

BIOMIMÉTISME & ÉNERGIE

.....
RAPPORT DE SYNTHÈSE

ÉDITION 2022



Ceebios

“

La transformation du système électrique est au cœur des enjeux du climat, de la transformation de notre société vers la neutralité carbone. Cette transition énergétique ne peut faire l'économie de la prise en compte de l'impact sur les écosystèmes, la biodiversité, les ressources.

Depuis plusieurs années, RTE s'intéresse au potentiel du biomimétisme pour explorer des pistes de solutions qui prennent bien en compte toutes ces dimensions. S'ouvre ainsi un champ de coopération pour tous les acteurs de l'énergie, des opérateurs aux industriels engagés pour la transition énergétique, faisant du biomimétisme un des piliers du développement des produits de l'énergie de demain.

C'est le sens de notre soutien à ce rapport qui marque la ligne de départ de cet espoir de coopération.

Olivier Grabette

Délégué Général en charge des Affaires Industrielles Européennes
Membre du COMEX
Rte

É D I T O

Le biomimétisme peut constituer un fil conducteur sur lequel s'appuyer pour choisir les technologies à développer, pour construire une expertise originale, innovante et porteuse d'activités économiques, mais aussi pour inspirer les futures technologies compatibles avec la transition écologique. Dans ce contexte, l'ADEME reconnaît tout l'intérêt du biomimétisme, notamment pour mieux intégrer l'industrie de l'énergie au cycle de vie des êtres vivants.

C'est pour collectivement relever ce défi que nous avons souhaité nous associer à cette publication qui ouvre sur un questionnement original, des perspectives et horizons nouveaux, des pistes de réflexion, des exemples stimulants et des réalisations possibles. Sur le fond, le biomimétisme interroge en profondeur nos objectifs, nos pratiques et nos exigences qui font souvent l'impasse sur l'impératif d'intégrer l'ensemble de nos activités au monde biologique et ses grands cycles biogéochimiques, ainsi qu'à la préservation des services écosystémiques.

Consciente de ces limites, l'ADEME a souhaité établir une convention nationale avec Ceebios afin d'utiliser les principes du biomimétisme pour mettre en œuvre une transition écologique responsable. L'objectif étant d'en faciliter l'appropriation par le plus grand nombre, le partage des meilleures pratiques et surtout l'émergence et la diffusion des solutions développées. Dans cette perspective, l'ADEME soutient des projets s'appuyant sur le biomimétisme, qu'ils relèvent de la recherche en connaissance nouvelle, de l'innovation ou du pré-déploiement industriel. C'est notamment le cas de l'hydrolienne à membrane ondulante pour la récupération de l'énergie des courants marins, issue de travaux de recherche financés par l'agence.

Dans les domaines des projets proches du marché, on peut également évoquer le projet s3, financé dans le cadre du programme d'investissements d'avenir, qui vise à déployer un prototype houlomoteur ondulant pour valoriser l'énergie des vagues. Citons

aussi, dans le domaine de l'agrivoltaïsme, le projet sun agri, également issu du programme d'investissements d'avenir, permettant de produire de l'électricité tout en contribuant à la résilience des cultures agricoles face au changement climatique.

Au-delà des projets de recherche et d'innovation accompagnés par l'ADEME, nous nous sommes associés aux côtés de Ceebios pour la réalisation d'un guide méthodologique sur l'écoconception biomimétique afin que les porteurs de projets puissent intégrer très tôt dans la réflexion la prise en compte des impacts environnementaux de leurs innovations.

Ces quelques exemples concrets dans le domaine de l'énergie fournissent une bonne idée du potentiel d'innovation du biomimétisme. Au-delà du seul domaine de l'énergie, ce constat nous incite aussi à impulser au sein de nos organisations une dynamique forte d'appropriation des concepts de biomimétisme pour faire évoluer nos pratiques dans tous nos domaines d'interventions. C'est à ce défi plus global que « biomimétisme et énergie » nous invite en proposant des pistes de réflexion et des propositions de solution.

Arnaud Leroy

Président Directeur Général de l'ADEME



Agence de la Transition écologique, l'ADEME accompagne tous ceux qui agissent pour mettre en œuvre les solutions, innover et préparer l'avenir pour accompagner la nécessaire transformation de nos modes de production et de consommation.

TABLE DES MATIÈRES

.05

INTRODUCTION

Réinventer notre relation à l'énergie, en observant le vivant

.06

ENJEUX MODERNES DE L'ÉNERGIE

Les limites à la croissance énergétique

.09

BIOMIMÉTISME

S'inspirer du vivant et de sa gestion de l'énergie

.14

LE POTENTIEL TECHNIQUE DU BIOMIMÉTISME

Trois exemples

Des bio-matériaux aux fonctions passives, par leur structure
Des stratégies du vivant, pour limiter la perte énergétique
Le vivant s'organise, pour déployer des réseaux

.20

AXES D'INSPIRATION

AXE 1. Sources et vecteurs énergétiques dans le vivant
AXE 2. Fonctions et conversion d'énergie dans le vivant
AXE 3. Spécialisation de sous-systèmes biologiques
AXE 4. Gestion du stress et régulation de la balance énergétique

.34

SYNTHÈSE & PERSPECTIVES

.38

ALLER PLUS LOIN

Groupe de travail filière & revue de littérature

.39

S'INSPIRER DU VIVANT POUR LA GESTION DE L'ÉNERGIE

Exemples de réalisations concrètes
Exemples de compétences nationales & internationales

INTRODUCTION

RÉINVENTER NOTRE RELATION À L'ÉNERGIE, EN OBSERVANT LE VIVANT

Tendre vers un modèle énergétique souhaitable

L'énergie est au cœur de la transition écologique de cette première moitié du XXI^e siècle. Collecter de l'énergie « propre », la stocker massivement pour pallier la variabilité de sa disponibilité et ce sans polluer. La transmettre efficacement pour répondre à la demande, optimiser son utilisation et limiter les pertes, autant d'éléments qui composent le cahier des charges des systèmes énergétiques de demain. Ce modèle énergétique souhaitable, porté à l'échelle internationale par des initiatives comme la COP 21, les *Green Deal* américain et européen et à l'échelle nationale par des acteurs comme l'ADEME, peut sembler utopiste. Pourtant, il peut d'ores et déjà être observé dans le reste du monde vivant. Depuis près de 3,8 milliards d'années, la Vie s'est construite autour de vecteurs énergétiques localement abondants pour assurer sa résilience et son développement tout en répondant à ses contraintes environnementales et fonctionnelles.

S'inspirer de la gestion de l'énergie dans le vivant

Le biomimétisme consiste à s'inspirer des stratégies des systèmes biologiques, afin d'apporter des solutions innovantes conciliant performances techniques et environnementales. Cette démarche appliquée au domaine de l'énergie ouvre un large champ d'innovations potentielles.

À travers ce rapport, la présentation des enjeux de la filière de l'énergie nous conduira à :

- ▼ étudier et analyser la gestion de l'énergie dans le vivant,
- ▼ présenter des exemples précis de modèles biologiques associés à des innovations biomimétiques incrémentales de court à moyen terme,
- ▼ formaliser une synthèse globale des axes stratégiques soulignant l'intérêt du biomimétisme pour un changement du paradigme de l'énergie, sur le moyen à long terme.

L'objectif de ce document est de présenter les opportunités du biomimétisme dans le cadre de la gestion de l'énergie et d'identifier un ensemble de leviers clés d'innovation biomimétique à actionner pour accélérer la transition écologique.

En cela, notre démarche s'intègre dans une double approche conjuguant un axe technico-scientifique et un axe sociétal et environnemental. Sans prétendre à l'exhaustivité, nous établissons une synthèse de l'état des lieux, pour informer, inspirer et structurer l'action des acteurs de la filière de l'énergie.

Ce document est la synthèse d'un rapport plus complet et détaillé, rédigé par les mêmes auteurs.

ENJEUX MODERNES DE L'ÉNERGIE

LES LIMITES À LA CROISSANCE ÉNERGÉTIQUE

Au cours de son développement, l'espèce humaine a progressivement accédé à une quantité croissante d'énergie. Plus que les produits alimentaires, qui nourrissent le système biologique qu'est l'être humain, c'est surtout l'accès aux vecteurs fossiles d'origine organique (charbon, pétrole, etc.), alimentant des machines non biologiques qui a considérablement accéléré la croissance du monde technologique. L'humanité est une espèce à part du point de vue de son rapport à l'énergie. C'est la seule qui l'utilise majoritairement pour alimenter des systèmes non vivants (les machines) et donc non soumis à la sélection naturelle ou à l'enjeu de sobriété¹.

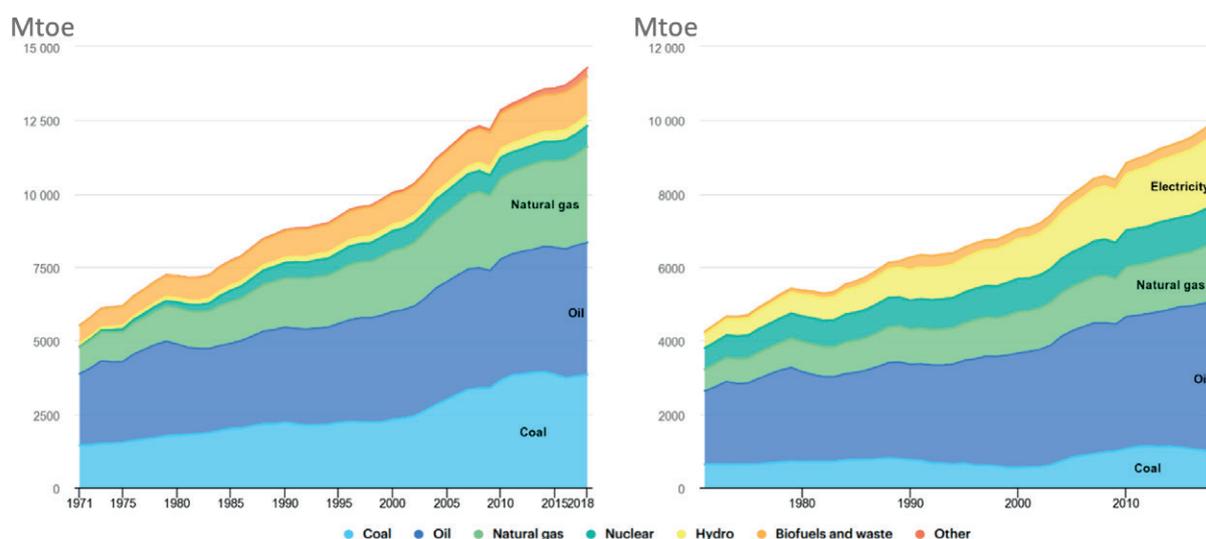


Figure 1.

Total de la production (gauche)² et de la consommation finale (droite)³ mondiale d'énergie par source.

Associée à l'essor du niveau de vie des pays de l'OCDE, la poursuite de la croissance démographique et industrielle de nombreux pays en développement (la Chine et l'Inde notamment) conduit à une augmentation continue de la quantité d'énergie utilisée par l'humanité. Se pose alors la question centrale des limites et des impacts multiples de cette croissance.

1 A. Gonzague, Le gaspillage énergétique, grand oublié de la COP21, L'OBS, 2015, <https://www.nouvelobs.com/planete/cop21/20151210.OBS1135/le-gaspillage-energetique-grand-oublie-de-la-cop21.html>

2 IEA, World total energy supply by source, 1971-2018, IEA, Paris, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-total-energy-supply-by-source-1971-2018>

3 IEA, World total final consumption by source, 1973-2018, IEA, Paris, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-total-final-consumption-by-source-1973-2018>

Quatre axes principaux peuvent être identifiés pour étudier les limites à cette croissance de la consommation énergétique mondiale⁴ :

▼ les limites des stocks de ressources utilisées comme sources d'énergie

La recherche scientifique sur la composition de la planète Terre a permis d'estimer les durées limites d'exploitation des différentes ressources fossiles exploitées au rythme actuel⁵ : entre 50 à 100 ans d'exploitation maximum. Ces ressources fossiles représentant 83% du mix énergétique mondial (hors nucléaire³), le maintien d'une balance énergétique stable demande d'anticiper la fin des stocks pour prévenir une chute drastique des apports en énergie d'origine fossile.

▼ les limites de l'équilibre du système de la planète Terre^{6,7}

Les impacts de l'activité humaine sur notre environnement planétaire peuvent conduire à un déséquilibre des fondements environnementaux sur lesquels notre société est construite (climat, biodiversité, composition atmosphérique, etc.). Il s'agit donc de considérer les limites à respecter pour prévenir un tel déséquilibre.

▼ les limites de nos savoirs et savoir-faire scientifiques et technologiques

Notre incapacité à réduire drastiquement nos impacts questionne la réponse scientifique et technologique aux limites planétaires. Si la technologie ne peut être vue comme le seul axe de réponse, elle a toutefois un rôle fondamental à jouer.

▼ les limites politiques, socio-économiques et sociétales⁸

La prise de conscience des trois limites précédemment explicitées nous intime de sortir d'une croissance toujours plus forte des usages de l'énergie, fondée sur notre émancipation des règles de sobriété intrinsèques au reste du vivant. Requestionner nos modes de consommation, réinterroger le paradigme de l'énergie⁹, repenser les objectifs sociétaux sont autant de composantes clés d'un avenir plus souhaitable. Seuls des choix politiques éclairés en faveur d'une orientation réfléchie de notre croissance sociétale, dont l'axe reste à (re)définir, pourront nous guider dans la transition vers un modèle énergétique durable.

Si les enjeux liés aux limites des stocks et aux limites de l'équilibre terrestre émergent de contraintes naturelles imposées par notre planète, les enjeux technico-scientifiques et politico-sociétaux sont dépendant de notre capacité d'espèce à choisir les bons leviers de résolution.

Plusieurs décennies de travaux scientifiques¹⁰ ont souligné le lien entre notre modèle énergétique

et notre impact sur l'environnement. La durabilité sociétale est dépendante de la durabilité énergétique. Cette transition vers un système énergétique durable s'impose aujourd'hui encore plus qu'hier comme un objectif international majeur, tel qu'exprimé en 2015 dans les Objectifs de Développement Durable de l'ONU¹¹, notamment l'ODD n°7.

4 RTE, "Futurs énergétiques 2050 : les scénarios de mix de production à l'étude permettant d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050", [Online]. Available: <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques#Lesdocuments>

5 <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/le-developpement-durable/l-epuisement-des-ressources>

6 Meadows, D. H., Randers, J., & Meadows, D. L. (2013). The limits to growth. *The Future of Nature: Documents of Global Change*, 101–112.

7 Rockström, J., Steffen, W., Noone, K. et al. A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475 (2009). <https://doi.org/10.1038/461472a>

8 Joakim Kulin & Ingemar Johansson Sevä (2019) The Role of Government in Protecting the Environment: Quality of Government and the Translation of Normative Views about Government Responsibility into Spending Preferences, *International Journal of Sociology*, 49:2, 110-129, <https://doi.org/10.1080/00207659.2019.1582964>

9 Spittler, N.; Gladkykh, G.; Diemer, A.; Davidsdottir, B. Understanding the Current Energy Paradigm and Energy System Models for More Sustainable Energy System Development. *Energies* 2019, 12, 1584. <https://doi.org/10.3390/en12081584>

10 <https://www.ipcc.ch/reports/GIEC> (FR) = IPCC (EN)

11 <https://www.un.org/fr/chronicle/article/lobjectif-de-developpement-durable-relatif-lenergie-et-les-technologies-de-linformation-et-de-la> (ONU)

BIOMIMÉTISME

S'INSPIRER DU VIVANT ET DE SA GESTION DE L'ÉNERGIE

Le monde vivant fonctionne à l'énergie solaire. Les flux de matière sont régulés et distribués de manière circulaire. Les écosystèmes sont résilients aux perturbations. Les organismes peuvent notamment se nourrir, communiquer, se développer, se protéger et s'auto-réparer de manière sobre et efficiente. Le vivant intègre une multitude de réponses aux défis auxquels l'humanité est aujourd'hui confrontée. Ces réponses s'observent à de nombreuses échelles de temps et d'espace.

Le biomimétisme nous invite à observer les principes qui régissent le monde biologique, à identifier les règles qui le régulent, à comprendre l'organisation qui lui confère son équilibre. Il nous invite également à étudier en détails les stratégies de résolution des défis techniques qu'une telle organisation implique.



C'est bien là toute la richesse de l'approche biomimétique, qui questionne notre structure de développement et offre des leviers techniques en proposant des alternatives plus durables.

Qu'ils soient techniques ou biologiques, les systèmes sont soumis aux lois de la physique et, dans le cas de l'énergie, aux principes de la thermodynamique. Le premier de ces principes souligne que la quantité d'énergie est toujours conservée. Le deuxième explique que l'énergie se disperse naturellement et diminue donc inexorablement en qualité.

Ces principes nous invitent à considérer que l'énergie n'est disponible pour un organisme qu'à la condition d'avoir pu être prélevée dans son environnement. De plus, comme cette énergie prélevée se disperse, le vivant doit en user en permanence pour assurer le maintien de sa structure organisée et ses fonctions vitales.

En conclusion : la collecte, le stockage, le transfert et l'utilisation d'énergie sont des fonctions cruciales dans la survie des espèces¹².

La convergence des besoins fonctionnels des mondes biologiques et technologiques (se déplacer, communiquer, protéger, etc.) ainsi que des défis énergétiques associés (stocker, transmettre, collecter et utiliser de l'énergie durablement) (Figure 2) nous conduit à vouloir apprendre de la manière dont la Vie articule, depuis près de 3,8 milliards d'années, une gestion durable de l'énergie.

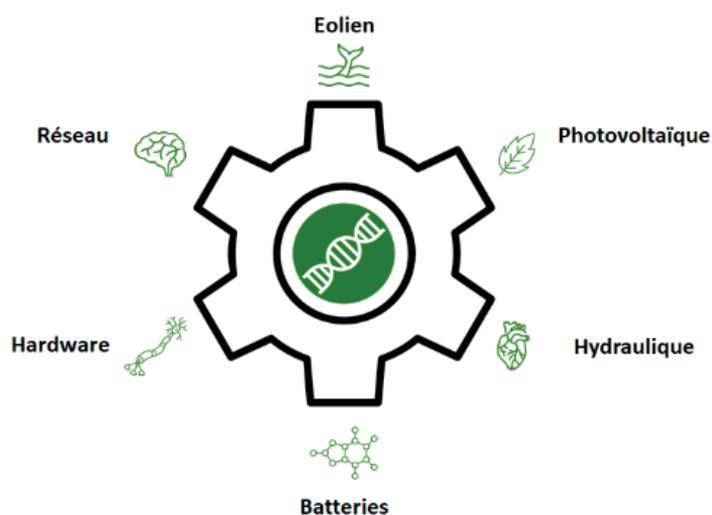


Figure 2. Illustration des convergences entre les besoins fonctionnels technologiques et biologiques
© Ceebios



(Credit : Christian Van Bebbber on Unsplash)

La caractérisation d'un futur souhaitable pour l'humanité est aujourd'hui au cœur de la démarche de transition sociétale. Le biomimétisme offre un cadre cohérent à cette transition en décrivant un ensemble de fondations sur lesquelles construire un équilibre durable.

Comparer les mondes technologique et biologique sur un ensemble de critères liés à la gestion de l'énergie permet d'identifier de grands axes d'innovation biomimétiques possibles, de nouvelles contraintes à anticiper et de nouveaux prismes d'analyse. Ce rapprochement avec le vivant nous conduit à faire évoluer notre rapport à l'énergie (Tableau 1).

SOURCES & VECTEURS D'ÉNERGIE		
	MONDE TECHNOLOGIQUE	MONDE BIOLOGIQUE
Vecteur d'énergie majoritaire	Hydrocarbures	Photon solaire
Durée avant épuisement des stocks des vecteurs énergétiques principaux	Quelques dizaines à centaines d'années	Correspond à la durée de vie du soleil soit environ 5 milliards d'années
Taux de renouvellement des vecteurs	Plusieurs millions d'années = vecteurs fossiles	Continu = vecteurs renouvelables
Mobilité des vecteurs	Possible sur de grandes distances = énergie de stock	Limitée localement = énergie de flux
Variabilité de la disponibilité des vecteurs	Variabilité faible jusqu'à épuisement des stocks	Variabilité permanente (saison, heure, climat, etc.)

INFRASTRUCTURE DE GESTION DE L'ÉNERGIE		
	MONDE TECHNOLOGIQUE	MONDE BIOLOGIQUE
Matériaux & composition	Grande quantité de matière, peu recyclée et présence d'éléments rares	Économe en matière, matière entièrement recyclée basée sur des éléments abondants
Assemblage des infrastructures	Assemblage industriel polluant et coûteux en énergie	Auto-assemblage dans l'eau, à température et pression ambiantes
Désassemblage des infrastructures	Désassemblage coûteux en énergie, long et polluant	Désassemblage rapide en briques élémentaires valorisées biocompatibles
Impact sur l'environnement	Pollution, destruction d'habitat, artificialisation des sols, etc.	Dépollution, création d'habitat, perméabilisation des sols, etc.
Plage de fonctionnement	Plage de fonctionnement étroite (fonctionnement dans des conditions précises), faible résistance aux conditions changeantes (optimisation monocritère / maximisation)	Plage de fonctionnement variable, d'étroite à large selon l'environnement, forte résistance aux conditions changeantes (optimisation multicritère)
Résilience des systèmes	Une dégradation même faible peut conduire à l'arrêt complet du système	Une dégradation conduit le plus souvent à une réduction du rendement avant un retour à l'état d'équilibre

PROCESSUS ASSOCIÉS À L'ÉNERGIE		
	MONDE TECHNOLOGIQUE	MONDE BIOLOGIQUE
Extraction des vecteurs	Forage dans le sous-sol	Directement disponible sous réserve d'exposition au soleil
Transport des vecteurs de collecte	Transport mondial depuis les principaux producteurs vers l'ensemble des pays	Pas ou peu de transport des vecteurs énergétiques chimiques, sous contrôle du métabolisme
Transformation des vecteurs de collecte en vecteur utile	Apport d'énergie pour raffiner les hydrocarbures en vecteurs énergétiques utilisables ou en matériaux pétro-sourcée (ex. plastiques)	Utilisation de l'énergie du photon, du CO ₂ et d'H ₂ O pour former des vecteurs d'énergie chimique utilisable
Usages	<p>Permet au système technique de générer de la chaleur par combustion d'hydrocarbures et d'utiliser (chauffage individuel ou collectif) ou convertir cette chaleur en énergie mécanique (moteur, turbine, etc.) pour assurer un ensemble de fonctions (mobilité, génération d'électricité, etc.)</p> <p>Utilisation de matériaux d'intérêt dans l'industrie (ex. textile, agroalimentaire, etc.)</p>	<p>Permet aux systèmes vivants d'accomplir leurs fonctions vitales par oxydation du vecteur d'énergie chimique en vecteurs chimiques instables utilisés pour rendre possible des réactions chimiques et la conversion d'énergie chimique en énergie mécanique (reproduction, nutrition, communication, etc.)</p> <p>Utilisation pour l'assemblage et la structuration de la matière constitutive des organismes</p>
Fin de vie	Perte de l'énergie sous forme de chaleur, relargage des produits de combustion (dont H ₂ O et CO ₂), dégradation difficile des matières pétro-sourcées	Perte de l'énergie sous forme de chaleur (utilisée par certains systèmes biologiques), relargage des produits d'oxydation complète (H ₂ O et CO ₂), biodégradation

Tableau 1. Comparaison de la gestion de l'énergie entre les mondes technologique et biologique
© Ceebios

Credit : Jean Steiner/Pixabay



Aujourd'hui acceptée comme nécessaire pour assurer la pérennité de la civilisation humaine, la transition vers un système énergétique basé sur des vecteurs dits renouvelables est une transformation qui a déjà été effectuée par le monde vivant au cours de l'évolution.

Si le soleil correspond aujourd'hui à la source primaire d'énergie largement majoritaire, l'hypothèse admise par la communauté scientifique est que les premiers organismes, apparus au fond des océans, puisaient leur énergie de molécules minérales et non du rayonnement solaire. Une déduction notamment basée sur l'observation de d'organismes contemporains comme les bactéries sulfo-oxydantes ou méthanogènes¹³.

En effet, la Vie, qui utilise majoritairement des ressources locales, est apparue dans les océans où le rayonnement solaire se fait rare. Son système énergétique était alors basé sur les molécules qui l'entouraient. Ce n'est que dans un second temps, lorsque la Vie est sortie de l'eau, que le soleil, largement disponible, a été utilisé comme source énergétique et a pris sa place centrale dans la gestion de l'énergie par le vivant.

Cette évolution montre que la Vie privilégie toujours l'utilisation de ressources locales abondantes, et que la transition qu'il nous faut accomplir n'est pas seulement possible, mais qu'elle suit la logique du développement du monde vivant : un développement global à la surface du globe nécessite de passer à une énergie massivement disponible, comme le fait le vivant.

Le biomimétisme nous permet alors de cibler les compromis nécessaires à la transition énergétique en cours : l'adaptation aux ressources locales, la variabilité de la production et de l'accès à l'énergie, le renouvellement continu, la chute du rendement de conversion au profit de la multifonctionnalité, etc. Ces compromis, indispensables pour construire une société pérenne dans un environnement fini, sont autant de profondes modifications de notre manière d'appréhender l'énergie.

Si le biomimétisme nous invite, sur un axe stratégique, à faire un pas de recul pour observer les grandes règles structurant le monde du vivant, il permet également, sur un axe technique, de répondre aux problèmes inhérents au requestionnement de notre approche de l'énergie. On peut ainsi lister un ensemble d'axes fonctionnels associés à l'énergie et pour lesquels le biomimétisme présente de fortes potentialités.



Une transition analogue à celle que nous souhaitons effectuer
(d'une énergie de stock vers une énergie de flux)
a façonné le développement de la Vie à la surface
de la Terre.

¹³ Minic, Z., Serre, V., & Hervé, G. (2006). Adaptation des organismes aux conditions extrêmes des sources hydrothermales marines profondes. In Comptes Rendus - Biologies (Vol. 329, Issue 7, pp. 527-540). <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2006.02.001>



Illustration des adaptations du vivant en fonction des ressources locales (cactus en zone aride).

LE POTENTIEL TECHNIQUE DU BIOMIMÉTISME

TROIS EXEMPLES

Trois prismes sont ici choisis pour illustrer le potentiel technique du biomimétisme :

- ▼ un prisme structurel
- ▼ un prisme fonctionnel
- ▼ un prisme organisationnel.



*Illustration de la structuration des yeux d'insectes,
conduisant ici à la superhydrophobie des yeux de libellules*

DES BIO-MATÉRIAUX AUX FONCTIONS PASSIVES PAR LEUR STRUCTURE

Les matériaux biologiques sont souvent très structurés, à de très petites échelles. Ces micro- et nanostructurations, largement répandues aux interfaces des systèmes vivants, assurent la fonctionnalisation des matériaux biologiques (Tableau 2). Les fonctions (autonettoyage, hydrophobie, anti-reflet, etc.) sont assurées de manière passive, par la forme du matériau, avec un coût énergétique propre nul lors de la phase d'usage.

Fonctions	Modèles biologiques
Concentration du rayonnement solaire	Aile de papillon
Propriété antireflet	Yeux d'insecte (Figure 4)
Guidage du rayonnement lumineux	Poils d'ours polaire
Favorise la réflexion et l'émission	Poil de fourmi
Maintenance par auto-nettoyage	Type « <i>Effet Lotus</i> »
Protection à l'eau	Type « <i>Effet Lotus</i> »
Protection anti-biofilms	Cigale

Tableau 2. Exemple du potentiel fonctionnel associé à la structuration des matériaux biologiques
© Ceebios

S'inspirer de ces modèles représente un fort potentiel d'innovation pour nos systèmes énergétiques ayant des besoins fonctionnels souvent comparables (auto-nettoyage des panneaux photovoltaïques, protection contre les biofilms, etc.).

DES STRATÉGIES DU VIVANT, POUR LIMITER LA PERTE ENERGETIQUE

Les organismes vivants sont des systèmes chimiques dont l'intégrité structurelle et le fonctionnement dépendent de la température. Ils assurent leur fonction de thermorégulation à travers un ensemble de stratégies alliant matériaux, structure, processus et organisation (Tableau 3). S'inspirer de ces stratégies peut nous permettre d'imaginer de nouveaux systèmes prévenant, limitant et contrecarrant les variations de température par l'association de solutions actives et passives réduisant le coût énergétique global.

Fonctions	Modèles biologiques
Produire de la chaleur	Graisse brune
Valoriser la chaleur fatale	Contraction musculaire et métabolisme
Isoler thermiquement	Trichomes végétaux
Limiter la radiation solaire	Canopée
Réguler l'émission infrarouge	Papillon Morpho
Ventiler passivement	Termitière
Utiliser de l'énergie thermique	Sudation (photo)

Tableau 3. Exemple du potentiel fonctionnel associés aux modèles biologiques de thermorégulation
© Ceebios



Phénomène de sudation comme processus de conversion d'énergie thermique
© Pixabay

Dans le vivant, comme dans la technosphère, la chaleur est la principale cause de pertes énergétiques, notamment par le frottement des structures dans leur milieu fluide. Si cette contrainte énergétique est très forte, elle a conduit au cours du temps au développement d'un ensemble de stratégies d'hydro- et d'aérodynamisme visant à limiter les pertes (Tableau 4).

Fonctions	Modèles biologiques
Réduire les frottements de surface	Peau du requin et du dauphin
Gérer les turbulences	Nageoires de baleine
Limiter les perturbations aéroacoustiques	Chouette effraie (Figure 6)
Déplacement ondulatoire	Ondulation chez les poissons
Limitation des problèmes de cavitation	Superhydrophobie des collemboles

Tableau 4. Exemple du potentiel fonctionnel associés aux modèles biologiques d'hydro/aérodynamisme
© Ceebios

Transposer les stratégies de gestion des frottements observées dans la nature vers des domaines où s'exercent les mêmes contraintes environnementales, que ce soit pour des fonctions similaires (génération d'énergie mécanique pour une mise en mouvement) ou inverses (collecte d'énergie grâce à une mise en mouvement) ouvre la voie à un grand nombre d'applications potentielles dans le secteur de la mobilité (gestion des flux, frottement de surface, etc.) et de l'énergie (turbine, oscillateur, etc.).



Modèle de limitation des perturbations
aéroacoustiques par la chouette effraie
© KevinPhotos/Pixabay

LE VIVANT S'ORGANISE, POUR METTRE EN PLACE DES RÉSEAUX

L'organisation du monde vivant en réseau de matière et d'énergie peut être observée à différentes échelles : celle de l'organisme, de la population, de l'écosystème, etc. Le vivant se développe à travers la coévolution des différents organismes dans leurs environnements respectifs, menant à l'émergence de systèmes coordonnés dans un équilibre dynamique sous contraintes, pouvant dans certains cas conduire

à des situations durablement efficaces, sobres et résilientes.

L'observation de la structuration de ces systèmes apparaît alors comme une nouvelle source d'inspiration, cette fois de nature organisationnelle (Tableau 5).

Fonctions	Modèles biologiques
Maintenir des apports énergétiques constants	Homéostasie énergétique
Prévenir les perturbations du réseau	Comportement adaptatif des essaims
Pallier les accidents ponctuels	Système circulatoire des feuilles
Diriger les flux au sein d'un système complexe	Organisation des bancs de poissons (Photo)
Optimiser l'architecture réseau	Croissance du blob

Tableau 5. Exemple du potentiel fonctionnel associés aux modèles de gestion de réseaux biologiques
© Ceebios

Les exemples présentés dans ces trois prismes (structurel, fonctionnel et organisationnel) illustrent le potentiel technique du biomimétisme. Outre le changement de paradigme que nous propose le biomimétisme dans notre relation au monde vivant, et de manière plus globale à notre environnement, il permet donc d'apporter une réponse concrète aux freins techniques de la transition en cours. Ces deux

niveaux d'inspiration, stratégique et technique, sont au cœur de la démarche d'innovation biomimétique.

Notre compréhension des tendances clés sélectionnées au cours de l'évolution, aussi appelées « *principes du vivant*¹⁴ », nous conduit à identifier de nombreux axes d'innovation pour la filière de l'énergie.

14 Différentes formalisations des principes du vivant existent dans la littérature, telle la version du Biomimicry 3.8 ou du guide KARIM. Le référentiel d'origine par Hoagland, B. Dodson & J. Hauck est celui utilisé dans ce rapport. On notera que ces principes sont toujours discutés et affinés par la communauté scientifique, dont Ceebios et ses partenaires académiques. Avec ce regard critique en tête, le recours à ces principes du vivant dans cette synthèse vise à la structuration d'un prisme d'analyse de modèles vivants questionnant nos pratiques technologiques.



*Modèle de comportement collectif
dans un banc de poissons*

© 123RF

AXES D'INSPIRATION

.01 SOURCES ET VECTEURS ÉNERGÉTIQUES DANS LE VIVANT

Le vivant structure la matière grâce à l'énergie et échange l'énergie par le biais de matière. Dans le vivant encore plus qu'ailleurs, matière et énergie sont intimement liées. Toutes deux sont vitales à la survie de chaque organisme, au cœur des processus biologiques.

De ce constat émerge une première question : celle de la source et de la forme d'énergie. Comment le système s'alimente-t-il en énergie et sous quelle forme

l'énergie est-elle collectée, transmise et/ou utilisée ?

La source première d'énergie du monde vivant est le soleil. L'énergie solaire (énergie électromagnétique) est convertie par la photosynthèse en énergie chimique. Par le biais d'une réaction en chaîne, l'énergie des photons est utilisée pour effectuer la réaction de photocatalyse de l'H₂O (ce qui libère de l'O₂) et la réduction du CO₂ inorganique (ce qui stocke du CO₂) en sucres (matière organique) (Eq. 1).



Eq. 1. Bilan réactionnel global de la photosynthèse

Cette capacité des organismes photosynthétiques (plantes vertes, phytoplanctons et certaines bactéries) à utiliser de l'énergie pour transformer la matière inorganique (CO₂) en matière organique (sucres) leur vaut l'appellation de « *producteurs primaires* ». Ce processus liant l'énergie de flux (le rayonnement solaire) et l'énergie de stock (matière organique) est le fondement de l'entrée d'énergie dans la biosphère¹⁵. Ces sucres synthétisés intègrent le métabolisme des organismes et représentent les principaux vecteurs énergétiques d'utilisation : « *le vivant fonctionne au sucre*¹⁴ ».

Cependant, la majorité des animaux sont incapables d'utiliser le soleil comme une source d'énergie directe. Si cette source d'énergie de flux ne leur est pas accessible, l'énergie leur demeure vitale et doit donc

être collectée par ailleurs. C'est par une alimentation basée sur la consommation d'autres êtres vivants, eux riches en vecteurs d'énergie chimique (énergie de stock), que ces apports sont assurés. Les organismes consommant des producteurs primaires sont ainsi nommés « *consommateurs primaires* ». Ils nourrissent eux-mêmes des consommateurs dits « *secondaires* » et ainsi de suite. Une troisième catégorie d'organismes complète le tableau du réseau de matière et d'énergie du Vivant : les « *décomposeurs* ». Ces organismes se nourrissent également de matière organique, mais le font lorsqu'un organisme meurt¹⁶. Ils assurent la décomposition de la matière en molécules inorganiques essentielles aux producteurs primaires. Si l'un de ces maillons est rompu, c'est toute la chaîne qui est impactée : « *le vivant est interconnecté et interdépendant*¹⁴ » (Figure 3).

¹⁵ C. Goupil, H. Ouerdane, E. Herbert, Cl. Goupil and Y. D'Angelo. Thermodynamics of metabolic energy conversion under muscle load. New J. Phys. 21 023021 -2019

¹⁶ Allan, J. D., & Castillo, M. M. (2007). Primary producers. Stream Ecology, 105-134. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5583-6_6

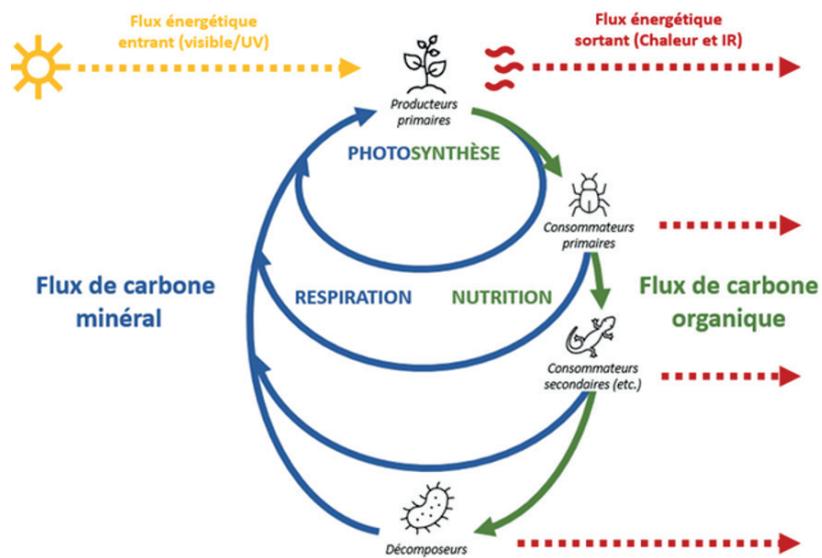


Figure 3 : Principe d'interconnexion et d'interdépendance à travers l'exemple des relations trophiques à l'échelle d'un écosystème
© Ceebios

Si les organismes sont interconnectés au sein des écosystèmes, leur niveau de dépendance varie et une seconde observation émerge. En effet, si un organisme consommateur disparaît, alors la chaîne est impactée mais non rompue. En revanche, si ce sont les producteurs primaires ou les décomposeurs qui sont retirés de l'équation, alors le flux s'arrête. La matière et l'énergie se retrouvent bloquées dans un compartiment. Pour éviter ce scénario destructeur, les écosystèmes se structurent naturellement en pyramide composée d'une large base (les producteurs primaires) et d'un sommet étroit (les consommateurs en fin de chaîne).

Formalisée en 1942 par la loi de Lindemann, cette structuration du vivant montre que, dans un écosystème donné, un facteur d'environ 10 sépare les flux d'énergie de deux strates de consommateurs successifs : « *le vivant construit de bas en haut* »¹⁴ (Figure 4).

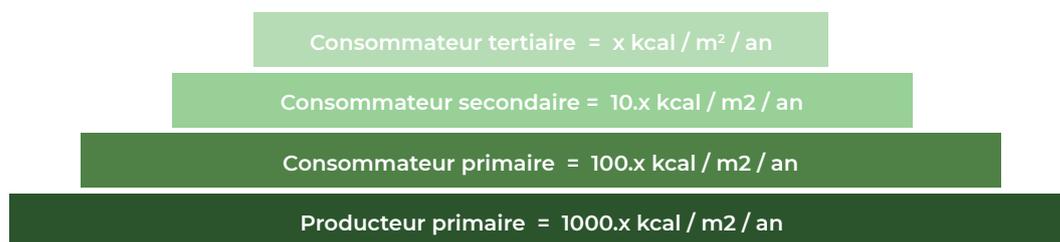


Figure 4 : Illustration du principe de construction de bas en haut à travers l'exemple des pyramides trophiques et de la loi de Lindemann

Ce principe de construction, préconisant une démarche depuis la base vers le haut, ne s'applique pas uniquement à la mise en place des écosystèmes. Il peut être observé à toutes les échelles, notamment à celle des organismes, construits de cellules associées en tissus, eux-mêmes associés en organes, etc.

Une fois entrée dans le monde vivant, l'énergie doit pouvoir être transmise, stockée et utilisée. Cette

diversité de besoins fonctionnels associés à la gestion de l'énergie sous forme chimique conduit à une variabilité des caractéristiques des vecteurs considérés (mobilité, réactivité, stabilité, etc.). Ainsi, les sucres simples comme le glucose, formés par les producteurs primaires, sont les molécules « *carrefour* » du réseau de transformations biochimiques nécessaires aux besoins fonctionnels associés à la gestion de l'énergie (Figure 5).

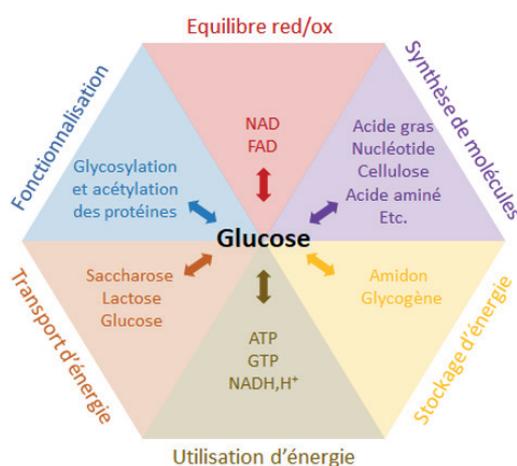


Figure 5 : Illustration du principe du vivant de fonctionnement au sucre

▼ Lorsqu'une cellule a besoin d'énergie, elle utilise le glucose comme réactif de la respiration cellulaire. Ce mécanisme biologique conduit à la synthèse d'Adénosine TriPhosphate (ATP), "*petite monnaie*"

énergétique des cellules, par oxydation de ce sucre (Eq. 2). C'est l'ATP, et non le sucre, qui est le vecteur énergétique directement utilisable par les cellules.



Eq. 2. Bilan réactionnel global de la respiration aérobie

▼ Lorsque l'apport dépasse la demande, les vecteurs énergétiques sont stabilisés avant d'être transportés et/ou stockés. Le vivant utilise notamment la polymérisation de la matière comme levier de régulation. Ainsi, plus le glucose est polymérisé (assemblé en chaînes moléculaires) et plus il est stable. Cette plus grande stabilité favorise son transport (saccharose),

puis son stockage (amidon), et permet même d'assurer des fonctions structurales (cellulose). Lorsque les vecteurs d'énergie doivent être stockés sur une longue durée, les sucres sont transformés en lipides (les graisses), encore plus stables et plus denses en énergie (Figure 6).

Le rôle central de la réaction de polymérisation dans la gestion des vecteurs énergétiques par le vivant souligne le fait que « *le vivant s'assemble en chaîne*¹⁴ ». C'est notamment la variabilité de la longueur de ces chaînes qui permet l'émergence de la diversité des fonctions de gestion des vecteurs énergétique : leur stockage, leur transport et leur utilisation.

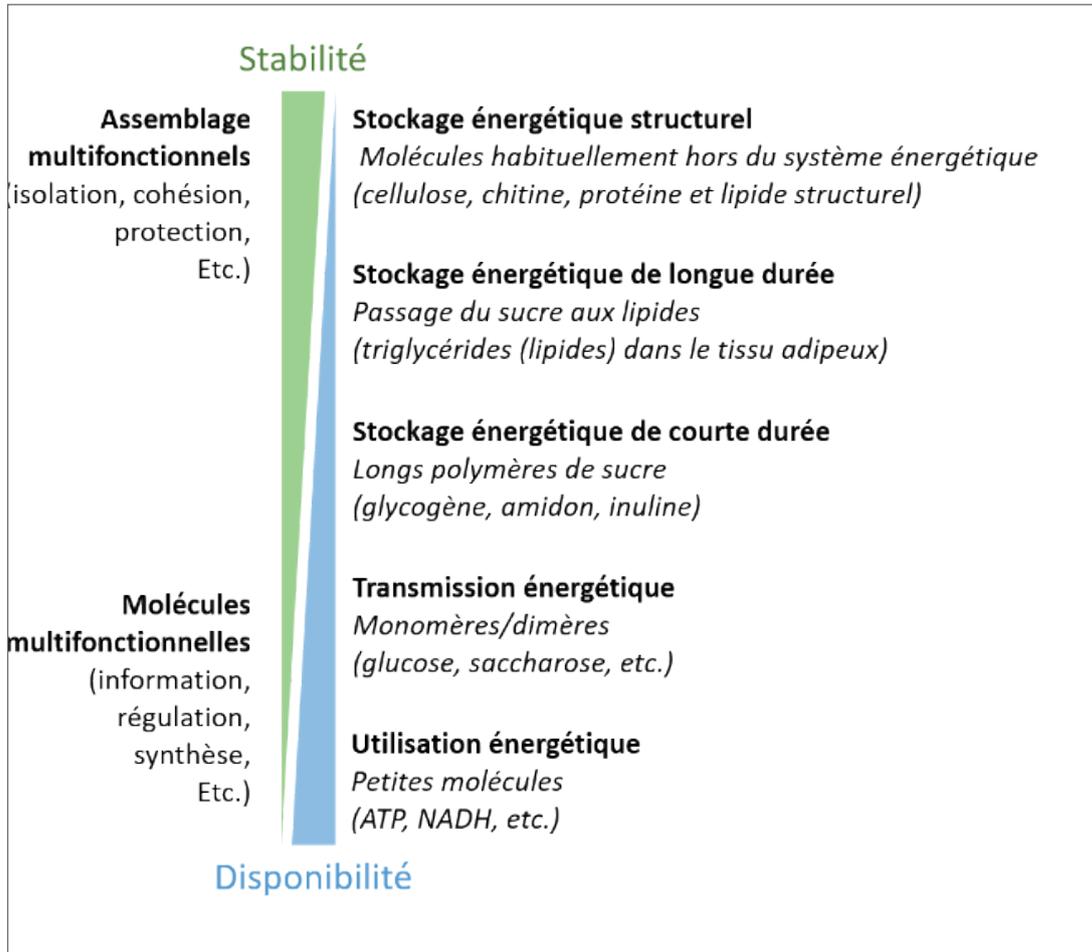


Figure 6. Illustration du principe d'assemblage en chaîne à l'échelle moléculaire pour assurer la stabilité des vecteurs de stockage d'énergie © Ceebios

L'analyse des sources et vecteurs énergétiques du monde vivant nous conduit à souligner un dernier élément fondamentalement ancré dans la gestion de ces ressources. Comme l'énonce le second principe de la thermodynamique, la qualité de l'énergie ne fait que se dégrader au cours du temps, depuis des formes très structurées comme l'énergie chimique, vers une forme désorganisée : l'énergie thermique. Le monde vivant est donc composé d'un ensemble

de systèmes dégradant en permanence la qualité de l'énergie qui les traverse pour structurer leur propre matière et remplir leurs fonctions. Là où la qualité de l'énergie n'évolue donc que de manière linéaire, le flux de la matière, et donc des vecteurs d'énergie, est en revanche profondément circulaire. Les bilans de la photosynthèse et de la respiration parlent d'eux-mêmes : pour la matière, la vie sur Terre fonctionne essentiellement en circuit fermé (Figure 7).

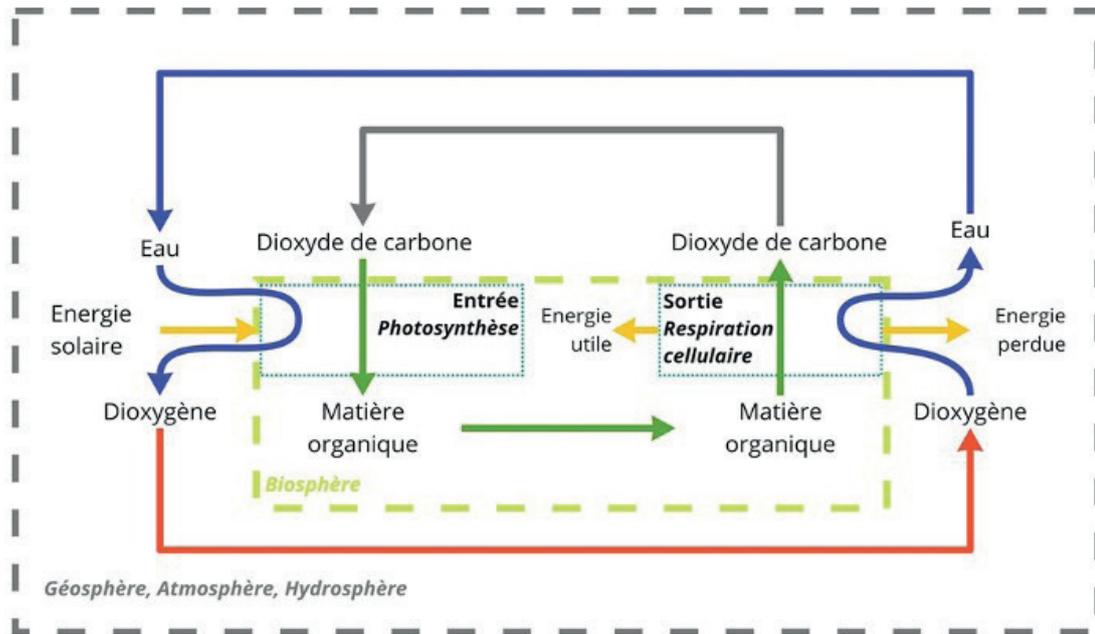


Figure 7. Illustration du principe de recyclage dans le vivant à travers l'exemple de l'équilibre entre les mécanismes de respiration et photosynthèse, fondations de la gestion énergétique © Ceebios

Ainsi, les atomes et molécules qui nous composent et transportent notre énergie sont les mêmes que ceux qui composaient les plantes de l'époque des dinosaures. Le flux de matière assuré par le couple « producteurs primaires / décomposeurs » constitue le fondement de la pérennité du mécanisme par lequel le vivant est capable de s'alimenter en énergie sans épuiser le stock de ressources : « le vivant recycle ce qu'il utilise¹⁴ ». En cela, les phases de construction et de dégradation sont d'égale importance pour garantir la capacité du monde vivant à persister.

Émerge de ces flux un lien étroit entre matière et énergie. De manière générale, avec peu d'éléments

chimiques (C, H, N, O...), le vivant assemble des blocs unitaires en superstructures qui, par leur architecture et leur agencement à toutes les échelles, se fonctionnalisent. Là où la technosphère use d'éléments rares (comme les métaux) ou d'énergie pour traiter le matériau (par exemple la fabrication du verre à haute température), « le vivant s'organise avec l'information¹⁴ ». C'est ainsi la variabilité de l'information génétique, qui conduit à une diversité d'agencement de seulement 20 acides aminés en plusieurs centaines de milliers de protéines aux fonctions propres¹⁸.

18 Vincent, J. F. V., Bogatyreva, O. A., Bogatyrev, N. R., Bowyer, A., & Pahl, A. K. (2006). Biomimetics: Its practice and theory. *Journal of the Royal Society Interface*, 3(9), 471-482. <https://doi.org/10.1098/rsif.2006.0127>

AXES D'INSPIRATION

.02 FONCTIONS ET CONVERSION D'ÉNERGIE DANS LE VIVANT

Tout organisme est en permanence soumis à un grand nombre de contraintes environnementales qui requièrent une réponse multifonctionnelle complexe. Cette réponse repose sur la conversion d'énergie permettant de produire un travail et d'accomplir des fonctions. Le principal vecteur énergétique utilisé par les cellules est l'ATP (voir « *Axe d'inspiration 1* »). Universelle, cette molécule est l'agent d'utilisation de l'énergie du vivant. En raisonnant par analogie, on peut assimiler cette molécule à

une batterie possédant deux formes majoritaires : l'adénosine diphosphate (ADP, déchargée) et l'adénosine triphosphate (APT, chargée). La liaison du troisième groupement phosphate est dite à « *haut potentiel* » dans la mesure où elle nécessite une quantité importante d'énergie pour être maintenue. L'ATP, très instable, tend à rapidement retrouver sa forme plus stable, l'ADP, en réagissant avec son environnement pour transférer l'énergie et libérer le troisième groupement phosphate (Figure 8).

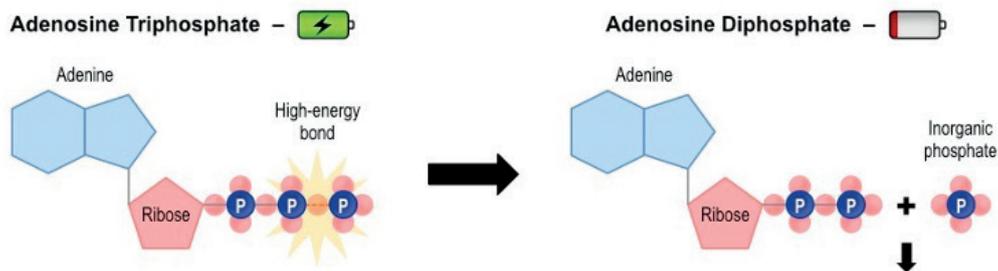


Figure 8. Réaction d'hydrolyse de l'ATP qui permet l'utilisation d'énergie dans le vivant de manière universelle

De ce fait, l'ATP est formée localement et en continu par l'organisme¹⁹. La cellule contraint le retour de l'ATP à la forme ADP en le couplant avec d'autres réactions pour tirer profit de l'énergie libre qui en découle. C'est ainsi que sont effectuées la quasi-totalité des réactions endergoniques (ayant besoin d'énergie pour se réaliser) de l'organisme.

Par exemple, l'ATP est utilisée pour permettre le changement de conformation de la molécule de myosine, entraînant son mouvement à l'échelle moléculaire, qui, répété un grand nombre de fois, conduit aux glissements des fibres musculaires et à la contraction des muscles permettant la locomotion²⁰.

Les fonctions du monde vivant reposent ainsi sur l'apport d'énergie rendu possible par des cycles de charge/décharge de l'ATP²⁰. La capacité des sous-systèmes fonctionnels (aussi bien l'ATP, que les muscles, que les complexes bioluminescents, etc.) à retrouver leur état initial assure aux organismes leur capacité à remplir de manière répétée leurs différentes fonctions, « *le vivant fonctionne de manière cyclique*¹⁴ ».

19 Törnroth-Horsefield, S., & Neutze, R. (2008). Opening and closing the metabolite gate. In Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (Vol. 105, Issue 50). <https://doi.org/10.1073/pnas.0810654106>

20 <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/animaux/systeme-locomoteur/la-contraction-musculaire>

Par ailleurs, tout organisme assure en permanence plusieurs fonctions en parallèle, nécessitant une gestion fine et équilibrée de l'énergie :



La nutrition

Incorporer de la matière et d'accumuler de l'énergie potentielle chimique pour croître, se reproduire, se diviser, proliférer, assurer l'entretien et l'intégrité de l'organisme.



L'homéostasie

Maintenir ses constantes physiologiques (température, glycémie, etc.) pour permettre une activité métabolique optimale. L'homéostasie thermique tire par exemple partie du phénomène de radiation (énergie thermique, énergie électromagnétique) pour refroidir l'organisme.



La communication intra-organisme

Transmettre de l'information entre les systèmes composant un organisme biologique donné. Elle s'effectue au sein de l'organisme notamment par la libération de messagers chimiques (ex. communication hormonale) ou d'un potentiel osmo-électrique conduisant à la propagation d'un courant électrique (communication nerveuse).



La communication avec d'autres organismes

Transmettre de l'information entre deux organismes biologiques distincts. Elle peut s'effectuer notamment par le mouvement (d'énergie chimique \rightarrow travail mécanique), le son (d'énergie chimique \rightarrow énergie mécanique, onde sonore), la lumière par bioluminescence notamment (énergie chimique \rightarrow énergie électromagnétique) ou encore l'échange de phéromones.



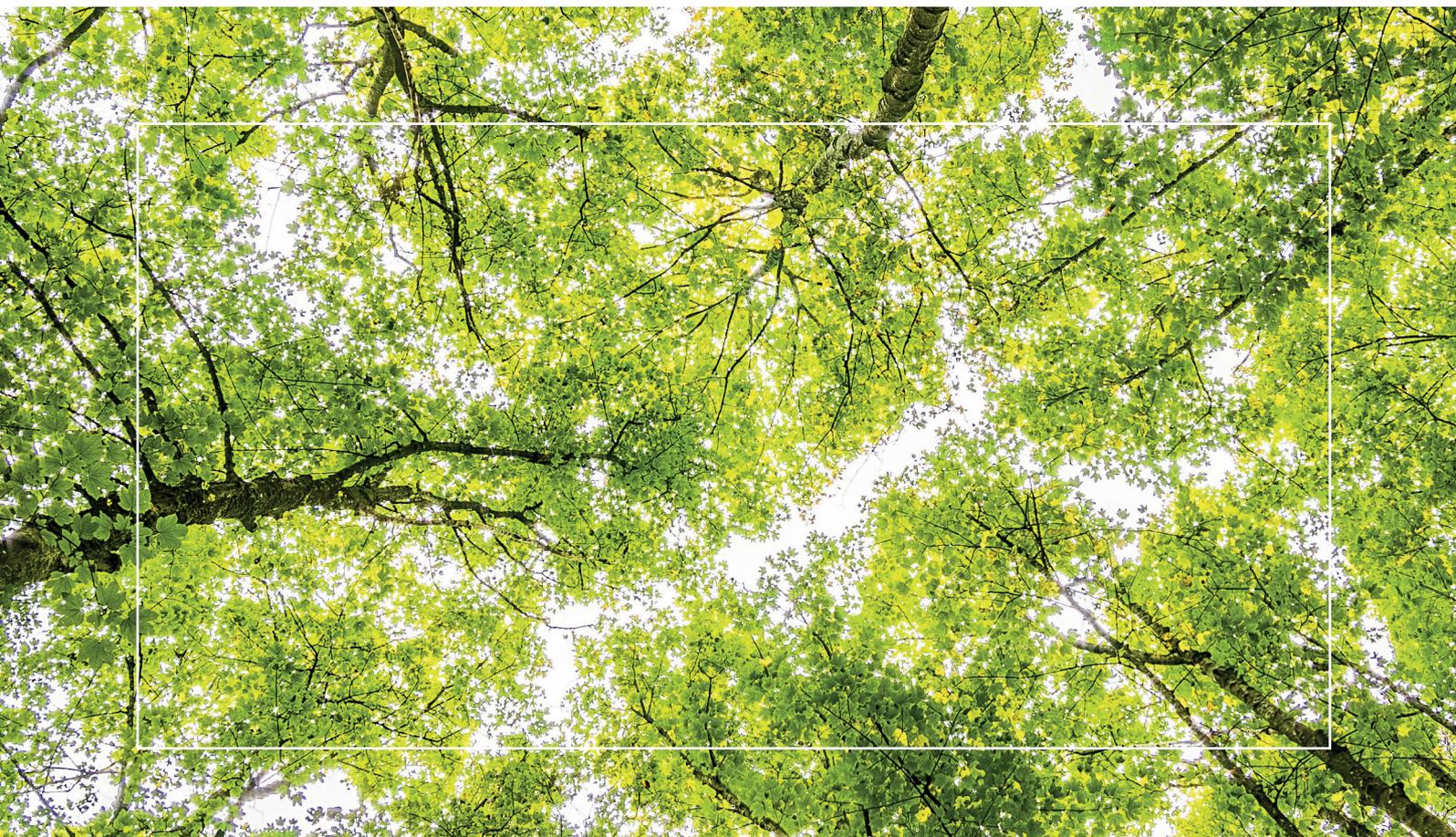
La locomotion

Se déplacer (marcher/nager/sauter/voler/ramper) par la conversion d'énergie chimique en énergie mécanique, cinétique, ou en énergie potentielle de pesanteur.

Face à ces besoins multiples, le vivant ne maximise pas les fonctions qu'il effectue, il adopte la règle du « *good enough* », sous-entendu « *suffisant* » pour assurer sa survie. Cette dynamique s'observe notamment du point de vue de la sélection naturelle qui conduit à l'adaptation des organismes vers des équilibres fonctionnels, des compromis, qui répondent aux contraintes environnementales auxquelles ils sont exposés.

Par ailleurs, de récents travaux soulignent que certains organismes minimisent la quantité de déchets qu'ils produisent lorsqu'ils atteignent leurs conditions optimales de fonctionnement²¹, posant la question de la généralisation d'une telle observation. Outre l'adaptation des espèces au cours du temps par la sélection naturelle, conduisant à ces compromis fonctionnels, les organismes gèrent en continu leur répartition interne d'énergie en fonction de leurs besoins tout en respectant l'équilibre fonctionnel de base qui assure leur survie. En conclusion : « *le vivant tend à trouver le meilleur compromis plutôt qu'à maximiser¹⁴* ».

21 Herbert, E., Ouerdane, H., Lecoœur, P., Bels, V., & Goupil, C. (2020). Thermodynamics of Animal Locomotion. *Physical Review Letters*, 125(22), 228102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.228102>



AXES D'INSPIRATION

.03 SPÉCIALISATION DE SOUS-SYSTÈMES BIOLOGIQUES

Parmi les fonctions assurées par un organisme, la gestion de l'énergie repose sur un ensemble d'organes et de tissus structurés en un réseau de distribution alimentant des sous-systèmes de collecte, de stockage et d'utilisation d'énergie.

Les feuilles sont un remarquable exemple de modèle pour l'étude des infrastructures de collecte de l'énergie solaire. En effet, par leur rôle d'interface, ces organes sont constamment exposés à des contraintes environnementales (soleil, vent, insectes, etc.²²). Au cours du temps, ces contraintes ont conduit à la sélection de caractères assurant de multiples fonctions telles que l'auto-réparation, la protection contre les agresseurs, la réduction de la prise au vent, etc. C'est de cette diversité fonctionnelle qu'émerge la résilience de ces structures de collecte énergétique²³, elles-mêmes associées en un feuillage au caractère multifonctionnel propre tel que l'auto-ombrage (multifonctionnalité multi-échelle) (Figure 9).

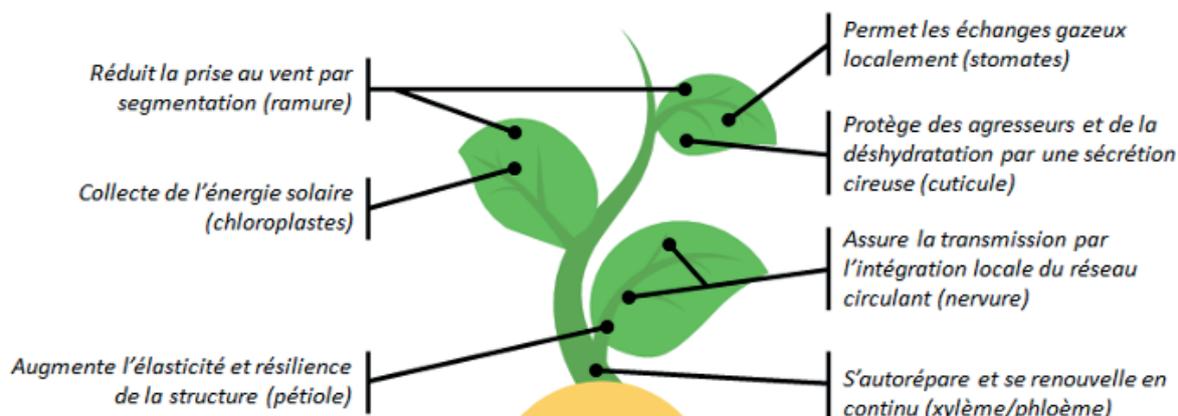


Figure 9. Illustration du principe de gestion des compromis liés à la multifonctionnalité, l'exemple de la feuille © Ceebios © Icon by DynosoftLabs / Flaticon

Globalement, les organes collecteurs génèrent un flux énergétique initialement dirigé pour répondre aux besoins du métabolisme basal et notamment des organes les plus consommateurs, comme le cerveau chez les animaux. Le surplus énergétique en circulation est stocké dans les organes dits de « réserve », comme les tubercules chez les végétaux ou le tissu adipeux chez les vertébrés.

Ce stockage s'effectue par l'accumulation des vecteurs énergétiques et par leur transformation en des vecteurs plus denses (des glucides vers les lipides). Lors d'une forte augmentation du besoin ou/et en cas de diminution du flux entrant, un flux énergétique secondaire s'instaure, depuis les réserves vers les organes utilisateurs assurant les fonctions biologiques.

22 Barthlott, W., Mail, M., Bhushan, B., & Koch, K. (2017). Plant surfaces: Structures and functions for biomimetic innovations. In *Nano-Micro Letters* (Vol. 9, Issue 2, p. 23). SpringerOpen. <https://doi.org/10.1007/s40820-016-0125-1>

23 C. Goupil, E. Herbert H. Benisty, « LINKS série 5-6, Penser la résilience. Un regard thermodynamique : 1 du concept de résilience, P 48-53, 2 : de la résilience des organismes à celle des sociétés, P 156-163 - 2021

À l'échelle d'un organisme, le système de distribution énergétique correspond essentiellement au système circulatoire. C'est par le biais des liquides circulants (hémolymphe chez les invertébrés, sèves chez les plantes vasculaires, sang chez les vertébrés, etc.) que les vecteurs énergétiques sont transportés, avec des molécules informatives et d'autres composants sanguins, depuis les organes de collecte ou de stockage vers les organes d'utilisation. La structure de ces réseaux repose sur des règles de ramifications fractales. Le nombre de segments augmente avec la diminution de leur diamètre et de leur longueur. Cette structure fractale, sélectionnée au cours de l'évolution, conduit à l'augmentation de la surface totale de l'interface et permet la multiplication des points locaux d'apports énergétiques. L'organisme est « irrigué » en vecteurs énergétiques par le système circulatoire.

L'énergie thermique est transportée par ce système circulatoire mais également distribuée, par une

conduction passive mais très contrôlée, à travers les structures biologiques. Aussi bien à l'échelle de l'écosystème qu'à celle des organismes, les systèmes vivants demeurent profondément interdépendants et interconnectés.

On notera que tous ces systèmes demeurent multifonctionnels, la notion de « spécialisation » représente la variation de leur équilibre fonctionnel au regard des autres systèmes, suivant le principe de compromis plutôt que de maximisation. Par exemple, les organes de stockage utilisent et transportent aussi de l'énergie mais de manière plus localisée et plus limitée que d'autres systèmes. Ils ont par ailleurs de nombreuses autres fonctions nécessitant elles-aussi des conversions énergétiques, ou assurées de manière passive comme l'isolation ou la protection mécanique (Tableau 6).

Exemples de systèmes spécialisés	Fonction de gestion de l'énergie	Exemple d'autres fonctions
Feuillage des végétaux	Collecter des vecteurs et assurer l'apport d'énergie	Moteur de circulation hydraulique (évapotranspiration), support de formation/dissémination de graines (autoréplication), ombrage pour l'écosystème local, etc.
Système circulatoire des végétaux	Transmettre des vecteurs et assurer la distribution d'énergie	Transport des déchets, transport des agents immunitaires, utilisation comme système d'information (ex. hormones), etc.
Tissu adipeux (graisse) chez les mammifères	Stocker des vecteurs et assurer la constitution de réserves d'énergie	Isolation thermique, génération de chaleur (tissu adipeux brun), protection mécanique, communication interne (sécrétion d'hormones), etc.
Tissu musculaire animal	Utiliser l'énergie et assurer la génération d'un travail	Génération de chaleur (frisson), mobilité, protection physique, communication externe (ex. dissuasion), etc.

Tableau 6. Illustration du caractère multifonctionnel des systèmes biologiques spécialisés dans la gestion de l'énergie © Ceebios



Les êtres vivants s'organisent autour de sous-systèmes concentrant des activités spécifiques à la gestion de l'énergie. Cette architecture, polarisée et connectée par un réseau, est associée à un système de régulation étroitement liée à la notion d'information et de communication intra-organisme. Les organismes doivent ainsi avoir la capacité de mesurer l'énergie interne dont ils disposent pour, le cas échéant, anticiper ou répondre à un stress énergétique. Ces mécanismes permettent la prise de décisions assurant la survie de l'organisme dans son environnement dynamique.

AXES D'INSPIRATION

.04 GESTION DU STRESS ET RÉGULATION DE LA BALANCE ÉNERGÉTIQUE

Au sein de chaque système biologique, l'évaluation de l'énergie disponible apparaît centrale afin de moduler les flux entrant/sortant et d'assurer une gestion efficace de l'énergie. Cette évaluation se fait par :

▼ des mesures directes des concentrations en sucre stocké (le glycogène, l'amidon, etc.), ou libre, (le glucose, le saccharose). Elle s'effectue à l'échelle locale (ex. cellules photosynthétiques), mais également de manière centralisée chez les animaux par le biais d'organes spécialisés dans la régulation de la glycémie comme le pancréas, le foie ou encore le cerveau ;

▼ des mesures indirectes de la quantité de réserve disponible notamment sous forme lipidique. Chez les animaux, le tissu adipeux sécrète des molécules, notamment la leptine et l'insuline. La concentration sanguine de ces molécules est alors proportionnelle à la quantité de réserves lipidiques. C'est le cerveau (hypothalamus et tractus solitaire) qui perçoit ces molécules et entraîne l'ajustement global des flux pour maintenir la balance énergétique.



À l'échelle de l'organisme biologique, la régulation de la répartition énergétique est effectuée par un processus multifactoriel dirigé, selon les espèces, par les systèmes de communication nerveux, humoral et hormonal. À l'échelle de la cellule, la régulation est sous contrôle de molécules de signal qui orientent les processus de transformation des vecteurs énergétiques. Le système de transmission et de régulation, mais également la mise en place de nouvelles structures de stockage sont donc intrinsèquement liés au système d'information : à nouveau, « *le vivant s'organise avec l'information*¹⁴ ».

Par son rôle de réseau de transport d'énergie, le système circulatoire est au centre du mécanisme de régulation.

Cette régulation de l'énergie :

▼ repose sur des constantes physiologiques de consigne.

Ce niveau basal de consommation des organes est variable et compose un aiguillage énergétique de référence. Par exemple, on estime qu'au repos, le cerveau représente environ 20% de l'énergie totale consommée²⁴, quand le cœur en utilise seulement 8%²⁵.

▼ prend en compte des besoins énergétiques locaux ponctuels.

Chez les animaux, l'activité musculaire induit une stimulation rapide et locale de la vasodilatation/ vasoconstriction du réseau vasculaire (respectivement l'augmentation ou la réduction du diamètre d'un vaisseau sanguin) entraînant un flux plus ou moins important de sang, et donc de vecteurs énergétiques, vers une zone donnée.

▼ est soumise à des facteurs environnementaux imprévisibles ou/et saisonniers.

C'est par exemple le cas chez les végétaux avec le phénomène de « montée de la sève » observable uniquement à la fin de l'hiver, au cours duquel une sève très riche remonte le réseau réservé à la sève pauvre pour amener de l'énergie aux bourgeons depuis les réserves racinaires.

▼ est associée aux mécanismes de survie.

Par exemple, chez les animaux, la perception d'un danger imminent entraîne un pic d'adrénaline qui conduit à une redirection quasi instantanée du flux sanguin vers les muscles des membres moteurs. C'est la réponse réflexe dite de « combat-fuite » assurant à l'organisme d'avoir l'énergie à disposition pour mener à bien l'une ou l'autre de ces stratégies de défense²⁶.

24 Magjstretti, P. J., & Allaman, I. (2015). A Cellular Perspective on Brain Energy Metabolism and Functional Imaging. *Neuron*, 86(4), 883-901. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.03.035>

25 Brown, D. A., Perry, J. B., Allen, M. E., Sabbah, H. N., Stauffer, B. L., Shaikh, S. R., Cleland, J. G. F., Colucci, W. S., Butler, J., Voors, A. A., Anker, S. D., Pitt, B., Pieske, B., Filippatos, G., Greene, S. J., & Gheorghide, M. (2016). Mitochondrial function as a therapeutic target in heart failure. *Nature Reviews Cardiology* 2016 14:4, 14(4), 238-250. <https://doi.org/10.1038/nrcardio.2016.203>

26 Jansen, A. S. P., Nguyen, X. Van, Karpitskiy, V., Mettenleiter, T. C., & Loewy, A. D. (1995). Central Command Neurons of the Sympathetic Nervous System: Basis of the Fight-or-Flight Response. *Science*, 270(5236), 644-646. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.270.5236.644>



Ainsi, un ensemble de signaux et de senseurs moléculaires permet aux organismes de percevoir leur situation en temps réel et d'assurer le maintien des constantes (l'homéostasie) énergétiques, notamment en cas de stress.

Un stress énergétique peut être dû à un déséquilibre ponctuel et non anticipable entre les flux entrant

et sortant d'énergie, ou au caractère cyclique et intermittent des ressources énergétiques du vivant. Que l'on considère le cycle quotidien d'ensoleillement pour l'énergie électromagnétique ou le cycle saisonnier pour l'énergie chimique, l'énergie disponible varie au cours du temps.

Stratégies	Ponctuel non-anticipable	Quotidien anticipable	Saisonnier anticipable
Stockage externe	Bol alimentaire en cours de dégradation chez les animaux	Alimentation régurgitée pour la progéniture	Réserve de miel chez les abeilles
Stockage interne	Vecteurs circulants et cellulaires : ATP, phosphocréatine, glucose, etc.	Réserve de polysaccharides et triglycérides	Réserve de longue durée sous forme de graisse
Séparation temporelle des processus	Phase non photochimique de la photosynthèse	Stockage de CO ₂ de nuit chez le cactus	Cycle de développement annuel chez les insectes
Alternative métabolique	Dégradation des lipides et des protéines structurelles	Respiration et photosynthèse des plantes	Dégradation la graisse brune chez l'ours polaire
Ralentissement métabolique	Cryptobiose chez les tardigrades	Sommeil chez les animaux	Hibernation, Dormance
Résoudre la contrainte	Sentiment de faim conduisant à la chasse chez les carnivores	Héliotropisme chez le tournesol	Migration saisonnière chez de nombreux animaux

Tableau 7. Stratégies de réponse aux stress énergétiques
© Ceebios

Face à des contraintes énergétiques vitales, le vivant présente un grand nombre d'adaptations possibles, rendant possible son développement sur la majeure partie de la planète.

Cette capacité à s'acclimater et à évoluer pour répondre à une multitude de contraintes souligne

en quoi « *le vivant est opportuniste*²⁷ ». Sous l'angle de l'énergie, ce principe s'illustre parfaitement par la diversité des types trophiques (manières dont un organisme répond à ses besoins en matière et en énergie) présents dans le monde vivant et à la diversité des fonctions qui en découlent²⁷ (Tableau 8).

27 Schuldt, A., Assmann, T., Brezzi, M. et al. Biodiversity across trophic levels drives multifunctionality in highly diverse forests. Nat Commun 9, 2989 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05421-z>

Source d'énergie	Source d'électrons	Source de carbone	Type trophique	Principaux exemples
Lumière Photo-	Composé organique -organo-	Organique - hétérotrophe	Photoorganohétérotrophe	Certaines bactéries
		Minérale (CO ₂) - autotrophe	Photoorganoautotrophe	Certaines bactéries (athiorhodacées...), hémiparasites végétaux chlorophylliens
	Inorganique -litho-	Organique - hétérotrophe	Photolithohétérotrophe	Certaines bactéries (thiobaca...)
		Minérale (CO ₂) - autotrophe	Photolithoautotrophe = nutrition minérale	Végétaux chlorophylliens, certaines bactéries
Oxydation d'un composé chimique réduit, organique ou minéral Chimio-	Composé organique -organo-	Organique - hétérotrophe	Chimioorganohétérotrophe	Animaux, mycètes (champignons), la plupart des bactéries
		Minérale (CO ₂) - autotrophe	Chimioorganoautotrophe	Rare, certaines bactéries (mixotrophie)
	Inorganique -litho-	Organique - hétérotrophe	Chimiolithohétérotrophe	Certaines bactéries (Bosea, Albibacter)
		Minérale (CO ₂ , CH ₄) autotrophe	Chimiolithoautotrophe	Certaines bactéries terrestres ou marines (écosystèmes hydrothermaux). La source d'énergie est inorganique

Tableau 8. Illustration du principe d'opportunisme du vivant au regard des ressources locales
Source : Wikipédia

Qu'il s'agisse des sources et vecteurs, des processus de conversion, de l'organisation des systèmes ou des réponses à un stress énergétique, étudier le vivant nous permet ainsi d'esquisser un cahier des charges des systèmes énergétiques biomimétiques qui pourront demain répondre aux enjeux écologiques, technico-scientifiques et politico-sociétaux de notre temps.

SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES

Ce rapport explore le potentiel du biomimétisme en réponse aux défis modernes de la filière de l'énergie. S'inspirer de la manière dont le monde du vivant gère l'énergie nous invite à considérer deux axes synergiques :

▼ un axe stratégique qui souligne les principes structurant la relation entre le vivant et l'énergie et nous conduit à repenser de manière systémique notre rapport à l'énergie ;

▼ un axe technique qui décrit comment le vivant peut nous permettre d'identifier des leviers concrets permettant la transition vers des systèmes énergétiques responsables et performants.

Étudier le lien entre le monde vivant et l'énergie nous conduit ainsi à poser un ensemble de réflexions structurantes sur la manière dont la Vie maintient depuis 3,8 milliards d'année un équilibre dynamique, garantie de son développement.

Ces observations sont structurées au cours du rapport à travers le prisme des principes du vivants tels que formalisés par Hoagland, Dodson & Hauk (Tableau 9).

	Matériau	Organisation
Le vivant tend à optimiser plutôt qu'à maximiser	Multifonctionnel	Constituée de répétitions, adaptable aux variations de l'environnement et prenant en compte l'ensemble des contraintes.
Le vivant recycle tout ce qu'il utilise / fonctionne de manière cyclique	Dégradable en blocs unitaires universels valorisables dans l'écosystème	Basée sur l'équilibre de flux
Le vivant s'assemble en chaîne	Constitué de blocs unitaires assemblés en polymères fonctionnels	Structurée par l'interdépendance des systèmes biologique (ex. les chaînes trophiques)
Le vivant s'organise avec l'information	À architecture complexe et fonctionnelle	Mise en place en association avec un réseau d'informations
Le vivant construit de bas en haut	Auto-assemblé de blocs unitaires	Reposant sur les producteurs primaires de matière organique
Le vivant est interconnecté et interdépendant	Dont les composants s'inscrivent dans le métabolisme	Écosystémique
Le vivant fonctionne au sucre	Structurel, vecteur énergétique, vecteur informationnel etc.	Reposant sur les flux de sucre

Tableau 9. Synthèse illustrant les principes du vivant à différentes échelles
© Ceebios

Le décalage clair qui émerge de la confrontation des principes du vivant au monde technologique conduit à un ensemble de perspectives, axes de réflexion et potentialités à explorer :

▼ Le vivant nous invite à considérer un système de collecte énergétique basé sur des flux (eau, air, rayonnement, chaleur) et non des stocks (hydrocarbures, gaz, uranium, etc.) de vecteurs. Et si nous nous inspirions du vivant pour dimensionner nos systèmes d'utilisation d'énergie en fonction de la disponibilité locale en flux d'énergie ? Pour repenser les échelles à partir desquelles considérer nos infrastructures comme des systèmes énergétiques autonomes ? Pour concevoir les organisations de nos systèmes de manière analogue à celles structurant les organes, organismes et écosystèmes ?

▼ Le vivant nous invite à questionner notre regard sur le rendement énergétique. Le rendement de collecte d'une feuille est d'environ 2%, soit près de 20 fois moins que nos meilleurs panneaux solaires (autour de 35%²⁸). En revanche, elles sont produites d'éléments abondants en quelques semaines et donc pour un coût total infiniment plus faible. Elles s'organisent par ailleurs en un feuillage résistant au vent, autonettoyant, autoréparant, et se renouvelant en continu. Et si nous nous inspirions du vivant pour rediriger nos innovations vers la recherche de compromis^{29,23} ? Pour construire des systèmes à l'architecture stable mais dont les parties peuvent être renouvelées en continu ? Pour regarder toute utilisation d'énergie comme une perte dirigée ?

▼ Le vivant nous invite à considérer un système de distribution et de stockage sous la forme de vecteurs de stock et non de flux¹⁵. Ce faisant, les vecteurs transportés ou stockés sont temporairement stabilisés avant d'être rendus disponibles lors du besoin. Ces observations peuvent même questionner la place de l'électricité dans notre système énergétique. Et si nous nous inspirions du vivant pour faire de cette forme le dernier maillon de la chaîne, le vecteur d'utilisation, l'équivalent de l'ATP du monde vivant ? Pour généraliser la mobilisation de réseaux physiques de matière (type réseau d'eau) pour le transport de vecteurs énergétiques à l'image des systèmes circulatoires biologiques ?

▼ Le vivant nous invite à faire face au compromis entre adaptabilité et adaptation. Un système adapté est peu adaptable et un système adaptable est peu adapté³⁰. Et si nous nous inspirions du vivant pour concevoir des systèmes dont l'adaptabilité dépend de la variabilité de leur environnement ? Pour concevoir des réseaux d'électricité constitués de portions très adaptables pour répondre aux fortes variations d'une collecte de flux et de portions très adaptées permettant d'assurer un apport constant depuis les systèmes de stockage vers les systèmes d'utilisation ? Pour proposer demain des systèmes avec une plage de fonctionnement adaptée à leur environnement, comme des voitures adaptées aux vitesses de la ville ?



28 Blankenship, R. E., Tiede, D. M., Barber, J., Brudvig, G. W., Fleming, G., Ghirardi, M., Gunner, M. R., Junge, W., Kramer, D. M., Melis, A., Moore, T. A., Moser, C. C., Nocera, D. G., Nozik, A. J., Ort, D. R., Parson, W. W., Prince, R. C., & Sayre, R. T. (2011). Comparing photosynthetic and photovoltaic efficiencies and recognizing the potential for improvement. *Science* (New York, N.Y.), 332(6031), 805-809. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1200165>

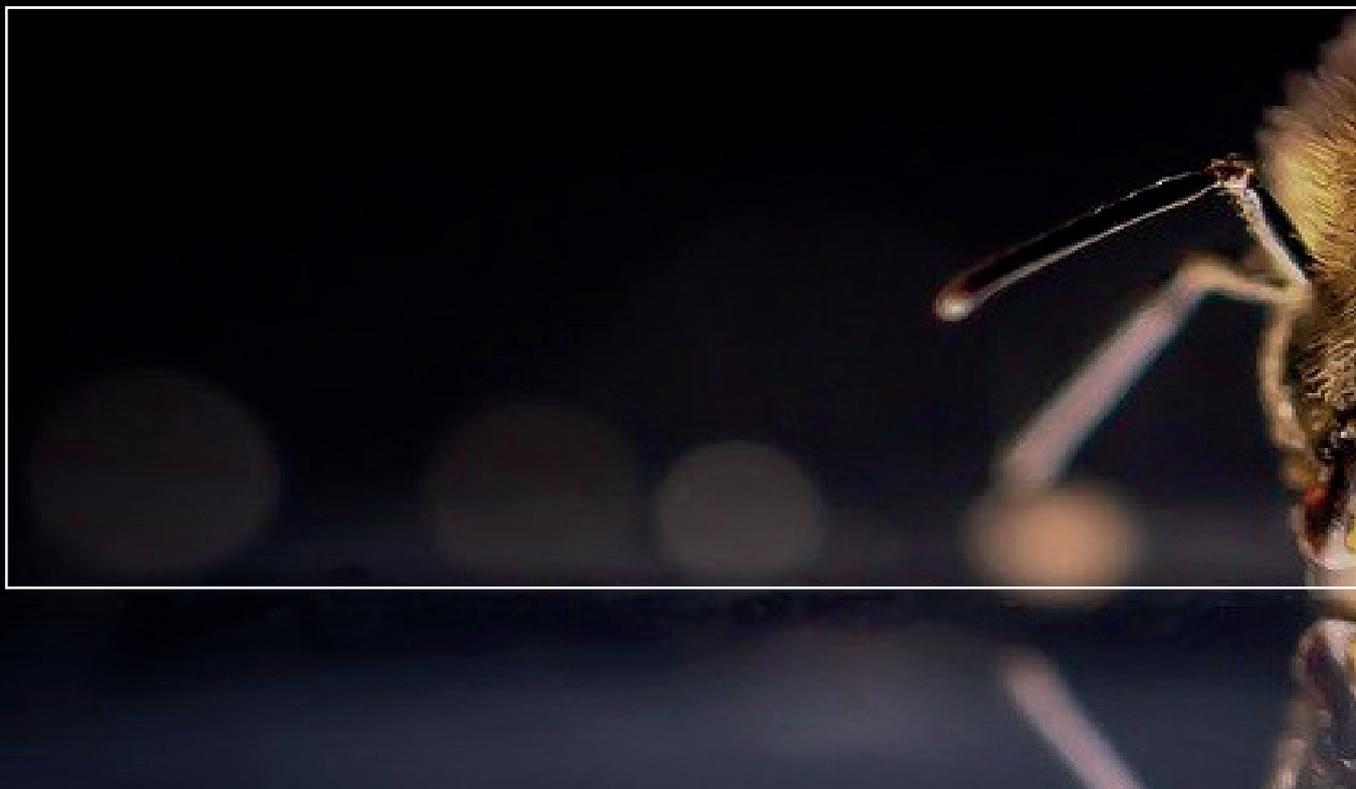
29 J. F. V. Vincent, The trade-off: A central concept for biomimetics, *Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials*, vol. 6, no. 2, pp. 67-76, Jun. 2016, doi: 10.1680/jbibn.16.00005.

30 C. Goupil, E. Herbert Adapted or Adaptable : How to Manage Entropy Production ?, *Entropy*, 22(1), 29 - 2020

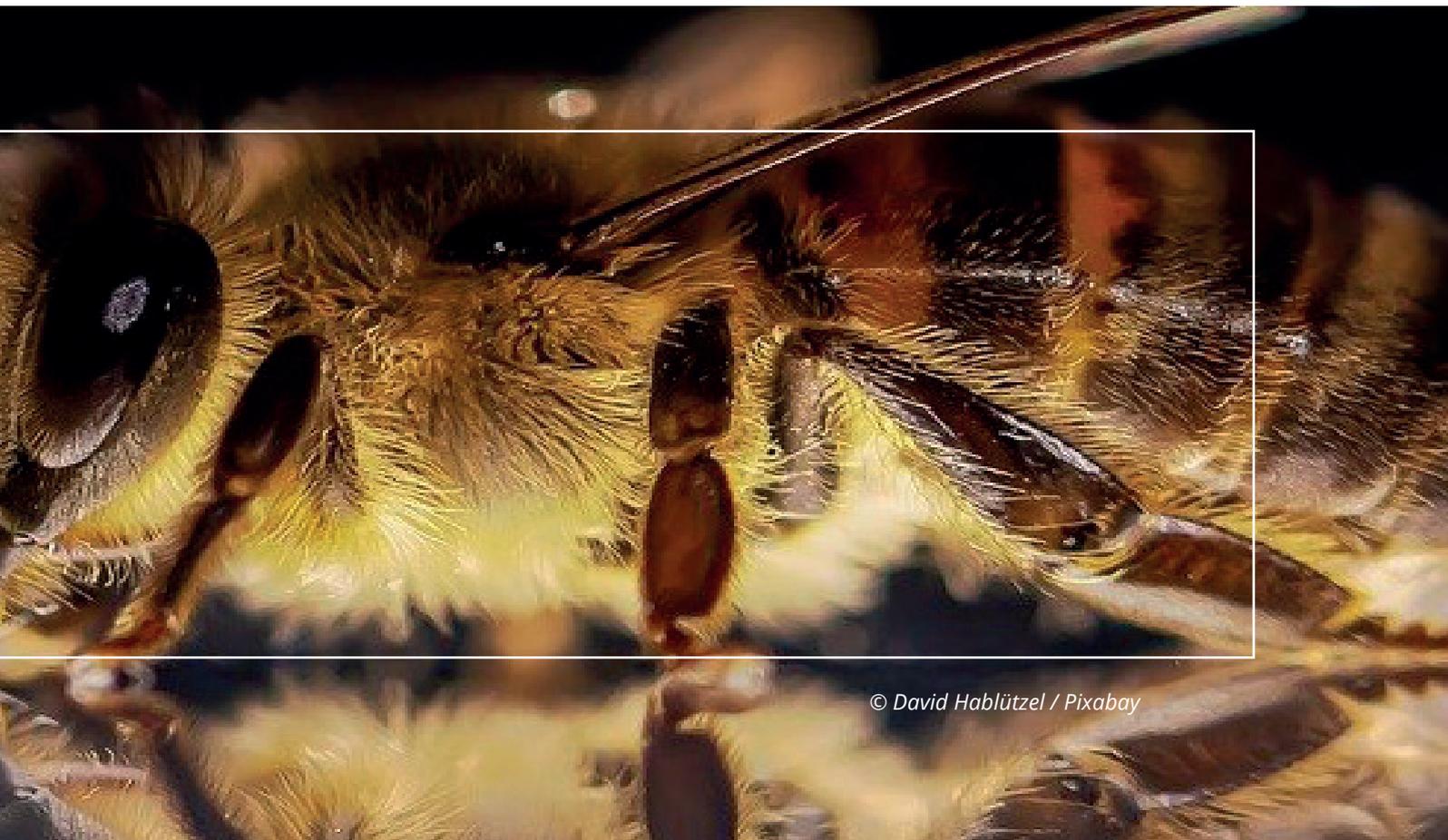
▼ Le vivant nous invite à considérer l'autonomie des systèmes énergétiques (auto-assemblage, auto-organisation, autonettoyage, auto-réparation). Et si nous nous inspirions du vivant pour concevoir demain des panneaux solaires autonettoyants sans traitement chimique ? Pour développer des réseaux autoréparants ? Pour réorganiser les champs d'éoliennes ou de panneaux solaires selon l'exposition aux flux ou aux contraintes environnementales ?

▼ Le vivant nous invite à faire coopérer nos systèmes énergétiques entre eux. Et si nous nous inspirions du vivant pour gérer les champs de blé, d'orge, d'éoliennes et de panneaux solaires comme des sous-systèmes d'une même exploitation et palliant les variations les uns des autres ? Pour développer un réseau lui-même producteur d'énergie ? Pour rendre possible la généralisation de l'association entre la production agricole et la collecte d'énergie (agrivoltaïsme, méthaniseur, etc.) ?

▼ Le vivant nous invite à constituer nos systèmes uniquement d'éléments biocompatibles et revalorisables de manière modulaire. Et si nous nous inspirions du vivant pour réorganiser notre système afin de gérer la matière en circuit fermée ? Pour parvenir demain à décorrélérer la performance de la quantité de matière utilisée ?



Autant de réflexions qui peuvent changer notre manière de penser la filière de l'énergie et requestionner nos pratiques. L'abandon des énergies fossiles n'est aujourd'hui plus qu'une question de temps et la transition vers un système profondément différent se doit d'être anticipée de manière systémique. La transition énergétique à venir représente le passage d'un monde technologique ayant un statut de consommateur final à un monde technologique au statut de producteur primaire. Il s'agit là d'une émancipation profonde et d'une réduction considérable du poids aujourd'hui porté par la biosphère.



POUR ALLER PLUS LOIN

GROUPE DE TRAVAIL & REVUE DE LITTÉRATURE

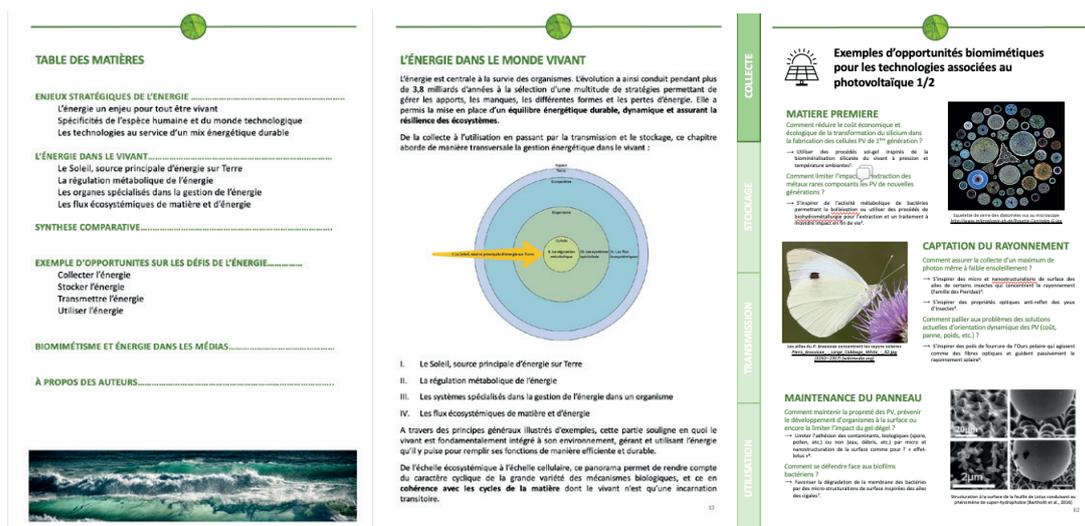


Figure 10. Rapport complet "Biomimétisme & énergie"

Ce document de synthèse *Biomimétisme & Énergie* préfigure des actions ayant pour objectif l'essor des pratiques biomimétiques au sein de la filière de l'énergie.

Dans la continuité de ses actions de structuration et de coordination des groupes de travail *Projet Urbain Bio-inspiré*, *Matériaux Bio-inspirés*, *Gestion De l'Information et Biomimétisme Marin*, Ceebios et ses partenaires souhaitent rassembler les acteurs de la filière pour mettre en place un nouveau groupe de travail : *Biomimétisme & Énergie*.

Le lancement de ce groupe de travail s'accompagne de la mise à disposition des coopérateurs de la SCIC Ceebios³¹ et des abonnés à l'offre Biome+ de Ceebios d'un rapport approfondi présentant notamment une revue de la littérature scientifique associée au sujet, un ensemble de fiches thématiques décrivant des innovations existantes ou en cours de développement (TRL 3-4). Environ 200 références bibliographiques adressant les principaux enjeux d'innovation d'une quinzaine de systèmes technologiques (panneaux photovoltaïque, batteries, lampes etc.), sur des thématiques transversales (thermorégulation, recyclage de matière première, maintenance, etc.) y sont présentées (Figure 10).



S'INSPIRER DU VIVANT POUR LA GESTION DE L'ÉNERGIE

EXEMPLES DE RÉALISATIONS CONCRÈTES



Projet Rhéticus par les groupes allemands Evonik et Siemens visant la mise en place d'une usine qui effectue l'électrolyse électrique de CO₂ et d'H₂O pour produire de l'H₂ et du CO utilisés comme substrats réactionnels de fermenteurs. Les produits potentiels sont du bio-fuel, du bioplastique ou des additifs alimentaires.



Biome Renewables commercialise des éoliennes bio-inspirées du martin pêcheur et du samare d'érable. Leur forme guide le flux d'air pour améliorer sa captation et assurer une meilleure gestion des turbulences. Ces adaptations réduisent les nuisances sonores et augmentent jusqu'à 13% la production annuelle d'énergie.



Que ce soit en à travers des modèles mathématiques décrivant l'alternance dans le positionnement des feuilles sur leur tige (phyllotaxie) qui permet d'optimiser l'ensoleillement (éclairage naturel et apport d'énergie thermique) ou encore la capacité des termitières de l'espèce *Macrotermes michaelseni* à réguler passivement leur température, le cabinet d'architecture In Situ s'inspire du vivant pour repenser l'habitat.



Prophesee commercialise des caméras et algorithmes neuromorphiques, c'est-à-dire qu'ils imitent le fonctionnement de l'œil humain et du cerveau. À la différence des caméras classiques qui rafraîchissent la totalité des pixels à intervalles de temps réguliers, les caméras event-based enregistrent uniquement les changements de luminosité, pixel par pixel, en continu. Cela rend ces caméras particulièrement sobres énergétiquement.



Encycle développe une technologie pour améliorer l'efficacité énergétique de la climatisation. Son produit phare est SwarmLogic®, un système de contrôleurs sans fil qui communiquent entre eux à la manière d'un essaim d'abeilles et contrôlent la transmission d'énergie au sein du réseau de climatiseur du bâtiment au juste besoin.



Whylot a développé des moteurs électriques plus légers et petits que les moteurs de référence grâce à plusieurs innovations dont un système de thermo-régulation inspiré de l'architecture en nid d'abeilles.



Glowee tire profit de la capacité de bioluminescence de microorganismes et grâce aux biotechnologies proposent une alternative moins énergivore que les systèmes d'éclairage conventionnels.



Wavera adapte ce mécanisme de mise en mouvement de fluide à ses pompes hydrauliques présentant un gain de poids et de volume ainsi qu'une consommation énergétique réduite de 30%.



En inversant le mécanisme de propulsion par ondulation, Eel Energy développe une technologie d'hydrolienne ondulante, respectueuse des fonds marins et non sujette au phénomène de cavitation. Contrairement aux éoliennes off-shore, cette source énergétique présente les avantages d'être renouvelable, prédictible et régulière.



Push4M révisé les solutions robotiques actuelles avec une technologie qui permet de gagner en sobriété énergétique, légèreté, précision et en compacité dans la mise en place d'un mouvement mécanique. Cette solution de cobotique peut s'appliquer aux secteurs de la manufacture, de la manutention, du BTP..., et en intégrant en toute sécurité l'opérateur humain à proximité (cobotique).



La locomotion des organismes marins repose majoritairement sur la propulsion d'un fluide par ondulation de membrane et non pas sur la rotation d'hélices. Fort de ce constat, de nombreuses startups de la deeptech ont développé des technologies innovantes :

S'INSPIRER DU VIVANT POUR LA GESTION DE L'ÉNERGIE

EXEMPLES DE COMPÉTENCES NATIONALES & INTERNATIONALES



Laurent Billon, IPREM - Université de Pau et des Pays de l'Adour, coordinateur du projet eSCALED

Le projet eSCALED est une contribution de niveau européen par la formation à la recherche et la capacité d'innovation pour l'élaboration d'un dispositif de feuille artificielle fonctionnant sur le principe de la photosynthèse. Il a pour objectif de produire "des carburants solaires" tel que l'hydrogène H_2 ou des matières premières sous forme chimique stable et stockable, à partir de l'énergie solaire, de l'utilisation de l'eau H_2O et du CO_2 , pour la génération d'une énergie renouvelable et durable.



Équipe SolHyCat Artero Research Group, CBM-LAB

Dirigée par Vincent Artero, cette équipe de recherche étudie l'électro-catalyse de réactions d'oxydoréduction multi électroniques, et leur intégration au sein de nanostructures d'électrodes. Une des caractéristiques importantes du groupe est de placer les principes de la bio-inspiration au cœur de la conception des catalyseurs développés, en particulier pour obtenir des systèmes efficaces mettant en œuvre des métaux non-nobles (Fe, Co, Ni, Mn, Cu, Mo, W...).



Center for Bio-inspired Energy Science

Le centre cherche à développer la nouvelle génération de matériaux souples par la conception de structures inspirées des nombreuses propriétés observables dans les systèmes biologiques. Notre vision est que la recherche scientifique fondamentale dans ce domaine peut conduire à des matériaux artificiels qui rivalisent avec les matériaux vivants dans la façon remarquable et utile dont ils gèrent l'énergie.



Groupe français de Bioénergétique

Le Groupe Français de Bioénergétique (GFB) est une association loi 1901 dont l'objectif est de soutenir le développement des recherches scientifiques en bioénergétique et de fédérer l'ensemble des laboratoires travaillant dans ce domaine. La principale activité du GFB est l'organisation d'un congrès bisannuel.



GDR 3422 Organismes Photosynthétiques

Le rôle du GdR "*Organismes photosynthétiques*" sera de fédérer les efforts de tous les laboratoires français qui prennent en compte dans leur travail sur les organismes photosynthétiques le fonctionnement d'un appareil de capture et de transformation de l'énergie lumineuse. Le réseau comprend 41 membres (laboratoires ou équipes).



International Society of Photosynthesis Research

Les objectifs de l'ISPR sont les suivants : (1) Encourager la croissance et promouvoir le développement de la photosynthèse en tant que science fondamentale et appliquée. (2) Faciliter la publication des recherches sur la photosynthèse. (3) Parrainer l'organisation d'un Congrès international triennal sur la photosynthèse (4) Promouvoir la coopération internationale dans la recherche et l'enseignement sur la photosynthèse.



GDR ACTHYF 3270

Créé le 1^{er} janvier 2007, le laboratoire développe une recherche originale et innovante dans les domaines de la chimie et de la science des matériaux, ainsi qu'aux interfaces avec la physique, l'ingénierie et la biologie, de manière à répondre aux grands défis sociétaux dans les thématiques transverses de l'énergie, le transport, l'environnement, le développement durable et la santé.



Christophe Goupil, LIED - Université Paris-Diderot

L'activité de recherche du laboratoire est fondée sur une approche thermodynamique hors équilibre des processus de conversion d'énergie et de matière, où sont envisagés les conditions d'optimisation de l'efficacité de ces derniers, ainsi que les stratégies d'allocation des ressources et des rejets. Ces travaux se déclinent dans les domaines de la Physique, la Macroéconomie, la Biologie, et la Médecine au service de la performance sportive et de la rééducation fonctionnelle. L'ensemble de cette activité est basé sur une approche bio-inspirée de l'énergie, dans laquelle il s'agit d'apprendre comment la nature fait usage des premier et second principes de la thermodynamique.



GDR Solar Fuels

Le Groupement de Recherche « *Solar Fuels* » a pour objectif de structurer la communauté française travaillant dans les domaines de la production de carburants solaires. La production de tels carburants ou vecteurs d'énergie d'origine solaire par photocatalyse, photo-électrocatalyse, photosynthèse artificielle ou via le couplage de procédés constitue aujourd'hui une discipline transverse et en plein essor. Il est organisé autour de six axes de recherche et s'adosse sur un consortium constitué de près de 50 équipes de recherche académiques françaises.



Projet Arcane

Le projet ARCANÉ est guidé à la fois par des ambitions de recherche fondamentale et par la nécessité de répondre à des enjeux critiques et sociétaux. Ainsi, chimistes et biochimistes combinent leurs expertises en chimie des protéines, chimie de synthèse, catalyse et photo/électrochimie afin de mieux comprendre les fonctions de ces systèmes, notamment lorsqu'ils interagissent dans des structures multi-protéiques complexes pour produire des effets synergiques, et exploiter les principes chimiques de base sur lesquels reposent ces systèmes biologiques pour générer des analogues multifonctionnels artificiels et bio-inspirés.



LES AUTEURS

Eliot GRAEFF,
Chargé de mission
Études industrielles & Méthodologie

Ingénieur en biologie (AgroParisTech) et docteur en ingénierie de la conception biomimétique (Arts & Métiers), Eliot poursuit l'objectif de créer des ponts entre les sciences. Au sein du Ceebios, il met à profit ses compétences de manière à accompagner les partenaires industriels dans leurs démarches d'innovation biomimétique, soutenir la formation académique/professionnelle et participer au développement du cadre méthodologique du biomimétisme.

eliot.graeff@ceebios.com

Félix GUEGUEN,
Chargé de mission
Études industrielles

Formé à AgroParisTech en sciences du vivant et de l'environnement puis en double diplôme à l'École Nationale Supérieure des Arts & Métiers spécifiquement en sciences aéronautiques et simulation aérodynamique. Félix a rejoint le Ceebios après une expérience de consulting au sein du cabinet Myceco. Il a notamment participé à la rédaction du rapport sur l'état de l'art du biomimétisme en 2020 en France (rapport *France Stratégie*).

felix.gueguen@ceebios.com

Avec la participation de Christophe Goupil,
membre du conseil scientifique de Ceebios



Ceebios

Centre d'études & d'expertises
en biomimétisme

Depuis 2015



+ 20 experts Ceebios, docteurs, biologistes, ingénieurs
+ 100 clients et projets industriels accompagnés
+ 500 partenaires dans un écosystème unique en Europe



www.cebios.com

© Tous droits réservés - Cebios - 2021



Cebios - SA SCIC à capital variable en formation
62 rue du Faubourg Saint Martin, 60300 Senlis
SIRET : 805 345 915 00013

Version 21/12/21



Ceebios