



Biomimétisme dans les transports

Efficacité énergétique, sécurité et intégration dans l'environnement

Introduction

En 2023, les transports ont représenté 13% du budget des ménages français, c'est-à-dire 191,8 milliards d'euro de dépenses. Ces transports sont multi-modaux : les camions routiers, les trains, les bateaux fluviaux, les portes containers marins, les avions, ... Ces transports de personnes, d'animaux et d'objets mais aussi d'informations et d'énergie ont plusieurs causes : la nécessité de se nourrir, de se reposer dans un abri, de se reproduire ou encore de retrouver une niche écologique adaptée. Cependant les transports représentent 126,8 millions de tonnes équivalent CO₂, il faut alors chercher des alternatives plus vertes et éco-responsables en s'inspirant du vivant.

Une grande diversité de modes de transports est observable chez les animaux : la marche peut se faire à 4, 6, 8 ou même mille pattes ; le vol, la grimpe, la nage sont aussi d'autres moyens de se déplacer. Christophe Goupil expliquait lors de la Biomim'Expo de 2019 que le cheval (et par extension les animaux) a une allure optimale pour chaque mode, que ce soit le pas, le trot, le galop, afin de minimiser la production de déchets. Le monde végétal, quant à lui, se déplace aussi grâce aux graines qui sont transportés par les animaux, le vent, l'eau ou même par la plante elle-même. Enfin à de plus grosses échelles, l'étude de fluides, comme les rivières ou les courants marins, mais aussi des plaques géologiques renseignent sur le transport de la matière inorganique. C'est cette inspiration de la nature qui a lancé Léonard De Vinci à la conquête du ciel.

De nombreuses start-ups et entreprises se sont aussi penchées sur cette diversité afin de répondre à la question " *Comment améliorer nos réseaux de transports afin qu'ils soient plus efficaces, plus sûrs et s'intègrent mieux à l'environnement ?* " Cet article est un tour d'horizon des différentes innovations qui ont été trouvées pour répondre à cette question.

Efficacité du déplacement

Aérodynamisme

L'étude des morphologies biologiques permet d'analyser les formes les plus adaptées au déplacement aquatique ou aérien. Ainsi les ingénieurs japonais, en s'inspirant du martin-pêcheur, ont allongé l'avant du train Shinkansen. Cette élongation a réduit la consommation énergétique, en diminuant la résistance à l'air de 30%. Cette innovation a aussi permis au train d'augmenter sa vitesse maximale de 285 à 320 km/h. De façon similaire, les ingénieurs chez Mercedes se sont inspirés du poisson coffre pour une voiture combinant aérodynamisme et grand volume intérieur.

L'inspiration peut aussi venir des requins : un dispositif aérodynamique appelé "Sharklets", inspiré des ailerons de requins, est installé à l'extrémité des ailes des avions modernes. Cette innovation réduit la consommation en carburant ainsi que les émissions de CO₂. De la même manière, les nageoires de baleines ont été étudiées pour modifier les pales d'éoliennes afin de rendre leur mouvement plus efficace.

L'innovation peut aussi être dans la modification de la surface comme le revêtement "Aeroshark" pour les avions. Ce revêtement imite les indentations microscopiques trouvées dans la peau des requins et permet une économie de 400 tonnes de kérosène et de plus de 1200 tonnes de CO₂ pour chaque Boeing 777-200ER. Ce biomimétisme de la peau des requins avaient même fait polémique il y a quelques années lors des compétitions de natation. En effet la combinaison en polyuréthane utilisant ce procédé donnait un trop grand avantage au nageur en réduisant sa traînée dans l'eau.

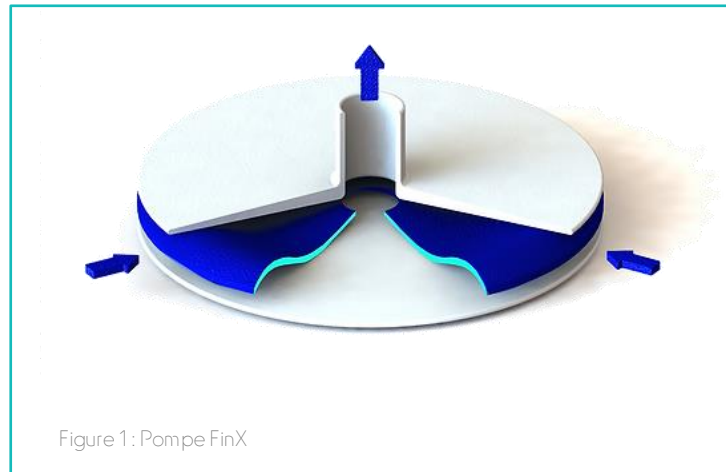
Enfin l'étude de la nature a entraîné aussi des innovations dans le domaine de l'aérospatial : certains panneaux solaires utilisés par les satellites se replient en s'inspirant des origamis mais aussi des ailes de coccinelles. Ils restent ainsi rangés de manière compacte pour minimiser le volume tout en maximisant la surface une fois déployés en orbite. Une note Biome+ a été rédigée sur le thème des origamis si vous souhaitez en apprendre plus.

Hydropropulsion

Dans le domaine du nautisme, l'innovation s'inspire des formes comme dans l'aéronautique, mais recherche aussi des nouvelles formes d'hydropropulsion. Deux voies ont été étudiées sur le modèle des poissons : la forme des nageoires et le mouvement ondulatoire.

Pour la première voie, ADV Propulse a développé un propulseur trochoïdal à axe vertical. Ce propulseur a un rendement hydrodynamique de 85%, ce qui est supérieur de 10 à 15% par rapport aux hélices classiques. Ce système permet une orientation à 360° donnant une meilleure maniabilité tout en réduisant la pollution sonore en milieu aquatique.

Pour la deuxième voie, la startup WavEra ensuite rachetée par FinX a conçu des pompes à membrane ondulante avec un rendement de 80% et une économie d'énergie de 30% par rapport aux pompes classiques. L'eau passe alors de l'extérieur de la membrane vers le centre afin d'être propulsée. Elle est même actuellement testée comme pompe cardiaque par CorWave car elle peut reproduire un fonctionnement pulsatile tout en limitant les dommages aux cellules sanguines contrairement aux pompes classiques.



Adhésion

Le sujet de l'adhésion est complexe car selon les modes de transports, le constructeur cherche à augmenter ou à diminuer l'adhésion.

Ainsi pour le domaine automobile, les ingénieurs cherchent à augmenter la prise sur la route surtout lors de pluie. La technologie Sharkskin de Rainsport3 offre un flux optimisé de l'eau en minimisant les turbulences et en améliorant son évacuation. D'autres roues sont inspirées des pattes d'ours polaire comme Blizzak Tires pour une meilleure accroche sur les routes enneigées. Enfin des skis de la marque Stöckli, inspirés des écailles de tortues, offre une meilleure tenue sur neige pendant les tournants tout en facilitant les virages.

Dans le domaine naval, la volonté est de réduire l'adhésion des microorganismes pour limiter l'effet de biofouling qui ralentissent les bateaux et augmentent leur consommation énergétique. Le revêtement Sharklet (à ne pas confondre avec le dispositif pour avion) donne une surface avec des structures microscopiques qui empêchent le développement des bactéries ainsi que l'accrochage de la faune et la flore marine. Il y a ainsi 90% de moins de transfert de bactéries comparé à des surfaces classiques.

Adaptation au terrain

L'efficacité du déplacement peut aussi être atteinte par une adaptation au terrain. Le prototype Corleo de Kawasaki est une moto qui s'inspire de quadrupède comme le chien, la panthère ou le cheval. Ce mode de transport d'un genre nouveau ne nécessite plus d'infrastructures comme des routes pour se déplacer et peut s'adapter à des dénivelés rocheux comme à des plaines. Même si cette preuve de concept peut ne pas aboutir, elle permet d'ouvrir la voie à de nouveaux transports qui ne reposent plus sur des roues mais sur des "jambes" ou "pattes".

Protection et Sécurité

Absorption des chocs

La sécurité dans le domaine des transports passe avant tout par l'évitement des chocs. Cependant lorsque le choc est inévitable, il faut pouvoir l'absorber. Un exemple d'objet assurant cette sécurité à l'échelle individuelle est le casque de vélo Shellmet. Ce casque, inspiré par la forme des coquilles St Jacques, est créé à partir des coquilles elles-mêmes et permet une meilleure absorption et répartition des chocs reçus. La coquille des St Jacques est une source de pollution des plages et des récifs par sa très grande consommation par les Japonais et son utilisation en tant que matière première permet de réduire jusqu'à 36% des émissions de CO₂ comparé à un casque classique en plastique.

Une autre façon d'absorber les chocs n'est pas de trouver une nouvelle forme mais une nouvelle structure interne. Les os humains absorbent les chocs tout au long de notre vie, le produit Modula'Choc par l'entreprise Modulatio s'en est inspiré et a créé un matériau avec une structure alvéolaire / trabéculaire à variation de densité. A performance équivalente, ce nouveau matériau produit 2 à 3 fois moins de CO₂, est moins lourd et consomme moins de matière.

Meilleure résistance

La sécurité dans les transports ou même dans les espaces et structures accueillant ces transports passe par le choix des matériaux de construction. La technologie Woodflow de l'entreprise StrongByForm vend des matériaux de constructions légers et résistants reprenant la structure d'un arbre. Ces pièces sont utilisables pour des pièces de véhicules ou mêmes pour des structures maritimes tout en utilisant moins de matière qu'une pièce en bois classique et en restant très résistantes aux forces.



Figure 2: Exemple de la technologie WoodFlow

La résistance des transports peut aussi nécessiter une résistance à la température. Des chercheurs du CNRS ont réussi à faire une nacre artificielle qui est 10 fois plus résistante que de la céramique classique. Cette nacre résiste jusqu'à 600°C et 470MPa de pression, la rendant très intéressante pour l'industrie automobile et dans les dispositifs générant de l'énergie.

Le passage du temps est un facteur important dans l'usure des matériaux. La technologie HealTech™ de la startup CompPair permet à ses matériaux composites de se réparer en chauffant pendant 1 min à 110° C. Cette technologie d'auto-cicatrisation, inspirée de la nature, a été utilisée lors de la fabrication de skis en collaboration avec la marque Salomon. La production de CO2 liée à sa fabrication a été réduite de 20% et sa réparation de 99,6%.

Sécurité lors et autour du transport

Enfin la sécurité se fait aussi durant et autour des transports. Pour la sécurité routière, des Œils-de-chat et autres rétro réfléchissants sont utilisées pour assurer la sécurité des conducteurs la nuit. Inspirés du fond de l'œil des chats, ces appareils renvoient une partie de la lumière des phares en direction du conducteur, marquant ainsi le centre de la route et évitant aux personnes de conduire aux mauvais endroits.

A l'échelle du véhicule, des capteurs peuvent être installés pour assurer la sécurité des personnes autour du mode de transports. Certains se basent sur le mouvement comme le détecteur CurvAce qui imite les yeux à facettes des insectes. D'autres détectent les objets en milieu turbide comme la technologie BlueSens de Elwave qui utilise un champs électrique généré par un drone afin de détecter tout objet à 360°. Cette détection est basée sur les poissons, comme les mormyridés, vivant en milieu trouble où la vision et le sonar sont inefficaces.

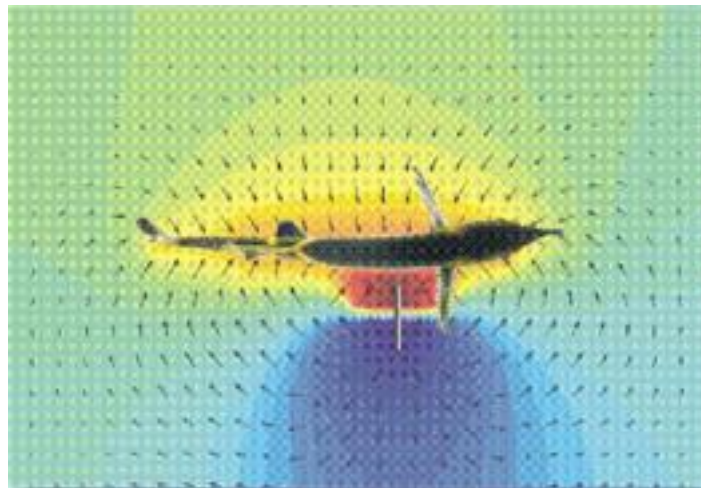


Figure 3: Champs électrique perturbé par un objet

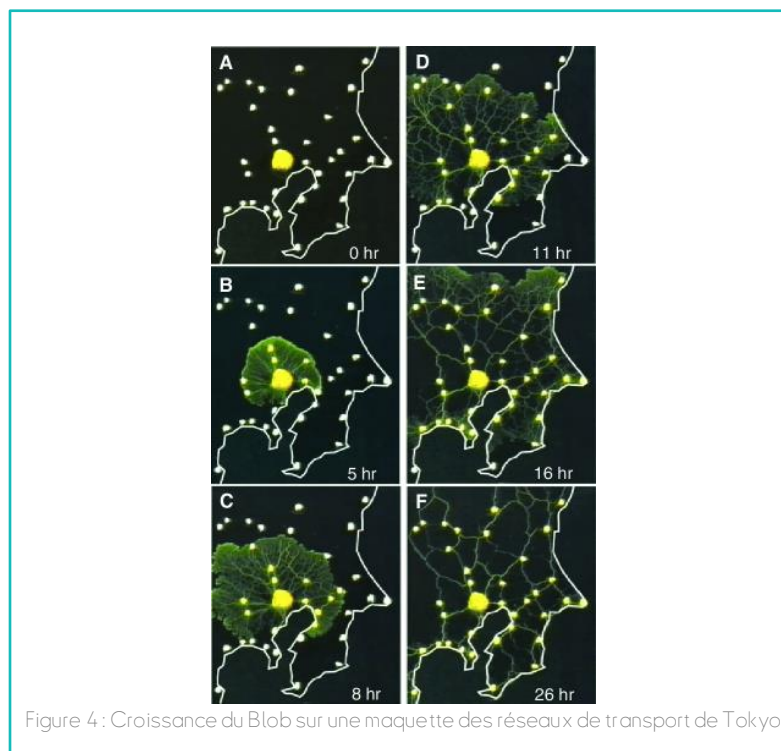
Intégration dans l'environnement

Gestion des flux

La gestion des flux est essentielle pour augmenter l'efficacité des transports mais aussi son intégration dans l'environnement.

Le flux qui vient plus rapidement en tête est le flux automobile. Lors d'un embouteillage, le plus important est de gérer les flux de voitures entrant et d'en détourner une partie afin de réduire la taille du bouchon. Des modélisations de réseaux en temps réels sont basés sur les fourmis. Leur gestion optimisée de coordination permet de trouver le chemin le plus rapide tout en contournant des obstacles et un temps très court. Waze utilise des modèles algorithmiques inspirés des réseaux de fourmis pour gérer les flux de voiture. La bioinspiration peut faire ressurgir des solutions très intéressantes pour la gestion des transports en temps réel.

L'étape suivante est de pouvoir prédire les problèmes de flux. Claire Lesieur, lors de la Biomim'Expo de 2019, comparait l'encombrement d'une cellule à celui d'une ville. Son analyse permettait de détecter les zones où les embouteillages ne désengorgeraient pas et qu'il serait intéressant de modifier. De la même manière, le débit des flux dans la veine d'une feuille ou dans un corps peut être comparé à la gestion fluide des véhicules. Certains modèles mathématiques sont déjà utilisés pour la prévision des flux routiers. Dans cette veine, des chercheurs japonais ont utilisé le blob, un organisme unicellulaire jaune pouvant s'étendre sur quelques mètres carrés, afin d'étudier sa gestion des fluides. En créant un modèle réduit du réseau de transport de Tokyo, ces chercheurs se sont rendu compte que le blob adoptait un réseau très proche de celui déjà existant, montrant l'efficacité des transports de Tokyo.



Cependant ces découvertes restent sur des réseaux 2D. Qu'en est-il de la 3D avec les flux aériens ? Le projet Perdix mené par le département de la défense américaine permettait de gérer le vol d'une centaine de drones autonomes en simultanément tel un essaim d'oiseau. Les drones communiquaient entre eux afin de ne pas entrer en collision entre eux mais aussi de se déplacer vers des points donnés. Cette notion de coopération entre appareils volants a été aussi testée par de véritables avions durant le Projet Fello Fly puis le projet GEESE. Dans ces projets, deux avions A350 se suivaient selon une configuration particulière durant un long vol entre Toulouse et Montréal. Comme pour les vols en V réalisés par les oiseaux migrateurs, cette coordination a permis au deuxième avion d'économiser 5% de son carburant et tout autant en CO₂. Le projet est encore en cours pour optimiser la configuration tout en assurant la sécurité des passagers.

Repérage et localisation

La gestion de l'environnement passe aussi par le repérage et l'auto-localisation dans celui-ci et pour ça les insectes sont des champions.

Le Projet AntBot du CNRS arrive à s'orienter telles les fourmis du désert en utilisant la polarisation de la lumière et donc sans soutien d'un GPS classique. Le projet BeeRotor, commun entre le CNRS et l'Institut des Sciences du Mouvement, utilise la vision à facettes des insectes qui analyse le défilement du paysage pour adapter les mouvements, les positions et la vitesse du drone. Enfin on peut encore citer le projet américain Perdix, se basant sur les essaims d'insectes et les vols de perdrix pour s'adapter à l'environnement. Ces différents projets montrent que les capteurs ont encore de beaux jours devant eux afin d'aider au repérage dans des situations de crise ou même de manière générale.

Gestion de la biodiversité

Les installations de nos réseaux de transports posent des problèmes aux écosystèmes qui les entourent.

En effet les longues lignes de trains séparent des habitats en deux, empêchant les déplacements des animaux. Pour diminuer cette compétition entre transport humain et animal, des couloirs de biodiversité sont maintenant construits au-dessus ou en-dessous des voies ferrées et sont adaptées aux espèces présentes dans la région. Cependant ce n'est pas toujours suffisant car il arrive que des cerfs ou des sangliers se retrouvent quand même sur les voies au mauvais moment. Pour pallier ce problème, des effaroucheurs de biodiversité sont installés proche des voies et émettent des sons de dangers en prévision de l'approche d'un train. De plus ces sons sont adaptés à la saison et aux animaux locaux pour augmenter leur efficacité.

Les ports sont aussi des lieux où la biodiversité souffre des activités humaines. Le projet Seaboost, en collaboration avec Ifremer, propose des nurseries à poisson pour l'étude de milieux marins portuaires. Le test mené à Toulon, où de nombreuses nurseries artificielles ont été installées, montrent que le nombre de poisson juvéniles a augmenté. L'étude se poursuit actuellement sur le devenir de ces poissons mais aussi sur l'impact de la pollution au mercure et au plomb sur la biodiversité.



Figure 5 : Nurserie Seaboost

Limitation de la pollution

L'étude des pollutions passées mais aussi en cours est un sujet de plus en plus important dans notre société.

La pollution peut être "physique", comme la pollution de l'eau ou de l'air. Dans le premier cas, une membrane Aquaporine Insid™ a été développée afin de filtrer l'eau. Cette membrane, inspirée par les membranes des cellules humaines et animales, est plus rapide et économe qu'un filtre classique. Elle bloque différents polluants comme des toxines mais aussi des métaux. Concernant les plastiques, c'est vers la startup PolyGone qu'il faut se tourner. Leur innovation qui s'inspire des racines des plantes arrivent à récupérer jusqu'à 98% des microplastiques dans un cours d'eau et cela de manière passive. Dans le cas de la pollution de l'air, comme nous passons la majorité de notre temps à l'intérieur, il est donc très important de filtrer l'air dans les habitations et les locaux. La société MetalMark s'est inspiré de la structure nanométrique des ailes de papillons pour faire un filtre renouvelable qui catalyse la décomposition des particules dangereuses.

La pollution peut aussi être lumineuse. Dans ce cas, la première pensée serait de limiter cette pollution en éteignant les éclairages publics après une certaine heure la nuit mais cette pratique pose cependant des questions de sécurité. La startup Glowee, rachetée en 2024 par BioDotDotDot, propose des éclairages publics utilisant la bioluminescence, ce qui diminue la pollution lumineuse mais aussi la consommation d'électricité. Lumikrom, aussi possédée par la même compagnie, propose dans la même veine, des marquages au sol photoluminescents la nuit afin d'assurer la sécurité tout étant éco-responsable.



Figure 6 : Prototype d'éclairage public Glowee

La dernière source de pollution est la pollution sonore qui est très importante autour des modes de transports les plus rapides comme les avions, les trains ou même les bateaux de plaisirs. Les moteurs de la société FinX citée plus haut réduisent leur pollution sonore aquatique grâce à leurs moteurs à membranes. Pour le train, le Shinkansen est un exemple connu de biomimétisme. Lors de ses débuts, il provoquait un boum sonore à chaque fois qu'il sortait d'un tunnel ce qui dérangeait les habitants autour. Un des ingénieurs en charge s'est inspiré du martin pêcheur afin d'affiner l'avant du train et de le rendre plus aérodynamique, lui permettant d'atteindre de nouvelles vitesses tout en limitant la pollution sonore. (Nota Bene, c'est cette histoire marquante qui a inspiré le logo de Ceebios).

Conclusions

Le biomimétisme et la bioinspiration sont déjà importants dans le domaine des transports et cela sous plusieurs formes : dans l'amélioration de l'efficacité du déplacement par l'étude de nouvelles formes plus aéro ou hydrodynamiques ; dans la protection et la sécurité autour des transports en étudiant l'absorption de chocs ou encore la résistance des structures ; ou encore dans l'intégration dans l'environnement que ce soit l'environnement humain par la gestion des flux de transports ou encore la gestion de l'environnement naturel en limitant les différentes formes de pollution. Ces différentes innovations vont entraîner d'autres découvertes afin d'améliorer le domaine des transports mais aussi les autres aspects de la vie.

Rédacteur

Raphaël Teissier, Stagiaire Ingénieur Ceebios
Étudiant Ingénieur Biologiste à AgroParisTech

Références

- Chiffres clés sur les transports : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-des-transports-edition-2025-0>
- Shinkansen : <https://luxdesign.cc/shinkansen-the-bullet-train-inspired-by-kingfishers-bf6173cc5eae>
- Sharklet avion : <https://www.air-journal.fr/2023-07-17-info-pratique-a-quoi-servent-les-sharklets-au-bout-des-ailes-5250109.html>
- Surface Aeroshark : <https://www.lufthansa-technik.com/en/aeroshark>
- Note Biome+ sur les origamis :
- ADV Propulse : <https://adv-propulse.fr>
- WavEra / FinX : <https://finxmotors.com>
- CorWave : <https://www.corwave.com/fr/>
- Sharkskin Rainsport3 : <https://www.uniroyal-tyres.com/fr/fr/car/tyres/rainsport-3/>
- Blizzak Tires : <https://trailtire.com/blog/bridgestone-blizzak-tires/>
- Ski Stöckli : <https://actu.epfl.ch/news/des-skis-inspires-des-ecailles-de-tortue/>
- Revêtement Sharklet : <https://www.sharklet.com>
- Prototype Corleo de Kawasaki : <https://www.kawasaki.eu/en/news/2025/april/CORLEO--concept-unveiled.html>
- Shellmet : <https://koushi-chem.co.jp/hotamet/en/>
- Modulatio : <https://www.modulatio.fr>
- Strongbyform : <https://strongbyform.com>
- Nacre artificielle : <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/chimie-ceramique-artificielle-dix-fois-plus-tenace-inspiree-nacre-53033/>
- CompPair : <https://www.comppair.ch>
- Détecteur CurvAce : <https://www.cite-sciences.fr/archives/science-actualites/home/webhost.cite-sciences.fr/fr/science-actualites/enquete-as/wl/1248138238090/curvace-l-il-artificiel-qui-fait-mouche/index.html>
- Elwave : <https://elwave.fr/elwave/projet-esense/>
- Claire Lesieur lors de la BiomimExpo 2019 : <https://biomimexpo.com/2019/06/07/claire-lesieur-speaker-2019/>
- Blob Tokyo : https://www.researchgate.net/publication/41111573_Rules_for_Biologically_Inspired_Adaptive_Network_Design
- Projet Perdix : <https://www.defense.gov/News/Releases/Release/Article/1044811/department-of-defense-announces-successful-micro-drone-demonstration/>
- FelloFly par Airbus : <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2024-09-airbus-and-sesar-partners-are-taking-wake-energy-retrieval-to-the-next>
- Antbot du CNRS : <https://www.cnrs.fr/fr/presse/le-premier-robot-pattes-qui-se-deplace-sans-aps>
- Beerotor : <https://qomet.net/innovation-beerotor-drone-loeil-dinsecte-invente-labo-marseillais/>
- Seaboost : <https://www.seaboost.fr>
- Aquaporine InsidTM : <https://aquaporin.com>
- Polygone : <https://www.polygonessystems.com>
- MetalMark : <https://metalmark.xyz>
- BioDotDotDot (Glowee, Lumikrom) : <https://biidotdotdot.com>