient soit puiser dans leurs économies personnelles, soit se passer du médicament. L'inégalité flagrante dans l'accès au traitement d'une maladie familière battait en brèche l'attachement de tout un chacun à l'équité. Le problème était particulièrement prononcé au Japon, où les pouvoirs publics avaient pour politique de ne pas rembourser les technologies innovantes « avancées ». Le fabricant de l'Amespira a lancé sans succès une

Scénarios fictifs

campagne de communication qui laissait entendre que les particuliers devaient se soigner à leurs frais au motif que personne n'était censé ignorer que fumer provoquait le cancer du poumon. Il a même proposé de fournir son médicament avec un rabais de 75 % aux patients qui n'avaient jamais fumé de leur vie.

Du point de vue politique, la controverse sur l'Amespira a apporté de l'eau au moulin des partisans des incitations financières proposées pour remplacer les brevets sur les innovations médicales. Plusieurs autres facteurs ont rendu le secteur pharmaceutique plus réceptif à cette idée qu'il ne l'était en 2014. Le premier était le rétrécissement du marché des médicaments et la quasi-disparition du modèle économique des médicaments vedettes. Il a eu pour effet, entre autres, de faire diminuer progressivement les apports de fonds destinés à financer le cycle suivant d'innovation. Le deuxième tenait aux difficultés que les petites entreprises de biotechnologie rencontraient pour lever du capital-risque. Troisièmement, les grands groupes pharmaceutiques se procuraient de plus en plus de nouvelles molécules auprès des petites entreprises et ils réalisaient un pourcentage croissant de leur chiffre d'affaires avec les génériques. Ils disposaient donc de l'expertise nécessaire pour gérer des contrats de redevances complexes, et leurs profits étaient moins tributaires des médicaments brevetés. Le quatrième facteur avait trait à des problèmes de production. L'utilisation croissante des plantes pour produire des molécules pharmaceutiques complexes avait donné lieu à plusieurs affaires de contrefaçons très médiatisées qui avaient pour point de départ des vols de semences, contrefaçons qui avaient amputé les revenus de quelques grands groupes pharmaceutiques.

Le cinquième facteur intéressait particulièrement une grande partie des responsables politiques aux États-Unis. Un système d'incitations financières financé par des contributions assises sur le PIB national était de nature à mettre fin au problème du « bénéficiaire indu » (« free riding ») dans le domaine du développement de médicaments. Depuis des années, les Américains se plaignaient du prix des médicaments, plus élevé aux États-Unis que dans les autres pays développés, car cela signifiait à leurs yeux qu'ils subventionnaient l'innovation médicale pour le reste du monde. Toutes les propositions soumises pour le système d'incitation financière faisaient appel à un petit prélèvement sur le PIB national, calculé de manière à constituer un fonds deux fois supérieur aux dépenses mondiales annuelles au titre de la R-D sur les produits pharmaceutiques et les dispositifs médicaux, soit approximativement 160 milliards USD. Les rétributions élevées que ce fonds était susceptible de distribuer étaient suffisamment incitatives pour encourager les investissements à long terme risqués. Même si les contributions étaient liées aux indicateurs du développement mondial de l'ONU, afin que la participation des pays riches soit supérieure à celle des pays pauvres, la contribution des États-Unis représentait 0,25 % de leur PIB, soit un tiers de moins que les dépenses de leur secteur privé au titre de la R-D médicale. De plus, les entreprises américaines allaient pouvoir rivaliser sur un pied d'égalité avec toutes les autres entreprises du monde pour des ressources annuelles quatre fois plus élevées que le niveau de leur R-D à l'époque.

Encouragée par beaucoup d'ONG œuvrant dans le domaine de la santé, l'OMS s'est chargée de parvenir à un accord international sur le contenu du Traité de rétribution financière pour les découvertes médicales (RFDM). Bon nombre des principes fondamentaux avaient été définis dans les années 2000⁶ et lors des deux conférences internationales tenues en 2014

et 2017. L'accord définitif a été obtenu en 2019, c'est-à-dire assez rapidement, car le contexte international des négociations sur la santé s'était nettement amélioré à la suite de la pandémie de grippe cambodgienne de 2014. Rapidement, les entreprises ont baptisé « RFDM » une unité monétaire d'une valeur de 1 million USD.

Le traité RFDM a résolu le problème des importations parallèles, celui de l'impossibilité de l'accès aux innovations médicales à cause de leur coût élevé et celui des bénéficiaires indus. Il était toujours possible de faire breveter une nouvelle molécule, mais une fois que la commercialisation d'une innovation médicale était autorisée sur un marché important, le brevet expirait et l'innovation pouvait être produite par des fabricants de génériques. La production de produits biopharmaceutiques dans des plantes rendait l'opération particulièrement facile et abaissait notablement le coût des médicaments. Les brevets étaient surtout utilisés pour répartir les paiements entre les différentes entreprises qui avaient contribué à l'innovation. La rétribution versée sur dix ans, en vertu du traité, se composait d'un élément fixe auquel s'ajoutait un élément variable en fonction de l'amélioration de l'indicateur AVAQ (années de vie ajustées par la qualité). Il était essentiel qu'un montant minimum soit garanti afin de stimuler la recherche sur les maladies rares. Par ailleurs, un certain pourcentage du montant total distribué chaque année était réservé aux améliorations qu'il était difficile de mesurer en AVAQ, comme celles qui étaient apportées aux systèmes de vectorisation de médicaments, aux systèmes de surveillance et aux thérapies applicables contre les pandémies possibles et le bioterrorisme.

S'appuyant sur les négociations internationales de 2014, le traité RFDM a aussi affecté 3 % du montant total du fonds aux nouveaux antibiotiques. L'amélioration de la santé publique dans le monde en développement, l'hygiène en milieu hospitalier, et la limitation de la prescription des antibiotiques dans les pays développés avaient atténué la menace que représentaient, de plus en plus, les bactéries antibiorésistantes, mais les spécialistes de la santé publique étaient convaincus que tôt ou tard, l'antibiorésistance conduirait à une pandémie mondiale grave et impossible à traiter.

Le principal problème du système des RFDM, familier à beaucoup de petites entreprises de biotechnologie, était le financement de la recherche en l'absence d'un flux de recettes. Pour la plupart, les grands groupes ont adhéré au dispositif, à la fois en tant qu'apporteurs de fonds et que coordinateurs. Dans la mesure où les paiements étaient répartis en fonction des contributions, il était extrêmement tentant de collaborer au lieu de se lancer dans des courses onéreuses et redondantes pour être le premier à mettre une innovation sur le marché.

Le système des RFDM a entraîné plusieurs grands changements dans l'innovation médicale. Comme il était ouvert à tous les pays qui participaient au traité (c'est-à-dire presque tous les membres de l'ONU), il encourageait le développement de la recherche médicale en dehors des principaux centres de l'innovation pharmaceutique des États-Unis, d'Europe, du Japon, de Chine et d'Inde. Ensuite, beaucoup de rétributions ont été versées, dans les cinq premières années, à de petits fabricants de dispositifs médicaux, et en particulier à des entreprises qui s'intéressaient aux cellules souches et au génie tissulaire. Le système antérieur des brevets avait déçu bon nombre de ces entreprises. La méthode prédominante consistait à utiliser des cellules souches empruntées au patient. Ces cellules étaient traitées et mises en culture, et le tissu qui en résultait était implanté chirurgicalement chez le patient. Ce procédé exigeait beaucoup de

Scénarios fictifs

main-d'œuvre, mais surtout, il était facile de l'appliquer secrètement et donc d'éviter de payer des redevances sur les brevets. Les patients des pays développés se faisaient admettre dans des cliniques du Brésil ou d'Inde pour y subir des traitements bon marché car non soumis aux redevances, et ils en ressortaient munis de nouvelles dents, de nouveaux cartilages ou encore de nouvelles cellules constitutives des îlots de Langerhans, dans le pancréas, pour soigner leur diabète. L'incitation créée par les RFDM a vivement stimulé la recherche sur les cellules souches et le génie tissulaire.

Contrairement au système des brevets, le système des RFDM incitait également à chercher des remèdes aux maladies chroniques.

2025 à 2030 : consolidation de la bioéconomie

Jusqu'en 2030, le changement climatique, la pollution et la pression exercée par la population sur les ressources en eau et en terres ont provoqué une détérioration de la qualité de l'eau dans beaucoup de pays en développement. Il en a résulté une hausse de l'incidence de certaines maladies infectieuses et une plus grande dislocation des populations, à l'origine d'une augmentation des cas de tuberculose. Le réchauffement mondial a accru l'aire géographique potentielle du paludisme, de la dengue et d'autres maladies (Tong et Soskolne, 2007). Des mesures de salubrité publique, comme l'inspection rigoureuse des cargaisons pour détecter les insectes vecteurs, ont empêché que ces maladies ne se répandent dans les pays développés. Leur coût est resté minime grâce à la mise au point de sondes ADN automatisées et non invasives permettant de détecter les pathogènes et les vecteurs aussi bien chez les personnes que dans les marchandises. Le recul des épidémies de nouvelles formes de grippe, qui a résulté de l'automatisation de l'élevage en Asie du Sud-Est, a eu des effets très bénéfiques sur la santé.

Les avancées de la biologie moléculaire, telles que les technologies fondées sur les protéines d'enveloppe virale, ont assuré une protection contre les virus présents chez le blé, le riz et la pomme de terre. Comme le profil ADN d'un fort pourcentage des grandes cultures et cultures mineures était connu, certaines cultures mineures ont bénéficié elles aussi des technologies de lutte contre les virus. En outre, la possibilité de transférer des gènes multiples au moyen de chromosomes artificiels (Houben *et al.*, 2008) a permis de conférer aux végétaux une résistance aux stress agronomiques tels que la chaleur, la sécheresse et la salinité, ainsi qu'aux infections provoquées par les nématodes, les insectes et les champignons, dont la fréquence s'était accrue dans les principales cultures vivrières à l'échelle mondiale (soja, maïs, riz, blé et pomme de terre). Dans la mesure où ces résistances empêchaient les plantes de produire des graines, des haricots ou des tubercules plus gros, les rendements s'amélioraient lorsque les gènes de résistance étaient « désactivés ». Les agriculteurs utilisaient donc des biocapteurs et des diagnostics pour détecter une éventuelle aggravation des stress agronomiques ou un ennemi des cultures. Confrontés à une menace, ils pouvaient pulvériser des produits chimiques pour activer la résistance voulue. Ces avancées de la biologie moléculaire et de la génétique ont permis au secteur agricole d'accroître les rendements malgré la multiplicité des stress.

La hausse des revenus en Chine, en Inde et en Asie du Sud-Est s'est traduite par une forte augmentation de la demande de protéines animales, notamment de poisson, de viande et de

produits laitiers. A cela s'est ajoutée la diminution de la plupart des stocks naturels de poissons sauvages dans le monde. Il fallait donc trouver de nouvelles sources de protéines animales pour remplacer la partie de la demande que la pêche ne pouvait plus satisfaire. La disparition de ressources halieutiques bon marché, notamment l'effondrement du stock de colin d'Alaska, en 2014, a aussi provoqué une baisse de la production aquacole d'espèces carnivores, comme le saumon, le thon, le cabillaud, la truite et la crevette, qui avait besoin de protéines de poisson. Plusieurs entreprises avaient investi dans la recherche biotechnologique pour faire produire ces protéines à des algues génétiquement modifiées, mais il a fallu attendre 2019 pour que ces produits soient disponibles en quantités suffisantes et à un prix assez bas pour pouvoir relancer l'élevage à grande échelle de poissons carnivores.

Annoncée dès les années 50, la diminution des stocks halieutiques était due aux échecs répétés de la communauté internationale à conclure un accord contraignant pour lutter contre la surpêche. Dans l'espoir de faire revivre certaines pêcheries, on a procédé à un relevé rigoureux de l'empreinte génétique et au suivi des populations sauvages de thon, de cabillaud, de merlan, de hareng, de saumon, de sardine, de colin, d'églefin et d'autres espèces encore.

Les craintes qu'avait suscitées dans les années malthusiennes l'approvisionnement en aliments pour l'homme et le bétail et en biomasse pour la production d'énergie et de produits industriels avaient diminué, en partie grâce à de nouvelles biotechnologies agricoles qui permettaient de pratiquer des cultures vivrières à haut rendement et des cultures énergétiques spécialisées comme celle de graminées ou de variétés d'eucalyptus génétiquement modifiées. L'autre raison était l'augmentation substantielle des surfaces agricoles en Amérique du Sud et en Afrique. Malgré ses efforts, la communauté internationale n'était pas parvenue à fixer des normes de cycle de vie rigoureuses applicables à la production de carbone et à l'origine des produits agricoles et des biocarburants. La forte demande de céréales pour l'élevage et de matières premières pour la production de biocarburants a donc accéléré la conversion de vastes étendues de savane et de forêts humides en surfaces cultivables dans les régions tropicales. Malheureusement, ce processus a libéré d'énormes quantités de carbone, au détriment des efforts déployés pour lutter contre le réchauffement climatique.

La prospérité mondiale était tributaire du renforcement des règles commerciales, dans le cadre de l'OMC. Ni l'une ni l'autre des deux grandes puissances asiatiques, à savoir la Chine et l'Inde, n'était capable de produire assez d'aliments pour nourrir sa population et élever son bétail. Toutes deux importaient beaucoup de produits alimentaires, d'aliments du bétail et de biocarburants d'Amérique du Sud, d'Afrique et d'Amérique du Nord, et exportaient des produits manufacturés à forte valeur ajoutée. Afin d'apaiser les tensions politiques, la FAO a été chargée de veiller au maintien de stocks alimentaires mondiaux importants. De l'avis général, en l'absence de stocks suffisants et de règles garantissant le libre échange de produits agricoles de base, une réédition de la catastrophe des années malthusiennes risquait de mener à la guerre.

Des biocarburants à forte densité énergétique étaient produits à partir de certaines espèces de canne à sucre ou à partir de la fermentation cellulosique de variétés transgéniques à faible teneur en lignine de graminées et d'arbres à croissance rapide. Dans les zones tempérées, ils

Scénarios fictifs

étaient principalement produits à partir de graminées génétiquement modifiées cultivées sur les terres marginales en Russie, en Mongolie et dans les plaines septentrionales des États-Unis et du Canada. Ils étaient aussi produits à partir de bois dans quelques pays tempérés, comme la Nouvelle-Zélande, dans de vastes plantations cultivant des essences renouvelables à un faible coût. Pour le reste, les données économiques favorisaient nettement les régions tropicales et subtropicales caractérisées par des précipitations abondantes, où la production de biocarburants, dans les plantations d'eucalyptus tropical, était dix fois plus élevée par hectare qu'à partir des essences cultivées dans les zones tempérées, par exemple en Europe.

Les bioraffineries modernes, concentrées dans les régions chaudes et très pluvieuses d'Amérique du Sud, d'Afrique, d'Asie du Sud-Est et du Sud des États-Unis, produisaient peu de déchets et pouvaient passer facilement d'une production à une autre en fonction des prix du marché. Outre les biocarburants, beaucoup d'entre elles pouvaient produire des substances oléochimiques et des biolubrifiants à valeur élevée pour les secteurs chimique et manufacturier, ainsi que des bioplastiques utiles aux constructeurs automobiles et aux industries manufacturières. Plusieurs produits chimiques complexes à valeur élevée étaient produits par des microorganismes issus de la biologie synthétique.

Quatre conglomérats agro-industriels américano-brésiliens réalisaient 70 % de la production mondiale de biocarburants et de produits chimiques issus de la biomasse. Pour assurer leur approvisionnement en matières premières et réduire leurs coûts, ces entreprises exploitaient de vastes plantations de canne à sucre et d'arbres génétiquement modifiés. L'énergie produite à partir de la biomasse satisfaisait 6 % de la demande mondiale et était presque entièrement destinée au secteur des transports. Les principales sources d'énergie à bas carbone utilisées pour la production d'électricité étaient le nucléaire, le solaire, la géothermie, l'énergie marémotrice et l'énergie éolienne.

Le Moyen-Orient était devenu un foyer de recherche spécialisé dans la production d'hydrogène comme combustible, dans les biocarburants algaux et dans la biologie synthétique. Le coût des biocarburants algaux avait baissé rapidement, grâce à une percée technique qui empêchait les bactéries d'infester les fermes d'algues unicellulaires.

Selon plusieurs entreprises de conseil spécialisées en énergie, l'hydrogène et les biocarburants algaux étaient susceptibles de devenir moins chers que les biocarburants produits à partir de canne à sucre ou de bois en 2032. Les quatre conglomérats américano-brésiliens investissaient donc massivement dans la recherche biotechnologique, en vue d'améliorer la compétitivité des carburants à forte densité énergétique tirés de la canne et des cultures celluloseuses.

La production de biocarburants n'était pas suffisante pour satisfaire la totalité des besoins du secteur des transports. En conséquence, les modes de propulsion variaient selon les possibilités dans une même région. Les systèmes de transports publics électriques dominaient dans les villes. Les véhicules privés légers, en biopolymères composites, pouvaient fonctionner à l'électricité sur les distances courtes ou avec différents biocarburants sur les distances plus longues. Compte tenu du niveau élevé des taxes sur le carbone, l'usage du pétrole était limité en 2030 à la fabrication de produits chimiques de base, au transport aérien et à la production d'électricité dans des centrales dotées d'installations de captage du carbone.

Scénarios fictifs

La nécessité d'économiser l'énergie et la restructuration progressive des grandes villes pour y accueillir des densités de population plus élevées ont favorisé l'exercice physique en développant l'usage des transports publics, l'utilisation du vélo et la marche. Grâce à une légère diminution de la consommation de nourriture, due à la hausse relative des prix alimentaires, et à l'exercice physique pratiqué dans la vie quotidienne, l'épidémie d'obésité qui constituait un grand problème de santé publique en 2010 a été freinée. De même, dans les pays développés, l'opposition de la population à la majoration des primes d'assurance-maladie pour les comportements personnels à risque a diminué au fil du temps. Qu'elles soient publiques ou privées, les assurances-maladie prévoyaient des réductions en fonction d'indicateurs de vie saine, comme le poids, la tension artérielle ou le régime alimentaire. Ces indicateurs étaient mesurés dans le cadre d'examen annuels complets pratiqués par le médecin de famille.

En 2030, des systèmes d'archives médicales électroniques avaient été mis en place progressivement dans la plupart des juridictions. Les dossiers médicaux étaient analysés pour définir les thérapies optimales et répertorier les facteurs génétiques de risque de nombreuses maladies chroniques. Les RFDM jouaient un rôle incitatif qui avait aidé à améliorer l'efficacité de la recherche en encourageant les collaborations. Compte tenu de l'extinction des brevets après la mise sur le marché des produits brevetés, tous les produits qui avaient bénéficié de RFMD étaient fabriqués sous la forme de génériques, ce qui réduisait le coût de la technologie médicale. Les populations de nombreux pays en développement pouvaient ainsi avoir accès aux innovations récentes portant sur les produits pharmaceutiques, les techniques de diagnostic et les dispositifs médicaux.

Il n'était plus possible d'opérer une distinction entre le secteur des biotechnologies de santé et le secteur pharmaceutique. Les connaissances en biotechnologies étaient employées dans le développement de toutes les molécules nouvelles et dans celui de nombreux dispositifs médicaux. Néanmoins, la recherche médicale avait en partie délaissé les produits pharmaceutiques pour s'intéresser davantage à la médecine régénérative, aux diagnostics et aux techniques chirurgicales. Plusieurs maladies débilitantes chroniques comme les problèmes cardiovasculaires, le diabète et l'arthrite étaient traitées par régénération des tissus à partir de cellules souches. La découverte de biomarqueurs pour certains cancers au stade précoce et les techniques d'imagerie bionanotechnologiques permettant de les détecter avant l'apparition de métastases (principale cause de la mortalité par cancer) avaient engendré de nouvelles possibilités de traitement par la microchirurgie et de systèmes de vectorisation de médicaments fondés sur les nanotechnologies.

Les biomarqueurs des cancers au stade précoce ont considérablement amélioré la survie, mais ils étaient onéreux parce que le dépistage devait être pratiqué à l'échelle de la population. Cela majorait sensiblement le coût du diagnostic, car il fallait soumettre au dépistage 100 individus de plus de 40 ans pour détecter un cancer au stade précoce. Une partie du coût du dépistage et de la médecine régénérative était compensée par une diminution de celui des soins chroniques. Le dépistage génétique de maladies héréditaires et de facteurs de risques graves chez l'embryon a lui aussi permis de faire quelques économies. Il s'est aussi traduit par une chute brutale du nombre de bébés nés avec des maladies de ce type (Campbell, 2008), dont beaucoup avaient nécessité des traitements médicaux longs et coûteux. Toutefois, les coûts

Scénarios fictifs

se sont mis à grimper parce que le public a commencé à utiliser le dépistage génétique pour détecter de petits « défauts » ou facteurs de risques de maladies chroniques. La définition des types de facteurs génétiques pouvant justifier l'avortement au stade de l'embryon a soulevé de vifs débats.

Les principales raisons pour lesquelles les coûts des soins de santé restaient élevés étaient l'augmentation du nombre de cas de maladies neurodégénératives, due au vieillissement de la population en Europe, en Chine et au Japon, et les coûts de la recherche sur la médecine prédictive et préventive et de ses applications. Les maladies neurodégénératives étaient considérées comme le nouveau cancer, très redouté et sans traitement efficace en vue, malgré les milliards de dollars dépensés en R-D publique et privée.

Outre la caractérisation de biomarqueurs pour les cancers au stade précoce, la médecine prédictive et préventive connaissait des réussites notables. Les médecins étaient à même de déceler un risque d'arthrite rhumatoïde et de plusieurs autres maladies auto-immunes, et d'en retarder le développement de dix ans en moyenne d'après les estimations. Pour d'autres maladies, des tests de facteurs génétiques de risque et des diagnostics fondés sur des biomarqueurs permettaient d'en prédire l'apparition plusieurs années avant la manifestation des symptômes, mais il n'existait pas de thérapies efficaces pour les empêcher de se développer.

Une expérimentation conduite à l'échelle nationale au Danemark sur cinq ans, de 2024 à 2028, a permis de montrer que le concept de médecine prédictive et préventive posait de graves problèmes. Abstraction faite du dépistage du cancer et de l'arthrite rhumatoïde après 50 ans, il a été estimé que cette expérience avait fait presque autant de mal que de bien. Se sachant exposés au risque de contracter une maladie chronique grave plus tard dans leur existence, nombreux ont été ceux qui ont réagi par l'anxiété et la dépression. Étant donné la nature probabiliste des facteurs de risque, plus de personnes que nécessaire ont subi un dépistage ou un traitement préventif, d'où une hausse des coûts.

Rapidement, les parents danois ont refusé que leurs enfants soient soumis à des dépistages pour autre chose que des maladies graves curables susceptibles de se déclarer dans les deux ans. Les études ont montré que les gens aspiraient à une qualité de vie satisfaisante et à la tranquillité d'esprit. L'application exagérément enthousiaste de la médecine préventive semblait avoir sensiblement nui à l'une et à l'autre. Les personnes âgées craignaient en particulier de perdre leur autonomie, de sorte qu'apprendre qu'elles couraient un risque élevé de développer une maladie neurodégénérative débilite les plongeait souvent dans une grave dépression et les démotivait.

L'expérience danoise a déclenché une intense réflexion à l'échelle internationale. Dans la mesure où la plupart des gens ne voulaient pas savoir s'ils seraient un jour confrontés à de graves problèmes de santé, les spécialistes de l'éthique se demandaient si les limites de l'intervention médicale dans les soins de santé n'avaient pas été atteintes. Les scientifiques ont fait observer que, avec le temps, on trouverait des thérapies préventives performantes contre beaucoup des maladies contre lesquelles la prévention n'existait pas ou n'était qu'en partie efficace. Les chercheurs en santé publique ont répondu qu'une partie de l'efficacité de la médecine préventive contre les maladies cardiovasculaires et plusieurs cancers était due à des

Scénarios fictifs

modifications de l'alimentation et du sommeil, à l'exercice physique et à une vie sociale active – autant de facteurs que l'on connaissait depuis des décennies. En outre, un médecin pouvait aisément détecter les grands facteurs de risque de ce type sans avoir à utiliser des techniques médicales de pointe.

Les résultats de l'expérience danoise ont conduit de nombreux pays à revoir leur réglementation en matière de médecine prédictive et préventive. Les médecins n'ont plus été autorisés à pratiquer que les tests portant sur des maladies qui pouvaient être soignées ou nettement retardées. Les tests portant sur des maladies qui ne pouvaient pas être traitées ou dont le diagnostic précoce ne changeait rien ont été interdits dans la plupart des pays, excepté aux fins de recherche.

En 2010, on s'attendait à ce que la médecine prédictive et préventive automatise les soins de santé. Dans ce contexte, le médecin de famille aurait changé de rôle, cessant d'être celui qui pratiquait « l'art » de la médecine pour devenir un technicien chargé de définir des thérapies optimisées individuellement à partir de données objectives avec l'aide d'un logiciel capable d'analyser les résultats de tests génétiques et d'autres techniques de diagnostic, ainsi que des informations comportementales et environnementales. En 2030, tous ces systèmes étaient en place. Le risque que les médecins passent outre les protocoles obligatoires de traitement avait diminué, consécutivement à un contrôle plus strict des systèmes administrés de soins de santé et à une modification des programmes des écoles de médecine. Toutefois, les médecins n'avaient pas été totalement transformés en techniciens et jouaient un rôle important en encourageant les changements de mode de vie et en les accompagnant.

Beaucoup de gens vivaient plus longtemps et en meilleure santé grâce à l'amélioration des soins de santé et des modes de vie. Dans la plupart des pays de l'OCDE, l'âge de la retraite avait été repoussé peu à peu à mesure que la longévité augmentait : il était de 69 ans en moyenne en 2030, ce qui avait évité la crise des retraites redoutée. Comme on l'avait anticipé en 2010, les produits des technologies de l'information et les systèmes de prise en charge des patients ont permis aux personnes âgées de vivre chez elles de plus en plus longtemps. Cela a permis de faire quelques économies sur les soins de santé, étant donné le coût élevé des hospitalisations de longue durée. Certains aspects des soins à domicile, comme les systèmes automatisés de surveillance de la santé, ont été mal acceptés dans un premier temps par les patients, qui y voyaient une atteinte à leur indépendance (Dinesen *et al.*, 2008). Avec le temps, et moyennant un nouveau marketing qui les présentait comme les « compagnons de la santé » virtuels, ils ont fini par être largement acceptés.

La pollution de l'eau douce et des océans restait un problème grave. Le littoral chinois, l'Est de l'Inde et le golfe du Mexique faisaient partie des régions du monde où les eaux étaient les plus polluées. L'Inde et la Chine ont investi dans les techniques de biodépollution, dans l'amélioration des systèmes agricoles et dans les technologies permettant d'économiser l'eau afin d'accroître leur approvisionnement en eau douce et dépolluer les océans. Des plantes marines génétiquement modifiées ont servi à revitaliser des espaces marins qui étaient devenus des « zones mortes » à cause de la pollution industrielle et des ruissellements agricoles. Les plantes marines étaient récoltées mécaniquement, puis expédiées dans les bioraffineries de produits chimiques qui les utilisaient comme biomasse.

Scénarios fictifs

Scénario 2 – Développement irrégulier

2009 à 2014 : progrès mitigés

Les systèmes réglementaires ont fait peser des contraintes sur les systèmes d'innovation et engendré des coûts substantiels, en particulier dans les secteurs de la santé et de la production primaire. Dans ces secteurs, les coûts liés au respect de la réglementation ont limité la capacité des petites entreprises à investir dans l'innovation. Ces entreprises avaient besoin de se procurer des brevets utiles et de recevoir une aide financière de capital-risqueurs ou de grands groupes. L'accélération du processus de concentration, qui s'est traduite par une diminution du nombre de grands groupes, n'a pas facilité les choses, en particulier pour les applications agricoles qui souhaitaient faire appel aux nouvelles technologies. Elle a constitué un véritable obstacle lorsque l'apparition de nouvelles technologies menaçait une technologie détenue par un grand groupe.

La lenteur des progrès des biotechnologies agricoles dans le développement des procédés de fermentation cellulosique qui menaçaient les investissements dans les biocarburants à base d'amidon a été une conséquence de ce phénomène. Aux Etats-Unis, la production de bioéthanol à partir de maïs a doublé entre 2009 et 2012, alors que la production européenne de biocarburants a absorbé 15 % de la production végétale de l'Union européenne en 2013.

Les biotechnologies agricoles appliquées aux cultures vivrières et fourragères, qui se trouvaient dans les mains de cinq puissantes multinationales, ont néanmoins engrangé des succès. La production alimentaire et fourragère a crû en Amérique du Sud, en Inde et en Chine, portée par l'arrivée de nouvelles variétés de maïs, de blé, de riz et de soja. Toutefois, les pays européens ont continué à s'opposer aux OGM, ce qui a provoqué de graves conflits avec les éleveurs européens confrontés à une hausse continue des prix des aliments du bétail. Cette hausse de prix était due, en partie, au pourcentage élevé de la production fourragère européenne affectée à la production imposée de biocarburants et, en partie, au blocage en frontière de nombreux produits d'importation contenant des OGM non homologués à l'état de trace. La politique européenne en matière de biocarburants était très controversée, les ONG environnementales prétendant que cette politique favorisait la production mondiale de GES plutôt qu'elle ne la freinait, en particulier parce qu'elle encourageait la destruction de forêts tropicales humides pour libérer des espaces agricoles affectés à des cultures destinées, entre autres, à la production de biocarburants.

Les entreprises agro-industrielles d'Europe et d'Amérique du Nord ont répondu à la politique des biocarburants en investissant dans des infrastructures onéreuses de production de biocarburants à partir de cultures énergétiques. À travers leur activité de lobbying, elles ont réussi à convaincre les gouvernements de maintenir une politique favorable à ces biocarburants. En raison de la lenteur des progrès de la recherche sur la fermentation cellulosique, conjuguée à la faiblesse du soutien des prix des combustibles et carburants celluloseux en Europe et aux États-Unis, il était peu probable que les bioraffineries celluloseuses deviennent rentables dans un avenir prévisible. Les investisseurs « verts », qui avaient misé sur les biocarburants celluloseux, se sont donc tournés vers d'autres sources d'énergie, en particulier le solaire, la géothermie et l'exploration pétrolière.

Scénarios fictifs

Au début de 2014, le Parlement européen a mis un terme à toutes les mesures en faveur des biocarburants sous la pression des ONG, même s'il a été prétendu que cette décision avait été prise à cause du manque d'adhésion du public aux initiatives en faveur de la réduction des GES après cinq années de températures inférieures à la moyenne. Quelques mois plus tard, le Parlement européen a approuvé un programme de construction d'une série de centrales nucléaires visant à fournir 80 % des besoins d'électricité de l'Union européenne à partir de cette énergie. Cette annonce a provoqué la chute brutale des cours du pétrole brut et du gaz naturel en prévision d'une forte baisse des importations russes. En revanche, les prix des produits agricoles n'ont guère diminué après l'annonce de l'arrêt de la politique européenne en faveur des biocarburants en raison de l'augmentation de la demande mondiale de denrées alimentaires et d'aliments du bétail. L'utilisation des amidons agricoles comme matière première dans l'industrie européenne des polymères et des produits chimiques a donc été abandonnée au profit du pétrole.

Un développement majeur est intervenu dans le secteur des biotechnologies médicales au début de 2015, lorsque deux des principaux groupes pharmaceutiques mondiaux et une grande entreprise spécialisée dans les TIC (technologies de l'information et de la communication) ont créé une entreprise conjointe (« TripleC ») avec le premier prestataire privé de soins médicaux des États-Unis, Consolidated Community Carers (CCC), qui comptait 100 millions de membres⁷. CCC, qui a vu une fantastique opportunité dans l'obligation, imposée par la FDA, d'assurer un suivi après commercialisation et d'utiliser les données pharmacogénétiques dans les essais cliniques, était à l'origine de cette initiative. Il a proposé aux deux groupes pharmaceutiques un accès total à son fichier des essais cliniques et le droit d'utiliser son vaste système d'archives médicales électroniques développé par l'entreprise de TIC. Les archives médicales fournissaient un suivi des patients sur toute la période où ils étaient affiliés au CCC et contenaient des informations sur les prescriptions médicales, l'évolution de l'état de santé, les facteurs de risques environnementaux et comportementaux tels que les régimes et l'exercice et, en nombre croissant, des informations génétiques et des biomarqueurs. En contrepartie, CCC demandait une réduction de 25 % sur le prix plancher appliqué aux États-Unis pour les médicaments produits par ces deux groupes. Un autre avantage, dans lequel CCC voyait son principal intérêt, était que ce prestataire de soins médicaux allait être en mesure d'occuper la première place pour la qualité des soins sur le territoire des États-Unis et, par conséquent, d'appliquer des primes d'assurance plus élevées que celles de ses concurrents. L'entreprise de TIC était elle aussi intéressée par le marché potentiel représenté par les produits de diagnostic automatisé et de soins à domicile.

Aux termes de l'accord conclu, CCC gardait le contrôle des types de produits pharmaceutiques, de thérapies régénératives et de diagnostics que les deux groupes pharmaceutiques souhaitaient tester sur ses membres. Cette clause visait à éviter que les groupes pharmaceutiques n'augmentent les coûts supportés par CCC en testant des médicaments n'apportant que des avantages mineurs par rapport aux thérapies déjà disponibles. En outre, comme CCC ne serait en mesure d'appliquer une prime que s'il pouvait revendiquer de meilleurs résultats sanitaires que ceux de ses concurrents, il était fortement incité à encourager ses deux partenaires pharmaceutiques à mener des recherches sur des thérapies innovantes.

Scénarios fictifs

2015 à 2022 : turbulences

Globalement, l'économie mondiale n'a enregistré qu'une croissance économique modérée après la fin de la crise financière en 2010, si l'on fait abstraction de la Chine et de l'Inde dont la croissance a été rapide. La demande d'énergie, de ressources minérales et de produits agricoles a retrouvé des taux de croissance supérieurs à la tendance de long terme. La communauté internationale n'est parvenue à aucun accord sur les GES. L'intérêt du public pour le changement climatique a faibli, parce que les températures ont très peu augmenté après 2007. En 2008, les climatologues ont prévenu que cette pause n'était qu'une anomalie passagère due à un cycle long de l'orbite terrestre et qu'elle s'achèverait vers 2020. Ensuite, les températures se remettraient à augmenter rapidement si la production de GES n'était pas réduite. Quelques capitales ont pris cet avertissement au sérieux, mais la plupart n'y ont pas cru. La production de biocarburants s'est poursuivie aux États-Unis grâce aux aides financières justifiées par des objectifs de sécurité énergétique, et la production de bioéthanol, même non subventionnée, est restée rentable au Brésil. Ailleurs, l'intérêt pour les biocarburants et les autres sources d'énergie à bas carbone a fléchi.

Le 11 septembre 2016, des terroristes ont attaqué trois raffineries de pétrole en Louisiane, au Mississippi et au Texas, paralysant temporairement la production d'essence aux États-Unis. Le même jour, une quatrième attaque a eu lieu à Londres : une substance toxique a été disséminée dans la ville et a provoqué de graves douleurs intestinales chez des milliers de personnes. La cause de ces douleurs intestinales a été découverte après quelques semaines. Il s'agissait d'une bactérie synthétique probablement produite dans un laboratoire situé dans l'Ouest des États-Unis. Ces événements ont provoqué un électrochoc aux États-Unis et en Europe, notamment parce qu'ils étaient inattendus après plusieurs années sans attaque terroriste d'envergure.

L'attaque à Londres a inquiété les gouvernements beaucoup plus que celles des raffineries de pétrole. La dissémination d'une toxine synthétique pathogène a permis d'imaginer les actes effroyables auxquels une utilisation malveillante de la biologie synthétique pourrait donner lieu, et elle a fait naître la crainte que la bactérie relativement inoffensive utilisée à Londres ne soit annonciatrice d'actes bien plus graves.

Ces événements ont conduit les gouvernements à réorienter immédiatement leurs priorités sur la sécurité intérieure. Tous les pays développés ont immédiatement durci les règles de sécurité applicables à la recherche sur les OGM et les formes de vie synthétiques. En raison des coûts élevés à engager pour se mettre en conformité avec les nouvelles règles de sécurité, la plupart des petites entreprises intervenant dans le secteur des biotechnologies agricoles et industrielles ont abandonné la recherche sur les OGM. Entre 2017 et 2025, les États-Unis ont investi massivement dans la recherche sur la biosûreté afin de détecter les pathogènes présents à l'état de trace dans les produits agricoles, l'eau et les marchandises importées. Les salaires élevés et les débouchés offerts par le secteur de la recherche sur la biosûreté ont amené beaucoup de chercheurs en biotechnologie employés dans des entreprises industrielles ou agricoles à opter pour ce secteur. Les mesures de biosûreté ont été également accrues dans les pays en développement, en particulier au Brésil, en Inde et en Chine, mais pas avec la même intensité. Dans ces trois pays, la recherche biotechnologique a été essentiellement menée par des laboratoires publics où il est facile de mettre en œuvre des mesures de sécurité améliorées.

Scénarios fictifs

Le commerce international, en particulier de produits agricoles, s'est contracté en raison des inquiétudes sur le risque de franchissement des frontières par des terroristes ou des substances pathogènes. Le risque de dépression économique profonde au Canada et au Mexique, tous deux largement tributaires des échanges avec les États-Unis, a conduit ces deux pays à s'entendre sur une zone de sécurité énergétique dans le cadre de l'ALENA. L'objectif – plus d'importations de pétrole d'ici 2025 – a été atteint grâce à un plan comprenant des mesures d'économies d'énergie, une augmentation de la production de pétrole à partir des sables bitumineux de l'Athabasca au Canada et la production de biocarburants.

Les biomatériaux renouvelables, tels que les huiles, les matières plastiques et les intrants industriels biodégradables, n'ont guère retenu l'attention dans la plupart des pays développés. Les gouvernements étaient trop accaparés par les préoccupations essentielles en matière de sécurité ; quant aux entreprises industrielles, elles ont rencontré de sérieuses difficultés pour recruter des chercheurs en biotechnologie et pour mener à bien leurs travaux de recherche sur les biomatériaux. Les produits et les pratiques environnementales durables ont continué à susciter un minimum d'intérêt.

La recherche sur la biosûreté a présenté plusieurs avantages exploitables sur le plan commercial. La mise au point de technologies de conservation et de purification de l'eau pour garantir la pureté de l'eau destinée aux ménages et favoriser le développement industriel a eu des effets positifs sur la production agricole dans plusieurs pays exposés à des sécheresses fréquentes comme l'Australie, les États-Unis et l'Espagne. Les programmes de lutte contre les ravageurs et parasites en agriculture, notamment pour protéger les animaux mais aussi les cultures, ont bénéficié des nouvelles techniques de biosûreté reposant sur les nanotechnologies, la biodétection ou le diagnostic moléculaire et génétique. La mise au point de capteurs capables d'identifier instantanément des centaines de variétés de microbes a représenté une avancée majeure. Les médecins et les hôpitaux les ont largement utilisés pour identifier des sous-types de bactéries résistant à certains antibiotiques et pour déterminer si des affections courantes étaient provoquées par des virus ou des bactéries. Ces capteurs sont devenus un outil de base pour répondre au problème croissant des bactéries antibiorésistantes.

En revanche, la modification génétique des plantes cultivées a marqué le pas aux États-Unis à cause de nouvelles normes sécuritaires sévères et de la pénurie de chercheurs en biotechnologie. La plupart des chercheurs universitaires en agronomie se sont spécialisés dans la biosûreté. Seuls quelques grands groupes ont continué à développer des cultures transgéniques en concentrant leurs travaux sur la résistance aux ravageurs. Les États-Unis et l'Europe ont interdit la production de médicaments et de produits chimiques industriels à base d'OGM, parce qu'ils craignaient que la technologie ne soit détournée illégalement par des terroristes pour produire des poisons.

Dans les pays développés sensibles aux questions de sécurité, les consommateurs ont privilégié les produits locaux dont l'emballage mentionnait la distance parcourue entre le lieu de production et de distribution. Les « kilomètres alimentaires » (« food miles ») indiquaient la distance parcourue par les produits depuis leur lieu de production jusqu'à l'assiette du consommateur. Bien que conçu à l'origine pour mesurer l'empreinte écologique des produits alimentaires, cette notion servait désormais à évaluer la sûreté des aliments parce qu'on considérait que chaque kilomètre supplémentaire parcouru augmentait le risque sécuritaire.

Scénarios fictifs

Les brevets sur les biotechnologies industrielles, agricoles ou sécuritaires sont devenus de plus en plus chers à obtenir, parce que les États-Unis et les pays européens mettaient en avant les normes de protection de l'accord ADPIC pour bloquer les brevets susceptibles de révéler des informations précieuses aux terroristes.

La Chine et l'Inde se sont prononcées en faveur de la protection des brevets, mais ces décisions ont été difficiles à respecter dans la pratique. Le manque de protection efficace des brevets a contribué lui aussi à freiner les options biotechnologiques en agriculture et dans l'industrie.

Le secteur de la santé a échappé en grande partie aux problèmes rencontrés par l'agriculture et l'industrie grâce à ses salaires plus compétitifs. De plus, le gouvernement des États-Unis a augmenté les crédits affectés à la recherche médicale sur l'identification et le traitement des nouveaux pathogènes infectieux.

En 2020, les partenaires à l'origine de TripleC ont mis fin à leur entreprise conjointe, qui a été remplacée par une fusion entre CCC et l'entreprise de TIC, complétée par une OPA amicale de ces deux sociétés sur les deux groupes pharmaceutiques. La décision d'opter pour une entreprise intégrée a été dictée en partie par des différends entre CCC et l'entreprise de TIC, d'une part, et les deux groupes pharmaceutiques, d'autre part, au sujet du développement de médicaments onéreux mais peu innovants. D'autres différends ont porté sur l'utilisation de la médecine régénérative, qui a rencontré un succès croissant, mais qui menaçait certains marchés des groupes pharmaceutiques. La nouvelle société TripleC issue de la fusion était dirigée par les PDG de CCC et de l'entreprise de TIC. Elle a pu mettre en place de nouvelles technologies, constituer de nouveaux types d'expertise, surmonter les obstacles réglementaires à l'innovation et développer son nouveau modèle compétitif. Elle est devenue très rentable, mais surtout, jusqu'à présent, grâce à l'adoption de nouveaux dispositifs médicaux et de nouvelles thérapies régénératives.

Après l'annonce de la fusion, la demande d'affiliation à TripleC a bondi, parce que les candidats escomptaient des services de santé bien meilleurs que ceux des concurrents, ce qui a permis à TripleC d'augmenter encore ses primes. Compte tenu des coûts logistiques, le modèle économique de TripleC était efficace jusqu'à un plafond de 100 millions de membres. L'entreprise n'avait donc aucun intérêt à grandir encore. En outre, le modèle dépendait notamment de la capacité à sélectionner les individus ayant le meilleur état de santé afin de réduire les frais médicaux. Le Congrès des États-Unis a interdit aux prestataires d'assurance maladie de demander des renseignements génétiques à leurs membres potentiels. TripleC a pu néanmoins éviter efficacement les maladies chroniques les plus coûteuses en demandant à ses membres d'effectuer des examens médicaux de routine et de s'engager à maintenir leur poids dans des limites raisonnables et à suivre des programmes d'exercices adaptés à leur tranche d'âge. L'entreprise a échappé à la législation de plusieurs États américains interdisant aux prestataires d'assurance maladie de refuser des membres en déplaçant son siège en Arizona.

Après acceptation de leur dossier, les membres étaient soumis à un dépistage génétique, afin d'identifier les risques potentiels de maladies chroniques. Les données recueillies étaient utilisées pour définir des programmes de santé individualisés obligatoires et pour concevoir des programmes de recherche thérapeutique.

Scénarios fictifs

Le modèle américain a été copié avec succès par l'Inde et la Chine, dont les systèmes de santé publics sont peu développés et qui ont vu se multiplier les prestataires de soins de santé privés. La principale entreprise chinoise de ce secteur est née de la fusion d'un prestataire de soins de santé et de plusieurs sociétés spécialisées dans la médecine régénérative, alors qu'en Inde, la principale entreprise a suivi l'exemple américain en se constituant par fusion entre un groupe pharmaceutique, un prestataire de soins de santé et une entreprise spécialisée dans les TIC. On a appelé « prestataires de santé en réseau » (PSR) ces entreprises et leurs modèles économiques. Les PSR étaient les chefs de file de la médecine translationnelle. S'appuyant sur un très grand nombre de membres et dotés de leurs propres hôpitaux, ils offraient d'excellents équipements aux universitaires et leur permettaient d'accéder à leurs bases de données informationnelles.

Alors que la rentabilité de chaque médicament figurant dans le portefeuille d'un PSR ne pouvait rivaliser avec celle des médicaments vedettes, la coordination d'une palette de médicaments et de thérapies s'est révélée rentable. La structure des PSR était par ailleurs plus efficace que celle des organismes publics, tels que l'institut national NICE au Royaume-Uni, pour maîtriser les coûts excessifs des médicaments.

Comme les PSR constituaient de plus en plus la principale voie d'accès au marché, les petites entreprises biotechnologiques spécialisées en santé ont été à même de développer une gamme de stratégies d'innovation beaucoup plus étendue qu'en 2015. Le développement de nouvelles molécules a cessé de jouer un rôle prépondérant dans les biotechnologies de santé, qui ont accordé une importance équivalente au diagnostic et à la médecine régénérative. Les fruits des investissements publics et privés dans les sciences de la vie ont commencé à se concrétiser sous des formes nouvelles et souvent inattendues, notamment grâce à l'apparition de nouveaux types de partenariats associant des personnes physiques et morales dotées d'une expertise en biochimie, TIC, physique et ingénierie. Les PSR se sont mis à vendre des thérapies, soit entre eux, soit aux systèmes de santé publics et à d'autres prestataires de santé privés.

Les PSR ont tiré profit d'une mesure de la FDA imposant le recours à la pharmacogénétique dans les essais cliniques, l'objectif étant de réduire les coûts en identifiant les médicaments inefficaces à un stade précoce des essais cliniques. Toutefois, la pharmacogénétique a aussi provoqué une augmentation sensible du nombre de nouveaux médicaments innovants, ce qui a activé un nouveau cycle de recherche fondamentale sur de nouveaux objectifs pharmaceutiques.

2022 à 2030 : reprise partielle

En 2022, les biotechnologies étaient largement utilisées dans les secteurs de la santé et de la biosûreté, mais leurs applications, tant dans l'industrie que dans la production primaire, restaient limitées dans les pays développés en raison du coût élevé du respect des règles de biosûreté, de l'absence de percées technologiques malgré les promesses et espoirs initiaux, et du manque de chercheurs intéressés par ces applications. L'Union européenne interdisait toujours les OGM et les étudiants en sciences étaient davantage intéressés par les nouveaux défis de la recherche nucléaire, géothermique et solaire.

Scénarios fictifs

Quelques succès ont été enregistrés. En 2025, le Brésil disposait de bioraffineries rentables pour la production de biobutanol et de bioplastiques. Ce pays a bénéficié du savoir-faire de producteurs européens d'enzymes, qui ont transféré la plupart de leurs activités de recherche au Brésil, en Chine et en Inde après que les États-Unis et l'Union européenne eurent imposé des restrictions à la recherche sur la biologie synthétique et sur les OGM à la fin de 2016. En Inde et en Afrique du Sud, des chercheurs ont mis au point des biopuces à protéines photosynthétiques sur support métallique capables de produire de l'énergie solaire avec un bon rendement.

Le développement des bioprocédés industriels se concentrait essentiellement au Brésil et en Inde. Les bioplastiques en étaient le produit phare et remplaçaient la plupart des plastiques pétrochimiques dans le monde entier, en particulier en Asie. Leur production à partir de cultures OGM ou de procédés microbiens était peu coûteuse. Étant donné qu'elle s'effectuait en circuit fermé, les déchets étaient recyclés comme matière première. Les microorganismes étaient eux aussi utilisés pour recycler les bioplastiques et les produits à base de bioplastiques. Les chercheurs brésiliens et indiens voyaient dans le moindre déchet un défi pour mettre au point une solution microbienne au recyclage. Le génie métabolique a contribué grandement au développement de ce volet des biotechnologies industrielles. Combiné à la biologie synthétique, il a permis de développer des microorganismes capables d'extraire des métaux intéressants, comme l'uranium, dans l'eau de mer.

En 2022, le développement économique durable était variable selon les régions. L'Europe et la Chine avaient fortement investi dans la filière nucléaire pour réduire leurs émissions de GES, mais aussi pour assurer leur sécurité énergétique. Dans les pays membres de l'ALENA, la production de GES avait augmenté à la suite de l'exploitation poussée des sables bitumineux, mais les économies d'énergie réalisées grâce à la mise en œuvre d'une stratégie de sécurité énergétique en avaient atténué les effets les plus néfastes. Parmi les principales économies, le Brésil, l'Afrique du Sud et l'Inde présentaient l'empreinte carbone la plus neutre grâce aux biocarburants au Brésil et à l'énergie solaire en Afrique du Sud et en Inde.

Les GES et le changement climatique sont redevenus un problème mondial grave en 2027 après sept années consécutives de réchauffement climatique accéléré. L'augmentation des températures hautes et l'intensification des sécheresses ont suscité un regain d'intérêt pour le développement, à partir d'OGM, de variétés végétales résistant aux stress. Les lobbies se sont activés sans relâche auprès des gouvernements pour obtenir une simplification de la législation sur la biosûreté. La Chine et l'Inde ont été les premières à s'engager dans cette voie, parce qu'elles étaient de plus en plus préoccupées par les conséquences de l'irrégularité croissante des récoltes de céréales en Amérique du Sud et en Afrique, leurs principales sources d'importation.

À cause de la forte augmentation de la production intensive de lait en Chine et en Inde, la brucellose et, surtout, la tuberculose sont devenues des maladies particulièrement inquiétantes. La production intensive de porcs en Asie du Sud-Est a également déclenché une épidémie de grippe en 2023. Toutes ces pandémies, dont la grippe porcine africaine au Kenya, ont été rapidement identifiées et contrôlées grâce au diagnostic en temps réel et à des méthodes de production de vaccins recombinants à réponse rapide développées dans le cadre de la recherche

sur la biosûreté . Les vaccins recombinants ont été utilisés massivement pour les maladies du bétail. Certains vaccins ont été produits en masse par la Chine, la Thaïlande et le Vietnam et utilisés pour vacciner les troupeaux et la population en Asie du Sud-Est.

Les investissements dans la biosûreté destinée aux applications sanitaires et de sécurité intérieure, comme les nanotechnologies et la biodétection, ont été poursuivis afin d'améliorer la traçabilité et la sécurité alimentaires. Les nanotechnologies et la biodétection, par exemple, ont été fusionnées pour produire des biocapteurs capables de détecter des nanoparticules de pathogènes ou de contaminants dans les cargaisons de produits végétaux ou de bétail. Parmi les autres technologies mises en œuvre figuraient les lecteurs de micropuces sous-cutanées permettant d'identifier les variétés animales en quelques secondes et les micropuces avec leurs lecteurs dédiés pour connaître les antécédents de chaque animal et l'historique détaillé des produits alimentaires.

Jusqu'en 2028, la R-D biotechnologique a été davantage axée sur les animaux d'élevage que sur les cultures, la sélection assistée par marqueurs (SAM) et le clonage étant utilisés pour produire des variétés d'animaux résistant aux maladies. Le séquençage génétique d'espèces animales et végétales rentables ainsi que de ravageurs et parasites agricoles a représenté un important domaine de recherche, motivé principalement par le souci de mettre rapidement au point des traitements contre les futures maladies du bétail et des cultures.

Les banques de données mondiales sur l'ADN des plantes et des animaux ont été conservées par la FAO et les instituts nationaux de la santé (NIH) aux États-Unis dans le cadre des mesures en faveur de la biosûreté . Elles ont été utilisées dans les années 2020 pour prévenir le commerce illégal de biomatériaux. L'abattage illégal des forêts naturelles a été presque entièrement stoppé grâce aux systèmes de contrôle de la FAO faisant appel à des biocapteurs capables de détecter les essences et autres produits végétaux illégaux.

Quelques pays en développement, en particulier dans plusieurs régions d'Afrique, ont dû continuer à lutter contre des épidémies périodiques de maladies graves frappant les animaux d'élevage. Les pressions continues qui s'exerçaient sur les éleveurs incités à accroître leur productivité pour nourrir une population en pleine expansion, combinées à la surexploitation des sols et aux pressions sur les ressources hydriques, ont favorisé des pratiques de conduite peu efficaces et des réactions de stress chez les animaux. Cependant, l'éradication de la peste bovine et la plus grande efficacité des méthodes de lutte contre les maladies du bétail grâce à l'amélioration des diagnostics et des vaccins ont permis à l'Afrique de l'Ouest et de l'Est de rivaliser avec l'Amérique du Sud dans la production de viande. Cette production, comme celle d'Amérique du Sud, était exportée en grande partie en Asie.

Les pays européens dotés de systèmes de santé publics n'ont introduit que petit à petit un système de santé intégré, parce qu'ils redoutaient les conflits susceptibles de résulter du rapprochement entre des entreprises à but lucratif et des services de santé publics. Les groupes pharmaceutiques européens ont été aux prises avec des problèmes de financement, même s'ils ont pu tirer parti de la pharmacogénétique et de l'ARN interférent pour la découverte de nouvelles molécules. Par ailleurs, tous les groupes pharmaceutiques des pays développés ont souffert des restrictions imposées à l'utilisation des OGM et de la biologie synthétique pour la

Scénarios fictifs

production de médicaments. La production à bas coût de molécules biologiques et chimiques complexes en a été bloquée, ce qui a entraîné une hausse des coûts. Certains médicaments n'ont pu être produits économiquement qu'en Inde, où ces technologies restaient autorisées.

Le grand succès des PSR a créé de nouveaux problèmes et menacé leur modèle économique en 2030. Les PSR étaient en mesure d'imposer des primes élevées en contrepartie de services de meilleure qualité, ce qui a contribué à engendrer un système de santé clairement à deux vitesses aux États-Unis, en Chine, en Inde et même au Royaume-Uni, où le National Health Service est devenu un service hybride public-privé. La grande fraction de la population qui n'avait pas les moyens d'adhérer aux PSR était couverte par des prestataires de santé traditionnels de « deuxième classe ». Ces prestataires n'ont eu d'autre choix que d'acheter beaucoup de nouvelles thérapies auprès des PSR à des prix élevés. Confrontés au débat politique sur les PSR, plusieurs pays en développement dotés de systèmes de santé publics ont menacé, en 2030, d'invoquer les clauses dérogatoires de l'accord sur les aspects des droits de propriété intellectuelle qui touchent au commerce (ADPIC) pour produire des thérapies brevetées à bas coût au lieu de se les procurer auprès des PSR.

Notes :

1. Par exemple, le bevacizumab accroît la survie médiane des patients atteints d'un cancer colorectal de 1.8 mois, la faisant passer de 10.7 à 12.5 mois (NCI, 2005).
2. Cette tendance était déjà manifeste en 2007. Voir Grésillon, 2008.
3. L'intragenèse s'appuie sur la technologie des modifications génétiques pour transférer des constructions géniques entre plantes capables de se croiser dans des conditions naturelles.
4. USD de 2005, non corrigé de la parité de pouvoir d'achat.
5. USD de 2005, non corrigé de la parité de pouvoir d'achat.
6. De nombreuses caractéristiques du traité sont tirées de Love et Hubbard, 2007.
7. Cet exemple, de même que le développement qui suit, s'inspire du scénario sur les services de santé élaboré par Tait *et al.* (2008).

Références

- Bezold, C. et J. Peck (2005), « Drug Regulation 2056 », *Food and Drug Law Journal*, vol. 2, pp. 127-136.
- Bruinsma, J. (2003), *Agriculture mondiale : horizon 2015/2030 (Rapport abrégé)*, FAO, Rome.
- Campbell, C. (2008), « Genetic Screening Raises Tough Ethical Issues », *The Star Ledger*, 10 mars.
- CE (Commission européenne) (2007), *Sur le chemin d'une bio-économie basée sur la connaissance*, Commission européenne, Bruxelles.
- Dellenbach, R. (2008), « VC Funding for Biotech Companies Withering », *Genetic Engineering and Biotechnology News*.
- Dinesen, B. et autres (2008), « Under Surveillance, Yet Looked After : Telehomecare As Viewed By Patients and Their Spouse/Partners », *European Journal of Cardiovascular Nursing*, vol. 7, pp. 239-246.
- EU KLEMS (base de données de l'Union européenne : apports de capital (K) de main d'œuvre (L), d'énergie (E), de matériau (M) et de service (S)) (2008), « Comptes de croissance et de productivité », base de données, www.euklems.net/eukdata.shtml.
- Grésillon, G. (2008), « La mondialisation 2.0 a commencé », *Les Echos*, 20 mai.
- Gulliford, M. (2008), « Self Monitoring of Blood Glucose in Type 2 Diabetes », *British Medical Journal*, vol. 336, pp. 1139-1140.
- Houben, A., et autres (2008), « Engineered Plant Minichromosomes : A Bottom Up Success ? », *The Plant Cell*, vol. 20, pp. 8-10.
- IBM (2006), *Healthcare 2015 : Win-Win or Lose-Lose ?*, IBM Global Business Services, Somers, New York.
- Kay-Tee, K., et autres (2008), « Combined Impact of Health Behaviours and Mortality in Men and Women : The EPIC-Norfolk Prospective Population Study », *PLOS Medicine*, vol. 5, pp. 39-47.

- Love, J. et T. Hubbard (2007), « The Big Idea : Prizes To Stimulate R&D For New Medicines », *Chicago-Kent Law Review*, vol. 82, pp. 1519-1554.
- MacRae (2007), *Industrial Biotechnology to 2030*, www.oecd.org/dataoecd/12/9/40922929.pdf, consulté le 11 décembre 2008.
- Ministère allemand de l'Éducation et de la Recherche (2004), *Scenarios for a Bio-based Economy*, IFOK, août.
- Murphy, Angela M., et autres (2008), *Agricultural Biotechnologies to 2030*, www.oecd.org/dataoecd/12/57/40920458.pdf, consulté le 11 décembre 2008.
- NCI (National Cancer Institute) (2005), « Fact Sheet : Bevacizumab (Avastin) for Treatment of Solid Tumours : Questions and Answers », www.cancer.gov/cancertopics/factsheet/AvastinFactSheet/.
- Neild, I. I. et Pearson (2005), *BT Technology Timeline*, British Telecom, Londres, août.
- NZ MoRST (New Zealand Ministry of Research, Science and Technology) (2005), *Biotechnologies to 2025*, www.morst.govt.nz/business/biotech-to-2025/.
- OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques) (2008), Base de données STAN pour l'analyse structurelle, OCDE, Paris.
- OCDE (2006), *Biotechnology Statistics*, OCDE, Paris.
- Perry, G. (2006), « The European Generic Pharmaceutical Market in Review : 2006 and Beyond », *Journal of Generic Medicines*, vol. 4, pp. 4-14.
- Pharma Futures (2007), *Prescription for Long-term Value*, SustainAbility Ltd, Londres.
- Smith, R. (2006), « Responding to Global Infectious Disease Outbreaks : Lessons from SARS on the Role of Risk Perception, Communication and Management », *Social Science and Medicine*, vol. 63, pp. 3113-3123.
- Smith, R. et M.M. Álvarez (2008), *Global Change and Health : Mapping the Challenges of Global Non-healthcare Influences On Health*, Organisation mondiale de la santé, Genève.
- Tait, Joyce et autres (2008), *Health Biotechnology to 2030*, OCDE, Paris, www.oecd.org/dataoecd/12/10/40922867.pdf.
- Tong, S. et C. Soskolne (2007), « Global Environmental Change and Population Health : Progress and Challenges », *EcoHealth*, vol. 4, pp. 352-362.
- USDA (United States Department of Agriculture) (2005), *Preparing for the Future*, USDA Advisory Committee on Biotechnology and 21st Century Agriculture, USDA, Washington, DC.

WBCSD (World Business Council for Sustainable Development Scenario Unit) (2000), *Biotechnology Scenarios 2000-2050 : Using the Future to Explore the Present*, Conseil mondial des entreprises pour le développement durable (WBCSD), Genève.

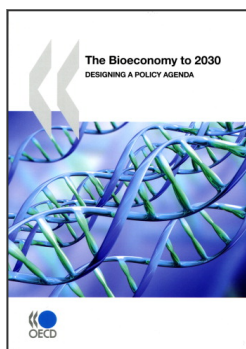
Zoellick. R. (2008), discours prononcé au Peterson Institute for International Economics, Washington, DC, 6 octobre.

Table des matières

Sigles et acronymes	13
Préface	17
Résumé	19
Chapitre 1. Définir la bioéconomie	23
Qu'est-ce qu'une bioéconomie ?	26
Les contours futurs de la bioéconomie émergente	31
Notes	33
Références	34
Chapitre 2. Quels seront les stimulants externes de la bioéconomie d'ici 2030 ?	37
Population et revenu	40
Démographie et ressources humaines	43
Consommation énergétique et changement climatique	45
Agriculture, prix alimentaires et eau	46
Coûts des soins de santé	48
Technologies contributives et concurrentes	49
Synthèse des moteurs de la bioéconomie	51
Notes	55
Références	57
Chapitre 3. La bioéconomie aujourd'hui : état des lieux	59
Plates-formes technologiques	60
Applications des biotechnologies dans le secteur de la production primaire	63
Applications des biotechnologies dans le secteur de la santé	72
Applications des biotechnologies dans l'industrie	82
Biocarburants	90
La bioéconomie aujourd'hui	95
Notes	97

Annexe 3.A1. Variétés transgéniques autorisées par le ministère de l'agriculture des États-Unis (USDA)	100
Annexe 3.A2. Classifications de la valeur thérapeutique par la Haute Autorité de Santé (HAS)	102
Annexe 3.A3. Analyse des évaluations de la valeur thérapeutique menées par la revue <i>Prescrire</i>	103
Références	105
Chapitre 4. La bioéconomie à l'horizon 2015	113
Les plates-formes technologiques à l'horizon 2015	115
Les applications des biotechnologies dans le secteur de la production primaire à l'horizon 2015	118
Les applications des biotechnologies dans le secteur de la santé à l'horizon 2015 ..	126
Les applications des biotechnologies dans le secteur de l'industrie à l'horizon 2015	138
Biocarburants à l'horizon 2015	144
La bioéconomie en 2015	150
Notes	152
Références	154
Chapitre 5. Les déterminants institutionnels et sociaux de la bioéconomie	159
Recherche publique	160
Réglementation	166
Droits de propriété intellectuelle	175
Réactions de l'opinion publique	177
Notes	180
Références	182
Chapitre 6. Les modèles économiques de la bioéconomie	187
Les modèles économiques actuels de la biotechnologie	188
Modèles économiques émergents dans le domaine des biotechnologies	196
Conclusions	211
Notes	213
Annexe 6.A1. Dépenses de R-D des principales entreprises de biotechnologie	216
Références	218

Chapitre 7. La bioéconomie en 2030	223
Introduction	224
La bioéconomie probable en 2030	224
Scénarios appliqués à la bioéconomie en 2030	233
Conclusions	241
Notes	243
Annexe 7.A1. Scénarios fictifs de la bioéconomie à l’horizon 2030	244
Références	270
Chapitre 8. Quelles options privilégier pour promouvoir la bioéconomie ?	273
Production primaire	279
Santé	287
Industrie	298
Questions transversales	307
Des enjeux mondiaux	310
Calendrier	313
Une situation complexe pour l’action publique	315
Notes	317
Références	321
Chapitre 9. Conclusions : cap sur la bioéconomie	327
Principales conclusions	329
Remarques finales	336
Notes	337
Annexe A. Membres du groupe de pilotage du projet « Bioéconomie à l’horizon 2030 »	339
Annexe B. Experts externes sollicités pour le projet « Bioéconomie à l’horizon 2030 »	347
Glossaire de quelques termes scientifiques et techniques	353



Extrait de :
The Bioeconomy to 2030
Designing a Policy Agenda

Accéder à cette publication :

<https://doi.org/10.1787/9789264056886-en>

Merci de citer ce chapitre comme suit :

OCDE (2009), « La bioéconomie en 2030 », dans *The Bioeconomy to 2030 : Designing a Policy Agenda*, Éditions OCDE, Paris.

DOI: <https://doi.org/10.1787/9789264056909-9-fr>

Cet ouvrage est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE. Les opinions et les arguments exprimés ici ne reflètent pas nécessairement les vues officielles des pays membres de l'OCDE.

Ce document et toute carte qu'il peut comprendre sont sans préjudice du statut de tout territoire, de la souveraineté s'exerçant sur ce dernier, du tracé des frontières et limites internationales, et du nom de tout territoire, ville ou région.

Vous êtes autorisés à copier, télécharger ou imprimer du contenu OCDE pour votre utilisation personnelle. Vous pouvez inclure des extraits des publications, des bases de données et produits multimédia de l'OCDE dans vos documents, présentations, blogs, sites Internet et matériel d'enseignement, sous réserve de faire mention de la source OCDE et du copyright. Les demandes pour usage public ou commercial ou de traduction devront être adressées à rights@oecd.org. Les demandes d'autorisation de photocopier une partie de ce contenu à des fins publiques ou commerciales peuvent être obtenues auprès du Copyright Clearance Center (CCC) info@copyright.com ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC) contact@cfcopies.com.