



ACADÉMIE
DES SCIENCES
INSTITUT DE FRANCE

Comptes Rendus

Mécanique

Christophe Béesau

Mathématiques et défis d'ingénierie : l'exemple de *Solar Impulse*

Volume 352, Numéro spécial S1 (2024), p. 27-34

En ligne depuis le 15 novembre 2024

Numéro publié le 15 novembre 2024

Numéro spécial : Hommage à Denis Papin

Rédacteur en chef invité : Bruno Chanetz (Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA), BP80100, 91123 Palaiseau Cedex, France)

<https://doi.org/10.5802/crmeca.261>

 Cet article est publié sous la licence
CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION 4.0 INTERNATIONAL.
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Les Comptes Rendus. Mécanique sont membres du
Centre Mersenne pour l'édition scientifique ouverte
www.centre-mersenne.org — e-ISSN : 1873-7234



Article de synthèse / *Review article*

Hommage à Denis Papin / *A tribute to Denis Papin*

Mathématiques et défis d'ingénierie : l'exemple de *Solar Impulse*

Mathematics and engineering challenges: the example of Solar Impulse

Christophe Béésau^{®,a}

^a Président d'Inworks, France

Courriel: christophe.beesau@in-works.com

Résumé. Les projets d'innovation nous mettent face à des défis complexes. Mais est-il possible de mieux comprendre la nature profonde de la complexité d'un problème ? Et peut-on alors utiliser cette compréhension pour accélérer l'élaboration de solutions et repousser ainsi les limites scientifiques et techniques ? L'analyse de ce qu'est un paradigme scientifique, en tant que structure facilitant les échanges entre scientifiques mais également en tant que cadre normatif « imposé », permet d'imaginer d'autres façons d'interpréter les informations existantes dès lors que l'on accepte de sortir de ce cadre. Les descripteurs de complexité qui en découlent se révèlent alors précieux pour mieux analyser les problèmes difficiles et dévoiler des analogies de structures surprenantes, y compris entre domaines scientifiques hétérogènes. Le projet *Solar Impulse*, riche en défis scientifiques et techniques, a permis d'illustrer une application concrète de cette approche et de la façon dont elle peut aider à penser les projets complexes.

Abstract. Innovation projects present us with complex challenges. But is it possible to better understand the profound nature of a problem's complexity? And can we then use this understanding to accelerate the development of solutions, thereby pushing back scientific and technical boundaries? The analysis of what a scientific paradigm is, as a structure that facilitates exchanges between scientists but also as an "imposed" normative framework, allows us to imagine other ways of interpreting existing information once we agree to step outside this framework. The resulting complexity descriptors are invaluable for analyzing difficult problems and revealing surprising structural analogies, even between heterogeneous scientific fields. The Solar Impulse project, rich in scientific and technical challenges, illustrated a concrete application of this approach and the way it can help us think about complex problems.

Mots-clés. Mathématiques, Ingénierie, Problèmes complexes, Solar Impulse, Innovation, Météorologie, Défis technologiques.

Keywords. Mathematics, Engineering, Complex problems, Solar Impulse, Innovation, Meteorology, Technological challenges.

Manuscrit reçu le 26 mai 2024, accepté le 25 juin 2024.

1. Innover, une activité à risque ?

Une étude du CNRS, publiée en 2018, révèle un chiffre étonnant : 7 projets d'innovation sur 10 échoueraient. Les projets d'innovation sont-ils aujourd'hui trop ambitieux ? Ou bien ne sont-ils pas assez bien maîtrisés ? à une époque où le calcul permet de (presque) tout évaluer par simulation numérique, y compris le fonctionnement et la performance des systèmes avant même toute réalisation physique, une telle proportion d'échecs ne peut que surprendre : quelle en est la cause ?

Mon métier de mathématicien et d'ingénieur en modélisation m'a amené à travailler sur de nombreux sujets ouverts et projets incertains. Passionné par la question de la complexité, j'ai entrepris dès 1991 mes premières recherches et analyses sur la complexité des phénomènes que, en tant que mathématicien, *et non en tant qu'expert de la discipline en question*, il me fallait mettre en équations et expliquer.

Si la lecture des fondamentaux sur ce sujet (H. Simon, R. May, J.-L. Le Moigne, E. Morin...) a été source d'inspiration (et parfois, également, de frustration), c'est surtout *La structure des révolutions scientifiques* de Thomas Kuhn [1] qui m'a conforté dans l'intuition que certaines informations déjà existantes pouvaient être *réexploitées* pour tenter de remonter de la complexité intrinsèque de chaque phénomène (ou système) aux causes de cette complexité, et ceci en dépit du fait que ces informations sont déjà connues et n'apportent donc, *a priori*, rien de nouveau.

2. Données et paradigmes

Pour Thomas Kuhn, l'une des forces du paradigme en sciences (au sens de « modèle à suivre car faisant consensus ») est bien de définir un cadre normatif dans lequel les scientifiques peuvent échanger de l'information sans ambiguïté. De ce fait, tout changement de paradigme conduit à ce qu'il appelle « une véritable révolution » dans la manière de percevoir et de comprendre la réalité.

En particulier, souligne-t-il, un tel changement n'implique ni l'utilisation de nouvelles données pour décrire cette réalité, ni une simple réinterprétation des données existantes : « bien que le monde ne change pas après un changement de paradigme, l'homme de science travaille désormais dans un monde différent [2] ». Et dans ce nouveau monde, les systèmes et les phénomènes sont perçus et compris différemment.

En 1998, Steven Weinberg nuance la vision de Kuhn en introduisant une idée particulièrement intéressante pour les mathématiciens. Selon lui, les théories scientifiques se composent d'un socle *dur*, constitué des équations régissant les phénomènes, et d'une partie *douce*, constituée de l'interprétation de ces équations et du pourquoi elles fonctionnent pour expliquer l'observable. C'est cette partie *douce* qui change, mais la partie *dure*, elle, ne change pas, ou sinon très lentement, par exemple à la faveur d'une généralisation intégrant de nouveaux domaines de validité. Ainsi la théorie de la Relativité comprend-elle celle de la mécanique de Newton, cette dernière restant valable dans la majorité des cas pratiques rencontrés en ingénierie, y compris pour envoyer les *rovers* les plus sophistiqués sillonner la surface de la planète Mars.

Dans ce contexte, il n'était pas *invisageable* de tenter de mieux comprendre la complexité d'un problème à travers la mathématisation de nouveaux descripteurs définissant, par eux-mêmes, un changement de paradigme, et ceci avec bien sûr l'idée seconde de pouvoir ensuite remonter aux causes de cette complexité. Après tout, les paléontologues eux-mêmes ne renoncent pas à utiliser un squelette partiel, voire parfois un seul os, pour reconstituer l'animal dans sa totalité, son mode de vie, voire ses habitudes alimentaires !



FIGURE 1. L'avion *Solar Impulse* (HB-SIA) lors de son tout premier test, le 3 décembre 2009.
Crédit photo : *Solar Impulse*.

3. Les défis du projet *Solar Impulse*

Le projet *Solar Impulse* avait pour objectif la réussite d'un tour du monde à bord d'un avion entièrement mû par énergie solaire (figure 1).

Initié en 2003 par Bertrand Piccard, bientôt rejoint par André Borschberg, ce projet s'est déroulé sur une durée totale de 13 années au cours desquelles d'innombrables défis techniques mais aussi humains ont été surmontés.

Mais au-delà des aspects techniques, et comme Bertrand Piccard lui-même l'a expliqué, l'objectif ultime de ce projet précurseur était de promouvoir les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique que permettent les nouvelles technologies. Et comment mieux mettre en lumière ces valeurs qu'à travers un projet porteur de symboles et l'accomplissement d'un exploit jugé impossible?

4. Repousser les limites de la faisabilité

La pré-étude réalisée par une prestigieuse école d'ingénieurs en Suisse laissait en effet peu de doutes sur les difficultés de réalisation d'un avion capable de voler jour et nuit à l'énergie solaire, exploit jugé infaisable avec les technologies sur étagère en 2003.

Il s'est donc immédiatement posé la question d'identifier les meilleures voies à explorer pour repousser les limites de la faisabilité d'un tel appareil. Quelles technologies retenir pour optimiser l'efficacité énergétique globale du vol? Comment tirer parti des avantages de chaque solution technique et limiter la propagation des contraintes lorsque ces solutions sont combinées les unes avec les autres au sein d'un système devant assurer un vol jour et nuit? En d'autres termes, comment être sûr de ne pas pénaliser un critère global de performance en essayant d'optimiser un sous-système de l'avion? Par exemple, dans quelle mesure pouvait-on conserver le bénéfice d'une augmentation de la masse de batterie embarquée, facteur favorisant le stockage de l'énergie et donc le vol de nuit, alors qu'un avion plus lourd a une finesse réduite, toutes choses étant égales par ailleurs? Même une question aussi simple et directe que celle-ci devenait, dans le contexte d'optimisation extrême du projet, d'une grande complexité.

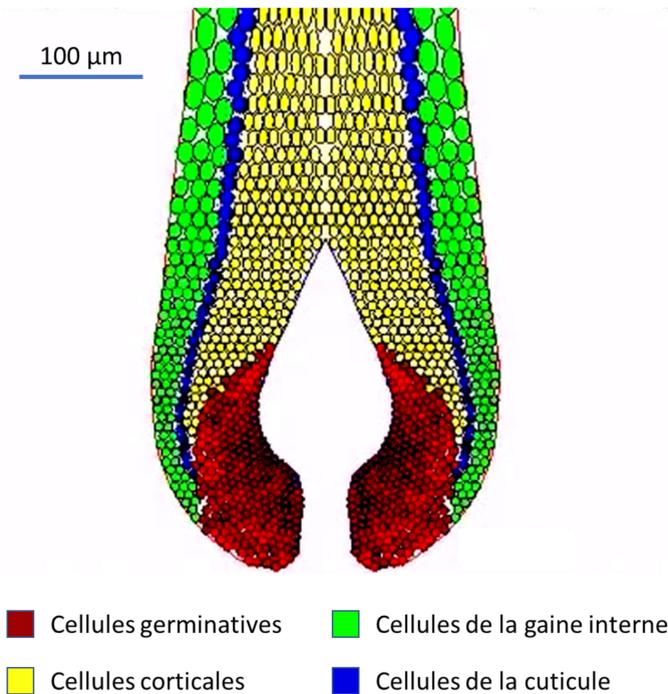


FIGURE 2. Simulation de la croissance d'un follicule pileux. Auteur : Christophe Béésau/Altran.

Propulsion électrique, collecte et stockage d'énergie solaire, électronique de puissance, irradiation solaire, aérodynamique, météorologie tout autour du globe... Aucune de ces thématiques n'était radicalement nouvelle par elle-même, mais de leur combinaison, de leur intrication au sein d'un système aussi fortement contraint, naissait un défi sans précédent.

Car toutes ces thématiques (et bien d'autres) devaient être intégrées dans le modèle multiphysique simulé qui déterminerait la solution optimale pour le futur avion. Avec, à la clef, des milliers d'équations et d'inéquations implicitement couplées les unes avec les autres, et des milliers de paramètres susceptibles d'entrer dans le processus d'optimisation. Or, le temps nécessaire au développement du modèle simulé avait été initialement estimé à 5 années, alors que les contraintes du projet ne nous laissaient que 18 mois pour le réaliser.

5. Quand les cheveux s'en mêlent

En travaillant dès le départ sur les descripteurs de complexité détaillant les caractéristiques du modèle simulé à construire, l'analyse de la mathématique du problème et en particulier de la nature des équations à résoudre avait révélé très tôt d'étonnantes similarités avec un autre problème très fortement paramétré auquel moi-même et mon équipe avions¹ apporté une réponse particulièrement efficace, quelques mois plus tôt : il s'agissait de la modélisation de la croissance d'un follicule pileux, véritable racine intradermique du cheveu (figure 2).

Mais comment deux problèmes aussi éloignés l'un de l'autre en apparence peuvent-ils avoir des similarités aussi fortes? Tout l'intérêt du choix *pertinent* des descripteurs de complexité est

¹Chez Altran.

bien de définir un espace multidimensionnel dans lequel les « distances » entre les problèmes peuvent être mesurées, révélant ainsi des proximités parfois surprenantes mais riches d'intérêt.

Dès lors, il nous était possible d'accélérer drastiquement la construction de la simulation multiphysique en déterminant directement, et avec un niveau de confiance élevé, la façon d'organiser le calcul de chaque sous-système et d'optimiser l'ensemble des couplages nécessaires au sein du modèle global. Et tous les ingénieurs en modélisation savent combien cette question du couplage est délicate tout autant que cruciale!

Aucun solveur ne pouvant traiter un problème aussi fortement paramétré, déterminer les solutions menant aux meilleures performances de l'avion nécessitait une approche différente. Or, en utilisant les descripteurs précédemment construits, il devenait possible d'estimer l'influence probable de la plupart des facteurs sur les performances de l'avion. Ainsi le problème d'optimisation pouvait-il être réduit de façon très significative et guidé par une démarche structurée, sans nécessiter une exploration "en aveugle", aussi risquée en termes de performances atteintes que coûteuse en temps.

Les tout premiers vols de l'avion furent source d'un certain stress, après les dix-huit mois d'études d'optimisation et les cinq ans d'ingénierie et de fabrication de l'avion. L'heure de vérité était venue : quel était le rendement énergétique obtenu? Le verdict tomba avec les mesures réalisées lors du premier vol d'essai du 7 avril 2010 : l'avion surperformait la simulation de 1,5 %, c'est-à-dire que nos calculs étaient très légèrement pessimistes, ce qui était exactement l'objectif recherché.

6. Franchir les océans?

Le premier avion solaire, HB-SIA, avait permis la réalisation de bien des records. Dix ans plus tard, son successeur spécialement conçu pour les vols de longue durée, HB-SI2, réussissait ses premiers essais. Ce délai avait bien sûr été mis à profit pour continuer l'exploration des descripteurs de complexité sur un grand nombre d'autres projets.

Rodée et disposant de tous les outils nécessaires validés sur de nombreux vols, l'équipe du *Mission Control Center* était quant à elle fin prête à accompagner les pilotes dans le défi du tour du monde aérien. Il restait cependant une question ouverte, aussi intéressante que difficile techniquement : comment estimer la stabilité des prévisions météorologiques le long de la route suivie par l'avion, en particulier lorsqu'il s'aventure à franchir les océans?

La dynamique des systèmes météo est d'une grande complexité (figure 3), et il ne s'agissait bien sûr ni de recommencer le calcul des prévisions fournies par la NOAA², ni de remettre en cause les interprétations réalisées par l'équipe météo, mais plutôt de quantifier rationnellement cette stabilité du décollage à l'atterrissage de l'avion.

Les données de la NOAA sont en effet actualisées par cycles de 6 heures et, en fonction de la dynamique propre des systèmes de basses et hautes pressions qui composent l'atmosphère, l'évolution de la prévision d'un cycle à l'autre pour un point donné est plus ou moins marquée. Or, plus la prévision concerne une période lointaine, moins elle est fiable, ce qui signifie aussi que sa stabilité probable diminue. Cette conséquence était donc à la fois gênante pour les vols longs (jusqu'à 120 heures, soit 5 jours pour l'étape de Nagoya à Hawaï) et complexe à quantifier sur une trajectoire couvrant plusieurs milliers de kilomètres.

7. Déplier l'origami spatio-temporel

Cette interrogation sur la stabilité des prévisions météo allait nous servir de cas d'école pour essayer de répondre à une autre question : est-il possible d'analyser la complexité d'un système,

² *National Oceanic and Atmospheric Administration.*

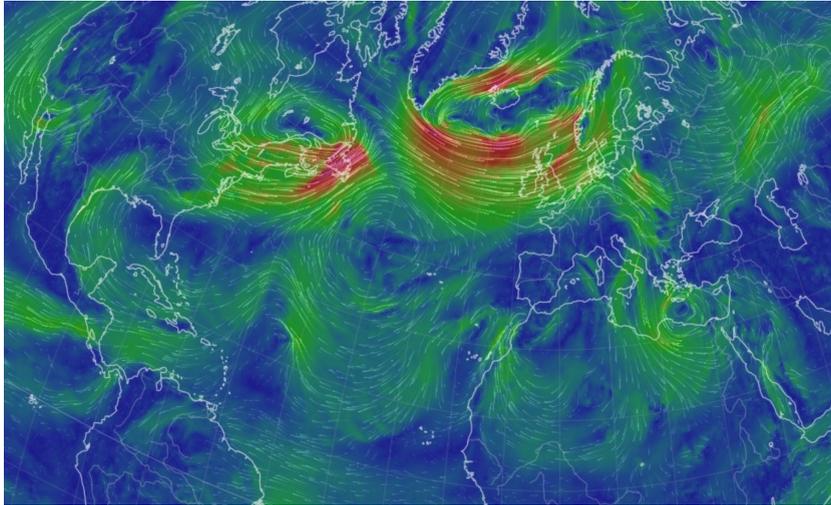


FIGURE 3. Systèmes de hautes et basses pressions sur l'Atlantique Nord. Les couleurs indiquent l'intensité des vents associés, de la plus faible (vert clair) à la plus intense (rouge). Crédit photo nullschool.net.

non pas uniquement en raisonnant à partir d'équations déjà connues et décrivant ses sous-systèmes, mais en prenant également en compte un ensemble de données caractérisant le comportement de ce système?

Car si d'innombrables travaux ont bien sûr été menés sur la question de la stabilité des grands systèmes depuis le célèbre article de R. May [3], il se trouvait que la configuration particulière de notre problème (les équations différentielles impliquées n'ayant généralement pas de solution analytique) contraignait à utiliser une approche non-conventionnelle. Ainsi, il fallait combiner l'élaboration de familles-types de relations de la physique et de la thermodynamique avec l'utilisation de données permettant de reconstituer des heuristiques de couplages spatiaux mais aussi temporels, significatifs de l'évolution des scénarios météorologiques.

De telles investigations supposaient la capacité de travailler simultanément sur des dizaines de prévisions³ composées chacune de 20 cycles successifs couvrant les 120 heures requises, le long d'une trajectoire parcourant des milliers de kilomètres. Par ailleurs, l'une des étapes de calcul consistait en une découpe pertinente de l'espace et du temps, livrés au regard tel un origami déplié. Cependant, la méthode récursive utilisée, très efficace, s'avérait gourmande en ressources matérielles. Enfin, il était évidemment indispensable d'effectuer ces calculs bien avant la disponibilité des données du cycle suivant, c'est-à-dire dans un délai maximum de 6 heures, sans quoi les résultats obtenus auraient utilisé de fait des données déjà obsolètes. Les exigences en termes de puissance de traitement nécessaire étaient donc réelles.

Disponible dès fin 2015, c'est un ordinateur parallèle⁴ qui allait assurer la totalité de ces traitements en moins d'une heure.

C'est ainsi que la stabilité des prévisions météorologiques de chacun des vols réalisant la seconde moitié (2016) du tour du monde aérien de l'avion *Solar Impulse* a pu être évaluée avec ce système expérimental. Les analyses de validation effectuées au long des prévisions successives ont également montré que les critères quantitatifs élaborés par cette méthode de travail permettaient d'anticiper efficacement la dynamique d'évolution des conditions météorologiques en un

³ Il s'agit des *ensembles*, c'est-à-dire de toutes les prévisions réalisées pour la même date et représentant en quelque sorte les multiples scénarios possibles d'évolution de la météo.

⁴ Calculateur Ulysse CDR-2 (Inworks).

point donné de la trajectoire, c'est-à-dire *la stabilité de la prévision* en ce point. L'extension des critères de stabilité à une trajectoire complète était maintenant une question de choix : extremum obtenu parmi l'ensemble des points de la trajectoire, raisonnement différencié en fonction de l'altitude de l'avion, combinaison ou non de critères selon les phénomènes physiques impliqués : turbulences, humidité relative, etc.

8. L'énigme des bouloches textiles

Restait enfin à déterminer de quelle manière ce *cas d'école* éclairait la possibilité de caractériser la complexité d'un système par l'utilisation conjointe d'équations connues et de données caractéristiques (grandeurs physiques estimées par les prévisions successives). En effet, et bien qu'élaborés empiriquement, les critères de stabilité avaient été démontrés pertinents; dans ce cas, pouvait-on s'attendre à ce que les équations associées à ces critères apportent une information nouvelle permettant de mieux déterminer les descripteurs de complexité du problème?

L'analyse réalisée à cet effet a montré un résultat surprenant à première vue : parmi tous les problèmes décrits dans la base de données de complexité, le plus proche « voisin » du problème de stabilité des prévisions météorologiques est un problème de croissance et d'évolution des bouloches textiles à la surface d'un velours!

Une analyse plus poussée de ce résultat explique cette énigme : même si les deux problèmes n'ont pas de ressemblance d'un point de vue physique, le calcul des descripteurs de complexité trouve, dans ce cas précis, des similarités significatives dans les équations de couplage des facteurs descriptifs de la tribologie des textiles d'une part, et de la dynamique des systèmes de basses et hautes pressions composant l'atmosphère, d'autre part... Une forme de « ressemblance » conceptuellement passionnante, et qu'il aurait été probablement difficile de soupçonner *a priori*.

Ainsi, et bien que restant à approfondir, cette démarche exploratoire ouvrait de fait la séduisante perspective de pouvoir analyser la complexité de tout problème mal décrit (en termes d'équations), voire d'une « boîte noire », si tant est que des données comportementales pertinentes sont disponibles!

9. Analyse et extensions futures

Toute démarche scientifique s'appuyant sur le principe de répétabilité, il était important d'explorer le domaine de validité de ces acquis et d'en affiner la maîtrise. Et si les heuristiques en elles-mêmes ne sont pas de la science, la science peut s'appuyer avec profit sur des heuristiques pour alimenter ses propres processus de découverte, y compris dans le domaine des mathématiques et de l'ingénierie.

Les descripteurs de complexité et les heuristiques associées présentés ci-dessus ont donc été généralisés et complétés, puis déployés sur plus de 150 projets d'innovation, dans une vingtaine de secteurs aussi variés que la science des matériaux, l'aéronautique, le soudage laser, la biotechnologie, la fabrication des composants optiques ou la physico-chimie des polymères.

Cet retour d'expérience (figure 4) peut-il éclairer le surprenant taux d'échec des projets d'innovation évalué par l'étude du CNRS, par exemple en identifiant des causes techniques de paralysie?

L'analyse montre que 5 causes déterminent 94 % des situations de blocage extrême des projets :

- Dans 27 % des cas, c'est l'existence de phénomènes inconnus (ou parfois non soupçonnés dans le contexte du projet) qui cause le blocage.
- Les interactions paradoxales, c'est-à-dire influençant le phénomène ou le système d'une façon opposée à ce qui est attendu, représentent 21 % des cas, à égalité de fréquence

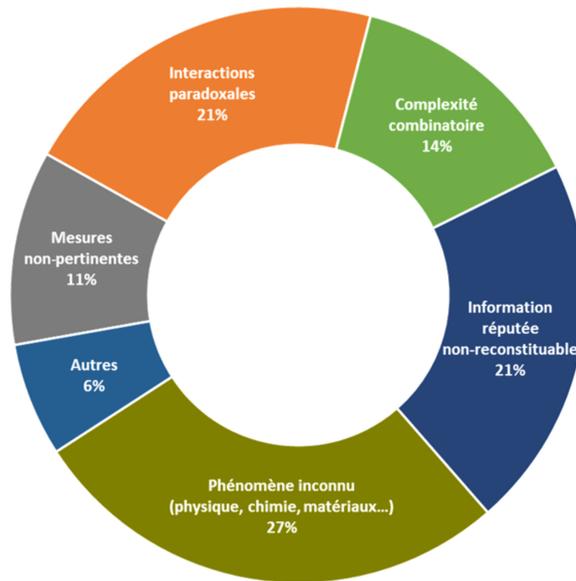


FIGURE 4. Répartition des causes de blocages extrêmes. Retour d'expérience sur 150 à 200 cas d'étude © 2023 Inworks.

avec les informations non utilisées car réputées (à tort) impossibles à reconstituer : effet de boîte noire, mesure irréalisable, etc.

- Les problèmes de complexité combinatoire représentent 14 % des cas et n'affectent pas seulement des questions de performances, mais aussi de stabilité difficile des systèmes.
- La présence de mesures ou données non-pertinentes (mesures avec erreurs insoupçonnées, données non fiables...) représente 11 % des cas.
- Enfin, d'autres causes complètent cette répartition, dans des proportions moindres, comme des erreurs humaines ou des effets d'échelle qui ne sont pas maîtrisés.

Soulignons que sur de nombreux projets, les causes racines ont pu être multiples, c'est-à-dire parfois coexistantes au sein du même système (ou sous-système), ou bien réparties dans différents sous-systèmes.

Tous ces résultats encouragent bien sûr à aller plus loin et à étendre les raisonnements qui ont initié ces travaux.

Ainsi, l'étape suivante, déjà en cours, consiste-t-elle à développer un processus de Machine Learning afin de traiter la base de données de complexité existante et d'en déduire plus rapidement les préconisations adaptées à l'analyse ou à la modélisation de nouveaux phénomènes ou systèmes complexes!

Déclaration d'intérêts

Christophe Béésau a travaillé pour la Solar Impulse Foundation (association à but non lucratif) de 2003 à 2016, en tant que Chief mathematician. Il joue aujourd'hui ce rôle pour la start-up Dirisolar.

Références

- [1] T. KUHN, *La structure des révolutions scientifiques*, Flammarion, 1970.
- [2] H. NOVOTNY, P. SCOTT and M. GIBBONS, *Repenser la Science*, Belin, 2003.
- [3] R. M. MAY, « Will a Large Complex System be Stable? », *Nature* **238** (1972), p. 413-414.