

En quête d'un génome minimal

Un des grands projets de la biologie de synthèse est la création d'un génome minimal – un génome qui ne contiendrait que les gènes nécessaires au fonctionnement de la cellule qui l'héberge, et ceux qui produiront les fonctions biologiques souhaitées.

L'intérêt d'utiliser un génome réduit est multiple. D'une part, cela diminuerait le coût énergétique de la réplication du génome lors de la division cellulaire. D'autre part, l'ADN codant les fonctions synthétiques pourrait être inséré à la place libérée.

Enfin, certaines séquences du génome, dites recombinogènes, sont connues pour favoriser les recombinaisons génétiques. En les retirant, on diminue le risque que le génome subisse des

modifications spontanées. Plusieurs équipes sont impliquées dans la conception et la fabrication de tels génomes réduits. Ainsi, la société américaine *Scarab Genomics* commercialise des souches de colibacille dont l'ADN a été réduit de 15 pour cent, notamment par élimination des séquences recombinogènes. Cette société a été fondée en 2002 par Fred Blattner, dont l'équipe séquençait le premier génome de colibacille.

À l'Université Johns Hopkins, aux États-Unis, Jef Boeke (aujourd'hui à l'Université de New York) et Joel Bader ont lancé le projet Sc2.0 d'un génome synthétique d'une cellule eucaryote, la levure de bière *Saccharomyces cerevisiae*. À ce jour, un chromosome a été synthétisé entièrement. Là aussi, les séquences recombinogènes ont été supprimées. En revanche, des séquences ont été introduites pour induire à volonté de nombreux réarrangements aléatoires de morceaux de chromosome. Il est donc possible de disposer d'un génome stable, mais, par un simple stimulus, d'induire son évolution accélérée. Ensuite

les variants issus de cette évolution peuvent être sélectionnés sur un critère quelconque.

En 2010, l'Institut américain J. Craig Venter a publié la synthèse chimique du génome d'une bactérie, un mycoplasme (environ un million de paires de nucléotides). Introduit dans une souche cousine, ce génome était toujours fonctionnel : les cellules obtenues étaient capables de se diviser. Cette prouesse technique ouvre la voie à des génomes totalement synthétiques. En revanche, la séquence synthétisée était une copie quasi identique de la version naturelle. À l'évidence, le chemin sera encore long avant de pouvoir concevoir *de novo* un génome...

d'une dizaine de réactions. C'est le cas du circuit de bioproduction de l'artémisinine. Comment briser ce plafond pour construire des circuits biochimiques plus complexes et augmenter d'autant les possibilités de la biologie de synthèse ?

Pour une part, ce plafond tient à notre incapacité à concevoir un génome complet. Pour étendre fortement la taille et la complexité des circuits, il faudrait pouvoir introduire un nombre arbitraire de gènes qui coopéreraient de façon optimale selon un cahier des charges fixé par avance. Cela sous-entend de connaître l'ensemble des contraintes qui pèsent sur les génomes naturels des hôtes envisagés – une levure ou une bactérie, par exemple. La version modifiée de ce génome devrait non seulement tenir compte de ces contraintes, mais en tirer parti pour optimiser les circuits de synthèse.

Concevoir un génome *ab initio*

Plusieurs équipes se sont ainsi lancées dans des recherches visant à synthétiser ou à réduire des génomes complets d'organismes unicellulaires. C'est le cas, par exemple, de l'équipe de l'Institut J. Craig Venter, à Rockville aux États-Unis, et de celle de Fred Blattner, de l'Université du Wisconsin, à Madison, pour les bactéries,

ou encore de celle de Jef Boeke et Joel Bader, de l'Université Johns Hopkins, à Baltimore, pour la levure (voir l'encadré ci-dessus).

Ces travaux représentent des tours de force techniques. Paradoxalement, ils soulignent aussi les carences dans notre capacité à concevoir *ab initio* un génome. Par exemple, le génome de mycobactérie synthétisé par l'équipe de J. Craig Venter est quasi copié du génome naturel. C'est pourtant bien la conception à l'échelle du génome et non la copie qui permettra d'agrandir la taille et la complexité des circuits biochimiques, la synthèse d'ADN permettant ensuite de réaliser ce génome à façon.

Dans mon équipe, nous cherchons précisément à exploiter les contraintes connues des génomes de micro-organismes pour la conception *ab initio* de génomes porteurs de grands circuits de synthèse. En particulier, nous avons observé que les gènes qui fonctionnent ensemble (par exemple parce qu'ils sont régulés par les mêmes protéines) ne sont pas disposés au hasard le long des génomes. Au contraire, on les retrouve côte à côte ou à intervalles périodiques. Ces schémas semblent optimiser l'expression des gènes. Ce type d'observation conduit à proposer de respecter ces schémas « naturels » lors de l'insertion de gènes co-fonctionnels dans des chromosomes microbiens – une donnée

qui devrait aider à augmenter la complexité des circuits.

On le voit, la biologie de synthèse n'est pas simplement un nouveau domaine de la biologie. Elle apporte un vaste socle méthodologique et conceptuel, ainsi qu'un état d'esprit nouveau en biotechnologie. Construire un système biologique qui fonctionne comme prévu est une façon de s'assurer que l'on a compris les phénomènes sous-jacents. En ce sens, la biologie de synthèse permet de faire progresser les connaissances sur le monde vivant. L'approche de l'ingénieur étant dominante, les applications industrielles ne sont cependant jamais loin.

Le potentiel économique de ces applications est considérable et concerne de nombreux domaines : santé (diagnostic, médicaments), agroalimentaire, environnement (biocapteurs de pollution), énergie (biocarburants), matériaux (biomatériaux « intelligents »), etc. En ouvrant toutes ces possibilités, la biologie de synthèse renouvelle les questions éthiques concernant la responsabilité des hommes à « artificialiser » le vivant. Jusqu'à quel point voulons-nous modifier ou recréer le vivant ? Quelle gouvernance de la biologie de synthèse adopter pour qu'elle corresponde bien à nos attentes ? Il est indispensable que ces questions soient dès maintenant continuellement débattues. ■

Biologie de synthèse et sciences sociales, un dialogue difficile

Pierre-Benoît Joly et Benjamin Raimbault

Quel sera l'impact de la biologie de synthèse sur la société ? Comment éviter les dérives ? Les sciences sociales apporteraient un éclairage décisif si elles n'étaient pas cantonnées à un rôle inapproprié de médiateur.

Domaine de recherche en plein essor depuis le début des années 2000, la biologie de synthèse nourrit d'importantes ambitions théoriques puisqu'il s'agit d'appliquer les principes de l'ingénierie à la biologie. Conjointement, en s'annonçant comme la nouvelle révolution industrielle, elle revendique un grand potentiel d'applications et, par conséquent, de profonds changements économiques et sociaux, ses applications devant toucher des domaines aussi variés que la santé, l'agroalimentaire, l'environnement ou la production d'énergie. En pratique, si certains discours laissent entendre que la biologie de synthèse sera la corne d'abondance du début du XXI^e siècle, très peu d'applications sont aujourd'hui disponibles, à l'exception de certains cas emblématiques tels que la semi-synthèse de l'artémisinine, un médicament antipaludéen produit désormais en grande quantité par *Sanofi*.

Néanmoins, la biologie de synthèse alimente déjà plusieurs débats au sein de la société. Par exemple, à la suite de la recommandation de l'Organisation mondiale de la santé d'utiliser des combinaisons thérapeutiques à base d'artémisinine, des milliers de petits producteurs asiatiques

L'ESSENTIEL

■ Pour anticiper les conséquences sociales des futures applications de la biologie de synthèse, les biologistes ont développé des collaborations avec les chercheurs en sciences sociales.

■ Plusieurs approches ont été utilisées, mais des difficultés sont apparues.

■ Les sciences sociales ont un rôle à jouer, mais celui-ci n'est ni de vaincre la contestation ni d'être le porte-parole de la société.

■ Il est nécessaire de clarifier l'agenda de recherche et les questions de fond sur la biologie de synthèse et sa gouvernance.

© Seamartin Graphics/shutterstock

et africains ont développé la culture de la plante qui la produit naturellement, l'armoïse annuelle. Après une période alternant surproduction et sous-production d'artémisinine naturelle, une initiative de planification à l'échelle mondiale de médicaments à base d'artémisinine a vu le jour en 2009, permettant de consolider la filière et de répondre aux besoins. Produite au même prix à partir de 2013, l'artémisinine de synthèse vient ainsi concurrencer les petits producteurs et perturber un marché encore fragile sans pour autant constituer un réel progrès médical. Dès lors, comment s'assurer que les applications de la biologie de synthèse seront bien en adéquation avec les besoins sociétaux et environnementaux, et limiter leurs effets négatifs ?

Une des principales originalités de la biologie de synthèse a été de vouloir anticiper les conséquences sociales de ses futures applications en développant de façon systématique une collaboration avec les sciences sociales. Depuis les débuts de la biologie de synthèse, plusieurs approches ont été menées dans ce sens, mais celles-ci ont leurs limites. Quelles sont-elles et comment les dépasser ? C'est ce que nous allons examiner.