

**Les systèmes artificiels mis en place par l'homme pour modéliser le monde et pour le gérer sont de plus en plus détaillés et de plus en plus complexes.**

***Ces systèmes sont-ils toujours exploités de manière rationnelle<sup>1</sup> ?***

***La planète sera-t-elle mieux gérée sur le long terme ?***

Par Yves Desnoës février 2015

Au cours de ma vie professionnelle, j'ai assisté à l'augmentation de la complexité de systèmes que j'ai contribué à faire évoluer. Cette complexité est en particulier liée à la formidable expansion des systèmes dits d'information et de communication que nous observons depuis quelques décennies, expansion qui se poursuit aujourd'hui et dont la fin n'est pas en vue. A partir des problèmes que j'avais à résoudre, j'ai mené au cours des années une réflexion sur les caractéristiques de cette complexité, réflexion qui m'a aidé à concevoir des solutions et m'a donné une vision de la problématique d'ensemble, notamment des limites de la rationalité. Lorsque Bernard Beauzamy m'a proposé de participer à ce colloque et que j'ai vu le thème qu'il avait retenu, l'occasion m'a paru particulièrement opportune.

Nous allons examiner les systèmes utilisés pour la conduite des opérations aériennes, les systèmes utilisés pour la prévision à long terme du niveau de la mer, le réseau financier mondial et les systèmes de navigation maritime. Je n'ai pas d'expérience personnelle directe de l'avant-dernier, mais les éléments accessibles montrent bien la croissance de la complexité de ce système et il complète bien les autres pour dégager des conclusions générales.

### **L'évolution des opérations aériennes.**

Jusqu'à la fin des années 1980, les systèmes utilisés pour les opérations aériennes étaient séparés les uns des autres, le plus intégré étant celui utilisé pour la surveillance de l'espace aérien et la la défense aérienne, avec notamment la transmission et la présentation automatisées de pistes élaborées à partir des détections des radars. Les commandements de la défense aérienne, des forces aériennes défensives et du transport aérien étaient séparés. Le cycle de préparation d'une mission aérienne offensive était de l'ordre de 24 heures, donc peu efficace face à un ennemi mobile et dispersé. A la fin des années 1970, on a commencé à définir des évolutions de ces systèmes visant à les rendre plus rapides, faisant notamment passer les cycle de 24 heures à quelques heures, et aussi à gagner en productivité. Cela a nécessité l'interconnexion automatisée des systèmes qui auparavant communiquaient principalement par télex et voix, sur de multiples sites, notamment centres de commandement (fixes et mobiles), bases aériennes (fixes et mobiles), sites de missiles, sans oublier les avions eux-mêmes que l'on a reliés par des « liaisons de données tactiques »<sup>2</sup>. On a introduit dans ce dispositif des avions de surveillance avancée (AWACS) et automatisé également les liaisons avec la Marine, l'Armée de terre et les forces alliées. Tout cela fonctionne aujourd'hui de manière satisfaisante dans ce que l'on appelle SCCOA : Système de Commandement et de Conduite des Opérations Aériennes. Le cycle offensif a été très raccourci puisque l'on peut par exemple « reprogrammer » en vol des avions offensifs et l'on peut aussi participer à des opérations communes avec l'OTAN et les pays qui en font partie.

Pour le Système de Commandement et de Conduite des Opérations Aériennes (SCCOA) français, on a schématiquement appliqué les principes rappelés ci-dessous dans un processus voulu comme raisonnable et dont on peut estimer a posteriori qu'il l'a bien été.

---

1 J'ajouterais « raisonnable » selon la définition donnée plus bas.

2 liaisons hertziennes numériques

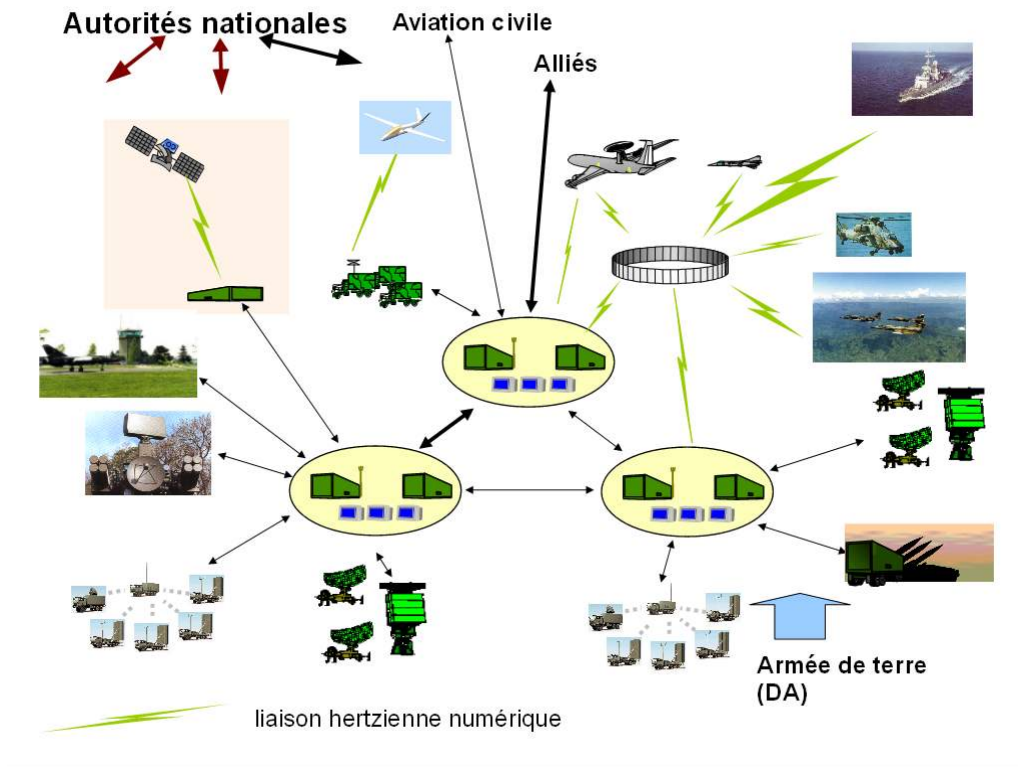


Figure 1 : schéma d'un système de conduite des opérations aériennes moderne

### Quelques définitions et caractéristiques des systèmes d'information interconnectés.

Avant d'aller plus loin, et pour qualifier les méthodes employées pour développer ces systèmes, quelques définitions sont nécessaires.

**Système** : au sens de l'ingénierie des systèmes ; ensemble organisé de matériels et logiciels satisfaisant des besoins communs.

Les systèmes en ce sens sont artificiels.

Il n'y a pas de système sans utilisateurs et la prise en compte de leurs caractéristiques est primordiale<sup>3</sup>.

**Rationnel** : décrit de manière logiquement rigoureuse ;  
ex : mathématiques, logique formelle, sciences exactes.

**Raisonné** : construit en suivant des règles de l'art dont de multiples applications ont montré la validité, ou en les extrapolant ; c'est ce que l'on pratique dans le domaine de l'ingénierie lorsque les méthodes purement rationnelles sont insuffisantes, ce qui est le cas le plus fréquent ;  
ex : cathédrales, majorité des logiciels, réseaux financiers.

*Un énoncé raisonné peut contenir des parties rationnelles*

*Un modèle intrinsèquement rationnel peut être inadapté à la réalité*

*En compliquant, on extrapole les règles de l'art*

**Règles de l'art** : méthodes, qualité, normes

<sup>3</sup> Certains auteurs incluent les utilisateurs dans ce qu'ils appellent « système ». Si l'on veut raisonner sur la complexité de la partie artificielle des systèmes définis ainsi, il faut répéter partout « partie rationnelle du système », ce qui est lourd, à moins de choisir un sigle (PRS), ce qui nuit à la lisibilité.

Extrapolation des règles de l'art : application du bon sens de l'ingénieur (expérimenté) pour traiter des problèmes nouveaux

, avec quelques principes simples ; ex :

- ce qui ne fonctionne pas bien pour des systèmes simples fonctionne encore moins bien pour des systèmes complexes
- une vision d'ensemble cohérente du système et de ses fonctions est nécessaire ; cette vision repose sur des hommes et il faut donc la transmettre ; cette transmission est délicate
- procéder par étapes où la complexité croît modérément.

On observe que les systèmes (artificiels selon notre définition) les plus complexes sont réalisés par des ingénieurs en sortant largement du domaine dit des sciences exactes.

Autant la frontière entre sciences exactes et règles de l'art de l'ingénierie est logiquement nette, encore que touffue car éparpillée en de nombreux emplacements, autant la frontière entre raisonnable et déraisonnable est floue, car on a peu de garde-fous en extrapolant, et l'incompétence ou l'inconscience, voire des motivations autres que la réussite du projet, conduisent trop souvent à des échecs qu'un peu de réflexion et de prudence auraient permis d'éviter ; mais les échecs sont vite « oubliés ».

### La combinatoire de la complexité

Il existe divers modèles mathématiques de complexité, notamment pour les algorithmes utilisés en informatique. Cherchant seulement à illustrer les dangers des interconnexions non maîtrisées dans le pire scénario possible, nous observerons que les liens entre  $n$  systèmes sont au nombre de  $n(n-1)/2$ , et que le nombre de configurations possibles (sous-ensembles de  $p$  systèmes parmi les  $n$  pour tous les  $p$  est de  $2^n$  (comme sur l'échiquier de la légende). Et il faut a priori prévoir les transitions entre ces  $2^n$  configurations ...

Bien sûr on simplifie en définissant des architectures, mais c'est plus un art qu'une science exacte.

### Observation et prévision à long terme du niveau de la mer.

Je ne parlerai ici que de ce que l'on appelle « niveau moyen », en le définissant comme le niveau de la mer lorsqu'on lui a retiré la marée astronomique, laquelle se prédit bien.

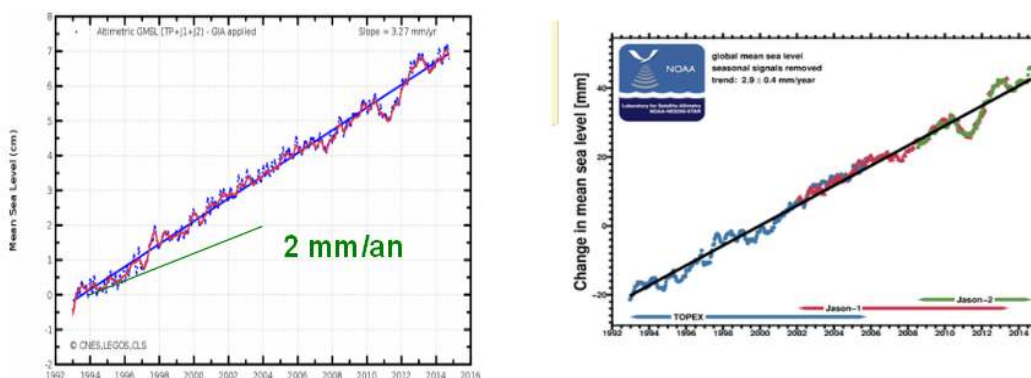


Figure 2: niveau moyen observé par les satellites d'altimétrie à gauche, site Aviso ; à droite, site NOAA

Sur la figure ci-dessus, on voit que les satellites d'altimétrie donnent une montée du niveau moyen de

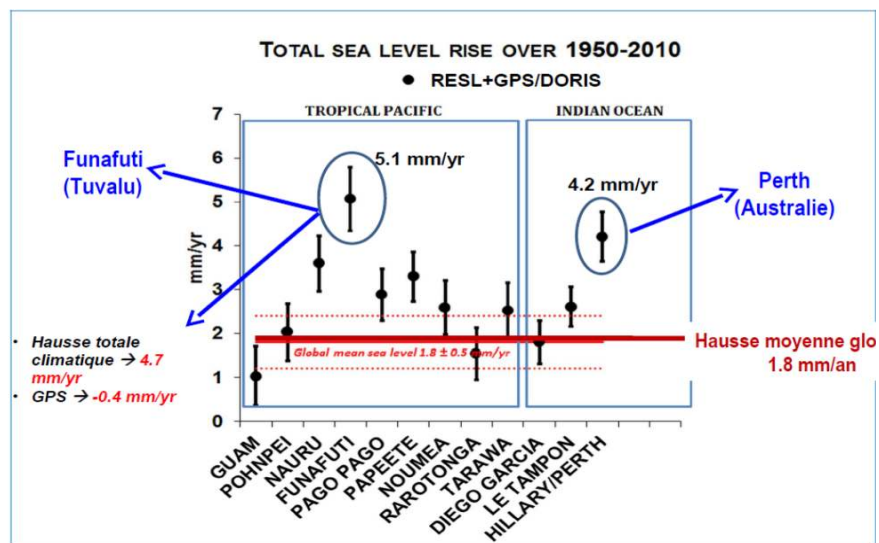
3mm/an environ ; le site de la NOAA présente les deux graphiques sans interpréter la différence de 0,4 mm/an.

Sur le graphique de gauche, on a porté une pente de 2 mm/an qui est ce que l'on observe en faisant la moyenne des observations des marégraphes côtiers<sup>4</sup> (une centaine) sur la période 1982-2011, après avoir corrigé les mesures des déplacements verticaux de la côte mesurés au GPS. La différence est loin d'être négligeable, et cruciale pour la validation des modèles utilisés pour la prévision<sup>5</sup> du niveau moyen jusqu'en 2100 : les modèles doivent être calés sur des observations portant sur une durée suffisante, et comme avant les années 1990 on n'a que des marégraphes côtiers, caler un modèle sur 2mm/an avant puis sur 3 mm/an après impose une accélération initiale qui ne peut que fausser les résultats si elle n'est pas réelle, et il n'est pas démontré qu'elle le soit.

Les bilans explicatifs des diverses contributions aux variations observées à l'échelle mondiale sont utiles, mais ne donnent que peu d'indications pour l'avenir. Une référence<sup>6</sup> souvent citée trouve une valeur moyenne de 1/10 pouce/an (2,54 mm/an) à +/- 0,46 RMS<sup>7</sup>, qui se trouve (hasard?) à mi-chemin entre les 2 mm/an et 3 mm/an décrits plus haut.

Dans les catastrophes prévues, on cite souvent les atolls de l'Océan Indien et du Pacifique qui seraient menacés par la montée du niveau de la mer. Qu'en est-il exactement?

Observons tout d'abord que certaines données alarmistes comme celles présentées figure 3 ci-dessous paraissent loin de la réalité.

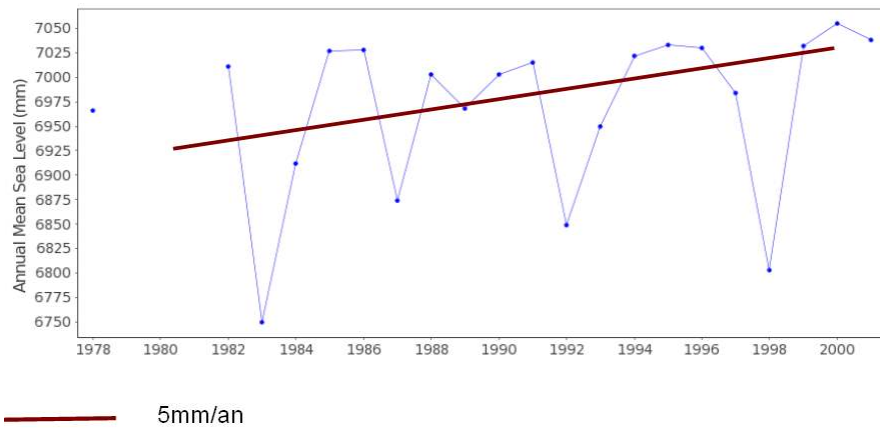


Becker et al., 2012, Palanisamy et al, in revisio

Figure 3 : un exemple de données alarmistes

Pour Funafuti (Tuvalu), SONEL donne les observations ci-dessous (figure 4)

- 4 Origine : SONEL - [www.sonel.org](http://www.sonel.org) ; SONEL vise à fournir des données du niveau de la mer de grande qualité métrologique obtenues à partir de marégraphes (niveaux relatifs de la mer) et de techniques modernes de géodésie (déplacements verticaux et niveaux absolus de la mer) pour l'étude des tendances à long terme du niveau de la mer ou la calibration d'altimètres radar embarqués sur satellite, par exemple.
- 5 Certains écrivent « prédition », mais en français il vaut mieux réserver ce terme à des prédictions maîtrisées, notamment la marée astronomique.
- 6 Church & al. GLR vol 38, 2011 - Revisiting the Earth's seal-level and energy budgets from 1961 to 2008
- 7 2,5 mm/an) à +/- 0,5 RMS serait plus correct du point de vue physique.



**Tuvalu** données SONEL

*Figure 4*

On ne sait pas d'où l'inventeur des 5 mm/an tire ses données pour 1950 ; si elles existent, leur qualité est inconnue. On notera que si l'on prend pour 1950 le point bas observé en 1983, on trouve une pente de 5 mm/an.

En ce qui concerne Perth, on pourra vérifier dans SONEL que les observations montrent une baisse du niveau moyen.

Et même si le niveau moyen montait aussi vite, il est probable que la plupart des atolls pourraient suivre : ils ont survécu à de nombreuses transgressions marines et sont capables de croître de plusieurs millimètres par an (certains auteurs vont jusqu'à 1 cm, mais restons mesurés). Par contre, si les eaux sont trop polluées (eaux usées, ordures, pêches au cyanure ou à la dynamite ...), ou si les prédateurs des prédateurs du corail sont trop chassés (ex : conque marine, prédateur de l'acanthaster), le corail meurt et l'atoll est menacé même si le niveau de la mer ne monte pas.

On dit que l'océan s'acidifie très rapidement et que cela va empêcher le corail de pousser. C'est un débat en soi et nous ne pouvons le décrire ici, mais vu les « imprécisions » déjà relevées, on peut se demander si là aussi il n'y a pas quelque exagération ; comment se ferait-il que les animaux à coquille ou squelette en calcaire aient proliféré à des époques où la concentration en gaz carbonique était largement supérieure à ce qui est prévu par les plus pessimistes? Certes il faut réduire les pollutions, mais les prend-on dans le bon ordre de priorité, et le gaz carbonique est-il une pollution en soi? On dit aussi que la vitesse d'évolution actuelle est sans précédent géologique ; comment peut-on en être sûr? A-t-on des mesures précises des vitesses d'évolution il y a des millions d'années (ex : PETM : Paleocene Eocene Thermal Maximum). Le débat étant radicalisé entre partisans de l'origine anthropique du réchauffement climatique et de ses conséquences catastrophiques d'un côté, et « climato-sceptiques »<sup>8</sup> de l'autre, il est difficile d'obtenir une estimation vraiment scientifique de l'imprécision des analyses et des prévisions. Seul l'avenir dira la vérité.

Mais où est la complexité dans tout cela?

Elle est dans la nature, que l'on ne sait modéliser que très grossièrement, et dans les modèles que l'on complexifie pour essayer de modéliser la nature. Il est d'ailleurs trompeur d'utiliser le même mot « complexité » pour la nature et pour les modèles d'environnement, car cela pourrait sous-entendre que la complexité de la nature est modélisable, ce qui est loin d'être démontré et très probablement hors d'atteinte, car il faudrait maîtriser une combinatoire qui dépasse largement les capacités humaines.

Si nous regardons les modèles utilisés pour prévoir le niveau moyen, nous observons que la plupart sont fortement non linéaires et pour certains discontinus (ex : changements d'état) :

<sup>8</sup> Certains vont jusqu'à opposer scientifiques et climato-sceptiques !

Pour expliquer et prévoir, il faut modéliser :

- température
  - interactions océans-atm
  - salinité, température, vents, courants,
  - vapeur d'eau
  - nuages (formation, albedo)
  - GES (gaz à effet de serre)
  - aérosols
  - albedo
- glaces
- hydrates de méthane
- aquifères
- stockage de l'eau
- mouvements du socle
- monde vivant

A la base, on trouve des modèles couplés « océan-atmosphère » utilisant les équations de Navier-Stokes, hyperboliques donc plutôt instables<sup>9</sup>, lesquelles ne donnent pas directement le niveau de la mer qui doit être déduit de bilans globaux de la température et de l'eau sous ses diverses formes. J'ai souligné le monde vivant, car il joue un rôle important dans les cycles des GES et n'est pas modélisé avec une précision compatible avec les objectifs de prévision, ni probablement modélisable autrement que par des coefficients empiriques dont la stabilité n'est pas connue.

En couplant tous ces modèles, on augmente la complexité sans validation proprement scientifique, puisque l'on a vu que les observations présentaient des divergences non expliquées. Du point de vue de l'ingénieur, on a un système complexe extrapolé à partir du raisonnable sans validation suffisante. On observe aussi qu'il y a multiplicité de modèles plus ou moins indépendants ( fondés sur les mêmes équations mais avec des approximations différentes) que l'on utilise pour fournir de pseudo intervalles de confiance (ce n'est pas ce que disent la plupart des auteurs, mais les non spécialistes les interprètent souvent comme tels, sans d'ailleurs bien savoir ce que serait un intervalle de confiance mathématiquement valide).

Les essais de modélisation des climats plus anciens, grâce aux informations recueillies dans les carottes de glace du Groenland et de l'Antarctique, ne sont pas très concluants et ne peuvent mettre en oeuvre les modèles de prévision à l'échéance du siècle car ceux-ci sont trop gourmands en capacités informatiques. Ce qui est certain, c'est que le climat passé évoluait partiellement en fonction des paramètres de l'orbite de la terre, principalement obliquité (de l'axe de rotation par rapport à la perpendiculaire à l'écliptique) et excentricité, au point que les marqueurs géologiques qui en résultent permettent de recalibrer les géochronologies sur des dizaines de millions d'années. Mais si l'on détecte bien les périodes, on ne sait pas pourquoi depuis un million d'années environ c'est la variation d'excentricité qui domine le climat (période de 100 000 ans environ) alors qu'avant c'était plutôt la variation de l'obliquité (période 41 000 ans). On ne sait pas non plus expliquer les réchauffements ou refroidissements sur le très long terme (millions d'années).

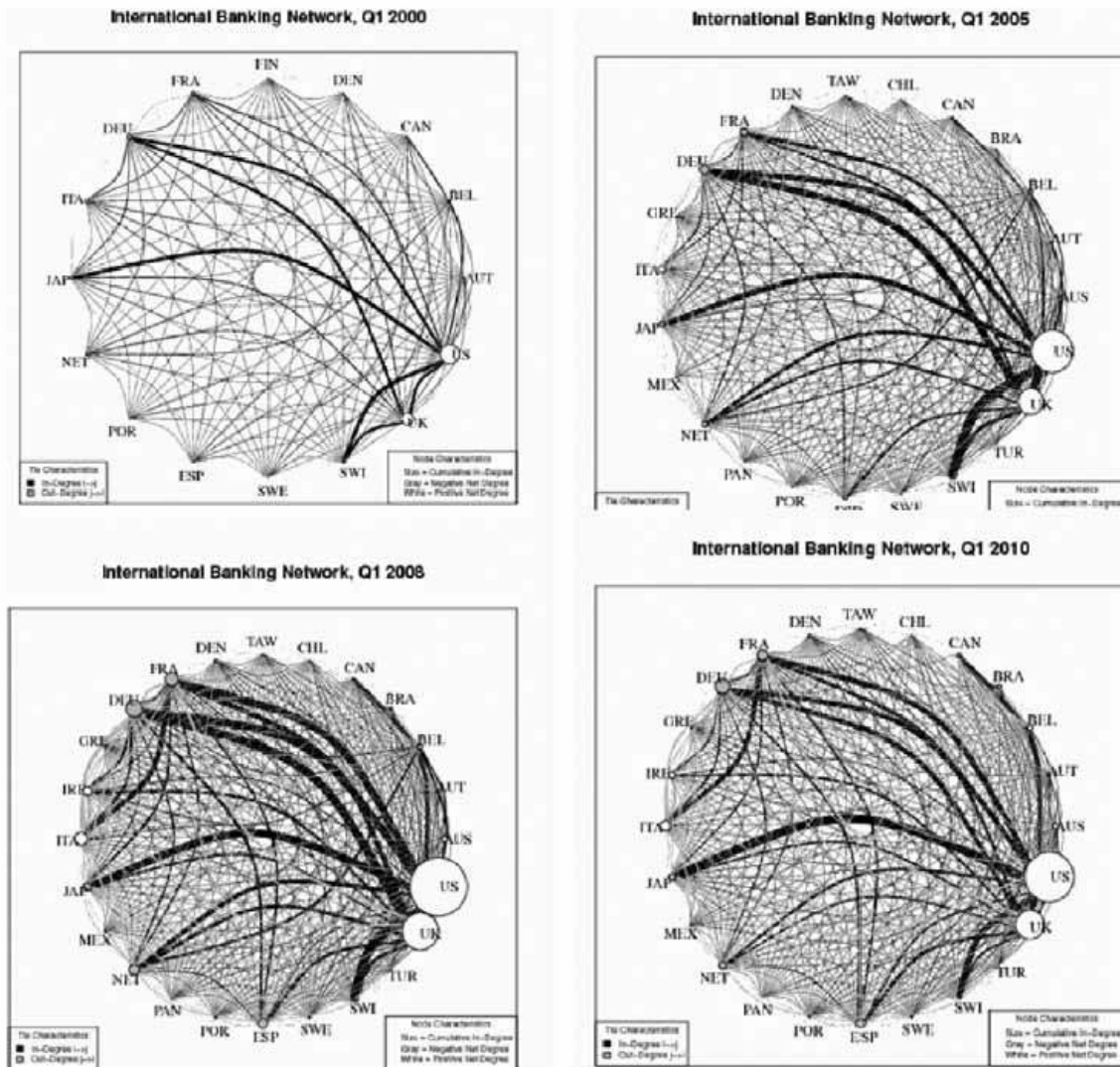
En conclusion de ce chapitre, on peut dire qu'en termes d'ingénieur on a significativement extrapolé le savoir-faire en augmentant la complexité de modèles dont beaucoup reposent sur des connaissances incomplètes et sur des approximations aux conséquences non mesurables. En outre on ne dispose pas de données suffisantes pour caler crédiblement ces modèles ni pour les valider. On est donc à la limite du raisonnable, voire au-delà lorsqu'on présente des prévisions dont on n'a aucun moyen d'évaluer la vraisemblance.

## **Le réseau financier mondial**

---

<sup>9</sup> On y applique généralement des lissages comparables à de la viscosité (artificielle)

Il n'est que de regarder la figure 5 ci-dessous pour constater que le réseau financier mondial (représenté par le réseau des banques) est de plus en plus complexe.



Source: Bank for International Settlements Consolidated banking statistics Table 9B.

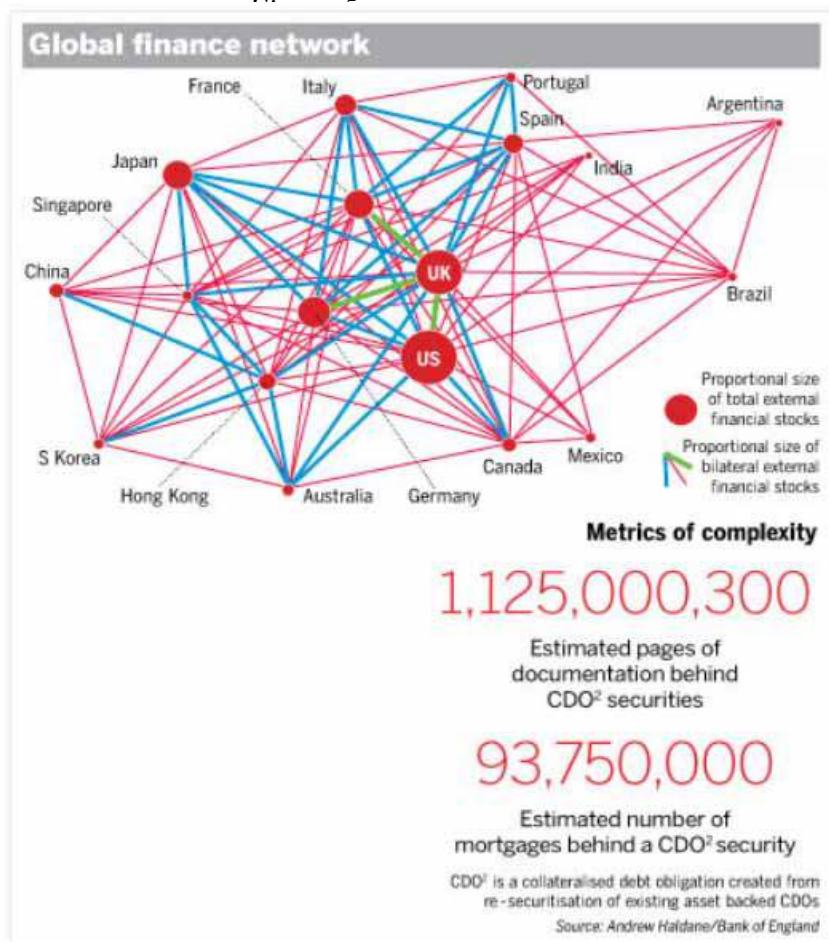


Figure 6

La figure 6 ci-dessus donne une autre vision de ce réseau et donne aussi des indications de complexité, notamment par la taille de la documentation. A titre de comparaison, la taille de la documentation d'un système complexe se compte aujourd'hui en dizaines de mètres linéaires, alors qu'ici il s'agit de dizaines de kilomètres linéaires !

Observant que ces systèmes sont en grande partie automatisés (donc artificiels)<sup>10</sup>, qu'ils présentent une grande complexité d'ensemble, sans architecture globale, et que les modèles de comportement sont en grande partie confidentiels en raison de la concurrence, on voit mal comment ils pourraient être considérés comme maîtrisables en l'état selon les règles de l'art de l'ingénierie. Certains financiers commencent à s'en rendre compte, et les figures ci-dessus sont issues d'articles sur le sujet, mais il n'est pas sûr que des démarches conduisant à une réelle maîtrise soient en vue. Certains par exemple envisagent d'utiliser des modèles d'écosystèmes naturels pour modéliser la finance mondiale ; ce n'est peut-être pas sans intérêt, mais vu ce que nous avons observé sur le monde vivant et sur la maîtrise de la complexité, l'expérience en ingénierie permet de prévoir que de telles extrapolations hardies sans fondement réel conduisent probablement à l'échec si l'on veut en tirer des prévisions fiables.

## La navigation maritime

C'est un domaine intéressant car en pleine mutation. L'arrivée sur les passerelles de navires et dans les centres à terre d'équipements et de systèmes de plus en plus performants et d'informations de plus en plus riches n'a pas apporté les gains de sécurité et de productivité escomptés. L'une des raisons identifiées est l'insuffisante intégration de tous ces équipements, qui se traduit par une surcharge des navigateurs. Cette intégration nécessite une mise en réseau automatisée des navires et des centres à terre qui les alimentent en informations et recueillent aussi les informations sur et en provenance des navires.



Figure 7 : des systèmes de plus en plus performants et des informations de plus en plus riches

On voit là une problématique analogue à celle décrite pour les opérations aériennes, mais avec des différences notables :

- il y a beaucoup plus de « partenaires », y compris des industriels concurrents visant à vendre des produits assurant les mêmes fonctions ;
- les fonctions sont plus simples, mais la complexité reste élevée pour la raison ci-dessus : deux produits concurrents ne peuvent être considérés comme identiques a priori, et la plupart des partenaires étatiques (a priori tous les états côtiers) ont des

<sup>10</sup> Ne nous trompons pas : ce qui est visé ici est l'automatisation des applications utilisées pour les décisions ; les transferts interbancaires fonctionnent bien, les achats de bourse aussi ; mais c'est relativement simple et les mécanismes sont connus de tous.



organisations et des besoins différents se traduisant par des configurations différentes, voire des systèmes différents, amplifiant les divergences dues à la multiplicité des produits ;

- on ne peut agir dans ce contexte que par normalisation, ce qui laisse le champ libre à de multiples interprétations et choix locaux d'architecture.

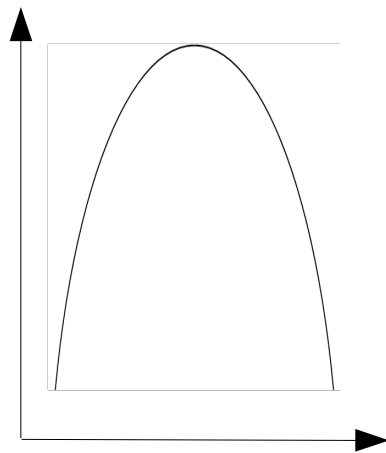
On est donc encore au milieu du gué, avec des normes nécessaires<sup>11</sup> qui commencent à voir le jour, par exemple dictionnaires de données ou qualité des logiciels, mais on n'a pas encore défini une première configuration dont on ait de bonnes raisons de penser quelle n'augmente pas trop brutalement la complexité systémique, et la communauté maritime dans son ensemble ne semble pas avoir pris conscience de la dimension du problème. On est en pleine extrapolation des règles de l'art sans le savoir collectivement, ce qui laisse augurer de périodes difficiles si l'on se lance trop vite dans la généralisation de systèmes satisfaisant de nouvelles normes incomplètes et ambiguës.

## Conclusions

Nous nous sommes souvent référés à l'ingénierie, qui est pertinente puisqu'on lui fait confiance pour concevoir et mettre en place des systèmes complexes. Mais écoute-t-on assez les ingénieurs ?

Nous avons vu que la complexité des systèmes augmentait effectivement et que l'exploitation qui en était faite pouvait être, du point de vue de l'ingénieur, à la limite du raisonnable, voire au-delà lorsque l'on est allé trop loin dans l'extrapolation, toujours intuitive, du savoir-faire. Nous avons également remarqué que ce n'est pas forcément en compliquant les systèmes que l'on est plus adapté à la réalité.

Efficacité



complexité du système

Avec un modèle simple, on peut montrer que la densité de défauts dans un logiciel bien structuré, développé en suivant des méthodes que nous avons qualifiées de raisonnables, croît comme le logarithme de sa taille. Etant donné la multiplication de systèmes qui sont au mieux développés et exploités raisonnablement, ainsi que les observations sur la combinatoire de la complexité, on peut intuitivement schématiser l'évolution de l'efficacité de ces systèmes en une croissance initiale aboutissant à un palier puis à une décroissance, laquelle pourrait être brutale dans certains cas.

Il serait utile d'étudier cette problématique rationnellement et raisonnablement. Il ne semble pas que ce soit à l'ordre du jour quelque part. Pourquoi ?

La première raison est probablement que les hommes cherchent des certitudes et que la proposition ci-dessus vise à préciser les limites de cette certitude. Il y a un côté magique dans l'utilisation des grands systèmes d'information et des grands systèmes de modélisation : on veut manifestement y croire. Les ordinateurs ont en partie remplacé les oracles antiques, lesquels donnaient souvent de bons résultats, sans que l'on sache d'ailleurs l'expliquer. On ne voit pas pourquoi nos systèmes « magiques » seraient de meilleures aides à la décision lorsqu'ils sont utilisés hors de leur domaine de validité, lequel est trop souvent inconnu.

Dans le même ordre d'idées, il semble naturel que les professionnels mettent en avant leur savoir-faire

<sup>11</sup> Mais pas encore suffisantes

plutôt que ses limites. Et si des avantages locaux peuvent en être tirés, pourquoi se préoccuper de l'efficacité globale?

Il faut également observer qu'il s'agit de grands systèmes de portée continentale ou mondiale qui sont par nature difficiles à observer :

- leurs détails internes sont en grande partie confidentiels,
- chacun est unique en son genre et il est difficile d'en tirer des conclusions générales,
- les durées d'observation nécessaires s'étaleraient sur de très longues périodes peu compatibles avec les cursus universitaires,
- ce n'est pas un domaine de recherche reconnu formellement.

Pour progresser sur ce type de réflexion, il faudrait un « club » international de personnes physiques et morales intéressées et motivées, et il faudrait aussi trouver des ressources. Une des questions fondamentales à laquelle il faudrait apporter une réponse est la suivante : peut-on interconnecter efficacement des applications<sup>12</sup> automatisées sans gouvernance d'ensemble ?

---

<sup>12</sup> internet n'est pas un exemple pertinent car il ne fait que transmettre et présenter des informations, ce qui est déjà remarquable mais justement tend à favoriser les interconnexions d'applications.