

Nouveaux processus de développement

Les promesses de l'intelligence artificielle basée sur la donnée vont-elles supplanter la culture du modèle ?

Durant plus de deux siècles le développement de l'industrie a su profiter du mouvement des sciences qui progressaient concomitamment. L'association de ces deux mouvements a transformé les pratiques de l'ingénierie industrielle qui s'est écartée d'une démarche simple de réflexion suivie d'une réalisation, et de l'expérience de la réussite ou de l'échec, pour tirer profit des nouvelles connaissances et développer des démarches prédictives. Progressivement l'ingénierie s'est construite puis établie sur les bases que l'on connaît maintenant :

- Compréhension et modélisation des phénomènes physiques à la base du comportement des « produits » tout au long de leur vie.
- Volonté de prévoir le mieux possible, sur la base des modèles précédemment établis, le comportement de ces « produits » face aux conditions d'utilisation (attendues ou observées).

C'est la « culture du modèle ». Elle concerne toutes les phases du processus « produit », conception, vérification-validation, exploitation et maintenance des « objets », ou des « systèmes » dans lesquels ils sont intégrés.

Mais cette culture, très « mécanicienne », et les processus de développement associés, montrent quelques carences lorsque les systèmes se complexifient, en particulier lorsque les « logiciels embarqués » prennent une place importante, mais pas seulement, comme le montre l'exemple des difficultés à identifier, lors de la conception, les solutions globalement optimales, par opposition à un optimum local, ou à explorer tous les cas de fonctionnement pouvant être rencontrés.

La période récente, celle de l'informatisation, celle des logiciels embarqués, celle des bases de données massives à explorer, gérer et exploiter, a été l'occasion de voir éclore de nouvelles approches pour développer les outils spécifiques de ce domaine. **Une nouvelle « culture » est née celle de la « donnée ».**

La question de la fusion de ces deux cultures se pose depuis plusieurs années alors que les objets connectés et l'**Intelligence Artificielle** interviennent de façon massive et opportuniste.

Mais leur orchestration intelligente n'est encore qu'en émergence. La culture du modèle sera-t-elle submergée par celle de la donnée ? Comment cela va-t-il évoluer ? Quels espoirs peut-on fonder ? Que peut-on proposer ?

1 La culture des modèles pour les produits et systèmes physiques

L'ingénierie des systèmes « physiques », celle des « produits », la technologie des « objets » (OT) a depuis longtemps, avec une intensité variée selon les secteurs, éprouvé la nécessité de construire

des modèles, tant pour comprendre l'environnement physique des systèmes que pour concevoir ces systèmes dans toutes les dimensions de leur complexité croissante.

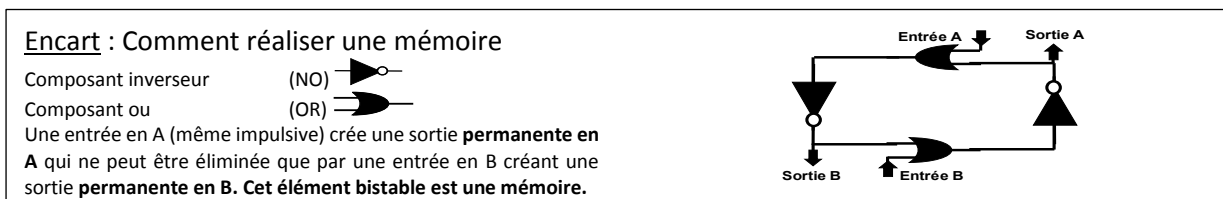
Cela s'est développé dans les multiples disciplines de cette ingénierie : mécanique (des solides, des fluides), thermique, conception de produits ou d'usines (production : énergétique, pétrochimique, etc.), électricité et circuits électroniques (de plus en plus complexes et intégrés), optronique, etc...

La culture de base est celle de la Fiabilité, au sens FMDS : Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité, Sécurité (RAMS en anglais). Cela concerne des parties prenantes de plus en plus nombreuses dans les projets de développement et les multiples phases de vie des systèmes, désormais élargies du berceau à la tombe par les préoccupations sociétales de soutenabilité des solutions proposées.

La croissance continue du nombre de facteurs à prendre en compte dans le cadre de la conception et de la complexité qui en résulte justifie la mise en place d'une ingénierie intégrée et collaborative : échange, partage, co-simulation entre modèles (de disciplines voire entreprises différentes), entreprise étendue, PLM (Product Lifecycle Management), BIM (Building Information Modeling), jumeau numérique de système en fonctionnement, etc.

1.1. L'ingénierie des systèmes

Dès lors que deux entités sont en interaction, qu'ainsi elles se contraignent mutuellement, les fonctionnalités de chacune sont modifiées de sorte que l'ensemble des fonctions obtenu n'est pas la réunion des fonctions de l'une et de l'autre et qu'en revanche il en émerge de nouvelles fonctions dont il faut avoir la maîtrise. Un exemple élémentaire classique est que l'interaction de deux composants électroniques de type NOR (*Non-Ou*) crée une mémoire.



On comprend dès lors que la multiplicité croissante des fonctions ou des constituants des systèmes (et donc de leurs interactions) va dans le sens d'une complexité de plus en plus difficilement appréhendable par l'esprit humain. Une des difficultés est d'organiser et hiérarchiser les fonctions, services, organes, etc.

Dans une démarche d'ingénierie, on a alors besoin de vue d'ensemble, d'architecture d'ensemble, de contrôle-commande (la supervision) d'ensemble, de sécurité d'ensemble... ce qui implique de savoir structurer, découper et définir les interactions de façon rigoureuse... et de disposer de méthodes et d'outils pour le faire.

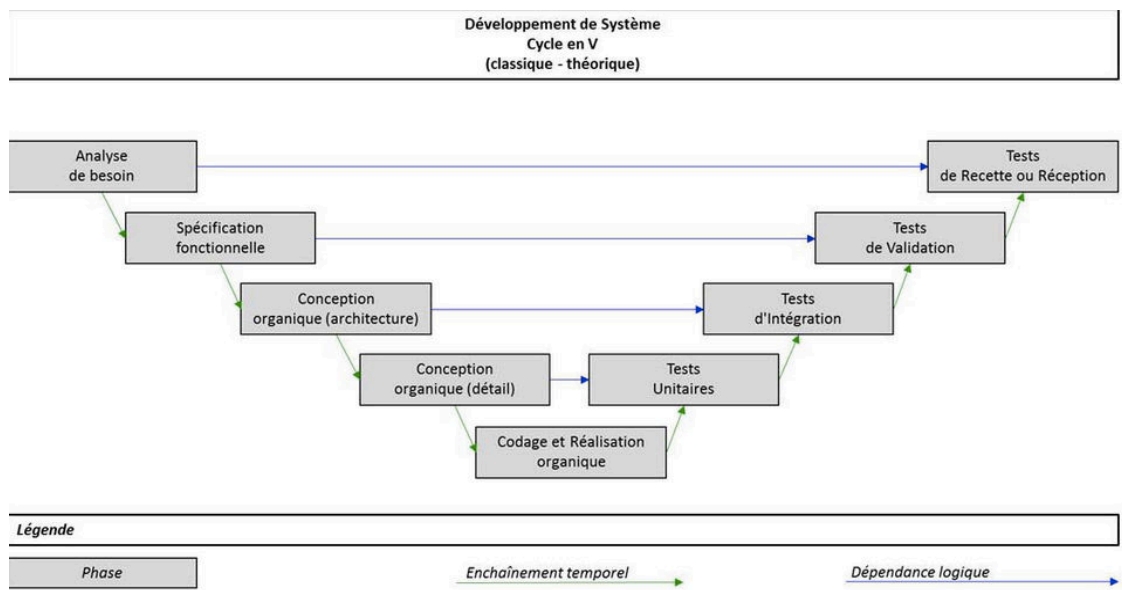
1.1.1. Le cycle en V, la Planification, la Vérification et la Validation (V&V)

Le cycle en V a été inventé afin de faciliter une démarche d'ingénieur (la complexité étant résolue par le découplage) progressive liant le plus abstrait au plus concret avec : phases descendantes de construction jusqu'au détail et phases remontantes d'intégration, de vérification, validation, certification.

La branche descendante va de l'expression des besoins à la conception détaillée.

La branche remontante va du test unitaire à la certification. La distinction des différents types de test (robustesse, limites, couverture) mérite une attention particulière ainsi que la planification et l'automatisation de test.

Cette démarche d'ingénierie rigoureuse est bien adaptée pour des développements incrémentaux ou à des développements pour lesquels une phase préliminaire d'avant-projet a permis d'établir une bonne vue d'ensemble du système et du partage entre ses différents constituants.



1.1.2. Les besoins, le "Design" précoce et l'exploration du champ des possibles

Souvent le maître d'ouvrage exprime son besoin dans la continuité des pratiques et solutions existants. Dans un "business as usual" c'est efficace et justifié, mais lors de certaines phases sociétales ou entrepreneuriales, il peut s'avérer pertinent de s'affranchir des habitudes et d'aller au fond de l'expression des "vrais" besoins.

Dans une **démarche exhaustive**, on a alors envie d'explorer dès le départ les différentes options fonctionnelles, architecturales, technologiques envisageables, d'imaginer et construire les compromis les plus adéquats et de tracer les conséquences des possibles choix envisagés.

Pour cela, il existe des méthodes permettant de modéliser les dépendances des choix à niveaux multiples (approches matricielles et autres) dans le but :

- de construire des compromis préliminaires
- d'optimiser ces compromis
- de pouvoir revenir sur certains choix et leurs conséquences pour en explorer d'autres

La combinatoire étant très vite hors de portée de l'esprit humain, on peut alors envisager des méthodes d'exploration automatique de ces arborescences de choix, voire de trouver les meilleurs. De tels outils n'existent pas encore véritablement.

Les **méthodes agiles** avec leurs sprints mobilisant "par salves" les équipes sur des défis prédéfinis d'évolution du système, sont un exemple d'intéressantes façons de construire certains types de systèmes (non critiques), notamment des applications ou démonstrateurs dont les spécifications précises sont difficiles à obtenir de façon figée de la part du maître d'ouvrage ou l'utilisateur. Mais bien que permettant des explorations plus larges, ne garantissent pas non plus l'exhaustivité de l'exploration du champ des possibles.

1.1.3. La traçabilité entre exigences, modèles, réalisations et V&V

Les exigences de fiabilité impliquent que tout soit enregistré, justifié (donc entre exigences, modèles, réalisations et V&V) et construit.

Pour cela, il existe des outils, mais ils sont souvent lourds (indexation des exigences dans les différents modèles) surtout au regard de l'explosion des exigences (elles-mêmes parfois pléthoriques, lorsque le maître d'ouvrage fait trop d'ingérence dans la maîtrise d'œuvre ou les choix techniques). Mais

l'essentiel est dans la rigueur méthodologique des liens qui sont établis entre phases, modèles, disciplines, métiers, etc.

Il existe aussi des méta-langages formels - basés sur des formes syntaxiques ou lexicales standardisées prédéfinies : Si... alors, Lorsque., Reçoit... émet... - d'expression des exigences et des outils de modélisation-exécution de ces exigences qui peuvent être directement utilisés pour le test : sollicitation du système, vérification des pré-conditions d'applicabilité de l'exigence à la situation du système, oracle de son comportement attendu et constat d'écart à l'exigence.

1.1.4. La sûreté de fonctionnement et les modèles

La maturité des industries sur le sujet de la sûreté de fonctionnement est variable et dépend du degré de criticité des systèmes (cf. ferroviaire, pétrochimie, nucléaire, aéronautique, automobile, médical). On observe cependant une progressive convergence des méthodes, de la certification et des normes.

Les techniques les plus élémentaires sont des méthodes "papier" : APR (Analyse Préliminaire de Risque), AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité), Arbres de Défaillances, Livret des points critiques, souvent affaires de spécialistes, avec leurs limites : humaines, statiques... lourdes à réaliser "à la main".

Le MBSA (Model Based Safety Assessment) fait au contraire appel à des modèles formels (AltaRica et al.) qui assurent la propagation des défaillances, sur lesquels peut être effectué du model-checking, qui peuvent calculer des arbres de défaillance, des coupes minimales, des scénarii critiques

1.1.5. La maintenance basée sur les modèles

Les modèles successifs que l'on réalise pour concevoir le système, notamment en ce qui concerne ses modes de fonctionnement, ses détections d'anomalies, ses modes dégradés, sa sûreté de fonctionnement et ses essais peuvent être utilisés pour la maintenance des systèmes. Notamment, les modèles exécutables peuvent être considérés comme des embryons de jumeaux numériques des systèmes en fonctionnement.

Parallèlement, des modèles physiques du système et de ses constituants peuvent être construits pour simuler l'évolution de leurs caractéristiques et notamment leur perte d'efficacité (vieillessement, etc.), leur rupture, etc. Ceci permet d'obtenir des valeurs numériques théoriques concernant le MTTF (Mean Time to Failure).

1.2. L'ingénierie physique et la modélisation multi-disciplinaire

De longue date (années « 70 ») la CAO et les outils de calcul en mécanique des solides (statique puis dynamique) ont accompagné la conception physique (notamment mécanique) des produits.

1.2.1. L'ingénierie, le design, la modélisation et l'analyse physique et multidisciplinaire

On se situe ici dans le MDA (Multi-Disciplinary Analysis) du système (multi)physique. Les disciplines concernées sont par exemple : la Mécanique (des Solides, des Fluides), la Thermique, l'Acoustique, l'Electricité... dont les lois sont mises en équations paramétrées, statiques ou dynamiques.

Dans certains domaines, ces équations sont analytiquement solubles (intégration...), d'autres (Méca-Flu par exemple) nécessitant des heuristiques ou des calculs (1D, 2D, 3D...) par maillage (par exemple Lattice Boltzmann) avec des contraintes appliquées aux limites. Les outils effectuent alors des calculs directs, des propagations, etc ... Ils produisent des résultats numériques assortis de vues (1D, 2D, 3D...) interprétables par l'ingénieur. Ces résultats sont normalement assortis de tolérances.

L'automatisation de certaines tâches de modélisation, l'enchaînement des opérations d'analyse se font généralement manuellement, avec un souhait croissant d'automatisation des enchaînements (voire par des méthodes d'apprentissage – voir 3-5).

1.2.2. L'ingénierie, le design, modélisation et optimisation multidisciplinaire

On se situe ici dans le MDO (Multidisciplinary Design Optimization) du système (multi)physique. Le but est de trouver le meilleur compromis, compte tenu d'une fonction de contrainte, ce terme étant générique (par exemple, la masse, le coût, ou ...).

Compte tenu de l'existence d'un nombre très important de caractéristiques à explorer dès que le système à concevoir est un peu complexe des démarches simplificatrices sont souvent utilisées en phase d'avant-projet, par exemple de commencer par sélectionner les caractéristiques les plus influentes et de donner de simples valeurs probantes aux autres. Ensuite le passage à la modélisation complète se traduit souvent par une énormité de modèles de plusieurs disciplines que l'on doit associer, dans cette situation la faisabilité des calculs peut nécessiter de faire appel à des modèles condensés localement (surrogate models) dans chaque discipline.

L'automatisation de l'exploration (la plus couvrante possible) des domaines paramétriques et la recherche d'un optimum absolu, sans se perdre dans des optimaux locaux nécessite le plus souvent de faire appel à des algorithmes de type génétique (voir 3.4).

1.3. L'électronique programmable et le calcul embarqué

Depuis les années '70, l'industrie électronique a mis au point des logiciels de conception et de routage de plus en plus sophistiqués ; ces outils ont accompagné l'intégration tridimensionnelle et exponentiellement croissante des technologies, architectures et composants.

Les moyens de calcul dans les systèmes sont actuellement encore scindés sur les architectures :

- soit matérielles - HardWare (Hw) - telles que les circuits intégrés (VLSI) et programmables (FPGA)
- soit logicielles - SoftWare (Sw) - telles que les processeurs de calcul (CPU) devenus graphiques (GPU).

Les besoins de calcul sont en pleine explosion (Cf. les ordinateurs, les véhicules connectés ou autonomes et leurs multiples services, la reconnaissance de forme, etc.) et le parallélisme du calcul se développe.

La montée en puissance de la 5G interroge de son côté sur la répartition local-global des services et des calculs. En fonction des exigences de rapidité (l'information vers le "nuage" (cloud) ne parcourt que 300 km/ms - ce qui peut être insuffisant pour la sécurité - on aura besoin de décentralisation des calculs (edge computing).

Il est raisonnable de penser que, pour des raisons de performance, il soit pertinent de traiter (i.e. nettoyer, apporter de l'intelligibilité, pré-interpréter) certaines données au plus près de leur capture, d'autres de façon centralisée, d'autres enfin à un niveau intermédiaire (edge computing, Hardware-Software).

2 La culture de la donnée en ingénierie de l'information

L'ingénierie des systèmes d'information et les technologies de l'information (IT) et des "Services" à l'entreprise ont de leur côté depuis longtemps développé des processus de développement

initialement orientés vers les systèmes, logiciels et outils de gestion et destinés à l'entreprise et à ses services support.

La culture de base est celle de la Disponibilité, au sens FMDS.

Encart : Fiabilité et Disponibilité, quelques rappels

La **fiabilité** est l'aptitude d'un système à fonctionner pendant un intervalle de temps, à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, durant un temps donné.

La **disponibilité** est l'aptitude d'un système à être en état de marche à un instant donné, en supposant que la fourniture des moyens nécessaires est assurée.

Remarque : la disponibilité d'un système dépend de sa **fiabilité** et de sa **maintenabilité**. En effet, pour qu'un système soit en état de marche à un instant donné, il faut, soit qu'il n'est pas arrêté de fonctionner (fiabilité), soit qu'il ait pu être remis en état de marche en cas de défaillance (maintenabilité).

2.1. Les systèmes d'information : adéquation, conception et maintenance

La base des systèmes d'information est la connaissance, la structuration, la gestion de la donnée et de l'information en général, les bases de données, leur saisie, leur extraction, leur exploitation, leur affichage.

L'analyse et la spécification précise du comportement (dynamique) des systèmes d'information n'était pas central jusqu'au foisonnement récent des données et de leur exploitation en "temps réel".

2.1.1 Les bases de données et leur conception

La conception de SGBD (Systèmes de Gestion de Base de Données) s'est, il y a quelques décennies, appuyée sur des méthodes (Merise et ses MCD, Modèles Conceptuels de Données).

Depuis les années '60, on a vu successivement apparaître les SGBD hiérarchiques, relationnels, objets (persistants), graphes.

2.1.2 La sémantique et les données

Initialement propre au domaine du texte, la Sémantique a vu ses côtés pratiques prendre la forme de thesaurus, puis d'ontologie (spécifique, publique) en lien avec le text-mining : vectorisation, racinisation, lemmatisation et autres techniques de text-mining permettant de mesurer des distances, d'établir des proximités et classifications...

Elle est désormais utilisée dans toutes sortes de domaines. La sémantique intervient dans le graph-mining (traitement topologique sélectif de grands graphes), dans les données échangées dans la messagerie (CAN...) d'un véhicule, dans les images captées (on parle de caméra sémantique), dans le Web sémantique...

2.1.3 La statistiques et les méthodes de classification

La Statistique est la science de base de la donnée. Les années '70 ont vu fleurir l'utilisation de l'Analyse en Composantes Principales (ACP), l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC). Ces méthodes ont constitué les bases de la classification automatique des données (multidimensionnelles).

La branche Bayésienne de la Statistique a elle aussi été à la source des mécanismes utilisés dans les méthodes actuelles de l'Intelligence Artificielle basées sur l'apprentissage.

2.1.4 La maintenance basée sur les données : le 6-Sigma

Dans le domaine de la production, l'utilisation de méthodes de type 6-Sigma permet depuis longtemps de suivre la conformité de la production aux tolérances prévues.

L'automatisation des moyens de collecte de données en production (via des capteurs et objets connectés) et les outils de traitement permettent de traiter en Temps Réel la conformité de la production et d'être réactif dans sa gestion.

2.2. La Recherche opérationnelle

La Recherche Opérationnelle (RO) est un domaine particulier des Mathématiques et particulièrement des Mathématiques Appliquées qui cherche à trouver des solutions à des questions opérationnelles :

- L'exemple type est la recherche de trajet (problème de la tournée dit du voyageur de commerce).
- Un autre problème type est celui de l'allocation optimale de ressources (exemples : allocation des arrivées d'avions aux portes des terminaux d'aéroport, emploi du temps des lycées avec les contraintes de salles, d'options et des professeurs, attribution des chambres d'hôpital aux malades avec les contraintes matérielles et humaines des malades et des personnels, etc.).
- Un autre enfin est la recherche d'optimum d'implantation de centres de collecte (déchets) ou de production (bassin client).

De tels problèmes (dits non polynomiaux, NP-Complets) n'ont pas de solution analytique. Les résoudre implique le parcours de la totalité des combinatoires d'entrées, ce qui est généralement impossible dans des échelles de temps "humaines", même avec de puissants calculateurs.

Ils nécessitent donc de développer des heuristiques ad hoc, plus ou moins performantes et efficaces selon les classes de problèmes traités et les domaines d'application ; des compétitions mathématiques existent en permanence à ce sujet.

Les langages non déclaratifs, la programmation par contraintes offrent des outils généralistes permettant de résoudre divers types de problèmes d'allocation de ressources.

L'enjeu actuel est de construire des outils graphiques permettant de poser un problème d'ingénieur sous la forme Mathématique et de faire ensuite appel aux solveurs appropriés.

3 L'émergence de l'"Intelligence Artificielle"

Depuis quelques années, l'irruption de ce qu'on appelle **Intelligence Artificielle (IA)** se fait à grande échelle dans tous les domaines, y compris ceux de l'ingénierie "physique". Quelles réalités recouvre cette notion ?

L'intelligence "humaine" repose sur la capacité des individus à utiliser les **informations dont ils disposent** pour arriver à des conclusions, apporter des solutions à un problème matériel ou intellectuel. Pour atteindre ce résultat ils peuvent aussi faire preuve d'inventivité ou d'"intuition", faire des hypothèses sur des informations ou données non disponibles ...

C'est ainsi que, au fil des siècles, le monde a progressé, mais le monde change et grâce à la **dématérialisation des échanges, à une digitalisation du monde** et, plus généralement, aux progrès accomplis dans les (Nouvelles) Technologies de l'Information et de la Communication (TIC ; capacité, rapidité, convivialité), la quantité d'informations disponibles immédiatement, ou accessibles plus ou moins facilement, a augmenté dans des proportions considérables, et non envisagées il y a seulement 20 ans.

Notre monde crée ainsi aujourd'hui en 2 jours l'équivalent en nombre de données de ce qui a été accumulé entre l'aube de l'humanité et l'année 2003.

L'explosion des informations désormais disponibles rend le travail de l'humain plus difficile car elle sature sa capacité d'analyse et entraîne l'utilisation d'outils (logiques ou informatiques) pour l'aider à exploiter cette abondance d'informations (exemple de la mission TARA et de ses 3 peta-octets d'informations recueillis). Dans cette situation l'objectif logique est de faire que les outils d'aide à l'humain parviennent à terme à le remplacer dans tout ou partie des processus d'analyse et de prise de décision ou, a minima, de formulation de proposition. C'est le rêve, ou l'espoir, que véhicule le concept d'"Intelligence Artificielle".

Mais quelles réalités recouvre cette notion ?

3.1. Le "Big Data", le "Nuage (Cloud)" et la globalisation

Désormais dans notre monde, toute action, qu'elle soit professionnelle ou privée, personnelle ou collective, raisonnée ou automatique, matérielle ou intellectuelle, dans le monde de l'industrie ou celui des services, d'origine humaine ou d'origine naturelle, laisse des traces numériques indélébiles. C'est le « **Big Data** ».

Ces « empreintes » ne sont rien individuellement, mais collectivement elles peuvent être considérées comme une projection dans le monde digital de la réalité du monde, de ses lois physiques et de nos comportements et donc être d'un grand intérêt pour qui saurait les interpréter.

Ces données sont de nature très variées (données chiffrées, images, textes ...), sous des formes elles aussi très variées (bases de données, enregistrements d'opérations, enregistrements audio ...), d'accès libre, cachées dans les ordinateurs des entreprises ou chez des hébergeurs, mais surtout de validité ou de fiabilité très variables

Ces connaissances... ou plutôt ces informations qui "explosent", sont de plus en plus stockées un peu partout, ailleurs, de façon globalisée, dans le « Cloud ».

3.2. Les objets connectés et l'intelligence "embarquée"

A la frontière de l'objet et de la donnée, les objets connectés sont des capteurs d'information ou (inclusivement) des actionneurs et ils sont dotés d'une certaine intelligence...

Autrefois réservé aux calculateurs de contrôle-commande ou de pilotage embarqués dans des systèmes mobiles le terme "embarqué" est désormais utilisé pour tout ce qui concerne une intelligence décentralisée dans un sous-système, parfois même peu mobile par lui-même.

Cette extension de la notion d'"embarqué" est fortement liée à la diffusion des objets connectés, à l'Internet des Objets (l'IoT, Internet of Things).

3.3. Les systèmes experts à l'ancienne

Avant que le terme d'IA ne soit à la mode, étaient apparus dans les années '80 les systèmes (multi-)experts basés sur la notion de faits et de règles. Ils sont activés par des moteurs d'inférence à chaînage avant, arrière ou mixte avec des logiques classiques (booléennes) ou des logiques dites "floues". La base de règle est établie généralement à partir de dire d'expert, nécessite un investissement assez lourd et suppose un processus de mise à jour, tenant compte des faits nouveaux.

Ces systèmes ont pour but de reproduire le raisonnement de l'expert (déduction et inférence). Leur utilisation a connu un long hiver depuis cette époque.

3.4. Les algorithmes génétiques

Leur objet est de contrecarrer le déterminisme des algorithmes de calcul (simulation aléatoire, recherche opérationnelle, recherche d'optimum, par exemple) pour explorer des zones

systématiquement oubliées. Grâce à l'introduction de "mutations" dans l'héritage de propriétés déterministe, ils permettent de parcourir automatiquement et plus largement le champ des possibles ou de sortir de puits intempestifs.

Ceci permet par exemple de trouver des optima de configurations que la machine déterministe ne pourrait trouver par construction et que l'humain ne parviendrait pas à explorer faute d'efficacité, de temps ou de rigueur.

3.5. Le Machine-Learning, les réseaux de neurones : fiabilité et confiance

Les pratiques au moins quarantennaires de la Statistique (cf. ACP ou AFC et Bayésien mentionnés plus haut), ont eu une suite notable dans **le Machine Learning** (ML) (One Shot Learning, Deep Learning...) et les réseaux de neurones (NN, Neural networks). Leurs domaines d'application les plus en vue en sont :

- La reconnaissance d'image (Computer Vision) (ex. identification de tumeurs sur des radios ou scans)
- Le traitement automatique du langage (NLP, Natural Language Processing) (ex. : analyse de sentiment exprimé).

La multiplicité des outils existants et de leurs paramètres, la concurrence des méthodes et des équipes de recherche mettent en évidence le rôle croissant des "data analysts" et de leur capacité à ajuster ("tuner") le paramétrage (ex : choix des outils, profondeur et fonctions des différentes "couches" des NN).

L'apprentissage (training) peut être supervisé (typiquement : orienté par l'humain) ou non supervisé. Il consiste à faire ingurgiter la connaissance à la machine via la labellisation (i.e. classification préalable) des objets, par ex. des images. Cette labellisation peut parfois même être automatisée.

La quantité de données d'apprentissage est un critère essentiel. Il existe nombre de jeux de données publics. Dans le cas de données en nombre insuffisant pour l'apprentissage, il existe des techniques d'amplification (augmentation artificielle de la quantité) de données.

Il faut noter que des biais intrinsèques aux jeux de données, i.e. des répartitions "orientées" peuvent être la source de performances dégradées, voire d'erreurs criantes du dispositif de traitement. Exemple : répartition de genre trop "masculine" ou d'ethnie trop "blanche", répartition géographique trop "occidentale" ou socio-professionnelle...

Mais une étape essentielle des processus est le nettoyage des données : il s'avère qu'on doit y consacrer le quart ou le tiers des moyens. En effet, la qualité de l'analyse opérationnelle ou de la prédiction dépend de celle de l'apprentissage.

Les limites d'efficacité sont encore loin de celles exigées dans les systèmes "sûrs" : on parle de pourcentage de reconnaissance (96 %, par exemple, i.e. $4 \cdot 10^{-2}$ d'échec) et pas encore de ratio d'échec (10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} par exemple, comme on en rencontre en sûreté de fonctionnement).

3.6. La maintenance basée sur les données : l'IA pure et agnostique

De multiples exemples fleurissent de recueil agnostique (déconnecté de tout modèle préalable) de données sur chaîne de production, flotte ou système en exploitation suivi de traitement de type Machine Learning en lien avec des événements de panne-réparation de ces systèmes.

Encart : Un exemple de maintenance prédictive

Aux Etats-Unis, sur un site d'exploitation de centraux téléphoniques modernes, avant l'ère de l'IA, un travail sur la base de toutes les informations disponibles (recueillies par les systèmes de surveillance des différents éléments, disponibles dans les cahiers de maintenance, ...) a permis d'identifier des « empreintes » (successions particulières de signaux hors norme) et l'apparition ultérieure de pannes aux conséquences sérieuses. Il a ainsi été possible de mettre en place une maintenance prédictive sur la base de ces « signaux faibles » et de notablement augmenter la fiabilité opérationnelle du site.

De telles démarches seront certainement grandement facilitées par l'utilisation d'outils IA.

On espère ainsi identifier de signes avant-coureurs (signaux faibles) annonciateurs de défaillances. Corrélation ou causalité ? On est moins ici dans la recherche de compréhension de la causalité que dans la simple recherche de corrélation, le travail explicatif pouvant être fait autrement, d'autant que les outils actuels ne permettent pas d'expliquer ces corrélations.

3.7. Quelles perspectives

La question de la traçabilité du verdict (classification, décision) est une question émergente actuellement, notamment dans le cadre de systèmes faisant l'objet d'un processus de vérification rigoureux ou de certification (par exemple, le véhicule autonome dans son acceptation ultime). Cela signifie qu'on cherche des solutions pour que la machine fournisse des éléments descriptifs des caractéristiques auto-élaborées de ses différentes couches neuronales permettant d'expliquer à posteriori voire en temps réel ses choix de classification.

Des projets favorisant l'émergence d'une IA "explicable" se font actuellement jour dans divers appels à projet et dans les IRT (Instituts de Recherche et de Technologie) notamment pour l'aéronautique voire le véhicule autonome.

Déjà très présent dans la finance l'usage de la « **Block chain** » pourrait être envisagé partout où une grande confiance dans la validité d'une information est recherchée (certification, autorisation d'usage spécifique ...).

4 Les constats

Les méthodes d'ingénierie système-produit-technique (OT) peuvent apparaître lourdes (attention à ne pas les submerger de données inutiles), mais elles ont fait leurs preuves en répondant à des exigences essentiellement de fiabilité.

Les méthodes de l'ingénierie de l'information ont elles aussi fait leurs preuves, avec en général un niveau moindre de formalisation ou modélisation car répondant essentiellement à des exigences de disponibilité.

Par ailleurs on constate une grande multiplicité des méthodes d'ingénierie, utilisées en mode globalement opportuniste mais peu organisé. Et de leur côté, les systèmes sont de plus en plus foisonnants en termes de fonctionnalités, de constituants, de parties prenantes ; et leurs interactions sont de plus en plus nombreuses et intriquées.

Or la connaissance, la conception et la maintenance prédictive des systèmes nécessite - justement - une approche d'ensemble, cohérente et construite à partir des besoins et des objectifs poursuivis, qu'ils soient fonctionnels, de performance ou concernent la sûreté de fonctionnement, la sécurité des données, la protection des données, la validation ou la certification.

Du point de vue de l'humain et des compétences mobilisées, on constate encore à ce jour une grande scission culturelle entre l'ingénierie dite technique des objets et celle de l'information. Leur intégration et la double compétence associée ne sont encore qu'une exceptionnelle réalité. Et comme

la "mode" est à la donnée, on peut nourrir des craintes sur l'incorporation de concepts de modèles, plus spécifiques de l'ingénierie technique de l'objet dans celle de l'information.

Sont abordées ci-après quelques questions transverses illustrées par quelques constats.

4.1. La question de la traçabilité et de l'explicabilité

En vue de fiabilité, les démarches d'ingénierie système-produit-techniques mettent le plus souvent en place des processus structurés de traçabilité des choix, entre l'amont et l'aval des phases d'élaboration du système.

Or les méthodes de l'ingénierie de l'information, notamment l'IA fait de plus en plus appel à des boîtes noires algorithmiques, certes paramétrables, mais qui ne fournissent généralement aucune trace de raisonnement déductif progressif, d'enchaînement causal (on se place dans la corrélation) et donc aucune justification hormis un résultat de performance (dont le niveau actuel n'est d'ailleurs pas dans les ordres de grandeur attendus en sûreté de fonctionnement).

Là aussi la question ouverte est : peut-on envisager **une IA traçable et explicable** ?

4.2. La question de la centralisation-décentralisation

Que ce soit à l'échelle de la planète ou à celle, interne, du système, la question de la centralisation des données et des traitements se pose.

- Doit-on laisser les données ou les calculs dans le Cloud et y accéder selon les besoins ? Le risque d'indisponibilité (panne ou absence de réseau, non-déterminisme, etc.) devrait amener à y renoncer pour les applications critiques.
- Doit-on effectuer les calculs de façon centralisée dans le système ? Oui, en ce qui concerne la supervision de haut niveau et critique du système.
- Doit-on effectuer certains prétraitements, soit certaines décisions au plus près de la capture des données, de façon décentralisée ? Oui pour alléger et pré-interpréter la sémantique, pour la rapidité de traitement (local, centralisé, intermédiaire ou edge).

Mais tout cela reste à étudier au cas par cas dans une approche systémique éclairée.

4.3. L'exemple de la maintenance

Les diverses approches de la question de la maintenance des systèmes selon le point de vue (modèle, données) se résument en 4 axes :

La maintenance devrait être basée :

- sur les modèles
 - du système et de son comportement
 - physiques de perte d'efficacité (vieillesse, fatigue, rupture, etc.)
- sur les données :
 - le 6-Sigma et l'analyse de dispersion
 - l'IA pure basée sur la donnée (agnostique de tout modèle du système observé)

"I made a dream..." : l'idéal ne serait-il pas de les combiner intelligemment, par exemple en reliant les données aux modèles et en incorporant dans les algorithmes dit d'IA les éventuels modèles existants, élaborés pour la conception ou la maintenance des systèmes en opération ?

5 Conclusions, conseils et perspectives

Espérer que l'Intelligence Artificielle sera capable de reconstituer à elle seule et très vite toute la culture des modèles (et de la physique au sens large, acquise depuis des siècles), c'est un peu nier l'excellence de la construction et du progrès humains.

Certes, la machine est dans un nombre croissant de domaines plus efficace et plus performante que l'homme, mais c'est encore dans des cas délimités. Le plus sage est donc de s'efforcer de faire en sorte que les méthodes nouvelles basées sur la donnée sachent à la fois :

- prendre en compte les acquis de la culture des modèles (formalisation, structuration, modélisation, simulation, traçabilité...) : de façon simpliste, ne pourrait-on imaginer que des réseaux de neurones intègrent des modèles génériques préétablis dans leurs "couches" ?
- expliquer a posteriori ce qu'elles ont construit, que l'on peut assimiler à "leur raisonnement" : un ensemble de réflexions est en émergence sur ce dernier sujet - l'"IA explicable" - notamment dans une optique de certification.

Sur le plan méthodologique, il convient de bien comprendre les excellences respectives de l'OT et de l'IT :

- Oui, les technologies des objets sont plus formelles, donc plus lourdes, mais elles ont fait la preuve de leur efficacité dans la conception et la production de systèmes fiables
- Oui, les technologies de l'information ont fait la preuve de leur capacité à gérer et traiter de grandes quantités (croissantes) d'informations, allant vers le big-data

Oui aux apports manifestes de l'IA.

Non à la pensée magique relative à l'IA qui consisterait à penser que l'effort de modélisation doit être abandonné par l'humain au profit de la machine "qui saurait à coup sûr" reconstituer son savoir (acquis au fil des siècles) à partir des données (de l'instant).

Il convient d'utiliser les bonnes techniques (OT ou IT) en fonction des objectifs et des exigences à respecter. Cela concerne tant l'architecture fonctionnelle ou organique des solutions, les méthodes de modélisation ou le calcul.

Il faut viser à fertiliser mutuellement :

- l'OT par l'IT (apprentissage)
- l'IT par l'OT (intégration de la rigueur des modèles dans l'explicabilité)

Des progrès théoriques probables sont espérés sur la traçabilité et l'explicabilité en IA.

Enfin - last but not least - à défaut d'espérer à court terme l'émergence de doubles compétences en ingénierie technique (modèle) et ingénierie de l'information (IA comprise), il faudrait s'efforcer de construire des équipes mixtes dont la réunion des membres et l'interaction entre eux permette cette double compétence et la « cross-fertilization ».

"Le Point de vue d'un économiste"

L'intégration économique des sauts technologiques dans les entreprises

Chaque saut technologique représente une nouvelle zone de profit soit par l'apport d'un nouveau produit, soit d'un nouveau service et donc la création d'un nouveau besoin pour les consommateurs. Les décideurs dans les entreprises se préoccupent toujours de la notion du retour sur investissement avant de s'engager dans un nouveau système de production, fût-il issu d'une amélioration du processus existant. Aujourd'hui, l'IA telle qu'elle est présentée dans le monde comme pourvoyeuse de capacité d'analyse et de rationalité des décisions prises n'a pas encore convaincu l'ensemble des décideurs. Probablement du fait que le modèle de l'IA basée sur la donnée est présenté comme une solution de substitution complète à la culture du modèle. Et surtout, les résultats de la promesse ne sont pas encore là... Dans l'histoire économique, la plus grande part d'augmentation de la profitabilité d'un produit est encore aujourd'hui issue de l'amélioration des processus de production ou l'amélioration de la qualité d'un produit.

Les Allemands et les Japonais pour des raisons de structure capitalistique de leurs entreprises, de culture d'entreprise et sociétale ont su améliorer au mieux les marges et l'attractivité de leurs produits. Pour développer ces deux aspects, ils se sont appuyés sur la culture du modèle. De fait, c'est la culture du modèle poussée à son paroxysme et la discipline et la rigueur de l'application de cette culture qui a abouti à l'excellence des processus de production qui ont abouti aux performances remarquables de leurs économies.. La culture du modèle qui présente toujours une grande efficacité dans l'amélioration des performances des entreprises n'est pas encore moribonde.

La structuration capitalistique joue également un grand rôle dans le processus de décision d'évolution et d'investissement d'une entreprise. Les entreprises Allemandes et Japonaises ont construit leur efficacité autour de plusieurs valeurs :

- Le consensus
- La recherche d'une qualité supérieure
- La permanence de l'homme et le respect de son rôle dans l'entreprise
- Une taille adaptée aux objectifs de production

Aujourd'hui, les machines et les robots ont envahi les chaînes de production des biens et des services en Allemagne et au Japon. On voit des hommes et des robots travailler côte à côte sur les chaînes sans que cela dérange particulièrement les hommes. La rentabilité des entreprises de ces pays en a été améliorée.

Economiquement, l'IA n'est pourtant pas présente dans les entreprises et est même encore loin de remplacer les modèles existants. L'incertitude liée à la qualité du résultat obtenu est encore trop forte pour inciter les entreprises à délaisser la culture du modèle. Le premier qui identifiera une source de profit supplémentaire dans un investissement en IA le fera sans hésiter. Pour autant, il devra adapter sa structure d'entreprise (capitalistique, organisationnelle et humaine) à l'introduction de ce nouvel élément dans sa chaîne de valeur. La première étape consistera probablement à introduire une part d'IA dans la culture du modèle, puis à trouver les synergies complémentaires. La rupture technologique s'accompagne obligatoirement d'un changement de paradigme dans la gestion et la structure d'une entreprise et de ses processus de production. Et tout comme la structure des premières voitures automobiles s'est basée sur la structure des calèches ou des charrettes pour finalement évoluer vers les formes des véhicules que nous connaissons aujourd'hui, l'intégration dans la chaîne de production de modèle de données gérées par l'IA se fera par touches successives dans les entreprises. Celles-ci gèreront son intégration dans une évolution constante jusqu'à arriver à maturité. Le modèle de l'intelligence artificielle basée sur la donnée intégrera probablement les entreprises dans les prochaines années mais probablement pas comme nous l'imaginons...

Table des matières

1	La culture des modèles pour les produits et systèmes physiques	1
1.1.	L'ingénierie des systèmes	2
1.1.1.	Le cycle en V, la Planification, la Vérification et la Validation (V&V)	2
1.1.2.	Les besoins, le "Design" précoce et l'exploration du champ des possibles	3
1.1.3.	La traçabilité entre exigences, modèles, réalisations et V&V	3
1.1.4.	La sûreté de fonctionnement et les modèles	4
1.1.5.	La maintenance basée sur les modèles	4
1.2.	L'ingénierie physique et la modélisation multi-disciplinaire	4
1.2.1	L'ingénierie, le design, la modélisation et l'analyse physique et multidisciplinaire	4
1.2.2	L'ingénierie, le design, la modélisation et l'optimisation multidisciplinaire	5
1.3.	L'électronique programmable et le calcul embarqué	5
2	La culture de la donnée en ingénierie de l'information	5
2.1	Les systèmes d'information : adéquation, conception et maintenance	6
2.1.1	Les bases de données et leur conception	6
2.1.2	La sémantique et les données	6
2.1.3	La statistiques et les méthodes de classification	6
2.1.4	La maintenance basée sur les données : le 6-Sigma	6
2.2	La Recherche opérationnelle	7
3	L'émergence de l'"Intelligence Artificielle" et sa nature	7
3.1	Le "Big Data", le "Nuage (Cloud)" et la globalisation	Erreur ! Signet non défini.
3.2	Les objets connectés et l'intelligence "embarquée"	8
3.3	Les systèmes experts à l'ancienne	8
3.4	Les algorithmes génétiques	8
3.5	Le Machine-Learning, les réseaux de neurones : fiabilité et confiance	9
3.6	La maintenance basée sur les données : l'IA pure et agnostique	9
4	Les constats	10
4.1	La question de la centralisation-décentralisation	11
4.2	L'exemple de la maintenance	11
4.3	La question de la traçabilité et de l'explicabilité	11
5	Conclusions, conseils et perspectives	12