

RAPPORT
COMPLET

BIOMIMÉTISME & ÉNERGIE

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

INTRODUCTION	5
Réinventer notre relation à l'énergie, en observant le vivant	5
ENJEUX STRATÉGIQUES DE L'ÉNERGIE	6
L'énergie, un enjeu pour tout être vivant	6
Spécificités de l'espèce humaine et du monde technologique	10
Les technologies au service d'un système énergétique durable	12
L'ÉNERGIE DANS LE MONDE VIVANT	18
Le Soleil, source d'énergie principale sur Terre	19
La régulation métabolique de l'énergie dans un organisme	26
Les systèmes biologiques spécialisés dans la gestion de l'énergie d'un organisme	34
Les flux écosystémiques de matière et d'énergie	42
grandes tendances de la gestion énergétique par le vivant	45
SYNTHÈSES COMPARATIVES	46
La collecte d'énergie	46
Le stockage d'énergie	47
La transmission d'énergie	48
L'utilisation d'énergie	49
En résumé	50
OPPORTUNITÉS DU BIOMIMÉTISME POUR LES TECHNOLOGIES DE L'ÉNERGIE	52
La collecte de l'énergie	56
Le stockage de l'énergie	75
La transmission de l'énergie	86
L'utilisation de l'énergie	99
S'INSPIRER DU VIVANT POUR LA GESTION DE L'ÉNERGIE	112
Exemples de réalisations concrètes	112
S'INSPIRER DU VIVANT POUR LA GESTION DE L'ÉNERGIE	114
Exemples de compétences nationales & internationales	114
BIOMIMÉTISME & ÉNERGIE DANS LES MÉDIAS	116
LES AUTEURS	118

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.

Une synthèse de ce document a été rédigée par les mêmes auteurs.

ENJEUX STRATÉGIQUES DE L'ÉNERGIE

Un regard par la fenêtre suffit à comprendre en quoi l'énergie, définie comme *"la capacité à effectuer des transformations"*¹, est un enjeu fondateur à l'émergence aussi bien du monde du vivant que du monde technologique. L'étude des propriétés de l'énergie conduit notamment à la formalisation du principe de conservation (premier principe de la thermodynamique) au XIXe siècle. Démontré en 1915 par la mathématicienne E. Noether², celui-ci implique que *"la seule chose que l'on peut faire avec de l'énergie c'est soit la transférer (...) soit en modifier la nature. Par exemple, on pourra transformer de l'énergie thermique en électricité"*³. **On ne peut donc pas produire ni détruire de l'énergie à proprement parler, on peut uniquement la collecter, la transmettre et la convertir d'une forme en une autre.**

L'ÉNERGIE, UN ENJEU POUR TOUT ÊTRE VIVANT

Prenons un instant le point de vue du physicien sur la question de l'énergie dans le vivant. **Un être vivant est un système complexe, ouvert, échangeant de la matière et de l'énergie avec son environnement.** Ces systèmes sont capables d'accomplir un ensemble de fonctions (reproduction, communication, etc.), tout en assurant **leur auto-organisation, le maintien de leur intégrité physique** et la réponse à leurs besoins physiologiques. Pour cela, le vivant **dépense de l'énergie en permanence**. Or, la première loi de la thermodynamique précédemment évoquée stipule la conservation de l'énergie. Celle-ci n'est donc **disponible** pour un organisme que si elle a précédemment pu être **prélevée** dans son environnement. **L'enjeu de la collecte d'énergie** représente donc un prérequis fondamental au fonctionnement des systèmes biologiques.

En biologie **ces apports d'énergie et de matières sont regroupés sous le concept de nutrition**, on parle alors d'apports nutritionnels. Assez instinctivement, ces flux énergétiques apparaissent fondamentaux dans la mesure où **sans eux les organismes ne peuvent survivre**. La nécessité vitale d'assurer une disponibilité permanente d'énergie souligne l'enjeu fondamental du **stockage énergétique** pour pallier les absences ponctuelles d'apports. Outre la notion de disponibilité de l'énergie, les êtres vivants doivent être capables de convertir les vecteurs énergétiques collectés en énergie utile, en cela **la disponibilité de formes précises d'énergie** d'une part et **la mise en place de systèmes de conversion** d'autre part représentent également des **enjeux fonctionnels cruciaux**. Ce dernier élément souligne que tous les organismes ne recherchent pas les mêmes formes d'énergie, les mêmes vecteurs énergétiques.

Il existe donc un enjeu de régulation des flux énergétiques à **différentes échelles** :

- ▼ à l'échelle écosystémique, entre organismes aux différents besoins énergétiques,
- ▼ au sein de chaque organisme, selon leurs spécificités propres.

1 <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/essentiel-sur-energies.aspx> (Centre d'Énergie Atomique, France)

2 <https://arxiv.org/pdf/physics/9807044.pdf> (UCLA Physics Department, Los Angeles)

3 <https://www.cea.fr/multimedia/Pages/videos/culture-scientifique/energies/klein-qu-est-ce-que-energie.aspx> (Etienne Klein)

Pour aller plus loin...

LA NOTION D'ENTROPIE

▼ L'entropie quantifie le niveau de "désorganisation" d'un système

Plus cette notion physique, l'entropie, est grande, plus le système est "désorganisé, déstructuré, homogène" et inversement un système "bien rangé, ordonné, inhomogène" est dit de faible entropie.

▼ Le concept d'entropie est subtilement lié à celui d'énergie

On peut dire que l'entropie mesure la « qualité » ou « dégradation » de l'énergie d'un système. Certaines formes d'énergies sont plus "dégradées" que d'autres, ainsi l'agitation thermique (chaleur) est moins facilement mobilisable pour faire évoluer le système que d'autres formes d'énergie, comme si elle était de moins bonne « qualité ». Le second principe de la thermodynamique indique que tout système isolé évolue spontanément en augmentant son entropie. Autrement dit, un système isolé tend à se désorganiser spontanément.

▼ Un être vivant est donc un système de très faible entropie.

Si on s'intéresse au vivant, on remarque d'abord qu'un organisme est un système extrêmement organisé, compartimenté, structuré comparé à un mélange homogène de tous les atomes qui le constituent.

▼ Un organisme vivant est tout sauf un système isolé

L'observation précédente semble en contradiction avec le second principe de la thermodynamique, mais seulement en apparence car celui-ci s'applique aux systèmes "isolés" (coupés de toute interaction avec son environnement). Un être vivant est dit ouvert car il échange constamment de la matière et de l'énergie avec son environnement. Ainsi, pour qu'un organisme puisse diminuer localement sa propre entropie en se structurant, grandissant, changeant constamment, il faut qu'un flux d'énergie le traverse et que l'entropie du système global isolé (« être vivant + son environnement ») augmente⁴.

Soulignons ici un élément clé différenciant de la conception technologique face aux systèmes vivants. Du fait qu'ils aient évolué par le biais de la sélection naturelle qui prend en compte **un grand jeu de contraintes**, les organismes vivants n'évoluent pas vers un maximum de rendement ou de puissance. Ils présentent en revanche un équilibre fonctionnel **face aux multiples contraintes, et minimisent leur production de déchets**⁵. Le vivant fait donc preuve de sobriété à la fois dans **la consommation régulée d'énergie, mais également dans la génération de rejets**. Cette observation nous conduit à un paradoxe criant : ces axes de croissance visant le développement vers des systèmes toujours plus économes et peu producteurs de déchets ont été largement négligés par l'être humain alors qu'ils représentent une tendance évolutive majeure dans l'ensemble du monde vivant.

Les différents enjeux décrits dans cette partie, s'ils ne correspondent pas à une liste exhaustive, soulignent la nécessaire **gestion de l'équilibre entre les besoins et les apports énergétiques d'une part, et les stratégies de réponses mises en place au sein des systèmes biologiques d'autre part**.

4 Passet René, « Présentation », dans : , L'Économique et Le Vivant. sous la direction de Passet René. Paris, Economica (programme ReLIRE), « Hors collection », 1996, p. 83-95. URL : <https://www.cairn.info/l-economique-et-le-vivant--9782717831047-page-83.htm>

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

Pour structurer notre raisonnement et créer un cadre d'analyse commun au monde vivant et au monde technologique, nous considérerons des phases de conversion et de transmission d'énergie artificiellement découpées en quatre grandes fonctions :

- ▼ La collecte, fonction conduisant à un flux entrant d'énergie depuis le milieu extérieur au système vers l'intérieur de celui-ci,
- ▼ La transmission, fonction permettant la séparation dans l'espace de deux phases de conversion énergétique successives,
- ▼ Le stockage, fonction permettant la séparation dans le temps de deux phases de conversion énergétique successives,
- ▼ L'utilisation/la dissipation, fonction conduisant à un flux sortant d'énergie depuis l'intérieur du système vers le milieu extérieur.

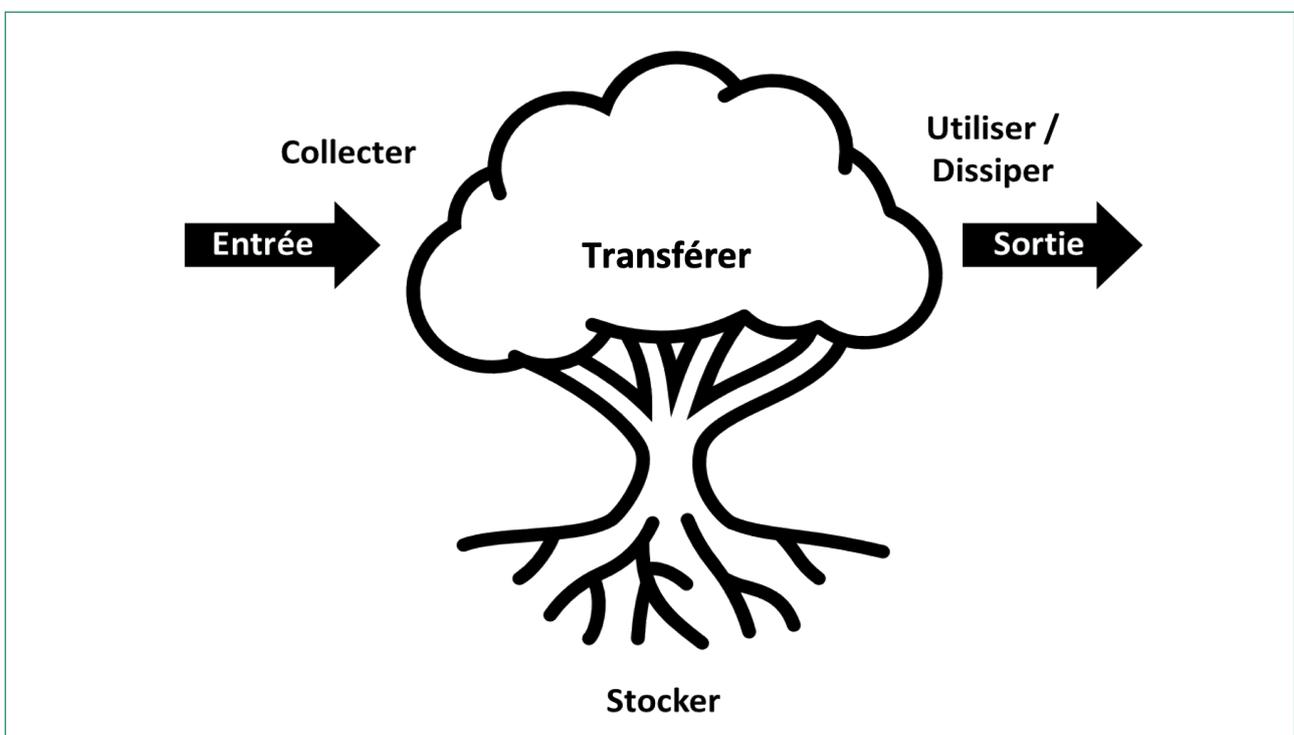


Schéma 1.
Cadre de bilan d'énergie adapté à un système biologique

On souligne par ailleurs que ces différentes stratégies fonctionnelles peuvent s'incarner très différemment **selon les échelles systémique (biosphère, écosystème, organisme, organes, cellules...) ou temporelle (jour, année, etc.) considérées.**

Ce rapport sur le biomimétisme et l'énergie nous invite à explorer les mécanismes du monde vivant pour en extraire **un ensemble de stratégies capable de répondre à ces différents enjeux.** Si l'énergie est fondamentale pour le monde vivant, sa gestion dans le cadre des sociétés humaines, que ce soit pour son utilisation, sa collecte, son stockage et sa transmission à l'échelle nationale, ou son impact géopolitique à l'échelle internationale, apparaissent comme des problématiques modernes essentielles. La mise en place d'infrastructures et de gouvernances permettant l'optimisation de cette gestion de l'énergie représente donc des enjeux technologiques et stratégiques clés à l'heure de la transition vers un modèle énergétique environnementalement et socialement durable.



SPÉCIFICITÉS DE L'ESPÈCE HUMAINE ET DU MONDE TECHNOLOGIQUE

En tant qu'être vivant, l'humain ne fait pas exception au constat explicité dans la partie précédente, **il est dépendant d'apports énergétiques** : nous avons besoin de nous nourrir pour maintenir nos fonctions vitales.

Quasi totalement construite autour d'un monde technologique, la société humaine dépend d'un ensemble de systèmes artificiels, de machines. Si celles-ci ne sont pas vivantes, elles nécessitent également des apports énergétiques. Les enjeux modernes de l'espèce humaine associés à l'énergie se distinguent alors des enjeux associés à la nutrition. **Parler d'enjeux énergétiques dans un cadre humain revient à parler de l'apport d'énergie aux machines.** En cela l'espèce humaine est un cas profondément particulier, les enjeux énergétiques modernes ne sont qu'indirectement liés à la notion de survie biologique.

Si les machines ont d'abord été actionnées par **l'énergie mécanique de l'animal**, de nouvelles sources énergétiques sont rapidement découvertes et viennent progressivement répondre aux besoins énergétiques des technologies et machines en nombre croissant. Dans l'antiquité c'est d'abord **le vent, l'eau et la combustion de biomasse** qui sont utilisés comme vecteurs d'énergie. A ceux-ci s'ajoute par la suite l'énergie thermique libérée par la combustion de **vecteurs fossiles** (charbons, pétrole et gaz), convertie en **énergie mécanique** (machine à vapeur) puis en énergie électrique au cours des révolutions industrielles successives. A partir du siècle dernier, **l'émergence du nucléaire**, tout particulièrement en France, et dans une moindre mesure **des énergies renouvelable**, vient finaliser cette offre répondant à l'enjeu d'un besoin croissant en énergie

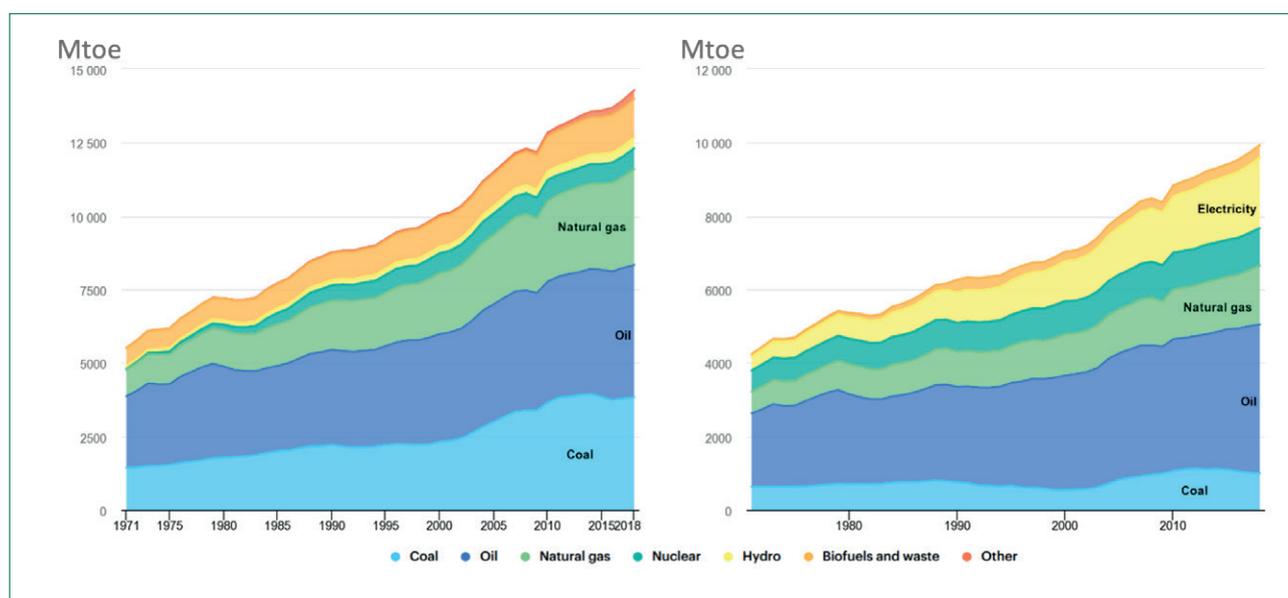


Figure 1. Total de la production* (gauche) et de la consommation finale** (droite) mondiale d'énergie par source.

* 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>

** 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>

L'Homme représente donc **une espèce à part du point de vue de son rapport à l'énergie**. Il utilise de l'énergie pour alimenter des systèmes non vivants, il collecte l'énergie via une multitude de sources qui sont peu voire non utilisées par le vivant, il maîtrise un grand nombre de processus de conversion et a conçu des machines non soumises à l'enjeu vital de sobriété, et donc sujettes au gaspillage énergétique⁶.

6 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>

Ces tendances de développement posent alors une question centrale, quelles en sont les limites ?

Sans prétendre à son analyse exhaustive, et encore moins à sa résolution, quatre axes peuvent être identifiés pour souligner les enjeux de la transformation énergétique des décennies à venir⁷ :

- **Les enjeux dus aux limites des stocks de ressources utilisés comme sources d'énergie.** Les résultats de la recherche scientifique sur la composition de la planète Terre ont rendu possible l'estimation de la quantité totale d'énergie encore disponible sous forme de stock et donc de leurs durées limites d'exploitation⁸. En 2019, 84,3% de l'énergie utilisée dans le monde est issue de vecteurs dits non renouvelables ou fossiles (hors nucléaire)⁷. Ce caractère non renouvelable est caractérisé par un processus de renouvellement très lent, de plusieurs millions d'années. A terme, le maintien d'une balance énergétique stable demande donc d'anticiper la fin des stocks pour prévenir une chute drastique des apports.
- **Les enjeux dus aux limites de l'équilibre du système de la planète Terre^{9,10}.** Ce second axe interroge les impacts de l'utilisation d'énergie (ex. déforestation et artificialisation des sols), de méthodes d'extraction des vecteurs énergétiques (ex. fracture hydraulique), de potentiels co-produits (ex. pollution et réchauffement climatique), de systèmes industriels (ex. extraction des matières premières et production de biens) et de l'organisation des flux de matière et d'énergie (ex. mondialisation), etc. En d'autres termes, **les impacts de l'activité humaine sur notre environnement planétaire** peuvent conduire à un déséquilibre des fondements sur lesquels notre société est construite. Il s'agit donc de **prendre en compte ces limites à respecter pour prévenir ce déséquilibre**.
- **Les enjeux dus aux limites de nos savoirs et savoir-faire scientifiques et techniques.** Le troisième axe questionne la capacité de nos sociétés à **apporter une réponse scientifique, technologique et structurelle face aux limites précédemment établies**. Comment la science, la technologie et la société peuvent-elles pallier à une chute prévisible de la disponibilité des vecteurs énergétiques non renouvelables ? A-t-on la capacité technique de réduire les besoins énergétiques actuels ? A-t-on la capacité de systématiser l'utilisation de nouvelles sources énergétiques ? Et si cela était possible, **l'humanité saura-t-elle se structurer durablement pour mettre en place ces changements ?** Tant d'incertitudes soulignent en quoi **la technologie ne peut être considérée comme le seul axe de réponse**. A l'inverse **exclure la part technologique de la solution est contre-productif** au vu du potentiel qu'elle représente.
- **Les enjeux dus aux limites politiques, socio-économiques et sociétales¹¹.** Ce dernier axe aborde notre rapport à l'énergie en tant qu'espèce consciente. Si la disponibilité jusqu'à présent croissante de l'énergie nous a conduit à une perception faussement infinie de celle-ci, et ce plus spécifiquement dans les pays développés, la prise de conscience des limites précédemment explicitées nous intime de sortir d'une croissance perpétuelle des usages de l'énergie. Le questionnement de nos modes de consommation associé à l'évolution des objectifs sociétaux, et au delà du paradigme actuel de l'énergie¹², semblent être des composantes clés de la solution. En cela, **l'enjeu du choix politique éclairé**, et donc de l'orientation réfléchie de notre croissance sociétale, dont l'axe reste à (re)définir, **apparaît central dans la transition vers un modèle énergétique durable**.

Comme bien souvent dans le monde vivant, c'est la **notion d'équilibre, et donc d'une adaptation simultanée à l'ensemble des contraintes** représentées par ces axes, qui émerge comme une solution souhaitable. Autant de défis qui peuvent se résumer par **la notion de durabilité sociétale et donc énergétique**.

7 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>

8 <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>

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

10 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>

11 Joakim Kuln & Ingemar Johansson Sevå (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>

12 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>

LES TECHNOLOGIES AU SERVICE D'UN SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE DURABLE

Si les enjeux dus aux limites des stocks et aux limites de l'équilibre terrestre nous permettent de caractériser **les contraintes naturelles imposées**, les enjeux technico-scientifiques, politiques et sociétaux peuvent être perçus comme liés au fait de choisir les bons leviers de résolution. Plusieurs décennies de travaux scientifiques¹³ ont ainsi souligné ce lien intrinsèque entre notre modèle énergétique et notre impact sur l'environnement. **La transition vers un système énergétique durable s'impose aujourd'hui comme un objectif international majeur** tel qu'exprimé en 2015 dans les Objectifs de Développement Durable (ODD n°7 notamment) de l'Organisation des Nations Unies (ONU)¹⁴.

Les défis des acteurs de l'énergie sont donc cruciaux : **minimiser les besoins**, notamment par la réduction des pertes, par l'optimisation de la distribution et par la modification des modèles d'utilisation, et **assurer la réponse à ces besoins** par des apports énergétiques issus de vecteurs durables et à faibles impacts. Face à ces objectifs forts, l'accord de Paris de 2016 engage 190 pays à réduire massivement leurs émissions de gaz à effet de serre (dont le CO₂) notamment issue de la combustion de ressources énergétiques fossiles¹⁵. En 2019 l'Europe pousse la démarche plus loin à travers le pacte vert (European Green Deal), posant l'objectif **de rendre nulles les émissions nettes de gaz à effet de serre et de dissocier la croissance de l'utilisation de ressources**¹⁶.

A l'échelle nationale, les acteurs français de l'industrie énergétique ont d'ores et déjà **réduit de près de 19% leurs émissions de CO₂ depuis 1990**¹⁷. Cette tendance trouve notamment son explication dans le déploiement de l'énergie nucléaire (40,3% de la consommation d'énergie primaire en 2019¹⁸) et des énergies dites renouvelables (11,6% de la consommation d'énergie primaire en 2019²⁰) remplaçant les filières du charbon et du pétrole (respectivement 3,0% et 29,1% consommation d'énergie primaire en 2019²⁰).

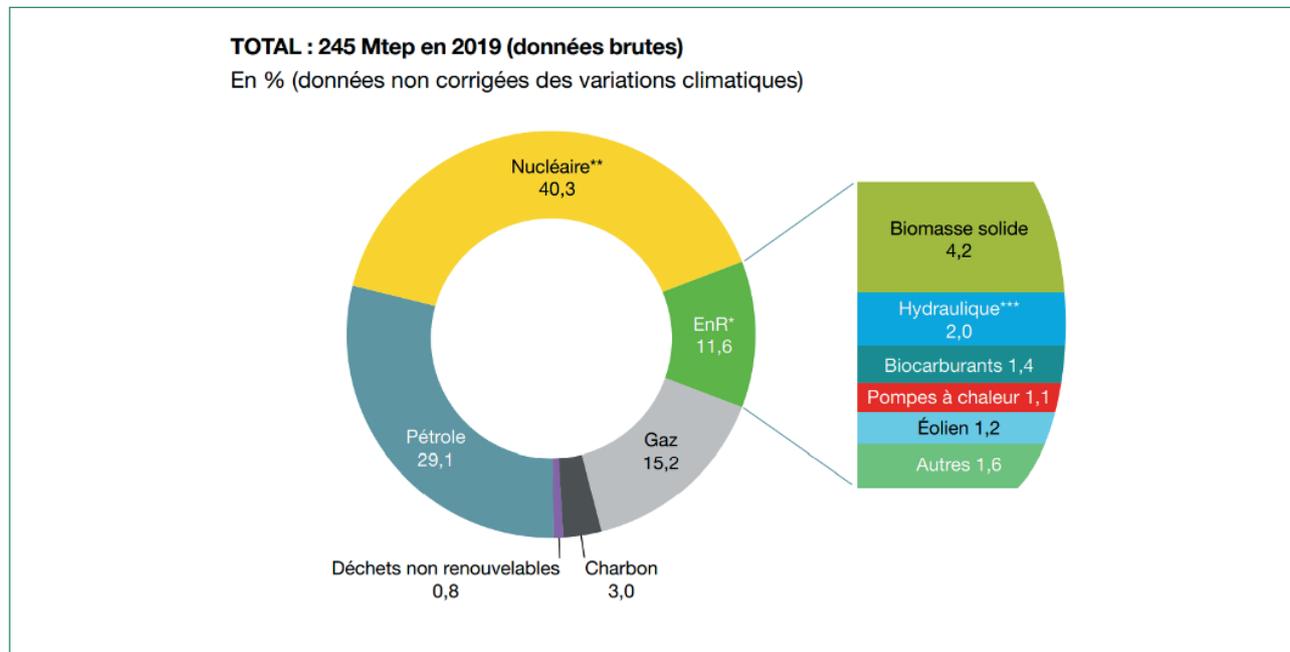


Figure 2. Répartition de la consommation d'énergie primaire en France*. Champ : France entière (y compris DOM).
EnR : énergies renouvelables / ** Correspond pour l'essentiel à la production nucléaire, déduction faite du solde exportateur d'électricité. On inclut également la production hydraulique issue des pompages réalisés par l'intermédiaire de stations de transmission d'énergie, mais cette dernière demeure marginale, comparée à la production nucléaire / *** Hydraulique hors pompages.

*SDES, Bilan énergétique de la France, cité par : https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-09/datalab_70_chiffres_cles_energie_edition_2020_septembre2020.pdf

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

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

15 <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement> (ONU)

16 https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

17 <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/les-emissions-de-co2-liees-lenergie-en-france-de-1990-2017-facteurs-devolution-et-elements-de>

18 <https://www.ecologie.gouv.fr/france-relevance-transition-ecologique> (Gouvernement Français)

Poursuivant dans cette direction, le gouvernement français établit en 2020 une feuille de route **vers la neutralité carbone d'ici à 2050** à travers le plan "France Relance"¹⁹. Celui-ci vise notamment à **soutenir les entreprises souhaitant effectuer une transition** vers des modèles de production bas-carbone, le développement de la filière de l'hydrogène, l'économie circulaire, les circuits courts, la transition agroécologique, les filières de recyclage ainsi que la mobilité propre.

L'intention mondiale, et particulièrement européenne et française, est donc à la décarbonation. Cette tendance extrêmement positive sur la gestion du carbone vise à traiter **une partie des conséquences** de notre rapport sociétal à l'énergie.

La démarche actuelle vise donc à considérer les autres tenants du problème. La réduction de la pollution due au relargage d'éléments impactant l'environnement et la santé (oxyde d'azote, monoxyde de carbone, déchets radioactifs, métaux lourds, etc.) ou de la destruction d'espaces naturels, sont des leviers majeurs visant à contrer **la chute drastique de la biodiversité**^{20, 21} associée aux enjeux précédemment décrit.

Plus récemment, nous avons également fait l'expérience de **l'augmentation du risque d'émergence d'épidémies** (réchauffement du permafrost²², extraction directe²³, déplacements des espèces et des populations dus aux changements climatiques²⁴, etc.) qui vient également s'ajouter à la liste des symptômes liés à notre manière d'appréhender nos ressources naturelles dont l'énergie.

Il s'agit donc **d'aborder l'énergie avec une vision la plus holistique possible**. Ce faisant, il nous sera possible d'utiliser l'augmentation du rendement d'une machine pour produire autant en consommant moins, plutôt que de produire plus sur un temps équivalent ce qui limite la réduction de la consommation énergétique absolue (**effet rebond**) .

Pour aller plus loin...

L'EFFET REBOND

▼ L'effet rebond désigne le phénomène par lequel l'amélioration de la qualité technologique d'un bien a pour conséquence l'augmentation de sa consommation

« On parle aussi de « paradoxe de Jevons » ou de « postulat de Khazzoom-Brookes ». Ainsi, l'amélioration des performances des voitures en matière de consommation de carburant n'a pas eu comme conséquence une baisse de cette consommation. Il s'agit d'un effet rebond dit « direct ». Il existe aussi des effets rebonds « indirects », lorsque des économies faites (sur le carburant par exemple) libèrent du pouvoir d'achat pour des dépenses d'une autre nature. »²⁵

La prise en compte de ce phénomène est donc clé pour permettre une transition écologique efficace.

19 <https://www.ecologie.gouv.fr/france-relance-transition-ecologique> (Gouvernement Français)

20 Giam, X. (2017). Global biodiversity loss from tropical deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(23), 5775–5777. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1706264114>

21 Van Dover, C. L., Ardron, J. A., Escobar, E., Gianni, M., Gjerde, K. M., Jaeckel, A., Jones, D. O. B., Levin, L. A., Niner, H. J., Pendleton, L., Smith, C. R., Thiele, T., Turner, P. J., Watling, L., & Weaver, P. P. E. (2017). Biodiversity loss from deep-sea mining. *Nature Geoscience*, 10(7), 464–465. <https://doi.org/10.1038/ngeo2983>

22 Stella, E., Mari, L., Gabrieli, J. et al. Permafrost dynamics and the risk of anthrax transmission: a modelling study. *Sci Rep* 10, 16460 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72440-6>

23 <https://www.tephinet.org/an-outbreak-of-human-anthrax-in-a-mining-company-selenge-province-mongolia-2010>

24 <https://www.hsph.harvard.edu/c-change/subtopics/coronavirus-and-climate-change/>

25 Binswanger, M. (2001). Technological progress and sustainable development: What about the rebound effect? *Ecological Economics*, 36(1), 119–132. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(00\)00214-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(00)00214-7)

Si cette prise en compte du modèle structurel est essentielle, les avancées scientifiques et techniques offrent également un ensemble de leviers visant à atteindre les objectifs précédemment établis.

Ainsi, les systèmes de collecte de vecteurs renouvelables ont vu leur potentiel croître au cours des dernières décennies, et ce malgré différents inconvénients qui handicapent leur développement à des échelles comparables à celles des systèmes basés sur la combustion de vecteurs fossiles (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



La part croissante des énergies renouvelables dans la consommation énergétique mondiale, **souligne cette tendance** claire, bien que limitée face à la consommation totale.

Par ailleurs, on notera l'augmentation de l'effort de recherche académique dans ces secteurs qui confirme un investissement humain et financier massif sur la résolution des freins explicités dans les tableaux précédents (Tableau 1). Ces découvertes primordiales actuellement au stade de la recherche seront au centre des innovations des années à venir.

Les défis technologiques à résoudre restent donc nombreux pour poursuivre la mutation sociétale en cours.

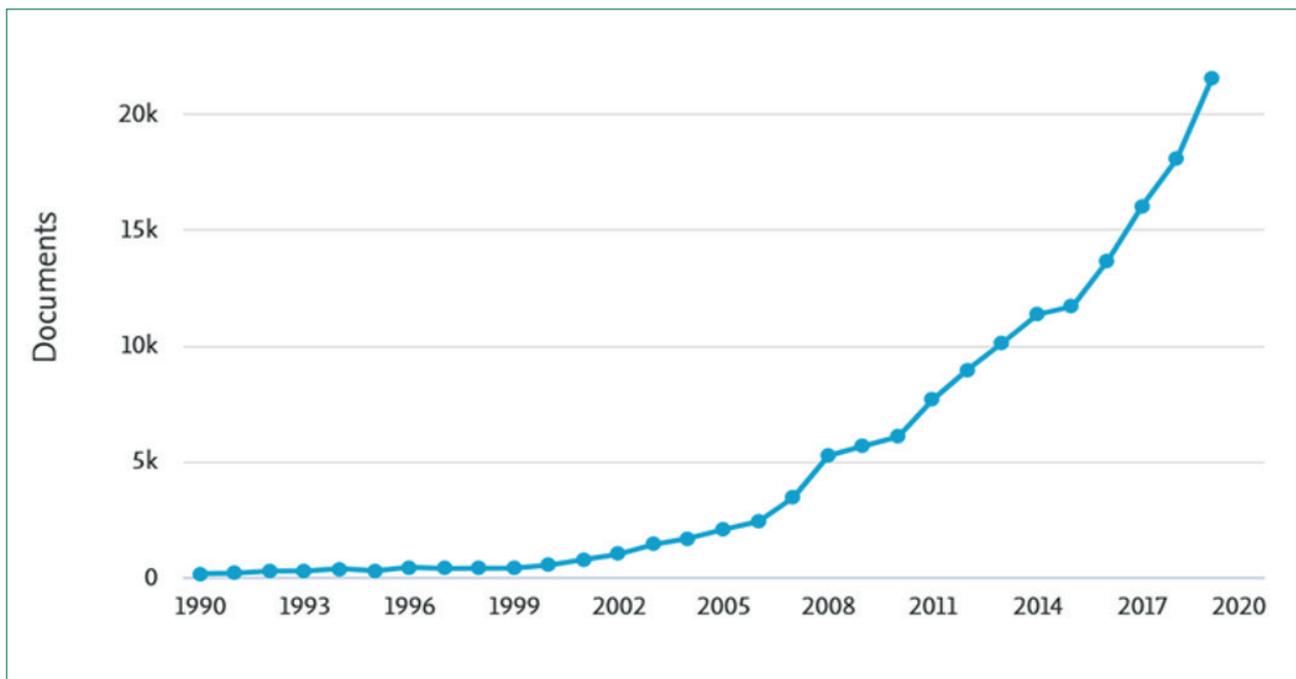


Figure 3. Dynamique d'évolution du nombre d'articles publiés abordant les « énergies renouvelables »
Données de tendance issues de la recherche "TITLE-AB-KEY (energy AND renewable)" sur Scopus (<https://www.scopus.com/>)



Là où la question des sources d'énergie et des vecteurs énergétiques possède une réponse aujourd'hui claire - nous devons nous passer des vecteurs non renouvelables - ce sont bien **les systèmes énergétiques, leurs infrastructures et leur gouvernance qui assureront la mise en place d'une réponse technologique cohérente**. L'inertie d'une telle transition met en évidence la complexité du sujet, aussi bien du point de vue technique que politique. Il convient de **ne pas simplement déplacer le problème**, que ce soit dans l'espace ou dans le temps.

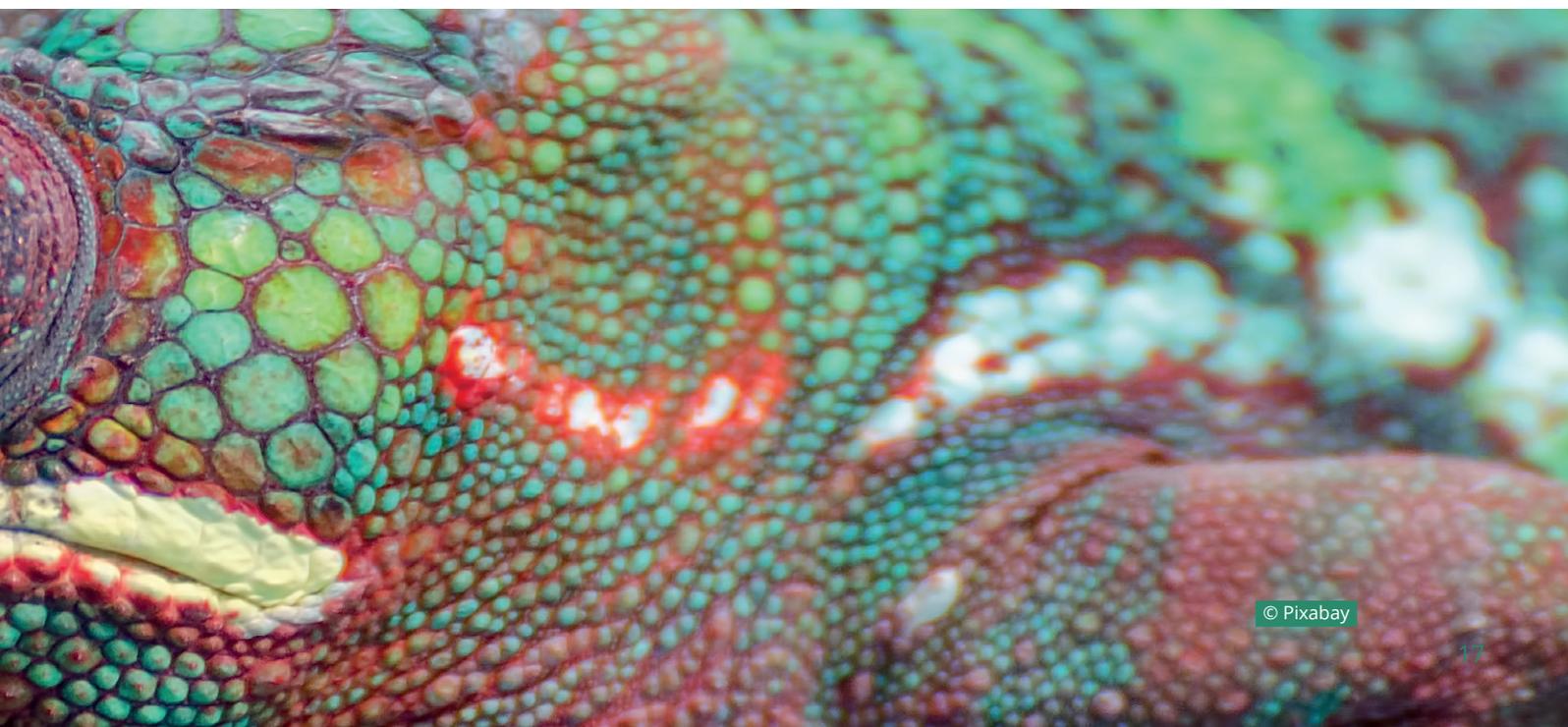
Si cette transition ne peut pas être instantanée, elle devra malgré tout **rapidement endiguer les causes et non seulement les symptômes** de la crise environnementale actuelle. L'innovation dans le secteur de l'énergie est donc, aujourd'hui comme hier, **investie d'une mission clé pour les générations futures**. Cette partie sur les enjeux de l'énergie a permis de souligner d'une part **le caractère transversal du rôle de l'énergie dans le monde du vivant et dans le monde technologique** et d'autre part les **spécificités associées à la gestion d'énergie dans les sociétés humaines**.

A partir de ce point de départ, **le cœur de ce rapport vise à présenter en quoi**, face aux spécificités du monde technologique et à la complexité des enjeux considérés, **le biomimétisme représente une opportunité significative de propositions de solutions durables**.

Si les deux premiers enjeux de la gestion humaine de l'énergie (limites des stocks et limites de l'équilibre du système terrestre) font intrinsèquement partie des contraintes environnementales terrestres, et a fortiori de celles d'un milieu local donné, elles représentent donc une pression de sélection pour les organismes biologiques, leur résolution au cours de l'évolution est aujourd'hui incarnée par les êtres vivants modernes. Il s'agit alors d'une part d'observer les tendances qui régissent le monde biologique, d'identifier les règles qui le régulent, l'architecture qui lui confère son équilibre et sa résilience, etc. et d'autre part, d'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 du biomimétisme, elle questionne notre structure de développement (pourquoi utiliser des sources d'énergie de stock ?) et offre des leviers techniques incarnant des alternatives (la photosynthèse utilise une énergie de flux). La convergence des besoins des systèmes biologiques et technologiques (stocker, transmettre, collecter et utiliser de l'énergie durablement) nous conduit alors à questionner la manière dont la Vie articule depuis près de 3,8 milliards d'années une gestion durable de l'énergie.

Dans la mesure où toutes les activités humaines représentent différentes manières spécifiques d'utiliser de l'énergie, que celle-ci soit perçue ou non (=énergie grise), apporter des solutions biomimétiques favorisant la transition vers une gestion durable des ressources énergétiques contribuerait à impacter profondément l'ensemble des secteurs d'activités.



L'ÉNERGIE DANS LE MONDE VIVANT

L'énergie est centrale à la survie des organismes. L'évolution a ainsi conduit pendant plus de 3,8 milliards d'années à la sélection d'une multitude de stratégies permettant de gérer les apports, les manques, les différentes formes et les pertes d'énergie. Elle a permis la mise en place d'un **équilibre énergétique durable, dynamique et assurant la résilience des écosystèmes**.

De la collecte à l'utilisation en passant par la transmission et le stockage, ce chapitre aborde de manière transversale la gestion énergétique dans le vivant :

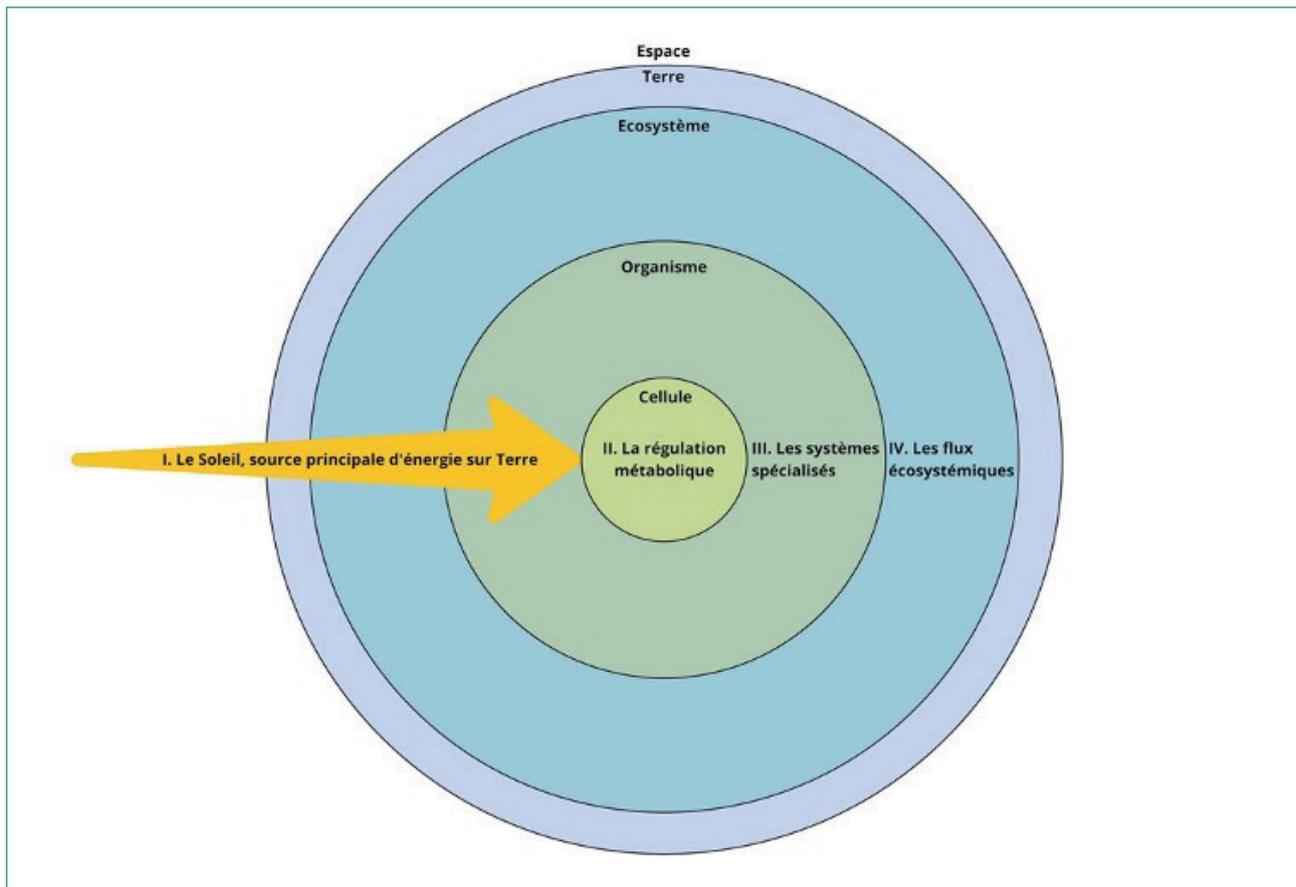


Schéma 3.
I. Le Soleil, source principale d'énergie sur Terre
II. La régulation métabolique de l'énergie
III. Les systèmes spécialisés dans la gestion de l'énergie dans un organisme
IV. Les flux écosystémiques de matière et d'énergie

A travers des principes généraux illustrés d'exemples, cette partie souligne en quoi le vivant est fondamentalement intégré à son environnement, gérant et utilisant l'énergie qu'il y puise pour remplir ses fonctions de manière efficace et durable.

De l'échelle écosystémique à l'échelle cellulaire, ce panorama permet de rendre compte du caractère cyclique de la grande variété des mécanismes biologiques, et ce **en cohérence avec les cycles de la matière** dont le vivant n'est qu'une incarnation transitoire. Ce travail relate notre compréhension des tendances clés sélectionnées au cours de l'évolution, aussi appelées « principes du vivant »²⁶, permettant à la biosphère d'assurer sa pérennité.

26 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.

LE SOLEIL, SOURCE D'ÉNERGIE PRINCIPALE SUR TERRE

LES SOURCES D'ÉNERGIE

La source principale du monde vivant repose sur la transformation de l'énergie solaire (énergie électromagnétique) en matière organique, par un **processus appelé photosynthèse**. Cette photosynthèse permet d'utiliser l'énergie des photons pour effectuer la réaction de réduction du carbone inorganique (CO_2) en carbone organique dans des molécules appartenant à la famille des sucres²⁷. Cette réaction consomme de l' H_2O ce qui produit de l' O_2 comme co-produit réactionnel.

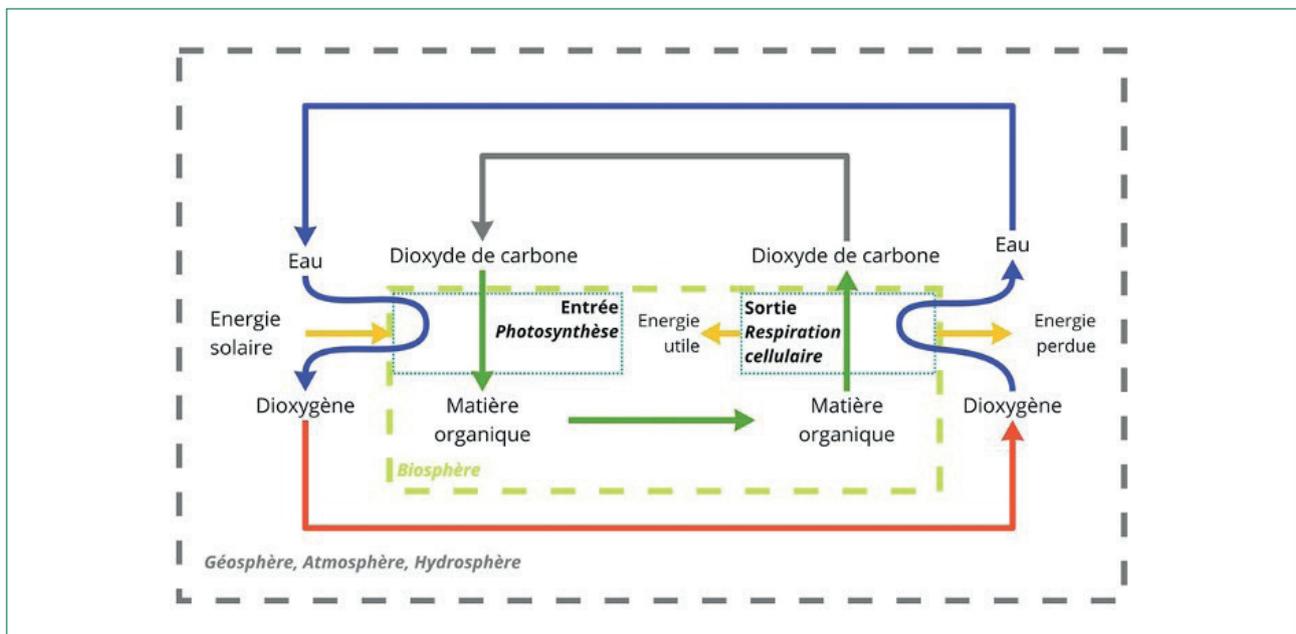


Figure 4. Illustration du principe de recyclage dans le vivant à travers l'exemple de l'équilibre entre les mécanismes de respiration et photosynthèse, fondations de la gestion énergétique. © Ceebios

C'est la réaction inverse, l'oxydation de la matière organique en CO_2 le plus souvent par l' O_2 , qui disponibilisera l'énergie pour les organismes vivants. Ce processus est appelé respiration cellulaire et comme toute conversion énergétique, il présente des pertes sous forme de chaleur. Le carbone du CO_2 fixé par la photosynthèse est ainsi libéré sous cette même forme lors de la respiration cellulaire, assurant un équilibre dynamique par la cyclicité de la matière.

Si le soleil correspond aujourd'hui à la source énergétique largement majoritaire du monde vivant, l'hypothèse admise par la communauté scientifique est que les premiers organismes puisaient leur énergie de molécules minérales au fond des océans. Cette thèse est notamment basée sur l'observation de bactéries actuelles capables d'utiliser de telle source, comme les bactéries sulfo-oxydantes ou méthanogènes²⁸.

²⁷ « le vivant fonctionne au sucre », voir (31)

²⁸ 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). No longer published by Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2006.02.001>

Plus récemment, des études ont identifié **deux autres sources d'énergie** collectées par le vivant, **l'électricité**²⁹ et **les radiations ionisantes**³⁰. Ces sources demeurent cependant anecdotiques et principalement d'origine anthropique mais témoignent du caractère opportuniste du vivant³¹.

Source d'énergie	Source d'électrons	Source de carbone	Type trophique	Principaux exemples
Lumière photo-	Composé organique -organo-	Organique- hétérotrophe	Phoroorganohétérotrophe	Certaines bactéries
		Minérale (CO ₂) - autotrophe	Phoroorganoautotrophe	Certaines bactéries (athiorhodacées...), hémiparasites végétaux chlorophylliens
	Inorganique -litho-	Organique- hétérotrophe	Phoroorganohétérotrophe	Certaines bactéries (thiobac...)
		Minérale (CO ₂) - autotrophe	Phoroorganoautotrophe = nutrition minérale	Végétaux chlorophylliens, certaines bactéries
Oxydation d'u composé chimique réduit, organique ou minéral Chimio-	Composé organique -organo-	Organique- hétérotrophe	Chimioorganiquehétérotrophe	Animaux, mycètes (champignons), la plupart des bactéries
		Minérale (CO ₂) - autotrophe	Chimioorganiqueautotrophe	Rare, certaines bactéries (mixotrophie)
	Inorganique -litho-	Organique- hétérotrophe	Chimioorganiquehétérotrophe	Certaines bactéries (Bosea, Albibacter)
		Minérale (CO ₂ , CH ₄) - autotrophe	Chimioorganiqueautotrophe	Certaines bactéries terrestres ou marines (écosystèmes hydrothermaux). La source d'énergie est inorganique

Tableau 2. Types trophiques du vivant : Illustration du principe d'opportunisme du vivant au regard des ressources locales Source : Wikipédia

Le tableau de synthèse ci-dessus (Tableau 2) présente les différents mode de nutrition (=apport de matière et d'énergie), ou types trophiques, adoptés par le vivant. La très grande majorité de la biosphère se divise en deux types trophiques, les photolithoautotrophes (assimilés au concept d'**autotrophes** par la suite) et les chimioorganohétérotrophes (resp. **hétérotrophes**). Tous les organismes oxydent de la matière organique pour récupérer de l'énergie mais les autotrophes sont les seuls à pouvoir la produire à partir de matière minérale.

29 Lovley, D. R. (2011). Powering microbes with electricity: direct electron transfer from electrodes to microbes. Environmental Microbiology Reports, 3(1), 27–35. <https://doi.org/10.1111/j.1758-2229.2010.00211.x>

30 Dadachova, E., & Casadevall, A. (2008). Ionizing radiation: how fungi cope, adapt, and exploit with the help of melanin. Current Opinion in Microbiology, 11(6), 525–531. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2008.09.013>

31 « le vivant est opportuniste », voir (1)

Cette diversité de types trophiques, et donc de sources énergétiques, souligne notamment la capacité du vivant à **s'adapter à son environnement pour y puiser l'énergie nécessaire à sa survie et son développement**. Pour comprendre comment celle-ci est **rendue disponible à l'ensemble du monde vivant**, concentrons-nous à présent sur **les autotrophes qui en représentent son point d'entrée**.

L'énergie dans le monde vivant :

- est probablement passée au cours de l'évolution d'une source chimique minérale à la source solaire aujourd'hui immensément majoritaire,
- a toujours des sources très diverses mais avec des tendances largement majoritaires, elles peuvent d'ailleurs coexister chez un même organisme pour lui permettre de s'acclimater à des environnements variés,
- entre et sort du monde vivant via deux réactions principales permettant d'une part la conversion de collecte par réduction d'un vecteur carboné (photosynthèse), et d'autre part l'utilisation d'énergie par oxydation d'un vecteur carboné (respiration).



ENTRÉE DANS LE MONDE VIVANT

Les autotrophes, principalement des plantes et des phytoplanctons (microorganismes marins qui réalisent à eux seuls la moitié de la photosynthèse terrestre) représentent **les fondations énergétiques essentielles à l'ensemble du vivant**.

Leur activité photosynthétique permet **la concentration de l'énergie solaire dans des vecteurs énergétiques chimiques** qui peuvent ensuite circuler entre les différents organismes d'un écosystème, à la faveur de relations trophiques incarnées par les chaînes alimentaires. Puisque tenant un rôle clé dans la collecte d'énergie, les autotrophes sont nommés **producteurs primaires** (de matière organique). Leurs prédateurs sont alors nommés **consommateurs primaires**.

Il est à noter que si les autotrophes assurent la transformation du carbone minéral (CO₂) en carbone organique (sucres), ce sont **tous les organismes biologiques qui assurent la cyclicité du carbone**. Comme précédemment évoqué, la minéralisation du carbone organique s'effectue par la respiration cellulaire, en plus notamment de l'activité des décomposeurs qui dégradent la matière organique d'organismes morts³². Ces êtres vivants sont des maillons clés de la boucle de la matière carbonée, vecteur chimique de l'énergie du vivant. Ainsi, **l'énergie disponible à l'échelle de la biosphère et de chaque écosystème est limitée par la quantité d'énergie collectée et de matière organique synthétisée** par les producteurs primaires. Intéressons-nous donc à présent à ces producteurs primaires et à **leurs infrastructures de collecte d'énergie**.

L'énergie est rendue disponible à l'ensemble du monde vivant par :

- la conversion de l'énergie électromagnétique solaire en énergie chimique pour assurer l'entrée principale d'énergie sur le « réseau »,
- la gestion conjointe de la matière et de l'énergie,
- la transmission et le stockage de l'énergie sous forme chimique via la matière organique.



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

INFRASTRUCTURE DE COLLECTE

Le système de collecte d'énergie solaire et lieu de la photosynthèse est une structure appelée **chloroplaste**. Situés à l'intérieur des cellules, ce sont ces organites qui permettent de synthétiser de la matière organique à partir d'H₂O, de CO₂ et d'énergie solaire. Si ces systèmes sont présents chez l'ensemble des organismes autotrophes photosynthétiques, **l'infrastructure qui les accueille est variable**, depuis l'organisme unicellulaire du taxon bactérien, aux cellules chlorophylliennes des feuilles de plantes.

Du fait de leur diversité, **les feuilles représentent un remarquable modèle** d'étude des infrastructures de collecte de l'énergie solaire. En effet, par son **rôle d'interface**, cet organe est constamment exposé à des contraintes environnementales (vent, insectes, etc.)³³ ce qui a conduit à la sélection au cours du temps de caractères profondément multifonctionnels tels que l'auto-réparation, la protection contre les agresseurs, la réduction de la prise au vent, etc.

Comme pour tous les systèmes vivants, la feuille a donc été sélectionnée face à un jeu de différentes contraintes pour atteindre un **équilibre fonctionnel plutôt que pour maximiser une seule fonction**³⁴ au détriment des autres, soulignant la notion de compromis dans le vivant³⁵. C'est de cette diversité fonctionnelle qu'émerge le caractère profondément résilient de ces structures de collecte énergétique³⁶, elle-même associées en un feuillage au caractère multifonctionnel.

Par ailleurs, ces systèmes biologiques sont remarquables du point de vue de leur processus de « fabrication ». Ils sont localement auto-assemblés de manière ascendante, associant croissance structurelle et spécialisation multifonctionnelle³⁷.

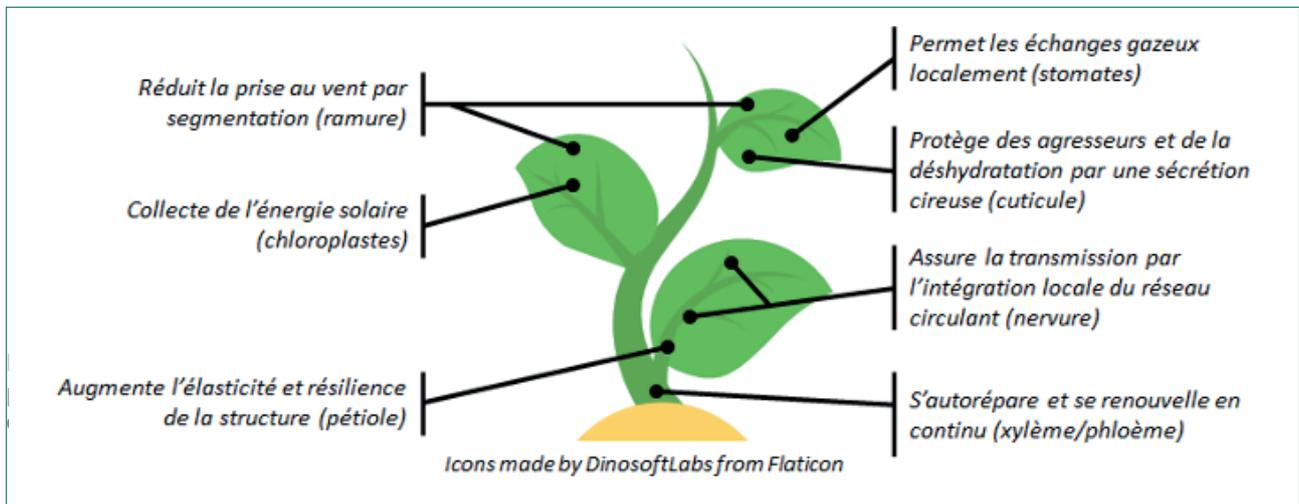


Figure 5. Illustration du principe de gestion des compromis liés à la multifonctionnalité, l'exemple de la feuille © Ceebios © Icon by DynosoftLabs / Flaticon

33 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>

34 « Le vivant tend à optimiser plutôt qu'à maximiser », voir (1)

35 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/jbim.16.00005.

36 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

37 « Le vivant construit de bas en haut », voir (31)

Les infrastructures de collecte d'énergie électromagnétique sont :

- Multifonctionnelles,
- Fabriquées localement et autoassemblées de manière ascendante à différentes échelles,
- Segmentées et étagées
- Modulables.



PROCESSUS DE COLLECTE

La photosynthèse est le processus conduisant à **la conversion de l'énergie électromagnétique solaire externe en énergie chimique (sucre)** interne à l'organisme. Comme explicité dans la partie précédente, celle-ci a lieu dans les chloroplastes des cellules chlorophylliennes. Ces chloroplastes renferment des structures nommées thylakoïdes qui sont responsables de la collecte de l'énergie solaire. Plus spécifiquement, c'est dans la membrane de ces structures que sont présentes un ensemble de protéines qui conduisent, par une réaction en chaîne, à la conversion de l'énergie apportée par les photons en énergie chimique.

Sans entrer dans les détails de la nature des composants du système photosynthétique, c'est la capacité de différents pigments (chlorophylles et caroténoïdes notamment) à **absorber l'énergie des photons pour délocaliser leurs électrons qui initie la réaction**. Atteignant un fort niveau d'excitation, ceux-ci sont en effet rendus mobiles et sont transportés par le biais d'une chaîne de molécules jusqu'à un accepteur final d'électrons, appelé NADP⁺. Cet apport d'électron entraîne sa **réduction en NADPH, H⁺**, molécule qui représente alors un **vecteur d'énergie chimique**.

Au cours de cette chaîne réactionnelle, on observe également **la formation d'un gradient de proton H⁺** de part et d'autre de la membrane. Cette accumulation de proton à l'intérieur des thylakoïdes est notamment due à la **photolyse de l'eau**, nécessaire au remplacement des électrons déplacés et permettant ainsi un retour à l'équilibre du système ($2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$). Cette différence de potentiel chimique forme **une énergie dite électroosmotique**.

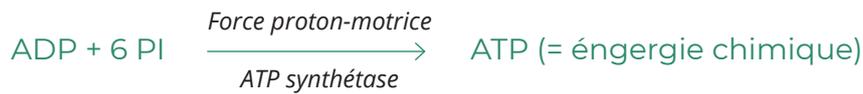
Pour aller plus loin...

LA RÉACTION D'OXYDO-RÉDUCTION

▼ Une réaction d'oxydoréduction est une réaction chimique au cours de laquelle se produit un transfert d'électrons depuis un « réducteur » vers un « oxydant »

L'oxydant le plus commun est la molécule d'O₂, qui donne d'ailleurs son nom à cette réaction chimique. Ainsi, l'O₂ a tendance à arracher les électrons des molécules qu'il rencontre pour devenir de l'eau, H₂O. Inversement, il est compliqué pour l'eau de se défaire d'électron afin de régénérer de l'O₂. Pourtant, la phase photochimique de la photosynthèse conduit la chlorophylle en déficit d'électron à en capter chez H₂O par une réaction spécifique au monde biologique et particulièrement remarquable : l'oxydation de l'eau par photolyse.

L'énergie électro-osmotique est ensuite convertie en énergie chimique par le biais d'une enzyme transmembranaire, l'ATP synthétase, capable d'utiliser un flux de protons comme **une force dite « proton-motrice »**. Elle conduit à la mise en place d'une liaison entre l'Adénosine DiPhosphate (ADP) et un phosphate inorganique (Pi) pour former de **l'Adénosine TriPhosphate (ATP)**.



Eq. 1. Bilan réactionnel global de la photosynthèse

Cette première phase de la photosynthèse, dite phase photochimique ou phase claire, conduit la cellule à **convertir de l'énergie électromagnétique** (la lumière solaire) en **énergie électroosmotique** (gradient de proton) et en **énergie chimique** (potentiel réducteur du NADPH, H⁺ et liaison à fort potentiel de l'ATP).

Au sein des chloroplastes a également lieu la seconde phase de la photosynthèse, dite non photochimique (ne dépendant donc pas d'une exposition à la lumière).

Il s'agit d'un processus métabolique cyclique, le cycle de Calvin, qui **utilise l'énergie libérée par la dégradation de l'ATP pour fixer du CO₂ et former une molécule organique** de la famille des sucres, le glucose, grâce à une enzyme : la rubisCO.

Les vecteurs énergétiques formés lors de la première phase de la photosynthèse sont ainsi directement transformés au sein des chloroplastes pour former majoritairement une autre molécule énergétique plus stable, le glucose (C₆H₁₂O₆).

Le processus de collecte d'énergie électromagnétique par le vivant est notamment basé sur :

- des systèmes aux électrons rendus mobiles après leur excitation par des photons,
- des chaînes d'accepteurs d'électrons permettant la mobilité du flux électronique,
- la génération d'un gradient de proton grâce au mouvement de l'électron,
- la conversion de l'énergie potentielle électroosmotique en énergie chimique par la formation de liaisons moléculaires « à haut potentiel »,
- la stabilisation des vecteurs moléculaires formés par leur utilisation lors de la réaction de biosynthèse endergonique de matière organique plus stable.
- le retour à l'état initial du système de collecte.

Une fois le glucose formé, l'énergie est rendue disponible pour l'organisme. Notre compréhension de la gestion de l'énergie par le vivant dépend alors de l'étude des mécanismes qui assurent la transformation de cette molécule énergétique élémentaire en un ensemble d'autres molécules aux usages variés. Ces transformations chimiques cruciales à la survie des organismes sont alors finement régulées pour assurer le stockage, la disponibilité ou la transmission d'énergie.



LA RÉGULATION MÉTABOLIQUE DE L'ÉNERGIE DANS UN ORGANISME

Le métabolisme est défini comme **l'ensemble des réactions chimiques ayant lieu dans les cellules de l'organisme**³⁸. Celui-ci se découpe en deux parties, le **catabolisme**, dégradant des molécules pour en extraire de l'énergie et d'autres molécules, et **l'anabolisme**, utilisant l'énergie et les molécules pour répondre aux besoins physiologiques.

Nous avons vu dans la partie précédente que le monde vivant est capable de former des molécules de glucose à partir de matière minérale via l'utilisation d'énergie fournie par le soleil. **La photosynthèse est donc un processus anabolique**. L'intégration du glucose au sein du métabolisme et **la déclinaison des formes de vecteurs d'énergies chimiques** qui en découle sont au cœur des mécanismes de régulation.

Dans un effort de simplification, la partie suivante se basera par défaut sur **un modèle de cellule générique ayant à disposition du glucose** et déclinant ses stratégies de gestion de l'énergie selon les usages (utilisation, transmission, stockage). Spécifiquement, c'est le rôle du métabolisme dans la transformation des vecteurs énergétiques chimiques qui est ici à l'étude.

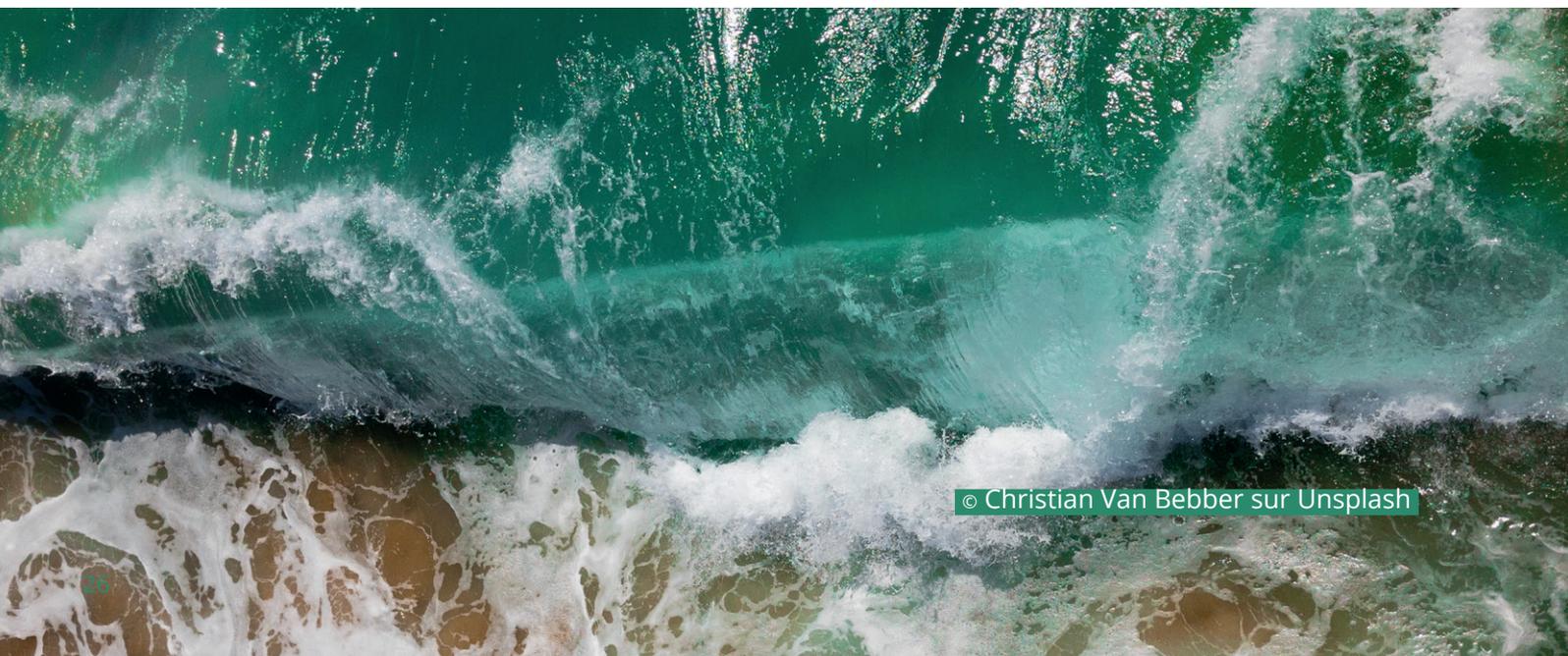
Régulé à de multiples échelles, le métabolisme s'articule autour d'une dynamique de vases communicants. Il **transforme ainsi en permanence des molécules**, et donc les vecteurs d'énergie, **pour orienter les flux en fonction des besoins**.

Rappelons qu'un vecteur d'énergie est un système en déséquilibre thermodynamique qui tend à le retrouver, et donc à se stabiliser, par une réaction exergonique (libérant de l'énergie). On peut caractériser un vecteur énergétique par :

- **Sa stabilité** (puis-je le conserver dans le temps ?),
- **Sa mobilité** (puis-je le déplacer d'un point A à un point B ?),
- **Sa disponibilité** (puis-je facilement le convertir et l'utiliser à des fins utiles, fonctionnelles ?)

Ces **caractéristiques prédisposent un vecteur à une fonction donnée**. Par exemple, dans le monde technologique, le vecteur électrique est utilisé pour transférer l'énergie car il est très mobile, très instable et très disponible alors que l'essence est bien plus stable mais bien moins mobile et moins disponible, assurant sa capacité à constituer des stocks d'énergie. De la même manière, là où l'ATP est un vecteur très instable et très disponible, le rendant difficilement stockable, le glucose est plus stable autorisant sa transmission et son stockage pour une gestion énergétique compatible avec une collecte intermittente.

³⁸ <http://biochemical-pathways.com/#/map/1>



LA MOLÉCULE DE GLUCOSE, CARREFOUR MÉTABOLIQUE

Les sucres sont au cœur du système énergétique du vivant. Plus précisément, le glucose et dérivés (comme le fructose), sont des vecteurs essentiels dans la gestion de l'énergie et de la matière chez un organisme. Leur caractère central tient au fait que le métabolisme peut utiliser le glucose pour accomplir de multiples fonctions : transmettre de l'énergie, construire des macromolécules structurales, réguler l'activité des protéines, etc.

Le glucose occupe ainsi la place d'une molécule au carrefour de différentes voies métaboliques. Autrement dit, le glucose (comme tous les autres vecteurs d'énergie du monde vivant) n'est pas réservé à des fonctions énergétiques

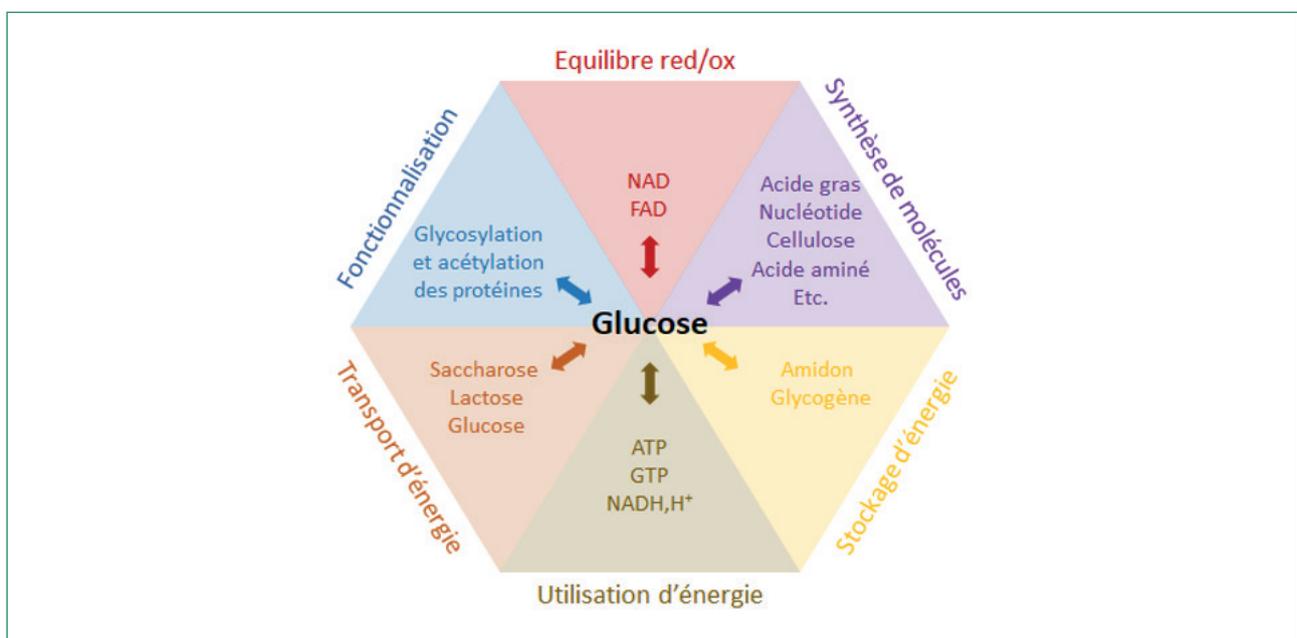


Figure 6 : Illustration du principe du vivant de fonctionnement au sucre. © Ceebios

À travers cette balance métabolique, un composant structurel (ex : cellulose), un actionneur mécanique (ex : protéine musculaire) ou encore un support informationnel (ex : ADN) peuvent tous servir de vecteur énergétique en cas de besoin. Ainsi, si le taux de glucose dans le sang (glycémie) d'un animal chute, un ensemble de processus réactionnels vont transformer d'autres molécules en glucose, pour assurer un retour vers une valeur consigne. C'est aussi la raison pour laquelle nous perdons du poids pendant une longue période de faible apport nutritionnel, les composés structurels sont transformés pour en extraire l'énergie nécessaire à la survie de l'organisme. Ce processus **d'équilibre permanent des constantes physiologiques est nommé homéostasie.**

Sa stabilité et sa petite taille explique que le glucose serve de **vecteur de transmission d'énergie** dans le vivant. Par exemple, il est transporté jusqu'aux muscles chez les animaux pour les alimenter en énergie. Chez les plantes, il est principalement transporté en étant associé à un autre sucre comme le fructose (pour former du saccharose).

En revanche, si le glucose est fondamental pour la transmission et le stockage d'énergie, **il n'est pas utilisé comme une source énergétique directe par une cellule.** On peut expliquer cela par une stabilité trop importante du vecteur. Il est alors **transformé à nouveau**, principalement en ATP, lorsque la cellule (quelle qu'elle soit) a un besoin énergétique.



Le vivant gère l'énergie et la matière de manière conjointe par :

- la synthèse d'un bloc de matière et d'énergie conjoint, unitaire et universel,
- sa capacité à transformer ce bloc universel afin de le fonctionnaliser,
- sa capacité à extraire/utiliser de l'énergie par la désorganisation/organisation de la matière, donc à puiser/stocker de l'énergie dans sa matière structurale, au besoin.

L'ATP, VECTEUR D'UTILISATION DE L'ÉNERGIE

L'ATP est le principal vecteur énergétique final et universel du monde vivant : c'est la « **petite monnaie** » énergétique. La molécule d'ATP, étant relativement instable, **est synthétisée en continu** par l'organisme au sein de compartiments cellulaires spécialisés : les mitochondries. Le rôle clé de ces organites ubiquistes vient de leur capacité à effectuer le processus catabolique de **respiration cellulaire**. Celui-ci permet **l'oxydation du glucose par de l'O₂ conduisant à la formation d'ATP et de CO₂ (cycle de Krebs)**. Cette fonction cruciale conduit les biologistes à comparer les mitochondries à « **des centrales énergétiques de la cellule** ».

Post-respiration, l'ATP est distribuée au sein de la cellule et est utilisée afin de mener à bien les différentes activités cellulaires. Cette utilisation repose sur **la rupture de la liaison du dernier des trois groupement phosphate composant l'ATP**. Cette réaction **d'hydrolyse exergonique** (= qui libère de l'énergie) peut alors être couplée à une autre réaction chimique, elle endergonique (= coûteuse en énergie). Ces couplages et hydrolyses sont régulés par l'action d'enzymes qui catalysent les réactions moléculaires. Ces réactions moléculaires permettent alors de remplir des fonctions comme la locomotion ou la génération de lumière.

Par exemple, la luciférase est une enzyme qui catalyse l'oxydation d'une molécule, la luciférine, qui conduit à une émission de photons et au phénomène de bioluminescence chez les lucioles. Cette réaction est endergonique, et est donc **rendue possible grâce à l'énergie issue de l'hydrolyse de molécule d'ATP**. L'ATP est donc la source d'énergie pour la réaction et le complexe luciférase-luciférine, l'effecteur impliqué.

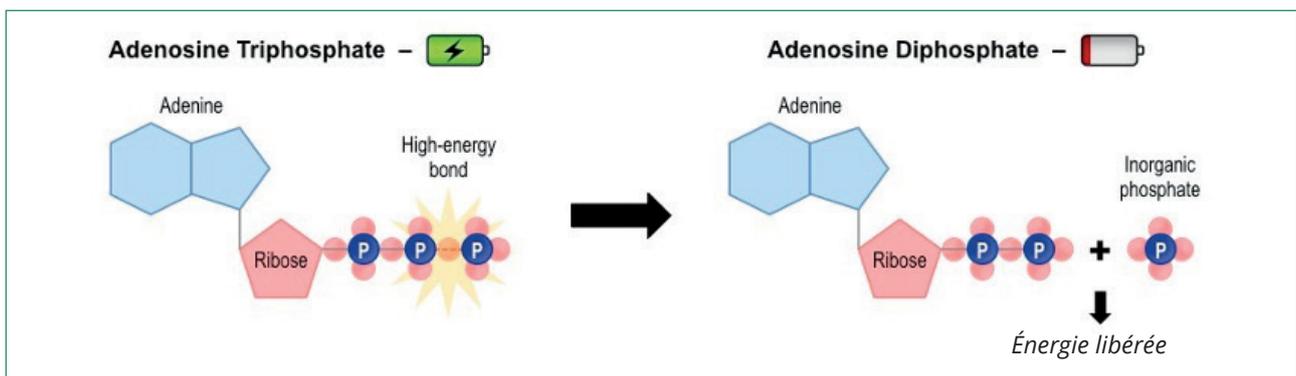


Figure 7. Réaction d'hydrolyse de l'ATP qui permet l'utilisation d'énergie dans le vivant de manière universelle

Il existe de multiples effecteurs, sous la forme de protéines, qui permettent la transformation de ce stock d'énergie chimique en d'autres typologies d'énergie (mécanique, électromagnétique, thermique...) et d'assurer la conversion efficace de l'énergie dans un but fonctionnel. Ces protéines sont souvent caractéristiques de systèmes spécialisés qui seront présentés dans la suite de ce rapport.

L'hydrolyse de l'ATP en ADP est une réaction réversible. En effet, de manière analogue au processus de photosynthèse, la respiration cellulaire se base sur l'activité de l'ATP synthase pour effectuer la réaction inverse et donc la régénération d'ATP à partir d'ADP et de phosphate inorganique. On observe donc une cyclicité pour la gestion de l'ATP et une quantité d'ATP+ADP globalement constante dans un organisme³⁹.

Pour aller plus loin...

L'HYDROLYSE DE L'ATP

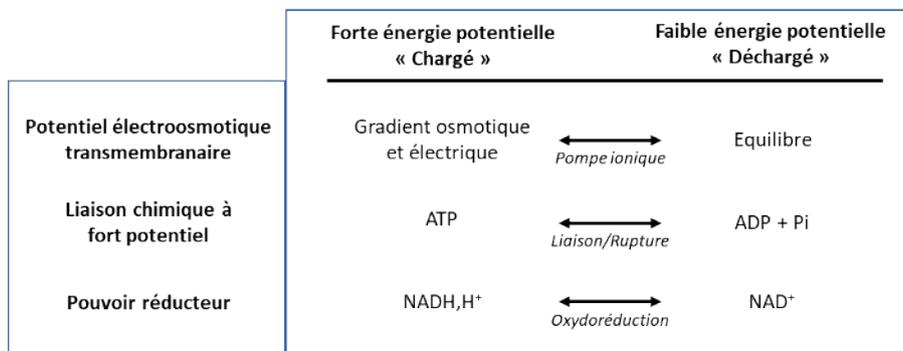
L'ATP n'est pas la forme de stockage long terme d'énergie dans le vivant mais joue le rôle de « monnaie énergétique » ce qui explique que le corps humain n'en contienne à chaque instant qu'environ 250g⁴⁰ mais en consomme et régénère chaque jour de l'ordre de son propre poids⁴¹.

Si l'ATP représente le vecteur principal d'énergie, il en existe deux autres directement disponibles pour la cellule en phase d'utilisation d'énergie : **l'énergie électroosmotique et l'énergie chimique des coenzymes à potentiel réducteur.**

Si l'on retrouve ici **les trois mêmes types d'énergies que pour la photosynthèse**, la respiration est bien un processus catabolique et donc libérant de l'énergie stockée (phase d'utilisation), là où la photosynthèse est un processus anabolique conduisant à la formation de glucose (phase de collecte). La distinction est fondamentale ici : une cellule, même photosynthétique, tire son énergie de l'ATP produite par respiration et non directement de la photosynthèse qui produit elle, du glucose.

Les trois types d'énergie directement utilisables par une cellule

- **l'énergie électroosmotique** (gradient de H⁺ générant une force dite proton-motrice),
- **l'énergie chimique des coenzymes à potentiel réducteur** (ex. NADH, H⁺)
- **l'énergie chimique des liaisons à fort potentiel** (ex. ATP).



Les trois types d'énergie directement utilisables par une cellule, crédit : Ceebios

39 « le vivant fonctionne de manière cyclique », voir (31)

40 University of Leeds. "Nature's batteries' may have helped power early lifeforms." ScienceDaily. ScienceDaily, 25 May 2010. <https://www.sciencedaily.com/releases/2010/05/100525094906.htm>, consulté le 14/01/21

41 Tö Rnroth-Horsefield, S., & Neutze, R. (2008). Opening and closing the metabolite gate (Vol. 105). www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0810654106

Ces trois formes d'énergie sont les seules ayant été identifiées comme capables de fournir une forme de travail (l'hydrolyse de l'ATP, le flux de proton transmembranaire ou l'oxydation du NADPH, H+) par libération d'énergie « utile » à une cellule. Cette énergie disponible permet dans un premier temps de répondre **aux besoins de « base » de la cellule** (métabolisme basal), tel le maintien de son intégrité structurelle, sa réparation, son homéostasie, sa réplication etc., **avant de répondre à un besoin ponctuel** comme le fait de courir chez un animal. Ce métabolisme basal représente chez l'Homme 60 à 75% de la dépense énergétique d'un individu hors exercice⁴².

Comme pour toute conversion énergétique le rendement du couplage de l'hydrolyse de l'ATP avec une autre réaction n'est pas total. Plus précisément, quasiment **60% de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur**⁴³. Celle-ci finira par représenter un flux d'énergie sortant de l'organisme mais elle n'est **pas pour autant totalement perdue**.

En effet, cette chaleur va traverser l'organisme permettant **d'assurer un rôle clé dans la thermorégulation** des animaux à sang chaud, dits homéothermes (par exemple : 37,5°C chez l'humain). Toutes les conversions énergétiques de l'organisme permettent d'assurer une fonction de chauffage critique pour le bon déroulement des réactions métaboliques (la température agit sur l'activité enzymatique notamment). Ces conversions peuvent même être provoquées à cette fin comme c'est le cas pour les frissons et la « chaire de poule ». Certaines structures ont de plus pour **fonction principale la dissipation d'énergie par génération de chaleur**, grâce à la dégradation de tissus adipeux brun.

Si les trois vecteurs qui permettent aux cellules d'utiliser de l'énergie sont précisément identifiés, leurs **disponibilités** par le biais d'apports et leurs **utilisations** en réponse à des besoins sont, elles, profondément discontinues. Pour faire face à ces variations notamment dues à un environnement dynamique (climat, prédation, jour/nuit, etc.), les systèmes vivants possèdent des **stratégies de stockage d'énergie**. Celles-ci reposent essentiellement sur des processus de **stabilisation du glucose par sa polymérisation en vecteurs encore plus stables**.



Les systèmes vivants utilisent tous les mêmes vecteurs énergétiques finaux d'utilisation :

- formés localement (niveau cellulaire), de manière réversible et en continu.
- utilisés par couplage de leur réaction de dégradation (exergonique) avec une réaction couteuse en énergie (endergonique)

42 Catherine B. Lawrence PhD, in Diet and Nutrition in Dementia and Cognitive Decline, 2015

43 Berne & Levy physiology. Berne, Robert M., 1918-2001., Koepfen, Bruce M., Stanton, Bruce A. (6th, updated ed.). Philadelphia, PA: Mosby/Elsevier. 2010.

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

LES MACROMOLÉCULES, MOLÉCULES DE STOCKAGE ÉNERGÉTIQUE

Le mécanisme clé du stockage d'énergie dans le vivant est la **polymérisation**. Ce processus anabolique correspond à **l'assemblage de briques moléculaires**, nommées monomères (ex. le glucose), en **une longue chaîne de molécules appelée polymère** (ex. le glycogène, la cellulose, etc.)⁴⁴. Cet assemblage résulte en de nouveaux vecteurs à plus forte densité énergétique. Par ailleurs, liés les uns aux autres, les monomères de sucres sont beaucoup moins mobiles et ne sont plus **directement accessibles** par les enzymes du catabolisme, les vecteurs sont ainsi stabilisés.

Etant donné leur perte de mobilité, ces vecteurs énergétiques denses s'accumulent avec leur production et sont donc **formés localement** dans des **compartiments spécialisés**. Ils peuvent alors former des structures de stockage comme les grains d'amidon dans les amyloplastides des tubercules végétaux. Outre le stockage de polymères sucrés, on observe également la possible transformation des sucres en un autre type de nutriment encore plus dense, les lipides, permettant aux organismes de constituer **l'essentiel de leurs réserves de longue durée, les graisses**.

Pour aller plus loin...

LIPIDES OU BACTÉRIES ?

Le stockage d'énergie du vivant repose ainsi en majorité sur la famille des lipides. Dans le monde technologique, un dispositif de stockage énergétique analogue serait une batterie à composants organiques, c'est-à-dire sans métal. Moins de 0,4% de l'électricité produite en France est stockée sous cette forme^{45,46}.

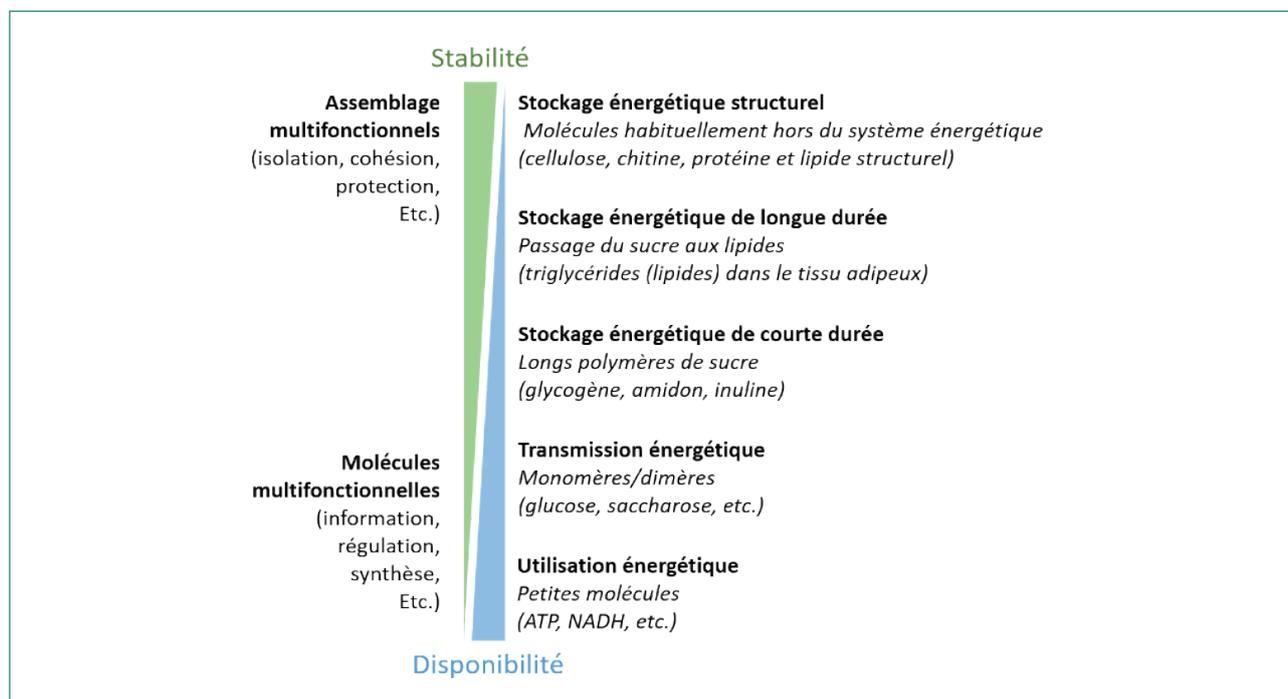


Figure 8. Illustration du principe d'assemblage en chaîne à l'échelle moléculaire pour assurer la stabilité des vecteurs de stockage d'énergie © Ceebios

44 « Le vivant construit de bas en haut » et « le vivant s'assemble en chaînes », voir (1)

45 Données production d'électricité en France, RTE, 2020

46 Renewable Energy Agency, I. (2017). Electricity storage and renewables: costs and markets to 2030

À l'inverse, l'hydrolyse des polymères de sucres, la **dépolymérisation**, rend disponible les monomères qui les constituent. On observe donc un **compromis entre disponibilité et stabilité** de l'énergie stockée, dont la polymérisation est un des leviers majeurs de régulation. Les formes mobiles de vecteurs énergétiques émergent comme un entre-deux, suffisamment stables pour être transportées tout en limitant leur encombrement.

Les réactions métaboliques sont ainsi responsables de la transformation des vecteurs énergétiques vers des voies d'utilisation (la respiration cellulaire), des voies de stockage ou encore d'utilisation (niveau de polymérisation). La question fondamentale qui émerge de cette observation est celle de la régulation de ces voies métaboliques. **Par quels mécanismes les organismes biologiques gèrent-ils leur stock énergétique ?**



Les systèmes vivants gèrent notamment leurs vecteurs énergétiques par :

- des réactions de polymérisation et dépolymérisation qui permettent respectivement la stabilisation ou la disponibilité des vecteurs énergétiques,
- l'utilisation des vecteurs les plus denses comme blocs de construction,
- leur fonctionnalisation réversible via leur transformation et l'évolution de leur organisation architecturale.

LES MÉCANISMES DE RÉGULATION

Trois principaux leviers assurent l'orientation des vecteurs énergétiques vers les différentes voies de stockage, transmission ou disponibilité

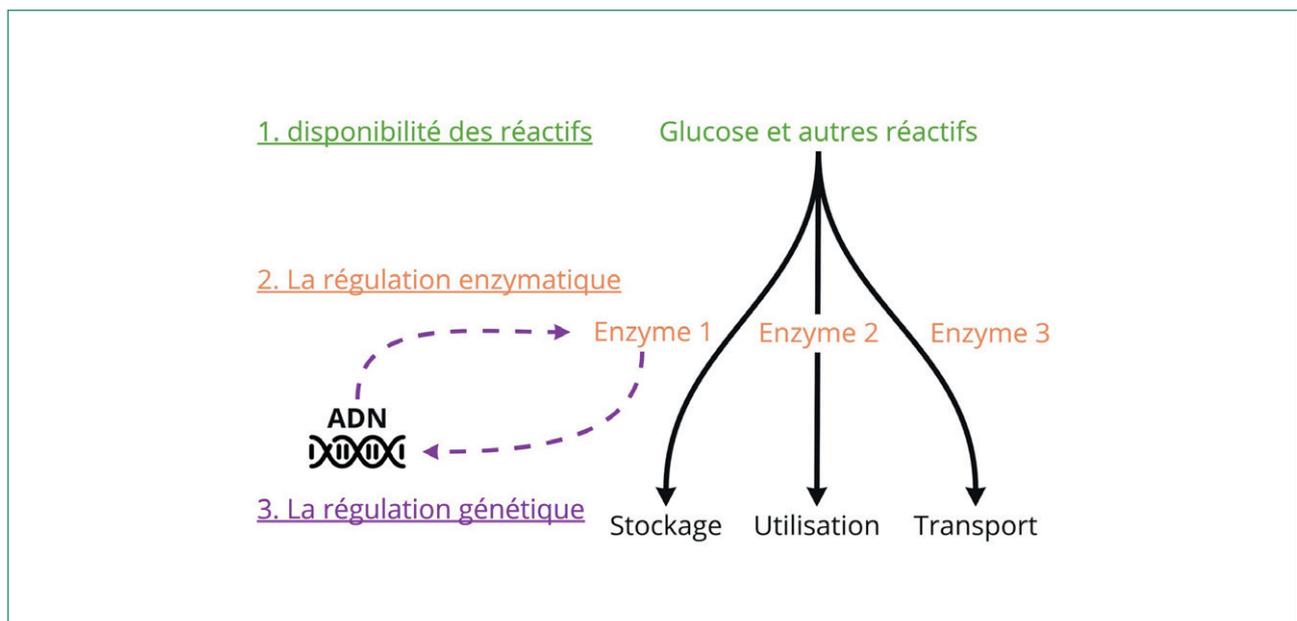


Figure 9. Illustration des différents niveaux de régulation du métabolisme © Ceebios

- **La disponibilité des réactifs** : une chute dans la quantité de réactifs disponibles conduit mécaniquement au ralentissement des réactions associées. La disponibilité de l'ensemble des molécules impliquées dans ces chaînes réactionnelles, tels que l'O₂ ou le CO₂, impactent ainsi fortement ces mécanismes de régulation (ex. passage à l'oxy-

dation de glucose par fermentation anaérobie en absence d'O₂).

■ **La régulation enzymatique** : les réactions chimiques au sein d'une cellule sont d'une rapidité tout à fait remarquable lorsque comparées aux mêmes réactions effectuées dans un tube à essai. Ce sont les enzymes qui sont à l'origine de ce phénomène. Par leur fixation spécifique aux réactifs, ces protéines sont capables de réduire l'énergie nécessaire à la réalisation d'une réaction chimique et ce sans altérer leur propre intégrité. On parlera de catalyse enzymatique. Telles des interrupteurs, les enzymes régulatrices peuvent être activées ou désactivées, assurant alors l'aiguillage métabolique.

■ **La régulation génétique** : comme toutes protéines, les enzymes sont synthétisées par la traduction de séquences génétiques spécifiques qui codent chacune d'entre elles. L'action de facteurs inhibiteurs ou activateur de la synthèse de ces enzymes représente alors un moyen durable de réguler le métabolisme. Il est à noter que ces facteurs inhibiteurs/activateur dépendent parfois des produits de la réaction ou des enzymes elles-mêmes, on parlera alors de rétrocontrôle négatif/positif.

À l'échelle de la cellule, l'orientation des réactions de conversion des vecteurs en fonction des besoins énergétiques repose donc sur l'évolution de l'arsenal enzymatique et des concentrations de réactifs. En revanche, à l'échelle de plusieurs cellules, voire d'un organisme complexe comme un animal ou un arbre, la régulation des flux énergétiques repose sur le transport d'énergie, notamment depuis les systèmes biologiques de collecte, vers ceux de stockage ou d'utilisation importante.

Associés aux types de vecteurs énergétiques soumis à l'action du métabolisme, les systèmes biologiques spécialisés dans la gestion des flux et des stocks d'énergie forment ainsi un second levier de régulation énergétique au sein des organismes pluricellulaires.

À l'échelle de la cellule, le flux énergétique est orienté par :

- des processus de transformation des vecteurs énergétiques,
- la modulation directe des processus de transformation par les caractéristiques des effecteurs moléculaires de transformation,
- la modulation indirecte des processus de transformation par activation, répression des effecteurs moléculaires ou de leur synthèse.



LES SYSTÈMES BIOLOGIQUES SPÉCIALISÉS DANS LA GESTION DE L'ÉNERGIE D'UN ORGANISME

Assemblées en tissus puis en organes, les cellules représentent les blocs unitaires composant les organismes pluricellulaires. Si l'on peut analyser une partie de la gestion de l'énergie à l'échelle de la cellule, celle-ci est assurée à de multiples échelles et notamment à l'échelle de systèmes biologiques spécialisés (vaisseaux, organes, tissus, etc.).

SYSTÈME DE DISTRIBUTION D'ÉNERGIE

À l'échelle d'un organisme, le système de distribution énergétique correspond essentiellement au système circulatoire. En effet, 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 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. Ainsi, le nombre de segments diminue avec l'augmentation de leur diamètre et de leur longueur. Cette structure spécifique sélectionnée au cours de l'évolution conduit à l'augmentation de la surface totale de l'interface d'échange et permet la multiplication des points locaux d'apports énergétiques. L'organisme est donc « irrigué » par le système circulatoire qui véhicule les vecteurs énergétiques.

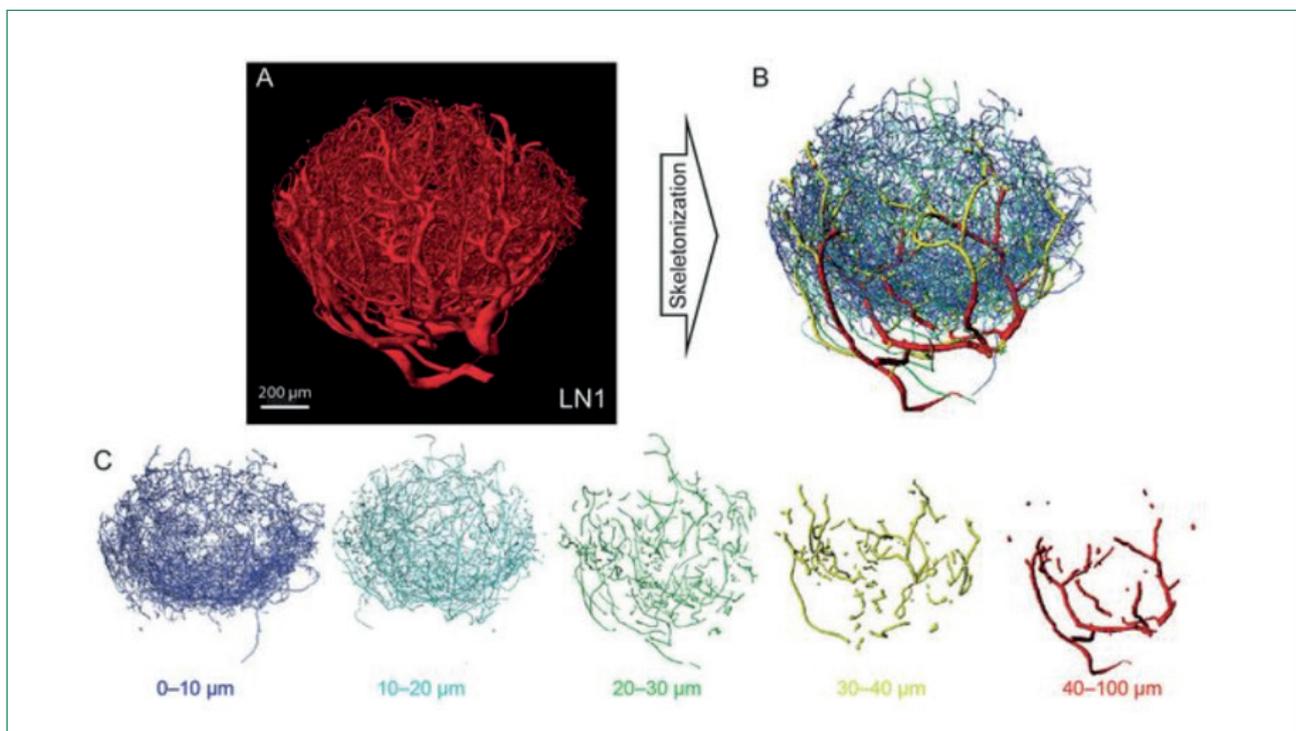


Figure 10. Répartition du système vasculaire de l'organe lymphatique chez la souris*

<> Jafarnejad, Mohammad & Ismail, A. & Duarte, Delfim & Vyas, Cian & Ghahramani, A. & Zawieja, David & Celso, Cristina & Poologasundarampillai, Gowsihan & Moore, J. (2019). Quantification of the Whole Lymph Node Vasculature Based on Tomography of the Vessel Corrosion Casts. Scientific Reports. 9. 10.1038/s41598-019-49055-7.

Les processus de mise en mouvement de ces fluides dépendent notamment des règnes d'organisme considérés. Ainsi, les animaux, qui ont des muscles, vont utiliser une partie de l'énergie chimique circulante pour mécaniquement pomper le liquide circulant. Chez les vertébrés, contrairement aux insectes, on distingue une pompe principale (le cœur) puis une action de muscles dans la paroi des vaisseaux tout le long du réseau (muscles lisses des vaisseaux) afin de compenser la perte de charge et d'orienter les flux.

Une autre partie de la solution réside dans un ensemble de mécanismes passifs. Chez les vertébrés, certains vaisseaux sont pourvus de valves anti-reflux et sont très élastiques afin d'emmagasiner puis de restituer l'énergie mécanique due à la pression sanguine. Chez les végétaux, qui n'ont pas de muscles, le système est entièrement passif et dépend du phénomène d'« évapotranspiration ». En effet, c'est l'évaporation des molécules d'eau au niveau des feuilles qui va créer une dépression « tirant » la colonne de molécules d'eau liées de la sève, depuis les racines et l'eau du sol jusqu'aux feuilles, fonctionnant comme une véritable pompe hydraulique solaire.

Pour aller plus loin...

LE SYSTÈME CARDIO-VASCULAIRE, UN MONDE MICROSCOPIQUE

Les segments du système vasculaire humain mis bout à bout s'étendent sur 100.000 km et 80% d'entre eux sont des capillaires de diamètre microscopique, approvisionnant chaque mm³ des tissus.

Par ailleurs, chez les végétaux, les flux pauvres et riches en énergie sont strictement compartimentés. On distinguera ainsi le xylème, vaisseaux transportant la sève brute pauvre en énergie depuis les racines vers les feuilles, et le phloème, vaisseaux transportant la sève élaborée, riche en énergie, depuis les feuilles vers les organes de stockage du tronc et des racines. Outre ces flux dirigés d'énergie chimique, on observe également des flux plus diffus notamment ceux liés à l'énergie thermique.

Deux types de transferts de chaleur simultanés sont observés :

- le transfert actif, associé au liquide circuloire,
- le transfert passif, dû aux phénomènes physiques de radiation, de changement d'état, de convection et de conduction thermique.

Si l'on comprend aisément le principe de distribution de l'énergie thermique par le biais d'un fluide (fluide caloripporteur), **le vivant a également mis en place un ensemble de stratégies visant à réguler les flux thermiques passifs** comme l'immobilisation de l'eau pour prévenir la convection (ex. aloé vera), l'isolation de l'organisme par des couches de graisse (ex. baleine bleue) et de fourrure (ex. ours polaire) pour prévenir la conduction, ou encore la régulation de la radiation infrarouge en cas d'excès de chaleur (ex. papillon morpho). Comment précédemment explicité **les flux de chaleur sont donc finement régulés** pour être limités ou favorisés (selon les contraintes thermiques du milieu). Ces phénomènes relèvent du mécanisme physiologique **d'homéostasie thermique**.

En synthèse, les flux énergétiques au sein des systèmes biologiques :

- peuvent être actifs, basés sur des muscles pompant un fluide circulant dans un réseau ramifié, ou passifs, basés sur une diffusion finement régulée,
- maintiennent un apport minimal dans l'ensemble de l'organisme,
- sont plus spécifiquement dirigés vers les systèmes essentiels et énergivores,
- peuvent être cloisonnés selon leur finalité pour faire émerger une fonctionnalité.



SYSTÈMES BIOLOGIQUES SPÉCIALISÉS DANS LE STOCKAGE ET L'UTILISATION D'ÉNERGIE

Outre les systèmes ayant dans leur fonction l'orientation des flux énergétiques, un certain nombre de structures ont également été sélectionnées au cours de l'évolution pour leur capacité à stocker ou utiliser de l'énergie.

Ainsi, 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 demeurant dans la circulation sera alors 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 accumulation des vecteurs énergétiques et 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.

Pour aller plus loin...

DENSITÉ ÉNERGÉTIQUE : VIVANT VS TECHNOLOGIE

En comparant et approximant les ordres de grandeur des densités énergétiques des principaux vecteurs de stockage biologique, les lipides (densité énergétique de 37kcal/g, soit 10 kWh/kg) et technologique, le STEP (densité énergétique de 1 Wh/kg d'eau), on observe que la densité énergétique du premier est 10 000 fois plus importante que celle du second^{47,48,49}.

En référence aux actionneurs technologiques, on appellera actionneurs biologiques les systèmes biologiques pouvant transformer de l'énergie pour fournir un travail. Diverses fonctions émergent de ces structures qui ont pour dénominateur commun une **utilisation frugale et efficiente de l'énergie**. Ces caractéristiques reposent notamment sur le métabolisme à l'échelle cellulaire, et donc sur l'arsenal enzymatique précédemment évoqué.

47 <https://www.encyclopedie-energie.org/stockage-hydraulique-atouts-et-contraintes/>, consulté en décembre 2020

48 Food energy - methods of analysis and conversion factors, Rome, food and agriculture organization of the united nations, 2003 (ISBN 92-5-105014-7) (55) Koohi-Fayegh, S.,

49 Koohi-Fayegh, S., & Rosen, M. A. (2020). A review of energy storage types, applications and recent developments. In Journal of Energy Storage (Vol. 27). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101047>

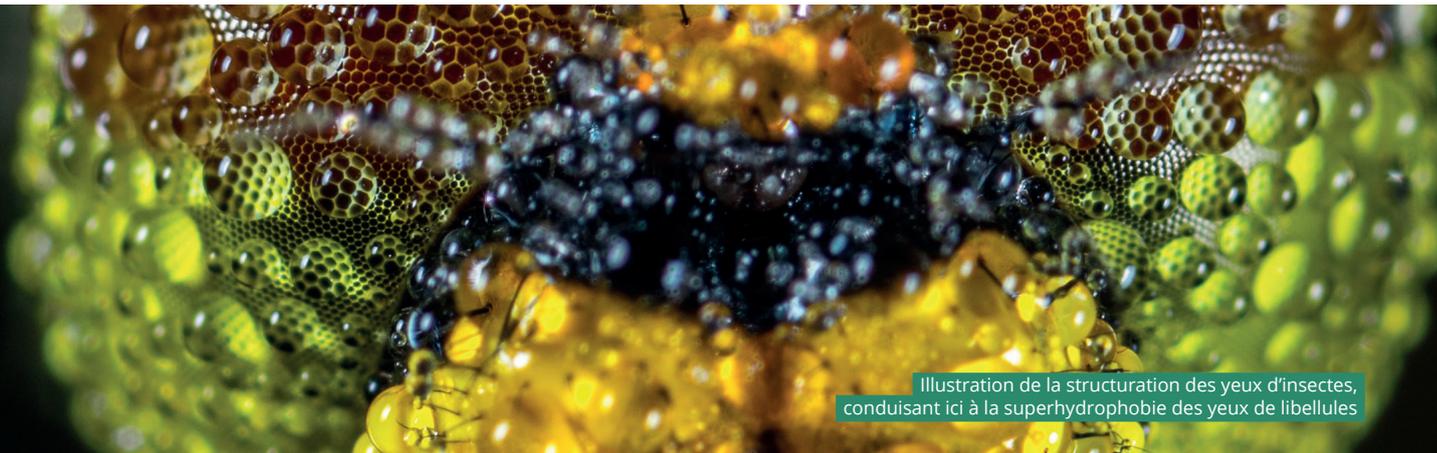


Illustration de la structuration des yeux d'insectes, conduisant ici à la superhydrophobie des yeux de libellules

Combiné à l'échelle des tissus, ces conversions d'énergie chimique en d'autres typologies d'énergie (mécanique, électromagnétique...) assurent la réalisation des fonctions biologiques telle que :



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 --> travail mécanique), le son (d'énergie chimique --> énergie mécanique, onde sonore), la lumière par bioluminescence notamment (énergie chimique --> 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.

Pour aller plus loin...

XXX

Avec 2300 kcal/j (apport recommandé) sur 80 ans, un humain aura consommé et dissipé 270 GJ, ce qui équivaut à une puissance moyenne de l'ordre de la centaine de watt, soit l'équivalent de la puissance d'un appareil électroménager.

On notera que toutes les cellules d'un organisme nécessitent de l'énergie pour survivre et donc que l'organisme utilise constamment de l'énergie. On soulignera de plus que **tous ces systèmes demeurent multifonctionnels**, la notion de « spécialisation » représente la **variation de leur équilibre fonctionnel** au regard des autres systèmes. 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 comme l'isolation ou la protection mécanique nécessitant elles aussi des conversions énergétiques (figure).

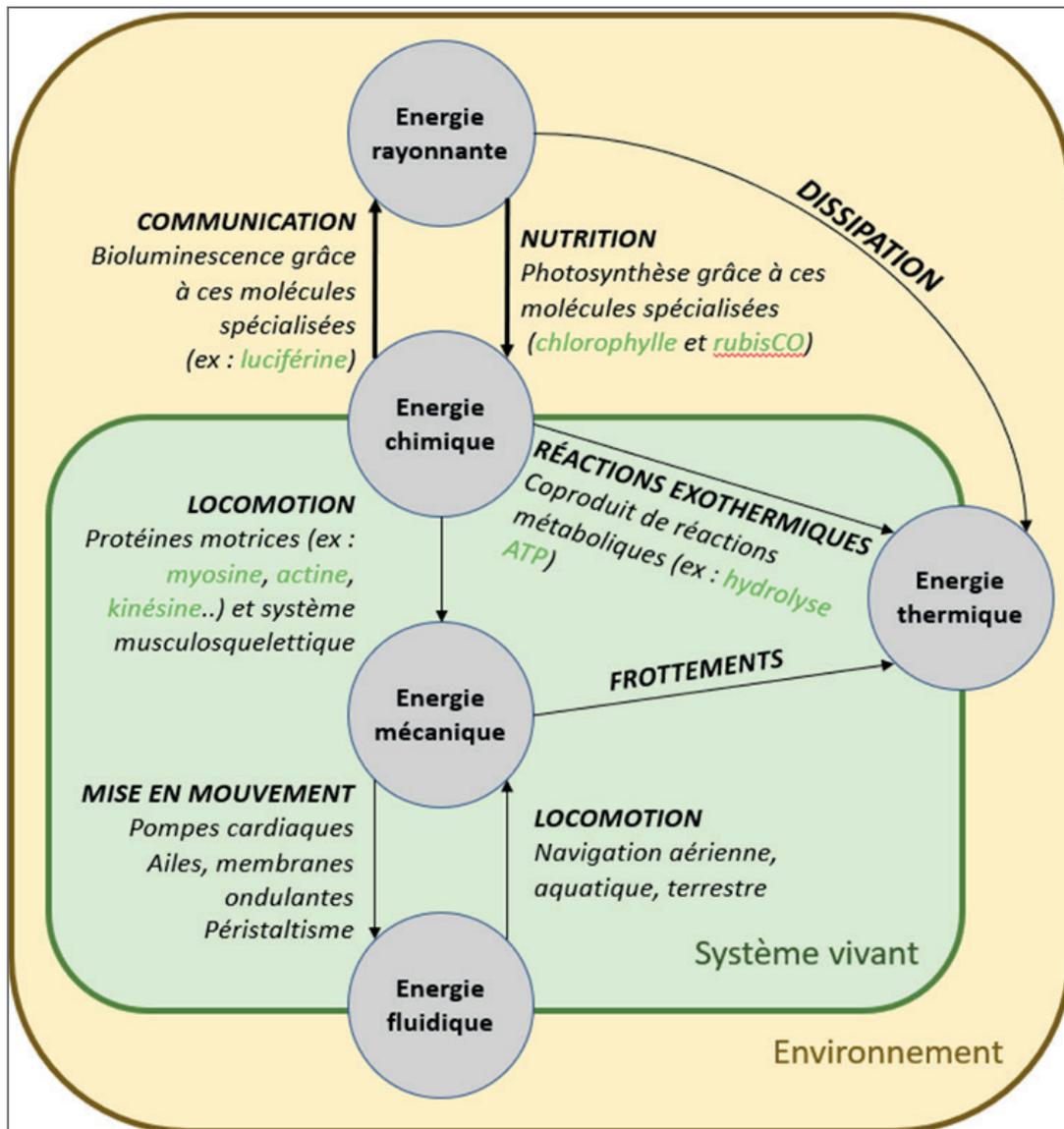


Figure 11. Fonctions biologiques et formats d'énergie

Les organismes biologiques se structurent donc autour de sous-systèmes concentrant des activités propres dans leur rapport à l'énergie. Cette structure polarisée et connectée par un réseau nécessite une régulation dans le temps et à l'échelle de l'organisme. Celle-ci est étroitement liée à la notion d'information et de communication intra-organisme. Il s'agit d'associer à l'architecture présentée précédemment, des systèmes de prises de décision assurant la survie de l'organisme dans son environnement dynamique. Pour cela il apparaît nécessaire aux organismes de pouvoir mesurer l'énergie interne dont ils disposent afin de pouvoir, le cas échéant, anticiper ou répondre à un stress énergétique.



Les systèmes de conversion énergétique au sein des organismes :

- sont composés de cellules associées et structurées en tissus permettant une synergie des conversions énergétiques, et donc de l'activité, à l'échelle des organes.
- possèdent des équilibres fonctionnels variables conduisant à leur « spécialisation »,
- assurent des conversions d'une grande diversité.

ÉVALUATION DE L'ÉNERGIE DISPONIBLE À UN INSTANT ET RÉPONSE AU MANQUE D'ÉNERGIE

L'évaluation de l'énergie disponible apparaît centrale afin de moduler les flux entrant/sortant d'énergie et d'effectuer une gestion des stocks efficace. Celle-ci se fait de deux manières, **en mesurant directement le taux de sucre stocké**, le glycogène, l'amidon, etc., **ou libre**, le glucose, ou **en mesurant indirectement la quantité de réserve disponible sous forme lipidique**.

La mesure des réserves de sucres se fait à la fois à l'**échelle locale**, notamment au niveau des cellules photosynthétiques chez les végétaux, 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.

Chez les animaux, le volume du tissu adipeux **est mesuré par le biais de molécules sécrétées par celui-ci**, notamment la leptine et l'insuline. La concentration sanguine de ces molécules est alors proportionnelle à la quantité de réserves lipidiques de l'organisme. C'est le cerveau (hypothalamus et tractus solitaire) qui perçoit ces molécules et entraîne **l'ajustement global des flux pour maintenir la balance énergétique**.

De part un ensemble de signaux et de senseurs moléculaires, les organismes peuvent ainsi percevoir leur situation énergétique en temps réel et assurer leur homéostasie énergétique, notamment par la régulation des entrées/sorties d'énergie et la mobilisation de leur réserves en cas de stress énergétique.

Celui-ci 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. En effet, que l'on considère le cycle quotidien d'ensoleillement pour l'énergie électromagnétique ou le cycle saisonniers pour l'énergie chimique et thermique, l'énergie disponible varie au cours du temps.

Dans les deux cas, **le vivant a développé des mécanismes lui permettant de répondre au stress énergétique**. Lorsque celui-ci est ponctuel, la balance énergétique est essentiellement rétablie par **l'augmentation des flux entrants** (qu'invite la sensation de faim) quand cela est possible. Lorsque cela est impossible, l'organisme **mobilise l'énergie circulante** (ATP et glucose circulant) **et les réserves** (stock de lipides, glycogène, amidon, etc.).

Quand la contrainte se prolonge, l'organisme **peut faire intervenir des ressources métaboliques alternatives** pour assurer sa survie, on observera ainsi la dégradation de protéines musculaires au cours du vol sans escale des oiseaux migrateurs. Il peut également **s'acclimater au cours du temps pour réduire le besoin énergétique**, notamment via une modulation de l'activité comme chez les marathoniens.

Lorsque **le stress énergétique est anticipable**, la mobilisation de réserve est associée à un ensemble **d'adaptations comportementales et physiologiques** pouvant conduire les organismes à suivre une cyclicité similaire à celle de l'intermittence des ressources. On parlera de cycle circadien pour un cycle d'une journée et de cycle annuel ou saisonnier pour une année.

Si ce type d'adaptation est observable à l'**échelle de l'individu**, il l'est également à l'échelle des générations. On peut ainsi souligner que de nombreuses espèces ont calqué leur cycle de développement sur une année afin **de faire correspondre les phases couteuses en énergie avec les saisons les plus favorables**.

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 3. Stratégies de réponse aux stress énergétiques
© Ceebios



Les réponses des systèmes vivants aux stress énergétiques sont multiples :

- augmentation de l'énergie disponible (collecte et/ou mobilisation du stock),
- réduction du besoin par l'acclimatation et la baisse d'activité,
- synchronisation des périodes de forts besoins et/ou d'investissements énergétiques avec les périodes de fortes disponibilités, potentielle segmentation de processus.

L'évaluation du stock énergétique et les stratégies de réponse face aux stress sont incarnées par des prises de décision conduisant à la régulation permanente des flux d'énergie à l'échelle de l'organisme.

RÉGULATION DE LA RÉPARTITION DE L'ÉNERGIE AU SEIN D'UN ORGANISME

La régulation de la répartition énergétique est effectuée par un processus multifactoriel dirigé par les systèmes de communication nerveux, humoral et hormonal selon les organismes⁵⁰. De part son rôle de réseau de transport d'énergie, le système circulatoire, est au cœur du mécanisme de régulation qui :

- 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 consommée, seulement 8% pour le cœur.
- 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 augmentation ou 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 soumis 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 défense.

La régulation du flux actif d'énergie au sein des systèmes vivants :

- est permise par la synergie des systèmes d'information et de transmission,
- est d'abord effectuée localement avant une réponse globale,
- repose sur des réponses rapides prédéfinies en cas de mise en danger du système,
- utilise notamment la taille des canaux de transmission, la concentration de vecteurs énergétiques et le débit des flux de vecteurs.



Après avoir étudié le rapport entre le vivant et l'énergie à l'échelle des cellules, des systèmes spécialisés et des organismes, la dernière partie de ce chapitre 2 vise une prise de recul en considérant les flux d'énergie à l'échelle des écosystèmes.

⁵⁰ « le vivant s'organise avec l'information », voir (31)

LES FLUX ÉCOSYSTÉMIQUES DE MATIÈRE ET D'ÉNERGIE

Chaque écosystème est composé d'un ensemble d'êtres vivants, la biocénose, et d'un environnement non vivant, le biotope. Le flux permanent d'énergie depuis sa source minérale vers sa dissipation sous forme de chaleur repose alors sur des équilibres intrinsèques à la mise en place d'une communauté d'organismes interdépendants. Au sein de ce groupe d'organismes, liés par leurs besoins mutuels en matière et en énergie, différents types de relation émergent.

LES RELATIONS ÉCOSYSTÉMIQUES

La relation la plus connue est celle de la **prédation**. Elle conduit le stock de matière organique composant les êtres vivants à être transportée au sein de l'écosystème par le biais des chaînes alimentaires, qui forment alors un réseau **trophique**. Les producteurs primaires sont consommés par les consommateurs primaires et ainsi de suite jusqu'aux décomposeurs, tel qu'évoqué précédemment. On notera que les carnivores (consommateur secondaire ou plus) se consomment peu entre eux.

Les interactions entre organismes peuvent également s'incarner par des relations à bénéfice réciproque de partage des ressources entre organismes, les **symbioses**. La **symbiose mycorhizienne** en est un exemple. Les arbres, producteurs primaires, fournissent aux champignons du sol de la matière organique tandis que ces derniers les approvisionnent en eau et en nutriments (nécessaires à la photosynthèse). Ces symbioses peuvent s'étendre sur plusieurs hectares, et relier une multitude d'organismes pour former un réseau transmettant de la matière, de l'énergie et de l'information.

Un autre exemple de symbiose énergétique est celle des animaux avec leur **microbiote digestif**. En effet, la nutrition des animaux repose sur la capacité de certaines bactéries du système digestif à dégrader les aliments au cours de leur trajet dans les différents organes (estomac, intestin, panse, etc.). En particulier, les ruminants possèdent un organe dédié à cette dégradation par les microorganismes, le rumen. Cette spécificité est due au fait qu'ils se nourrissent de matière riche en cellulose (herbe, foin, etc.) qui est un vecteur énergétique de grande stabilité et donc particulièrement difficile à dégrader en vecteurs énergétiques disponibles.

De manière plus générale, quand une source énergétique abondante est la même pour différents organismes, il est fréquent qu'une relation de compétition s'instaure. En revanche quand la source se raréfie, des relations de coopération sont préférées, permettant l'optimisation du bénéfice mutuel moyen.⁵¹



À l'échelle des organismes composant l'écosystème :

- les systèmes de collecte d'énergie sont les organismes autotrophes,
- tous les organismes d'un écosystème sont des convertisseurs d'énergie et donc la dissipent,
- chacun présente des structures de stockage propres,
- le transport d'énergie repose sur les relations écosystémiques, notamment les relations de proie-prédateur, de symbiose ou encore de parasitisme.

⁵¹ Exemple : Liu, J., Martinez-Corral, R., Prindle, A., Lee, D. Y. D., Larkin, J., Gabalda-Sagarra, M., Garcia-Ojalvo, J., & Süel, G. M. (2017). Coupling between distant biofilms and emergence of nutrient time-sharing. *Science*, 356(6338), 638–642. <https://doi.org/10.1126/science.aah4204>

LA DYNAMIQUE DU VIVANT

La résultante de ces relations entre les organismes est une profonde dynamique de flux. Les écosystèmes sont alimentés par un flux d'énergie entrant, le soleil. L'énergie est ainsi temporairement stockée par les producteurs primaires au sein de vecteurs organiques partie du flux de matière. L'énergie est alors transmise sous la forme de ces vecteurs au sein des écosystèmes permettant à chaque organisme d'accéder à une ressource énergétique. En répondant à leurs besoins, les organismes utilisent et dissipent cette énergie stockée pour former un flux énergétique sortant. Le monde vivant n'est donc qu'une forme temporaire, une sorte de « nœud », dans ces flux d'énergie et de matière.

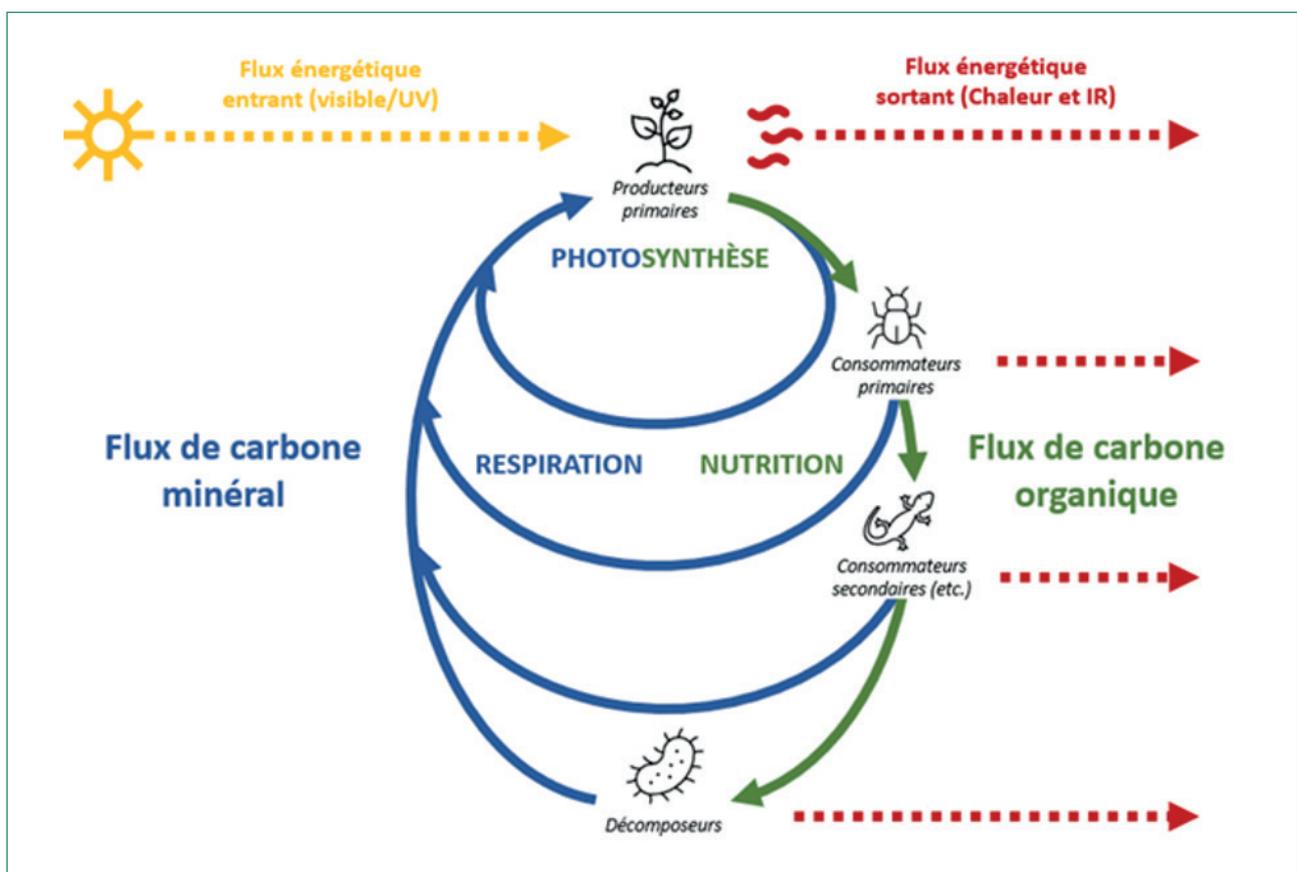


Figure 12 : Principe d'interconnexion et d'interdépendance à travers l'exemple des relations trophiques à l'échelle d'un écosystème © Ceebios

Ainsi l'énergie disponible dans le monde vivant est limitée par la quantité de rayonnement solaire capté et de matière organique synthétisée par les producteurs primaires.

Cependant, puisque l'énergie est notamment transmise par le biais de relations trophiques, on observe qu'une population donnée est plus grande que celle qui la consomme. Dans le cas contraire, les populations finissent par disparaître ou évoluer.

Observé à tous les étages de la pyramide trophique, ce phénomène est appelé loi de Lindeman. Celle-ci stipule que dans un écosystème donné, un facteur d'environ 10 sépare les flux d'énergie stockée sous forme de biomasse par des organismes appartenant à deux niveaux successifs de la pyramide⁵².

On comprend que la règle générique ici exposée s'incarne par l'évolution synergique des densités de populations au cours du temps. Les écosystèmes autorégulent ainsi le nombre des différents types de systèmes énergétiques en fonction du « coût » énergétique cumulé, et donc en fonction de leur « distance trophique » par rapport à la source d'énergie primaire.

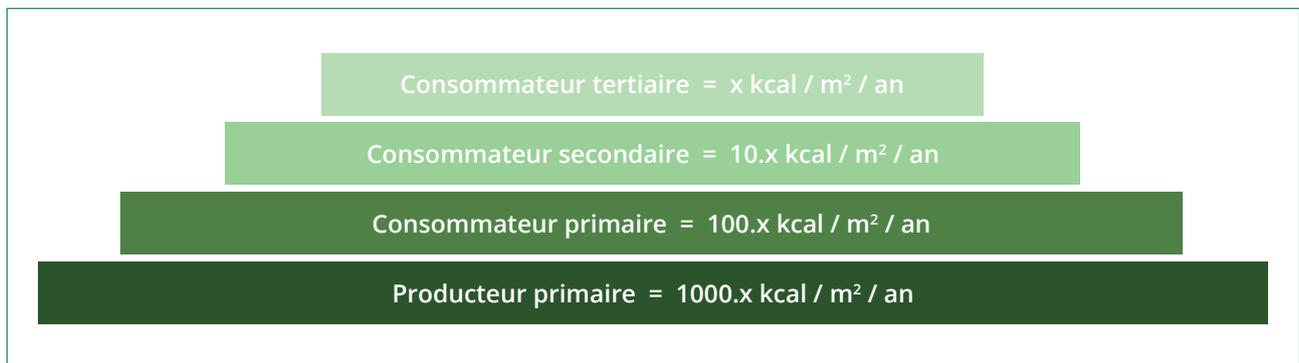


Figure 13 : Illustration du principe de construction de bas en haut à travers l'exemple des pyramides trophiques et de la loi de Lindemann

Le monde vivant est dans un état stable de non équilibre. Il est durable tant que les autotrophes captent une source considérée dans notre référentiel comme infinie : le Soleil. Cette dynamique biologique est durable car le monde vivant est alimenté par un flux entrant sur Terre qui limite sa taille. Le stock terrestre est fini et donc épuisable, sans énergie venant de l'extérieur de la Terre, l'activité de la planète serait voué à disparaître à hauteur de ses stocks.

Les réseaux énergétiques écosystémiques :



- sont basés sur des flux de matière et d'énergie régulés conjointement
- limitent au maximum les intermédiaires entre la source d'énergie et les systèmes d'utilisation.
- assurent qu'à chaque nouvel intermédiaire énergétique entre la source et l'utilisation, un rapport significatif de la densité des vecteurs successifs est observé pour assurer la stabilité de la pyramide énergétique.

⁵² Lindeman, R. L. (1942). The trophic-dynamic aspect of ecology. Ecology, 23(4), 399-417. ISO 690

GRANDES TENDANCES DE LA GESTION ÉNERGÉTIQUE PAR LE VIVANT

Cette description globale du rapport entre le monde vivant et l'énergie nous conduit à identifier un ensemble d'axes structurants généraux, abstraits, que l'on peut observer par le prisme des principes du vivants.

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

Face à ces observations, le biomimétisme nous invite à comparer le fonctionnement des systèmes énergétiques technologiques avec les systèmes biologiques pour identifier des leviers d'innovation potentiels. Cette synthèse comparative traitera alors séparément les 4 fonctions principales précédemment énoncées, la collecte, la transmission, le stockage et l'utilisation d'énergie avant de proposer une conclusion globale sur les préconisations qui en émergent.

SYNTHÈSES COMPARATIVES

.01

LA COLLECTE D'ÉNERGIE

▼ La source principale d'énergie

Comme explicité dans les parties précédentes, le monde du vivant extrait principalement son énergie du rayonnement électromagnétique solaire (issue de réactions de fusion nucléaire) là où le monde technologique extrait principalement son énergie des molécules organiques (pétrole, charbon, gaz et biomasse) ou de la fission des atomes (énergie nucléaire). Ce constat conduit à des systèmes de gestions d'énergie basés sur des flux intermittents pour le vivant ou des stocks finis pour la technologie, modifiant profondément la manière d'appréhender l'énergie.

▼ Les sources secondaires d'énergie

Le monde du vivant, comme le monde technologique, est capable d'utiliser un grand nombre de sources énergétiques. La Vie possède ainsi une résilience remarquable en cas de perturbations majeures. Si de nombreuses sources apparaissent communes aux deux mondes, leur représentation est variable. Le solaire prend par exemple une place faible dans la collecte d'énergie pour les systèmes humains, et à l'inverse l'énergie chimiques de vecteurs biologiques fossilisés est très peu utilisée par les systèmes vivants.

▼ Le cas des sources d'énergie cinétique

Un avantage certain au monde technologique est sa capacité à collecter les énergies cinétiques de l'eau et du vent qui sont aujourd'hui au cœur des réflexions sur la transition énergétique. Elles permettent de valoriser des énergies dérivées du rayonnement solaire (mise en mouvement des fluides par la variation de température et donc de densité) et de la gravité (mise en mouvement des fluides par l'attraction des corps de forte masse). Aujourd'hui, l'énergie cinétique n'a pas été identifiée comme une source d'énergie directement utilisée par le monde vivant. Le biomimétisme nous apporte en revanche un ensemble de stratégies quant à la gestion des vecteurs fluides, de part leur impact sur la mobilité, les frottements, l'érosion, etc. aux interfaces des systèmes. Les difficultés actuelles émergent notamment du fait qu'il s'agisse d'une gestion de flux et non de stock, modèle qui, comme explicité précédemment, diffère de notre rapport principal à l'énergie.

▼ Les processus de conversion et les vecteurs associés à la collecte

Dans le cas d'une gestion de stock, le processus de collecte est centré sur des vecteurs stables sous forme de matière stockant l'énergie. Il s'agit alors d'extraire et de rassembler une quantité de matière (barils de pétrole) représentant un potentiel énergétique. Dans le cas d'une gestion de flux, le processus de collecte est centré sur la conversion de l'énergie depuis un vecteur très instable, et dont l'utilisation directe est limitée, vers un vecteur souvent plus stable, à l'utilisation directe plus large voire universelle (ATP et glucose).

Face à cette distinction, on comprend que si le monde du vivant disponibilise de l'énergie par la formation de vecteurs stables, la technologie génère peu de vecteurs stables et vise plutôt leur extraction puis leur déstabilisation lors de l'utilisation. En cela les processus technologiques sont largement dépendants des processus biologiques. Si l'on applique la structure d'une chaîne alimentaire aux systèmes technologiques de collecte, ceux-ci sont principalement consommateurs et non des producteurs primaires (à l'exception des systèmes solaires, géothermiques, éoliens et hydroliens).

▼ La forme principale de stockage d'énergie

Dans le monde vivant, le stock d'énergie est principalement représenté par des réserves de matières carbonées sous forme de glucides et de lipides. Dans le monde technologique, le stock d'énergie est principalement représenté par les technologies de pompage STEP⁵³. On observe ici une inversion des modes de gestion de l'énergie, le monde technologique met en place une réserve de flux, par conversion d'une énergie électrique en énergie potentielle de pesanteur, alors que le vivant utilise une réserve de stock par la conversion de l'ATP en glucides puis en lipides, et donc en énergie potentielle chimique. Si l'on effectue une analogie avec le monde technologique, il s'agirait de convertir de l'électricité en un équivalent pétrole pour stocker l'énergie. Ce changement de typologie de gestion d'énergie pose le problème de la mobilité des formes de stockage. Si une réserve de stock est mobile (on peut transporter du sucre, du bois ou du pétrole), une réserve de flux, si elle représente une forte puissance, est difficilement transportable (un lac ou un flux d'eau sont peu mobiles) et est souvent beaucoup plus diffuse, et donc moins dense. Cette problématique est d'autant plus forte à l'heure des objets connectés et des systèmes de mobilité individuelle qui nécessitent des réserves énergétiques pour fonctionner. Des formes secondaires de stockage d'énergie sont alors utilisées.

▼ Les formes secondaires de stockage d'énergie

Le monde technologique présente ainsi des formes de stockage très variées et basées sur une diversité de formes d'énergie (batteries et énergie électrochimique, volants inertiels et énergie cinétique, etc.). Ils assurent ainsi une fonction de stockage énergétique tout en répondant à une contraintes de densité énergétique et de mobilité. le monde du vivant présente un stockage sous une forme unique, l'énergie chimique. Les vecteurs de stockage varient uniquement de part leur composition et leur niveau de polymérisation qui conduisent à des variations de leur stabilité. Un ensemble de composés aux fonctions principalement structurales et donc particulièrement stables peuvent ainsi être utilisés pour fournir de l'énergie en cas de nécessité, comme c'est le cas pour les protéines. Si l'on effectue une analogie avec le monde technologique, il s'agirait d'utiliser un matériau de construction comme forme de stockage d'énergie.

▼ Cas du stockage de vecteurs énergétiques de collecte

Dans la mesure où le monde technologique se base sur une collecte d'énergie de stock, les réserves peuvent également se faire par le stockage de vecteurs de collecte (stock de pétrole, de charbon, de gaz, etc.). A l'inverse, le monde biologique qui se base sur une collecte d'énergie de flux ne peut pas stocker son vecteur de collecte (le photon) et doit donc nécessairement le convertir.

53 Il constitue par ailleurs le système majoritaire de stockage d'énergie dans le monde avec plus de 95% des capacités de stockage de quantité d'énergie <https://www.encyclopedie-energie.org/stockage-hydraulique-atouts-et-contraintes/>, consulté en décembre 2020

▼ Le réseau de transmission d'énergie

Dans les organismes vivants, le réseau d'énergie est un réseau de fluide circulant, transportant des vecteurs énergétiques relativement stables. Dans les systèmes technologiques, le réseau d'énergie est un réseau d'électricité composé de vecteurs énergétiques instables. Ces deux types de vecteurs sont ainsi transmis soit par des « canalisations », soit par des « câbles ». A l'échelle globale, le réseau d'énergie inter-systèmes biologiques correspond aux cycles de la matière organique ayant lieu au sein des réseaux trophiques. En cela, et malgré les échanges entre écosystèmes d'une partie du flux, la transmission d'énergie est essentiellement concentrée à l'échelle locale, avec, dans chaque écosystème, des producteurs primaires, des consommateurs et des décomposeurs. Dans le cas de notre société technologique, le réseau de transmission d'énergie se structure par une distribution globalisée de l'énergie depuis ces zones de collecte vers ces zones d'utilisation et/ou de stockage. La distance parcourue par l'énergie est donc plus grande dans le monde technologique que dans le monde vivant.

▼ L'architecture du réseau énergétique

Lorsque l'on compare les architectures réseaux, on peut mettre en évidence que le réseau national est plus proche de l'architecture réseau intra-organisme que d'une architecture réseau inter-organismes. On observe une spécialisation régionale (zone de collecte, de stockage et d'utilisation) conduisant à la mise en place d'un réseau de transport globale de large quantité d'énergie entre ces trois pôles, et d'un réseau local de distribution d'énergie depuis le réseau de transport vers les systèmes énergétiques. En cela l'architecture nationale est très similaire à celle d'un organisme biologique. Cependant, si l'on considère non plus l'échelle de l'organisme mais celle des écosystèmes, échelle qui correspond mieux aux tailles associées à un réseau national, alors l'architecture diffère sensiblement. En effet, si chaque organisme a une gestion linéaire de l'énergie, les dynamiques écosystémiques assurent une régulation cyclique en réinjectant de l'énergie sous forme de matière et en limitant ainsi les pertes. Passer d'une architecture linéaire (intra-organisme) à circulaire apparaît alors comme un levier d'amélioration.

▼ Les vecteurs de transmission d'énergie

Lorsque l'on compare les vecteurs de transmission d'énergie on peut observer que la stabilité de ceux-ci est variable. Ainsi, si dans le monde technologique, le vecteur de transmission d'énergie est l'électricité, un vecteur particulièrement peu stable, le monde biologique transmet l'énergie sous forme de matière organique dont la stabilité dépend du niveau de polymérisation. Outre la régulation par l'infrastructure réseau, la fonction de transmission est ainsi également contrôlée par la modification de la stabilité du vecteur énergétique transmis. La seconde différence majeure d'un point de vue du vecteur est que l'électricité est à la fois le vecteur de transmission et le vecteur d'utilisation. On a ici une spécificité du monde technologique dans la mesure où le monde biologique dégrade son vecteur de transmission en un ensemble de vecteurs spécifiques à la phase d'utilisation.

▼ La perte sur le réseau

Les pertes énergétiques du réseau d'électricité sont en grandes majorités dues à l'échauffement des câbles lors du passage d'un courant, on parle d'effet Joule. Au sein d'un organisme, le réseau transporte des vecteurs stables et on observe des pertes de charges hydrauliques. Si la chaleur est aussi la principale source de perte d'énergie par le corps, celle-ci est majoritairement générée par le biais de réactions chimiques exothermiques et donc lors de l'utilisation.

.04

L'UTILISATION D'ÉNERGIE

▼ La forme principale de l'utilisation d'énergie

La « petite monnaie énergétique », autrement dit le dernier jalon avant conversion d'énergie utile dans le vivant, est incarnée par l'ATP, de manière universelle. Il n'existe dans le vivant qu'une seule forme d'énergie qui servent à réaliser les fonctions biologiques, tandis que dans le monde technologique, deux formes, l'électricité et l'hydrocarbure, se partagent cette tâche. Dans l'optique de l'abandon des énergies fossile, la société s'électrifie. Pourtant le vecteur électrique semble avoir un désavantage marqué par rapport au vecteur chimique : son incapacité à pouvoir être converti aujourd'hui simplement dans un format stockable ou transportable.

▼ Les effecteurs

Dans le vivant, les fonctions utiles sont atteintes par la multiplicité de conversions énergétique à l'échelle moléculaire. La somme de ces petits effets, résultants de la catalyse enzymatique du couplage de réaction entre hydrolyse de l'ATP et réaction effectrice de la fonction (par exemple : émission d'un photon), produit l'effet macroscopique que nous observons. Sans préjuger de la pertinence d'avoir de multiples petits effecteurs plutôt qu'un unique conséquent, il semble que cette stratégie soit omniprésente dans le monde vivant. C'est d'ailleurs en s'inspirant de cette logique que la micro-fluidique s'est imposée comme une technologie d'avenir.

▼ Efficience énergétique

L'efficience énergétique est un critère majeur de sélection au sein d'une population biologique. Cette pression évolutive a ainsi permis de sélectionner au fil des générations des individus présentant des convertisseurs et conversions énergétiques adaptées à leur environnement dont le rendement énergétique a été optimisé. Il ne s'agit pas ici d'une maximisation monocritère mais bien d'une optimisation multicritère. Par exemple, la génération de chaleur lors d'une réaction métabolique – considérée comme une perte énergétique pour certains – semble pour le vivant servir à la thermorégulation. Le vivant en ce sens est un système intégré de revalorisation de chaleur fatale.

▼ Sobriété énergétique

L'efficience énergétique d'un organisme n'est pas le seul critère de fitness qui lui donne un avantage évolutif. La question est plutôt : quelle quantité d'énergie a-t-elle été dépensée pour atteindre telle fonction ? Ainsi la sobriété énergétique (= la modération dans la consommation d'énergie, autrement dit l'anti-gaspillage énergétique) joue un rôle équivalent à l'efficience énergétique dans une gestion durable de l'énergie. Si l'efficience énergétique fait davantage appel au travail des ingénieurs dans la conception des convertisseurs, la sobriété énergétique s'impose à tout un chacun, par le prisme comportemental. Ce n'est qu'en alliant les deux concepts que l'effet rebond peut être évité à l'échelle d'une société humaine.

▼ Energie de flux VS Energie de stock

En somme, la règle principale de l'utilisation de l'énergie dans le vivant est : « je ne consomme que l'énergie que j'ai collecté d'un flux au préalable. » Dit autrement, le vivant ne vit pas à crédit sur des stocks mais au contraire, met de côté autant que faire se peut le surplus énergétique que sa sobriété et son efficience lui a permis de sauvegarder de sa collecte de flux.

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.

EN RÉSUMÉ

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%⁵⁴). 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^{40,41} ? 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 flux⁵⁵.

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 adapté⁵⁶. 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 ?

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 ? La suite de ce rapport vise à présenter des exemples d'opportunités du biomimétisme permettant de répondre aux défis technologiques des systèmes préexistants sur les 4 grandes thématiques précédemment établies : la collecte, le stockage, la transmission et l'utilisation d'énergie.

54 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>

55 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

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



OPPORTUNITÉS DU BIOMIMÉTISME POUR LES TECHNOLOGIES DE L'ÉNERGIE

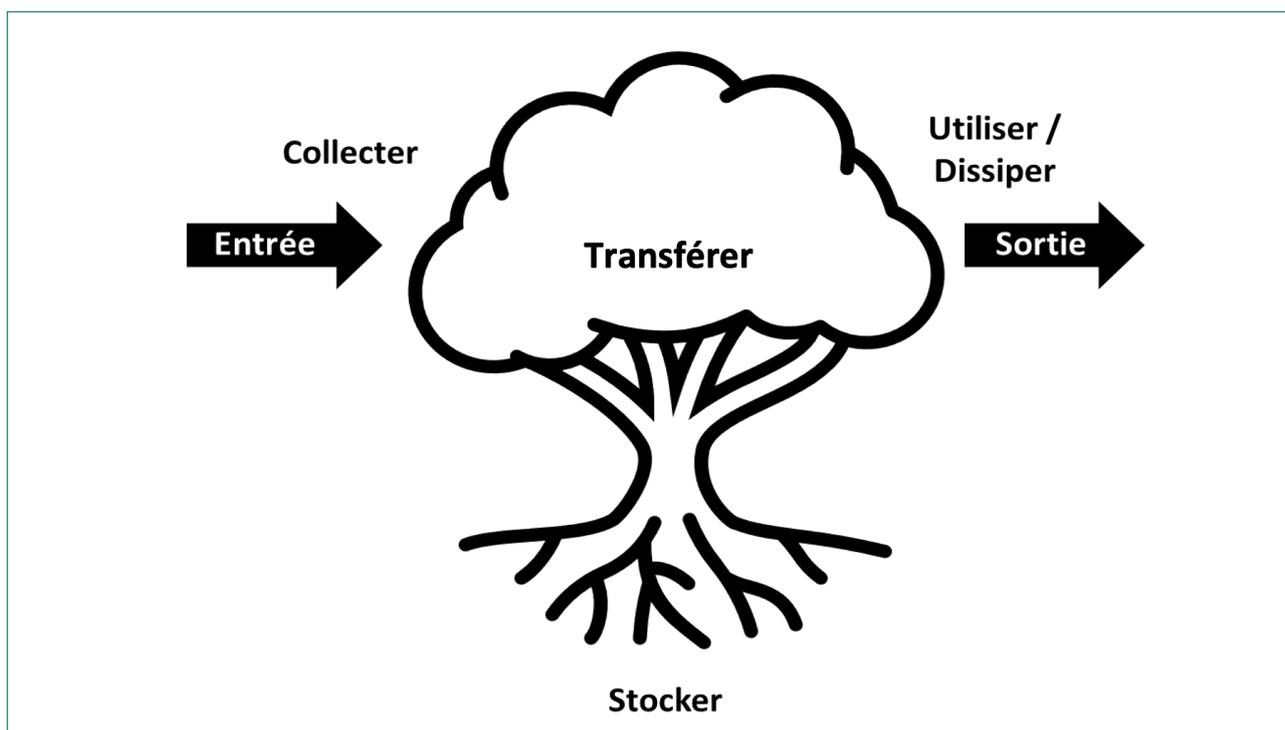


Schéma 1.
Cadre de bilan d'énergie adapté à un système biologique

Loin de proposer une liste exhaustive des innovations biomimétiques associées au domaine de l'énergie, l'objectif de ce rapport est de souligner en quoi le biomimétisme constitue une approche crédible pour répondre aux problématiques, notamment dans le cadre de la transition écologique, auxquelles font face les acteurs du secteur. Les références sont consignées en fin de chaque sous-partie. D'un point de vue méthodologique, il s'agit d'identifier les problématiques clés des systèmes énergétiques préexistants et de proposer des stratégies de résolution biomimétiques. On parlera de l'approche « technology-pull » du biomimétisme⁵⁷.

Il convient donc dans un premier temps d'établir une liste de problèmes associés à la technologie étudiée avant d'identifier des modèles biologiques faisant face à des problèmes analogues et présentant des stratégies biologiques de résolution.

57 ISO standard, ISO 18458:2015 - Biomimetics — Terminology, concepts and methodology. 2015. Accessed: Nov. 09, 2021. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/62500.html>

L'enjeu de cette partie est donc de dresser un panorama approfondi des freins qui limitent aujourd'hui le développement des énergies renouvelables et de présenter la diversité de stratégies du vivant qui y répondent. En cela, certaines opportunités ciblées dans ce chapitre se concentrent sur des systèmes énergétiques comme pour la question des principes de collecte et le développement de la photosynthèse artificielle.

D'autres stratégies abordent des fonctions secondaires aux systèmes considérés comme pour la question de la maintenance des infrastructures et le développement de bétons autoréparants.

Si aborder ces questions par le prisme des systèmes technologiques préexistants relèvent de l'innovation incrémentale et peut apparaître contre-productif au vu de la transition profonde qui est nécessaire, cette démarche se justifie par différents points dont les suivants :

- Les systèmes technologiques actuels sont la synthèse des centaines d'années de recherche et développement et en cela ils sont de formidables point de départ. Si la biologie renferme une multitude de solutions, considérer que l'innovation technologique est à rejeter en bloc est un absolutisme auquel nous choisissons de ne pas souscrire.
- La transition écologique est perçue comme un défi extrêmement complexe qu'il est difficile d'enclencher. Par une approche centrée sur les défis technologiques actuels, la démarche technology-pull permet d'ancrer le biomimétisme dans des problématiques concrètes. Elle donne ainsi la possibilité aux acteurs de tester et valider la pertinence du biomimétisme pour amorcer les changements nécessaires à différentes échelles.
- En s'inspirant de l'évolution, au sens biologique du terme, on observe que la notion de « contrainte historique » est un élément clé à considérer. Cette contrainte souligne la continuité du processus évolutif et la notion de coût évolutif. Si une espèce se développe avec un squelette interne, ce squelette peut devenir une contrainte a posteriori au cours de l'évolution, pourtant du fait que l'organisme est construit ainsi, le coût du passage à un squelette externe est trop fort et donc les solutions qui émergent sont contraintes par cette caractéristique historique. Du point de vue de la démarche d'inspiration, les organismes biologiques présentent ainsi des solutions spécifiquement adaptées à leurs contraintes historiques propres, contraintes qui n'ont pas lieu d'être pour un système technologique. La démarche d'inspiration doit donc en tenir compte. A l'inverse, il faut bien considérer les contraintes historiques propres aux sociétés humaines pour permettre une évolution cohérente de notre modèle énergétique et avec un coût minimum. Si l'on prend un exemple simplificateur, la taille des rues d'une ville correspond à une contrainte historique qu'il faut garder en tête avant de concevoir ses transports en commun du futur.

Il s'agit alors de combiner le référentiel des principes du vivant appliqués à l'énergie, et donc le requestionnement de notre modèle énergétique à l'échelle globale tel que présenté dans la partie précédente, et l'identification de stratégies fonctionnelles précises permettant de supporter cette transition progressive vers un système optimisé et basé sur les énergies renouvelables.

RECOUPEMENT DES ENJEUX MÉTIERS

Les systèmes technologiques qui sont passés en revue sont tous des convertisseurs énergétiques (voir annexe). Nous traiterons **les problématiques spécifiques** de ces convertisseurs au regard de leur usage. Les problématiques qui leur sont communes comme la thermorégulation, les problématiques de fin de vie, la composition de la matière première etc. ne seront traités qu'une seule fois et le recouplement des axes d'innovation et des technologies abordées est synthétisé ci-dessous.

TECHNOLOGIES								
		Matières premières (p.58)	Régulation thermique (p.59)	Frottements (p.62 et 77)	Maintenance (p.58 et 65)	Propriétés mécaniques (p.77)	Architecture système (p.62, 79 et 103)	Intégration à l'environnement (p.67)
Collecte	Photovoltaïques p. 57-60							
	Éoliens p. 61-62							
	Hydroélectriques p. 63-65							
	Méthaniseurs p. 66-67							
	Nucléaires p. 68-70							
Stockage	Volant inertiel p. 76-77							
	Batteries/piles p. 78-80							
	Stockage thermique p. 81-83							
Transmission	Réseau électrique p. 87-90							
	Réseau de chaleur p. 91-93							
	Vecteurs chimiques p. 94-95							
Utilisation	Pompes p. 100-101							
	Micro-actionneurs p. 102-103							
	Lampes p. 104-105							
	Composants électroniques p. 106-107							
	Chauffage p. 108-109							

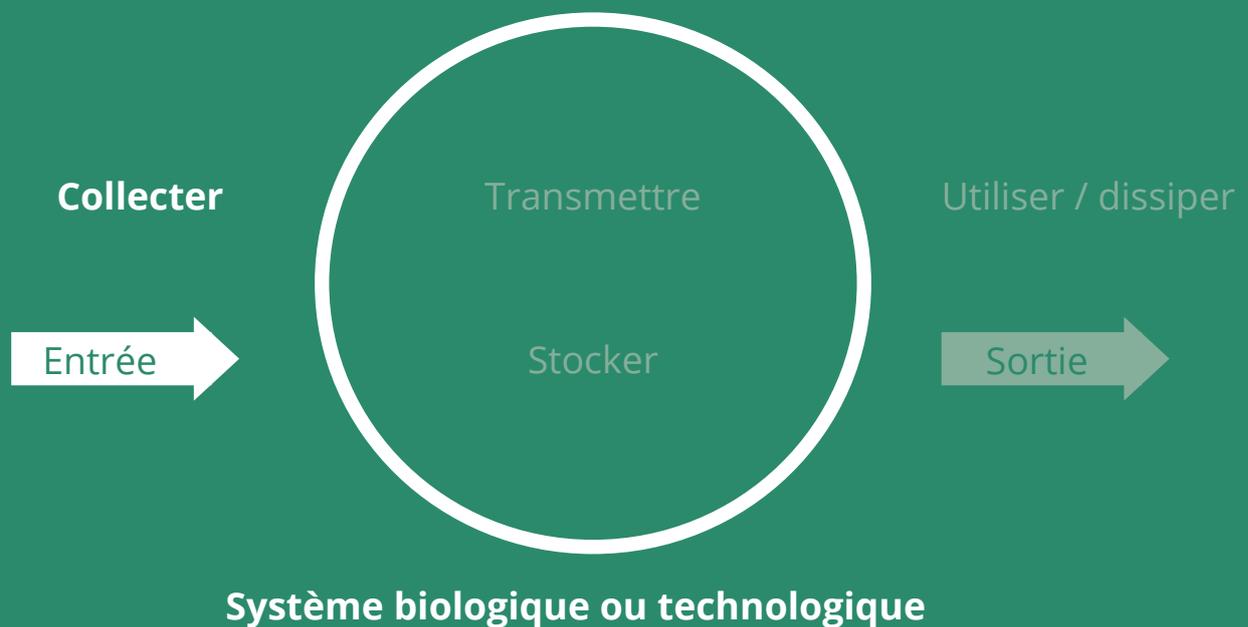


LA COLLECTE DE L'ÉNERGIE

On rappellera ici que la collecte d'énergie est définie dans ce rapport comme la fonction permettant le passage d'une énergie présente dans l'environnement à une énergie disponible au sein d'un système donné pour effectuer les 3 fonctions énergétiques restantes.

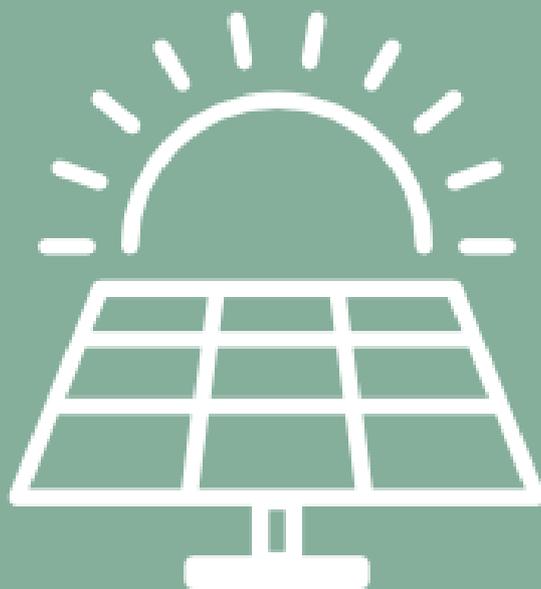
En nous basant sur le raisonnement présenté en partie 2, nous traiterons la question de la collecte d'énergie à travers les 5 sources constituant le plus gros potentiel dans la transition vers un mix énergétique durable : le solaire, l'éolien, l'hydrolien, la biomasse et le nucléaire.

Pour chacune de ces sources, un système technique représentatif des stratégies actuelles de collecte est abordé dans le détail, comme le panneau solaire, l'hydrolienne, l'éolienne, etc. Ainsi, des opportunités concrètes de réponses aux problèmes techniques étudiés en innovation sont présentées.



LE PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE

Le panneau photovoltaïque est un système composé de cellules photovoltaïques, capables de convertir l'énergie électromagnétique en énergie électrique par la photo-excitation d'un électron d'un matériau semi-conducteur.





Exemples d'opportunités biomimétiques pour les technologies associées au photovoltaïque 1/3

▼ Matière première

Comment réduire le coût économique et écologique de la transformation du silicium dans la fabrication des cellules PV de première génération ?

--> Utiliser des procédés sol-gel inspirés de la biominéralisation silicatée du vivant à pression et température ambiantes¹.

Comment limiter l'impact de l'extraction des métaux rares composants les PV de nouvelles générations ?

--> --> utiliser des procédés de biohydrométallurgie pour l'extraction et un traitement à moindre impact en fin de vie².

▼ Captation du rayonnement

Comment assurer la collecte d'un maximum de photon même à faible ensoleillement ?

--> S'inspirer des micro et nanostructurations de surface des ailes de certains insectes qui concentrent le rayonnement (Famille des Pieridae)³.

--> S'inspirer des propriétés optiques anti-reflet des yeux d'insectes⁴.

Comment pallier aux problèmes des solutions actuelles d'orientation dynamique des PV (coût, panne, poids, etc.) ?

--> S'inspirer des poils de fourrure de l'Ours polaire qui agissent comme des fibres optiques et guident passivement le rayonnement solaire⁵.

▼ Maintenance du panneau

Comment maintenir la propreté des PV, prévenir le développement d'organismes à la surface ou encore la limiter l'impact du gel-dégel ?

--> Limiter l'adhésion des contaminants, biologiques (spore, pollen, etc.) ou non (eau, débris, etc.) par micro et nanostructuration de la surface comme pour l'« effet-lotus »⁶.

Comment se défendre face aux biofilms bactériens ?

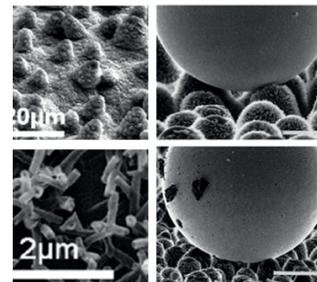
--> Favoriser la dégradation de la membrane des bactéries par des micro-structurations de surface inspirées des ailes des cigales⁷.



Squelette de verre des diatomées
vus au microscope
<http://www.mikroskopie-ph.de/Rosette-Centrales-G.jpg>



Les ailes du *P. brassicae*
concentrent les rayons solaires
[Pieris_brassicae \(wikimedia.org\)](http://Pieris_brassicae.wikimedia.org)



Structuration à la surface de
la feuille de Lotus conduisant
au phénomène de super-
hydrophobie⁶

1 Sanchez, C., Julián, B., Belleville, P., & Popall, M. (2005). Applications of hybrid organic-inorganic nanocomposites. *Journal of Materials Chemistry*, 15(35–36), 3559–3592. <https://doi.org/10.1039/b509097k>

2 Adesina, O., Anzai, I. A., Avalos, J. L., & Barstow, B. (2017). Embracing Biological Solutions to the Sustainable Energy Challenge. In *Chem* (Vol. 2, Issue 1, pp. 20–51). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2016.12.009>

3 Shanks, K., Senthilarasu, S., Ffrench-Constant, R. H., & Mallick, T. K. (2015). White butterflies as solar photovoltaic concentrators. *Scientific Reports*, 5(1), 12267. <https://doi.org/10.1038/srep12267>

4 Kryuchkov, M., Bilousov, O., Lehmann, J., Fiebig, M., & Katanaev, V. L. (2020). Reverse and forward engineering of *Drosophila* corneal nanocoatings. *Nature*, 585(7825), 383–389. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2707-9>

5 Khattab, M. Q., & Tributsch, H. (2016). Fibre-Optical Light Scattering Technology in Polar Bear Hair: A Re-Evaluation and New Results. *Journal of Advanced Biotechnology and Bioengineering*, 3(2), 38–51. <https://doi.org/10.12970/2311-1755.2015.03.02.2>

6 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>

7 Pogodin, S., Hasan, J., Baulin, V. A., Webb, H. K., Truong, V. K., Phong Nguyen, T. H., Boshkovikj, V., Fluke, C. J., Watson, G. S., Watson, J. A., Crawford, R. J., & Ivanova, E. P. (2013). Biophysical model of bacterial cell interactions with nanopatterned cicada wing surfaces. *Biophysical Journal*, 104(4), 835–840. <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2012.12.046>



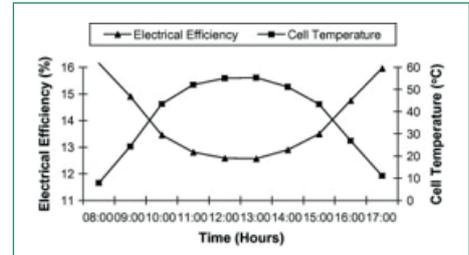
Exemples d'opportunités biomimétiques pour les technologies associées au photovoltaïque 2/3

▼ Thermoregulation

Comment assurer la thermorégulation des systèmes de collecte énergétique solaire ?

--> S'inspirer de la chitine et de la structure des ailes du papillon morpho favorisant l'émission dans l'infrarouge à partir d'un seuil de température⁸.

--> S'inspirer des poils triangulaires des fourmis argentées pour favoriser la réflexion du rayonnement et l'émission de infrarouge⁹.



Variation horaire de la température et de l'efficacité des cellules PV pour un jour typique d'été (Tiwari et al. 2011)

▼ Infrastructures de collecte

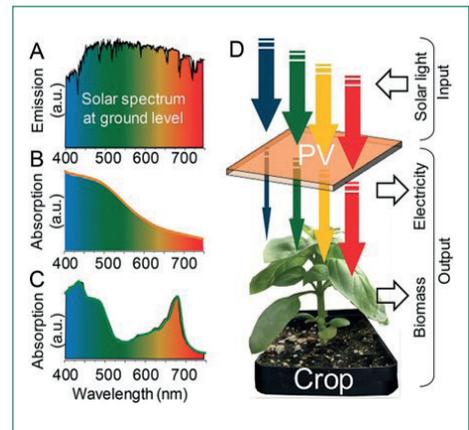
Comment assurer la thermorégulation des systèmes de collecte énergétique solaire par l'infrastructure ?

--> Utiliser l'association entre une toiture végétalisée et des panneaux solaires comme stratégie de thermorégulation¹⁰.

Comment maximiser le rendement à l'hectare ?

--> Dans le cadre de système photothermique (rayonnement utiliser comme source d'énergie thermique) s'inspirer de l'organisation spiralée des fleurs tubulées du tournesol pour réduire l'encombrement du système de collecte et même augmenter la quantité d'énergie collectée¹¹.

--> S'inspirer du modèle de la canopée des forêts pour mettre en place une collecte photovoltaïque multiétagée¹², et associer une production énergétique avec une production agricole¹³.



Agrivoltaïsme par implémentation d'un panneau solaire semi-transparent¹²

8 Shi, N. N., Tsai, C. C., Camino, F., Bernard, G. D., Yu, N., & Wehner, R. (2015). Keeping cool: Enhanced optical reflection and radiative heat dissipation in Saharan silver ants. *Science*, 349(6245), 298-301. <https://doi.org/10.1126/science.aab3564>

9 Hui, S. C. M., & Chan, S. C. (2011). Integration of green roof and solar photovoltaic systems. *Joint Symposium 2011: Integrated Building Design in the New Era of Sustainability*, 2011(November), 1-12.

10 Noone, C. J., Torrilhon, M., & Mitsos, A. (2012). Heliostat field optimization: A new computationally efficient model and biomimetic layout. *Solar Energy*, 86(2), 792-803. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.12.007>

11 Jayakumar, A., & Mathew, M. (2019). Solar photovoltaic tree and its end-of-life management using thermal and chemical treatments for material recovery. *Case Studies in Thermal Engineering*, 14, 100474. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100474>

12 Thompson, E. P., Bombelli, E. L., Shubham, S., Watson, H., Everard, A., D'Ardes, V., Schievano, A., Bocchi, S., Zand, N., Howe, C. J., & Bombelli, P. (2020). Tinted Semi-Transparent Solar Panels Allow Concurrent Production of Crops and Electricity on the Same Cropland. *Advanced Energy Materials*, 10(35), 2001189. <https://doi.org/10.1002/aenm.202001189>

13 <https://recherche.univ-pau.fr/fr/axes-scientifiques/environnement-et-matériaux/projetescald.html>



Exemples d'opportunités biomimétiques pour les technologies associées au photovoltaïque 3/3

▼ Photosynthèse artificielle

Comment convertir l'électricité en un vecteur plus stable fixant du CO₂ ?

--> Projet de recherche européen E-scaled, visant la mise en place d'un système qui « comprend une unité pour capturer la lumière du soleil et la transforme en électricité, afin d'alimenter des électrodes où les carburants (H₂ ou C_xH_yO_z) et l'oxygène seront formés sur des sites catalytiques/enzymatiques nanostructurés et bioinspirés »¹⁴.

--> Projet Rhéticus par les groupes allemands Evonik et Siemens visant la mise en place d'une usine¹⁵ qui effectue l'électrolyse électrique¹⁶ de CO₂ et d'H₂O pour produire de l'H₂ et du CO utilisés comme substrats réactionnels de fermenteurs¹⁷. Les produits potentiels sont du bio-fuel, du bioplastique ou des additifs alimentaires¹⁸.

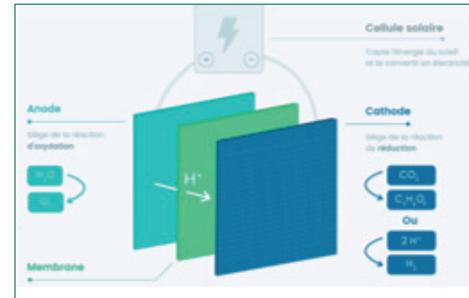
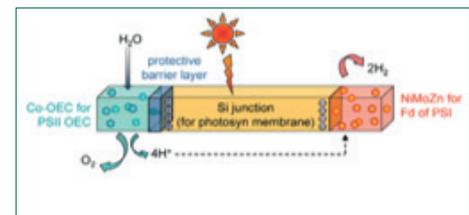


Schéma du dispositif E-scaled

Comment convertir directement l'énergie du rayonnement solaire en énergie chimique ?

--> La feuille artificielle du MIT¹⁹ qui convertit l'énergie lumineuse en un courant électronique activant des sites formés de métaux abondants comme le Cobalt (Co), le Nickel (Ni) ou le Zinc (Zn) et catalysant la séparation de l'H₂O et la formation de H₂.

--> Différentes études visent à optimiser ces systèmes, notamment sur l'architecture²⁰, la collecte de photons²¹ ou les catalyseurs employés²².



La feuille artificielle

14 <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/climate-friendly-industry-using-carbon-dioxide-and-hydrogen-raw-materials-sustainable>

15 Atkinson, S. (2020). Evonik works to close carbon dioxide cycle through "artificial photosynthesis" and aims to make green hydrogen more affordable. Membrane Technology, 2020(11), 8-9. [https://doi.org/10.1016/s0958-2118\(20\)30194-4](https://doi.org/10.1016/s0958-2118(20)30194-4)

16 Atkinson, S. (2020). Evonik works to close carbon dioxide cycle through "artificial photosynthesis" and aims to make green hydrogen more affordable. Membrane Technology, 2020(11), 8-9. [https://doi.org/10.1016/s0958-2118\(20\)30194-4](https://doi.org/10.1016/s0958-2118(20)30194-4)

17 Haas, T., Krause, R., Weber, R., Demler, M., & Schmid, G. (2018). Technical photosynthesis involving CO₂ electrolysis and fermentation. Nature Catalysis, 1(1), 32-39. <https://doi.org/10.1038/s41929-017-0005-1>

18 <https://www.siemens-energy.com/global/en/news/magazine/2020/rheticus-worlds-first-automated-co2-electrolyzer.html>

19 Nocera, D. G. (2012). The artificial leaf. Accounts of Chemical Research, 45(5), 767-776. <https://doi.org/10.1021/ar2003013>

20 Jeon, Dasom; Kim, Hyunwoo; Bae, Sanghyun; Lee, Cheolmin; Ryu, J. (2018). Enabling Solar-Fuel Production with Biomimetic Architectures. <https://scholarworks.unist.ac.kr/handle/201301/34242>

21 Yu, W., Zhang, S., Chen, J., Xia, P., Richter, M. H., Chen, L., Xu, W., Jin, J., Chen, S., & Peng, T. (2018). Biomimetic Z-scheme photocatalyst with a tandem solid-state electron flow catalyzing H₂ evolution. Journal of Materials Chemistry A, 6(32), 15668-15674. <https://doi.org/10.1039/c8ta02922a>

22 Guo, F., Chen, J., Zhao, J., Chen, Z., Xia, D., Zhan, Z., & Wang, Q. (2020). Z-scheme heterojunction g-C₃N₄@PDA/BiOBr with biomimetic polydopamine as electron transfer mediators for enhanced visible-light driven degradation of sulfamethoxazole. Chemical Engineering Journal, 386, 124014. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124014>

L'ÉOLIENNE

L'éolienne est une turbine permettant la conversion de l'énergie cinétique diffuse de l'air en électricité par la mise en rotation du rotor. Les éoliennes sont le plus souvent organisées en un « parc », associant plusieurs systèmes sur une surface donnée. Elles peuvent être terrestres ou maritimes.





Exemples d'opportunités biomimétiques pour les technologies associées à l'éolien

▼ Gestion des phénomènes aérodynamiques

Comment réduire les frottements ?

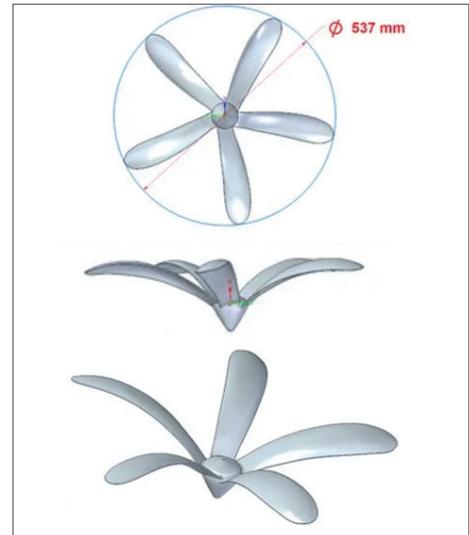
--> S'inspirer de la structuration de la peau de requin, de dauphin ou encore des plumes de pingouin pour réduire les frottements de la surface des pales du rotor¹.

Comment limiter les turbulences ?

--> Inspiration des formes des nageoires de baleines^{2,3}, du bec du martin pêcheur et des samares d'érables⁴ ou de la graine de *Petrea volubilis*⁵, pour améliorer la gestion de la turbulence et réduire la traînée.

--> Limitation de traînée par la mise en place de winglets inspirés des plumes des ailes des rapaces comme sur les ailes des avions⁶.

--> S'inspirer de la nage des poissons pour mettre en place des éoliennes à turbine verticale et à mouvement cycloïdal particulièrement adaptées aux usages urbains⁷.



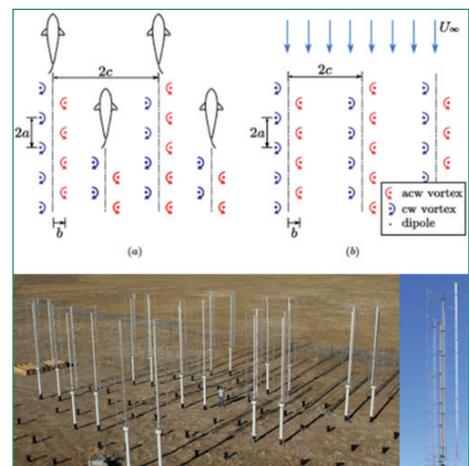
Modèle CAO des pales d'éolienne inspirées de la graine de *Petrea volubilis*

▼ Organisation des champs d'éoliennes

Comment limiter la chute de rendement due aux turbulences du flux d'air après son passage à travers le parc d'éoliennes ?

--> Utiliser des éoliennes verticales à sens de rotation alterné et structurer les parcs éoliens afin que les turbulences soient valorisées comme une source d'énergie comme c'est le cas dans les bancs de poissons notamment⁸.

--> S'inspirer du vol en V des oiseaux migrateurs pour utiliser les dépressions comme courant d'aspiration et collecter l'énergie ainsi générée.⁹



Modèle de champs d'éoliennes verticales

1 Yu, C., Liu, M., Zhang, C., Yan, H., Zhang, M., Wu, Q., Liu, M., & Jiang, L. (2020). Bio-inspired drag reduction: From nature organisms to artificial functional surfaces. *Giant*, 2, 100017. <https://doi.org/10.1016/j.giant.2020.100017>

2 Abate, G., Mavris, D. N., & Sankar, L. N. (2019). Performance effects of leading edge tubercles on the NREL Phase VI wind turbine blade. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, 141(5). <https://doi.org/10.1115/1.4042529>

3 <https://whalepowercorp.wordpress.com/>

4 <https://www.biome-renewables.com/>

5 Gaïtan-Aroca, J., Sierra, F., & Contreras, J. U. C. (2020). Bio-inspired rotor design characterization of a horizontal axis wind turbine. *Energies*, 13(14), 3515. <https://doi.org/10.3390/en13143515>

6 Guerrero, J. E., Maestro, D., & Bottaro, A. (2012). Biomimetic spiroid winglets for lift and drag control. *Comptes Rendus - Mécanique*, 340(1-2), 67-80. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2011.11.007>

7 <http://www.adv-tech.fr/eolienne/>

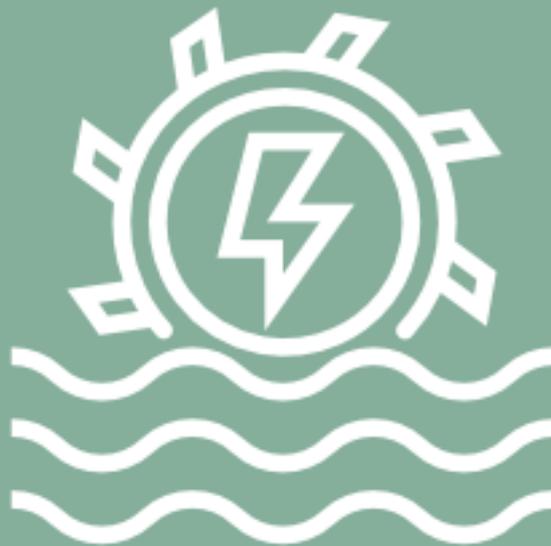
8 Whittlesey, R. W., Liska, S., & Dabiri, J. O. (2010). Fish schooling as a basis for vertical axis wind turbine farm design. *Bioinspiration & Biomimetics*, 5(3), 035005. <https://doi.org/10.1088/1748-3182/5/3/035005>

9 Portugal, S. (2016). Lissaman, Shollenberger and formation flight in birds. *Journal of Experimental Biology*, 219(18), 2778-2780. <https://doi.org/10.1242/jeb.148114>

LES TURBINES HYDRAULIQUES

On distingue différents types de turbines hydrauliques selon si l'on utilise l'eau des rivières, des marées, des vagues, des lacs de barrage ou encore des courants, comme vecteur d'énergie cinétique.

On considèrera ici les turbines de manière générique en précisant si nécessaire à quel système elles se rapportent. On notera par ailleurs que les barrages hydroélectriques sont également utilisés comme des systèmes de stockage d'énergie grâce au pompage d'eau (système STEP).





Exemples d'opportunités biomimétiques pour les technologies associées aux turbines hydrauliques 1/2

▼ Gestion des phénomènes hydrodynamiques

Comment réduire les frottements, la trainée et les turbulences ?

--> Prévenir le décrochage de la couche limite par la structuration de la surface de contact avec le fluide comme chez le requin permettant de générer activement et de manière dirigée des vortex, comme pour l'effet riblet¹.

--> Un ensemble de modèles d'inspiration de forme, comme les tubercules des nageoires de baleine, on été appliqués à la fois aux turbines hydrauliques et aux éoliennes (voir éolien).

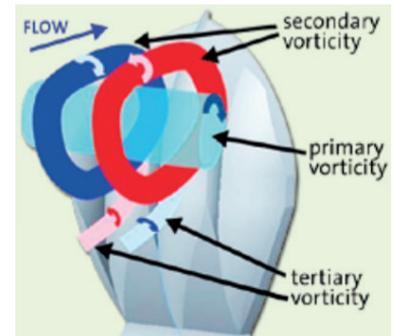
Comment réduire les pertes de charges ?

--> S'inspirer du système sanguin afin d'en tirer des apprentissages sur la limitation des pertes de charge².

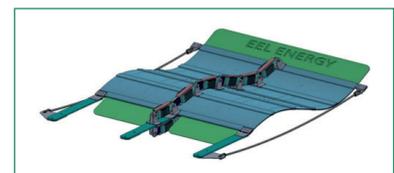
Comment convertir différemment l'énergie cinétique de l'eau ?

--> Les êtres vivants n'utilisent pas d'hélice (ou anecdotiquement) mais l'ondulation comme processus de mise en mouvement, pour mettre en mouvement le fluide de manière plus efficace par des pompes à membrane ondulante³.

--> S'inspirer du mouvement ondulatoire des poissons, dont l'anguille, pour maximiser la gamme de vitesse utile du fluide, minimiser la perturbation des flux et donc augmenter la densité des systèmes de récoltes, minimiser l'encrassement par des algues, etc. Il s'agit de systèmes sans turbine donc également pertinent pour la problématique des impacts environnementaux, réduction du son généré, réduction des risques physiques, etc.^{4,5}



Modèle d'une denticule de requin



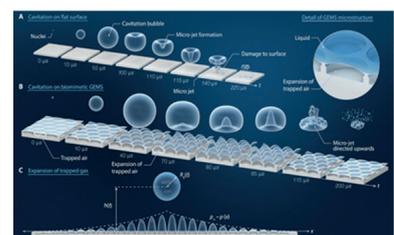
Modèle CAO du système ondulant Eel-Energy

▼ Gestion des phénomènes de cavitation

Comment réduire l'impact des bulles de cavitation ?

--> Répartir la contrainte pour éviter la dégradation par la forme des pales⁶.

--> Diriger l'énergie d'effondrement vers le liquide et non vers le solide en stabilisant une couche d'air en surface⁷.



Réduction de l'impact de l'effondrement des bulles de cavitation par modification de l'interface solide-liquide

1 Fu, Y. F., Yuan, C. Q., & Bai, X. Q. (2017). Marine drag reduction of shark skin inspired riblet surfaces. *Biosurface and Biotribology*, 3(1), 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.bsbt.2017.02.001>

2 Bach, D., Schmich, F., Masselter, T., & Speck, T. (2015). A review of selected pumping systems in nature and engineering - Potential biomimetic concepts for improving displacement pumps and pulsation damping. In *Bioinspiration and Biomimetics* (Vol. 10, Issue 5). Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/10/5/051001>

3 <https://www.wavera.tech/>, consulté en décembre 2020

4 Träsch, M., Déporte, A., Delacroix, S., Drevet, J. B., Gaurier, B., & Germain, G. (2018). Power estimates of an undulating membrane tidal energy converter. *Ocean Engineering*, 148, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.11.002>

5 <http://www.eel-energy.fr/en/eel-tidal-energy-convertor/>

6 Shi, W., Atlar, M., Rosli, R., Aktas, B., & Norman, R. (2016). Cavitation observations and noise measurements of horizontal axis tidal turbines with biomimetic blade leading-edge designs. *Ocean Engineering*, 121, 143–155. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.05.030>

7 onzalez-Avila, S. R., Nguyen, D. M., Arunachalam, S., Domingues, E. M., Mishra, H., & Ohl, C. D. (2020). Mitigating cavitation erosion using biomimetic gas-entrapping microtextured surfaces (GEMS). *Science Advances*, 6(13), 6192–6219. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax6192>



Exemples d'opportunités biomimétiques pour les technologies associées aux turbines hydrauliques 2/2

▼ Maintenance de la structure

Comment trouver une alternative aux produits toxiques pour l'entretien des circuits hydrauliques ?

--> Se prémunir du biofouling en s'inspirant des enveloppes biologiques antifouling⁸.

Comment limiter le besoin de maintenance ?

--> S'inspirer de l'architecture des matériaux biologiques composites, notamment ceux des enveloppes biologiques, pour générer des fonctions d'absorption de choc, de protection mécanique, etc.⁹

--> S'inspirer des processus d'autoréparation des matériaux biologiques pour constituer des bétons autoréparants¹⁰.



Turbine recouverte d'algues¹¹

▼ Impacts environnementaux

Comment limiter la pollution sonore sous-marine et les risques des hélices de turbines pour les organismes marins ?

--> Collecter l'énergie des vagues par oscillation, sans avoir besoin de turbines en s'inspirant du Kelp^{11, 12}.

--> Former des réseaux de nano-générateurs triboélectriques répartissant les contraintes et n'utilisant pas de turbines¹³.

--> Munir les turbines d'ailerons permettant de réduire les perturbations acoustiques sous-marines¹⁴.

Comment réduire l'impact des infrastructures sur les écosystèmes naturels et la fragmentation de l'habitat ?

--> Mettre en place des solutions d'ingénierie écologique pour intégrer les infrastructures dans l'environnement et régénérer sa biodiversité¹⁵.

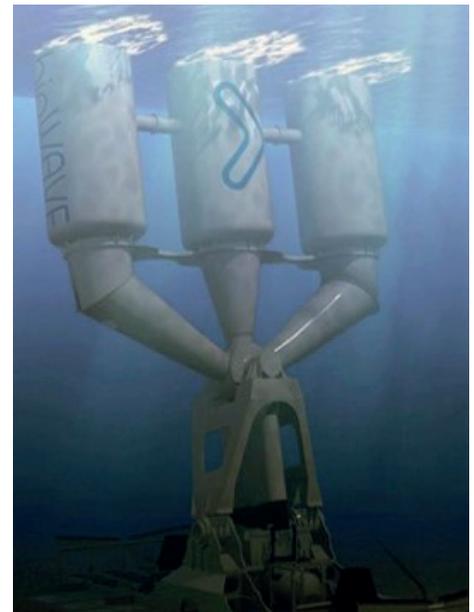


Illustration 3D du module BioWave par BioPower Systems

8 Gittens, J. E., Smith, T. J., Suleiman, R., & Akid, R. (2013). Current and emerging environmentally-friendly systems for fouling control in the marine environment. In *Biotechnology Advances* (Vol. 31, Issue 8, pp. 1738-1753). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.09.002>

9 « Matériaux bio-inspirés », Ceebios, 2020

10 <https://www.basiliskconcrete.com/en/>

11 Pedersen Zari, M. (2015). Can biomimicry be a useful tool for design for climate change adaptation and mitigation? In *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09287-4_4

12 <https://bps.energy/>

13 Li, W., Pei, Y., Zhang, C., & Kottapalli, A. G. P. (2021). Bioinspired designs and biomimetic applications of triboelectric nanogenerators. In *Nano Energy* (Vol. 84, p. 105865). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.105865>

14 Clark, I. A., Nathan Alexander, W., & Devenport, W. (2017). Bio-inspired finlets for the reduction of marine rotor noise. 23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2017. <https://doi.org/10.2514/6.2017-3867>

15 <https://www.seaboost.fr/>

FERMENTEUR & MÉTHANISEURS

La biomasse est la matière organique utilisable comme source d'énergie. Nous nous concentrerons ici sur le biocarburant issu de la valorisation de coproduits (agricole, agroalimentaire ou forestier) par procédé biochimique plutôt que sur le gaz naturel extrait.





Exemples d'opportunités biomimétiques pour les technologies associées à la valorisation de la biomasse

▼ Optimisation des procédés

Comment réduire les prétraitements chimiques à fortes pression et température ?

--> Dégrader mécaniquement la matière par le biais d'un système inspiré de la mâchoire des ruminants¹.

--> Ajouter une itération de la dégradation mécanique de la matière au sein des réacteurs pour assurer une granularité optimale des particules de matière comme c'est le cas lors de la rumination².



Image libre de droit, Pixabay

Comment réduire le danger et le coût dus à la manipulation du méthane (CH₄) ?

--> S'inspirer des métabolismes biologiques conduisant à la formation d'alcool stable, transition vers un procédé basé sur le méthanol et non le méthane³.

▼ Innovations biotechnologiques

Comment optimiser la population bactérienne et les conditions de fermentation des bioréacteur ?

--> S'inspirer du métabolisme bactérien du microbiote du rumen ou de l'activité des décomposeurs fongiques pour identifier des enzymes à fort potentiel de dégradation des matières lignocellulosiques^{4,5}.

Comment produire du méthanol à partir de méthane à pression et température ambiante ?

--> S'inspirer des enzymes méthane monooxygénases des bactéries dites méthanotrophes capables de former du méthanol (liquide et sans danger) à partir de méthane et d'oxygène à pression et température ambiantes⁶.



Cohesin-Dockerin complex from the cellulosome of *Clostridium thermocellum*

Comment optimiser l'activité enzymatique de la population bactérienne des bioréacteurs ?

--> S'inspirer de l'architecture des cellulosomes de *Clostridium thermocellum*⁷ permettant l'agencement optimisé de l'arsenal enzymatique et l'augmentation de son efficacité d'un facteur 50. Ajouter les protéines structurantes par biotechnologie sur les souches bactériennes d'intérêt⁸.

1 Wang, J., Cheng, C., Zeng, X., Zheng, J., & Zhou, Z. (2020). Bionic-tribology design of tooth surface of grinding head based on the bovine molar. *Tribology International*, 143, 106066. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106066>

2 Weimer, P. J., & Hall, M. B. (2020). The potential for biomimetic application of rumination to bioreactor design. In *Biomass and Bioenergy* (Vol. 143, p. 105822). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105822>

3 Olah, G. A. (2013). Towards Oil Independence Through Renewable Methanol Chemistry. *Angewandte Chemie International Edition*, 52(1), 104-107. <https://doi.org/10.1002/anie.201204995>

4 Sørensen, A., Lübeck, M., Lübeck, P. S., & Ahring, B. K. (2013). Fungal Beta-Glucosidases: A Bottleneck in Industrial Use of Lignocellulosic Materials. *Biomolecules*, 3, 612-631. <https://doi.org/10.3390/biom3030612>

5 Liang, J., Nabi, M., Zhang, P., Zhang, G., Cai, Y., Wang, Q., Zhou, Z., & Ding, Y. (2020). Promising biological conversion of lignocellulosic biomass to renewable energy with rumen microorganisms: A comprehensive review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 134, p. 110335). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110335>

6 Wang, V. C. C., Maji, S., Chen, P. P. Y., Lee, H. K., Yu, S. S. F., & Chan, S. I. (2017). Alkane Oxidation: Methane Monooxygenases, Related Enzymes, and Their Biomimetics. In *Chemical Reviews* (Vol. 117, Issue 13, pp. 8574-8621). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00624>

7 Carvalho, A. L., Dias, F. M. V., Prates, J. A. M., Nagy, T., Gilbert, H. J., Davies, G. J., Ferreira, L. M. A., Romão, M. J., & Fontes, C. M. G. A. (2003). Cellulosome assembly revealed by the crystal structure of the cohesin-dockerin complex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(SUPPL. 2), 13809-13814. <https://doi.org/10.1073/pnas.1936124100>

8 Chang, J. J., Anandharaj, M., Ho, C. Y., Tsuge, K., Tsai, T. Y., Ke, H. M., Lin, Y. J., Ha Tran, M. D., Li, W. H., & Huang, C. C. (2018). Biomimetic strategy for constructing *Clostridium thermocellum* cellulosomal operons in *Bacillus subtilis*. *Biotechnology for Biofuels*, 11(1), 157. <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1151-7>

CENTRALE NUCLÉAIRE

La chaleur obtenue par réaction de fission de l'uranium alimente une centrale électrique thermique. Nous interrogerons trois axes limitant l'utilisation de l'énergie nucléaire, l'approvisionnement en matière première, la sécurité et la fin de vie des installations.





Exemples d'opportunités biomimétiques pour les technologies associées au nucléaire 1/2

▼ Combiner nucléaire et sécurité

Comment bloquer ou valoriser le rayonnement ionisant ?

--> S'inspirer de champignons, comme le *Cladosporium sphaerospermum*, qui se protègent des rayonnements ionisants par la production d'une grande quantité de mélanine¹.

--> S'inspirer du champignon *Cryptococcus neoformans*, capable de se nourrir de rayonnement ionisant et de convertir cette énergie en énergie chimique (biomasse)².

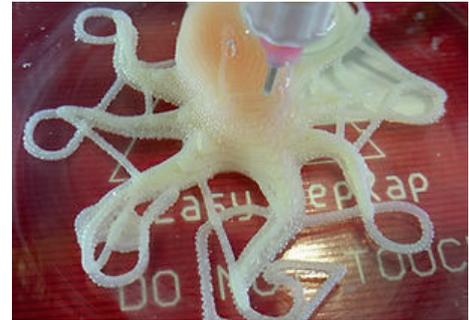
Comment réduire les situations à risques ?

--> Utiliser des matériaux bioinspirés autoréparant comblant les fissures (voir le rapport « matériaux bioinspirés »)³.

--> S'inspirer des senseurs biologiques et du circuit neuronal local permettant une réponse très rapide comme chez les insectes notamment^{4,5}.

Comment protéger les employés ?

--> S'inspirer de l'anatomie et de la biomécanique pour concevoir des robots très agiles, pouvant remplacer des manipulateurs humains en zones dangereuses⁶.



Impression 3D de robots mous bio-inspirés Photo: Oregon State University mLab Robotics. (CC BY-SA 2.0)

1 Shunk, G., Gomez, X., & Aversch, N. (2020). A Self-Replicating Radiation-Shield for Human Deep-Space Exploration: Radiotrophic Fungi can Attenuate Ionizing Radiation aboard the International Space Station. *BioRxiv*, 2020.07.16.205534. <https://doi.org/10.1101/2020.07.16.205534>

2 Pacelli, C., Bryan, R. A., Onofri, S., Selbmann, L., Shuryak, I., & Dadachova, E. (2017). Melanin is effective in protecting fast and slow growing fungi from various types of ionizing radiation. *Environmental Microbiology*, 19(4), 1612–1624. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13681>

3 Speck, O., & Speck, T. (2019). An Overview of Bioinspired and Biomimetic Self-Repairing Materials. *Biomimetics*, 4(1), 26. <https://doi.org/10.3390/biomimetics4010026>

4 Amoli, V., Kim, S. Y., Kim, J. S., Choi, H., Koo, J., & Kim, D. H. (2019). Biomimetics for high-performance flexible tactile sensors and advanced artificial sensory systems. In *Journal of Materials Chemistry C* (Vol. 7, Issue 47, pp. 14816–14844). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c9tc05392a>

5 Le souffle d'air du grillon | Nature = Futur !, https://www.youtube.com/watch?v=SwuRz9-jqT0&ab_channel=Mus%C3%A9umnational%27Histoirenaturelle, consulté en mars 2021

6 Bionic Learning Network | Festo Corporate, <https://www.festo.com/group/en/cms/10156.htm>, consulté en mars 2021



Exemples d'opportunités biomimétiques pour les technologies associées au nucléaire 2/2

▼ Déchets et impacts environnementaux

Comment réduire l'impact de l'extraction d'uranium ?

--> S'inspirer du métabolisme des microorganismes lithotrophes, tel qu'*Acidithiobacillus ferrooxidans*, utilisant l'uranium comme donneur d'électron (oxydation de l'uranium) et permettant la solubilisation de l'uranium dans des conditions physiologiques⁷.

--> Extraire l'uranium de l'océan par le biais de systèmes inspirés des Sidérophores bactériens⁸.

Comment prévenir les contaminations ?

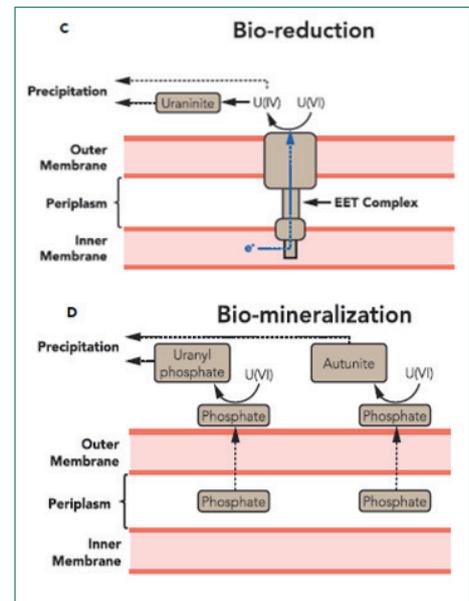
--> S'inspirer du métabolisme de bactéries telles que *S. oneidensis* ou *G. sulfurreducens* capables d'effectuer la bio-réduction ou biominéralisation d'Uranium (VI) soluble en composés immobilisés comme l'Uranium (IV), l'Uraninite, l'Uranyle phosphate ou encore l'Autunite, limitant ainsi la contamination du milieu^{9,10}.

--> S'inspirer ou utiliser des organismes fixateurs et accumulateurs d'éléments radioactifs comme certaines microalgues¹¹ ou la jacinthe d'eau¹².

Comment traiter les déchets radioactifs et les zones contaminées ?

--> À l'échelle moléculaire, s'inspirer de l'architecture des chélateurs biologiques pour extraire de l'uranium de déchets et milieux contaminés par des pièges chimiques biomimétiques¹³.

--> Traitement des eaux contaminées par photo-dégradation des composés organiques et fixation des ions radioactif inspirée du fonctionnement des fixateurs ioniques fongiques¹⁴.



Microbial metal demobilization mechanisms

7 Rashidi, A., Roosta-Azad, R., & Safdari, S. J. (2014). Optimization of operating parameters and rate of uranium bioleaching from a low-grade ore. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 301(2), 341–350. <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3164-4>

8 Ivanov, A. S., Parker, B. F., Zhang, Z., Aguila, B., Sun, Q., Ma, S., Jansone-Popova, S., Arnold, J., Mayes, R. T., Dai, S., Bryantsev, V. S., Rao, L., & Popovs, I. (2019). Siderophore-inspired chelator hijacks uranium from aqueous medium. *Nature Communications*, 10(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08758-1>

9 Newsome, L., Morris, K., & Lloyd, J. R. (2014). The biogeochemistry and bioremediation of uranium and other priority radionuclides. *Chemical Geology*, 363, 164–184. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.10.034>

10 Adesina, O., Anzai, I. A., Avalos, J. L., & Barstow, B. (2017). Embracing Biological Solutions to the Sustainable Energy Challenge. In *Chem* (Vol. 2, Issue 1, pp. 20–51). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2016.12.009>

11 Rivasseau, C., Farhi, E., Atteia, A., Couté, A., Gromova, M., De Gouvion Saint Cyr, D., Boisson, A. M., Féret, A. S., Compagnon, E., & Bligny, R. (2013). An extremely radioresistant green eukaryote for radionuclide bio-decontamination in the nuclear industry. *Energy and Environmental Science*, 6(4), 1230–1239. <https://doi.org/10.1039/c2ee23129h>

12 Saleh, H. M. (2012). Water hyacinth for phytoremediation of radioactive waste simulate contaminated with cesium and cobalt radionuclides. *Nuclear Engineering and Design*, 242, 425–432. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.10.023>

13 Sun, Q., Aguila, B., Perman, J., Ivanov, A. S., Bryantsev, V. S., Earl, L. D., Abney, C. W., Wojtas, L., & Ma, S. (2018). Bio-inspired nano-traps for uranium extraction from seawater and recovery from nuclear waste. *Nature Communications*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04032-y>

14 Li, Y., Zou, G., Yang, S., Wang, Z., Chen, T., Yu, X., Guo, Q., He, R., Duan, T., & Zhu, W. (2019). Integration of bio-inspired adsorption and photodegradation for the treatment of organics-containing radioactive wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 364, 139–145. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.01.169>

RÉCAPITULATIF DES RÉFÉRENCES DES FICHES EXEMPLES

--> COLLECTE DE L'ÉNERGIE

▼ Photovoltaïque

- 1 Sanchez, C., Julián, B., Belleville, P., & Popall, M. (2005). Applications of hybrid organic-inorganic nanocomposites. *Journal of Materials Chemistry*, 15(35–36), 3559–3592. <https://doi.org/10.1039/b509097k>
- 2 Adesina, O., Anzai, I. A., Avalos, J. L., & Barstow, B. (2017). Embracing Biological Solutions to the Sustainable Energy Challenge. In *Chem* (Vol. 2, Issue 1, pp. 20–51). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2016.12.009>
- 3 Shanks, K., Senthilarasu, S., Ffrench-Constant, R. H., & Mallick, T. K. (2015). White butterflies as solar photovoltaic concentrators. *Scientific Reports*, 5(1), 12267. <https://doi.org/10.1038/srep12267>
- 4 Kryuchkov, M., Bilousov, O., Lehmann, J., Fiebig, M., & Katanaev, V. L. (2020). Reverse and forward engineering of *Drosophila* corneal nanocoatings. *Nature*, 585(7825), 383–389. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2707-9>
- 5 Khattab, M. Q., & Tributsch, H. (2016). Fibre-Optical Light Scattering Technology in Polar Bear Hair: A Re-Evaluation and New Results. *Journal of Advanced Biotechnology and Bioengineering*, 3(2), 38–51. <https://doi.org/10.12970/2311-1755.2015.03.02.2>
- 6 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>
- 7 Pogodin, S., Hasan, J., Baulin, V. A., Webb, H. K., Truong, V. K., Phong Nguyen, T. H., Boshkovikj, V., Fluke, C. J., Watson, G. S., Watson, J. A., Crawford, R. J., & Ivanova, E. P. (2013). Biophysical model of bacterial cell interactions with nanopatterned cicada wing surfaces. *Biophysical Journal*, 104(4), 835–840. <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2012.12.046>
- 8 Berthier, S. (2005). Thermoregulation and spectral selectivity of the tropical butterfly *Prepona meander*: A remarkable example of temperature auto-regulation. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 80(7), 1397–1400. <https://doi.org/10.1007/s00339-004-3185-x>
- 9 Shi, N. N., Tsai, C. C., Camino, F., Bernard, G. D., Yu, N., & Wehner, R. (2015). Keeping cool: Enhanced optical reflection and radiative heat dissipation in Saharan silver ants. *Science*, 349(6245), 298–301. <https://doi.org/10.1126/science.aab3564>
- 10 Hui, S. C. M., & Chan, S. C. (2011). Integration of green roof and solar photovoltaic systems. *Joint Symposium 2011: Integrated Building Design in the New Era of Sustainability*, 2011(November), 1–12.
- 11 Noone, C. J., Torrilhon, M., & Mitsos, A. (2012). Heliostat field optimization: A new computationally efficient model and biomimetic layout. *Solar Energy*, 86(2), 792–803. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.12.007>
- 12 Gangwar, P., Kumar, N. M., Singh, A. K., Jayakumar, A., & Mathew, M. (2019). Solar photovoltaic tree and its end-of-life management using thermal and chemical treatments for material recovery. *Case Studies in Thermal Engineering*, 14, 100474. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100474>
- 13 Thompson, E. P., Bombelli, E. L., Shubham, S., Watson, H., Everard, A., D'Ardes, V., Schievano, A., Bocchi, S., Zand, N., Howe, C. J. & Bombelli, P. (2020). Tinted Semi-Transparent Solar Panels Allow Concurrent Production of Crops and Electricity on the Same Cropland. *Advanced Energy Materials*, 10(35), 2001189. <https://doi.org/10.1002/aenm.202001189>
- 14 <https://recherche.univ-pau.fr/fr/axes-scientifiques/environnement-et-materiaux/projetescal.html>
- 15 <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/climate-friendly-industry-using-carbon-dioxide-and-hydrogen-raw-materials-sustainable>
- 16 Atkinson, S. (2020). Evonik works to close carbon dioxide cycle through “artificial photosynthesis” and aims to make green hydrogen more affordable. *Membrane Technology*, 2020(11), 8–9. [https://doi.org/10.1016/s0958-2118\(20\)30194-4](https://doi.org/10.1016/s0958-2118(20)30194-4)
- 17 Haas, T., Krause, R., Weber, R., Demler, M., & Schmid, G. (2018). Technical photosynthesis involving CO₂ electrolysis and fermentation. *Nature Catalysis*, 1(1), 32–39. <https://doi.org/10.1038/s41929-017-0005-1>
- 18 <https://www.siemens-energy.com/global/en/news/magazine/2020/rheticus-worlds-first-automated-co2-electrolyzer.html>
- 19 Nocera, D. G. (2012). The artificial leaf. *Accounts of Chemical Research*, 45(5), 767–776. <https://doi.org/10.1021/ar2003013>
- 20 Jeon, Dasom; Kim, Hyunwoo; Bae, Sanghyun; Lee, Cheolmin; Ryu, J. (2018). Enabling Solar-Fuel Production with Biomimetic Architectures. <https://scholarworks.unist.ac.kr/handle/201301/34242>

- 21 Yu, W., Zhang, S., Chen, J., Xia, P., Richter, M. H., Chen, L., Xu, W., Jin, J., Chen, S., & Peng, T. (2018). Biomimetic Z-scheme photocatalyst with a tandem solid-state electron flow catalyzing H₂ evolution. *Journal of Materials Chemistry A*, 6(32), 15668–15674. <https://doi.org/10.1039/c8ta02922a>
- 22 Guo, F., Chen, J., Zhao, J., Chen, Z., Xia, D., Zhan, Z., & Wang, Q. (2020). Z-scheme heterojunction g-C₃N₄@PDA/BiOBr with biomimetic polydopamine as electron transfer mediators for enhanced visible-light driven degradation of sulfamethoxazole. *Chemical Engineering Journal*, 386, 124014. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124014>

▼ Éolien

- 1 Yu, C., Liu, M., Zhang, C., Yan, H., Zhang, M., Wu, Q., Liu, M., & Jiang, L. (2020). Bio-inspired drag reduction: From nature organisms to artificial functional surfaces. *Giant*, 2, 100017. <https://doi.org/10.1016/j.giant.2020.100017>
- 2 Abate, G., Mavris, D. N., & Sankar, L. N. (2019). Performance effects of leading-edge tubercles on the NREL Phase VI wind turbine blade. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, 141(5). <https://doi.org/10.1115/1.4042529>
- 3 <https://whalepowercorp.wordpress.com/>
- 4 <https://www.biome-renewables.com/>
- 5 Gaitan-Aroca, J., Sierra, F., & Contreras, J. U. C. (2020). Bio-inspired rotor design characterization of a horizontal axis wind turbine. *Energies*, 13(14), 3515. <https://doi.org/10.3390/en13143515>
- 6 Guerrero, J. E., Maestro, D., & Bottaro, A. (2012). Biomimetic spiroid winglets for lift and drag control. *Comptes Rendus - Mécanique*, 340(1–2), 67–80. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2011.11.007>
- 7 <http://www.adv-tech.fr/eolienne/>
- 8 Gaitan-Aroca, J., Sierra, F., & Contreras, J. U. C. (2020). Bio-Inspired Rotor Design Characterization of a Horizontal Axis Wind Turbine. *Energies 2020, Vol. 13, Page 3515, 13(14), 3515*. <https://doi.org/10.3390/EN13143515>
- 9 Whittlesey, R. W., Liska, S., & Dabiri, J. O. (2010). Fish schooling as a basis for vertical axis wind turbine farm design. *Bioinspiration & Biomimetics*, 5(3), 035005. <https://doi.org/10.1088/1748-3182/5/3/035005>
- 10 Portugal, S. (2016). Lissaman, Shollenberger and formation flight in birds. *Journal of Experimental Biology*, 219(18), 2778–2780. <https://doi.org/10.1242/jeb.148114>

▼ Turbines hydrauliques

- 1 Fu, Y. F., Yuan, C. Q., & Bai, X. Q. (2017). Marine drag reduction of shark skin inspired riblet surfaces. *Biosurface and Biotribology*, 3(1), 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.bsbt.2017.02.001>
- 2 Bach, D., Schmich, F., Masselter, T., & Speck, T. (2015). A review of selected pumping systems in nature and engineering - Potential biomimetic concepts for improving displacement pumps and pulsation damping. In *Bioinspiration and Biomimetics (Vol. 10, Issue 5)*. Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/10/5/051001>
- 3 <https://www.wavera.tech/>, consulté en décembre 2020
- 4 Träsch, M., Déporte, A., Delacroix, S., Drevet, J. B., Gaurier, B., & Germain, G. (2018). Power estimates of an undulating membrane tidal energy converter. *Ocean Engineering*, 148, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.11.002>
- 5 <http://www.eel-energy.fr/en/eel-tidal-energy-convertor/>
- 6 Shi, W., Atlar, M., Rosli, R., Aktas, B., & Norman, R. (2016). Cavitation observations and noise measurements of horizontal axis tidal turbines with biomimetic blade leading-edge designs. *Ocean Engineering*, 121, 143–155. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.05.030>
- 7 Gonzalez-Avila, S. R., Nguyen, D. M., Arunachalam, S., Domingues, E. M., Mishra, H., & Ohl, C. D. (2020). Mitigating cavitation erosion using biomimetic gas-entrapping microtextured surfaces (GEMS). *Science Advances*, 6(13), 6192–6219. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax6192>
- 8 Gittens, J. E., Smith, T. J., Suleiman, R., & Akid, R. (2013). Current and emerging environmentally-friendly systems for fouling control in the marine environment. In *Biotechnology Advances (Vol. 31, Issue 8, pp. 1738–1753)*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.09.002>
- 9 « Matériaux bio-inspirés », Ceebios, 2020
- 10 <https://www.basiliskconcrete.com/en/>

- 1 Fu, Y. F., Yuan, C. Q., & Bai, X. Q. (2017). Marine drag reduction of shark skin inspired riblet surfaces. *Biosurface and Biotribology*, 3(1), 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.bsbt.2017.02.001>
- 2 Bach, D., Schmich, F., Masselter, T., & Speck, T. (2015). A review of selected pumping systems in nature and engineering - Potential biomimetic concepts for improving displacement pumps and pulsation damping. In *Bioinspiration and Biomimetics* (Vol. 10, Issue 5). Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/10/5/051001>
- 3 <https://www.wavera.tech/> ,consulté en décembre 2020
- 4 Träsch, M., Déporte, A., Delacroix, S., Drevet, J. B., Gaurier, B., & Germain, G. (2018). Power estimates of an undulating membrane tidal energy converter. *Ocean Engineering*, 148, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.11.002>
- 5 <http://www.eel-energy.fr/en/eel-tidal-energy-convertor/>
- 6 Shi, W., Atlar, M., Rosli, R., Aktas, B., & Norman, R. (2016). Cavitation observations and noise measurements of horizontal axis tidal turbines with biomimetic blade leading-edge designs. *Ocean Engineering*, 121, 143–155. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.05.030>
- 7 Gonzalez-Avila, S. R., Nguyen, D. M., Arunachalam, S., Domingues, E. M., Mishra, H., & Ohl, C. D. (2020). Mitigating cavitation erosion using biomimetic gas-entrapping microtextured surfaces (GEMS). *Science Advances*, 6(13), 6192–6219. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax6192>
- 8 Gittens, J. E., Smith, T. J., Suleiman, R., & Akid, R. (2013). Current and emerging environmentally-friendly systems for fouling control in the marine environment. In *Biotechnology Advances* (Vol. 31, Issue 8, pp. 1738–1753). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.09.002>
- 9 « Matériaux bio-inspirés », Ceebios, 2020
- 10 <https://www.basiliskconcrete.com/en/>
- 11 Stringer, C. C., & Polagye, B. L. (2020). Implications of biofouling on cross-flow turbine performance. *SN Applied Sciences*, 2(3), 1-13. <https://doi.org/10.1007/S42452-020-2286-2/FIGURES/9>
- 12 Pedersen Zari, M. (2015). Can biomimicry be a useful tool for design for climate change adaptation and mitigation? In *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09287-4_4
- 13 <https://bps.energy/>
- 14 Li, W., Pei, Y., Zhang, C., & Kottapalli, A. G. P. (2021). Bioinspired designs and biomimetic applications of triboelectric nanogenerators. In *Nano Energy* (Vol. 84, p. 105865). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.105865>
- 15 Clark, I. A., Nathan Alexander, W., & Devenport, W. (2017). Bio-inspired finlets for the reduction of marine rotor noise. 23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2017. <https://doi.org/10.2514/6.2017-3867>
- 16 <https://www.seaboost.fr/>

▼ Méthaniseurs

- 1 Wang, J., Cheng, C., Zeng, X., Zheng, J., & Zhou, Z. (2020). Bionic-tribology design of tooth surface of grinding head based on the bovine molar. *Tribology International*, 143, 106066. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106066>
- 2 Weimer, P. J., & Hall, M. B. (2020). The potential for biomimetic application of rumination to bioreactor design. In *Biomass and Bioenergy* (Vol. 143, p. 105822). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105822>
- 3 Olah, G. A. (2013). Towards Oil Independence Through Renewable Methanol Chemistry. *Angewandte Chemie International Edition*, 52(1), 104–107. <https://doi.org/10.1002/anie.201204995>
- 4 Sørensen, A., Lübeck, M., Lübeck, P. S., & Ahring, B. K. (2013). Fungal Beta-Glucosidases: A Bottleneck in Industrial Use of Lignocellulosic Materials. *Biomolecules*, 3, 612–631. <https://doi.org/10.3390/biom3030612>
- 5 Liang, J., Nabi, M., Zhang, P., Zhang, G., Cai, Y., Wang, Q., Zhou, Z., & Ding, Y. (2020). Promising biological conversion of lignocellulosic biomass to renewable energy with rumen microorganisms: A comprehensive review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 134, p. 110335). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110335>
- 6 Wang, V. C. C., Maji, S., Chen, P. P. Y., Lee, H. K., Yu, S. S. F., & Chan, S. I. (2017). Alkane Oxidation: Methane Monooxygenases, Related Enzymes, and Their Biomimetics. In *Chemical Reviews* (Vol. 117, Issue 13, pp. 8574–8621). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00624>
- 7 Carvalho, A. L., Dias, F. M. V., Prates, J. A. M., Nagy, T., Gilbert, H. J., Davies, G. J., Ferreira, L. M. A., Romão, M. J., & Fontes, C. M. G. A. (2003). Cellulosome assembly revealed by the crystal structure of the cohesin-dockerin complex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(SUPPL. 2), 13809–13814. <https://doi.org/10.1073/pnas.1936124100>

- 8 Chang, J. J., Anandharaj, M., Ho, C. Y., Tsuge, K., Tsai, T. Y., Ke, H. M., Lin, Y. J., Ha Tran, M. D., Li, W. H., & Huang, C. C. (2018). Biomimetic strategy for constructing *Clostridium thermocellum* cellulosomal operons in *Bacillus subtilis*. *Biotechnology for Biofuels*, 11(1), 157. <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1151-7>

▼ Nucléaire

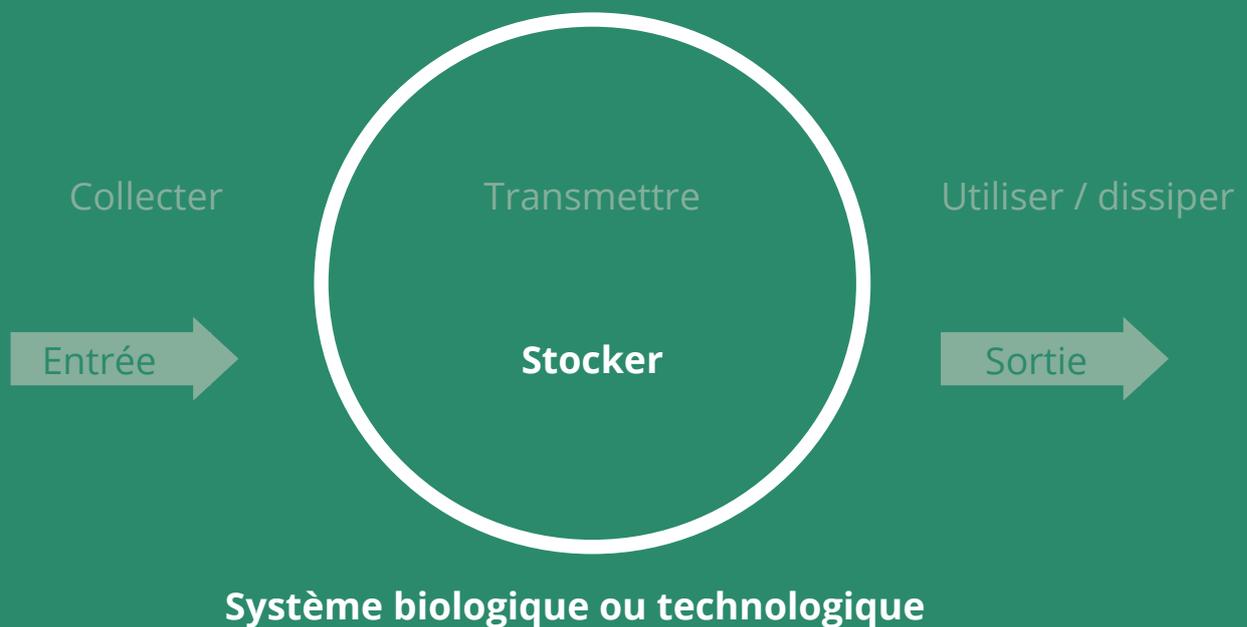
- 1 Shunk, G., Gomez, X., & Aversch, N. (2020). A Self-Replicating Radiation-Shield for Human Deep-Space Exploration: Radiotrophic Fungi can Attenuate Ionizing Radiation aboard the International Space Station. *BioRxiv*, 2020.07.16.205534. <https://doi.org/10.1101/2020.07.16.205534>
- 2 Pacelli, C., Bryan, R. A., Onofri, S., Selbmann, L., Shuryak, I., & Dadachova, E. (2017). Melanin is effective in protecting fast and slow growing fungi from various types of ionizing radiation. *Environmental Microbiology*, 19(4), 1612–1624. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13681>
- 3 Speck, O., & Speck, T. (2019). An Overview of Bioinspired and Biomimetic Self-Repairing Materials. *Biomimetics*, 4(1), 26. <https://doi.org/10.3390/biomimetics4010026>
- 4 Amoli, V., Kim, S. Y., Kim, J. S., Choi, H., Koo, J., & Kim, D. H. (2019). Biomimetics for high-performance flexible tactile sensors and advanced artificial sensory systems. In *Journal of Materials Chemistry C* (Vol. 7, Issue 47, pp. 14816–14844). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c9tc05392a>
- 5 Le souffle d'air du grillon | Nature = Futur !, https://www.youtube.com/watch?v=SwuRz9-JqT0&ab_channel=Mus%C3%A9umnationald%27Histoirenaturelle, (en mars 2021)
- 6 Bionic Learning Network | Festo Corporate, <https://www.festo.com/group/en/cms/10156.htm>, (en mars 2021)
- 7 Rashidi, A., Roosta-Azad, R., & Safdari, S. J. (2014). Optimization of operating parameters and rate of uranium bioleaching from a low-grade ore. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 301(2), 341–350. <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3164-4>
- 8 Ivanov, A. S., Parker, B. F., Zhang, Z., Aguila, B., Sun, Q., Ma, S., Jansone-Popova, S., Arnold, J., Mayes, R. T., Dai, S., Bryantsev, V. S., Rao, L., & Popovs, I. (2019). Siderophore-inspired chelator hijacks uranium from aqueous medium. *Nature Communications*, 10(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08758-1>
- 9 Newsome, L., Morris, K., & Lloyd, J. R. (2014). The biogeochemistry and bioremediation of uranium and other priority radionuclides. *Chemical Geology*, 363, 164–184. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.10.034>
- 10 Adesina, O., Anzai, I. A., Avalos, J. L., & Barstow, B. (2017). Embracing Biological Solutions to the Sustainable Energy Challenge. In *Chem* (Vol. 2, Issue 1, pp. 20–51). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2016.12.009>
- 11 Rivasseau, C., Farhi, E., Atteia, A., Couté, A., Gromova, M., De Gouvion Saint Cyr, D., Boisson, A. M., Féret, A. S., Compagnon, E., & Bligny, R. (2013). An extremely radioresistant green eukaryote for radionuclide bio-decontamination in the nuclear industry. *Energy and Environmental Science*, 6(4), 1230–1239. <https://doi.org/10.1039/c2ee23129h>
- 12 Saleh, H. M. (2012). Water hyacinth for phytoremediation of radioactive waste simulate contaminated with cesium and cobalt radionuclides. *Nuclear Engineering and Design*, 242, 425–432. <https://doi.org/10.1016/j.nuceng-des.2011.10.023>
- 13 Sun, Q., Aguila, B., Perman, J., Ivanov, A. S., Bryantsev, V. S., Earl, L. D., Abney, C. W., Wojtas, L., & Ma, S. (2018). Bio-inspired nano-traps for uranium extraction from seawater and recovery from nuclear waste. *Nature Communications*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04032-y>
- 14 Li, Y., Zou, G., Yang, S., Wang, Z., Chen, T., Yu, X., Guo, Q., He, R., Duan, T., & Zhu, W. (2019). Integration of bio-inspired adsorption and photodegradation for the treatment of organics-containing radioactive wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 364, 139–145. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.01.169>

LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE

Le stockage d'énergie est défini dans ce rapport comme la fonction permettant de séparer dans le temps l'utilisation d'une quantité d'énergie donnée, notamment en jouant sur la réversibilité des conversions énergétiques. On distinguera le stockage des matières premières énergétiques (vecteurs énergétiques utilisés en collecte), comme la biomasse, des vecteurs énergétiques spécifiquement utilisés comme format de stockage à la suite d'une collecte initiale d'énergie, notamment par conversion d'électricité.

De même que pour la collecte d'énergie nous traiterons la question du stockage énergétique à travers 4 typologies d'énergie : thermique, chimique, potentielle de pesanteur et cinétique.

Comme précédemment, un système technique représentatif des stratégies actuelles de collecte est abordé dans le détail, comme le STEP, le volant d'inertie, etc.



VOLANT D'INERTIE

Un volant inertiel est un système de stockage d'énergie sous forme d'énergie cinétique. En phase de charge, la vitesse de rotation d'une masse sur un axe augmente grâce à un moteur électrique. A l'inverse, il devient un générateur en phase de décharge, ce qui réduit la vitesse de rotation du rotor. Les caractéristiques de ce type de stockage le rendent pertinent pour des usages de lissage de la production des énergies renouvelables, de suivi de charge et de régulation du réseau électrique. La thématique de recherche principale pour améliorer ces systèmes repose sur le matériau constitutif de la masse en rotation, qui trouve des axes de recherche prometteur dans le champ des matériaux. La quantité d'énergie est proportionnelle au carré de la vitesse de rotation sachant que la quantité d'énergie maximale stockable est proportionnelle à la limite élastique du matériau utilisé¹.



¹ Amiryar, M. E., & Pullen, K. R. (2017). A review of flywheel energy storage system technologies and their applications. *Applied Sciences*, 7(3). <https://doi.org/10.3390/app7030286>



Exemples d'opportunités biomimétiques pour les technologies associées aux volants d'inertie

▼ Tribiologie

Comment gérer les problématiques de frottements générateurs d'une part conséquente des pertes ?

--> Le vivant gère des enjeux de frottements, dans le cadre de la fonction de locomotion entre autres. La tribologie, c'est-à-dire l'étude des frottements, s'intéresse à des stratégies et structures diverses et variées (structuration de surface, revêtement, sécrétions omniphobes etc).²



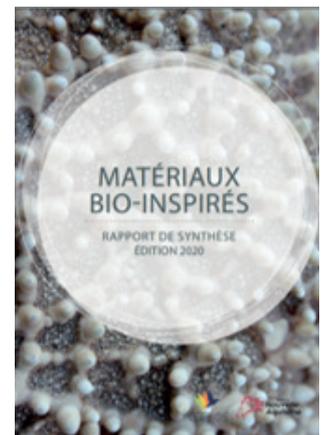
Nepenthes et sa surface omniphobe, libre de droit

▼ Propriétés mécaniques et matériaux

Les matériaux produits et constitutifs du vivant font l'objet d'une importance toute particulière dans le domaine du biomimétisme³. Leurs performances sont remarquables en termes de résistance, dureté, élasticité, légèreté, auto-réparation etc. avec des représentants comme la coquille de l'ormeau, le fil de soie d'araignée etc. Dans le contexte de la transition écologique, leurs processus de synthèse sont bien plus vertueux que notre manufacture industrielle conventionnelle. Auto-assemblés à température et pression ambiantes à partir de briques élémentaires locales, abondantes et non-toxiques, les matériaux biologiques deviennent l'axe d'effort prioritaire du biomimétisme en France, comme identifiés dans le deuxième rapport du Ceebios.⁴ L'avènement du PIA (Programme d'Investissement d'Avenir) BiOMIg⁵ porté par le Ceebios et ses partenaires, pour le développement d'une plateforme d'innovation ouverte sur les matériaux bio-inspirés, concrétise cette accélération et met à contribution les dernières avancées en termes de techniques de manufacture (fabrication additive, procédés sol-gel, texturation de surface par laser etc.) pour la transposition des stratégies biologiques.



Programme BiOMIg, Ceebios



Synthèse thématique *Matériaux bio-inspirés*, Ceebios

² Startup deeptech bio-inspirée : <https://www.helicoidind.com/helicoid-technology>, consulté en décembre 2020, <https://www.amsilk.com/industries/biosteel-fibers/>, consulté en décembre 2020

³ « Matériaux bio-inspirés », Ceebios, édition 2020

⁴ <https://presse.bpifrance.fr/ceebios-obtient-un-financement-public-de-22-millions-deuros-pour-le-developpement-de-biomig-sa-plateforme-dinnovation-ouverte-pour-les-materiaux-bio-inspires/>

⁵ Siddaiah, A., & Menezes, P. L. (2016). Advances in Bio-inspired Tribology for Engineering Applications. In *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion* (Vol. 2, Issue 4, pp. 1-19). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/s40735-016-0053-0>

STOCKAGE D'ÉNERGIE ÉLECTROCHIMIQUE

Les piles (procédé non-réversible) comme les piles à H₂ et batteries (procédé réversible) comme les batteries Li-ion sont des systèmes de stockage d'énergie dont les composants peuvent réagir entre eux (réaction d'oxydoréduction) pour fournir un courant électrique. Les axes de bio-inspiration sont multiples et constituent déjà un champ synthétisé dans des travaux académiques^{1,2}. Comme pour les volants inertiels, les batteries au sens large ont un rôle de support au déploiement des EnR et régulation du réseau électrique. Elles occupent de plus en plus une place qui va être amenée à croître significativement concernant la mobilité au même titre que les piles à combustible.



¹ Ding, M., Chen, G., Xu, W., Jia, C., & Luo, H. (2020). Bio-inspired synthesis of nanomaterials and smart structures for electrochemical energy storage and conversion. *Nano Materials Science*, 2(3), 264–280. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2019.09.011>

² Lee, B., Ko, Y., Kwon, G., Lee, S., Ku, K., Kim, J., & Kang, K. (2018). Exploiting Biological Systems: Toward Eco-Friendly and High-Efficiency Rechargeable Batteries. *Joule*, 2, 61–75. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.10.013>



Exemples d'opportunités biomimétiques pour les technologies associées aux systèmes électrochimiques 1/2

▼ Nature des entités réactives

Comment faire face aux enjeux d'extraction et fin de vie des composants notamment métalliques ?

--> Biohydrométallurgie et biolixiviation comme procédés d'extraction douce de matériaux métalliques^{3,4}.

--> Remédier des sols grâce aux capacités d'absorption des plantes et champignons, phyto/mycoremédiation^{5,6}.

Quelles alternatives aux composants peu abondants tels que ceux constitutifs des catalyseurs (ex. platine) ?

--> Utiliser des entités organiques biodégradables, recyclables et abondantes plutôt que des éléments métalliques extraits du sol^{7,8}.

--> Alternative aux éléments particulièrement rares comme le platine en tant que catalyseur : catalyse bio inspirée des hydrogénases^{9,10}.

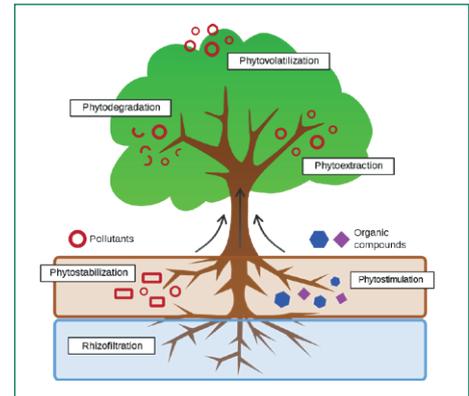


Schéma des sous-processus de la phytoremédiation (crédit :Townie, Wikipedia)

▼ Architecture du système

Comment optimiser l'architecture des composants d'échange et de stockage (électrolytes et électrodes) des dispositifs électrochimiques ?

--> S'inspirer des structures biologiques de stockage et disponibilité d'entités pour des réactions (ex: structure capillaires/muscle)¹¹.

--> Le vivant est rempli de structures à rapport volume/surface adaptées à la fonction d'échange ou de stockage : porosité des structures biologiques, structuration de surfaces au laser pour augmenter la surface d'échange^{12,13}.

--> Ces sujets sont valables pour l'architecture d'une batterie (ex : Li-ion) mais aussi pour les problématiques de stockage de H₂ (notamment la piste des nanotubes de carbone pour les piles à combustible)¹⁴.



Architecture d'électrode inspirée de l'architecture musculaire

3 Mulligan, C. N., Kamali, M., & Gibbs, B. F. (2004). Bioleaching of heavy metals from a low-grade mining ore using *Aspergillus niger*. *Journal of Hazardous Materials*, 110(1-3), 77-84. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.02.040>

4 Horeh, N. B., Mousavi, S. M., & Shojaosadati, S. A. (2016). Bioleaching of valuable metals from spent lithium-ion mobile phone batteries using *Aspergillus Niger*. *Journal of Power Sources*, 320, 257-266. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.04.104>

5 <https://www.novobiom.com/>, consulté en décembre 2020

6 Claude Grison CNRS, <https://www.chimeco-lab.com/>, consulté en décembre 2020

7 Zhu, Z., Kin Tam, T., Sun, F., You, C., & Percival Zhang, Y. H. (2014). A high-energy-density sugar biobattery based on a synthetic enzymatic pathway. *Nature Communications*, 5(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/ncomms4026>

8 Ding, Y., & Yu, G. (2016). A Bio-Inspired, Heavy-Metal-Free, Dual-Electrolyte Liquid Battery towards Sustainable Energy Storage. *Angewandte Chemie*, 128(15), 4850-4854. <https://doi.org/10.1002/ange.201600705>

9 Brazzolotto, D., Gennari, M., Queyriaux, N., Simmons, T. R., Pécaut, J., Demeshko, S., Meyer, F., Orio, M., Artero, V., & Duboc, C. (2016). Nickel-centred proton reduction catalysis in a model of [NiFe] hydrogenase. *Nature Chemistry*, 8(11), 1054-1060. <https://doi.org/10.1038/nchem.257510-15>. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2017.07.017>

10 Artero, V., & Fontecave, M. (2005). Some general principles for designing electrocatalysts with hydrogenase activity. In *Coordination Chemistry Reviews* (Vol. 249, Issues 15-16 SPEC. ISS., pp. 1518-1535). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2005.01.014>

11 Li, Y., Wang, M. Q., Chen, Y., Hu, L., Liu, T., Bao, S., & Xu, M. (2018). Muscle-like electrode design for Li-Te batteries. *Energy Storage Materials*, 10, 10-15. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2017.07.017>

12 Thekkekara, L. V., & Gu, M. (2017). Bioinspired fractal electrodes for solar energy storages. *Scientific Reports*, 7(March), 1-9. <https://doi.org/10.1038/srep45585>

13 Cheng, J., Xu, Q., Wang, X., Li, Z., Wu, F., Shao, J., & Xie, H. (2019). Ultrahigh-surface-area nitrogen-doped hierarchically porous carbon materials derived from chitosan and betaine hydrochloride sustainable precursors for high-performance supercapacitors. *Sustainable Energy and Fuels*, 3(5), 1215-1224. <https://doi.org/10.1039/c9se00072k>

14 The international Consortium for Fire Safety, H. & T. environment. (n.d.). Safety issues regarding fuel cell vehicle and hydrogen vehicles. Retrieved December 22, 2020



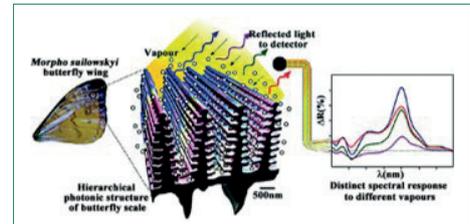
Exemples d'opportunités biomimétiques pour les technologies associées aux systèmes électrochimiques 2/2

▼ Intégrité et sécurité

Comment prévenir les fuites de combustible d'un point de vue pertes et sécurité ?

--> Capteurs inspirés d'organes sensoriels du vivant pour détection notamment de gaz : perception chimique du bombyx du murier¹⁵, perception aérodynamique des poils du criquet¹⁶, capteur d'H₂ inspiré de l'aile du Morpho¹⁷ etc.

--> La température est un facteur majeur de performance et de sécurité de ces dispositifs. Le vivant gère les échanges thermiques constamment et ses stratégies sont transposables de manières diverses sur ces stratégies^{18,19}.



Interaction entre composition moléculaire ambiante et surface nano-structurée de l'aile de Morpho¹⁷

15 Kaissling, K. E. (2009). The sensitivity of the insect nose: The example of Bombyx mori. Studies in Computational Intelligence, 188, 45–52. https://doi.org/10.1007/978-3-642-00176-5_3

16 Krijnen, G., Lammerink, T., Wiegerink, R., & Casas, J. (2007). Cricket inspired flow-sensor arrays. Proceedings of IEEE Sensors, 539–546. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2007.4388455>

17 He, J., Villa, N. S., Luo, Z., An, S., Shen, Q., Tao, P., Song, C., Wu, J., Deng, T., & Shang, W. (2018). Integrating plasmonic nanostructures with natural photonic architectures in Pd-modified: Morpho butterfly wings for sensitive hydrogen gas sensing. RSC Advances, 8(57), 32395–32400. <https://doi.org/10.1039/c8ra05046e>

18 Ma, S., Jiang, M., Tao, P., Song, C., Wu, J., Wang, J., Deng, T., & Shang, W. (2018). Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review. In Progress in Natural Science: Materials International (Vol. 28, Issue 6, pp. 653–666). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.11.002>

19 Jian, Y., Handschuh-Wang, S., Zhang, J., Lu, W., Zhou, X., & Chen, T. (2021). Biomimetic anti-freezing polymeric hydrogels: keeping soft-wet materials active in cold environments. Materials Horizons. <https://doi.org/10.1039/d0mh01029d>

STOCKAGE D'ÉNERGIE THERMIQUE

L'énergie thermique peut être stockée sous forme latente (matériaux à changement de phase) ou sensible, notamment de manière passive grâce à la photothermie. Bien que ces dispositifs ne soient pas capables de conversion réversible, le découplage dans le temps de la collecte et de l'utilisation de cette typologie d'énergie les range dans ce rapport dans la partie « stockage ».

Les champs d'innovation des technologies de stockage thermique sont à mettre en relation avec ceux des technologies de chauffage (par exemple, optimiser l'architecture des échangeurs de chaleur) traités plus loin dans la partie Utilisation.

Un accent est mis ici sur les innovations portant sur la stabilité du vecteur thermique - qui est une caractéristique majeure pour un système de stockage énergétique - et notamment gestion des fuites thermiques.





Le biomimétisme comme voie de résolution des défis technologiques des systèmes de stockage thermique 1/2

▼ Enjeu des échangeurs de chaleur

Comment maximiser les échanges de chaleur entre deux systèmes ?

--> Les structures d'échanges biologiques (de chaleur, de matière) comme les poumons ou les feuilles sont des modèles d'intérêt pour la conception d'échangeurs bio inspirés notamment en termes de structuration de surface^{1,2}.

--> Par exemple, le modèle des naseaux de chameau est une surface d'échange agencée de manière à gérer au mieux la ressource en eau via des échanges thermiques, qui est adaptée à l'environnement désertique, et dont le modèle a permis de concevoir un système frugal de gestion de température et humidité³.

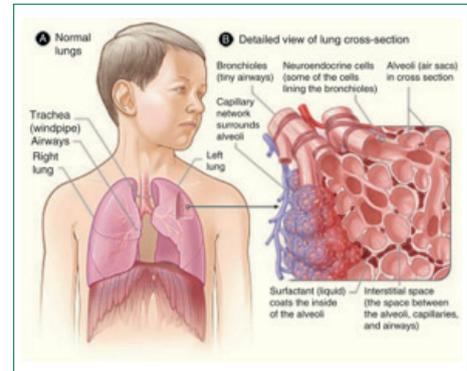
--> Ramifier son échangeur de chaleur en prenant comme modèle les systèmes « vasculaires » biologiques de micro-canaux, ici pour thermoréguler des composants électroniques⁴.

Comment maximiser l'absorption de rayonnement incident ?

--> « Fibres optiques » des enveloppes biologiques et stratégie de thermo régulation inspirent la conversion solaire-thermique^{5,6}.

Comment intégrer les enjeux d'absorption d'énergie dans un système multifonctionnel de type « façade de bâtiment » ?

--> Conception de façades transparentes inspirées de modèles comme la peau avec circulation de fluides (capillaires) pour améliorer les échanges^{7,8,9}.



Hierarchical multiscale structures in the human lung.
(Source: <https://en.wikipedia.org/wiki/Lung>. Licensed under CC BY 3.0.)

1 Ababneh, M. T. (2018). The Engineering History of Thermal Materials. Bioinspired Engineering of Thermal Materials, 25–46. <https://doi.org/10.1002/9783527687596.ch2>

2 Rupp, A. I. K. S., & Gruber, P. (2019). Biomimetic Groundwork for Thermal Exchange Structures Inspired by Plant Leaf Design. Biomimetics, 4(4), 75. <https://doi.org/10.3390/biomimetics4040075>

3 Shahda, M. M., Abd Elhafeez, M. M., & El Mokadem, A. A. (2018). Camel's nose strategy: New innovative architectural application for desert buildings. Solar Energy, 176, 725–741. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.072>

4 K, K., & Balakrishnan, P. (2020). Numerical analysis of microchannel based bio-inspired heat sinks with multiple inlet-outlet pairs for cooling square shaped electronic circuits. Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME), 0. <https://doi.org/10.22061/jcarme.2020.4854.1594>

5 Chang, C., Nie, X., Li, X., Tao, P., Fu, B., Wang, Z., Xu, J., Ye, Q., Zhang, J., Song, C., Shang, W., & Deng, T. (2020). Bioinspired roll-to-roll solar-thermal energy harvesting within form-stable flexible composite phase change materials. Journal of Materials Chemistry A, 8(40), 20970–20978. <https://doi.org/10.1039/d0ta07289c>

6 Engelhardt, S., & Sarsour, J. (2015). Solar heat harvesting and transparent insulation in textile architecture inspired by polar bear fur. Energy and Buildings, 103, 96-106.

7 Gosztonyi, S., & Gruber, P. (2013). BioSkin – Research potentials for biologically inspired energy efficient façade components and systems.

8 Muntinga, A. E. (2013). The STAR-system: A bio-inspired solution for a thermo regulative façade.

9 <http://smart-panel.tech/>, consulté en janvier 2021



Le biomimétisme comme voie de résolution des défis technologiques des systèmes de stockage thermique 2/2

▼ Réduction des pertes

Comment réduire au maximum les pertes thermiques notamment via l'isolation ?

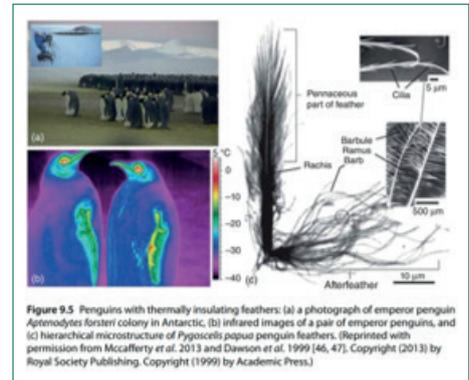
--> Piéger de l'air dans une structure poreuse de type fourrure ou plume¹⁰.

--> Jouer sur la nature radiative des structures sur la base de réflexion des enveloppes biologiques¹¹.

--> Améliorer l'hydrophobicité des structures isolantes pour prévenir l'échange thermique augmenté à cause de l'eau adsorbée¹¹.

--> Jouer sur des structures spécifiques à conduction ou absorption limitée (ex : lipides)¹¹.

--> Se reposer sur un système dynamique de fluide caloporteur « sous-cutané » comme chez les organismes homéothermes¹².



Plume thermorégulante du pingouin

▼ Stockage thermique, biomimétisme et habitat

Les enjeux de stockage thermique sont primordiaux dans le domaine du bâtiment dit « à zéro énergie ». De manière générale, les enveloppes biologiques (fourrures, peaux, carapaces, écorces etc.) sont des modèles majeurs d'inspiration dans le domaine de l'architecture biomimétique, pour lequel une thèse MNHN/Ceebios¹³ et un rapport Ceebios/Région Nouvelle-Aquitaine a été rédigé spécifiquement¹⁴.



Synthèse thématique
Projet urbain bio-inspiré, Ceebios

10 Metwally, S., Martínez Comesaña, S., Zarzyka, M., Szewczyk, P. K., Karbowiczek, J. E., & Stachewicz, U. (2019). Thermal insulation design bioinspired by microstructure study of penguin feather and polar bear hair. *Acta Biomaterialia*, 91, 270–283. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2019.04.031>
11 Tao, P., & McCafferty, D. J. (2018). Bioinspired Thermal Insulation and Storage Materials. In *Bioinspired Engineering of Thermal Materials* (pp. 201–223). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. <https://doi.org/10.1002/9783527687596.ch9>

12 Hatton, B. D., Wheeldon, I., Hancock, M. J., Kolle, M., Aizenberg, J., & Ingber, D. E. (2013). An artificial vasculature for adaptive thermal control of windows. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 117, 429–436. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.06.027>

13 Estelle Cruz, (2021), "Multi-criteria analysis of biological envelopes: the case study of built envelopes"

14 « Projet urbain bio-inspiré », Ceebios, 2020, <https://ceebios.com/wp-content/uploads/2020/11/RapportSynthese-UrbBI-201125-web.pdf>, version complète disponible à la demande

RÉCAPITULATIF DES RÉFÉRENCES DES FICHES EXEMPLES

--> STOCKAGE DE L'ÉNERGIE

VOLANT D'INERTIE

- 1 Amiryar, M. E., & Pullen, K. R. (2017). A review of flywheel energy storage system technologies and their applications. *Applied Sciences*, 7(3). <https://doi.org/10.3390/app7030286>
- 2 Siddaiah, A., & Menezes, P. L. (2016). Advances in Bio-inspired Tribology for Engineering Applications. In *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion* (Vol. 2, Issue 4, pp. 1–19). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/s40735-016-0053-0>
- 3 Startup deeptech bio-inspirée : <https://www.helicoidind.com/helicoid-technology>, consulté en décembre 2020 ; <https://www.amsilk.com/industries/biosteel-fibers/>, consulté en décembre 2020
- 4 « Matériaux bio-inspirés », Ceebios, édition 2020
- 5 <https://presse.bpifrance.fr/ceebios-obtient-un-financement-public-de-22-millions-deuros-pour-le-developpement-de-biomig-sa-plateforme-dinnovation-ouverte-pour-les-materiaux-bio-inspires/>

STOCKAGE ÉLECTROCHIMIQUE

- 1 Ding, M., Chen, G., Xu, W., Jia, C., & Luo, H. (2020). Bio-inspired synthesis of nanomaterials and smart structures for electrochemical energy storage and conversion. *Nano Materials Science*, 2(3), 264–280. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2019.09.011>
- 2 Lee, B., Ko, Y., Kwon, G., Lee, S., Ku, K., Kim, J., & Kang, K. (2018). Exploiting Biological Systems: Toward Eco-Friendly and High-Efficiency Rechargeable Batteries. *Joule*, 2, 61–75. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.10.013>
- 3 Mulligan, C. N., Kamali, M., & Gibbs, B. F. (2004). Bioleaching of heavy metals from a low-grade mining ore using *Aspergillus niger*. *Journal of Hazardous Materials*, 110(1–3), 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.02.040>
- 4 Horeh, N. B., Mousavi, S. M., & Shojaosadati, S. A. (2016). Bioleaching of valuable metals from spent lithium-ion mobile phone batteries using *Aspergillus Niger*. *Journal of Power Sources*, 320, 257–266. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.04.104>
- 5 <https://www.novobiom.com/>, consulté en décembre 2020
- 6 Claude Grison CNRS, <https://www.chimeco-lab.com/>, consulté en décembre 2020
- 7 Zhu, Z., Kin Tam, T., Sun, F., You, C., & Percival Zhang, Y. H. (2014). A high-energy-density sugar biobattery based on a synthetic enzymatic pathway. *Nature Communications*, 5(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/ncomms4026>
- 8 Ding, Y., & Yu, G. (2016). A Bio-Inspired, Heavy-Metal-Free, Dual-Electrolyte Liquid Battery towards Sustainable Energy Storage. *Angewandte Chemie*, 128(15), 4850–4854. <https://doi.org/10.1002/ange.201600705>
- 9 Brazzolotto, D., Gennari, M., Queyriaux, N., Simmons, T. R., Pécaut, J., Demeshko, S., Meyer, F., Orio, M., Artero, V., & Duboc, C. (2016). Nickel-centred proton reduction catalysis in a model of [NiFe] hydrogenase. *Nature Chemistry*, 8(11), 1054–1060. <https://doi.org/10.1038/nchem.2575>
- 10 Artero, V., & Fontecave, M. (2005). Some general principles for designing electrocatalysts with hydrogenase activity. In *Coordination Chemistry Reviews* (Vol. 249, Issues 15-16 SPEC. ISS., pp. 1518–1535). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2005.01.014>
- 11 Li, Y., Wang, M. Q., Chen, Y., Hu, L., Liu, T., Bao, S., & Xu, M. (2018). Muscle-like electrode design for Li-Te batteries. *Energy Storage Materials*, 10, 10–15. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2017.07.017>
- 12 Thekkekara, L. V., & Gu, M. (2017). Bioinspired fractal electrodes for solar energy storages. *Scientific Reports*, 7(March), 1–9. <https://doi.org/10.1038/srep4558513> https://www.festo.com/fr/fr/e/a-propos-de-festo/innovation-et-technologie/bionic-learning-network-id_31842/, consulté en février 2021
- 13 Cheng, J., Xu, Q., Wang, X., Li, Z., Wu, F., Shao, J., & Xie, H. (2019). Ultrahigh-surface-area nitrogen-doped hierarchically porous carbon materials derived from chitosan and betaine hydrochloride sustainable precursors
- 14 Kaisling, K. E. (2009). The sensitivity of the insect nose: The example of *Bombyx mori*. *Studies in Computational Intelligence*, 188, 45–52. https://doi.org/10.1007/978-3-642-00176-5_3
- 15 Krijnen, G., Lammerink, T., Wiegerink, R., & Casas, J. (2007). Cricket inspired flow-sensor arrays. *Proceedings of IEEE Sensors*, 539–546. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2007.4388455>

- 16 He, J., Villa, N. S., Luo, Z., An, S., Shen, Q., Tao, P., Song, C., Wu, J., Deng, T., & Shang, W. (2018). Integrating plasmonic nanostructures with natural photonic architectures in Pd-modified: Morpho butterfly wings for sensitive hydrogen gas sensing. *RSC Advances*, 8(57), 32395–32400. <https://doi.org/10.1039/c8ra05046e>
- 17 Ma, S., Jiang, M., Tao, P., Song, C., Wu, J., Wang, J., Deng, T., & Shang, W. (2018). Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review. In *Progress in Natural Science: Materials International* (Vol. 28, Issue 6, pp. 653–666). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.11.002>
- 18 Jian, Y., Handschuh-Wang, S., Zhang, J., Lu, W., Zhou, X., & Chen, T. (2021). Biomimetic anti-freezing polymeric hydrogels: keeping soft-wet materials active in cold environments. *Materials Horizons*. <https://doi.org/10.1039/d0mh01029d>

STOCKAGE THERMIQUE

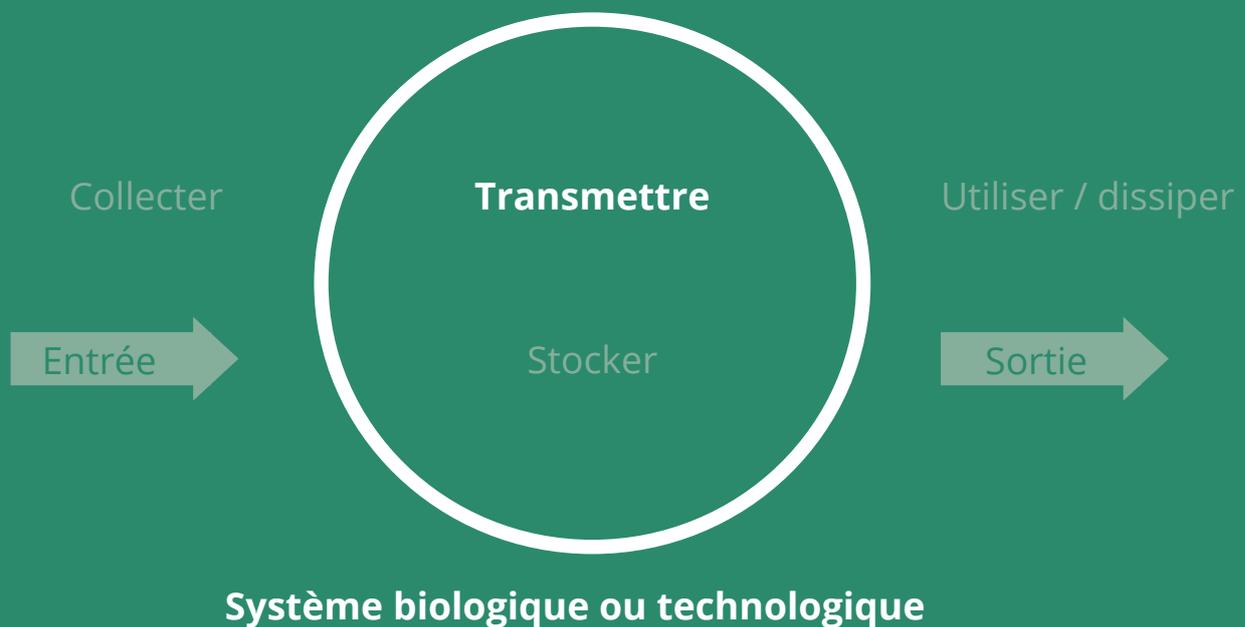
- 1 Ababneh, M. T. (2018). The Engineering History of Thermal Materials. *Bioinspired Engineering of Thermal Materials*, 25–46. <https://doi.org/10.1002/9783527687596.ch2>
- 2 Rupp, A. I. K. S., & Gruber, P. (2019). Biomimetic Groundwork for Thermal Exchange Structures Inspired by Plant Leaf Design. *Biomimetics*, 4(4), 75. <https://doi.org/10.3390/biomimetics4040075>
- 3 Shahda, M. M., Abd Elhafeez, M. M., & El Mokadem, A. A. (2018). Camel's nose strategy: New innovative architectural application for desert buildings. *Solar Energy*, 176, 725–741. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.072>
- 4 K, K., & Balakrishnan, P. (2020). Numerical analysis of microchannel based bio-inspired heat sinks with multiple inlet-outlet pairs for cooling square shaped electronic circuits. *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*, 0. <https://doi.org/10.22061/jcarme.2020.4854.1594>
- 5 Chang, C., Nie, X., Li, X., Tao, P., Fu, B., Wang, Z., Xu, J., Ye, Q., Zhang, J., Song, C., Shang, W., & Deng, T. (2020). Bioinspired roll-to-roll solar-thermal energy harvesting within form-stable flexible composite phase change materials. *Journal of Materials Chemistry A*, 8(40), 20970–20978. <https://doi.org/10.1039/d0ta07289c>
- 6 Engelhardt, S., & Sarsour, J. (2015). Solar heat harvesting and transparent insulation in textile architecture inspired by polar bear fur. *Energy and Buildings*, 103, 96–106.
- 7 Gosztonyi, S., & Gruber, P. (2013). BioSkin – Research potentials for biologically inspired energy efficient façade components and systems.
- 8 Muntinga, A. E. (2013). The STAR-system: A bio-inspired solution for a thermo regulative façade.
- 9 <http://smart-panel.tech/>, consulté en janvier 2021
- 10 Metwally, S., Martínez Comesaña, S., Zarzyka, M., Szewczyk, P. K., Karbowniczek, J. E., & Stachewicz, U. (2019). Thermal insulation design bioinspired by microstructure study of penguin feather and polar bear hair. *Acta Biomaterialia*, 91, 270–283. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2019.04.031>
- 11 Tao, P., & McCafferty, D. J. (2018). Bioinspired Thermal Insulation and Storage Materials. In *Bioinspired Engineering of Thermal Materials* (pp. 201–223). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. <https://doi.org/10.1002/9783527687596.ch9>
- 12 Hatton, B. D., Wheeldon, I., Hancock, M. J., Kolle, M., Aizenberg, J., & Ingber, D. E. (2013). An artificial vasculature for adaptive thermal control of windows. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 117, 429–436. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.06.027>
- 13 E. Cruz, Multi-criteria characterization of biological interfaces: towards the development of biomimetic building envelopes, Museum of Natural History of Paris, 2021.
- 14 « Projet urbain bio-inspiré », Ceebios, 2020, <https://ceebios.com/wp-content/uploads/2020/11/RapportSyn->

LA TRANSMISSION DE L'ÉNERGIE

La transmission d'énergie est définie dans ce rapport comme la fonction permettant de séparer dans l'espace la conversion d'une quantité d'énergie donnée. Elle est intimement liée à la notion de réseau de transmission. On distinguera la transmission des matières premières énergétiques, comme le gaz (vecteurs énergétiques utilisés en collecte), de celle d'une transmission par propagation dirigée de l'énergie, principalement l'électrique, à la suite d'une collecte initiale d'énergie.

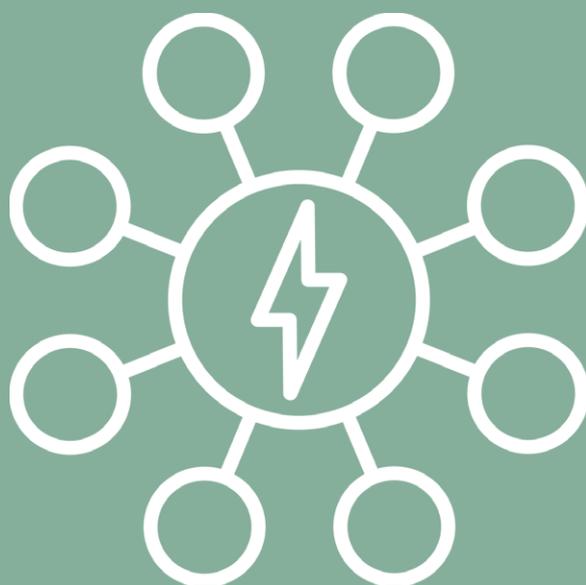
La transmission d'énergie est caractérisée par deux échelles de gestion, celle du transport d'énergie, la transmission à l'échelle globale, et celle de la distribution d'énergie, la transmission à l'échelle locale. Ces deux aspects seront abordés comme paramètres des axes étudiés. Deux types de transmission par propagation seront distingués, la transmission électrique et la transmission thermique. Nous aborderons également la question de la transmission des vecteurs énergétiques chimiques, comme le dihydrogène ou le biogaz.

Comme précédemment, des systèmes technologiques représentatifs des stratégies actuelles sont utilisées comme base de réflexion : un réseau électrique, un réseau de chaleur, un réseau de gaz et un réseau de biomasse.



RÉSEAU ÉLECTRIQUE

Le réseau électrique représente le principal système de transmission d'énergie des pays développés ou en voie de développement. Il permet le transport et la distribution d'énergie électrique à très grande vitesse depuis une source de production ou un système de stockage vers un consommateur final ou un système de stockage.





Exemples d'opportunités biomimétiques pour les technologies associées aux réseaux d'électricité 1/3

▼ Régulation énergétique

Comment assurer un apport énergétique constant ?

--> S'inspirer du processus d'homéostasie qui régule le maintien des constantes d'un organisme autour d'une valeur de consigne malgré des fortes variations environnementales^{1,2} (exemple pour la thermo-régulation, image).

Comment optimiser l'anticipation des phénomènes ?

--> S'inspirer d'algorithmes de prévision inspirés des réseaux de neurones³, du comportement des fourmis⁴, du comportement parasitaire du coucou⁵ ou encore de celui des abeilles (pour le moment appliqué à l'habitat⁶).

Comment générer de l'information stratégique ?

--> Multiplier des typologies de capteurs pour recouper les informations et apporter une réponse adéquate (ex : mécanique comme pour la peau humaine, photosensible comme les cellules végétales, vibration des câbles comme la toile de l'araignée, etc.)^{7, 8}.

Comment assurer une prise de décision rapide et adaptée ?

--> Décentralisation initiale de la prise de décision avec une réponse préétablie, puis affinée et stockée comme pour le contrôle des tentacules de la pieuvre⁹.

--> S'inspirer du système nerveux central des animaux bilatériens qui coordonne les mouvements des membres notamment¹⁰.

Comment augmenter/réduire localement l'apport en énergie ?

--> S'inspirer des vaisseaux sanguins dont la variation locale du diamètre permet de réguler l'apport d'énergie en fonction du besoin¹¹.

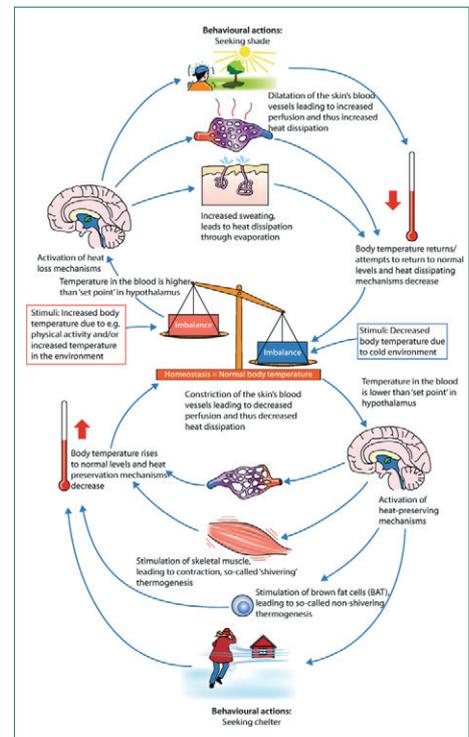


Diagramme simplifié des boucles de contrôle permettant le contrôle du flux d'énergie thermique chez le mammifère*

* Grodzinsky, E., Sund Levander, M. (2020). Thermoregulation of the Human Body. In: Grodzinsky, E., Sund Levander, M. (eds) Understanding Fever and Body Temperature. Palgrave Macmillan, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21886-7_5

1 Libretti, S., & Puckett, Y. (2020). Physiology, Homeostasis. In StatPearls. StatPearls Publishing. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32644564>

2 Showkatbakhsh, M., & Kaviani, S. (2020). Homeostatic generative design process: Emergence of the adaptive architectural form and skin to excessive solar radiation. International Journal of Architectural Computing, 147807712095194. <https://doi.org/10.1177/1478077120951947>

3 Muralitharan, K., Sakthivel, R., & Vishnuvarthan, R. (2018). Neural network based optimization approach for energy demand prediction in smart grid. Neurocomputing, 273, 199–208. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.08.017>

4 Pan, M., Li, C., Gao, R., Huang, Y., You, H., Gu, T., & Qin, F. (2020). Photovoltaic power forecasting based on a support vector machine with improved ant colony optimization. Journal of Cleaner Production, 277, 123948. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123948>

5 Alhajri, M. F., Alrashidi, M. R., & El-Naggar, K. M. (2018). Long-term electric load forecast in Kuwait and Egyptian power systems. In Journal of Engg. Research (Vol. 116, Issue 3). <https://kuwaitjournals.org/jer/index.php/JER/article/view/2903>

6 <https://www.encycle.com/>

7 Stroble, J. K., Stone, R. B., & Watkins, S. E. (2009). An overview of biomimetic sensor technology. Sensor Review, 29(2), 112–119. <https://doi.org/10.1108/02602280910936219>

8 voir rapport TIC

9 Zullo, L., & Hochner, B. (2011). A new perspective on the organization of an invertebrate brain. In Communicative and Integrative Biology (Vol. 4, Issue 1, pp. 26–29). Landes Bioscience. <https://doi.org/10.4161/cib.13804>

10 Bankole, T., Mirlekar, G., Al-Sinbol, G., Gebreslassie, B., Lima, F., Perhinschi, M., Diwekar, U., Turton, R., & Bhattacharyya, D. (2017). Development of integrated biomimetic framework with intelligent monitoring, cognition, and decision capabilities for control of advanced energy plants. Computing and Systems Technology Division 2017 - Core Programming Area at the 2017 AIChE Annual Meeting, 2017-Octob, 136–137. <https://doi.org/10.2172/1546598>

11 Ramanlal, R., & Gupta, V. (2020). Physiology, Vasodilation. In StatPearls. StatPearls Publishing. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32491494>



Exemples d'opportunités biomimétiques pour les technologies associées aux réseaux d'électricité 2/3

▼ Résilience du réseau

Comment pallier un accident ponctuel ?

--> Assurer une redondance, variabilité et décentralisation des réseaux d'informations et de transmission [Principe du vivant] comme dans la rhizosphère¹².

--> S'inspirer des boucles réseaux du système circulatoire des feuilles^{13,14}.

--> Utiliser l'accident comme l'évènement déclencheur d'une réponse locale de retour à l'équilibre, comme un feu de forêt qui déclenche la germination de graines dormantes¹⁵.

Comment se développer à partir d'un réseau existant ?

--> S'inspirer des mécanismes d'évolution des organismes, et notamment du concept de contrainte historique comme l'exemple des mammifères marins homéothermes en eaux froides¹⁶.

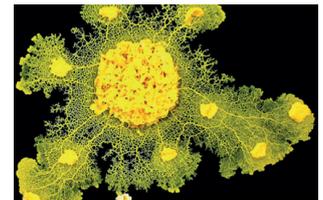


Réseau de veines à la surface d'une feuille

▼ Limitation des pertes

Comment optimiser l'architecture du réseau électrique ?

--> Optimisation des paramètres du réseau via de nombreux algorithmes bioinspirés¹⁷ basés sur les principes de l'évolution (ex. capacité à réduire la déviation de tension pour limiter l'effet joule¹⁸), le comportement des colonies de fourmis (ex. optimisation lors de l'intégration de générateurs distribués¹⁹) ou encore l'adaptabilité aux conditions changeantes du Blob (Physarum polycephalum, image)²⁰.



Réseau formé par une colonie de, Physarum polycephalum
©Audrey DUSSUTOIR / CRCA / CNRS Photothèque

Comment favoriser la thermorégulation des systèmes ?

--> S'inspirer des modèles de la fourmi argentée²¹ ou du papillon morpho²² pour que les câbles maximisent leur refroidissement par rayonnement thermique infrarouge.

--> Coupler les systèmes dissipant de la chaleur avec des systèmes visant à revaloriser la chaleur générée via un fluide caloporteur comme le sang dans les muscles²³.

12 Beiler, K. J., Durall, D. M., Simard, S. W., Maxwell, S. A., & Kretzer, A. M. (2010). Architecture of the wood-wide web: Rhizopogon spp. genets link multiple Douglas-fir cohorts. *New Phytologist*, 185(2), 543-553. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03069.x>

13 Katifori, E., Szöllösi, G. J., & Magnasco, M. O. (2010). Damage and fluctuations induce loops in optimal transport networks. *Physical Review Letters*, 104(4), 048704. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.048704>

14 Beiler, K. J., Durall, D. M., Simard, S. W., Maxwell, S. A., & Kretzer, A. M. (2010). Architecture of the wood-wide web: Rhizopogon spp. genets link multiple Douglas-fir cohorts. *New Phytologist*,

15 Schaffhauser, A., Curt, T., & Taton, T. (2008). The resilience ability of vegetation after different fire recurrences in Provence. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 119, 297-310. <https://doi.org/10.2495/FIVA080301>

16 <https://www.youtube.com/watch?v=O1J0lw04Cac>

17 Zheng, Y. J., Chen, S. Y., Lin, Y., & Wang, W. L. (2013). Bio-inspired optimization of sustainable energy systems: A review. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/354523>

18 Montoya, F. G., Baños, R., Gil, C., Espín, A., Alcayde, A., & Gómez, J. (2010). Minimization of voltage deviation and power losses in power networks using Pareto optimization methods. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23(5), 695-703. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2010.01.011>

19 Zakaria, Y. Y., Swief, R. A., El-Amary, N. H., & Ibrahim, A. M. (2020). Optimal Distributed Generation Allocation and Sizing Using Genetic and Ant Colony Algorithms. *Journal of Physics: Conference Series*, 1447(1), 12023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1447/1/012023>

20 Sun, Y. (2017). Physarum-inspired Network Optimization: A Review. In arXiv. <https://yahuisun.com>

21 Berthier, S. (2005). Thermoregulation and spectral selectivity of the tropical butterfly *Prepona meander*: A remarkable example of temperature auto-regulation. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 80(7), 1397-1400. <https://doi.org/10.1007/s00339-004-3185-x>

22 Shi, N. N., Tsai, C. C., Camino, F., Bernard, G. D., Yu, N., & Wehner, R. (2015). Keeping cool: Enhanced optical reflection and radiative heat dissipation in Saharan silver ants. *Science*, 349(6245), 298-301. <https://doi.org/10.1126/science.aab3564>

23 Badarnah, L. (2015). A Biophysical Framework of Heat Regulation Strategies for the Design of Biomimetic Building Envelopes. *Procedia Engineering*, 118, 1225-1235. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.474>



Exemples d'opportunités biomimétiques pour les technologies associées aux réseaux d'électricité 3/3

▼ Impact environnemental

Comment réduire l'impact des infrastructures ?

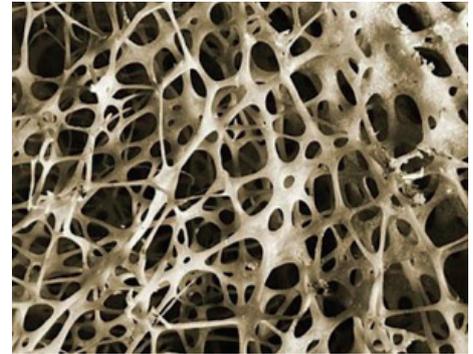
--> S'inspirer des fonctionnements écosystémiques pour fonctionnaliser les modifications environnementales et favoriser la restauration de la biodiversité, la mise en place de zone de compensation, de protection, etc.²⁴

--> S'inspirer des matériaux biologiques qui stockent du CO₂ pour faire des infrastructures des puits de carbones^{25,26}.

Comment réduire la consommation de matière première ?

--> S'inspirer des structures lattices du vivant pour réduire la quantité de matière utilisée dans les infrastructures tout en maintenant les propriétés mécaniques et générant de nouvelles fonctions²⁷.

--> S'inspirer de la superhydrophobie de nombreuses surfaces biologiques pour limiter le temps de résidence de l'eau en surface et ainsi réduire la formation de glace et la colonisation biologique^{28,29}.



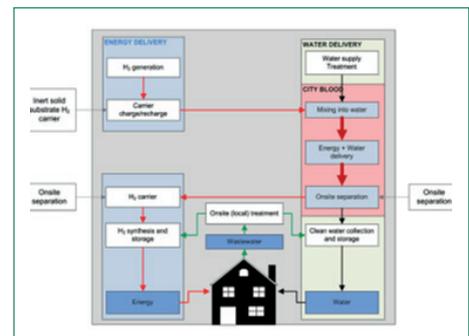
Structure lattice des os

▼ Le modèle des systèmes circulants

Vers une évolution des typologies de vecteurs

--> S'inspirer du transport conjoint d'eau et d'énergie dans les systèmes vivants pour concevoir un « sang de la ville » et aménager le réseau en conséquence³⁰.

--> S'inspirer du niveau variable de polymérisation et donc de stabilité des vecteurs énergétiques dans le vivant pour limiter au maximum les pertes. L'électricité pourrait ainsi être uniquement considérée comme un vecteur final, très ponctuel, en analogie avec l'ATP dans le vivant (voir chapitre 2).



Modèle de transmission de l'énergie par l'H₂.

Multiplicité des réseaux aux différentes échelles

--> S'inspirer des différents niveaux d'organisation des organismes pour multiplier les zones de collecte et de stockage locales et ainsi augmenter la résilience³¹. On peut ici voir une analogie des réseaux de stockage locaux avec des réserves de glycogène dans les muscles, et du réseau de stockage global avec les réserves de triglycéride dans le tissu adipeux.

24 <https://www.seaboost.fr/>

25 <https://www.blueplanet-ltd.com/>

26 <https://spectrum.ieee.org/energywise/energy/fossil-fuels/carbon-capture-power-plant-co2-concrete>

27 Pan, C., Han, Y., & Lu, J. (2020). Design and optimization of lattice structures: A review. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 10, Issue 18, pp. 1–36). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/APP10186374>

28 Han, Z., Mu, Z., Yin, W., Li, W., Niu, S., Zhang, J., & Ren, L. (2016). Biomimetic multifunctional surfaces inspired from animals. In *Advances in Colloid and Interface Science* (Vol. 234, pp. 27–50). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2016.03.004>

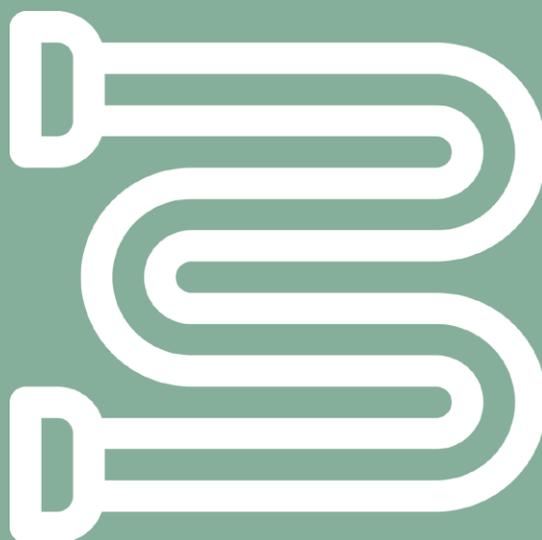
29 Sullivan, T., & O'callaghan, I. (2020). Recent developments in biomimetic antifouling materials: A review. In *Biomimetics* (Vol. 5, Issue 4, pp. 1–16). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/biomimetics5040058>

30 Karaca, F., Camci, F., & Raven, P. G. (2013). City blood: A visionary infrastructure solution for household energy provision through water distribution networks. *Energy*, 61, 98–107. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.04.033>

31 Teichmann, D., Stark, K., Müller, K., Zöttl, G., Wasserscheid, P., & Arlt, W. (2012). Energy storage in residential and commercial buildings via Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC). *Energy and Environmental Science*, 5(10), 9044–9054. <https://doi.org/10.1039/c2ee22070a>

RÉSEAU DE CHALEUR

Le réseau de chaleur est un réseau de distribution (échelle locale). Il est constitué d'une unité de production de chaleur (différents types existants), d'un réseau primaire (de l'usine aux centres urbains) et d'un réseau secondaire (distribution aux bâtiments). L'énergie thermique est transmise par le biais d'un vecteur dit « fluide caloporteur ».





Exemples d'opportunités biomimétiques pour les technologies associées aux réseaux de chaleur 1/2

▼ Limiter les pertes sur le réseau

Comment limiter la perte de chaleur par radiation ?

--> Bloquer la perte de chaleur par infra-rouge par le biais de matériaux captant les radiations et formant un « effet de serre » comme chez l'ours polaire ou l'édélweiss^{1,2}.

Comment limiter la perte de chaleur par conduction ?

--> Limiter la surface de contact et les frottements entre le fluide caloporteur et la surface des tuyaux par structuration de surface de type « effet lotus »³ ou encore par la stabilisation d'une couche d'eau et d'air comme chez la fougère salvinia⁴.

Comment limiter la perte de chaleur par convection ?

--> Stabiliser une couche de fluide sur la surface interne des tuyaux pour limiter la convection du fluide au contact de la paroi par application du modèle du Nepenthes⁵ et inspiration de réseaux de capillaires pour la thermorégulation⁶.



Le modèle de la fougère salvinia stabilisant une couche d'air
Source : Kurt Stüber, CC BY-SA 3.0 via Wikimedia Commons

▼ Réguler les flux thermiques

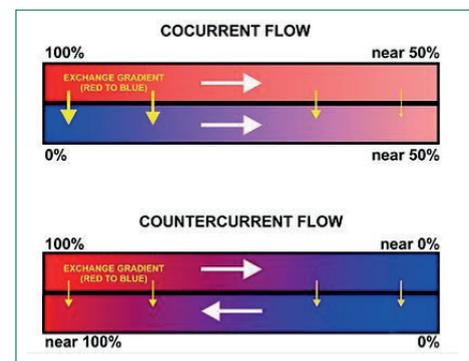
Comment favoriser la récupération de chaleur et ainsi limiter sa production ?

--> S'inspirer des modèles d'interfaces à forte ramifications comme sur les zones d'échange du système circulatoire (ex. la zone pulmonaire) et sur la gestion à contre-courant des flux de matière et d'énergie⁷.

--> S'inspirer de l'évolution comportementale saisonnière chez les mammifères conduisant à l'exploitation de tampons thermiques locaux⁸.

Comment répondre aux variations saisonnières des besoins ?

--> S'inspirer du processus de « montée de sève »⁹ et considérer cette inversion des flux comme une variation de localisation du besoin.



Transfert thermique à contre-courant
Source : Cruithne, CC BY-SA 4.0 via Wikimedia Commons

1 Khattab, M. Q., & Tributsch, H. (2016). Fibre-Optical Light Scattering Technology in Polar Bear Hair: A Re-Evaluation and New Results. *Journal of Advanced Biotechnology and Bioengineering*, 3(2), 38-51. <https://doi.org/10.12970/2311-1755.2015.03.02.2>

2 Vigneron, J. P., Rassart, M., Vértesy, Z., Kertész, K., Sarrazin, M., Biró, L. P., Ertz, D., & Lousse, V. (2005). Optical structure and function of the white filamentary hair covering the edelweiss bracts. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 71(1), 011906. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.011906>

3 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>

4 Barthlott, W., Schimmel, T., Wiersch, S., Koch, K., Brede, M., Barczewski, M., Walheim, S., Weis, A., Kaltenmaier, A., Leder, A., & Bohn, H. F. (2010). The salvinia paradox: superhydrophobic surfaces with hydrophilic pins for air retention under water. *Advanced Materials*, 22(21), 2325-2328. <https://doi.org/10.1002/adma.200904411>

5 Yu, C., Liu, M., Zhang, C., Yan, H., Zhang, M., Wu, Q., Liu, M., & Jiang, L. (2020). Bio-inspired drag reduction: From nature organisms to artificial functional surfaces. *Giant*, 2, 100017. <https://doi.org/10.1016/j.giant.2020.100017>

6 Hatton, B. D., Wheeldon, I., Hancock, M. J., Kolle, M., Aizenberg, J., & Ingber, D. E. (2013). An artificial vasculature for adaptive thermal control of windows. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 117, 429-436. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.06.027>

7 Lahondère, C., Insausti, T. C., Paim, R. M. M., Luan, X., Belev, G., Pereira, M. H., Ianowski, J. P., & Lazari, C. R. (2017). Countercurrent heat exchange and thermoregulation during blood-feeding in kissing bugs. *eLife*, 6. <https://doi.org/10.7554/eLife.26107>

8 Milling, C. R., Rachlow, J. L., Johnson, T. R., Forbey, J. S., & Shipley, L. A. (2017). Seasonal variation in behavioral thermoregulation and predator avoidance in a small mammal. *Behavioral Ecology*, 28(5), 1236-1247. <https://doi.org/10.1093/beheco/ax084>

9 <https://www.larecherche.fr/au-printemps-la-s%C3%A8ve-monte-dans-la-plante-alors-que-celle-ci-na-pas-encore-de-feuilles-pourquoi>



Exemples d'opportunités biomimétiques pour les technologies associées aux réseaux de chaleur 2/2

▼ Orienter le fluide caloporteur

Comment orienter passivement le flux de fluide ?

--> --> Jouer sur les propriétés des fluides pour assurer des mouvements passifs par capillarité et changement d'état sur le modèle de l'évapotranspiration végétale¹⁰.

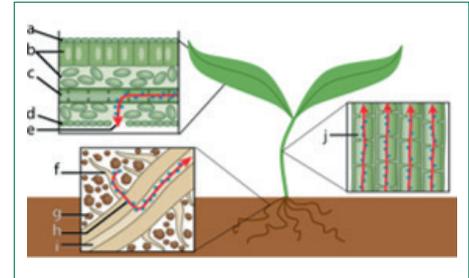
Comment répondre aux variations ponctuelles des besoins ?

--> Rediriger les flux de manière locale et globale sur le modèle du réseau sanguin. Permettre de potentiels réajustements très ponctuels comme c'est le cas de la réponse « fuite-combat »¹¹.

Comment faciliter la mise en circulation du fluide ?

--> S'inspirer du péristaltisme pour mettre en place des pompes qui régulent la pression en cours de distribution¹².

--> S'inspirer du mouvement ondulatoire des poissons et de la réduction des frottements à la surface des systèmes biologiques. Voir la partie sur la collecte d'énergie hydraulique¹³.



Continuité de la colonne d'eau dans lors du processus d'évapotranspiration des végétaux
Source : <https://sciencemusicvideos.com/ap-biology/module-32-water-transport-in-plants-transpiration/>

¹⁰ Badarnah, L. (2017). Form follows environment: Biomimetic approaches to building envelope design for environmental adaptation. Buildings. <https://doi.org/10.3390/buildings7020040>

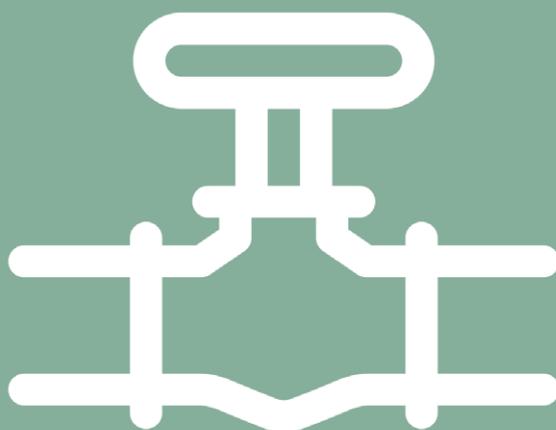
¹¹ <https://www.health.harvard.edu/staying-healthy/understanding-the-stress-response>

¹² Esser, F., Masselter, T., & Speck, T. (2019). Silent Pumpers: A Comparative Topical Overview of the Peristaltic Pumping Principle in Living Nature, Engineering, and Biomimetics. *Advanced Intelligent Systems*, 1(2), 1900009. <https://doi.org/10.1002/aisy.201900009>

¹³ Voir la partie sur la collecte d'énergie hydraulique

TRANSMISSION DE VECTEURS CHIMIQUES

On distingue deux formes de transmission de vecteurs chimiques, une transmission par le biais d'un réseau de canalisation (ex. biogaz et dihydrogène gazeux) ou par le biais de moyens terrestres ou maritimes de transport de fret (ex. dihydrogène liquide, biomasse solide).





Exemples d'opportunités biomimétiques pour les technologies associées à la transmission de vecteurs d'énergie potentielle chimique

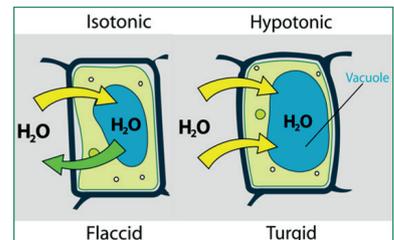
▼ Réseau routier et maritime

Comment optimiser la densité énergétique ?

--> S'inspirer des stratégies de polymérisation / dépolymérisation des vecteurs énergétiques selon les usages sur le modèle des sous-unités de glucose polymérisés en saccharose pour assurer un transport de vecteurs d'énergie potentielle chimique chez les végétaux¹.

Comment limiter l'énergie utilisée lors de la mise sous pression ?

--> S'inspirer de la mise sous pression des cellules végétales en turgescence par le biais de gradients osmotiques entre des compartiments de plus en plus concentrés².



Mise sous pression par augmentation du potentiel osmotique

▼ Réseau de gaz

Comment réguler la composition du gaz du réseau ?

--> S'inspirer des chimiorécepteurs pour mettre en place des senseurs pouvant mesurer avec une grande précision la composition des gaz du réseau³.

--> Utiliser des échangeurs structurés comme les poumons pour maximiser la surface d'échange⁴ et de la capacité des membranes biologiques à filtrer de manière très sélective⁵.

Typical diameter	Wall thickness	Composition of vessel wall (% diameter)				% of total blood volume contained		
		Endothelium	Muscle	Collagen	Elastin	Systemic	Pulmonary	
Aorta	25 mm	2 mm	5	22	33	40	-	-
Artery	4 mm	1 mm	10	20	25	30	12	9
Arteriole	30 µm	20 µm	10	50	20	20	-	-
Capillary	8 µm	<1 µm	100	0	0	0	11	1
Venule	20 µm	2 µm	40	10	40	10	41	14
Vein	20 mm	1 mm	8	32	40	20	-	-
Heart								14

Smooth muscle + elastin + collagen

Structure et composition des différents vaisseaux sanguins

Comment assurer une pression donnée ?

--> Senseurs de pression à haute sensibilité et à réponse rapide dont la structure est inspirée de la surface des pétales de rose⁶.

--> S'inspirer des variations de compositions, et donc de propriétés, des vaisseaux sanguins selon leur diamètre, leur localisation et donc de leur fonction⁷.

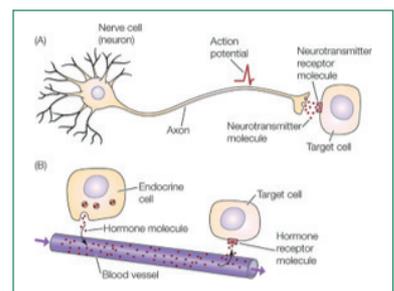
▼ Gestion des flux

Comment réguler au mieux les transferts de flux et de fret ?

--> S'inspirer du modèle du réseaux nerveux couplés aux réseaux hormonaux pour séparer les flux permanents (dirigés) des flux ponctuels (à large spectre)⁷.

Comment structurer le réseau de flux ?

--> Raisonner à l'échelle locale avant de construire un réseau global pour gagner en autonomie, raisonnement écosystémique pour favoriser l'utilisation des ressources renouvelables du territoire et concentrer les apports de longue distance pour la compensation des manques^{8,9,10}.



Comparaison du réseau hormonal (diffus) ou nerveux (concentré)
Source : macmillanhighered

1 <https://www.encyclopedie-environnement.org/zoom/saccharose-ou-amidon/>
 2 Bruhn, B. R., Schroeder, T. B. H., Li, S., Billeh, Y. N., Wang, K. W., & Mayer, M. (2014). Osmosis-based pressure generation: Dynamics and application. PLoS ONE, 9(3), e91350. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0091350>
 3 Pelosi, P., Zhu, J., & Knoll, W. (2018). From Gas Sensors to Biomimetic Artificial Noses. Chemosensors, 6(3), 32. <https://doi.org/10.3390/chemosensors6030032>
 4 Perera, A. S., & Coppens, M. O. (2019). Re-designing materials for biomedical applications: From biomimicry to nature-inspired chemical engineering. In Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences (Vol. 377, Issue 2138). <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0268>
 5 Hélix-Nielsen, C. (2018). Biomimetic membranes as a technology platform: Challenges and opportunities. In Membranes (Vol. 8, Issue 3, p. 44). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/membranes8030044>
 6 Mahata, C., Algadi, H., Lee, J., Kim, S., & Lee, T. (2020). Biomimetic-inspired micro-nano hierarchical structures for capacitive pressure sensor applications. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 151. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107095>
 7 Pat Willmer, G., & Stone, I. J. (2005). Environmental Physiology of Animals.
 8 Zari, M. P. (2017). Biomimetic urban design: Ecosystem service provision of water and energy. Buildings, 7(1), 21. <https://doi.org/10.3390/buildings7010021>
 9 Zari, M. P. (2021). Biomimetic urban and architectural design: Illustrating and leveraging relationships between ecosystem services. Biomimetics, 6(1), 1–16. <https://doi.org/10.3390/biomimetics6010002>
 10 Uchiyama, Y., Blanco, E., & Kohsaka, R. (2020). Application of biomimetics to architectural and urban design: A review across scales. Sustainability (Switzerland), 12(23), 1–15. <https://doi.org/10.3390/su12239813>

RÉCAPITULATIF DES RÉFÉRENCES DES FICHES EXEMPLES

--> TRANSMISSION DE L'ÉNERGIE

RÉSEAU ÉLECTRIQUE

- 1 Libretti, S., & Puckett, Y. (2020). Physiology, Homeostasis. In StatPearls. StatPearls Publishing. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32644564>
- 2 Showkatbakhsh, M., & Kaviani, S. (2020). Homeostatic generative design process: Emergence of the adaptive architectural form and skin to excessive solar radiation. *International Journal of Architectural Computing*, 147807712095194. <https://doi.org/10.1177/1478077120951947>
- 3 Muralitharan, K., Sakthivel, R., & Vishnuvarthan, R. (2018). Neural network-based optimization approach for energy demand prediction in smart grid. *Neurocomputing*, 273, 199–208. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.08.017>
- 4 Pan, M., Li, C., Gao, R., Huang, Y., You, H., Gu, T., & Qin, F. (2020). Photovoltaic power forecasting based on a support vector machine with improved ant colony optimization. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123948. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123948>
- 5 Alhajri, M. F., Alrashidi, M. R., & El-Naggar, K. M. (2018). Long-term electric load forecast in Kuwaiti and Egyptian power systems. In *Journal of Engg. Research* (Vol. 116, Issue 3). <https://kuwaitjournals.org/jer/index.php/JER/article/view/2903>
- 6 <https://www.encycle.com/>
- 7 Stroble, J. K., Stone, R. B., & Watkins, S. E. (2009). An overview of biomimetic sensor technology. *Sensor Review*, 29(2), 112–119. <https://doi.org/10.1108/02602280910936219>
- 8 voir rapport TIC
- 9 Zullo, L., & Hochner, B. (2011). A new perspective on the organization of an invertebrate brain. In *Communicative and Integrative Biology* (Vol. 4, Issue 1, pp. 26–29). Landes Bioscience. <https://doi.org/10.4161/cib.13804>
- 10 Bankole, T., Mirlekar, G., Al-Sinbol, G., Gebreslassie, B., Lima, F., Perhinschi, M., Diwekar, U., Turton, R., & Bhat-tacharyya, D. (2017). Development of integrated biomimetic framework with intelligent monitoring, cognition, and decision capabilities for control of advanced energy plants. *Computing and Systems Technology Division 2017 - Core Programming Area at the 2017 AIChE Annual Meeting, 2017-Octob*, 136–137. <https://doi.org/10.2172/1546598>
- 11 Ramanlal, R., & Gupta, V. (2020). Physiology, Vasodilation. In StatPearls. StatPearls Publishing. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32491494>
- 12 Beiler, K. J., Durall, D. M., Simard, S. W., Maxwell, S. A., & Kretzer, A. M. (2010). Architecture of the wood-wide web: Rhizopogon spp. genes link multiple Douglas-fir cohorts. *New Phytologist*, 185(2), 543–553. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03069.x>
- 13 Katifori, E., Szöllösi, G. J., & Magnasco, M. O. (2010). Damage and fluctuations induce loops in optimal transport networks. *Physical Review Letters*, 104(4), 048704. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.048704>
- 14 Beiler, K. J., Durall, D. M., Simard, S. W., Maxwell, S. A., & Kretzer, A. M. (2010). Architecture of the wood-wide web: Rhizopogon spp. genes link multiple Douglas-fir cohorts. *New Phytologist*,
- 15 Schaffhauser, A., Curt, T., & Taton, T. (2008). The resilience ability of vegetation after different fire recurrences in Provence. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 119, 297–310. <https://doi.org/10.2495/FIVA080301>
- 16 <https://www.youtube.com/watch?v=O1J0Iw04Cac>
- 17 Zheng, Y. J., Chen, S. Y., Lin, Y., & Wang, W. L. (2013). Bio-inspired optimization of sustainable energy systems: A review. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/354523>
- 18 Montoya, F. G., Baños, R., Gil, C., Espín, A., Alcayde, A., & Gómez, J. (2010). Minimization of voltage deviation and power losses in power networks using Pareto optimization methods. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23(5), 695–703. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2010.01.011>
- 19 Zakaria, Y. Y., Swief, R. A., El-Amary, N. H., & Ibrahim, A. M. (2020). Optimal Distributed Generation Allocation and Sizing Using Genetic and Ant Colony Algorithms. *Journal of Physics: Conference Series*, 1447(1), 12023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1447/1/012023>
- 20 Sun, Y. (2017). Physarum-inspired Network Optimization: A Review. In arXiv. <https://yahuisun.com>
- 21 Berthier, S. (2005). Thermoregulation and spectral selectivity of the tropical butterfly *Prepona meander*: A remarkable example of temperature auto-regulation. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 80(7), 1397–1400. <https://doi.org/10.1007/s00339-004-3185-x>

- 22 Shi, N. N., Tsai, C. C., Camino, F., Bernard, G. D., Yu, N., & Wehner, R. (2015). Keeping cool: Enhanced optical reflection and radiative heat dissipation in Saharan silver ants. *Science*, 349(6245), 298–301. <https://doi.org/10.1126/science.aab3564>
- 23 Badarnah, L. (2015). A Biophysical Framework of Heat Regulation Strategies for the Design of Biomimetic Building Envelopes. *Procedia Engineering*, 118, 1225–1235. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.474>
- 24 <https://www.seaboos.tfr/>
- 25 <https://www.blueplanet-ltd.com/>
- 26 <https://spectrum.ieee.org/energywise/energy/fossil-fuels/carbon-capture-power-plant-co2-concrete>
- 27 Pan, C., Han, Y., & Lu, J. (2020). Design and optimization of lattice structures: A review. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 10, Issue 18, pp. 1–36). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/APP10186374>
- 28 Han, Z., Mu, Z., Yin, W., Li, W., Niu, S., Zhang, J., & Ren, L. (2016). Biomimetic multifunctional surfaces inspired from animals. In *Advances in Colloid and Interface Science* (Vol. 234, pp. 27–50). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2016.03.004>
- 29 Sullivan, T., & O'callaghan, I. (2020). Recent developments in biomimetic antifouling materials: A review. In *Biomimetics* (Vol. 5, Issue 4, pp. 1–16). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/biomimetics5040058>
- 30 Karaca, F., Camci, F., & Raven, P. G. (2013). City blood: A visionary infrastructure solution for household energy provision through water distribution networks. *Energy*, 61, 98–107. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.04.033>
- 31 Teichmann : Teichmann, D., Stark, K., Müller, K., Zöttl, G., Wasserscheid, P., & Arlt, W. (2012). Energy storage in residential and commercial buildings via Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC). *Energy and Environmental Science*, 5(10), 9044–9054. <https://doi.org/10.1039/c2ee22070a>

RÉSEAU DE CHALEUR

- 1 Khattab, M. Q., & Tributsch, H. (2016). Fibre-Optical Light Scattering Technology in Polar Bear Hair: A Re-Evaluation and New Results. *Journal of Advanced Biotechnology and Bioengineering*, 3(2), 38–51. <https://doi.org/10.12970/2311-1755.2015.03.02.2>
- 2 Vigneron, J. P., Rassart, M., Vértesy, Z., Kertész, K., Sarrazin, M., Biró, L. P., Ertz, D., & Lousse, V. (2005). Optical structure and function of the white filamentary hair covering the edelweiss bracts. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 71(1), 011906. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.011906>
- 3 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>
- 4 Barthlott, W., Schimmel, T., Wiersch, S., Koch, K., Brede, M., Barczewski, M., Walheim, S., Weis, A., Kaltenmaier, A., Leder, A., & Bohn, H. F. (2010). The salvinia paradox: superhydrophobic surfaces with hydrophilic pins for air retention under water. *Advanced Materials*, 22(21), 2325–2328. <https://doi.org/10.1002/adma.200904411>
- 5 Yu, C., Liu, M., Zhang, C., Yan, H., Zhang, M., Wu, Q., Liu, M., & Jiang, L. (2020). Bio-inspired drag reduction: From nature organisms to artificial functional surfaces. *Giant*, 2, 100017. <https://doi.org/10.1016/j.giant.2020.100017>
- 6 Hatton, B. D., Wheeldon, I., Hancock, M. J., Kolle, M., Aizenberg, J., & Ingber, D. E. (2013). An artificial vasculature for adaptive thermal control of windows. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 117, 429–436. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.06.027>
- 7 Lahondère, C., Insausti, T. C., Paim, R. M. M., Luan, X., Belev, G., Pereira, M. H., Janowski, J. P., & Lazzari, C. R. (2017). Countercurrent heat exchange and thermoregulation during blood-feeding in kissing bugs. *eLife*, 6. <https://doi.org/10.7554/eLife.26107>
- 8 Milling, C. R., Rachlow, J. L., Johnson, T. R., Forbey, J. S., & Shipley, L. A. (2017). Seasonal variation in behavioral thermoregulation and predator avoidance in a small mammal. *Behavioral Ecology*, 28(5), 1236–1247. <https://doi.org/10.1093/beheco/axx084>
- 9 <https://www.larecherche.fr/au-printemps-la-s%C3%A8ve-monte-dans-la-plante-alors-que-celle-ci-na-pas-encore-de-feuilles-pourquoi>
- 10 Badarnah, L. (2017). Form follows environment: Biomimetic approaches to building envelope design for environmental adaptation. *Buildings*. <https://doi.org/10.3390/buildings7020040>
- 11 <https://www.health.harvard.edu/staying-healthy/understanding-the-stress-response>
- 12 Esser, F., Masselter, T., & Speck, T. (2019). Silent Pumpers: A Comparative Topical Overview of the Peristaltic Pumping Principle in Living Nature, Engineering, and Biomimetics. *Advanced Intelligent Systems*, 1(2), 1900009. <https://doi.org/10.1002/aisy.201900009>

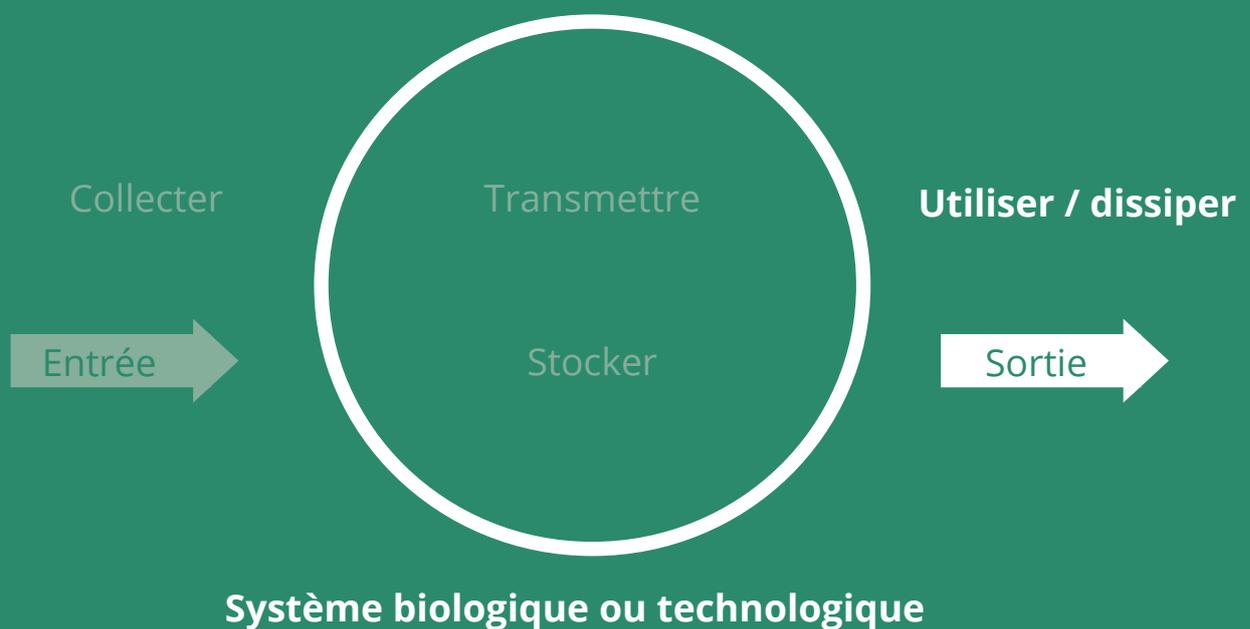
- 13 Voir la partie sur la collecte d'énergie hydraulique

TRANSMISSION DE VECTEURS CHIMIQUES

- 1 <https://www.encyclopedie-environnement.org/zoom/saccharose-ou-amidon/>
- 2 Bruhn, B. R., Schroeder, T. B. H., Li, S., Billeh, Y. N., Wang, K. W., & Mayer, M. (2014). Osmosis-based pressure generation: Dynamics and application. *PLoS ONE*, 9(3), e91350. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0091350>
- 3 Pelosi, P., Zhu, J., & Knoll, W. (2018). From Gas Sensors to Biomimetic Artificial Noses. *Chemosensors*, 6(3), 32. <https://doi.org/10.3390/chemosensors6030032>
- 4 Perera, A. S., & Coppens, M. O. (2019). Re-designing materials for biomedical applications: From biomimicry to nature-inspired chemical engineering. In *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* (Vol. 377, Issue 2138). <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0268>
- 5 Hélix-Nielsen, C. (2018). Biomimetic membranes as a technology platform: Challenges and opportunities. In *Membranes* (Vol. 8, Issue 3, p. 44). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/membranes8030044>
- 6 Mahata, C., Algadi, H., Lee, J., Kim, S., & Lee, T. (2020). Biomimetic-inspired micro-nano hierarchical structures for capacitive pressure sensor applications. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 151. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107095>
- 7 Pat Willmer, G., & Stone, I. J. (2005). *Environmental Physiology of Animals*.
- 8 Zari, M. P. (2017). Biomimetic urban design: Ecosystem service provision of water and energy. *Buildings*, 7(1), 21. <https://doi.org/10.3390/buildings7010021>
- 9 Zari, M. P. (2021). Biomimetic urban and architectural design: Illustrating and leveraging relationships between ecosystem services. *Biomimetics*, 6(1), 1–16. <https://doi.org/10.3390/biomimetics6010002>
- 10 Uchiyama, Y., Blanco, E., & Kohsaka, R. (2020). Application of biomimetics to architectural and urban design: A review across scales. *Sustainability (Switzerland)*, 12(23), 1–15. <https://doi.org/10.3390/su12239813>

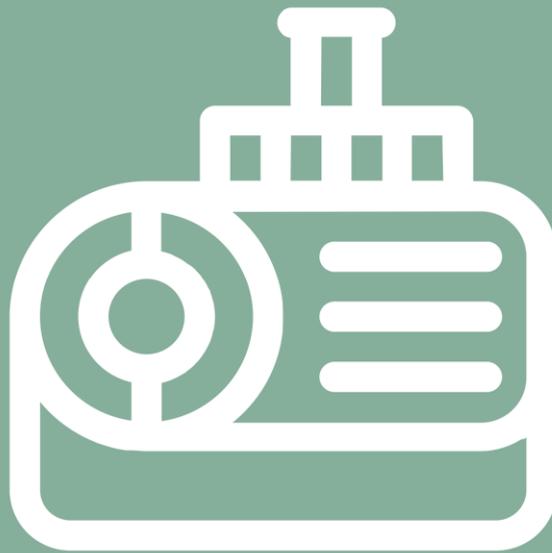
L'UTILISATION DE L'ÉNERGIE

On rappellera que l'utilisation d'énergie est ici une conversion dans la logique de l'accomplissement de fonctions données (énergie utile vers fonction visée) et souvent d'une énergie concentrée en une énergie dégradée ou diffuse (par exemple le chauffage). Il est pertinent de regarder par le spectre fonctionnel l'utilisation de l'énergie, que l'on peut séparer en différentes typologies de convertisseurs d'énergie ou actionneurs : actionneurs mécaniques, lampes, dispositifs de chauffage...



POMPES

Les pompes sont des technologies de mise en mouvement de fluides (gazeux ou liquide) qui reposent le plus souvent sur la transmission d'énergie à un fluide par rotation d'un axe à hélices. La pompe électrique remplit ainsi notamment la fonction inverse de la turbine génératrice d'électricité. La mise en mouvement d'un fluide est une fonction majeure dans notre société. Assurer la circulation d'un fluide caloporteur, extraire un fluide du sol, irriguer des terres arables, toutes ces déclinaisons reposent sur des pompes spécifiques. La mise en mouvement de fluide, ou bien la mise en mouvement au sein d'un fluide, qui joue sur la force de réaction comme pour la propulsion aéronautique, est un dénominateur commun du monde biologique, notamment pour la fonction de locomotion et est à ce titre riche en enseignements et en questionnements : pourquoi par exemple le vivant ne présente-t-il aucune structure rotative de mise en mouvement de fluide ?





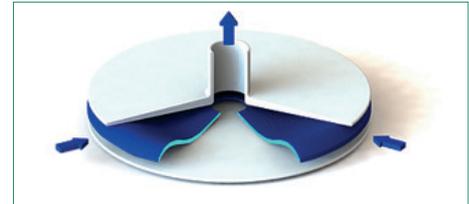
Exemples d'opportunités biomimétiques pour les technologies associées aux pompes

▼ Mettre en mouvement un fluide

Comment surmonter les verrous des technologies rotatives ?

--> S'inspirer de la mise en mouvement de fluide par membrane ondulante comme c'est le cas chez les organismes marins pour une plus grande plage d'activité et une meilleure efficacité énergétique¹.

--> Le vol battu offre des possibilités de disruption en aéronautique (notamment domaine des drones) comme alternative notamment à la propulsion conventionnelle (hélice ou réaction)².



Pompe à membrane ondulante, technologie crédit : Wavera®

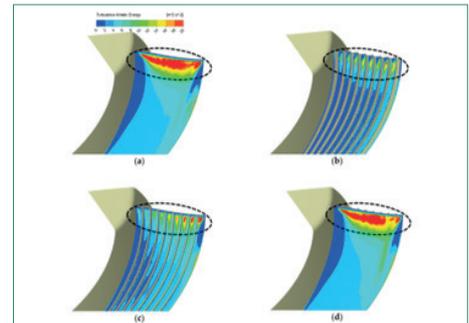
▼ Enjeux des moteurs rotatifs

Comment assurer la thermorégulation de ces dispositifs ?

--> S'inspirer des mécanismes de thermorégulation biologique omniprésents, par exemple le comportement collectif d'un essaim d'abeilles pour réguler la température de leur ruche pour thermoréguler les moteurs électriques³.

Comment amoindrir les nuances sonores de ces dispositifs ?

--> Les structures biologiques en lien avec les écoulements fluides (aériens ou marins) sont multifonctionnels et assurent ainsi des fonctions de dynamisme ainsi que de réduction de bruit⁴.



Propriétés aéro-acoustiques de structures bio-inspirées sur des pales de rotor

1 <https://www.wavera.tech/>, <https://www.corwave.com/fr/>, consultés en mars 2021

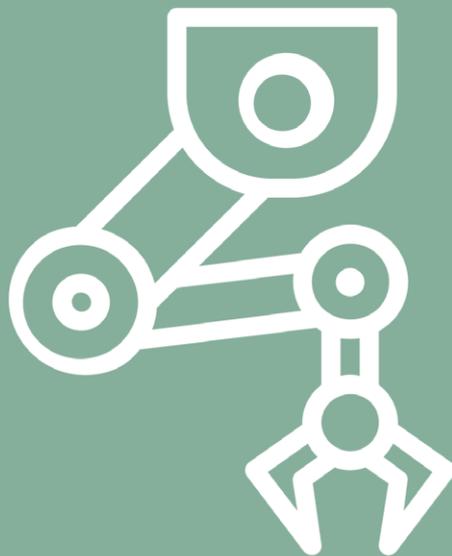
2 <https://whybot.com/our-innovations/?lang=fr>, consulté en mars 2021

3 Wang, J., Nakata, T., & Liu, H. (2019). Development of Mixed Flow Fans with Bio-Inspired Grooves. *Biomimetics*, 4(4), 72. <https://doi.org/10.3390/biomimetics4040072>

4 Chen, S., Wang, L., Guo, S., Zhao, C., & Tong, M. (2020). A bio-inspired flapping wing rotor of variant frequency driven by ultrasonic motor. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/app10010412>

MICRO-ACTIONNEURS

Les micro-actionneurs sont des actionneurs mécaniques - c'est-à-dire fournissant un travail - pouvant être assemblés en architectures complexes pour des usages en robotique et dans les domaines nécessitant précision et finesse dans l'exercice du mouvement. Le vivant présente de multiples structures permettant aux organismes de convertir de l'énergie majoritairement sous forme chimique en travail, notamment pour se déplacer. Ces structures sont efficaces, légères, recyclables, auto assemblées à température et pression ambiantes etc. (en somme : multifonctionnelles¹, modèles d'intérêt pour des applications dans le domaine de la santé, la robotique et notamment la robotique molle.^{2,3}).



1 Cui, H., Zhao, Q., Zhang, L., & Du, X. (2020). Intelligent PolymerBased Bioinspired Actuators: From Monofunction to Multifunction. *Advanced Intelligent Systems*, 2(11), 2000138. <https://doi.org/10.1002/aisy.202000138>
2 Kim, S., Laschi, C., & Trimmer, B. (2013). Soft robotics: A bioinspired evolution in robotics. In *Trends in Biotechnology* (Vol. 31, Issue 5, pp. 287-294). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.03.002>
3 Coyle, S., Majidi, C., LeDuc, P., & Hsia, K. J. (2018). Bio-inspired soft robotics: Material selection, actuation, and design. In *Extreme Mechanics Letters* (Vol. 22, pp. 51-59). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2018.05.003>



Exemples d'opportunités biomimétiques pour les technologies associées aux micro-actionneurs

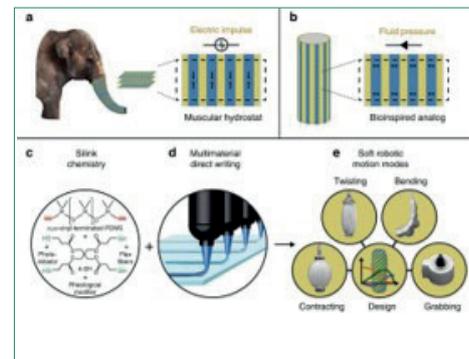
▼ Enjeu des micro-actionneurs

Comment surmonter les limites des actionneurs actuels ?

--> Les EAP (electroactive polymers) développés dans le cadre de l'inspiration des muscles comme levier de développements de divers domaines dont de futurs dispositifs médicaux^{4,5}.

--> L'étude des moteurs biomoléculaires (« nanomachines biologiques ») ouvre des potentialités dans le champ des actionneurs micro et nanoscopiques et de l'autoassemblage de structures⁶. Les hydrostats musculaires (tentacules, trompe, langue etc.) sont les modèles biologiques principaux des actionneurs mous⁷.

--> Les PAM (pneumatic artificial motor) sont une alternative supplémentaire à la mise en place de recherches en robotique bio-inspirée⁸.



Hydrostat musculaire et actionneurs mous bio-inspirés imprimés en 3D

▼ Superstructure d'actionneurs

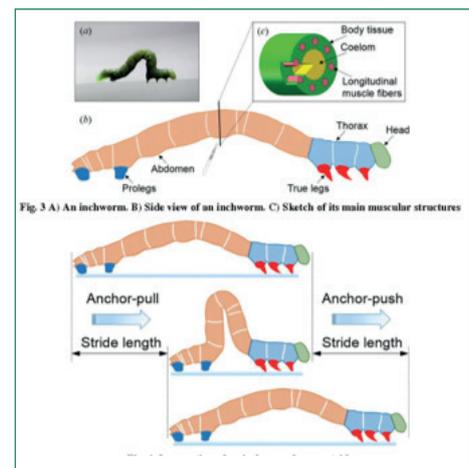
Comment agencer ces micro actionneurs bio-inspirés et plus généralement tirer des enseignements des structures biomécaniques dans leur diversité ?

--> Modèles variés de la biomécanique pour des propulsions terrestres, aériennes et sous-marines efficaces⁹.

L'étude des performances du muscle humain amène des alternatives améliorées au dispositifs classiques de transmission de force^{10,11}.

--> Les superstructures d'hydrostats musculaires sont des modèles pertinents dans des application en santé et offrent des degrés de liberté très importants^{12,13}.

--> Le système musculosquelettique et les tissus musculaires sont des modèles d'intérêt pour les architectures d'actionneurs¹⁴.



Locomotion de la chenille

4 Carpi, F., Kornbluh, R., Sommer-Larsen, P., & Alici, G. (2011). Electroactive polymer actuators as artificial muscles: Are they ready for bioinspired applications? *Bioinspiration and Biomimetics*, 6(4). <https://doi.org/10.1088/1748-3182/6/4/045006>

5 Bar-Cohen, Y., & Caltech, J. J. (n.d.). Artificial Muscles using Electroactive Polymers (EAP) Artificial Muscles using Electroactive Polymers (EAP): Capabilities, Challenges and Potential.

6 Hess, H., & Bachand, G. D. (2005). Biomolecular motors. *Materials Today*, 8(12 SUPPL. 1), 22–29. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(05\)71286-4](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(05)71286-4)

7 Schaffner, M., Faber, J. A., Pianegonda, L., Rühls, P. A., Coulter, F., & Studart, A. R. (2018). 3D printing of robotic soft actuators with programmable bioinspired architectures. *Nature Communications*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03216-w>

8 Erin, O., Pol, N., Valle, L., & Park, Y. L. (2016). Design of a bio-inspired pneumatic artificial muscle with self-contained sensing. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS, 2016-October*, 2115–2119. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2016.7591146>

9 Carpi, F., Erb, R., & Jeronimidis, G. (2011). Special section on biomimetics of movement. In *Bioinspiration and Biomimetics* (Vol. 6, Issue 4). Bioinspir Biomim. <https://doi.org/10.1088/1748-3182/6/4/040201>

10 Schmitt, S., Haeufle, D. F. B., Blickhan, R., & Günther, M. (2012). Nature as an engineer: One simple concept of a bio-inspired functional artificial muscle. *Bioinspiration and Biomimetics*, 7(3). <https://doi.org/10.1088/1748-3182/7/3/036022>

11 <https://push4m.com/> consulté en février 2021

12 Laschi, C., Mazzolai, B., Mattoli, V., Cianchetti, M., & Dario, P. (2009). Design of a biomimetic robotic octopus arm. *Bioinspiration and Biomimetics*, 4(1). <https://doi.org/10.1088/1748-3182/4/1/015006>

13 https://www.festo.com/fr/fr/e/a-propos-de-festo/innovation-et-technologie/bionic-learning-network-id_31842/, consulté en février 2021

14 Ku, B., Tian, Y., Wang, S., Libbos, E., Agrawal, S., & Banerjee, A. (2019). A distributed and scalable electromechanical actuator for bio-inspired robots. *2019 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2019*, 2180–2187. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2019.8785363>

LAMPES

L'actionneur luminescent, ou lampe, est un convertisseur d'énergie qui permet l'émission d'ondes électromagnétiques, dans le but d'éclairer en ce qui concerne le spectre du visible. Les technologies qui permettent l'éclairage seront l'objet de cette partie mais les pistes de bio-inspiration sont susceptibles de concerner les technologies luminescentes ayant d'autres fonctions (médical, capteurs etc.). L'éclairage est un poste majeur d'utilisation d'électricité dans le monde (par ex. 2% de la consommation annuelle 2020 US¹) et peut encore aujourd'hui bénéficier d'améliorations conséquentes en termes d'efficacité énergétique. Les technologies luminescentes ont ainsi évoluées de l'incandescence aux LEDs avec comme tendance actuelle l'adoption globale et le remplacement progressif par des technologies de SSL (Solid-State Lighting²). Se pose alors principalement la question de la nature des composants des dispositifs luminescents et spécifiquement leur impact environnemental. Ces quelques pistes ont pour but d'inspirer la conception d'OLED bio-inspirées frugales, recyclables etc. à l'image des structures biologiques.



1 FAQ US Energy Information Administration, consulté en mars 2021
2 US DOE. (2015). Solid-State Lighting R&D Plan.



Exemples d'opportunités biomimétiques pour les technologies associées aux lampes

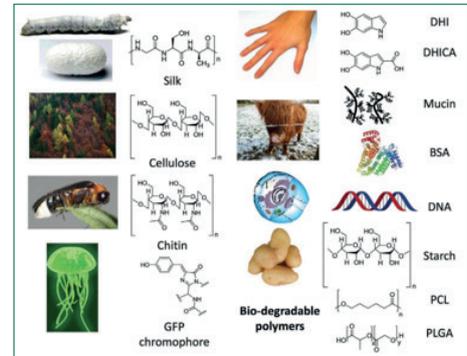
▼ Nature des entités réactives

Comment émettre de la lumière de manière la moins énergivore possible ?

--> Utiliser des mécanismes d'oxydation de protéine (comme la luciférase) pour émettre une lumière à moindre coût énergétique comme dans les phénomènes de bioluminescence (ex : Glowee)³.

Quelles leçons tirer des matériaux biologiques en lien avec la gestion de la lumière ?

--> Le vivant est multifonctionnel, la gestion de la lumière (en terme d'électronique ou d'optique) repose sur des matériaux de composition usuelle (C, H, N, O...). Une revue est proposée sur les performances de matériaux biologiques dans le cadre du SSL ouvrant le champ à l'alternative écoresponsable et aux enseignements de sobriété biologique⁴.



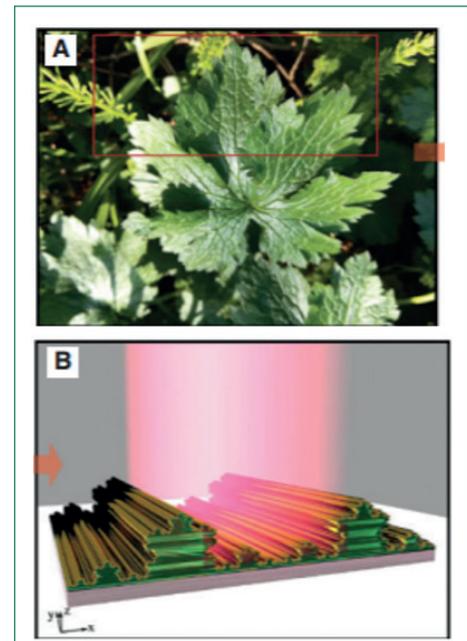
Différentes biomolécules utilisées dans le champ du SSL

▼ Architecture système

Comment améliorer la performance des dispositifs optiques et luminescents en jouant sur la texturation de surface de leurs composants ?

--> Structurer la surface de LED sur la base des nanostructures biologiques d'interface avec la lumière (particulièrement les organes optiques, notamment du papillon de nuit) qui présentent des structures photoniques permettant notamment de réduire les pertes optiques et améliorer l'efficacité de divers dispositifs optoélectroniques, notamment les photodétecteurs, les systèmes photovoltaïques, les imageurs et les diodes électroluminescentes⁵.

--> Agencer les sources d'émission de lumière dans une structure à architecture complexe pour modifier leurs caractéristiques d'émission. Ce genre de stratégie résulte de l'étude du scarabée *Hoplia coerulea* qui confine des molécules fluorescentes dans les écailles de sa cuticule et pourrait permettre l'exploration d'un champ innovant dans la conception de dispositifs optiques⁶.



Bio-inspired plasmonic leaf with a fractal structure.

3 <https://www.glowee.com/>, consulté en mars 2021

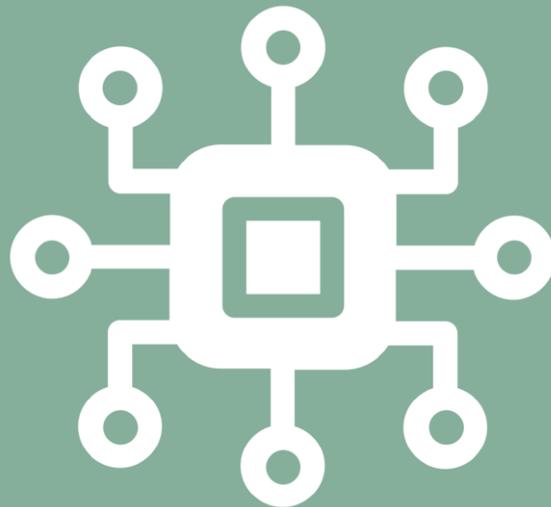
4 esta, E., Fernández-Luna, V., Coto, P. B., & Costa, R. D. (2018). Merging Biology and Solid-State Lighting: Recent Advances in Light-Emitting Diodes Based on Biological Materials. *Advanced Functional Materials*, 28(24). <https://doi.org/10.1002/adfm.201707011>

5 V Liu, C., Mao, P., Guo, Q., Han, M., & Zhang, S. (2019). Bio-inspired plasmonic leaf for enhanced light-matter interactions. *Nanophotonics*, 8(7), 1291–1298. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2019-0104>

6 Van Hooijdonk, E., Berthier, S., & Vigneron, J. P. (2012). Bio-inspired approach of the fluorescence emission properties in the scarabaeid beetle *Hoplia coerulea* (Coleoptera): Modeling by transfer-matrix optical simulations. *Journal of Applied Physics*, 112(11), 114702. <https://doi.org/10.1063/1.4768896>

COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES

Les composants électroniques, ici considérés comme éléments constitutifs des TIC (Technologies de l'Information et Communication) et supports de la digitalisation et du numérique, permettent de le traitement de l'information, notamment en termes de stockage et de calcul. Présenté comme partie intégrante de la transition écologique, le numérique n'est pas exempt d'impacts énergétiques et son déploiement doit se mettre en place dans la même posture que les autres technologies, en support à la transition énergétique¹.



¹ <https://www.un.org/fr/chronicle/article/lobjectif-de-developpement-durable-relatif-lenergie-et-les-technologies-de-linformation-et-de-la>, consulté en avril 2021



Exemples d'opportunités biomimétiques pour les technologies associées à l'électronique

▼ Hardware

Comment réduire la consommation d'énergie en jouant sur la conception du hardware ?

--> S'inspirer des systèmes neuronaux et concevoir des dispositifs neuromorphiques frugaux comme support de calculs d'intelligence artificielle².

--> Concevoir des capteurs miniatures sur le modèle du système optique des insectes et en tirant partie de leur capacité à percevoir et traiter l'information de manière efficace³.

--> Stocker l'information sous forme chimique stable plutôt que dans des data centers à forte consommation d'énergie. Coder l'information pour le numérique dans une molécule d'ADN ouvre des potentialités importantes en termes notamment d'efficacité énergétique⁴.



Image libre de droit, Pixabay

▼ Software

Comment réduire la consommation d'énergie en jouant sur la conception du software ?

--> Acquérir des images pour un dispositif optique en se basant sur la modification d'une image à une autre (event-based), similairement au fonctionnement de la vision humaine, afin de réduire la quantité de données stockées et augmenter la fréquence d'acquisition⁵.

--> Observer la manière dont l'information est gérée dans le cadre du comportement collectif des populations biologiques (nuées, essaims, bancs, etc.) et en tirer des algorithmes efficaces de gestion de l'information peu énergivore (ex : algorithmique formique⁶).

--> Concevoir « l'IA bio inspirée » ou simplement « intelligence » sur la base de notre compréhension du système neuronal pour tendre vers sa performance énergétique⁷.



Image libre de droit, Pixabay

▼ Frugalité, biomimétisme et numérique

Les enjeux de la gestion de l'information (perception, transmission, calcul, prise de décision etc.) sont communs au vivant et aux TIC (technologies de l'information et de la communication). A ce titre, un rapport Ceebios et Myceco sur le sujet a spécifiquement été rédigé⁸ pour éclairer les apports potentiels du biomimétisme notamment une consommation énergétique efficace du numérique.



Synthèse thématique Intelligences du vivant, Ceebios & Myceco (en cours de publication)

2 Grollier, J., Querlioz, D., Camsari, K. Y., Everschor-Sitte, K., Fukami, S., & Stiles, M. D. (2020). Neuro-morphic spintronics. In Nature Electronics (Vol. 3, Issue 7, pp. 360–370). Nature Research. <https://doi.org/10.1038/s41928-019-0360-9>

3 Serres, J. R., & Viollet, S. (2018). Insect-inspired vision for autonomous vehicles. Current Opinion in Insect Science, 30, 46–51. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2018.09.005>

4 Lin, K. N., Volkel, K., Tuck, J. M., & Keung, A. J. (2020). Dynamic and scalable DNA-based information storage. Nature Communications, 11(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16797-2>

5 <https://www.prophesee.ai/>, consulté en mars 2021

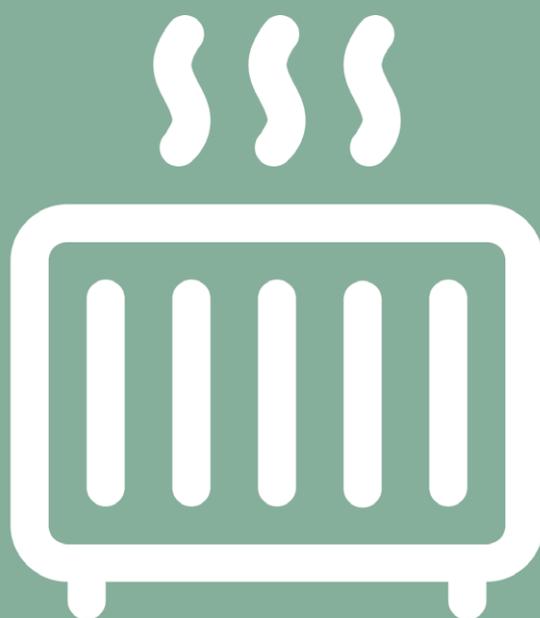
6 <https://www.antoptima.com/>, consulté en mars 2021

7 <https://anotherbrain.ai/#home>, consulté en mars 2021

8 « Intelligences du vivant, opportunités du biomimétisme pour le numérique et les TIC », Ceebios Myceco, 2021, <https://ceebios.com/wp-content/uploads/2020/12/SyntheseInfo-Preambule-201210.pdf>, version complète à la demande

CHAUFFAGE

Le chauffage est une typologie d'utilisation d'énergie bien particulière, puisqu'elle repose sur la génération d'énergie thermique, soit exactement ce qui est qualifié de pertes énergétiques dans les conversions de toutes les autres typologies d'énergie.





Exemples d'opportunités biomimétiques pour les technologies associées au chauffage

▼ La chaleur, perte énergétique ?

La génération de chaleur est-elle nécessaire dans ce que l'on cherche à accomplir ?

--> Chercher l'alternative à la montée en température par exemple dans les procédés industriels. Les procédés sol-gel cherchent à s'inspirer de la biominéralisation de microorganismes marins pour la fabrication du verre à température et pression ambiantes¹.

--> Le vivant - a fortiori les organismes homéothermes - ne possède pas d'organes spécifiques de génération de chaleur. La température corporelle est générée et maintenue via la co-production de chaleur inhérente à tout mécanisme physiologique à rendement partiel. A ce titre, un organisme biologique est un système intégré de valorisation de chaleur fatale.

--> Les démarches d'écologie industrielle, à l'instar du symbole de Kalundborg au Danemark, viennent mettre en pratique cette démarche de valorisation de « co-produit » et mise en commun de ressource, dans une logique écosystémique d'économie circulaire².

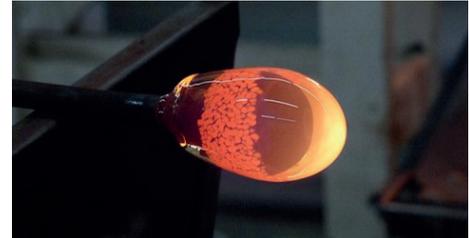


Image libre de droit, Pixabay



Image libre de droit, Pixabay

▼ Réseau de génération de chaleur

Comment assurer l'homogénéité thermique d'un espace ?

--> Développement d'une architecture de système inspirée des thermorécepteurs du corps humain pour optimiser la consommation énergétique des effecteurs thermiques³.

--> Décentraliser la production de chaleur et s'en inspirer dans la génération et régulation de la température chez les populations de manchots et abeilles selon le phénomène de « shivering thermogenesis »⁴.

--> Optimiser les systèmes de production et maintien de chaleur sur la base d'algorithmes bio-inspirés⁵.



Image libre de droit, Pixabay

1 Livage, J. (2018). Bioinspired nanostructured materials. *Comptes Rendus Chimie*, 21(10), 969-973. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2018.08.001>

2 Choi, J. H. (2010). CoBi : Bio-Sensing Building Mechanical System Controls for Sustainably Enhancing Individual Thermal Comfort. PHD Dissertation, May, 1-149. <http://repository.cmu.edu/dissertations/33>

3 Stabenheimer, A., Pressl, H., Papst, T., Hrasnigg, N., & Crailsheim, K. (2003). Endothermic heat production in honeybee winter clusters. *Journal of Experimental Biology*, 206(2), 353-358. <https://doi.org/10.1242/jeb.00082>

4 Woźniak, M., Książek, K., Marciniak, J., & Polap, D. (2018). Heat production optimization using bio-inspired algorithms. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 76, 185-201. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.09.003>

5 <http://www.symbiosis.dk/en/>, consulté en avril 2021

RÉCAPITULATIF DES RÉFÉRENCES DES FICHES EXEMPLES

--> UTILISATION DE L'ÉNERGIE

POMPES

- 1 <https://www.wavera.tech/>, <https://www.corwave.com/fr/>, consultés en mars 2021
- 2 Chen, S., Wang, L., Guo, S., Zhao, C., & Tong, M. (2020). A bio-inspired flapping wing rotor of variant frequency driven by ultrasonic motor. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/app10010412>
- 3 <https://whylot.com/our-innovations/?lang=fr>, consulté en mars 2021
- 4 Wang, J., Nakata, T., & Liu, H. (2019). Development of Mixed Flow Fans with Bio-Inspired Grooves. *Biomimetics*, 4(4), 72. <https://doi.org/10.3390/biomimetics4040072>

MICRO-ACTIONNEURS

- 1 Cui, H., Zhao, Q., Zhang, L., & Du, X. (2020). Intelligent PolymerBased Bioinspired Actuators: From Monofunction to Multifunction. *Advanced Intelligent Systems*, 2(11), 2000138. <https://doi.org/10.1002/aisy.202000138>
- 2 Kim, S., Laschi, C., & Trimmer, B. (2013). Soft robotics: A bioinspired evolution in robotics. In *Trends in Biotechnology (Vol. 31, Issue 5, pp. 287–294)*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.03.002>
- 3 Coyle, S., Majidi, C., LeDuc, P., & Hsia, K. J. (2018). Bio-inspired soft robotics: Material selection, actuation, and design. In *Extreme Mechanics Letters (Vol. 22, pp. 51–59)*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2018.05.003>
- 4 Carpi, F., Kornbluh, R., Sommer-Larsen, P., & Alici, G. (2011). Electroactive polymer actuators as artificial muscles: Are they ready for bioinspired applications? *Bioinspiration and Biomimetics*, 6(4). <https://doi.org/10.1088/1748-3182/6/4/045006>
- 5 Bar-Cohen, Y., & Caltech, J. J. (n.d.). Artificial Muscles using Electroactive Polymers (EAP) Artificial Muscles using Electroactive Polymers (EAP): Capabilities, Challenges and Potential.
- 6 Hess, H., & Bachand, G. D. (2005). Biomolecular motors. *Materials Today*, 8(12 SUPPL. 1), 22–29. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(05\)71286-4](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(05)71286-4)
- 7 Schaffner, M., Faber, J. A., Pianegonda, L., Rühls, P. A., Coulter, F., & Studart, A. R. (2018). 3D printing of robotic soft actuators with programmable bioinspired architectures. *Nature Communications*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03216-w>
- 8 Erin, O., Pol, N., Valle, L., & Park, Y. L. (2016). Design of a bio-inspired pneumatic artificial muscle with self-contained sensing. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS, 2016-October*, 2115–2119. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2016.7591146>
- 9 Carpi, F., Erb, R., & Jeronimidis, G. (2011). Special section on biomimetics of movement. In *Bioinspiration and Biomimetics (Vol. 6, Issue 4)*. *Bioinspir Biomim*. <https://doi.org/10.1088/1748-3182/6/4/040201>
- 10 Schmitt, S., Haeufle, D. F. B., Blickhan, R., & Günther, M. (2012). Nature as an engineer: One simple concept of a bio-inspired functional artificial muscle. *Bioinspiration and Biomimetics*, 7(3). <https://doi.org/10.1088/1748-3182/7/3/036022>
- 11 <https://push4m.com/> consulté en février 2021
- 12 Laschi, C., Mazzolai, B., Mattoli, V., Cianchetti, M., & Dario, P. (2009). Design of a biomimetic robotic octopus arm. *Bioinspiration and Biomimetics*, 4(1). <https://doi.org/10.1088/1748-3182/4/1/015006>
- 13 https://www.festo.com/fr/fr/e/a-propos-de-festo/innovation-et-technologie/bionic-learning-network-id_31842/, consulté en février 2021
- 14 Ku, B., Tian, Y., Wang, S., Libbos, E., Agrawal, S., & Banerjee, A. (2019). A distributed and scalable electromechanical actuator for bio-inspired robots. *2019 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2019*, 2180–2187. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2019.8785363>

LAMPES

- 1 FAQ US Energy Information Administration, consulté en mars 2021
- 2 US DOE. (2015). Solid-State Lighting R&D Plan
- 3 <https://www.glowee.com/>, consulté en mars 2021
- 4 Fresta, E., Fernández-Luna, V., Coto, P. B., & Costa, R. D. (2018). Merging Biology and Solid-State Lighting: Recent Advances in Light-Emitting Diodes Based on Biological Materials. *Advanced Functional Materials*, 28(24). <https://doi.org/10.1002/adfm.201707011>
- 5 Liu, C., Mao, P., Guo, Q., Han, M., & Zhang, S. (2019). Bio-inspired plasmonic leaf for enhanced light-matter interactions. *Nanophotonics*, 8(7), 1291–1298. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2019-0104>
- 6 Van Hooijdonk, E., Berthier, S., & Vigneron, J. P. (2012). Bio-inspired approach of the fluorescence emission properties in the scarabaeid beetle *Hoplia coerulea* (Coleoptera): Modeling by transfer-matrix optical simulations. *Journal of Applied Physics*, 112(11), 114702. <https://doi.org/10.1063/1.4768896>

COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES

- 1 <https://www.un.org/fr/chronicle/article/lobjectif-de-developpement-durable-relatif-lenergie-et-les-technologies-de-linformation-et-de-la>, consulté en avril 2021
- 2 Grollier, J., Querlioz, D., Camsari, K. Y., Everschor-Sitte, K., Fukami, S., & Stiles, M. D. (2020). Neuromorphic spintronics. In *Nature Electronics* (Vol. 3, Issue 7, pp. 360–370). Nature Research. <https://doi.org/10.1038/s41928-019-0360-9>
- 3 Serres, J. R., & Viollet, S. (2018). Insect-inspired vision for autonomous vehicles. *Current Opinion in Insect Science*, 30, 46–51. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2018.09.005>
- 4 Lin, K. N., Volkel, K., Tuck, J. M., & Keung, A. J. (2020). Dynamic and scalable DNA-based information storage. *Nature Communications*, 11(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16797-2>
- 5 <https://www.prophesee.ai/>, consulté en mars 2021
- 6 <https://www.antoptima.com/>, consulté en mars 2021
- 7 <https://anotherbrain.ai/#home>, consulté en mars 2021
- 8 « Intelligences du vivant, opportunités du biomimétisme pour le numérique et les TIC », Ceebios Myceco, 2021, <https://ceebios.com/wp-content/uploads/2020/12/SyntheseInfo-Preambule-201210.pdf>, version complète à la demande

CHAUFFAGE

- 1 Livage, J. (2018). Bioinspired nanostructured materials. *Comptes Rendus Chimie*, 21(10), 969–973. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2018.08.001>
- 2 <http://www.symbiosis.dk/en/>, consulté en avril 2021
- 3 Choi, J. H. (2010). CoBi : Bio-Sensing Building Mechanical System Controls for Sustainably Enhancing Individual Thermal Comfort. PHD Dissertation, May, 1–149. <http://repository.cmu.edu/dissertations/33>
- 4 Stabentheiner, A., Pressl, H., Papst, T., Hrassnigg, N., & Crailsheim, K. (2003). Endothermic heat production in honeybee winter clusters. *Journal of Experimental Biology*, 206(2), 353–358. <https://doi.org/10.1242/jeb.00082>
- 5 Woźniak, M., Książek, K., Marciniak, J., & Połap, D. (2018). Heat production optimization using bio-inspired algorithms. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 76, 185–201. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.09.003>

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

EXEMPLES DE RÉALISATIONS CONCRÈTES

SIEMENS



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

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.

**IN
SITU**

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.

PROPHESÉE
METAVISION FOR MACHINES

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 thermorégulation 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...).

CBES

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.

BIOMIMÉTISME & ÉNERGIE DANS LES MÉDIAS

NATURE = FUTURE !

Nature=Futur ! est une série documentaire coproduite par Ceebios, LaBelleSociété Production, le Muséum national d'Histoire naturelle, l'INSERM, le CNRS, Universcience, la Ville de Senlis, France TV Education, A way to wake up productions. Chacun des 30 films présente en 4 minutes un axe de recherche et innovation inspiré de la nature, dans de nombreux domaines...

Pour découvrir la série vidéo :

- Visionnez la série sur vimeo : <https://vimeo.com/channels/naturefutur>
- Consultez l'article du MNHN : <https://www.mnhn.fr/fr/quand-la-nature-nous-inspire>
- Découvrez " Les enjeux contemporains de la planète" avec la plateforme Lumni : <https://www.lumni.fr/lycee/seconde/sciences-de-la-vie-et-de-la-terre/les-enjeux-contemporains-de-la-planete>
- Informez-vous sur le média le Blob : <https://leblob.fr/>



ASSISES EUROPÉENNES DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Présentation du potentiel du biomimétisme pour la transition énergétique aux Assises Européennes de la Transition Énergétique. Organisées dans la continuité des temps forts gouvernementaux – et notamment des sommets de l'ONU sur le Climat (COP), les Assises sont l'occasion pour les gouvernements et acteurs locaux, ainsi que leurs partenaires, de s'approprier de manière collective les nouveaux enjeux nationaux et internationaux, et surtout de partager des expériences réussies et des solutions concrètes pour mettre en œuvre la transition énergétique dans les territoires. Chaque année, l'événement réunit pendant 3 jours, près de 3500 congressistes autour d'un programme de plus de 150 événements – plénières, ateliers, visites de sites, village de la transition énergétique ou encore carrefour de métiers de la transition énergétique.





LES AUTEURS

Eliot GRAEFF,
Chef de projet
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



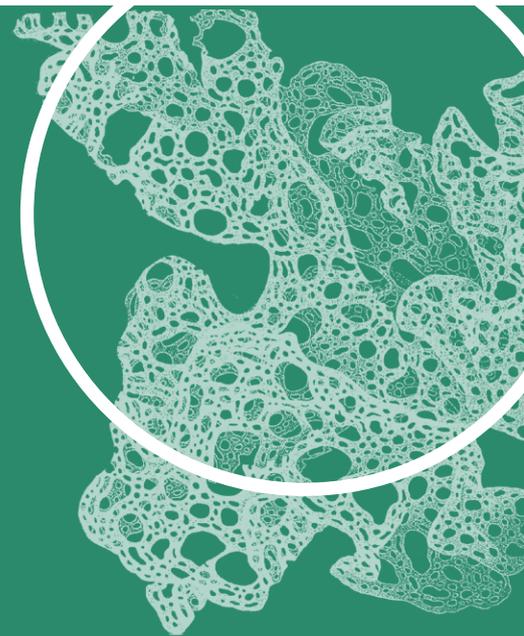
Ceebios

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