

## ANALYSE

### La biologie synthétique : de la bioingénierie à la bioéthique

#### 1. Vers une bioindustrie de synthèse ?

*La biologie synthétique est un nouveau domaine de recherche en plein essor, à l'interface entre la biologie moléculaire et les sciences de l'ingénieur. Son principe est d'utiliser des composants biologiques connus (gènes, promoteurs, protéines, etc.) pour modifier le comportement des cellules à des fins utiles. Ses applications potentielles vont de la synthèse de médicaments à la production de biocarburants en passant par la création de biomatériaux. Ce domaine pose cependant de nombreuses questions économiques, sociales, environnementales et éthiques à la hauteur de ses applications.*

La biologie synthétique consiste à organiser des éléments d'information génétique (des gènes, leurs éléments de régulation et leurs partenaires) pour créer des fonctions biologiques nouvelles. Ainsi, on ne considère plus la cellule et son patrimoine génétique comme une entité vivante mais comme une librairie de fonctions, qu'on peut réorganiser selon les finalités souhaitées. Les opérations programmées peuvent être des fonctions spécialisées, utiles pour une application, ou bien un moyen d'acquérir des connaissances biologiques nouvelles.

Les applications potentielles de la biologie synthétique sont d'ores et déjà variées et prometteuses. Elles mobilisent de nombreux acteurs, essentiellement américains, qui, des laboratoires publics et privés aux industriels de la chimie, de l'énergie, de l'agriculture ou encore de la pharmacie, en passant notamment par des start-up synthétisant des fragments d'ADN, jettent les bases d'une bioindustrie de synthèse.

#### La biologie synthétique et ses principales avancées

Le terme « biologie synthétique » apparaît pour la première fois dans le titre d'un ouvrage de Stéphane Leduc<sup>1</sup> paru en 1912, dans un sens différent de celui d'aujourd'hui. Il croyait avoir « *identifié les mécanismes chimiques du vivant lors de ses études sur la cristallisation osmotique* ». Le terme de biologie synthétique ne réapparaît qu'en 1974, le biologiste polonais Waclaw Szybalski en prédisant alors la prochaine **survenue**<sup>2</sup>. Aujourd'hui, la biologie synthétique est considérée comme l'ingénierie des circuits régulatoires et métaboliques, des génomes entiers et même des organismes. Cette discipline a fait l'objet de plus de 180 publications depuis l'année 2000.

#### Qu'est-ce que la biologie synthétique ?

Dans la biologie synthétique, « *il s'agit de coupler les avancées méthodologiques de la biologie des systèmes avec les processus du vivant, pour construire de nouveaux systèmes biologiques reposant sur l'observation du vivant, ayant des propriétés nouvelles, étendues mais contrôlables. Cette perspective peut s'appliquer à toutes les échelles du vivant (de la molécule à la population) avec des applications multiples pour la santé comme pour l'environnement. La rupture technologique provient ici du développement des nanotechnologies et du rapprochement entre biologie et chimie*<sup>3</sup> ». L'objectif de la

<sup>1</sup> Stéphane Leduc (1853-1939), biologiste et chimiste français, professeur à l'École de Médecine de Nantes. Voir le site sur les « jardins chimiques » [http://www.espci.fr/esp/CONF/2007/C07\\_07/conf07\\_2007.htm](http://www.espci.fr/esp/CONF/2007/C07_07/conf07_2007.htm).

<sup>2</sup> Waclaw Szybalski, in *Gene*, vol. 4, n° 3, 1978, p. 181.

<sup>3</sup> « *Jusqu'à présent, nous travaillons sur la phase descriptive de la biologie moléculaire. Mais le vrai défi commencera avec la recherche d'une biologie de synthèse : nous allons concevoir les nouveaux éléments de contrôle et ajouter ces nouveaux modules aux génomes existants ou bien construire entièrement de nouveaux génomes. Ce sera un champ d'expansion illimitée pour fabriquer des circuits mieux contrôlés et des organismes synthétiques* ».

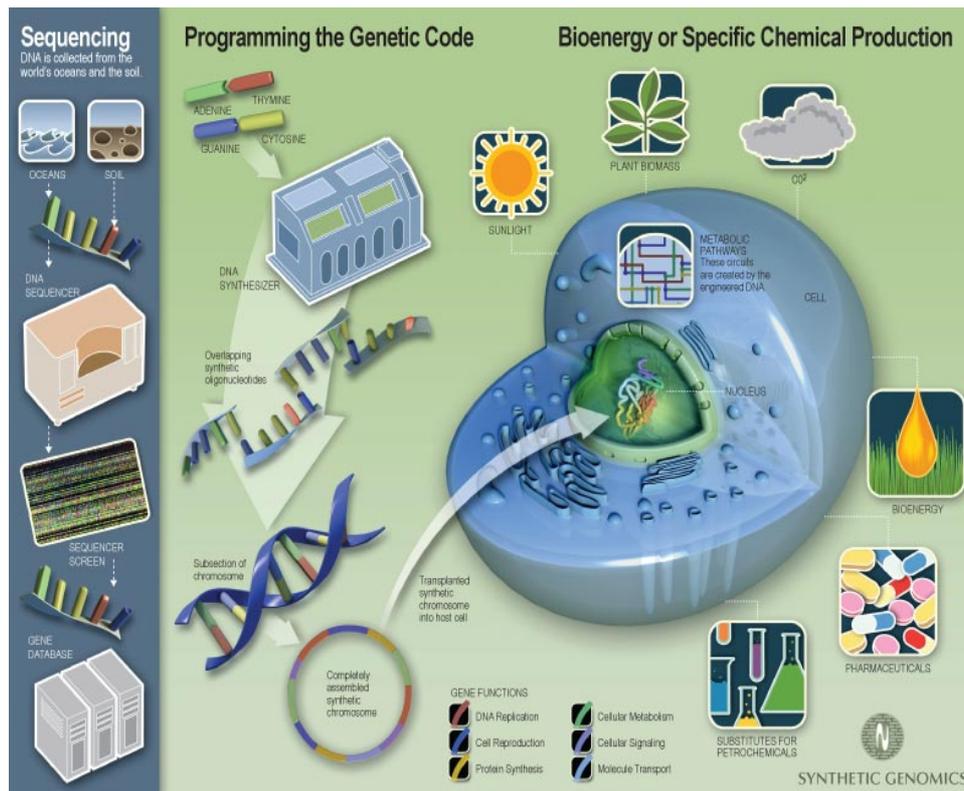
<sup>3</sup> D'après le texte préparatoire aux travaux de la Stratégie nationale de recherche et d'innovation (SNRI) disponible sur Internet :

biologie synthétique est la conception de systèmes biologiques par **modification des éléments de production de la cellule** : enzymes, biomatériaux, voies métaboliques, ou systèmes de contrôle génétique.

Alors que la biologie systémique cherche à comprendre les systèmes biologiques dans leur ensemble, la biologie synthétique vise des objectifs plus technologiques et surtout plus appliqués. Elle se différencie également du génie génétique dont l'un des buts est l'obtention d'organismes réalisant une fonction donnée, grâce à l'utilisation et au transfert de gènes existants, modifiés ou non.

Par analogie avec la chimie de synthèse, la biologie synthétique ne se contente pas d'expliquer ou de reproduire le comportement de systèmes naturels. Son objectif est plutôt de **programmer de nouveaux systèmes biologiques** basés sur les principes de « *design* » observés dans la nature. La complexité de cet objectif suscite une approche d'ingénierie.

Figure 1. Les principes de base de la biologie synthétique



© Copyright 2008 Synthetic Genomics, Inc : <http://www.syntheticgenomics.com/science.htm>

Quatre pistes de recherche principales se distinguent aujourd'hui :

- 1) La reproduction de la biologie naturelle par assemblage de molécules non naturelles.
- 2) L'ingénierie efficace de circuits génétiques artificiels au comportement programmé, par assemblage de « briques » réutilisables d'origine naturelle, à l'image des composants d'un circuit électronique.
- 3) La réalisation d'une cellule minimale, ce qui suppose de déterminer l'ensemble des gènes qui lui permettent de s'auto-entretenir et de se reproduire.
- 4) La reconstruction du vivant pour améliorer la bioproduction et/ou la compréhension de la biologie naturelle, en alliant le fondamental et l'appliqué.

Ces pistes recouvrent deux types d'approche : « *bottom-up* », de construction (ou assemblage) du vivant et « *top down* », de déconstruction (ou désassemblage) du vivant.

Par ailleurs, il existe actuellement des recherches sur une autre forme d'ADN appelée APN<sup>4</sup> (pour acide peptidonucléique) qui associe les propriétés de stockage de l'ADN et la résistance chimique d'une protéine. Le but de ces recherches est essentiellement la synthèse de nouveaux médicaments qui agirait sur l'ADN de gènes spécifiques.

<http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr>

<sup>4</sup> Voir le numéro 378, d'avril 2009, de *Pour la science*, page 26.

**Encadré 1. Les *biobricks* ou le développement d'un « Lego » biomoléculaire**

L'approche dite « *bottom-up* » a permis de concevoir des briques élémentaires ou *biobricks* et de les assembler pour fabriquer un génome répondant à des spécifications fonctionnelles précises. Inventée par un groupe d'ingénieurs du Massachusetts Institute of Technology (MIT), cette approche vise à construire une collection, en cours de constitution, de séquences de molécules d'ADN codant pour tout type d'élément génétique. Elles sont construites avec des normes et des propriétés strictes de façon à permettre la réalisation facile d'assemblages de circuits suivant une procédure standardisée. Les composants *biobricks* sont sensés pouvoir s'assembler les uns avec les autres à la manière de briques Lego qui peuvent s'enchâsser. On peut ainsi manipuler l'ADN aussi simplement que le ferait un ingénieur cherchant à fabriquer un circuit imprimé. En fait, cette approche consiste à pratiquer une ingénierie inversée du vivant, en essayant de créer des briques, des portions d'ADN qui possèdent des fonctions précises et dont les entrées-sorties sont parfaitement connues.

L'idée, à terme, est de ne plus se soucier des constituants intimes de ces pièces mais uniquement des propriétés qu'elles possèdent une fois organisées en sous-groupes, puis en groupes. Cette approche hiérarchique relève d'une véritable ingénierie. Nombre de chercheurs sont en train de constituer des collections de *biobricks*, par exemple à la BioBricks Foundation, qui en compte déjà environ 2 000, ou au SynBerc, un consortium de centres de recherche dédiés à la biologie synthétique, basé à Berkeley. Mais pour que cette technologie soit largement et pratiquement utilisable, elle requiert un haut niveau de standardisation et de compatibilité entre toutes ces pièces, comme c'est le cas en électronique.

***Quelles avancées actuelles et futures de la biologie synthétique ?***

Les **applications potentielles**<sup>5</sup> de la biologie synthétique traversent de nombreux domaines, de la médecine à la production d'énergie. Elles concernent notamment : les carburants, les médicaments, les biomatériaux, les biosenseurs, les virus « thérapeutiques », la décontamination.

Déjà, **deux succès** ont permis de réaliser des économies de coûts et de matières premières :

**- La synthèse du 1,3-propanediol**

Les fibres de polyester sont formées de macromolécules linéaires présentant dans la chaîne au moins 85 % d'un ester. Elles sont très utilisées dans l'industrie textile (plus grande élasticité, facilité de teinture, meilleure résistance), dans l'industrie des détergents (par exemple comme adoucissant protecteur dans les lessives liquides) ou encore dans la préparation de produits agroalimentaires ou pharmaceutiques. Le polytriméthylène téréphtalate (PTT) à base de triméthylène glycol est un polyester aromatique réalisé par polycondensation de 1,3-propanediol et d'acide téréphtalique. Pendant de nombreuses années, le coût élevé de la synthèse du 1,3-propanediol a freiné la commercialisation de cette fibre. Grâce à la biologie synthétique, le processus de synthèse permet une économie de 45 % de matière première et présente des avantages environnementaux (moins de rejets polluants, consommation d'énergie plus faible).

**- La synthèse d'artémisinine**

De nombreux médicaments dépendent de la synthèse chimique de composants rares, difficiles à isoler à partir de sources naturelles ou de synthèses chimiques complexes et coûteuses. C'est le cas de l'artémisinine, particulièrement efficace contre la malaria qui cause plus d'un million de morts par an. Ce composé chimique est naturellement produit par des plantes mais en petites quantités. En outre, sa structure chimique complexe rend la synthèse chimique difficile du point de vue du rendement. Le professeur Jay Keasling de l'université de Californie, à Berkeley a identifié le schéma de biosynthèse et développé un système microbiologique permettant la production d'artémisinine par fermentation. En mars 2008, le groupe pharmaceutique Sanofi-Aventis a signé avec l'Institute One World Health (iOWH), une société pharmaceutique américaine à but non lucratif, et Amyris Biotechnologies, un pionnier en biologie synthétique, un partenariat pour développer à l'horizon 2010 une artémisinine de synthèse à faible prix, un élément clé dans les traitements antipaludiques.

Ces organismes modifiés pourraient également être conçus pour produire des **matériaux utiles**, par exemple des matières plastiques biodégradables à partir de substances brutes, renouvelables et de faible coût, ou pour convertir ces sources en carburants comme l'hydrogène ou le méthanol. La capacité des systèmes biologiques à assembler la structure des matériaux au niveau moléculaire ouvrirait alors la voie à des matériaux dotés de propriétés nouvelles et améliorées, ou à des machines ou circuits électroniques nano-structurés.

La **production de carburants** à partir de biomasse est une application de la biotechnologie traditionnelle. Dans ce domaine, la biologie synthétique permettrait l'amélioration des méthodes existantes : production de biocarburants à haute densité énergétique par des organismes vivants, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives en matière de lutte contre le changement climatique ou la recherche de sources d'énergies renouvelables. On citera par exemple l'optimisation par ingénierie génétique du rendement de voies de biosynthèse, ou la synthèse de sources d'énergie telles que

<sup>5</sup> D'après le rapport rédigé par un groupe d'experts près la Commission européenne, présidé par Luis Serrano [http://ftp.cordis.europa.eu/pub/nect/docs/syntheticbiology\\_b5\\_eur21796\\_en.pdf](http://ftp.cordis.europa.eu/pub/nect/docs/syntheticbiology_b5_eur21796_en.pdf) et la traduction de M. Képès du Genopole.

l'hydrogène, difficile à produire par des moyens traditionnels, donc extrêmement coûteuse et techniquement difficile. Si la première génération des biocarburants fut un échec, l'association de la biologie synthétique et de l'industrie agroalimentaire pourrait conduire à lever, ou tout du moins à réduire, une partie des difficultés avec une nouvelle génération de biocarburants basés sur l'utilisation d'organismes synthétiques. En décembre 2008, une équipe de scientifiques de la Henry Samueli School of Engineering and Applied Science, université de Californie, Los Angeles, dirigée par le professeur Liao, a ainsi réussi à modifier génétiquement une bactérie *Escherichia coli*, afin de la rendre capable de produire des alcools à longue chaîne de carbone (entre 5 et 8 atomes), qui pourraient constituer des biocarburants plus énergétiques. En effet, ces alcools emmagasinent plus d'énergie dans un espace plus petit, et sont plus facilement séparables de l'eau, donc moins volatils et moins corrosifs que l'éthanol<sup>6</sup>. Rappelons que le marché des biocarburants était évalué à environ 22 milliards de dollars en 2006 et pourrait s'élever à plus de 110 milliards de dollars en 2020.

La **décontamination biologique** est aussi une application courante dans le secteur des biotechnologies. Il s'agit de mettre au point des micro-organismes capables de dégrader des produits polluants en composés moins nocifs pour l'environnement. La biologie synthétique propose une nouvelle méthodologie pour l'ingénierie de voies de dégradation plus efficaces en fonction des contaminants. La mise en œuvre de cette technologie impliquerait cependant la dissémination dans le milieu naturel de micro-organismes modifiés et pose donc le problème de l'impact à long terme sur l'environnement et les écosystèmes.

Les bactéries réagissent aux spécificités du milieu où elles se trouvent pour adapter leur cycle de vie. Cette capacité à « sentir » le milieu chimique dans lequel elles baignent fait des bactéries un substrat idéal pour développer des systèmes d'analyse très fins de l'environnement. En modifiant les voies métaboliques et les circuits génétiques qui s'activent en présence de telle ou telle molécule chimique extracellulaire, on peut conduire la bactérie à émettre un signal visible en fonction des concentrations externes. Un **biosenseur** peut ainsi être construit en liant un domaine extracellulaire à un domaine de protéine interne associé à une voie de transduction du signal cellulaire.

Des systèmes biologiques synthétiques pourraient être conçus comme **détecteurs** autonomes et sensibles de polluants, explosifs, matériel de guerre biologique. Cette capacité de détection pourrait être couplée à celle de destruction des substances dangereuses.

Des micro-dispositifs biologiques basés sur l'assemblage modulaire de gènes et protéines pourraient également agir dans le corps humain pour **détecter et corriger des pathologies à leur stade précoce, pour réparer ou régénérer des tissus**. Ainsi, la biologie synthétique offrirait les outils pour une intervention médicale au niveau moléculaire, évitant le recours à la chirurgie.

### Des laboratoires au marché : quel développement de la biologie synthétique ?

Né dans les années 1970, le champ de la biologie synthétique n'a véritablement décollé que depuis 2004. Du point de vue académique, **le nombre de publications dans le monde a été multiplié par 5 entre 2000 et 2004**. Ce changement est dû, entre autres, aux avancées technologiques qui ont permis une baisse significative des coûts : la synthèse d'une paire de bases<sup>7</sup> coûtait 30 \$ en 1970, 1 \$ en 2004 et environ 0,80 \$ en 2008. Berceau de la biologie synthétique, les États-Unis restent le moteur principal de ces avancées, même si l'Europe a fini par leur emboîter le pas.

#### Recherche : la domination américaine

On peut relever un **décalage important entre l'Amérique du Nord et l'Europe**, tant par le nombre de publications, leur écart dans le temps que par les financements publics qui soutiennent les projets de biologie synthétique (*Figures 2 & 3*). Près de **70 % des publications en biologie synthétique sont dus à des équipes américaines**, alors que l'Europe n'en représente que 24 % et la France 2,6 %<sup>8</sup>. La différence entre les États-Unis et le reste du monde est encore plus flagrante lorsque l'on compare **les financements, qui sont à 85 % d'origine américaine**.

Parmi les **acteurs principaux de la recherche en biologie synthétique**, il faut citer le « **BioFabGroup** ». Ce groupe rassemble des scientifiques des plus **grandes universités américaines** (MIT, Berkeley, Harvard, Princeton), qui développent la biologie synthétique dans leurs laboratoires mais également au sein des premières entreprises de biologie synthétique, en tant que fondateurs ou conseillers scientifiques. Leur **relation avec le secteur privé et le monde politique** est un élément clé pour comprendre le secteur de la biologie synthétique. **Les scientifiques européens sont beaucoup moins liés aux entreprises que leurs confrères américains**. Une liste très détaillée de ces entreprises figure

<sup>6</sup> <http://newsroom.ucla.edu/portal/ucla/ucla-researchers-push-nature-beyond-76969.aspx>

<sup>7</sup> L'ADN est constitué de 4 bases A-T-G-C qui peuvent s'apparier sous les formes suivantes : G-C et A-T. D'où la notion de paire de bases (pb).

<sup>8</sup> Les trois meilleurs auteurs français comptabilisent une vingtaine de publications chacun depuis 2001.

dans le rapport *Synbiology, An Analysis of Synthetic Biology Research in Europe and North America*<sup>9</sup>. Parmi ces acteurs apparaît le nom de Craig Venter, le scientifique à la tête de l'entreprise Celera qui avait défié le consortium public international lors du séquençage du génome humain.

Figure 2. Part des publications dans le monde

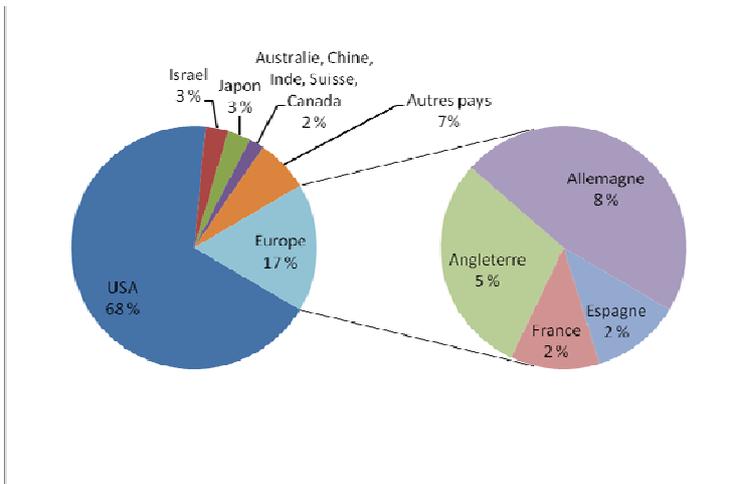
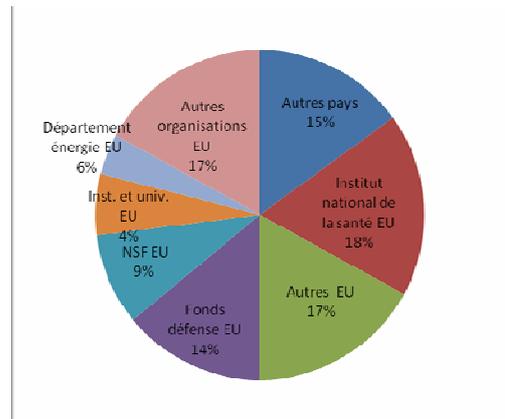


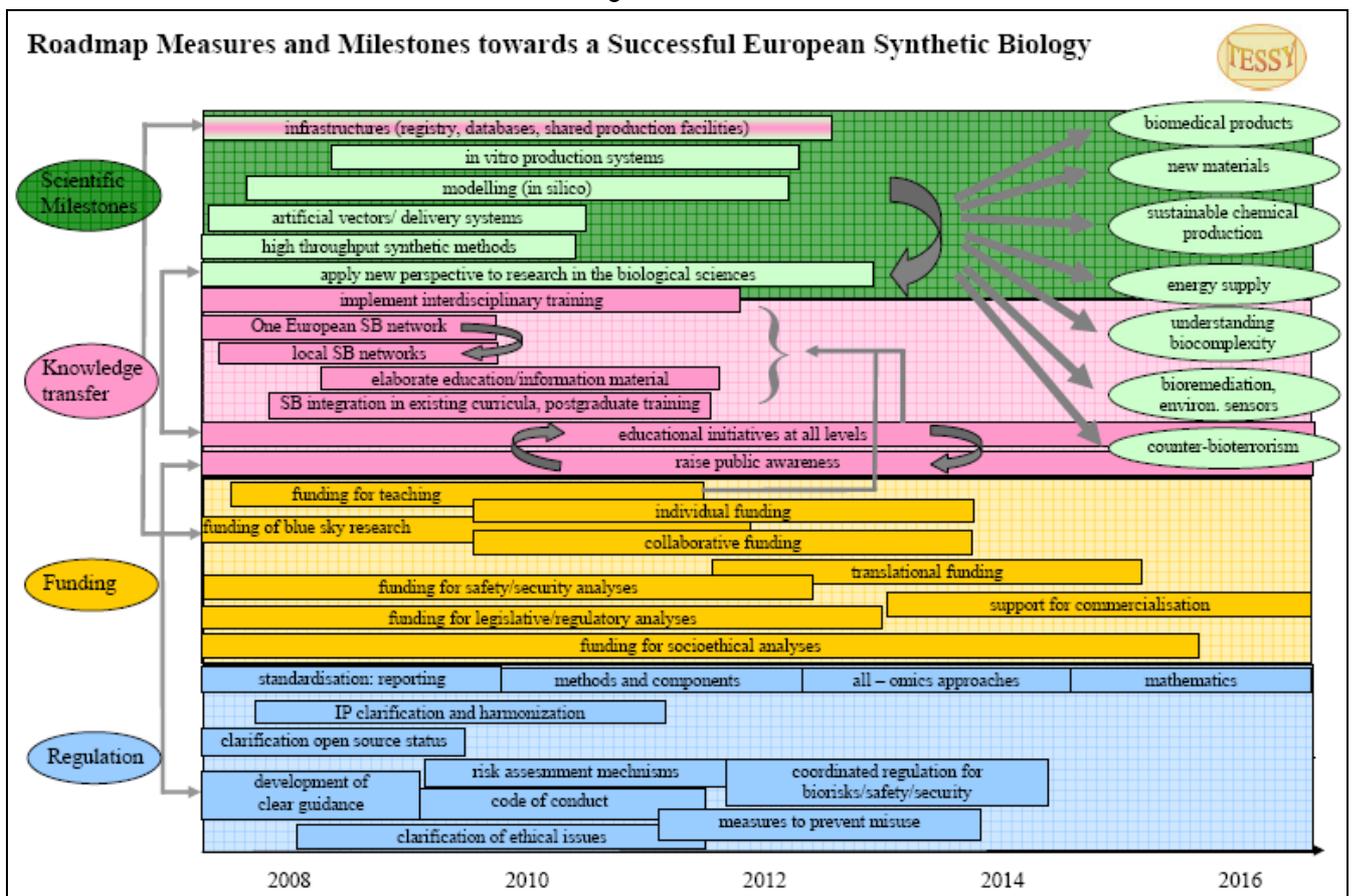
Figure 3. Financements par pays



Source : *Synbiology, An Analysis of Synthetic Biology Research in Europe and North America*

À l'échelle européenne, la biologie synthétique a été soutenue au sein du **programme NEST** (New and Emerging Science and Technology) du 6<sup>e</sup> programme-cadre européen consacré, à partir de 2005, aux sciences et technologies émergentes. Dix-huit projets ont ainsi été financés pour un montant de 25 millions d'euros, à l'instar du projet TESSY (*Towards a European Strategy for Synthetic Biology*). Celui-ci a proposé en décembre dernier un *roadmap* du développement de la biologie synthétique entre 2008 et 2016 en Europe<sup>10</sup> (cf. figure 4).

Figure 4.



<sup>9</sup> <http://www2.spi.pt/synbiology/documents/news/D11%20-%20Final%20Report.pdf>

<sup>10</sup> TESSY Achievements and Future Perspectives in Synthetic Biology, TESSY Final Report, décembre 2008 : [http://www.tessy-europe.eu/public\\_docs/TESSY-Final-Report\\_D5-3.pdf](http://www.tessy-europe.eu/public_docs/TESSY-Final-Report_D5-3.pdf)

Si ce projet se poursuit en 2009 dans le cadre des conférences européennes sur la biologie synthétique, le 7<sup>e</sup> PCRD (2007-2013), n'a jusqu'à présent que lancé des appels d'offre en biologie synthétique dans le cadre de la « bio-économie basée sur la connaissance »<sup>11</sup>. Les enjeux de la biologie synthétique appellent donc à la **construction d'un consortium européen d'envergure suffisante** dans une logique de coopération/compétition avec les grandes puissances scientifiques actuelles ou émergentes. La présence française dans les projets européens concernant la biologie des systèmes et la biologie synthétique reste assez limitée, même si certaines équipes de pointe peuvent être identifiées. En France, les investissements proviennent principalement du PCRD et de l'Agence nationale de la recherche (ANR). 19 des 71 pôles de compétitivité pourraient, en théorie, accueillir à terme des projets innovants liés à la biologie synthétique. Citons par exemple : Medicen Paris Région, Capenergies, Céréales Vallée, Cancéropôle, InnoViandes<sup>12</sup>, Plastipolis, etc.

#### Encadré 2 : iGEM, la compétition internationale de la recherche en biologie synthétique

Pour stimuler la recherche en biologie synthétique, le MIT organise, depuis 2004, **une compétition appelée iGEM<sup>13</sup>** (International Genetically Engineered Machines) entre les étudiants de différentes universités. La **France a été à l'honneur en 2007** en recevant le premier prix dans la catégorie « Foundational Research » au quatrième concours iGEM pour un travail sur l'ingénierie de la toute première bactérie multicellulaire : la *Synthetic Multicellular Bacterium*. L'intérêt industriel de ce projet est de contrôler la production de molécules biochimiques en découplant leur synthèse de la reproduction cellulaire. Autrement dit, on peut ainsi produire un composé en grande quantité tout en contrôlant sa dissémination dans l'environnement.

Voir les vidéos de la conférence Synthetic Biology 4.0 : <http://www.youtube.com/profile?user=BioBricksFoundation&view=videos>

#### Un marché en plein essor

Le marché de synthèse pure était évalué entre 30 et 40 millions de dollars en 2006, ce qui peut paraître faible au regard du marché du séquençage estimé à environ 7 milliards de dollars (équipement, consommable, services avec un taux de croissance de 10 % à 15 % jusqu'en 2009). Mais le marché de la synthèse enregistre une croissance beaucoup plus rapide. Ainsi, dès 2010, il pourrait atteindre 700 millions de dollars, puis 3 milliards de dollars en 2015, soit un taux de croissance annuel de 30 % à 50 %. Cette progression est portée non seulement par l'essor des biotechnologies mais également par la prise de conscience des décideurs tant des potentialités ouvertes par la biologie synthétique par rapport à la PCR<sup>14</sup> que des intérêts à externaliser cette synthèse.

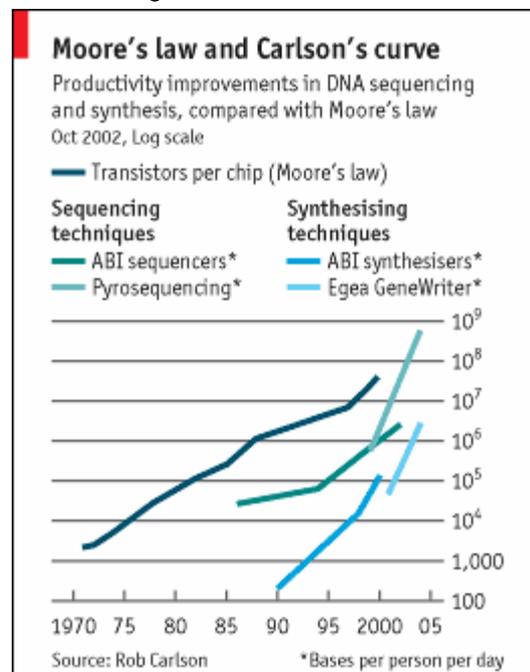
#### Les gains de productivité dans ce secteur augmenteraient selon une « loi » de Moore.

De manière analogue à la « loi » de Moore pour l'informatique, la course de Carlson décrit une croissance exponentielle de la biologie de synthèse (*Figure ci-contre*).

Dans la synthèse de l'ADN, la productivité, mesurée en paire de bases séquencée, par un professionnel et par jour, s'est accrue d'un facteur 7 000 sur les 15 dernières années. Le coût pour une paire de bases a été divisé par un facteur 50 et celui nécessaire pour synthétiser de l'ADN par 20 depuis 2000.

Si cette tendance se poursuivait, notamment avec le développement de nouvelles technologies plus efficaces (microfluidique, la synthèse par Digital Micromirror Device, etc.), **le coût du séquençage pourrait tomber en dessous de 0,01 \$/paire en 2010, et celui de la synthèse en dessous de 0,10 \$/paire, selon les estimations de Bio Economic Research Associates.**

Figure 4. La loi de Carlson



[http://www.economist.com/business/displaystory.cfm?story\\_id=7854314](http://www.economist.com/business/displaystory.cfm?story_id=7854314)

<sup>11</sup> [http://cordis.europa.eu/fp7/kbbe/about-kbbe\\_en.html](http://cordis.europa.eu/fp7/kbbe/about-kbbe_en.html)

<sup>12</sup> Certains peuvent encore en paraître éloignés comme InnoViandes, pôle de compétitivité sur les procédés de fabrication des viandes, mais les États-Unis ont engagé des réflexions sur la production industrielle de protéines animales dans de grands bioréacteurs.

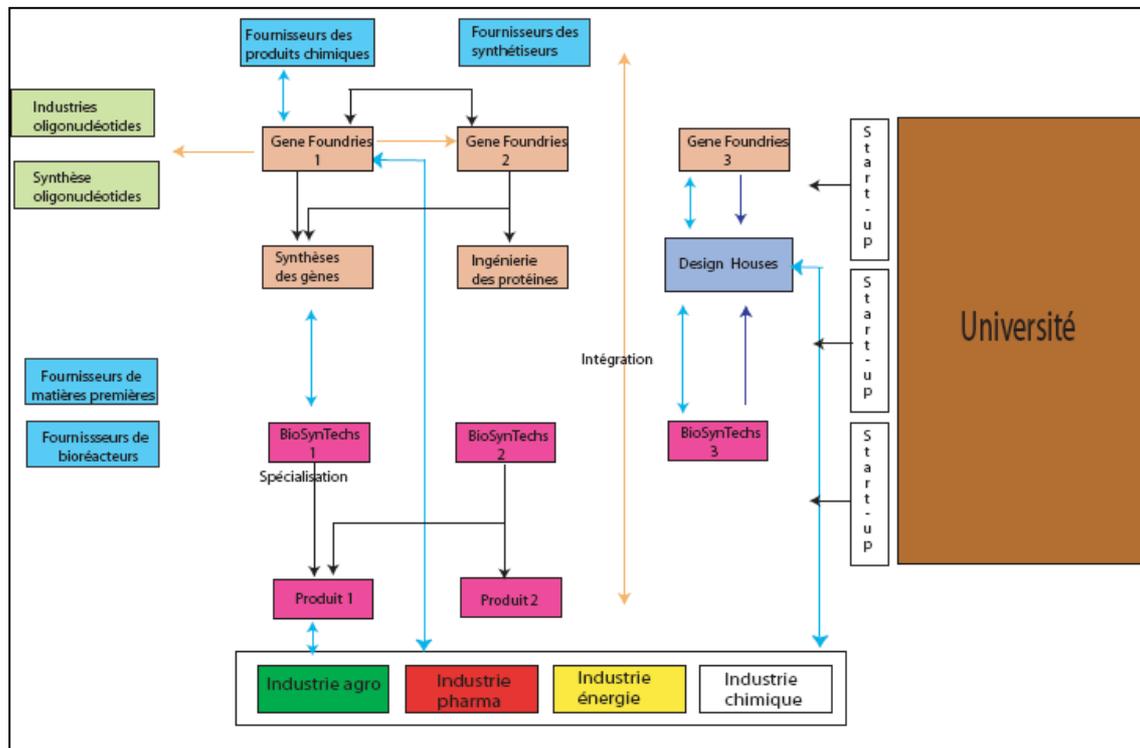
<sup>13</sup> Site de la compétition iGEM : [http://parts2.mit.edu/wiki/index.php/Main\\_Page](http://parts2.mit.edu/wiki/index.php/Main_Page)

<sup>14</sup> Réaction de polymérisation en chaîne, une technique de biologie moléculaire permettant d'amplifier toute séquence d'ADN, c'est-à-dire d'obtenir une grande quantité de copies d'une séquence nucléotidique donnée.

Le marché de la biologie synthétique est aujourd'hui structuré autour de deux grands types d'entreprises :

- les **Gene Foundries** qui produisent pour leurs clients des fragments d'ADN ;
- les **BioSynTechs** qui visent à fabriquer des micro-organismes susceptibles de produire des biocarburants, des produits biochimiques, des médicaments, de jouer un rôle de biosenseurs, ou encore d'être dotés de capacités de bioremédiation.

Figure 3 : Stratégies des entreprises du secteur de la biologie synthétique<sup>15</sup>



Demain, un troisième type d'acteur pourrait émerger : les **Gene Design Houses**, entreprises qui résulteraient de l'externalisation depuis les *Gene Foundries* et les *BioSynTechs* de la fonction de services de *design* de gènes, circuits génétiques et génomes.

Les **entreprises** des secteurs de l'agroalimentaire, de l'énergie et de la pharmacie ont déjà investi ce marché, à l'instar de Cargill, BP, DuPont et Pfizer. Plus récemment, de nouveaux entrants ont émergé, issus du secteur informatique (Microsoft<sup>16</sup>, IBM, SAP, Google, etc.).

Soulignons que **les barrières à l'entrée** du marché des *Gene Foundries* sont nombreuses. Tout d'abord, une grande partie du marché est verrouillée par les **portefeuilles de brevets** détenus par quelques grands acteurs clés. Par ailleurs, les **coûts** sont très importants, du point de vue matériel comme en termes d'investissements en R & D. De plus, pour accéder à ce marché, l'obtention de multiples **autorisations gouvernementales** est nécessaire en raison des mesures de biosécurité.

\*\*\*

La biologie synthétique est un **secteur en plein essor** qui peut conduire à des approches révolutionnaires dans de nombreux domaines. Les acteurs majeurs de cette industrie, les *Gene Foundries* et les *BioSynTechs*, sont en train de s'organiser pour investir et contrôler le marché. Il est indispensable de dégager dès à présent des éléments de base et des pistes de réflexion pour permettre de relever les défis liés à ce nouveau secteur du champ économique. La biologie synthétique a la possibilité

<sup>15</sup> D'après F. Le Fèvre (2008), *Biologie synthétique, quel business model ?*, Mémoire de fin d'études (2006-2008), IAE, université Paris 1 : [http://fhr.lefevre.googlepages.com/Synthia\\_quel\\_business\\_model.pdf](http://fhr.lefevre.googlepages.com/Synthia_quel_business_model.pdf)

<sup>16</sup> Microsoft a d'abord créé fin 2005 un département de bioinformatique. En 2007, il a annoncé un financement à hauteur de 600 000 dollars pour six équipes de recherche dans le domaine de la biologie synthétique : <http://research.microsoft.com/en-us/collaboration/>

de créer des technologies génériques servant à exploiter les outils et processus bio-inspirés pour des **applications industrielles et commerciales**.

La recherche en biologie synthétique a été **majoritairement menée aux États-Unis**. Les plus gros financements de projets en biologie se sont opérés justement en biologie synthétique pour un montant total d'un demi-milliard de dollars<sup>17</sup>. Avant 2015, selon certains experts<sup>18</sup>, un cinquième de l'industrie chimique américaine (valant 1,8 trillion de dollars) devrait être dépendant de la biologie synthétique. Étant donné l'importance des enjeux, il est nécessaire que la France investisse dans ce domaine pour **créer les infrastructures requises**. Il paraît ainsi souhaitable que la Stratégie nationale de recherche et d'innovation élève au rang de priorité la biologie synthétique afin que la France puisse occuper toute sa place dans ce nouveau champ de recherche.

> *Pierre-Henry Suet, Département Recherche, Technologies, Développement durable  
avec l'appui de Nathalie Bassaler, Service Veille, Prospective, International*

*Directeur de la publication :*  
René Sève, directeur général

*Rédactrice en chef* de la Note de veille :  
Nathalie Bassaler, chef du Service Veille,  
Prospective, International

Pour consulter les archives  
de la Note de Veille  
en version électronique :  
[http://www.strategie.gouv.fr/  
rubrique.php3?id\\_rubrique=12](http://www.strategie.gouv.fr/rubrique.php3?id_rubrique=12)

Centre d'analyse stratégique  
18, rue de Martignac  
75700 Paris cedex 07  
Téléphone 01 42 75 61 00  
Site Internet :  
[www.strategie.gouv.fr](http://www.strategie.gouv.fr)



<sup>17</sup> Bucci M. (2007), « Berkeley Center for Synthetic Biology », *Nature Chemical Biology*, vol 3 (9), 527.

<sup>18</sup> [http://www.synbioproject.org/process/assets/files/6319/nano\\_synbio2\\_electronic\\_final.pdf](http://www.synbioproject.org/process/assets/files/6319/nano_synbio2_electronic_final.pdf)