

FICHE DE LA SÉANCE DU 23 NOVEMBRE 2022

Académie d'Agriculture de France

LA BIOLOGIE DE SYNTHÈSE POUR L'AGRICULTURE

Section porteuse : 6 Sciences de la Vie
Autres sections impliquées : 1 Productions Végétales
4 Sciences Humaines et Sociales

Date :
mercredi 23 novembre 2022 — 14h30 - 17h.

Mots clefs :
Biologie de synthèse ; Agriculture ; Plantes ; Algues ; Photosynthèse ; Métabolisme

La biologie de synthèse est l'ingénierie rationnelle de la biologie. La finalité de ce domaine apparu en 2004 est de concevoir de nouveaux systèmes inspirés par la biologie ou fondés sur ses composants. Cette ingénierie fait progresser les connaissances sur le monde vivant, et permet de développer de nombreuses applications industrielles dont le potentiel économique est considérable.

Après la microbiologie, c'est désormais dans l'amélioration des plantes et algues que ce domaine opère des percées tous azimuts. Durant la Séance seront traitées trois de ces percées, représentatives du potentiel et du degré de maturité de la biologie de synthèse pour l'agriculture. Ensuite seront tirées les conclusions au plan de l'agronomie et de la question des valeurs en biotechnologies végétales.

Programme :

Panorama introductif	(15 min)	François Képès	AAF
Exposé 1	(20+10 min)	Anne Osbourn	JIC, Norwich
<i>" Finding drugs in the garden: harnessing plant metabolic diversity "</i>			
Exposé 2	(20+10 min)	Stéphane Lemaire	Paris Sorbonne U.
<i>"Biologie synthétique et systémique de la fixation de carbone"</i>			
Exposé 3	(20+10 min)	Jean-Christophe Baret	U. Bordeaux
<i>" Reconstruction de systèmes photosynthétiques par voie microfluidique "</i>			
Discussion générale	(15 min)		AAF
Conclusions			
a) Conséquences agronomiques	(15 min)	Michel Dron	AAF
b) Aspects philosophiques et question des valeurs dans les biotechnologies végétales	(15 min)	Claude Debru	AAF

Séance du 23 novembre 2022

LA BIOLOGIE DE SYNTHÈSE POUR L'AGRICULTURE

La biologie de synthèse est l'ingénierie rationnelle de la biologie. La finalité de ce domaine apparu en 2004 est de concevoir de nouveaux systèmes inspirés par la biologie ou fondés sur ses composants. Cette ingénierie fait progresser les connaissances sur le monde vivant, et permet de développer de nombreuses applications industrielles dont le potentiel économique est considérable.

Après la microbiologie, c'est désormais dans l'amélioration des plantes et algues que ce domaine opère des percées tous azimuts. Durant la Séance seront traitées trois de ces percées, représentatives du potentiel et du degré de maturité de la biologie de synthèse pour l'agriculture. Ensuite seront tirées les conclusions au plan de l'agronomie et de la question des valeurs en biotechnologies végétales.

Orateurs et modérateurs :

Jean-Christophe BARET	Université de Bordeaux, CNRS CRPP-UMR5031 & IUF
Claude DEBRU	AAF (section 4), ENS-CAPHES, Paris
Michel DRON	AAF (section 1), Université Paris-Saclay, IPS2
François KEPES	AAF (section 6), Académie des technologies
Stéphane LEMAIRE	Sorbonne Université, LBCQ, Institut de Biologie Paris Seine
Anne OSBOURN	John Innes Centre, Norwich, R-U
Agnès RICROCH	AAF (section 6), Université Paris-Saclay, IDEST, Faculté Jean Monnet, Sceaux

CV DES ORATEURS INVITÉS

Jean-Christophe BARET

Professeur, Université de Bordeaux
Membre honoraire de l'Institut Universitaire de France,
Group Leader CNRS, Centre de Recherche Paul Pascal,
UMR5031, Pessac, France

<http://sms.crpp-bordeaux.cnrs.fr/>

<https://scholar.google.fr/citations?user=wsEPop8AAAAJ&hl=fr&oi=ao>



Biographie :

- ESPCI 2002 - PhD Univ. Twente 2005
- Max Planck Research Group Leader 2010-2014, Goettingen, Germany
- Prof. Univ. Bordeaux, CNRS Group leader depuis 2014
- Expert en microfluidique pour le criblage haut-débit
- Recherche sur l'assemblage de cellules artificielles bottom-up et les systèmes minimaux biomimétiques
- Fondateur d'Emulseo, startup développant des formulations industrielles pour la microfluidique.

Stéphane LEMAIRE

Directeur de Recherche CNRS
Directeur scientifique et Co-fondateur Biomemory
Laboratoire de Biologie Computationnelle et Quantitative
Institut de Biologie Paris Seine, UMR7238, CNRS,
Sorbonne Université, Paris, France

<http://twitter.com/SLemaire75>

stephane.lemaire@sorbonne-universite.fr

<http://www.lcqb.upmc.fr/>

<https://www.biomemory.com/>

[Google scholar](#)



Biographie :

- Formé comme généticien et biochimiste moléculaire à l'Université Paris-Saclay et l'Université de Genève et chef d'équipe @ CNRS depuis 2005.
- Expert en biologie synthétique, photosynthèse et microalgues.
- Directeur scientifique (CSO) et co-fondateur de Biomemory, une start-up développant des technologies de stockage de données sur ADN.

Anne OSBOURN

Biography:

- PhD (Genetics) - University of Birmingham, UK - 1985
- Group Leader, Sainsbury Laboratory, Norwich, UK - 1999-2005
- National Endowment for Science, Technology and the Arts Dream Time Fellow – 2004-2005
- Group Leader, Department of Metabolic Biology, John Innes Centre, UK – 2005 onwards
- Honorary Professor, University of East Anglia, UK – 2006 onwards
- Deputy Director, John Innes Centre – 2022 onwards
- Fellow of the Royal Linnean Society - 2018
- Fellow of the Royal Society – 2019
- Officer of the Most Excellent Order of the British Empire (OBE) - 2020
- Member, National Academy of Sciences (2022)
- Expert in plant natural products – biosynthesis, function, mechanisms of metabolic diversification, metabolic engineering for food and health applications
- Founder and Chair, The Science, Art and Writing (SAW) Trust (www.sawtrust.org) – 2005 onwards



PANORAMA INTRODUCTIF

François KEPES

Académie d'Agriculture de France

Académie des technologies

Force est de reconnaître que les technologies du vivant (ou biotechnologies) sont encore loin de constituer une entité mature, à rebours, par exemple, des ingénieries chimique, mécanique, électronique ou logicielle. Apparue en 2004, la biologie de synthèse – que l'on peut définir comme "l'ingénierie rationnelle" de la biologie – a justement pour vocation de permettre aux biotechnologies, dont elle est le fer de lance, de réaliser cette mutation.

Les biotechnologies entretiennent depuis longtemps de fructueuses interactions avec les travaux d'amélioration et adaptation agronomiques. Dans ce contexte, la biologie de synthèse a ouvert un champ de créativité dans lequel se sont engouffrés des chercheurs de grand talent. Ce domaine vise les modifications suivantes à apporter aux plantes et algues :

- modifier leur métabolisme à des fins de bio-production de composés chimiques utiles ;
- optimiser leur croissance ;
- altérer leur composition pour faciliter leur usage ;
- les adapter au changement climatique ;
- améliorer leur photosynthèse et fixation de CO₂ ;
- modifier le riz élaborant des composés à 3 carbones (C3) vers 4 carbones (C4) ;
- permettre aux céréales d'utiliser l'azote atmosphérique ;
- recourir à moins de produits phytosanitaires.

Bibliographie (AAF) :

F. Képès (2021) "Biologie de synthèse et agronomie". AAF Potentiels de la Science

F. Képès (2021) "Optimiser la fixation de CO₂ par la biologie de synthèse". AAF Encyclopédie Questions sur ... n° 06.02.Q06

F. Képès (2022) "Biologie de synthèse". AAF Encyclopédie Questions sur ... n° 06.06.Q02

J-F. Morot-Gaudry (2021) "Qu'est-ce que la photosynthèse ?" AAF Encyclopédie Questions sur ... n° 06.02.Q01

J-F. Morot-Gaudry, J-C. Pernellet (2020) "Les cyberchloroplastes et la photosynthèse artificielle." AAF Potentiels de la Science

G. Pelletier (2021) "Mutants et mutagenèse dans le domaine végétal". AAF Encyclopédie Questions sur ... n° 06.01.Q01

TROUVER DES MÉDICAMENTS DANS LE JARDIN : EXPLOITER LA DIVERSITÉ MÉTABOLIQUE DES PLANTES

Anne OSBOURN

John Innes Centre, UK

Les plantes produisent une multitude de produits naturels. La grande majorité de la diversité des produits naturels codés par les génomes végétaux reste encore inexploitée. L'explosion des données relatives aux séquences du génome des plantes, associée à la synthèse d'ADN à un prix abordable et aux nouvelles technologies d'assemblage d'ADN, offre désormais des possibilités sans précédent d'exploiter toute la diversité des produits naturels des plantes et de générer de nouvelles molécules dans des hôtes étrangers en utilisant des approches de biologie de synthèse. La découverte récente que les gènes de synthèse de différents types de produits naturels sont organisés en groupes de gènes biosynthétiques dans les génomes végétaux ouvre des possibilités d'exploration de nouvelles voies et de nouveaux produits chimiques. Cette avancée, associée à une nouvelle technologie puissante d'expression transitoire des plantes, permet le développement de stratégies rationnelles pour produire des composés chimiques connus et nouveaux, adaptés à des applications alimentaires, sanitaires et industrielles. Cette présentation se concentrera sur notre travail de développement d'un pipeline de biologie de synthèse translationnelle pour un rapide accès à la préparation de produits végétaux naturels et de nouveaux analogues. Elle mettra également en évidence les progrès récents dans notre compréhension des réarrangements génomiques qui sous-tendent la formation de nouveaux groupes de gènes biosynthétiques, et des fonctions des composés naturels végétaux dans la nature.

Bibliographie :

Owen C, Patron NJ, Huang A and Osbourn A (2017). Harnessing plant metabolic diversity. *Curr. Opin. Chem. Biol.* 40: 24-30. DOI: 10.1016/j.cbpa.2017.04.015

Reed J, Stephenson JR, Miettinen K, Brouwer B, Leveau A, Brett P, Goss RJM, Goossens A, O'Connell MA and Osbourn A (2017). A translational synthetic biology platform for rapid access to gram-scale quantities of novel drug-like molecules. *Met. Eng.* 42: 185-193. DOI: 10.1016/j.ymben.2017.06.012

Li Y, Leveau A, Zhao Q, Feng Q, Lu H, Miao J, Xue Z, Martin AC, Wegel E, Wang J, Orme A, Rey MD, Karafiátová M, Vrána J, Steuernagel B, Joynson R, Owen C, Reed J, Louveau T, Stephenson MJ, Zhang L, Huang X, Huang T, Fan D, Zhou C, Tian Q, Li W, Lu Y, Chen J, Zhao Y, Lu Y, Zhu C, Liu Z, Polturak G, Casson R, Hill L, Moore G, Melton R, Hall N, Wulff BBH, Doležel J, Langdon T, Han B, Osbourn A (2021). Subtelomeric assembly of a multi-gene pathway for antimicrobial defense compounds in cereals. *Nat. Comms.* 12:1. DOI: 10.1038/s41467-021-22920-8

Webographie :

Osbourn lab: [Professor Anne Osbourn | John Innes Centre \(jic.ac.uk\)](https://www.jic.ac.uk/)

Stephenson, M. J., Reed, J., Brouwer, B., Osbourn, A. Transient Expression in *Nicotiana benthamiana* leaves for triterpene production at a preparative scale. *J. Vis. Exp.* (138), e58169, DOI:10.3791/58169 (2018). Link to video: [Transient Expression in Nicotiana Benthamiana Leaves for Triterpene Production at a Preparative Scale | Protocol \(jove.com\)](https://www.jove.com/video/58169)

Anne's prize-winning poetry collection [Mock Orange](#)

The SAW Trust - A cross-disciplinary science education initiative: www.sawtrust.org

BIOLOGIE SYNTHÉTIQUE ET SYSTÉMIQUE DE LA FIXATION DE CARBONE

Stéphane LEMAIRE

Laboratoire de Biologie Computationnelle et Quantitative
Institut de Biologie Paris Seine, UMR7238 CNRS, Sorbonne Université, Paris

Notre espèce et notre civilisation sont confrontées aux défis agricoles, environnementaux, industriels et économiques les plus importants et les plus inédits de leur histoire. La photosynthèse, le convertisseur d'énergie solaire le plus efficace sur la Terre, fournit de l'énergie et du carbone pour presque toutes les formes de vie sur notre planète et est la source des combustibles fossiles qui alimentent nos technologies. La production de biocarburants et de bioproduits photosynthétiques, en tant que ressource renouvelable utilisant l'énergie solaire et fixant le CO₂ atmosphérique, représente l'une des formes prometteuses et alternatives d'énergie et de molécules carbonées. En outre, l'amélioration du rendement des cultures pour répondre aux besoins alimentaires d'une population mondiale croissante est un défi majeur pour la biologie végétale. La biologie synthétique et systémique offre de nouvelles possibilités pour répondre à des questions fondamentales en utilisant de nouveaux concepts ou pour créer des systèmes artificiels ayant des applications biotechnologiques. L'essor de la biologie synthétique offre une merveilleuse opportunité pour permettre une seconde révolution verte en s'attaquant au défi de l'amélioration de l'efficacité de la photosynthèse par l'ingénierie des microalgues, des cyanobactéries et des plantes. Les résultats prometteurs récents ainsi que les pistes à explorer pour le futur seront présentés.

Bibliographie :

- F. Meng, T. Ellis, The second decade of synthetic biology: 2010-2020. *Nat Commun* 11, 5174 (2020).
- P. Crozet et al., Birth of a Photosynthetic Chassis: A MoClo Toolkit Enabling Synthetic Biology in the Microalga *Chlamydomonas reinhardtii*. *ACS synthetic biology* 7, 2074-2086 (2018).
- T. J. Erb, J. Zarzycki, Biochemical and synthetic biology approaches to improve photosynthetic CO₂-fixation. *Curr Opin Chem Biol* 34, 72-79 (2016).
- P. F. South, A. P. Cavanagh, H. W. Liu, D. R. Ort, Synthetic glycolate metabolism pathways stimulate crop growth and productivity in the field. *Science* 363, (2019).

RECONSTRUCTION DE SYSTÈMES PHOTOSYNTHÉTIQUES PAR VOIE MICROFLUIDIQUE

Jean-Christophe BARET

Université de Bordeaux, CNRS, CRPP-UMR5031
Institut Universitaire de France

La construction de cellules artificielles à partir d'ingrédients élémentaires nécessite à la fois une compréhension approfondie des fonctions et des molécules impliquées dans les processus vivants et de nouvelles technologies pour l'assemblage de ces fonctions dans des systèmes artificiels. La microfluidique fournit les outils essentiels pour la création et la manipulation de micro-compartiments, leur fonctionnalisation et leur analyse en grandes populations.

Nous concevons, développons, caractérisons et utilisons des systèmes microfluidiques pour le contrôle de la matière molle et des systèmes biochimiques et leur intégration dans des cellules artificielles. Nous nous concentrons sur le design et l'intégration de systèmes métaboliques minimaux dans des microcompartiments de quelques dizaines de microns.

Notre intégration 'bottom-up' a conduit à la création de compartiments artificiels qui fonctionnent dans des conditions hors équilibre. Ces conditions hors-équilibres sont réalisées par le contrôle de réactions chimiques, par l'import et le relargage de réactifs et de produits ou par la collecte de la lumière permettant d'alimenter des cycles métaboliques.

Dans ce cadre, nous avons démontré que la collecte de lumière peut être couplée à des cycles métaboliques artificiels de captage du CO₂ et que l'ensemble peut être miniaturisé dans des micro-compartiments fonctionnant ainsi comme des chloroplastes artificiels.

À long terme, ces outils mèneront au développement de méthodes et de systèmes d'intérêt pratique, industriel et thérapeutique, mais aussi d'outils expérimentaux utilisables pour tester les hypothèses sur l'émergence de la vie à partir du non-vivant.

Bibliographie :

Out-of-equilibrium microcompartments for the bottom-up integration of metabolic functions, T. Beneyton, D. Krafft, C. Bednarz, C. Kleineberg, C. Woelfer, I. Ivanov, T. Vidakovic-Koch, K. Sundmacher and J.-C. Baret, *Nature Communications*, 9:2391 (2018)

Sequential bottom-up assembly of mechanically stabilized synthetic cells by microfluidics, M. Weiss, J. P. Frohnmayer, L. T. Benk, B. Haller, J.-W. Janiesch, T. Heitkamp, M. Boersch, R. B. Lira, R. Dimova, R. Lipowsky, E. Bodenschatz, J.-C. Baret, T. Vidakovic-Koch, K. Sundmacher, I. Platzman & J. P. Spatz, *Nature Materials*, 17, 89-96 (2018)

Light-powered CO₂ fixation in a chloroplast mimic with natural and synthetic parts, T. E. Miller, T. Beneyton, T. Schwander, C. Diehl, M. Girault, R. McLean, T. Chotel, P. Claus, N. Socorro Cortina, J.-C. Baret, T.J. Erb, *Science* 368, 6491, pp. 649-654 (2020)

Webographie :

Groupe : <http://sms.crpp-bordeaux.cnrs.fr/>

Video de présentation : https://www.youtube.com/watch?v=ugCghd_xCe0

INTRODUCTORY OVERVIEW

François KEPES

French Academy of Agriculture
National Academy of Technologies of France

It must be recognised that life technologies (or biotechnologies) are still far from being a mature entity, unlike, for example, chemical, mechanical, electronic or software engineering. Synthetic biology, which appeared in 2004 and can be defined as the 'rational engineering' of biology, is intended to enable biotechnologies, of which it is the spearhead, to achieve this transformation.

Biotechnology has long had fruitful interactions with works bearing on agronomic improvement and adaptation. In this context, synthetic biology has opened up a field of creativity into which some very talented researchers have rushed. This field aims at the following modifications to be made to plants and algae:

- modifying their metabolism for the purpose of bioproduction of useful chemical compounds;
- optimising their growth;
- altering their composition to facilitate their use;
- adapting them to climate change;
- improving their photosynthesis and CO₂ fixation;
- modifying rice from 3-carbon (C3) to 4-carbon (C4) compounds;
- enabling cereals to use atmospheric nitrogen;
- using fewer phytosanitary products.

Selected references from the French Academy of Agriculture:

F. Képès (2021) "Biologie de synthèse et agronomie". AAF Potentiels de la Science

F. Képès (2021) "Optimiser la fixation de CO₂ par la biologie de synthèse". AAF Encyclopédie Questions sur ... n° 06.02.Q06

F. Képès (2022) "Biologie de synthèse". AAF Encyclopédie Questions sur ... n° 06.06.Q02

J-F. Morot-Gaudry (2021) "Qu'est-ce-que la photosynthèse ?" AAF Encyclopédie Questions sur ... n° 06.02.Q01

J-F. Morot-Gaudry, J-C. Pernollet (2020) "Les cyberchloroplastes et la photosynthèse artificielle." AAF Potentiels de la Science

G. Pelletier (2021) "Mutants et mutagenèse dans le domaine végétal". AAF Encyclopédie Questions sur ... n° 06.01.Q01

FINDING DRUGS IN THE GARDEN: HARNESSING PLANT METABOLIC DIVERSITY

Anne OSBOURN

John Innes Centre, UK

Plants produce a wealth of natural products. The vast majority of the natural product diversity encoded by plant genomes remains as yet untapped. The explosion in plant genome sequence data, coupled with affordable DNA synthesis and new DNA assembly technologies, now offer unprecedented opportunities to harness the full breadth of plant natural product diversity and generate novel molecules in foreign hosts using synthetic biology approaches. The recent discovery that genes for the synthesis of different kinds of natural products are organised in biosynthetic gene clusters in plant genomes opens up opportunities for mining for new pathways and chemistries. This advance, in combination with powerful new transient plant expression technology, is enabling the development of rational strategies to produce known and new-to-nature chemicals tailored for food, health and industrial applications. This presentation will focus on our work on developing a translational synthetic biology pipeline for rapid preparative access to plant natural products and novel analogs using synthetic biology approaches. It will also highlight recent advances in our understanding of the genomic rearrangements underpinning the formation of new plant biosynthetic gene clusters, and of the functions of plant natural products in nature.

Selected references:

Owen C, Patron NJ, Huang A and Osbourn A (2017). Harnessing plant metabolic diversity. *Curr. Opin. Chem. Biol.* 40: 24-30. DOI: 10.1016/j.cbpa.2017.04.015

Reed J, Stephenson JR, Miettinen K, Brouwer B, Leveau A, Brett P, Goss RJM, Goossens A, O'Connell MA and Osbourn A (2017). A translational synthetic biology platform for rapid access to gram-scale quantities of novel drug-like molecules. *Met. Eng.* 42: 185-193. DOI: 10.1016/j.ymben.2017.06.012

Li Y, Leveau A, Zhao Q, Feng Q, Lu H, Miao J, Xue Z, Martin AC, Wegel E, Wang J, Orme A, Rey MD, Karafiátová M, Vrána J, Steuernagel B, Joynson R, Owen C, Reed J, Louveau T, Stephenson MJ, Zhang L, Huang X, Huang T, Fan D, Zhou C, Tian Q, Li W, Lu Y, Chen J, Zhao Y, Lu Y, Zhu C, Liu Z, Polturak G, Casson R, Hill L, Moore G, Melton R, Hall N, Wulff BBH, Doležel J, Langdon T, Han B, Osbourn A (2021). Subtelomeric assembly of a multi-gene pathway for antimicrobial defense compounds in cereals. *Nat. Comms.* 12:1. DOI: 10.1038/s41467-021-22920-8

Web links:

Osbourn lab: [Professor Anne Osbourn | John Innes Centre \(jic.ac.uk\)](https://www.jic.ac.uk/)

Stephenson, M. J., Reed, J., Brouwer, B., Osbourn, A. Transient Expression in *Nicotiana benthamiana* leaves for triterpene production at a preparative scale. *J. Vis. Exp.* (138), e58169, DOI:10.3791/58169 (2018). Link to video: [Transient Expression in Nicotiana Benthamiana Leaves for Triterpene Production at a Preparative Scale | Protocol \(jove.com\)](https://www.jove.com/video/58169)

Anne's prize-winning poetry collection [Mock Orange](#)

The SAW Trust - A cross-disciplinary science education initiative: www.sawtrust.org

SYNTHETIC AND SYSTEMS BIOLOGY OF CARBON FIXATION

Stéphane LEMAIRE

Laboratoire de Biologie Computationnelle et Quantitative
Institut de Biologie Paris Seine, UMR7238
CNRS, Sorbonne Université, Paris

Our species and civilisation face the greatest and most unprecedented agricultural, environmental, industrial and economic challenges in their history. Photosynthesis, the most efficient solar energy converter on Earth, provides energy and carbon for almost all life on our planet and is the source of the fossil fuels that power our technologies. The production of biofuels and photosynthetic bioproducts, as a renewable resource using solar energy and fixing atmospheric CO₂, represents one of the promising alternative forms of energy and carbon molecules. In addition, improving crop yields to meet the food needs of a growing world population is a major challenge for plant biology. Synthetic and systems biology offers new opportunities to answer fundamental questions using new concepts or to create artificial systems with biotechnological applications. The rise of synthetic biology offers a wonderful opportunity to enable a second green revolution by tackling the challenge of improving the efficiency of photosynthesis by engineering microalgae, cyanobacteria and plants. Recent promising results as well as avenues to explore for the future will be presented.

Selected references:

- F. Meng, T. Ellis, The second decade of synthetic biology: 2010-2020. *Nat Commun* 11, 5174 (2020).
- P. Crozet et al., Birth of a Photosynthetic Chassis: A MoClo Toolkit Enabling Synthetic Biology in the Microalga *Chlamydomonas reinhardtii*. *ACS synthetic biology* 7, 2074-2086 (2018).
- T. J. Erb, J. Zarzycki, Biochemical and synthetic biology approaches to improve photosynthetic CO₂-fixation. *Curr Opin Chem Biol* 34, 72-79 (2016).
- P. F. South, A. P. Cavanagh, H. W. Liu, D. R. Ort, Synthetic glycolate metabolism pathways stimulate crop growth and productivity in the field. *Science* 363, (2019).

RECONSTRUCTION OF PHOTOSYNTHETIC SYSTEMS BY MICROFLUIDIC MEANS

Jean-Christophe BARET

Université de Bordeaux, CNRS, CRPP-UMR5031
Institut Universitaire de France

The construction of artificial cells from elementary ingredients requires both a deep understanding of the functions and molecules involved in living processes and new technologies for the assembly of these functions into artificial systems. Microfluidics provides the essential tools for the creation and manipulation of micro-compartments, their functionalization and their analysis in large populations.

We design, develop, characterise and use microfluidic systems for the control of soft matter and biochemical systems and their integration into artificial cells. We focus on the design and integration of minimal metabolic systems in microcompartments of a few tens of microns.

Our bottom-up integration has led to the creation of artificial compartments that function under non-equilibrium conditions. These non-equilibrium conditions are achieved by controlling chemical reactions, by importing and releasing reagents and products or by collecting light to fuel metabolic cycles.

In this context, we have demonstrated that light harvesting can be coupled to artificial metabolic cycles for CO₂ capture and that the whole can be miniaturised in micro-compartments functioning as artificial chloroplasts.

In the long term, these tools will lead to the development of methods and systems of practical, industrial and therapeutic interest, as well as experimental tools that can be used to test hypotheses on the emergence of life from the non-living.

Selected references:

Out-of-equilibrium microcompartments for the bottom-up integration of metabolic functions, T. Beneyton, D. Krafft, C. Bednarz, C. Kleineberg, C. Woelfer, I. Ivanov, T. Vidakovic-Koch, K. Sundmacher and J.-C. Baret, *Nature Communications*, 9:2391 (2018)

Sequential bottom-up assembly of mechanically stabilized synthetic cells by microfluidics, M. Weiss, J. P. Frohnmayer, L. T. Benk, B. Haller, J.-W. Janiesch, T. Heitkamp, M. Boersch, R. B. Lira, R. Dimova, R. Lipowsky, E. Bodenschatz, J.-C. Baret, T. Vidakovic-Koch, K. Sundmacher, I. Platzman & J. P. Spatz, *Nature Materials*, 17, 89-96 (2018)

Light-powered CO₂ fixation in a chloroplast mimic with natural and synthetic parts, T. E. Miller, T. Beneyton, T. Schwander, C. Diehl, M. Girault, R. McLean, T. Chotel, P. Claus, N. Socorro Cortina, J.-C. Baret, T.J. Erb, *Science* 368, 6491, pp. 649-654 (2020)

Web links:

Group: <http://sms.crpp-bordeaux.cnrs.fr/>

Presentation video: https://www.youtube.com/watch?v=ugCghd_xCe0