

Biologie

synthétique :

réflexions

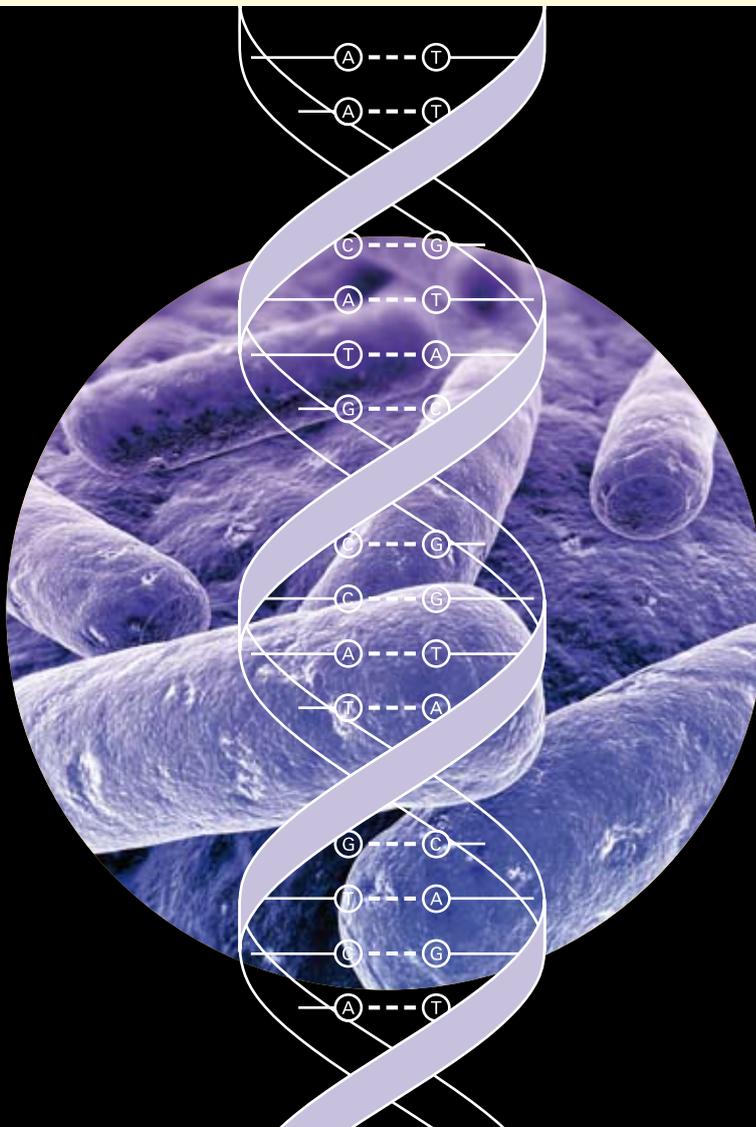
Rapport de la Commission

fédérale d'éthique pour la

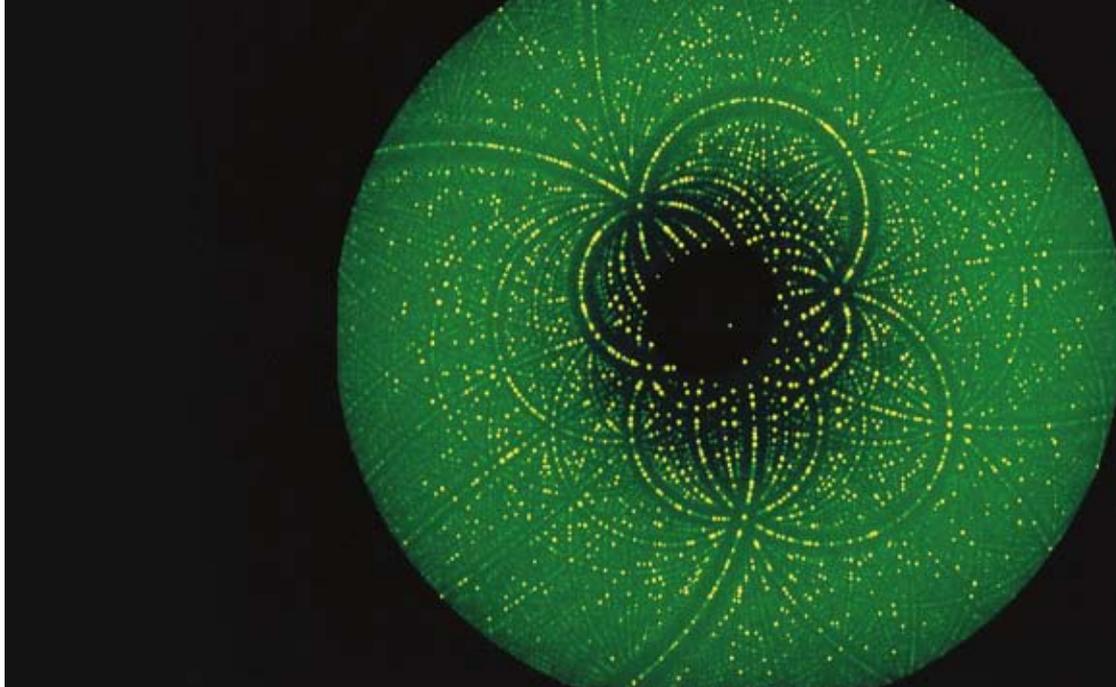
biotechnologie dans le domaine

non humain (CENH)

éthiques



1	Remarques liminaires	3
2	La notion de biologie synthétique telle qu'elle est utilisée par la communauté scientifique	5
3	La biologie synthétique: un domaine d'activité présentant une multitude d'objectifs et de méthodes	8
4	Applications de la biologie synthétique	9
5	Le projet de la biologie synthétique	10
5.1	La notion de nouveaux êtres vivants	10
5.2	La notion de fabriquer	11
5.3	La notion de contrôlabilité	11
5.4	Différentes conceptions ontologiques de la vie	12
6	Statut moral des êtres vivants que la biologie synthétique utilise ou produit	15
6.1	Statut moral lié à la valeur morale	15
6.2	Statut moral indépendant d'une valeur morale	17
6.3	Pondération dans une pesée d'intérêts	17
7	Réflexions sur l'éthique de la responsabilité	19
7.1	Comment la biologie synthétique influence-t-elle l'attitude de la société face aux êtres vivants?	19
7.2	Réflexions sur la justice	20
7.3	Réflexions relatives à l'éthique des risques	22
7.3.1	Description et étude du risque	24
7.3.2	Evaluation des risques	25
7.3.3	Devoirs de diligence	26
7.3.4	Conclusions quant à l'utilisation d'organismes synthétiques	27
8	Synthèse	28
9	Littérature	30



1 Remarques liminaires

La biologie synthétique désigne un domaine de recherche relativement nouveau qui associe des éléments de la biologie moléculaire (génie génétique), de la chimie, de l'informatique et de l'ingénierie. La biologie synthétique repose sur l'idée qu'il est possible de transformer ou de construire des êtres vivants de façon contrôlée et ciblée.

La biologie synthétique travaille avec des systèmes possédant certaines fonctions des êtres vivants. Lorsqu'il s'agit d'évaluer la biologie synthétique sous un angle éthique, la question de la définition de la vie prend une importance capitale. Cette question s'est certes posée en rapport avec d'autres technologies, mais pas d'une façon aussi pressante que pour certains objectifs de la biologie synthétique.

Avec l'acte d'institution du 28 avril 1998, le Conseil fédéral a confié la mission à la CENH, en qualité de commission consultative permanente, d'observer et d'évaluer du point de vue éthique les avancées et les applications de la biotechnologie dans le domaine non humain. Elle prend position sur les

questions scientifiques et sociales qui y sont liées et conseille le Conseil fédéral et l'administration fédérale en matière de législation¹. La CENH est constituée de 12 membres venant de différents domaines et dont la majorité sont des spécialistes de l'éthique, de la philosophie, et de la théologie. Les domaines de la biologie, de la biologie moléculaire, de la génétique, de la médecine et du droit sont aussi représentés. Les membres et le président sont choisis ad personam². La composition de la commission doit garantir la représentation équilibrée de différentes approches éthiques dans ses délibérations. La CENH est assistée dans ses travaux par un secrétariat scientifique; elle peut en outre recourir aux connaissances spécialisées d'experts externes et mandater des expertises.

Afin de préparer le présent rapport, la CENH a invité divers experts à donner des conférences et des entretiens et mandaté des études. Pour avoir un premier aperçu de l'utilisation de la notion de vie dans le discours philosophique, la CENH a mandaté Andreas Brenner, chargé de cours de philosophie à l'Université de Bâle, de réaliser une étude,

- 1 L'entrée en vigueur de la loi de 2003 sur l'application du génie génétique au domaine non humain (loi sur le génie génétique, LGG, RS 814.91) a donné à la CENH une nouvelle base légale à son mandat dans l'art. 23.
- 2 La description du mandat, la composition actuelle, les prises de position et les publications de la CENH peuvent être consultés à l'adresse www.ekah.admin.ch.



parue en 2007 sous le titre *Leben – Eine philosophische Untersuchung* (La vie. Une analyse philosophique)³ dans la collection *Contributions à l'éthique et à la biotechnologie*⁴. En 2007, Anne Eckhardt, de risicare GmbH, Zurich, a rédigé un rapport sur l'organisation et les objectifs de la biologie synthétique⁵. Sven Panke, professeur à l'*Institut für Verfahrenstechnik* de l'EPFZ a présenté à la CENH une introduction à la biologie synthétique en septembre 2007. A la fin de la même année, la commission a attribué deux autres mandats externes. Le premier, confié à Giovanni Maio, professeur à l'*Institut für Ethik und Geschichte der Medizin* de l'Université de Freiburg in Brisgau, visait à créer une cartographie des problèmes éthiques de la biologie synthétique. Rédigée avec la collaboration de Joachim Boldt et Oliver Müller, cette étude, intitulée *Synthetische Biologie – Eine ethisch-philosophische Analyse* (Biologie synthétique: une analyse éthico-philosophique)⁶, a paru en 2009 dans la collection de la CENH. Le deuxième mandat, mené par Bernard Baertschi, membre de la CENH et maître d'enseignement et de recherche à l'Institut d'éthique biomédicale de l'Université de Genève, a consisté en une expertise relative au statut moral des êtres vivants artificiels. Cette étude a elle aussi paru en 2009 dans la collection *Contributions à l'éthique et à la biotechnologie* sous le titre *La vie artificielle – Le statut moral des êtres vivants artificiels*⁷. Dans l'intervalle, les membres de la CENH ont débattu avec Beda Stadler, professeu-

re de la vie. Frederick Meins, professeur émérite au *Friedrich Miescher Institute (FMI) for Biomedical Research* à Bâle a apporté des précisions aux membres de la CENH sur le rôle de l'épigénétique et sur ses causes. Joachim Frey, professeur à l'Institut de bactériologie vétérinaire de l'Université de Berne et membre de la Commission fédérale d'experts pour la sécurité biologique (CFSB) a répondu aux questions de la CENH sur l'utilisation de microorganismes, en particulier *Mycoplasma sp*, comme modèles en biologie synthétique. Enfin, Kurt Hanselmann, membre de swiss i-research and training et collaborateur du groupe *Microbial Ecology* de l'Université de Zurich, a présenté un exposé sur le rôle des microorganismes, leur comportement et leurs fonctions dans l'écosystème.

3 Andreas Brenner, *Leben – Eine philosophische Untersuchung*, Contributions à l'éthique et à la biotechnologie, volume 3, CENH, Berne, 2007.

4 Dans la collection Contributions à l'éthique et à la biotechnologie, la CENH publie (en langue originale) des rapports d'experts qu'elle a mandatés. Ces rapports jettent les bases de la discussion des aspects éthiques de la biotechnologie et servent de documents de travail à la CENH. Les livres de cette collection sont disponibles auprès de l'Office fédéral des constructions et de la logistique (www.bundespublikationen.ch) ou en librairie. Le texte intégral des publications peut également être téléchargé gratuitement en format pdf sur le site Internet de la CENH (www.ekah.admin.ch).

5 Anne Eckhardt, *Synthetische Biologie. Organisation und Ziele*, Rapport pour la CENH, 2008, (<http://www.ekah.admin.ch/fr/documentation/expertises-externes/index.html>; en allemand).

6 Joachim Boldt, Oliver Müller, Giovanni Maio, *Synthetische Biologie – Eine ethisch-philosophische Analyse*, Contributions à l'éthique et à la biotechnologie, volume 5, CENH, Berne, 2009.

7 Bernard Baertschi, *La vie artificielle – Le statut moral des êtres vivants artificiels*, Contributions à l'éthique et à la biotechnologie, volume 6, CENH, Berne, 2009.



2 La notion de biologie synthétique telle qu'elle est utilisée par la communauté scientifique

Avant de pouvoir évaluer sous un angle éthique la biologie synthétique, ses objectifs et ses répercussions, il convient dans un premier temps de préciser quel est l'objet de cette discipline scientifique. Ce qui frappe au premier abord, c'est la multiplicité des significations de la notion de biologie synthétique, non seulement dans l'usage courant mais aussi dans le langage technique. Ainsi, alors que certaines définitions limitent l'objectif de la biologie synthétique à comprendre « les exigences minimales des processus vitaux »⁸, d'autres parlent d'utiliser cette discipline pour créer des systèmes vivants jusqu'ici inexistants à l'état naturel. Il s'agirait par exemple de concevoir et générer des organismes vivants capables d'accomplir des fonctions nouvelles grâce à l'assemblage d'éléments cellulaires et de modules spécifiques. Certains chercheurs envisagent également la possibilité de fabriquer de toutes pièces ou de modifier des formes de vie à partir d'éléments d'ADN standardisés, voire de créer la vie sur la seule base d'éléments chimiques et de schémas d'assemblage fournis par des séquences ADN. En 2003, Steven A. Benner

décrivait notamment cette revendication de la biologie synthétique dans la revue *Nature* en ces termes :

*« To a synthetic biologist, life is a special kind of chemistry, one that combines a frequently encountered property of organic molecules (the ability to undergo spontaneous transformation) with an uncommon property (the ability to direct the synthesis of self-copies), in a way that allows transformed molecular structures themselves to be copied. Any chemical system that combines these properties will be able to undergo Darwinian selection, evolving in structure to replicate more efficiently. In a word, <life> will have been created. »*⁹

Même si Steven A. Benner parle de créer la vie, il n'est pas surprenant qu'il mette le mot « vie » entre guillemets. En effet, une des questions centrales à l'évaluation éthique est la manière de qualifier le produit de la biologie synthétique. Est-ce réellement la vie qui est fabriquée ? Pour répondre à cette question, il convient d'abord de savoir ce qu'est la vie. Andreas Brenner remarque que les scientifiques évitent

⁸ Cf. http://www.ethz.ch/news/ethupdate/2007/070619_1/index (en allemand).

⁹ Steven A. Benner, *Synthetic biology: Act natural*. Dans : *Nature*. Vol. 421, 9 janvier 2003, p. 118 (cité par A. Brenner, *Leben*, 2007, p. 158) (en anglais). – Traduction : « Pour un biologiste synthétique, la vie est une forme de chimie particulière qui associe une propriété courante des molécules organiques (la capacité de se modifier spontanément) à une propriété inhabituelle (la capacité d'auto-réplication) de telle sorte que les structures moléculaires modifiées soient elles-mêmes aptes à se répliquer de façon autonome. Tout système chimique associant ces propriétés sera capable de sélection darwinienne et pourra évoluer structurellement afin de se répliquer plus efficacement. En d'autres termes, la « vie » aura été créée. »



souvent de répondre à cette question. Il en va en revanche autrement chez les pionniers de la biologie synthétique. Ainsi, Jack W. Szostak, David P. Bartel et Pier Luigi Luisi s'attelèrent en 2001, toujours dans la revue *Nature*, à une tentative de définition, tout en reconnaissant qu'une telle entreprise comportait de grandes difficultés¹⁰.

« We can consider life as a property that emerges from the union of two fundamentally different kinds of replicating systems: the informational genome and the three-dimensional structure in which it resides. »¹¹

Ce qui frappe dans les définitions actuelles de la biologie synthétique telles qu'utilisées par la communauté scientifique elle-même, c'est qu'elles évitent en général le terme « vie », lui préférant celui de « systèmes biologiques ». L'accent est mis sur le caractère technique de la discipline. Ainsi, le projet TESSY¹² de l'Union européenne définit la biologie synthétique comme suit:

« Synthetic biology aims to 1. engineer and study biological systems that do not exist as such in nature, and 2. use this approach for i) achieving better understanding of life processes, ii) generating and assembling functional modular components, or iii) develop novel applications or processes. »¹³

Cette définition de la biologie synthétique est si large qu'elle inclut les organismes génétiquement modifiés. Elle est par conséquent muette sur ce qui est nouveau dans la biologie synthétique par rapport au génie génétique. Sur le site Internet de la conférence *Synthetic Biology 4.0 Conference* organisée en octobre 2008 à Hong Kong, la biologie synthétique est décrite comme suit:

« Synthetic Biology is a new approach to engineering biology, with an emphasis on technologies to write DNA. Recent advances make the de novo chemical synthesis of long DNA polymers routine and precise. Foundational work, including the standardization of DNA-encoded parts and devices, enables them to be combined to create programs to control cells. »¹⁴

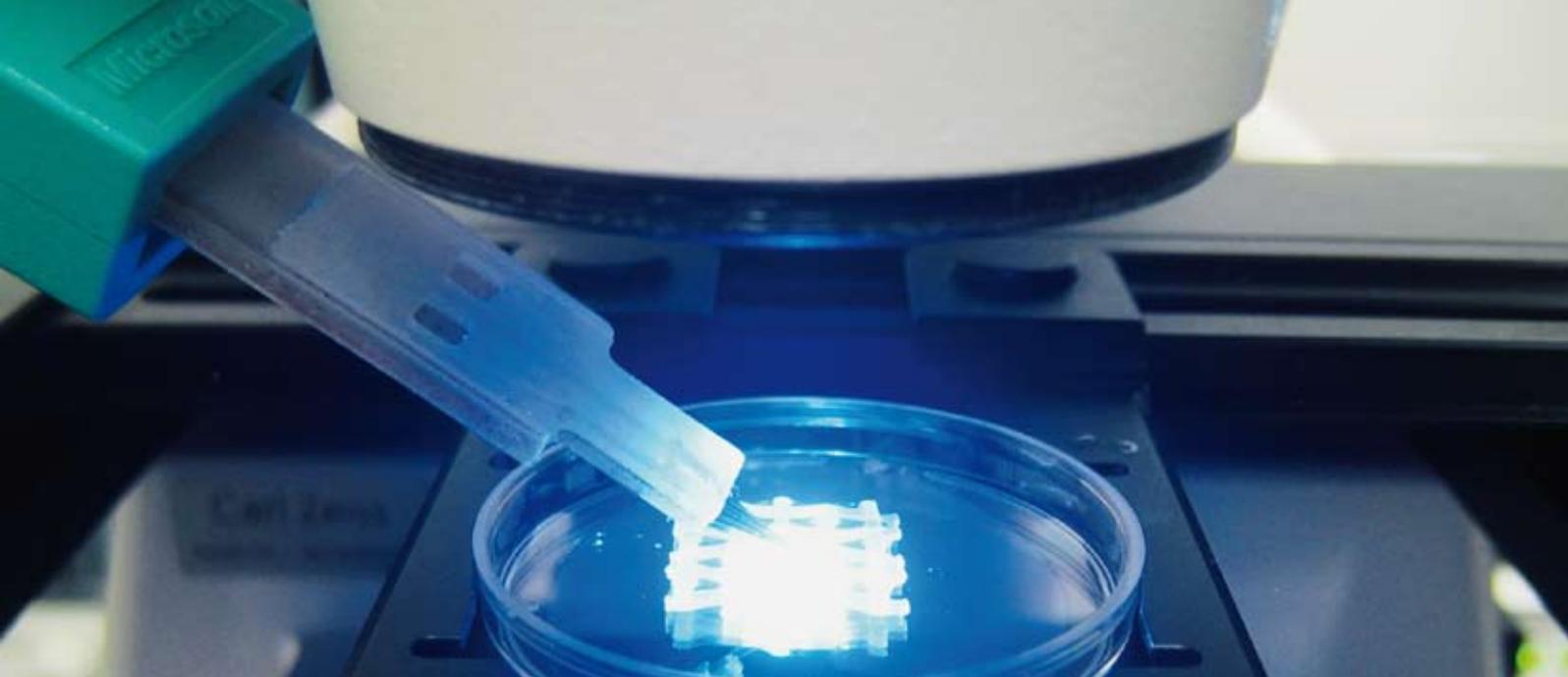
10 Andreas Brenner, *Leben – Eine philosophische Untersuchung*, 2007, p. 156.

11 Jack W. Szostak, David P. Bartel et Pier Luigi Luisi, *Synthesizing life*. Dans: *Nature*: Vol. 409, 18 janvier 2001, p. 387 (cité par A. Brenner, *Leben*, 2007, p. 156). – Traduction: « On peut considérer la vie comme une propriété résultant de la combinaison de deux systèmes de répllication fondamentalement différents: le génome en tant que source d'information et la structure tridimensionnelle dans laquelle il se trouve. »

12 TESSY est l'abréviation de *Towards a European Strategy for Synthetic Biology*.

13 cf.: www.tessy-europe.eu/public_docs/TESSY-final-Report_D5-3.pdf (en anglais). – Traduction: « La biologie synthétique vise 1. A fabriquer et à analyser des systèmes biologiques qui ne sont pas présents en tant que tels dans la nature et 2. à recourir à cette approche pour i) mieux comprendre les processus vitaux, ii) générer et assembler des éléments modulaires fonctionnels ou iii) développer de nouvelles applications ou processus. »

14 cf. *Synthetic Biology 4.0 Conference*, 10–12 octobre 2008, Hong Kong University of Science & Technology, <http://sb4.biobricks.org/field> (en anglais). La 5^e Conférence sur la biologie synthétique est actuellement en préparation: <http://syntheticbiology.org/Conferences.html>. – Traduction: « La biologie synthétique est une nouvelle approche de la biotechnologie qui met l'accent sur les technologies d'écriture de l'ADN. Les récentes avancées permettent la néosynthèse précise et de routine de longs polymères d'ADN. La recherche fondamentale, y compris la standardisation d'éléments et de structures d'ADN codés, permet de combiner ces polymères afin de développer des programmes de contrôle cellulaires. »



A la question de savoir en quoi la biologie synthétique est nouvelle par rapport au génie génétique, les auteurs du site Internet répondent ceci :

« Synthetic Biology builds on tools that have been developed over the last 30 years. Genetic engineering has focused on the use of molecular biology to build DNA (for example, cloning and PCR) and automated sequencing to read DNA. Synthetic Biology adds the automated synthesis of DNA, the setting of standards and the use of abstraction to simplify the design process. »¹⁵

La standardisation et l'automatisation de la fabrication de systèmes biologiques constituent ainsi à la fois le cœur même de la biologie synthétique et la condition *sine qua non* pour lui permettre d'atteindre ses objectifs, c'est-à-dire de concevoir et de fabriquer ou de reproduire des composants et systèmes biologiques nouveaux ou existants. Comme on lit sur le site Internet syntheticbiology.org :

- « Synthetic biology refers to both :*
- the design and fabrication of biological components and systems that do not already exist in the natural world,*
 - the re-design and fabrication of existing biological systems. »¹⁶*

¹⁵ Cf. *Synthetic Biology 4.0 Conference*, 10-12 octobre 2008, Hong Kong University of Science & Technology (<http://sb4.biobricks.org/field>). – Traduction: « La biologie synthétique s'appuie sur des techniques mises au point au cours des 30 dernières années. Tandis que le génie génétique mettait l'accent sur l'utilisation de la biologie moléculaire pour fabriquer de l'ADN (par ex. clonage et PCR) et sur l'automatisation du séquençage de l'ADN dans le but de le lire, la biologie synthétique y ajoute l'automatisation de la synthèse de l'ADN, la standardisation et l'utilisation de l'abstraction pour simplifier le processus de conception. ».

¹⁶ Cf. <http://syntheticbiology.org/FAQ.html>. (Ce site Internet est actualisé grâce aux contributions de tous les membres de la *Synthetic Biology Community*.) – Traduction: « La biologie synthétique désigne aussi bien la conception et création d'éléments ou de systèmes biologiques n'existant pas dans la nature que la reconception et fabrication de systèmes biologiques existants. »



3 La biologie synthétique : un domaine d'activité présentant une multitude d'objectifs et de méthodes

La biologie synthétique vise en premier lieu à concevoir et à fabriquer des éléments et systèmes biologiques n'existant pas dans la nature ou à reconstruire et à reproduire des systèmes biologiques existants. Diverses méthodes sont utilisées pour atteindre ces objectifs. On a coutume de distinguer essentiellement trois approches couvertes par la notion de biologie synthétique.

La première approche est aussi appelée le **modèle du châssis**. Suivant une approche descendante (en anglais, « top-down »), le génome d'un être vivant existant est réduit à un minimum, de sorte qu'en conditions de laboratoire, il ne dispose plus que des composantes essentielles pour assurer une permanence minimale du système et un métabolisme de base. Des modules synthétiques sont ensuite intégrés dans cet organisme minimal, afin que l'être vivant assure les nouvelles fonctions souhaitées, par exemple produire une substance déterminée. A l'heure actuelle, l'application de ce modèle se limite aux bactéries et aux virus. Etant donné que l'on travaille dans ce modèle avec des êtres vivants existants

que l'on dote de nouvelles propriétés, cette forme de biologie synthétique peut être considérée comme une forme « extrême » de génie génétique.

Dans la deuxième approche, ou **modèle du lego**, des biobriques (segments d'ADN fonctionnels définis) sont assemblées dans une approche ascendante (bottom-up) afin de produire de nouveaux types d'êtres vivants. Des systèmes chimiques sont ainsi mis en place progressivement, jusqu'à présenter certaines propriétés des êtres vivants. Ce modèle recourt à une technique qui ne s'appuie pas sur des êtres vivants existants et va donc au-delà du génie génétique, ce qui lui vaut la désignation de « biologie synthétique absolue ».

La troisième approche, la **synthèse de séquences d'ADN**, qui recouvre par exemple l'assemblage de séquences, aussi bien nouvelles qu'existantes, est, elle aussi, incluse dans la notion de biologie synthétique telle que nous l'avons vue ci-dessus, au travers de la définition de ses objectifs.



4 Applications de la biologie synthétique

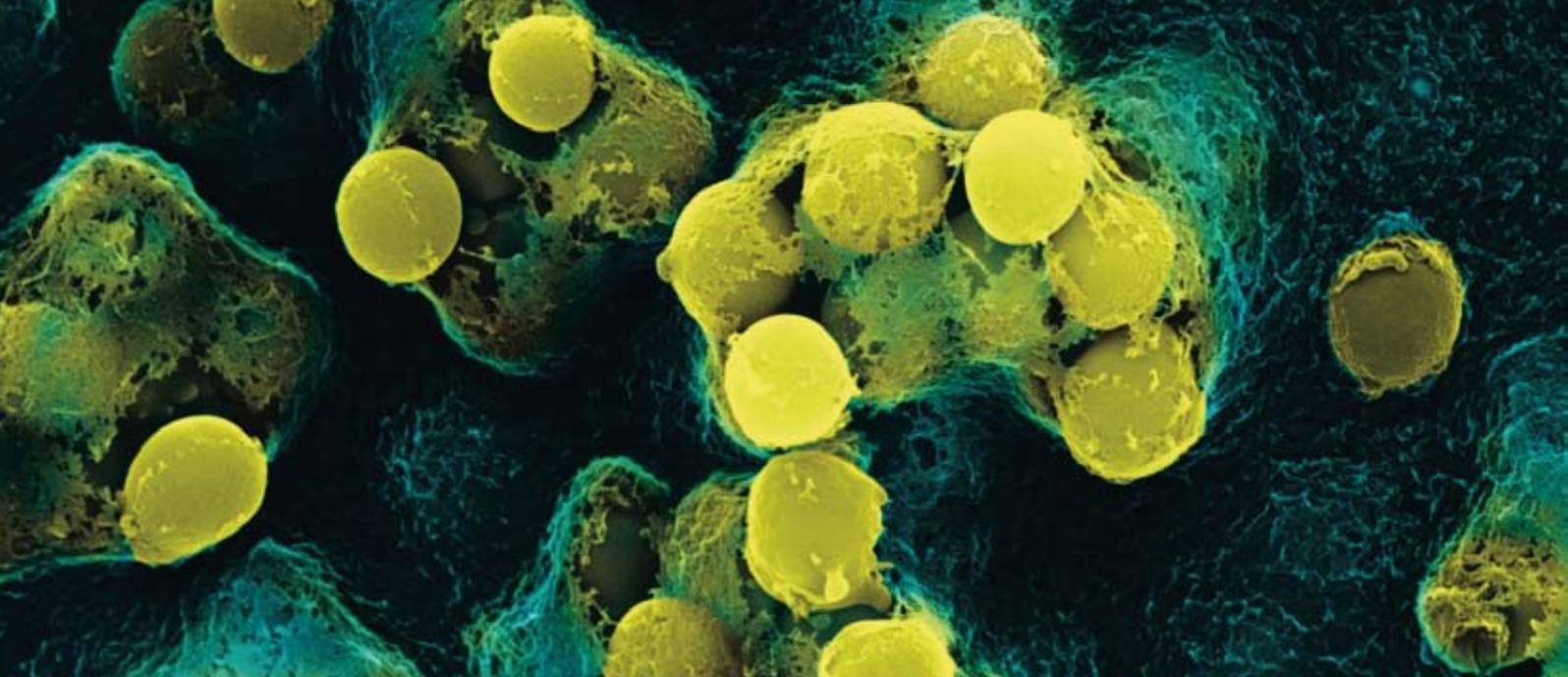
La liste ci-dessous présente une sélection des applications évoquées à ce jour pour la biologie synthétique¹⁷.

- **Production d'énergie:** transformation de matières premières renouvelables en énergie par des cellules synthétisées artificiellement.
- **Production de matériaux:** conception de cellules recombinantes à même de former des précurseurs chimiques pour la fabrication de plastiques ou de textiles, par exemple de la soie d'araignée ou des substituts aux produits pétrochimiques.
- **Production de médicaments** à prix avantageux par des bactéries et des levures synthétiques: citons à titre d'exemple l'artémisinine, à action antipaludique, ou l'atorvastatine (Lipitor®), utilisé pour réduire le taux de cholestérol.

- **Médecine:** programmation de cellules à des fins thérapeutiques, par exemple modification de bactéries ou de cellules T afin de les rendre aptes à circuler dans l'organisme pour identifier et traiter les cellules et tissus malades.
- **Applications militaires:** mise au point de nouvelles armes biologiques ou lutte contre celles-ci.
- **Technologie environnementale:** utilisation, par exemple, de bactéries fixant le CO₂ pour contribuer à réduire la teneur de ce gaz dans l'atmosphère.
- **Technologie en général:** simulation et étude de réseaux biologiques complexes sur ordinateur grâce aux avancées de la biologie synthétique, rendant ainsi possible, espère-t-on, la conception et le développement sur ordinateur (« *in silico* ») de principes actifs capables d'influencer ces mêmes réseaux biologiques.

Les seules applications commercialisées à ce jour sont la production du médicament antipaludique artémisinine et l'atorvastatine utilisé pour réduire le taux de cholestérol. C'est l'approche du châssis qui a été utilisée, soit une forme de génie génétique. Toutes les autres applications ne sont que musicale d'avenir. Cependant, l'évaluation éthique se doit de prendre en compte non seulement ce qui a déjà été fait, mais aussi ce qui est envisagé et espéré, soit, dans le cas présent, la fabrication contrôlée de nouveaux êtres vivants et la maîtrise de leurs fonctions.

¹⁷ Cf. <http://sb4.biobricks.org/field> (*Synthetic Biology 4.0 Conference*, 10–12 octobre 2008, Hong Kong University of Science & Technology) ou, pour une vue d'ensemble des projets de biologie synthétique en cours en Europe, <http://www.synbiosafe.eu/index.php?page=other-sb-projects> (en anglais).



5 Le projet de la biologie synthétique

La biologie synthétique entend fabriquer de nouveaux êtres vivants dans le cadre d'un processus contrôlé et ensuite maîtriser leurs fonctions. Comment juger de ce projet sous l'angle éthique? Pour pouvoir répondre à cette question, il importe de discuter tous ses éléments séparément: qu'entend-on par «nouveaux êtres vivants»? Que veut dire «fabriquer»? Que doit-on comprendre par la notion de «contrôlabilité»?

5.1 La notion de nouveaux êtres vivants

Que faut-il comprendre par les *nouveaux êtres vivants* que le modèle du lego parle de fabriquer? A l'instar des autres approches de la biologie synthétique, le modèle du lego utilise des molécules préexistantes. Il subsiste par conséquent toujours une référence à quelque chose d'existant. Le terme «nouveau» ne veut donc pas dire que les produits du modèle du lego sont créés *ex nihilo*¹⁸.

«Nouveau» signifie-t-il alors «inédit»? Ce qui distingue la biologie synthétique du génie génétique n'est pas

qu'elle fabrique des êtres inédits mais bien, dans le cas du modèle du lego, comment elle les fabrique. Plutôt que de modifier des êtres existants, elle prétend construire un organisme vivant à partir d'éléments inanimés. A l'argument que des êtres vivants de ce type n'ont jamais existé, on pourrait répondre que la biologie synthétique ne fait que répéter, aussi bien avec le modèle du châssis qu'avec celui du lego, ce que réalise l'élevage depuis des dizaines de milliers d'années et le génie génétique depuis cinquante ans (en franchissant cette fois la barrière de l'espèce). Ainsi, certaines races de chiens, comme le teckel, n'existaient pas avant que les êtres humains n'en fassent l'élevage.

Troisième signification possible: «nouveau» voudrait dire que ces êtres vivants, suivant la vision de certains biologistes synthétiques, sont créés, tout ou partie, à partir de matière inorganique. Cela impliquerait l'utilisation d'éléments ou composés chimiques qui relevaient jusqu'ici de la chimie dite «inorganique». Ce terme qualifie les substances et réactions chimiques qui ne sont pas d'origine biologique,

¹⁸ La critique du modèle du lego comme la tentation de «vouloir jouer à Dieu» présuppose une vision du monde profondément judéo-chrétienne selon laquelle Dieu aurait créé la matière à partir du néant. Les autres religions ne connaissent pas la création sous cette forme et même des courants de la philosophie gréco-romaine de l'Antiquité partent de l'idée que la matière est éternelle.



alors que le mot « organique » désigne les composés carbonés. Ainsi, tant que les projets basés sur le modèle du lego continueront à faire usage de composés carbonés existants, ils ne créeront rien de nouveau en ce sens. Pour que cela soit le cas, il faudrait par exemple synthétiser des êtres vivants à partir de silicium au lieu de carbone.

Enfin, on peut comprendre le terme « nouveau » de la façon suivante : pour la première fois, des êtres vivants sont fabriqués comme des machines, c'est-à-dire conçus sur une planche à dessin, puis assemblés.

5.2 La notion de fabriquer

L'objectif du modèle du lego est de synthétiser (c'est-à-dire assembler) des êtres vivants à partir d'éléments moléculaires, *fabriquant* ainsi des êtres vivants. Mais qu'entend-on exactement par « fabriquer » ou « créer » des êtres vivants ?

Pour certains, ces termes signifient simplement utiliser les techniques de la biologie synthétique *pour réunir les conditions nécessaires à la vie*. Cependant, pour d'autres, les utiliser ainsi n'est pas compatible avec leur portée courante. En effet, dans ce contexte, « créer » ne peut être compris autrement que *fabriquer la vie comme un produit*. Or, objectent les critiques, cette acception réduirait la fabrication des êtres vivants à un processus purement mécanique et physique, niant l'essence même de la vie. Si, de plus, la biologie synthétique elle-même se prétend inscrite dans la tradition de

l'ingénierie, laquelle associe la technique à l'art, la notion de fabrication s'enrichit d'un élément de conception créative, artistique. Pour peu que vienne encore s'y ajouter l'idée de création, alors la critique de la biologie synthétique ne vise pas seulement le langage qu'elle utilise, mais aussi son projet – pouvoir modifier et contrôler la nature biologique dans la tradition technique.

5.3 La notion de contrôlabilité

La biologie synthétique prétend transformer (modèle du châssis), voire reconstruire (modèle du lego), des êtres vivants, au moyen d'un processus contrôlé et dans un but précis, c'est-à-dire de façon prévisible et maîtrisable. Cette revendication peut également inclure l'idée que les produits obtenus seront eux aussi contrôlables. Savoir si cela est possible importe surtout pour l'éthique des risques (cf. 7). Pour l'instant, il ne s'agit que de l'idée de pouvoir fabriquer des êtres vivants dans le cadre d'un processus contrôlé. Comment considérer ce projet ?

Les critiques reprochent à la biologie synthétique leur approche mécaniste de la vie, réduite à la somme de ses éléments constitutifs. Une telle conception relèverait d'une perception étroite de la vie. Le projet de pouvoir en principe contrôler complètement des organismes, tant leur existence que leurs fonctions, ne s'applique pas seulement aux microorganismes, mais s'étend à tout les êtres vivants. Selon ses détracteurs, cette conception réductionniste de la vie démontre que



la biologie synthétique ne vise pas en premier lieu à mieux comprendre les êtres vivants, mais bien à les contrôler davantage et, partant, à les instrumentaliser.

Les arguments ne manquent pas pour contrer ces critiques : premièrement, il incombe aux scientifiques d'acquiescer des connaissances. Or, les liens de causalité sur lesquels repose la vie sont par essence accessibles aux sciences naturelles. Deuxièmement, il se pourrait que les connaissances fonctionnelles suffisent à permettre la pratique de la biologie synthétique aux plans expérimental et technique. Il ne serait alors pas nécessaire de savoir ce qu'est la vie pour faire de la biologie synthétique et encore moins pour évaluer ses répercussions sous l'angle éthique. A la critique que la biologie synthétique vise l'instrumentalisation des êtres vivants, on pourrait répondre que l'approfondissement des connaissances sur les êtres vivants et l'applicabilité technique de ces connaissances vont de pair. Ce lien n'exige pas de renoncer à l'application, mais de toujours exercer de manière responsable le pouvoir associé à cette maîtrise technique.

5.4 Différentes conceptions ontologiques de la vie

Est-il par essence possible de fabriquer des êtres vivants de façon contrôlée et, si oui, dans quelle mesure? Notre réponse à cette question dépendra sur quelle conception de vie repose notre évaluation¹⁹.

Des conceptions ontologiques divergentes de la vie sont aussi représentées au sein de la CENH. Elles s'expriment par des différences de langage. Ainsi, d'aucuns utilisent un langage technique, décrivant la vie comme un ensemble de fonctions (organisation, reproduction, métabolisme, réaction à des stimuli de l'environnement). Ici, ce qui fait la vie peut être expliqué en termes de causalité. D'autres, par contre, recourent à un langage de type systémique et favorisent une approche herméneutique. Selon ce point de vue, une simple description de fonctions n'est pas suffisante pour définir la vie. D'autres considérations sont encore nécessaires.

Ces approches différentes, et la signification que chacune attribue à la vie, sont inconciliables. Elles ne peuvent pas non plus simplement coexister passivement, car toutes deux prétendent à la même chose, à savoir expliquer ce qu'est la vie. Selon la conception ontologique qui considère que la vie peut être complètement expliquée en termes de causalité, les connaissances fonctionnelles suffisent pour évaluer convenablement comment traiter les êtres vivants. Les tenants de l'autre conception, en revanche, n'acceptent pas cette vision des choses. Pour eux, il est exclu de pouvoir appréhender ce qu'est la vie sur la seule base des connaissances fonctionnelles. Il faut un autre savoir, accessible uniquement par le biais de l'herméneutique, si l'on veut pouvoir utiliser les êtres vivants de façon éthiquement acceptable.

19 Même si la définition de TESSY par exemple parle de systèmes biologiques et non de vie, le débat relatif à la définition de la vie n'est pas inutile. En effet, la notion de « systèmes biologiques » est abstraite et est parfois utilisée comme synonyme de l'idée de « vie ».



La CENH a distingué les positions ontologiques suivantes :

- **Le monisme :** cette doctrine ramène les processus et les phénomènes du monde à une seule réalité fondamentale (ici : naturalisme/matérialisme ontologique). Ce que nous appelons la vie se réfère à des propriétés *purement chimiques et physiques* des êtres vivants ; la vie est ou peut être une propriété émergente des êtres matériels.
- **Le vitalisme :** selon cette doctrine, tout ce qui est vivant est mû par l'action d'un principe vital (*vis vitalis*) au sens de principe autonome, qui explique aussi la singularité de la vie par rapport à ce qui est inanimé. Selon le vitalisme, les organismes *ne sont pas réductibles au jeu des lois physiques et chimiques*. La vie comprend au moins une propriété *inconnue par essence*.
- **Le dualisme :** cette doctrine désigne en général la coexistence ou l'affrontement de deux principes, substances, forces ou définitions, la plupart du temps opposés, irréductibles à l'un ou à l'autre. Le dualisme est également considéré à l'heure actuelle dans le sens d'un « dualisme polaire » comme l'interdépendance des deux éléments²⁰. D'un point de vue dualiste, la vie ne se laisse jamais réduire à des propriétés uniquement matérielles, mais comprend au moins une composante *immatérielle*.

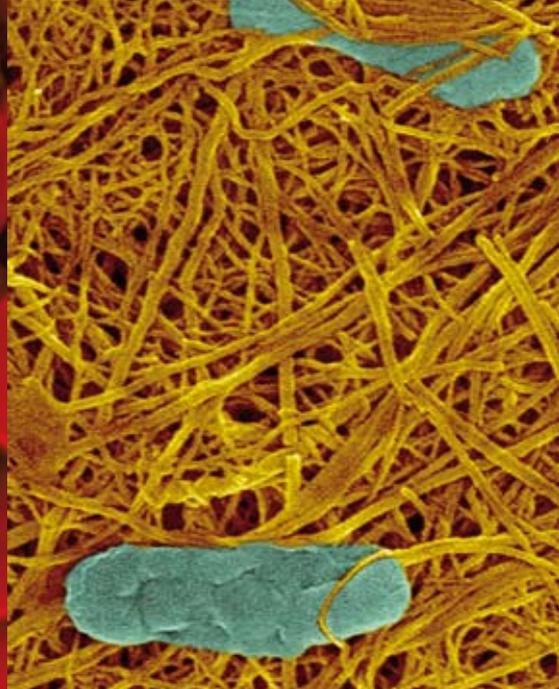
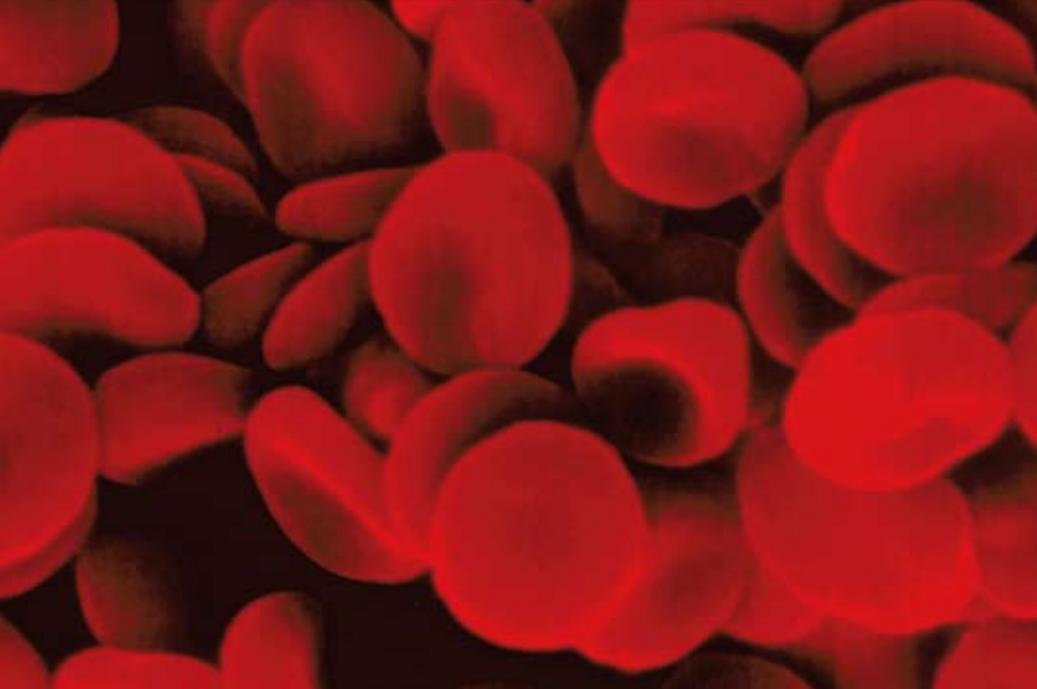
– **Le scepticisme :** le sceptique remet fondamentalement en cause la possibilité d'affirmer quoique cela soit sur la nature de la vie. Selon lui, il vaudrait mieux s'abstenir de toute assertion. Dans sa version modérée, le scepticisme dit qu'il n'est actuellement pas possible de définir ce qu'est la vie.

Les tenants d'une ontologie moniste acceptent que les êtres vivants soient de nature purement matérielle. Ainsi, ils considèrent qu'il n'y a aucune raison fondamentale qui empêche de réussir à fabriquer la vie selon le modèle du lego.

Les tenants du vitalisme ou du dualisme postulent que la vie comprend au moins une propriété immatérielle inconnue. Ils douteront peut-être de la possibilité d'« assembler » des êtres vivants à partir d'éléments inanimés. Selon eux, la nature et l'origine de la vie ne sont pas accessibles à la méthodologie scientifique. Il conviendrait donc de rejeter la revendication de fabriquer la vie de façon contrôlée et dans un but précis.

Enfin, les tenants du scepticisme, qui soutiennent que notre connaissance des êtres vivants se heurte à des limites épistémologiques (même si celles-ci ne sont peut-être que provisoires), supposent qu'il est impossible de savoir ce qu'est la vie et donc de répondre à la question ontologique de sa nature. Par conséquent, les sceptiques doivent s'abstenir de tout jugement sur les produits de la biologie synthétique.

20 Cf. Franz von Kutschera, *Jenseits des Materialismus*, mentis, Paderborn, 2003.



Notons que ni le scepticisme, ni le vitalisme ou le dualisme, n'excluent que les produits du modèle du lego puissent être vivants. Cela pourrait être le cas si l'on observait certaines manifestations de la vie, comme le métabolisme, la reproduction ou l'aptitude à se mouvoir de façon autonome. Mais même celui qui nie que le modèle du lego puisse fonctionner (parce que la fabrication d'êtres vivants serait, par essence, hors de notre portée), n'a pas pour autant justifié l'interdiction de tenter une telle fabrication. Pour interdire la poursuite de cet objectif, certes ontologiquement impossible aujourd'hui selon ces points de vue, mais dont la possibilité ne peut être écartée, il faudrait avancer d'autres arguments.

En définitive, les positions ontologiques susmentionnées laissent toutes ouverte la possibilité que le modèle du lego fonctionne et génère des êtres vivants. Les différences entre doctrines s'affichent dans leur discours sur la contrôlabilité ou l'incontrôlabilité du processus et des produits de la

biologie synthétique. Ces divergences de langage et de point de vue affectent le débat sur l'éthique de la responsabilité.

La moitié des membres de la CENH défend la doctrine moniste, qui constitue donc la position de la **majorité**. Une **forte minorité** adopte une position vitaliste et une **minorité plus petite** une position sceptique. Le dualisme est la position la **plus minoritaire** au sein de la commission.



6 Statut moral des êtres vivants que la biologie synthétique utilise ou produit

Les membres de la CENH s'accordent tous sur un point: pour autant que le modèle du lego fonctionne, ses produits sont des *êtres vivants*. La façon dont ces êtres vivants voient le jour, que ce soit dans le cadre d'un processus naturel ou d'une autre façon, n'a aucune influence sur leur statut moral²¹. La biologie synthétique se concentre actuellement sur les microorganismes que les deux modèles de la biologie synthétique utilisent ou entendent fabriquer en tant que produits. Or, à long terme, elle compte s'intéresser à tous les êtres vivants, à en croire du moins certaines visions de ce domaine. Cependant, c'est bien s'agissant des microorganismes que la question du statut moral des êtres vivants est la plus épineuse.

6.1 Statut moral lié à la valeur morale

Il est légitime de se demander si un débat sur la valeur morale est nécessaire lorsqu'il concerne les microorganismes et si la discussion éthique ne pourrait pas se limiter à des problématiques relatives à l'éthique de la responsabilité. Le contexte constitutionnel dans lequel a lieu ce débat exige néanmoins de préciser cette question de la valeur morale. En effet, l'art. 120 de la Constitution fédérale demande que, lors de l'utilisation des animaux, des végétaux et des autres organismes, soit respectée la dignité ou l'intégrité de la créature²².

Les microorganismes possèdent-ils une valeur morale, c'est-à-dire disposent-ils de ce que l'on appelle une « dignité » ? Les êtres possédant une valeur morale comptent moralement pour eux-mêmes. Si l'on arrive à la conclusion que des organismes possèdent bien une valeur morale, il faudra alors examiner quelles sont nos obligations *directes* à leur égard.

²¹ Les membres suivent sur ce point Bernard Baertschi, qui, dans son étude *La vie artificielle – Le statut moral des êtres vivants artificiels*, 2009, conclut que la genèse des êtres vivants n'influence pas leur statut moral.

²² Constitution fédérale de la Confédération suisse, RS 101, art. 120, Génie génétique dans le domaine non humain, <http://www.admin.ch/ch/fr/rs/101/a120.html>. – L'article 24^{novies}, al. 3, de l'ancienne Constitution fédérale, accepté lors d'une votation populaire en 1992, stipulait qu'il fallait tenir compte de « la dignité de la créature » dans notre rapport aux animaux, aux plantes et aux autres organismes. Dans la version française de la nouvelle Constitution fédérale de 1999, on a toutefois adopté, à l'article 120, une terminologie différente: le terme de « dignité de la créature » a été remplacé par « intégrité des organismes vivants ». Or, intégrité et dignité sont deux notions différentes. Le terme de dignité se réfère à la considération morale et au respect alors que celui d'intégrité se rapporte à la protection d'un ensemble, p.ex. une personnalité ou un gène. Etant donné que la discussion dans les autres langues nationales porte sur le concept de dignité (« Würde der Kreatur » resp. « dignità della creatura »), c'est bien toujours la question de la valeur morale, c'est-à-dire de la valeur des êtres vivants pour eux-mêmes qui reste aussi l'objet du débat en français.



L'attribution ou non d'un statut moral aux microorganismes du fait d'une valeur morale dépend de la position éthique défendue. Les membres de la CENH ont discuté des approches en matière d'éthique de l'environnement les plus couramment évoquées dans la littérature, en mettant particulièrement l'accent sur la question de la valeur morale :

Théocentrisme : théorie fondamentale de la connaissance humaine, de l'éthique et de la nature dans laquelle un dieu (*gr. theos*) est considéré comme principe, mesure et objectif de toute existence, connaissance et action. Selon cette doctrine, la valeur de toute chose résulte de sa création divine. Aussi, à l'instar de tous les autres êtres vivants, les microorganismes possèdent-ils, non pas une valeur morale (pour eux-mêmes), mais une valeur conférée par un dieu. Et c'est en tant que créatures qu'ils doivent être respectés. Or, pour les critiques une telle valeur n'est pas une valeur morale mais relationnelle. Certes, au sein d'un système éthique religieux, l'idée qu'un dieu puisse créer des êtres possédant une valeur morale est défendable. Selon les critiques cependant, il ne s'agirait alors plus de théocentrisme mais d'anthropocentrisme, de pathocentrisme, de biocentrisme ou encore d'écocentrisme.

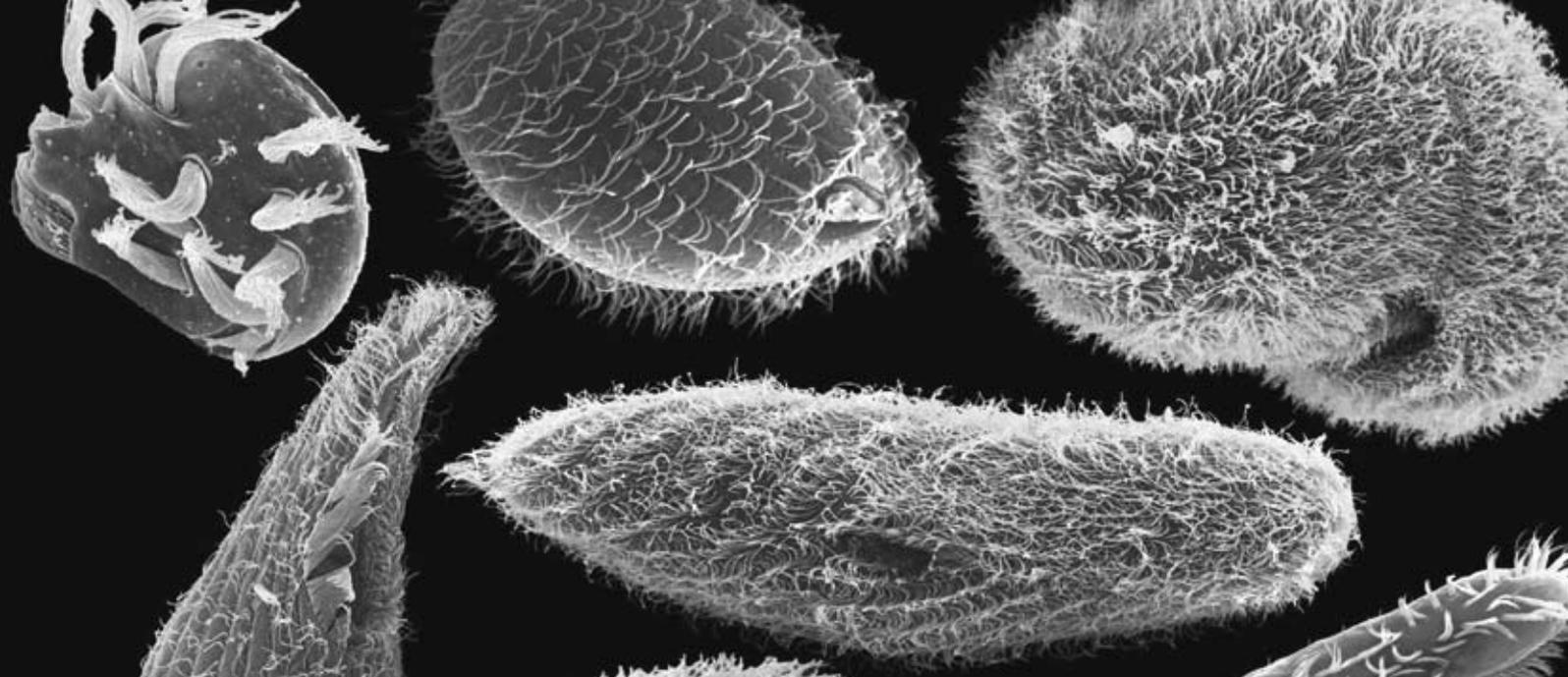
Anthropocentrisme :²³ théorie selon laquelle seul l'homme possède une valeur pour et par lui-même, tandis que les autres organismes vivants n'ont qu'une valeur relationnelle ou instrumentale et non une valeur morale. La

position particulière que l'anthropocentrisme attribue à l'homme provient soit de sa création d'origine divine (cf. théocentrisme), soit de ce qu'il est (potentiellement) doué de raison et de langage et capable d'abstraction. Cette dernière position s'apparente plus exactement au ratiocentrisme. Tous les êtres vivants disposant des mêmes facultés et qualités que les êtres humains appartiennent au groupe d'êtres vivants possédant une valeur morale. Pour aucune de ces deux conceptions la question de la valeur morale des microorganismes n'a de sens.

La perspective anthrop-relationnelle est parfois considérée comme une forme modérée d'anthropocentrisme. Selon cette conception, l'homme se voit attribuer un rôle particulier parce qu'il est le seul être à pouvoir assumer la responsabilité pour d'autres. Les autres êtres vivants comptent moralement en fonction de leur rapport à l'homme. Une variante théologique de cette position insère l'ensemble de cette structure dans un contexte théocentrique. Ici aussi, argumentent les critiques, la valeur dont il est question ici n'est pas morale mais relationnelle : dès qu'une conception défend l'idée selon laquelle les êtres vivants autres que l'homme ont une quelconque valeur morale, on se situe dans le pathocentrisme, le biocentrisme ou l'écocentrisme.

Pathocentrisme : à l'instar de tous les autres êtres vivants, les microorganismes possèdent une valeur morale s'ils peuvent, de quelque façon que ce soit, percevoir une atteinte comme

²³ L'anthropocentrisme épistémologique n'est pas considéré ici. Selon cette conception la réflexion éthique est une activité humaine et seuls les êtres humains peuvent appréhender les valeurs éthiques. Mais l'anthropocentrisme épistémologique est muet sur la façon d'évaluer les autres êtres vivants.



un dommage qui leur est infligé. Cette conception doit pouvoir pour le moins présenter des indices selon lesquels les microorganismes sont capables de percevoir un dommage comme tel.

Biocentrisme: les microorganismes sont des êtres vivants. Or, tous les êtres vivants, et seulement ces derniers, ont une valeur morale. Cette doctrine doit démontrer en quoi les êtres vivants et non vivants se distinguent. Par exemple, le biocentrisme est tout à fait en droit de décrire les virus comme quelque chose d'intermédiaire entre êtres vivants et non vivants; mais il doit alors exposer les critères justifiant un tel classement.

Ecocentrisme: cette vision attribue une valeur morale non seulement aux êtres vivants, mais aussi, et surtout, aux écosystèmes et aux groupes d'êtres vivants. Les microorganismes peuvent avoir une valeur morale aussi bien en tant qu'individus que comme parties d'écosystèmes.

Holisme: seule la nature dans son ensemble possède une valeur morale. Les individus, les groupes et les écosystèmes n'en possèdent pas. Quant aux microorganismes, ils n'ont qu'une valeur instrumentale et ce, uniquement s'ils remplissent une fonction, individuelle ou collective, au sein de cet ensemble.

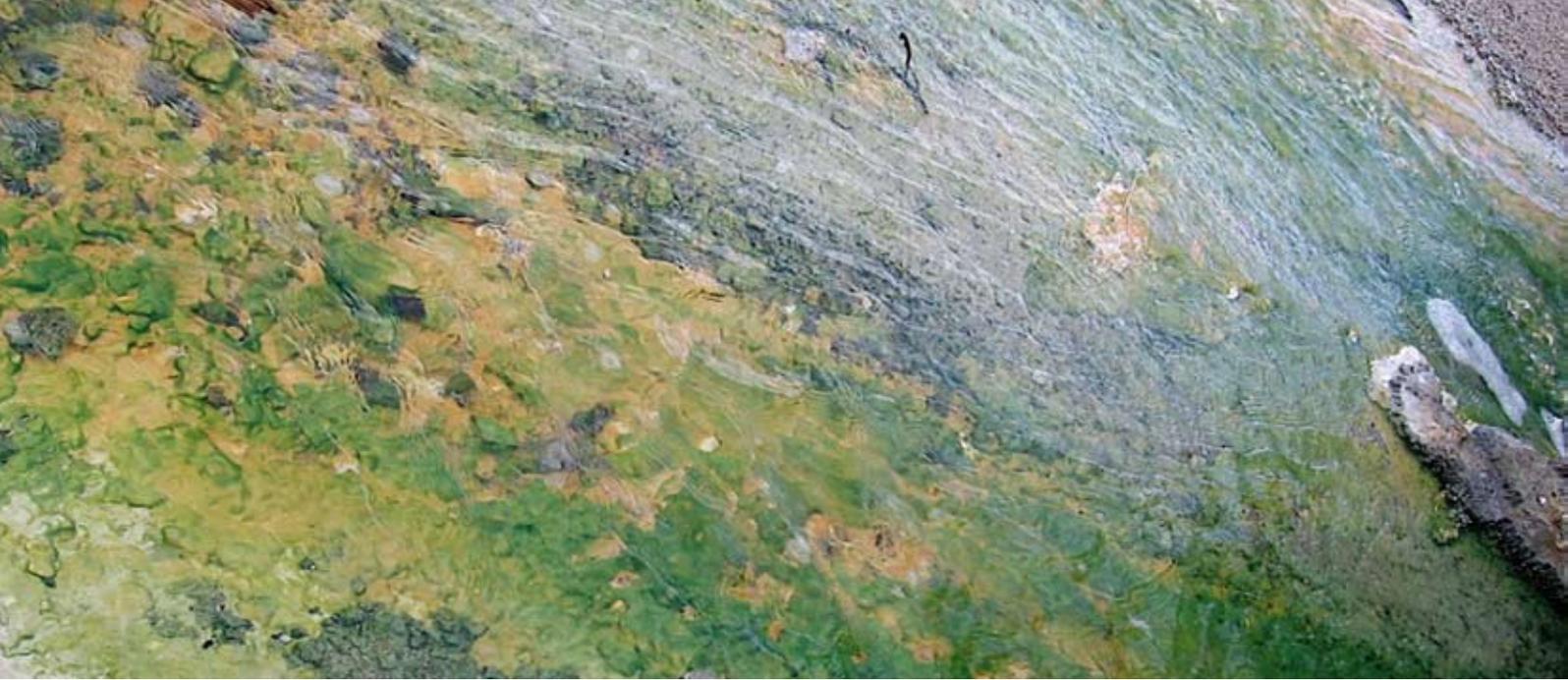
6.2 Statut moral indépendant d'une valeur morale

Il existe aussi des doctrines éthiques qui se passent des notions de « valeur morale » et de « dignité ». C'est la raison pour laquelle il convient de discuter de l'opportunité d'attribuer des droits moraux indépendamment de la nécessité ontologique de posséder une valeur morale ou une dignité. Pour pouvoir attribuer des droits moraux, deux conditions doivent être remplies: premièrement, il faut qu'il y ait des intérêts en jeu et, deuxièmement, il faut que ces intérêts puissent être représentés, ou du moins défendus par un avocat. Toutefois l'attribution d'intérêts ne fait sens qu'en présence d'une forme quelconque de soi.

6.3 Pondération dans une pesée d'intérêts

Nous ne pouvons préjuger des répercussions concrètes sur l'utilisation des microorganismes qu'aurait l'application des doctrines qui leur attribuent une valeur morale ou des intérêts propres. Les conséquences exactes dépendront toujours de l'importance que la pesée d'intérêts accordera à cette valeur morale ou à ces intérêts.

Si l'on postule que les microorganismes comptent du fait de leur valeur morale ou de leurs intérêts, quel poids faut-il alors accorder à ces aspects? C'est cette pondération qui déterminera s'il existe des obligations directes vis-à-vis des microorganismes et, si oui, de quelle nature elles sont. Cette



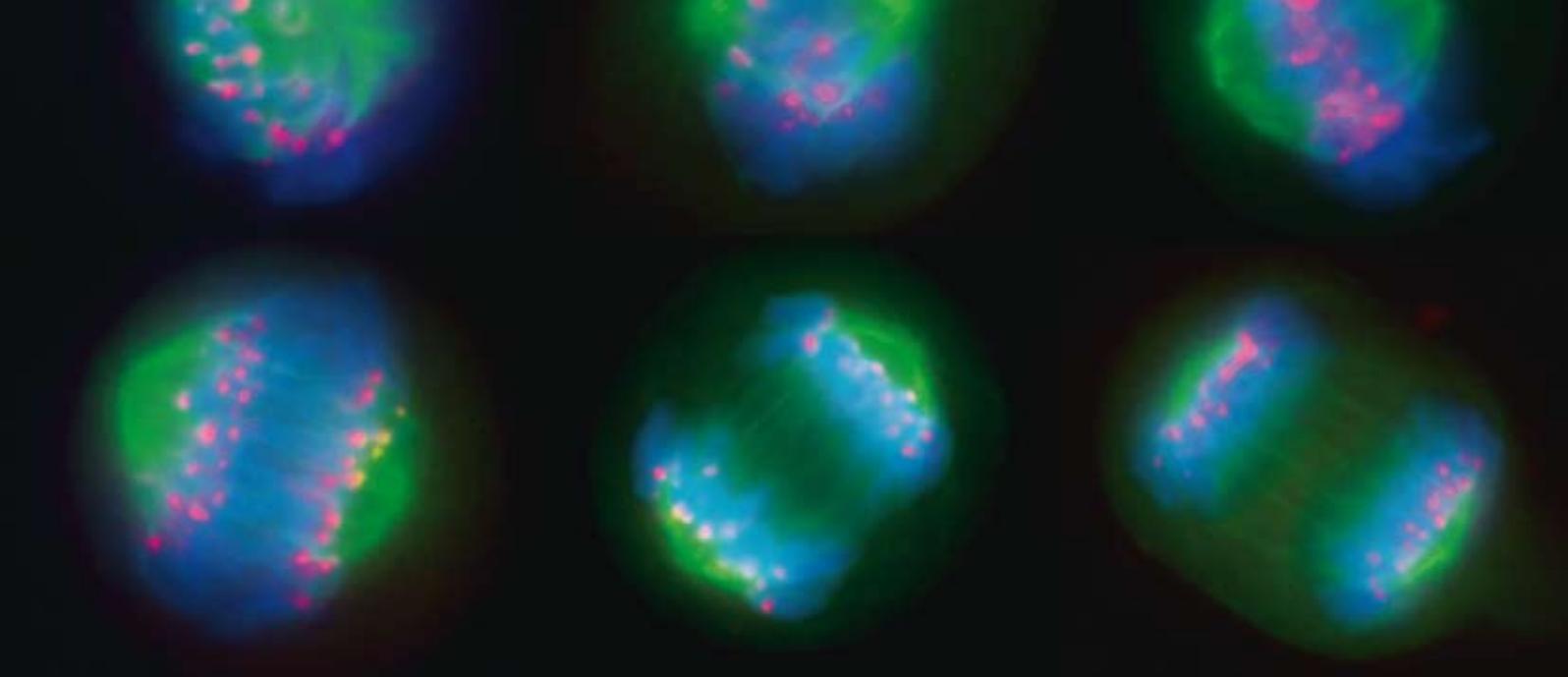
pondération est réalisée selon deux positions différentes :

Selon la position *égalitariste*, tous les êtres vivants méritent un respect moral et se trouvent sur un pied d'égalité. Cette doctrine admet donc que les intérêts des microorganismes sont de même rang que ceux des autres êtres vivants.

Selon la position *hiérarchique*, tous les êtres vivants méritent certes un respect moral, mais ils ne sont pas tous de même rang. Deux critères peuvent alors s'avérer déterminants. D'abord, l'appartenance à l'espèce : les intérêts des êtres humains sont supérieurs à ceux des animaux, lesquels passent avant les plantes qui, elles, priment sur les microorganismes. Ensuite, certaines aptitudes et caractéristiques : leur poids moral est alors proportionnel à leur degré de ressemblance avec les aptitudes et caractéristiques humaines.

La **majorité des membres de la commission** défend une position biocentriste hiérarchique. D'après cette majorité, les microorganismes ont une

valeur morale parce qu'ils sont des êtres vivants. Cependant, le point de vue hiérarchique ne lui attribue qu'un poids négligeable lors d'une pesée des intérêts. Un **premier groupe minoritaire** défend quant à lui une approche pathocentriste. Selon cette minorité, il n'existe aucun indice suggérant que les microorganismes peuvent percevoir un dommage comme tel, de quelque façon que cela soit. Ceux-ci ne possèdent par conséquent aucune valeur morale ni aucun intérêt. La **deuxième position minoritaire** au sein de la commission, **de moindre importance**, est le point de vue hiérarchique anthropo-relationnel : c'est leur relation à l'être humain qui confère une valeur morale aux microorganismes. Reste que cette minorité aussi ne leur attribue qu'un poids négligeable dans une pesée des intérêts éthiques.



7 Réflexions sur l'éthique de la responsabilité

Outre les *obligations directes*, il convient de clarifier quelles obligations indirectes résultent de la fabrication d'organismes artificiels. Quelle est la part de responsabilité qui incombe aux êtres humains en tant que constructeurs de ces êtres vivants, s'agissant des conséquences de cette fabrication ?

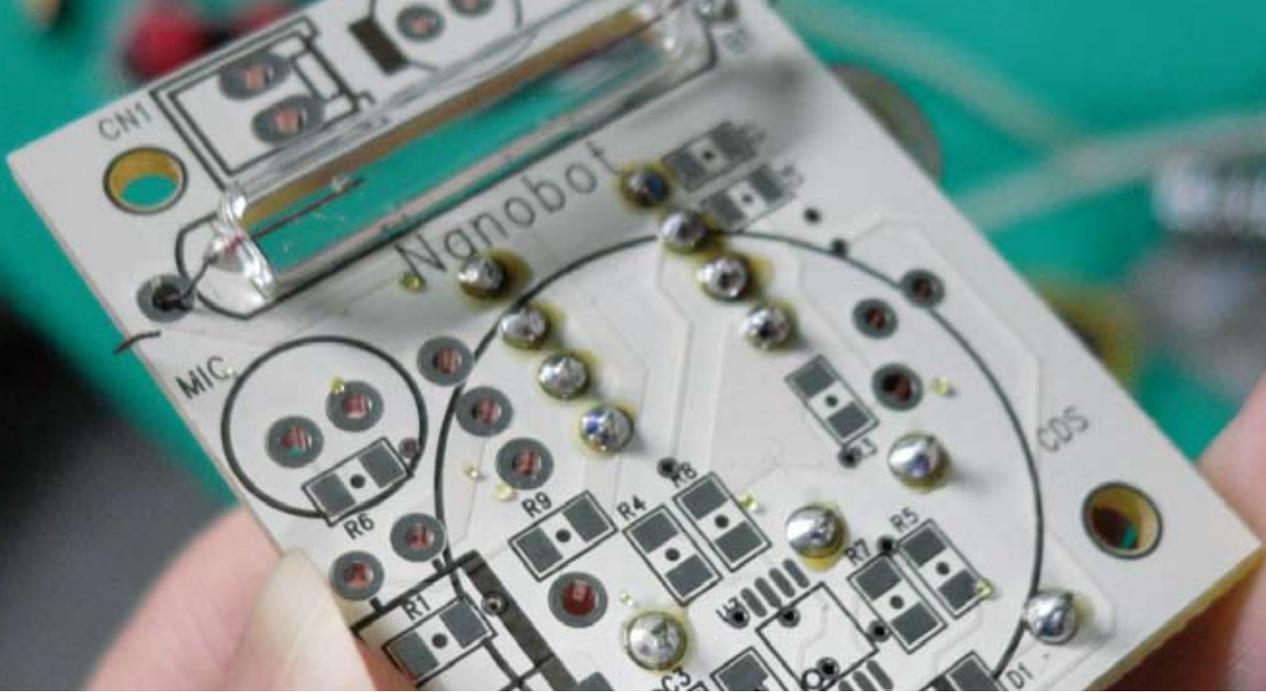
7.1 Comment la biologie synthétique influence-t-elle l'attitude de la société face aux êtres vivants ?

Bien que leur valeur morale soit nulle, ou alors si minime qu'elle en devient concrètement insignifiante dans la pesée des intérêts, et bien que notre empathie à leur égard soit faible, les microorganismes n'en restent pas moins des êtres vivants. N'y a-t-il donc pas un risque, craignent certains, que notre façon de considérer les microorganismes, d'en parler et de les utiliser n'ouvre la voie à un comportement dommageable, ou susceptible de l'être, pour d'autres êtres vivants, y compris nous-mêmes ?

Les critiques, représentés par **une minorité des membres de la CENH**, prétendent que la biologie synthétique entre en conflit avec certaines conceptions fondamentales, qui forment l'attitude de la société face à la technologie, à la culture et à la nature²⁴. Selon ces critiques, la biologie synthétique contribue à imposer une conception mécaniste, c'est-à-dire réductionniste, de la vie, laquelle influence et détermine non seulement la recherche, mais tous les domaines de la vie. Les critiques voient même l'influence de cette conception gagner en importance, que les visions de la biologie synthétique deviennent ou non un jour réalité, pour finalement supplanter d'autres conceptions, plus holistiques, de la vie.

Selon ces mêmes critiques, le mode de pensée qui sous-tend la biologie synthétique est marqué par les sciences de l'ingénieur. Il est l'expression d'une position qui considère les êtres vivants comme fabricables, contrôlables et à notre disposition. La prédominance de cette vision s'explique par son association intime avec des intérêts techniques et économiques.

²⁴ Cf. sur cette critique les explications dans J. Boldt et al., *Synthetische Biologie*, 2009, p. 55 ss. (en allemand)



Or, poursuivent les critiques, une telle attitude change notre perception des autres êtres vivants, notre système de valeurs et notre rapport aux êtres vivants et à la vie en général. Elle pourrait en fin de compte modifier l'image même que les êtres humains ont d'eux-mêmes, au risque de compromettre la dignité humaine.

En réponse à ces critiques, **la majorité des membres de la CENH** oppose divers arguments. Tout d'abord, plusieurs conceptions fondamentales coexistent au sein de la société. Ainsi, la critique de la mentalité mécaniste et réductionniste ne se réfère qu'aux traditions de pensée où la séparation entre les êtres vivants et les machines est centrale. Pour être convaincante, la critique doit pouvoir démontrer en quoi l'approche qui distingue entre machines et êtres vivants est juste et les autres approches, qui ne font pas cette distinction, fausses. Ensuite, il est fait remarquer que le terme « mécaniste » est souvent perçu comme péjoratif, alors que les constructions mécanistes peuvent se révéler très complexes et qu'il n'est possible d'exclure qu'elles possèdent une valeur morale ou des intérêts propres.

Lorsque l'instrumentalisation des êtres vivants est critiquée, on peut objecter qu'elle n'est pas en soi à rejeter d'emblée pour des raisons morales. La dignité humaine elle-même ne l'exclut pas, à preuve l'emploi d'êtres humains en guise de main-d'œuvre ou leur appartenance à une famille. La dignité humaine ne fait que protéger contre une instrumentalisation inadmissible,

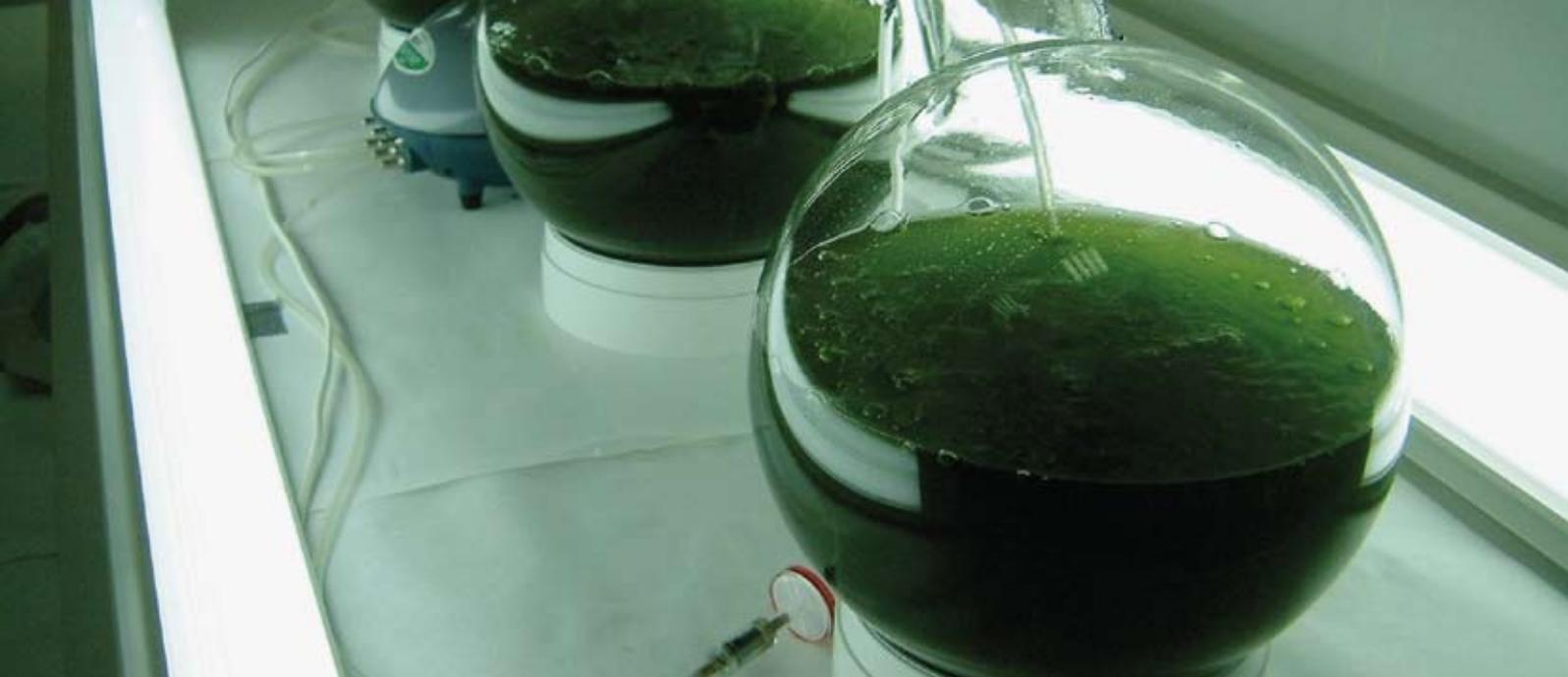
c'est-à-dire exclusive ou excessive. Pour donner du poids à l'argument de la « pente savonneuse », il faudrait pouvoir prouver que l'usage que fait la biologie synthétique des microorganismes exerce bien un impact négatif sur notre rapport aux autres êtres vivants, y compris les êtres humains. Il faudrait aussi démontrer si, et dans quelle mesure, le mode de pensée fondant la biologie synthétique modifie notre perception de ces êtres. A supposer qu'un tel changement se produise et entraîne une transformation de notre approche et de nos rapports aux autres êtres vivants, il serait alors nécessaire d'explicitier en quoi cette évolution est moralement répréhensible. En outre, il faudrait également démontrer qu'elle menace non seulement l'image que les êtres humains ont d'eux-mêmes, mais aussi, en fin de compte, la dignité humaine.

Les membres de la CENH s'accordent à dire que, certes, les arguments de la pente savonneuse sont utiles pour la détection précoce et le suivi des conséquences possibles. Néanmoins, ils ne considèrent pas que les réserves exprimées par les critiques justifient d'opposer un quelconque veto aux projets de biologie synthétique.

7.2 Réflexions sur la justice

Ce n'est pas seulement la biologie synthétique qu'il convient d'examiner sous l'angle de la justice, mais bien toutes les technologies et leurs applications. Or, la justice a plusieurs dimensions. Comme la CENH le mentionnait déjà dans son rapport « Génie génétique

25 CENH, *Génie génétique et pays en développement*, Berne, 2004.



et pays en développement»²⁵, un des principaux devoirs d'une communauté juste consiste à garantir les droits fondamentaux et leur application effective. La façon dont la société répartit les biens matériels et immatériels est également déterminante. Par ailleurs, la justice – au sens de justice procédurale – exige la participation des individus aux processus de prise de conscience sociale et de prise de décision. Comme toutes les autres technologies, il convient de mesurer la biologie synthétique à l'aune de ses répercussions sur ces différentes dimensions de la justice²⁶, en accordant une attention particulière à ses conséquences sur les pays en développement et émergents.

Le débat sur les liens entre justice et biologie synthétique reflète dans une large mesure celui sur le génie génétique. Plutôt que de choisir au hasard quelques projets et visions de la biologie synthétique pour les apprécier sous l'angle éthique, la CENH se concentre ici sur les éléments communs à toute évaluation de la biologie synthétique ou de ses applications concrètes sous l'angle de la justice.

Effets sur la sécurité alimentaire, la souveraineté alimentaire et la biodiversité: le débat public sur la biologie synthétique s'est notamment enflammé suite aux tentatives d'utiliser de tels organismes pour produire de l'énergie. D'un côté, ses partisans allèguent que cette technologie peut fournir une contribution cruciale à la production énergétique tout en luttant contre le réchauffement climatique

mondial. De l'autre, ses détracteurs craignent que les surfaces cultivées réquisitionnées pour une telle production énergétique ne compromettent encore plus la sécurité et la souveraineté alimentaires ou la biodiversité, surtout dans les pays en développement et émergents²⁷. Même si l'utilisation de tels organismes (par exemple pour le retraitement de sols pollués) apportait une solution à certains problèmes affectant également ces pays, cela ne pourrait compenser la violation concomitante de principes fondamentaux de la justice. Il faudrait donc trouver d'autres solutions.

Creusement du fossé technologique»: les critiques craignent que la biologie synthétique et ses applications ne creusent encore davantage les écarts technologiques existants entre pays industrialisés, émergents et en développement. Cette objection s'applique à toutes les avancées technologiques. En réponse à cet état de fait, le principe du respect de la souveraineté nationale exige, d'une part, que l'on accorde un soutien aux pays particulièrement défavorisés afin qu'ils développent leurs propres connaissances techniques et, d'autre part, que l'on favorise le transfert de technologies, si ces mêmes pays le souhaitent. Il leur sera ainsi possible d'utiliser ces nouvelles technologies correctement et de mener des recherches sur les risques spécifiques à leur contexte.

Protection de la propriété intellectuelle et biologie synthétique: comme pour les brevets en génie génétique, il convient ici aussi d'examiner

26 Le rapport de European Molecular Biology Organization (EMBO), vol. 10, n° 1, août 2009, pp. S1–S53, est consacré aux questions sociales soulevées par la biologie synthétique, cf. <http://www.nature.com/embor/journal/v10/n1s/index.html> (en anglais).

27 Au cœur du débat actuel, on retrouve des projets visant à produire de l'énergie à l'aide de cellules synthétiques qui font fermenter le sucre et le convertissent en énergie utilisable. Les répercussions sur les pays en développement et émergents sont commentées avec un œil critique dans le rapport (en anglais) du Groupe ETC (Action Group on Erosion, Technology and Concentration) *Commodifying Nature's Last Straw? Extreme Genetic Engineering and the Post Petroleum Sugar Economy* (2008).



l'admissibilité éthique ainsi que les conséquences détaillées de la protection de la propriété intellectuelle. A cet égard, la CENH renvoie à ses réflexions présentées dans le message du 23 novembre 2005 concernant la modification de la loi sur les brevets²⁸.

Répercussions sur les politiques économique et de recherche: lorsque l'Etat octroie des financements de départ (soutenant ainsi des instituts de recherche étatiques ou des entreprises privées) ou met en place le cadre structurel nécessaire à l'encouragement spécifique d'une certaine technologie ou de ses applications, il prend des décisions et crée un état de fait. Autant d'interventions qui conduisent à des distorsions de la concurrence. Cela peut se révéler justifié dans certains cas, mais il convient de ne pas perdre de vue les incidences de telles décisions sur d'autres approches lors de l'évaluation. L'encouragement par l'Etat de technologies présentant des risques potentiels doit, dans tous les cas, aller de pair avec un programme adéquat de recherche sur ces mêmes risques, y compris ceux à long terme.

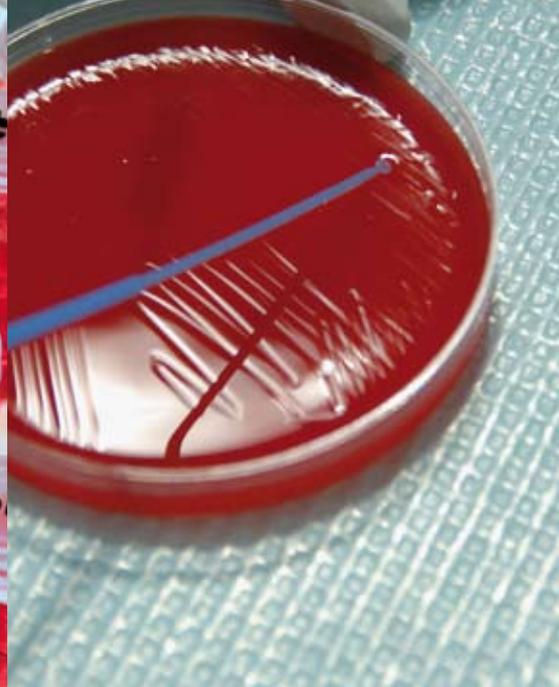
7.3 Réflexions relatives à l'éthique des risques

Les membres de la CENH sont d'avis qu'il n'y a pas de contradiction entre accorder un statut moral aux microorganismes utilisés aujourd'hui en biologie synthétique et les fabriquer artificiellement. De même, pour la majorité de la commission, les arguments de la pente savonneuse n'ont actuellement pas de portée. Reste à examiner une dimension de la biologie synthétique: celle relative à l'éthique des risques.

Dans une large mesure, le débat sur les risques de la biologie synthétique rappelle, lui aussi, les premières passes d'armes sur le génie génétique. Comme alors, une des objections fondamentales contre la biologie synthétique consiste à dire qu'elle travaille avec une matière qu'elle ne maîtrise pas et, partant, qu'elle ne peut contrôler. Parce qu'elle travaille avec des êtres vivants, elle manie des entités inconnues (que ce soit *par essence* ou parce que trop complexes pour être comprises) et qui donc présentent un risque élevé de mettre en danger l'homme et son environnement. Quand, de plus, les défenseurs de la biologie synthétique évoquent la figure d'un jeune magicien dans des bandes dessinées parues dans une revue scientifique²⁹, on est proche de la métaphore, désormais familière depuis le débat sur le génie génétique, de l'apprenti sorcier imaginé par Goethe, qui utilise les formules de son maître sans

28 Message du 23 novembre 2005 concernant la modification de la loi sur les brevets et l'arrêté fédéral portant approbation du Traité sur le droit des brevets et du Règlement d'exécution, p. 18–20, publié dans la Feuille fédérale 2006 1, cf. <http://www.admin.ch/ch/f/fff/2006/1.pdf>.

29 <http://www.nature.com/nature/comics/syntheticbiologycomic/index.html>.



en comprendre toute la portée. Or, à en croire les critiques de la biologie synthétique, et à la différence du conte de Goethe, aucun maître ne reviendra à temps pour éviter le pire. A cela, les adeptes de la biologie synthétique répondent, en reprenant eux aussi les arguments utilisés lors du débat sur le génie génétique, que la composition des produits de cette technologie est relativement simple. Leur capacité à nuire peut donc être cernée et maîtrisée: ces créatures nées dans un laboratoire dépendraient des conditions qui y règnent et ne seraient pas viables dans un environnement naturel. Et si des êtres vivants artificiels devaient s'échapper, leur capacité de nuisance serait restreinte, car ils ne pourraient s'imposer dans un écosystème naturel.

Selon les membres de la CENH, on exagère d'un côté comme de l'autre. Il ne faut ni se laisser aveugler par l'espoir que rien de grave ne va se produire lors de l'utilisation de substances et organismes potentiellement dangereux, ni refuser toute action par peur des conséquences. Une chose est sûre: même si chaque avancée technologique se base sur l'existant et le connu, ce qu'elle crée est partiellement nouveau. De plus, la référence au connu n'autorise pas à prétendre que quelque chose partiellement nouveau soit mesurable: il subsiste des incertitudes et, partant, on se trouve *en présence d'une situation typique de risque.*

La biologie synthétique représente un vaste champ de recherches et d'applications. Jusqu'à présent, ces dernières ne se sont que peu concrétisées, mais le domaine évolue à une vitesse vertigineuse. Dans l'état actuel, ce sont les visions, les incertitudes et les inconnues qui dominent. Rares sont encore les études de risque ayant fourni des données concrètes, toute évaluation du niveau de danger ne peut donc qu'être approximative. C'est pourquoi la CENH se borne principalement à discuter les différentes étapes qu'exigent la maîtrise d'une situation de risque et n'aborde qu'en passant quelques uns des exemples thématiques dans le débat public.

En matière de gestion des risques, il convient de distinguer la description et l'étude des risques de leur évaluation. S'y ajoutent les devoirs de diligence, qui touchent tant le stade de l'étude que celui de l'évaluation³⁰. Les réflexions d'ordre général qui suivent, sur la procédure à suivre en situation de risque, sembleront peut-être familières et évidentes à la plupart des lecteurs. Reste que l'expérience démontre, notamment s'agissant de l'évaluation de projets où des organismes génétiquement modifiés sont relâchés dans l'environnement, qu'il est judicieux de toujours réexaminer avec le plus grand soin les exigences auxquelles nous confrontent les situations à risque.

30 Sur la gestion des risques, voir les dispositions relatives au génie génétique dans le domaine non humain dans la loi fédérale du 21 mars 2003 sur l'application du génie génétique au domaine non humain (loi sur le génie génétique, LGG), RS 814.91.



7.3.1 Description et étude du risque

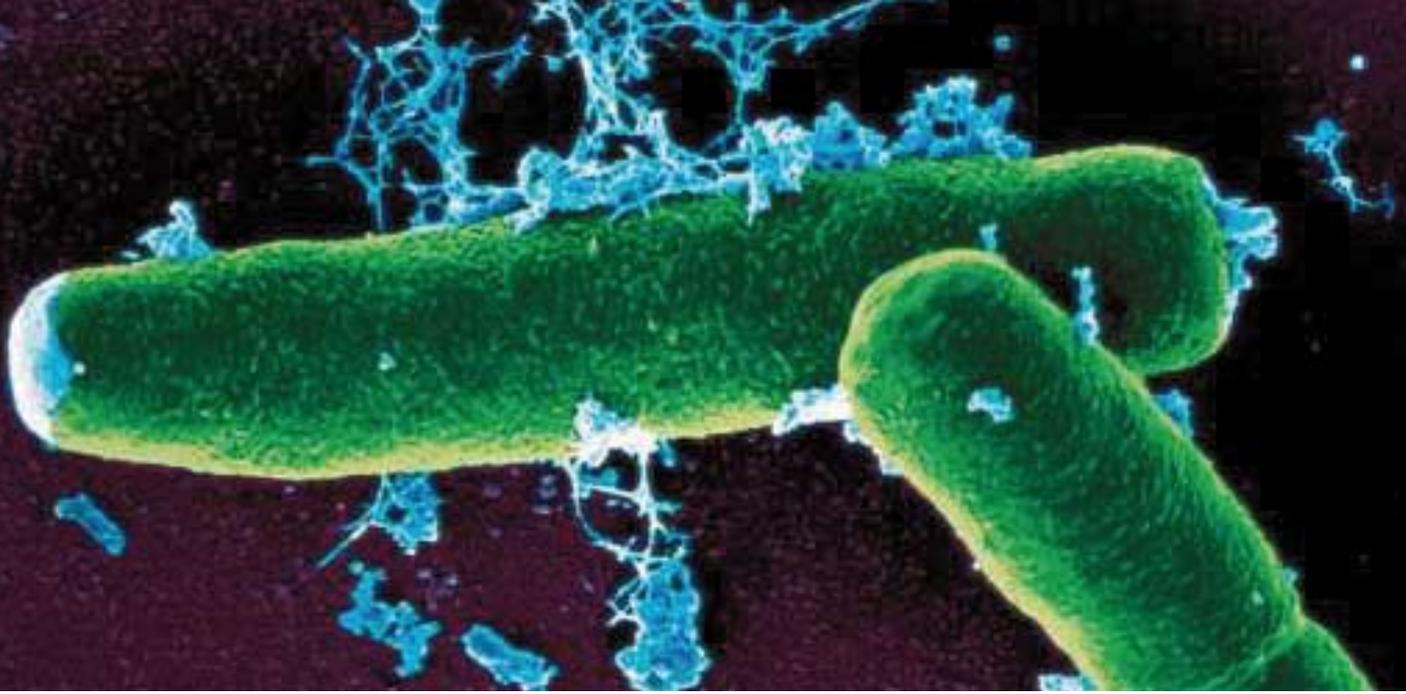
L'étude du risque est une discipline empirique. Elle détermine la probabilité d'occurrence de scénarios et l'ampleur de leurs effets. L'étude de risque vise à fournir des probabilités chiffrées et non des évaluations qualitatives. Pour que l'étude de risque puisse se dérouler correctement, il faut que les risques aient été bien décrits.

Comme en génie génétique, on distingue deux domaines de risques en biologie synthétique, en anglais *biosafety* et *biosecurity*, termes que nous avons traduits par *biosécurité* et *biosûreté*³¹. La biosécurité désigne ici la protection de l'homme et de l'environnement contre les risques involontaires résultant de l'utilisation, en soi légitime, d'organismes artificiels. Dans un premier temps, il s'agit des risques dus à l'utilisation de tels organismes en milieu confiné (laboratoire), c'est-à-dire résultant de la recherche et de la fabrication d'organismes synthétiques. Au premier plan ici, figurent les risques pour la santé des chercheurs et de leurs collaborateurs. Or il convient également d'étudier quels risques pour l'homme et l'environnement découlent de la dissémination accidentelle d'un organisme hors du laboratoire, et ce malgré l'observation de toutes les mesures de sécurité. A un stade ultérieur du développement de la biologie synthétique, il s'agira aussi d'examiner les risques résultant de disséminations volontaires de ces organismes, dans un premier temps effectuées à titre expérimental, puis

au stade commercial. L'ensemble de ces risques seront étudiés *ex ante*, c'est-à-dire avant toute action, afin de pouvoir émettre des hypothèses quant à leur probabilité.

La *biosûreté* vise, quant à elle, à protéger contre les risques résultant de l'utilisation illégitime, parce qu'abusives ou inappropriées, de tels organismes. Citons notamment les transports privés interdits, lorsque, par exemple, des chercheurs changent de poste de travail et emportent sans autorisation des organismes dans leur nouveau laboratoire. Il convient également de considérer à l'aune de la biosûreté les risques résultant de laboratoires qui ne sont pas gérés par des professionnels (laboratoires clandestins). Les abus sont également classés comme *bioterrorisme* et parfois sous l'appellation d'utilisation duale (*dual use*). Ce terme s'applique aux technologies pouvant être utilisées à des fins tant civiles que militaires ou terroristes. La biologie synthétique permet de fabriquer des bactéries ou des virus dangereux par des moyens relativement simples, ce qui fait craindre une multiplication des possibilités d'abus. En 2002, des chercheurs américains ont reproduit le virus de la polio en laboratoire, à partir de séquences d'ADN fabriquées commercialement et librement accessibles. En 2005, toujours aux Etats-Unis, un autre groupe a reconstitué synthétiquement le virus éteint de la grippe espagnole. Les structures de ces organismes ont été publiées et peuvent être consultées par tout un chacun. Ces exemples démontrent que les craintes d'abus sont

31 Cf. ici aussi J. Boldt et al., *Synthetische Biologie*, 2009, p. 65 ss.



justifiées même s'il reste jusqu'à présent plus facile d'obtenir de la nature les organismes hautement pathogènes, et donc dangereux pour l'homme et l'environnement. L'évolution des équipements techniques et la commercialisation croissante du séquençage de l'ADN qu'elle entraîne permettent de surmonter toujours plus facilement les obstacles financiers et techniques qui freinaient jusqu'ici les abus.

Etant donné les inconnues et incertitudes qui caractérisent les situations à risque, il convient de tenir compte d'hypothèses plausibles s'écartant de l'opinion majoritaire. De plus, il faut analyser quelles lacunes de connaissances (contraintes) limitent l'étude des risques. Les descriptions et études de risques effectuées sur des projets de biologie synthétique sont souvent critiquées comme ayant été réalisées avec des œillères de technocrates, ce qui restreint d'autant le champ de vision des risques potentiels. Il conviendrait d'examiner si, et dans quelle mesure, une telle approche réductionniste prévaut dans les faits et si elle conduit effectivement à une description inadéquate des risques.

Pour plus de détails en matière de description et d'étude des risques, nous vous renvoyons à la Commission fédérale d'experts pour la sécurité biologique (CFSB) et aux autorités compétentes.

7.3.2 Evaluation des risques

Il convient de distinguer l'étude des risques qui est descriptive, de l'évaluation des risques, qui elle est normative. L'évaluation des risques se fait à l'aune des données récoltées tout en sachant que celles-ci évoluent constamment. Elle comprend la pondération des répercussions attendues, mais aussi celle des lacunes de connaissance restantes. L'évaluation des risques considère les probabilités et les scénarios de dommages et décide si des mesures s'imposent et si oui, lesquelles. Dans une société démocratique, la nécessité d'agir est définie sur la base d'une décision collective quant aux probabilités et aux dommages raisonnablement acceptables.

La pondération des conclusions de l'analyse des risques et l'évaluation de l'acceptabilité des risques dépendent également de l'existence d'alternatives à la voie choisie et de la nature de ces dernières. Ces options sont pertinentes parce que les gens sont plus enclins à accepter de prendre des risques élevés pour résoudre un problème urgent (par exemple pour satisfaire des besoins fondamentaux) lorsqu'il n'existe aucune autre option moins risquée. On distingue trois niveaux d'alternatives :



1. Les alternatives à l'objet de la technologie : par exemple substituer des bactéries produisant de l'hydrogène à des algues synthétiques pour la production de biocarburant;
2. Les alternatives à la méthode : utiliser d'autres technologies pour produire de l'énergie issue de ressources renouvelables (énergie solaire, éolienne, etc.);
3. Les alternatives à l'objectif : par exemple se tourner vers des technologies réduisant la consommation énergétique.

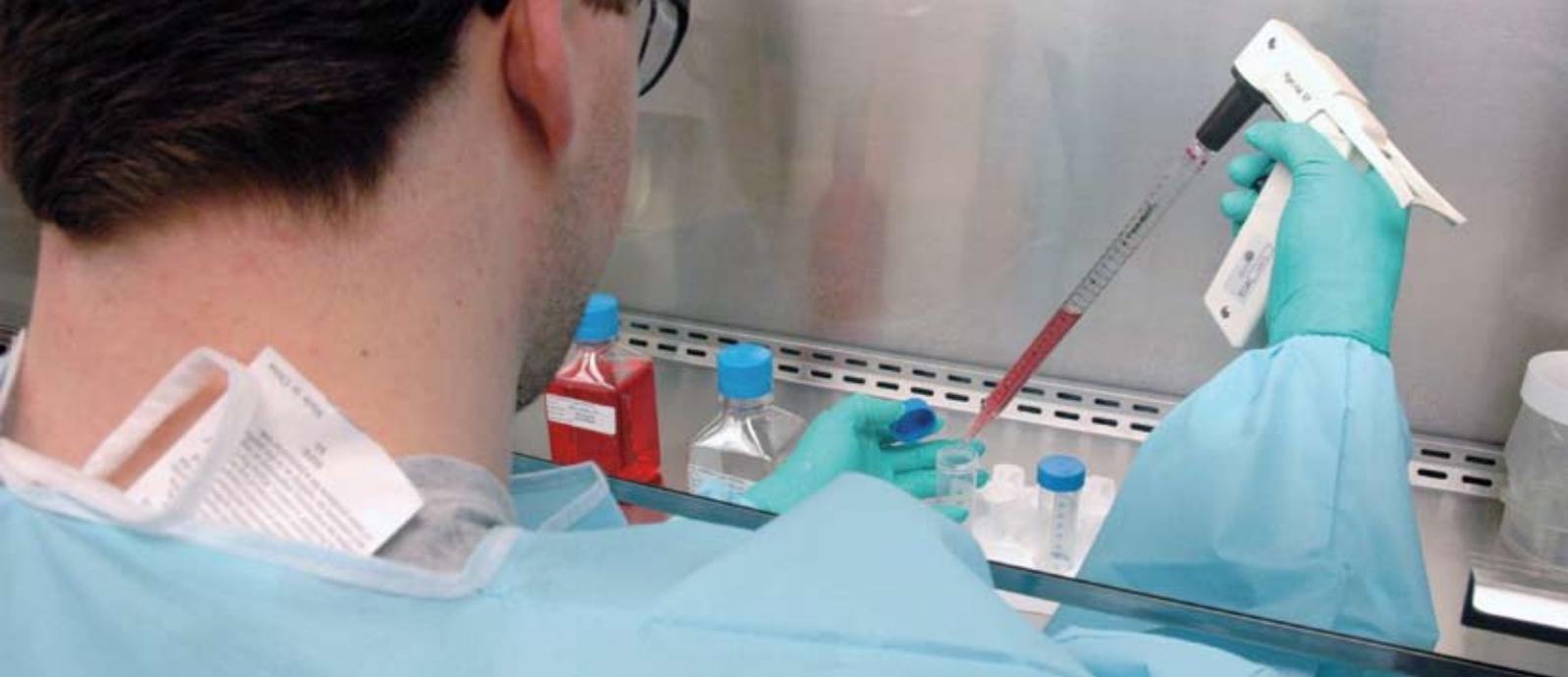
7.3.3 Devoirs de diligence

Les devoirs de diligence remplissent deux fonctions. Premièrement, ils exigent des acteurs qu'ils prennent conscience de l'état des connaissances, des conséquences éventuelles de leurs actes et du potentiel de dommages qui en résulte. Leur responsabilité s'étend par conséquent à ce qu'ils auraient dû prévoir au vu de l'état des connaissances. Ils doivent anticiper les conséquences éventuelles et leur potentiel de dommages. Par contre, on ne peut leur imputer l'imprévisible.

Deuxièmement, les devoirs de diligence exigent des acteurs qu'ils prennent toutes les mesures de précaution propres à éviter la survenue du dommage attendu. Ces mesures seront plus ou moins importantes en fonction de deux paramètres : la probabilité d'occurrence d'un dommage et son ampleur. Plus la probabilité d'occurrence est élevée, plus les exigences en matière de devoir de diligence sont grandes. Il faut éviter

autant que possible le dommage et, s'il devait quand même survenir, en limiter l'ampleur au maximum.

C'est ce deuxième niveau des devoirs de diligence qui influence l'évaluation des risques. Les programmes systématiques de surveillance sont un exemple de mesures aptes à réduire la probabilité d'occurrence d'un risque et l'ampleur des dégâts, telles qu'elles sont envisagées et parfois mises en œuvre dans d'autres domaines technologiques. Ces programmes permettent d'identifier le plus rapidement possible les effets néfastes sur l'environnement et la santé. Une autre mesure serait l'obligation de procéder par étapes, à savoir commencer par des expériences en laboratoire, à différents niveaux de sécurité, poursuivre par des essais de terrain limités et contrôlés et ensuite seulement, mettre les organismes en circulation. Le raisonnement qui fonde cette approche postule que les connaissances nécessaires à une évaluation adéquate des risques en matière de nouvelles technologies doivent être générées pas à pas. Ainsi, si l'étude de risque n'a pas pu fournir les données nécessaires pour la prochaine étape, il est impossible de formuler une hypothèse quant à la probabilité d'occurrence d'un dommage. Or, sans hypothèse, pas d'évaluation des risques. Et sans évaluation des risques, aucune décision rationnelle ne peut être prise sur la suite de la procédure. Il est donc inadmissible de passer à l'étape suivante et d'exposer aveuglément les autres à des risques.



7.3.4 Conclusions quant à l'utilisation d'organismes synthétiques

Selon la CENH, bien qu'il existe des scénarios de risque plausibles, les données expérimentales sur les propriétés des organismes synthétiques sont, elles, trop lacunaires pour pouvoir procéder à une évaluation des risques correcte. Devant une telle situation, l'éthique des risques impose une prudence particulière dans l'utilisation d'organismes synthétiques, en application du principe de précaution. S'agissant d'essais de dissémination d'organismes synthétiques, il faut attendre de disposer des données expérimentales nécessaires à une évaluation correcte des risques, et d'ici là, suivant le principe de l'approche par étapes, se limiter au travail en milieu confiné, en appliquant les mesures de précaution spécifiques à l'organisme en question.

Faute de données, la commission ne peut se prononcer pour l'instant sur l'adéquation des dispositions légales existantes relatives à l'utilisation d'organismes génétiquement modifiés pour réglementer l'utilisation d'organismes synthétiques.



8 Synthèse

Dans le présent rapport, la CENH examine sous l'angle éthique les objectifs et méthodes de la biologie synthétique, en particulier son projet de fabrication contrôlée de nouveaux êtres vivants, à partir de ce que l'on appelle les biobriques. La première partie se concentre sur la nature des produits de la biologie synthétique, avant de se demander s'il existe une obligation éthique à l'égard de ces produits, qui s'opposerait à l'application de cette science, et, dans l'affirmative, de s'interroger sur sa portée. La deuxième partie est consacrée aux questions relatives à l'éthique de la responsabilité.

Le rapport explique que pour savoir s'il est possible de fabriquer des êtres vivants de manière contrôlée, et dans quelle mesure, il faut connaître la conception de la vie sur laquelle repose l'évaluation. Diverses doctrines ontologiques sont ensuite présentées. Au sein de la CENH, la majorité des membres adopte une position moniste, selon laquelle ce que l'on désigne par vie se réfère à des propriétés purement physico-chimiques des êtres vivants. Les autres doctrines – vitalisme et dualisme, mais également scepticisme –

sont défendues par des minorités. Néanmoins, quelle que soit leur position ontologique, tous les membres admettent que le projet de la biologie synthétique peut aboutir et réussir à produire des êtres vivants par les méthodes qu'elle envisage.

Même si certaines visions à long terme de la biologie synthétique postulent la fabrication d'êtres vivants de tous types, la recherche se focalise actuellement sur les microorganismes. C'est eux que les scientifiques utilisent ou qu'ils entendent fabriquer. Dans le cadre donné par l'art. 120 de la Constitution fédérale, qui impose de respecter la dignité ou l'intégrité de la créature lors de l'utilisation des animaux, des végétaux et des autres organismes, il faut clarifier la question de la valeur morale des microorganismes. Selon la CENH, le mode de création des êtres vivants, qu'il soit naturel ou artificiel, n'a aucune incidence sur leur statut moral. C'est la position éthique défendue qui va décider de l'attribution ou non de ce qu'on appelle « valeur morale » ou « dignité » aux microorganismes, et qui les fera compter moralement pour eux-mêmes. La



majorité des membres de la commission défend une position biocentriste: les microorganismes possèdent une valeur morale parce qu'ils sont vivants. Un premier groupe minoritaire défend une approche pathocentriste: étant donné qu'il n'existe pas d'indice suggérant que les microorganismes peuvent, de quelque façon que ce soit, percevoir un dommage comme tel, ceux-ci n'appartiennent pas au cercle des êtres auxquels il faut accorder une considération morale. La deuxième position minoritaire défend un point de vue anthropo-relationnel: c'est la relation à l'être humain qui confère aux microorganismes une valeur morale. Cependant, même les membres qui reconnaissent cette valeur aux microorganismes, admettent que leur poids est négligeable dans une pesée des intérêts, étant donné leur position hiérarchique dans le monde vivant. En conséquence, pour tous les membres de la commission, aucune objection éthique ne s'oppose, dans la pratique, à un projet faisant usage de microorganismes.

Les diverses positions ontologiques représentées au sein de la CENH s'expriment aussi par des différences dans le langage utilisé pour parler de la contrôlabilité du processus et des produits de la biologie synthétique. Celles-ci affectent à leur tour le débat sur l'éthique de la responsabilité. Le débat public sur la biologie synthétique met en avant les arguments de la « pente savonneuse ». Les membres admettent tous que ces arguments sont utiles pour la détection précoce et le suivi des conséquences possibles.

Néanmoins, ils ne considèrent pas que les réserves exprimées jusqu'ici justifient d'opposer un quelconque veto aux projets de biologie synthétique.

Cependant, à l'instar de toutes les technologies et de leurs applications, il convient de mesurer et d'évaluer la biologie synthétique à l'aune de la justice. En outre, il faut l'examiner sous l'angle de l'éthique des risques. La CENH constate que la biologie synthétique représente un vaste champ de recherches et d'applications. Jusqu'à présent, malgré son évolution extrêmement rapide, elle n'a produit que fort peu de résultats concrets: ce sont les visions, les incertitudes et les inconnues qui dominent. Bref, nous nous trouvons face à une situation typique de risque. Selon la CENH, bien qu'il existe des scénarios de risques plausibles, nous disposons de trop peu de données expérimentales pour être à même de procéder à leur évaluation. C'est la raison pour laquelle, dans le présent rapport, la commission se borne principalement à rappeler les procédures exigées par l'éthique (et déjà inscrites dans la loi pour d'autres domaines technologiques). Le principe de précaution s'applique et, conformément à l'approche par étapes, exige de s'entourer de mesures de sécurité particulières, adaptées à l'organisme avec lequel on travaille. Faute de données, la commission ne peut se prononcer pour l'instant sur l'adéquation des dispositions légales existantes relatives à l'utilisation d'organismes génétiquement modifiés pour réglementer l'utilisation d'organismes synthétiques.



9 Bibliographie

BAERTSCHI, BERNARD: *La vie artificielle – Le statut moral des êtres vivants artificiels*, Contributions à l'éthique et à la biotechnologie, volume 6, CENH, Berne, 2009.

BENNER, STEVEN A.: *Synthetic biology: Act natural*. Dans: *Nature*, vol. 421, 9 janvier 2003, p. 118 (cité par A. Brenner, *Leben*, 2007, p. 158).

BOLDT, JOACHIM/OLIVER MÜLLER/
GIOVANNI MAIO: *Synthetische Biologie – Eine ethisch-philosophische Analyse*, Contributions à l'éthique et à la biotechnologie, volume 5, CENH, Berne, 2009.

BRENNER, ANDREAS: *Leben – Eine philosophische Untersuchung*, Contributions à l'éthique et à la biotechnologie, volume 3, CENH, Berne, 2007.

CENH: *Génie génétique et pays en développement*, Berne, 2004.

CONSTITUTION FÉDÉRALE du 18 avril 1999, RS 101, art. 120, Génie génétique dans le domaine non humain.

ECKHARDT, ANNE: *Synthetische Biologie. Organisation und Ziele*, Rapport pour la CENH, 2008 (en allemand).

GROUPE ETC: *Commodifying Nature's Last Straw? Extreme Genetic Engineering and the Post Petroleum Sugar Economy*, 2008.

KUTSCHERA, FRANZ VON: *Jenseits des Materialismus*, mentis, Paderborn, 2003.

LOI SUR LE GÉNIE GÉNÉTIQUE: Loi fédérale du 21 mars 2003 sur l'application du génie génétique au domaine non humain (LGG), RS 814.91.

MESSAGE du 23 novembre 2005 concernant la modification de la loi sur les brevets et l'arrêté fédéral portant approbation du Traité sur le droit des brevets et du Règlement d'exécution, p. 18–20, publié dans la Feuille fédérale 2006 1 (<http://www.admin.ch/ch/ff/ff/2006/1.pdf>).

RAPPORT EMBO: vol. 10, n° S1, août 2009, S1–S53 (www.nature.com/embor/journal/v10/n1s/index.html).

SZOSTAK, JACK W./DAVID P. BARTEL/
PIER LUIGI LUISI: *Synthesizing life*. Dans: *Nature*, vol. 409, 18 janvier 2001, p. 387 (cité par A. Brenner, *Leben*, 2007, p. 156).

Sources Internet

(toutes consultées le 6 avril 2010)

<http://sb4.biobricks.org/field>

<http://syntheticbiology.org>

www.ethz.ch/news/ethupdate/2007/070619_1/index

www.nature.com/nature/comics/syntheticbiologycomic/index.html

www.synbiosafe.eu/index.php?page=other-sb-projects

www.tessy-europe.eu/public/_docs/TESSY-final-Report_D5-3.pdf

Crédit photographique:

Couverture	Dessin: Atelier Bundi, Photo: Bakterien, © Sebastian Kaulitzki	Page 14	Gauche: Stoffwechsel, Janssen-Cilag Droite: Shewanella sp, University of California, Riverside
Page 3	Beugungsbild eines Biomoleküls, Max-Planck-Arbeitsgruppen für Strukturelle Molekularbiologie	Page 15	Pseudomonas-aeruginosa, Janssen-Cilag
Page 4	Gauche: Staphylococcus aureus, Janssen-Cilag Droite: Mycoplasma mycoides bacterium, J. Craig Venter Institute	Page 16	Microbiological agrar plate, © Claudia Disqué, Ph. D.
Page 5	Gauche: DNA double helix, © The University of Waikato Droite: Laborproben, Jürgen Haacks, Uni Kiel	Page 17	Mikroorganismen, Wilhelm Foissner, Andreas Zankl, University of Salzburg, Austria
Page 6	Gauche: DNA-Chip, Flad & Flad Communication GmbH Droite: Forschung, Janssen-Cilag	Page 18	Mikroorganismen, © vangorpreunion, Picasa
Page 7	Agent release module, © bioss – Center for Biological Signalling Studies	Page 19	Mitose, IMP
Page 8	Escherichia-coli, Janssen-Cilag	Page 20	Computer, Digital Media Lab, KAIST
Page 9	Gauche: Anophelesmuecke, Birgit Betzelt/action medeor Droite: Artemisinin, Birgit Betzelt/action medeor	Page 21	Second generation biofuel from algae oil, Global Energy
Page 10	Streptococcus pyogenes, © S. Lowry, University of Ulster	Page 22	Forschung, Janssen-Cilag
Page 11	Gauche: Forschung, Janssen-Cilag Droite: Aral Forschung, Deutsche BP AG	Page 23	Gauche: Laborproben, Jürgen Haacks, Uni Kiel Droite: Hautbakterien, Bill Branson, NIH
Page 12	Forschung, Janssen-Cilag	Page 24	Anti anthrax pesticide, Stanford University
Page 13	Phytoplankton bloom, © NASA	Page 25	Bacillus anthracis, Oregon State University
		Page 26	Algenproduktionsanlage, Jülich Forschungszentrum
		Page 27	Labor, Microtest Laboratories
		Page 28	Acinetobacter, Janssen-Cilag
		Page 29	Bakterie, Indiana University
		Page 30	Bacteria on Culture, Bill Branson, NIH

Mai 2010

Éditeur: Commission fédérale d'éthique pour la
biotechnologie dans le domaine non humain CENH

Rédaction: Ariane Willemsen, Secrétariat CENH
c/o Office fédéral de l'environnement OFEV
CH-3003 Berne
tél. +41 (0)31 323 83 83
fax +41 (0)31 323 03 69
ekah@bafu.admin.ch

Traduction: Services linguistiques de l'OFEV

Mise en page: Atelier Bundi AG, Boll

Impression: Ackermann Druck AG, Liebefeld

Cette brochure est disponible en français, en
allemand et en anglais pour la version imprimée;
elle est également disponible en italien sur
support électronique et sur www.ekah.admin.ch.

Reproduction autorisée avec mention de la source.
Les droits de reproduction des images doivent être
demandés séparément.

Imprimé sur papier blanchi sans chlore.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

**Commission fédérale d'éthique
pour la biotechnologie dans
le domaine non humain CENH**

