

Théorie de l'information

La théorie de l'information, sans précision, est le nom usuel désignant la théorie de l'information de Shannon, qui est une théorie probabiliste permettant de quantifier le contenu moyen en information d'un ensemble de messages, dont le codage informatique satisfait une distribution statistique précise. Ce domaine trouve son origine scientifique avec Claude Shannon qui en est le père fondateur avec son article *A Mathematical Theory of Communications* publié en 1948.

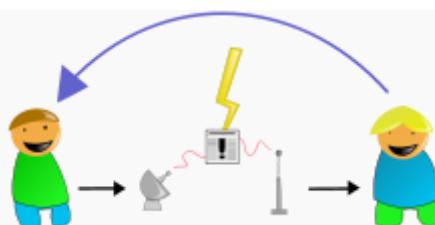
Parmi les branches importantes de la théorie de l'information de Shannon, on peut citer :

- le codage de l'information,
- la mesure quantitative de redondance d'un texte,
- la compression de données,
- la cryptographie.

Dans un sens plus général, une théorie de l'information est une théorie visant à quantifier et qualifier la notion de contenu en information présent dans un ensemble de données. À ce titre, il existe une autre théorie de l'information : la théorie algorithmique de l'information, créée par Kolmogorov, Solomonov et Chaitin au début des années 1960.

L'information selon Shannon, un concept de la physique mathématique

L'information est un concept physique nouveau qui a surgi dans un champ technologique. Le concept théorique d'information a été introduit à partir de recherches théoriques sur les systèmes de télécommunication. L'origine de ces recherches remonte aux études entreprises dès la fin du XIX^e siècle, en physique et en mathématique par Boltzmann et Markov sur la notion de probabilité d'un événement et les possibilités de mesure de cette probabilité. Plus récemment, avant la Seconde Guerre mondiale, les contributions les plus importantes sont dues à la collaboration des mathématiciens et des ingénieurs des télécommunications, qui ont été amenés à envisager les propriétés théoriques de tout système de signaux utilisé par les êtres, vivants ou techniques, à des fins de communication.



Modèle de la communication de Shannon et Weaver

À la suite des travaux de Hartley (1928), Shannon (1948) détermine l'information comme grandeur mesurable, sinon observable —car nul n'a jamais vu l'information— et celle-ci devient la poutre maîtresse de la théorie de la communication qu'il élabore avec Warren Weaver¹.

Cette théorie est née de préoccupations techniques pratiques. La société Bell cherche à transmettre les messages de la façon à la fois la plus économique et la plus fiable. Aussi le cadre originel de la théorie est celui d'un système de communications où un émetteur transmet un message à un récepteur à travers un canal matériel/énergétique donné. Émetteur et récepteur ont par hypothèse un répertoire commun, un code qui contient les catégories de signaux utilisables. Ainsi le message codé est transmis, de l'émetteur au récepteur à travers le canal, sous forme de signes ou signaux portés par de la matière/énergie.

Ainsi, le concept d'information a été l'objet d'une théorie que la postérité a choisi d'appeler "théorie de l'information" alors qu'il s'agissait, à proprement parler, d'une théorie mathématique de la communication de l'information ; or cette expression est exactement celle de Shannon et Weaver ! Cette source de confusion est régulièrement rappelée dans la littérature. On dit, en

pareil cas, que l'expression abrégée a été retenue par l'usage ; l'emploi du sigle TMCI clarifierait pourtant bien la situation.

Cette théorie mathématique appliquée aux techniques de la télécommunication a été élaborée plus spécialement par Claude Shannon, ingénieur à la Compagnie des Téléphones Bell et reste jusqu'à nos jours la base du concept dit scientifique d'information. Cependant, cette théorie ne pourrait s'appuyer ni sur la forme matérielle/énergétique, ni sur le contenu cognitif des messages émis : leur contenu sémantique est laissé de côté, de même que leur contenu physique, pour ne s'intéresser qu'aux aspects mathématiques et communicationnels.

Dans sa conception originale, la théorie de l'information de Shannon s'est limitée à analyser les moyens à mettre en œuvre dans les techniques de télécommunication pour transmettre l'information le plus rapidement possible et avec le maximum de sécurité. Elle s'est donc efforcée de développer des méthodes susceptibles de minimiser la probabilité d'erreur dans la reconnaissance du message. Une notion fondamentale sera nécessaire pour développer ces méthodes : la mesure de l'information, au sens mathématique du terme.

Pour Shannon, l'information présente un caractère essentiellement aléatoire. Un événement aléatoire est par définition incertain. Cette incertitude est prise comme mesure de l'information. Une information sera donc uniquement définie par sa probabilité ($I = -\log p$). Donc l'information est la mesure de l'incertitude calculée à partir de la probabilité de l'événement. Shannon a donc confondu la notion d'information et de mesure d'incertitude. Il faut remarquer que dans cette définition l'information est bien synonyme de mesure d'incertitude. Dans cet ordre d'idée, plus une information est incertaine, plus elle est intéressante, et un événement certain ne contient aucune information. En théorie de l'information de Shannon, il s'agit donc de raisonner en probabilité et non en logique pure.

L'information de Shannon se mesure en unités binaires dites bits. Le bit peut être défini comme un événement qui dénoue l'incertitude d'un récepteur placé devant une alternative dont les deux issues sont pour lui équiprobables. Plus les éventualités que peut envisager ce récepteur sont nombreuses, plus le message comporte d'événements informatifs, plus s'accroît la quantité de bits transmis. Il est clair que nul récepteur ne mesure en bits l'information obtenue dans un message. C'est seulement le constructeur d'un canal de télécommunication qui a besoin de la théorie, et mesure l'information en bits pour rendre la transmission de message la plus économique et la plus fiable.

La notion d'information d'après Shannon est nécessairement associée à la notion de « redondance » et à celle de « bruit ». Par exemple, en linguistique l'information n'est ni dans le mot, ni dans la syllabe, ni dans la lettre. Il y a des lettres voire des syllabes qui sont inutiles à la transmission de l'information que contient le mot : il y a dans une phrase, des mots inutiles à la transmission de l'information. La théorie de Shannon appelle redondance tout ce qui dans le message apparaît comme en surplus. Aussi est-il économique de ne pas transmettre la redondance.

L'information chemine à travers un canal matériel/énergétique : fil téléphonique, onde radio, etc. Or, dans son cheminement, l'information rencontre du bruit. Le bruit est constitué par les perturbations aléatoires de toutes sortes qui surgissent dans le canal de transmission et tendent à brouiller le message. Le problème de la dégradation de l'information par le bruit est donc un problème inhérent à sa communication. Ici, l'idée de redondance présente une face nouvelle ; alors qu'elle apparaît comme un surplus inutile sous l'angle économique, elle devient, sous l'angle de la fiabilité de la transmission un fortifiant contre le bruit, un préventif contre les risques d'ambiguïté et d'erreur à la réception.

Le statut physique de la théorie de l'information

Très vite de multiples applications de la théorie de l'information de Shannon sont apparues dans le domaine des sciences humaines² : les modèles mathématiques élaborés ont permis de préciser certains concepts utilisés couramment dans les analyses linguistiques structurales, en même temps qu'ils faisaient apparaître les limites inhérentes à ce type d'analyse et provoquaient

des recherches nouvelles (en traduction automatique et en psycholinguistique). Tandis que se développait un champ scientifique nouveau : la cybernétique³.

Cependant, une caractéristique majeure de la théorie shannonienne est de donner à la notion d'information (telle que définie par cette théorie) un statut physique à part entière. Effectivement, l'information acquiert les caractères fondamentaux de toute réalité physique organisée : abandonnée à elle-même, elle ne peut évoluer que dans le sens de sa désorganisation, c'est-à-dire l'accroissement d'entropie ; de fait, l'information subit, dans ses transformations (codage, transmission, décodage, etc..), l'effet irréversible et croissant de la dégradation. Par conséquent Shannon définit comme entropie d'information la mesure H ($H = -K \log p$). De façon étonnante, l'équation par laquelle Shannon définit l'entropie de l'information coïncide, mais de signe inverse, avec l'équation de Boltzmann-Gibbs définissant l'entropie S en thermodynamique ($S = K \log p$). Cet épisode important a été abondamment commenté⁴.

Certains, comme Couffignal⁵, ont soutenu que la coïncidence est sans signification : l'application de la fonction de Shannon à la thermodynamique et à l'information serait un hasard de rencontre de l'application d'une même formule mathématique, sans plus. Certes, il peut y avoir rencontre de deux équations de probabilité provenant d'univers différents.

À l'inverse, Brillouin avait prétendu établir une relation logique entre le H de Shannon et le S de Boltzmann, ce que retiennent la plupart des chercheurs qui appliquent la théorie aux disciplines non mathématiques, la biologie en particulier. Selon ce point de vue, il est possible d'inscrire l'information shannonienne dans la physique. En effet, il existe une dualité dans le concept d'information reliant l'information à la matière/énergie véhiculant cette information. L'information shannonienne s'enracine ainsi dans la physique d'une part, dans les mathématiques d'autre part, mais sans qu'on puisse la réduire aux maîtres-concepts de la physique classique : masse et énergie. Comme le dit Wiener : « l'information n'est ni la masse, ni l'énergie, l'information est l'information », ce qui laisse la porte ouverte à des conceptions diverses, à commencer par celle d'un troisième constituant de l'univers⁶, après la matière et l'énergie précisément !

Développement de la théorie mathématique de l'information

La théorie mathématique de l'Information résulte initialement des travaux de Ronald Aylmer Fisher. Celui-ci, statisticien, définit formellement l'information comme égale à la valeur moyenne du carré de la dérivée du logarithme de la loi de probabilité étudiée.

$$I(\theta) = E \left\{ \left[\frac{\partial}{\partial \theta} \ln f(X; \theta) \right]^2 \middle| \theta \right\}$$

À partir de l'inégalité de Cramer, on déduit que la valeur d'une telle information est proportionnelle à la faible variabilité des conclusions résultantes. En termes simples, moins une observation est probable plus elle est porteuse d'information. Par exemple, lorsque le journaliste commence le journal télévisé par la phrase « Bonsoir », ce mot, qui présente une forte probabilité, n'apporte que peu d'information. En revanche, si la première phrase est, par exemple « La France a peur », sa faible probabilité fera que l'auditeur apprendra qu'il s'est passé quelque chose, et, partant, sera plus à l'écoute.

D'autres modèles mathématiques ont complété et étendu de façon formelle la définition de l'information.

Claude Shannon et Warren Weaver renforcent le paradigme. Ils sont ingénieurs en télécommunication et se préoccupent de mesurer l'information pour en déduire les fondamentaux de la Communication (et non une théorie de l'information). Dans *Théorie Mathématique de la Communication* en 1948, ils modélisent l'information pour étudier les lois correspondantes : bruit, entropie et chaos, par analogie générale aux lois d'énergétique et de thermodynamique. Leurs travaux complétant ceux d'Alan Turing, de Norbert Wiener et de John von Neumann (pour ne citer que les principaux) constituent le socle initial de la théorie du signal et des « Sciences de l'Information ».

Pour une source X comportant n symboles, un symbole i ayant une probabilité p_i d'apparaître, l'entropie H de la source X est définie comme :

$$H(X) = - \sum_i^n p_i \log_2(p_i)$$

C'est au départ le logarithme naturel qui est utilisé. On le remplacera pour commodité par le logarithme à base 2, correspondant à une information qui est le bit. Les considérations d'entropie maximale (MAXENT) permettront à l'inférence bayésienne de définir de façon rationnelle ses distributions *a priori*.

L'informatique constituera une déclinaison technique automatisant les traitements (dont la transmission et le transport) d'information. L'appellation « Technologies de l'Information et de la Communication » recouvre les différents aspects (systèmes de traitements, réseaux, etc.) de l'informatique au sens large.

Les sciences de l'information dégagent du sens depuis des données en s'appuyant sur des questions de corrélation, d'entropie et d'apprentissage (voir Data mining). Les technologies de l'information, quant à elles, s'occupent de la façon de concevoir, implémenter et déployer des solutions pour répondre à des besoins identifiés.

Adrian Mc Donough dans *Information economics* définit l'information comme la rencontre d'une donnée (data) et d'un problème. La connaissance (*knowledge*) est une information potentielle. Le rendement informationnel d'un système de traitement de l'information est le quotient entre le nombre de bits du réservoir de données et celui de l'information extraite. Les data sont le *cost side* du système, l'information, le *value side*. Il en résulte que lorsqu'un informaticien calcule la productivité de son système par le rapport entre la quantité de données produites et le coût financier, il commet une erreur, car les deux termes de l'équation négligent la quantité d'information réellement produite. Cette remarque prend tout son sens à la lumière du grand principe de Russel Ackoff qui postule qu'au-delà d'une certaine masse de données, la quantité d'information baisse et qu'à la limite elle devient nulle. Ceci correspond à l'adage « trop d'information détruit l'information ». Ce constat est aggravé lorsque le récepteur du système est un processeur humain, et pis encore, le conscient d'un agent humain. En effet, l'information est tributaire de la sélection opérée par l'attention, et par l'intervention de données affectives, émotionnelles, et structurelles absentes de l'ordinateur. L'information se transforme alors en sens, puis en motivation. Une information qui ne produit aucun sens est nulle et non avenue pour le récepteur humain, même si elle est acceptable pour un robot. Une information chargée de sens mais non irriguée par une énergie psychologique (drive, cathexis, libido, ep, etc.) est morte. On constate donc que dans la chaîne qui mène de la donnée à l'action (données → information → connaissance → sens → motivation), seules les deux premières transformations sont prises en compte par la théorie de l'information classique et par la sémiologie. Kevin Bronstein remarque que l'automate ne définit l'information que par deux valeurs : le nombre de bits, la structure et l'organisation des sèmes, alors que le psychisme fait intervenir des facteurs dynamiques tels que passion, motivation, désir, répulsion, etc. qui donnent vie à l'information psychologique.

Exemples d'information

Une information désigne, parmi un ensemble d'événements, un ou plusieurs événements possibles.

En théorie, l'information diminue l'incertitude. En théorie de la décision, on considère même qu'il ne faut appeler « information » que ce qui est « susceptible d'avoir un effet sur nos décisions » (peu de choses dans un journal sont à ce compte des informations...)

En pratique, l'excès d'information, tel qu'il se présente dans les systèmes de messagerie électronique, peut aboutir à une saturation, et empêcher la prise de décision.

Premier exemple

Soit une source pouvant produire des tensions entières de 1 à 10 volts et un récepteur qui va mesurer cette tension. Avant l'envoi du courant électrique par la source, le récepteur n'a aucune idée de la tension qui sera délivrée par la source. En revanche, une fois le courant émis et reçu, l'incertitude sur le courant émis diminue. La théorie de l'information considère que le récepteur possède une incertitude de 10 états.

Second exemple

Une bibliothèque possède un grand nombre d'ouvrages, des revues, des livres et des dictionnaires. Nous cherchons un cours complet sur la théorie de l'information. Tout d'abord, il est logique que nous ne trouvions pas ce dossier dans des ouvrages d'arts ou de littérature ; nous venons donc d'obtenir une information qui diminuera notre temps de recherche. Nous avons précisé que nous voulions aussi un cours complet, nous ne le trouverons donc ni dans une revue, ni dans un dictionnaire. Nous avons obtenu une information supplémentaire (nous cherchons un livre), qui réduira encore le temps de notre recherche.

Information imparfaite

Soit un réalisateur dont j'aime deux films sur trois. Un critique que je connais bien évoque son dernier film et je sais que je partage en moyenne les analyses de ce critique quatre fois sur cinq. Cette critique me dissuadera-t-elle d'aller voir le film ? C'est là la question centrale de l'inférence bayésienne, qui se quantifie aussi en bits.

Contenu d'information et contexte

Il faut moins de bits pour écrire « chien » que « mammifère ». Pourtant l'indication « Médor est un chien » contient bien plus d'information que l'indication « Médor est un mammifère » : le contenu d'information sémantique d'un message dépend du contexte. En fait, c'est le couple message + contexte qui constitue le véritable porteur d'information, et jamais le message seul (voir paradoxe du compresseur).

Mesure de la quantité d'information

Quantité d'information : cas élémentaire

Considérons N boîtes numérotées de 1 à N . Un individu A a caché au hasard un objet dans une de ces boîtes. Un individu B doit trouver le numéro de la boîte où est caché l'objet. Pour cela, il a le droit de poser des questions à l'individu A auxquelles celui-ci doit répondre sans mentir par OUI ou NON. Mais chaque question posée représente un coût à payer par l'individu B (par exemple un euro). Un individu C sait dans quelle boîte est caché l'objet. Il a la possibilité de vendre cette information à l'individu B. B n'acceptera ce marché que si le prix de C est inférieur ou égal au coût moyen que B devrait dépenser pour trouver la boîte en posant des questions à A. L'information détenue par C a donc un certain prix. Ce prix représente la quantité d'information représentée par la connaissance de la bonne boîte : c'est le nombre moyen de questions à poser pour identifier cette boîte. Nous la noterons I .

EXEMPLE :

Si $N = 1$, $I = 0$. Il n'y a qu'une seule boîte. Aucune question n'est nécessaire.

Si $N = 2$, $I = 1$. On demande si la bonne boîte est la boîte n° 1. La réponse OUI ou NON détermine alors sans ambiguïté quelle est la boîte cherchée.

Si $N = 4$, $I = 2$. On demande si la boîte porte le n° 1 ou 2. La réponse permet alors d'éliminer deux des boîtes et il suffit d'une dernière question pour trouver quelle est la bonne boîte parmi les deux restantes.

Si $N = 2^k$, $I = k$. On écrit les numéros des boîtes en base 2. Les numéros ont au plus k chiffres binaires, et pour chacun des rangs de ces chiffres, on demande si la boîte cherchée

possède le chiffre 0 ou le chiffre 1. En k questions, on a déterminé tous les chiffres binaires de la bonne boîte. Cela revient également à poser k questions, chaque question ayant pour but de diviser successivement le nombre de boîtes considérées par 2 (méthode de dichotomie).

On est donc amené à poser $I = \log_2(N)$, mais cette configuration ne se produit que dans le cas de N événements équiprobables.

Quantité d'information relative à un évènement

Supposons maintenant que les boîtes soient colorées, et qu'il y ait n boîtes rouges. Supposons également que C sache que la boîte où est caché l'objet est rouge. Quel est le prix de cette information ? Sans cette information, le prix à payer est $\log_2(N)$. Muni de cette information, le prix à payer n'est plus que $\log_2(n)$. Le prix de l'information « la boîte cherchée est rouge » est donc $\log_2(N) - \log_2(n) = \log_2(N/n)$.

$$\frac{N}{n}$$

On définit ainsi la quantité d'information comme une fonction croissante de $\frac{N}{n}$ avec :

- N le nombre d'évènements possibles
- n le nombre d'éléments du sous-ensemble délimité par l'information

$$I = \log_2\left(\frac{N}{n}\right)$$

Afin de mesurer cette quantité d'information, on pose :

I est exprimé en bit (ou « logon », unité introduite par Shannon, de laquelle, dans les faits, bit est devenu un synonyme), ou bien en « nat » si on utilise le logarithme naturel à la place du logarithme de base 2.

Cette définition se justifie, car l'on veut les propriétés suivantes :

1. l'information est comprise entre 0 et ∞ ;
2. un évènement avec peu de probabilité représente beaucoup d'information (exemple : « Il neige en janvier » contient beaucoup moins d'information que « Il neige en août » pour peu que l'on soit dans l'hémisphère nord) ;
3. l'information doit être additive.

Remarque : lorsqu'on dispose de plusieurs informations, la quantité d'information globale n'est pas la somme des quantités d'information. Ceci est dû à la présence du logarithme. Voir aussi : information mutuelle, information commune à deux messages, qui, dans l'idée, explique cette « sous-additivité » de l'information.

Entropie, formule de Shannon

Supposons maintenant que les boîtes soient de diverses couleurs : n_1 boîtes de couleur C_1 , n_2 boîtes de couleur C_2 , ..., n_k boîtes de couleurs C_k , avec $n_1 + n_2 + \dots + n_k = N$. La personne C sait de quelle couleur est la boîte recherchée. Quel est le prix de cette information ?

L'information « la boîte est de couleur C_1 » vaut $\log N/n_1$, et cette éventualité a une probabilité n_1/N . L'information « la boîte est de couleur C_2 » vaut $\log N/n_2$, et cette éventualité a une probabilité n_2/N ...

Le prix moyen de l'information est donc $n_1/N \log N/n_1 + n_2/N \log N/n_2 + \dots + n_k/N \log N/n_k$. Plus généralement, si on considère k évènements disjoints de probabilités respectives p_1, p_2, \dots, p_k avec $p_1 + p_2 + \dots + p_k = 1$, alors la quantité d'information correspondant à cette distribution de probabilité est $p_1 \log 1/p_1 + \dots + p_k \log 1/p_k$. Cette quantité s'appelle entropie de la distribution de probabilité.

L'entropie permet donc de mesurer la quantité d'information moyenne d'un ensemble d'évènements (en particulier de messages) et de mesurer son incertitude. On la note H :

$$H(I) = - \sum_{i \in I} p_i \log_2 p_i$$

avec $p_i = \frac{n_i}{N}$ la probabilité associée à l'apparition de l'évènement i .

Entropie de Shannon

L'entropie de Shannon, due à Claude Shannon, est une fonction mathématique qui, intuitivement, correspond à la quantité d'information contenue ou délivrée par une source d'information. Cette source peut être un texte écrit dans une langue donnée, un signal électrique ou encore un fichier informatique quelconque (collection d'octets).

Du point de vue d'un récepteur, plus la source émet d'informations différentes, plus l'entropie (ou incertitude sur ce que la source émet) est grande. Ainsi, si une source est réputée envoyer toujours le même symbole, par exemple la lettre 'a', alors son entropie est *nulle*, c'est-à-dire minimale. En effet, un récepteur qui connaît seulement les statistiques de transmission de la source est assuré que le prochain symbole sera un 'a'. Par contre, si la source est réputée envoyer un 'a' la moitié du temps et un 'b' l'autre moitié, le récepteur est incertain de la prochaine lettre à recevoir. L'entropie de la source dans ce cas est donc *non nulle* (positive) et représente quantitativement l'incertitude qui règne sur l'information émanant de la source. L'entropie indique alors la quantité d'information nécessaire pour que le récepteur puisse déterminer sans ambiguïté ce que la source a transmis. Plus le récepteur reçoit d'information sur le message transmis, plus l'entropie (incertitude) vis-à-vis de ce message décroît. En particulier, plus la source est redondante, moins elle contient d'information. En l'absence de contraintes particulières, l'entropie est maximale pour une source dont tous les symboles sont équiprobables.

Historique

Au début des années 1940, les télécommunications étaient dominées par le mode analogique. Les sons et les images étaient transformés en signaux électriques dont l'amplitude et/ou la fréquence sont des fonctions continues du signal d'entrée. Un bruit ajouté pendant la transmission résultait en une dégradation du signal reçu. L'archétype de ce type de bruit prend la forme de grésillement pour la radio et de neige pour la télévision. Aujourd'hui, les signaux sont également codés sous forme numérique. Un bruit ajouté pendant la transmission se traduira par une erreur sur les données numériques transmises, se manifestant par exemple par l'apparition de pixels aberrants sur une image de télévision. Dans les deux cas, on souhaite d'une part transmettre le maximum de données en le minimum de temps sur un canal de transmission donné, d'autre part, pouvoir corriger les altérations dues au bruit dans une limite donnée.

En 1948, Claude Shannon, ingénieur en génie électrique aux Laboratoires Bell, formalisa mathématiquement la nature statistique de « l'information perdue » dans les signaux des lignes téléphoniques. Pour ce faire, il développa le concept général d'entropie de l'information, fondamental dans la théorie de l'information¹, ce qui lui permit d'évaluer la quantité d'information maximale qu'on pouvait transmettre dans un canal donné. Il a également montré qu'en utilisant une stratégie de codage numérique adéquat, il était possible de transmettre les informations de façon à ce que le récepteur soit en mesure de restaurer le message original bruité sans perte d'information, sous réserve de réduire la vitesse de transmission des informations.

Initialement, il ne semble pas que Shannon ait été au courant de la relation étroite entre sa nouvelle mesure et les travaux précédents en thermodynamique. Le terme *entropie* a été suggéré par le mathématicien John von Neumann pour la raison que cette notion ressemblait à celle déjà connue sous le nom d'entropie en physique statistique. Il aurait

ajouté que ce terme était de plus assez mal compris pour pouvoir triompher dans tout débat².

En 1957, Edwin Thompson Jaynes démontrera le lien formel existant entre l'entropie macroscopique introduite par Clausius en 1847, la microscopique introduite par Gibbs, et l'entropie mathématique de Shannon. Cette découverte fut qualifiée par Myron Tribus de « révolution passée inaperçue »³.

Le calcul de l'entropie d'une source de messages donne une mesure de l'information minimale que l'on doit conserver afin de représenter ces données sans perte. En termes communs, dans le cas particulier de la compression de fichiers en informatique, l'entropie indique le nombre minimal de bits que peut atteindre un fichier compressé. En pratique, l'entropie de l'image ou du son se voit davantage abaissée en retirant des détails imperceptibles pour les humains, comme lors de la compression des sons par le format MP3, des images par JPEG ou des vidéos par MPEG.

Définition formelle

Pour une source, qui est une variable aléatoire discrète X comportant n symboles, chaque symbole x_i ayant une probabilité P_i d'apparaître, l'**entropie** H de la source X est définie comme :

$$H_b(X) = -\mathbb{E}[\log_b P(X = x_i)] = \sum_{i=1}^n P_i \log_b \left(\frac{1}{P_i} \right) = -\sum_{i=1}^n P_i \log_b P_i.$$

où \mathbb{E} désigne l'espérance mathématique, et \log_b le logarithme en base b . On utilise en général un logarithme à base 2 car l'entropie possède alors les unités de bit/symbole. Les symboles représentent les réalisations possibles de la variable aléatoire X . Dans ce cas, on peut interpréter $H(X)$ comme le nombre de questions à réponse oui/non que doit poser en moyenne le récepteur à la source, ou la quantité d'information en bits que la source doit fournir au récepteur pour que ce dernier puisse déterminer sans ambiguïté la valeur de X .

$$H(X) = H_2(X) = -\sum_{i=1}^n P_i \log_2 P_i.$$

Si on dispose de deux variables aléatoires X et Y , on définit d'une façon analogue la quantité $H(X,Y)$, appelée l'**entropie conjointe**, des variables X et Y :

$$H(X,Y) = -\sum_{i,j} P(X = x_i, Y = y_j) \log_2 P(X = x_i, Y = y_j)$$

ainsi que l'**entropie conditionnelle**⁴ de Y relativement à X :

$$H(Y | X) = -\sum_{i,j} P(X = x_i, Y = y_j) \log_2 P(Y = y_j | X = x_i) = \sum_i P(X = x_i) \left(-\sum_j P(Y = y_j | X = x_i) \log_2 P(Y = y_j | X = x_i) \right)$$

Justification de la formule

Dans le cas où l'on dispose d'un nombre N de symboles de la forme $N = 2^n$, avec n entier, et où les N symboles sont équiprobables, il suffit de n questions, en procédant par dichotomie, pour déterminer le symbole envoyé par la source. Dans ce cas, la quantité d'information contenue par le symbole est exactement $n = \log_2(N)$. Il est naturel de conserver cette formule dans le cas où N n'est pas une puissance de 2. Par exemple, si les symboles sont les lettres de l'alphabet ainsi que le symbole espace (soit 27 symboles), l'information contenue par un symbole est $\log_2(27) \approx 4,75$, valeur intermédiaire entre 4 bits (permettant de coder 16 symboles) et 5 bits (qui permet

d'en coder 32). Cette définition de l'entropie dans le cas équiprobable est comparable à celle donnée en thermodynamique par Boltzmann.

Supposons maintenant que les N symboles soient répartis en n sous-catégories, la i -ème catégorie étant constituée de N_i symboles (avec donc $N = N_1 + \dots + N_n$). Par exemple, les 27 caractères considérés précédemment peuvent être répartis en trois catégories, les voyelles, les consonnes et le caractère espace. Soit X la variable aléatoire donnant la catégorie du symbole considéré. Posons $P_i = N_i/N$ la probabilité que le symbole considéré appartienne à la i -ème catégorie. La détermination du symbole peut être effectuée en deux temps, d'abord celui de sa catégorie X , exigeant une quantité d'information $H(X)$, puis, au sein de sa catégorie, la détermination du symbole. Si la catégorie à laquelle appartient le symbole est la i -ème, cette dernière étape demande une quantité d'information égale à $\log_2(N_i)$. Cette éventualité se produisant avec une probabilité P_i , la quantité moyenne d'information pour déterminer le

$$\sum_{i=1}^n P_i \log_2(N_i)$$

symbole connaissant sa catégorie est $\sum_{i=1}^n P_i \log_2(N_i)$. La quantité d'information totale $\log_2(N)$ pour déterminer le symbole est donc la somme de la quantité $H(X)$

$$\sum_{i=1}^n P_i \log_2(N_i)$$

pour déterminer sa catégorie, et de la quantité moyenne $\sum_{i=1}^n P_i \log_2(N_i)$ pour déterminer le symbole au sein de sa catégorie. On a donc :

$$\log_2(N) = H(X) + \sum_i P_i \log_2(N_i)$$

donc :

$$H(X) = \log_2(N) - \sum_i P_i \log_2(N_i) = - \sum_i P_i \log_2(N_i/N) = - \sum_i P_i \log_2(P_i)$$

Par exemple, la quantité d'information de 4,75 bits pour déterminer un caractère parmi 27 se scinde en $H(X) = 0,98$ bits pour déterminer sa catégorie (voyelle, consonne, espace) auxquels s'ajoutent 3,77 bits en moyenne pour déterminer le caractère au sein de sa catégorie.

On peut vérifier a posteriori la cohérence de cette définition avec la propriété d'additivité de l'entropie. Soient deux variables aléatoires indépendantes X et Y . On s'attend à ce que $H(X, Y) = H(X) + H(Y)$. Par exemple, si (X, Y) représente la position d'un objet dans un tableau (X étant le numéro de ligne et Y le numéro de colonne), $H(X, Y)$ est la quantité d'information nécessaire pour déterminer cette position. C'est la somme de la quantité d'information $H(X)$ pour déterminer son numéro de ligne et de la quantité d'information $H(Y)$ pour déterminer son numéro de colonne. Or, la probabilité du produit cartésien de ces variables aléatoires est donnée par :

$$P(X = x, Y = y) = P(X = x) P(Y = y)$$

qui sera abrégé par la suite en $P(x, y) = P(x)P(y)$. On a alors :

$$\begin{aligned}
H(X, Y) &= - \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} P(x, y) \log P(x, y) \\
&= - \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} P(x)P(y) \log [P(x)P(y)] \\
&= - \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} P(x)P(y) [\log P(x) + \log P(y)] \\
&= - \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} P(x)P(y) \log P(x) - \sum_{y \in Y} \sum_{x \in X} P(x)P(y) \log P(y) \\
&= - \sum_{x \in X} P(x) \log P(x) \sum_{y \in Y} P(y) - \sum_{y \in Y} P(y) \log P(y) \sum_{x \in X} P(x) \\
&= - \sum_{x \in X} P(x) \log P(x) - \sum_{y \in Y} P(y) \log P(y) \\
&= H(X) + H(Y)
\end{aligned}$$

comme attendu.

Exemples simples

Tirage aléatoire dans une urne

Considérons une urne contenant une boule rouge, une boule bleue, une boule jaune et une boule verte. On tire une boule au hasard. Il s'agit de communiquer la couleur tirée. Aucun tirage n'étant privilégié, l'entropie est maximale, égale ici à $\log_2(4) = 2$. Si on convient que les couleurs sont codées respectivement 00, 01, 10, 11, l'information contenue dans le tirage correspond effectivement à 2 bits.

Mais si une certaine couleur est plus représentée que les autres, alors l'entropie est légèrement réduite. Supposons par exemple que l'urne contienne 4 boules rouges, 2 bleues, 1 jaune et 1 verte. L'entropie est alors de $\log_2(2)/2 + \log_2(4)/4 + \log_2(8)/8 + \log_2(8)/8 = 7/4$. Si les couleurs sont codées respectivement 0 pour le rouge, 10 pour le bleu, 110 pour le jaune et 111 pour le vert⁵, alors l'information sur la couleur tirée occupe 1 bit une fois sur deux, 2 bits une fois sur quatre et 3 bits une fois sur quatre, soit en moyenne 7/4 bits, correspondant à l'entropie calculée.

Entropie d'un texte

Considérons un texte constitué d'une chaîne de lettres et d'espaces, soit 27 caractères. Si ces caractères sont équiprobables, l'entropie associée à chaque caractères est $\log_2(27) = 4,75\dots$, ce qui signifie qu'il faut entre 4 et 5 bits pour transmettre un caractère. Mais si le texte est exprimé dans un langage naturel tel que le français, comme la fréquence de certains caractères n'est pas très importante (ex : 'w'), tandis que d'autres sont très communs (ex : 'e'), l'entropie de chaque caractère n'est pas si élevée. Compte tenu de la fréquence de chaque caractère, une estimation effectuée sur la langue anglaise par Shannon donne comme valeur de l'entropie environ 4,03⁶.

L'entropie est en fait encore plus faible, car il existe des corrélations entre un caractère et celui (ou ceux) qui le précède. Des expériences ont été menées afin d'estimer empiriquement cette entropie. Par exemple, A dispose du texte et

demande à B de le deviner lettre par lettre (espaces compris). Si B devine correctement la lettre, on compte 1 et si B se trompe, on compte 4,75 (correspondant à l'entropie d'un caractère équiprobable, donnée plus haut). On obtient ainsi expérimentalement une entropie de 1,93 bits par lettre^{7,8}.

Enfin, la considération de la loi de Zipf (empirique)⁹ amène à des considérations du même ordre, cette fois-ci pour les mots. D'après l'ouvrage de 1955 *Connaissance de l'électronique*¹⁰ une lettre dans une langue donnée représente dans la pratique 1,1 bit-symbole (terminologie employée par cet ouvrage). Cette redondance explique la facilité avec laquelle on peut briser plusieurs chiffages de complexité moyenne si on dispose de leur algorithme, même sans connaître la clé de chiffrement. C'est elle aussi qui permet de retrouver le contenu d'un texte parlé ou écrit dont une grande partie est altérée pour une raison ou une autre.

Propriétés

Voici quelques propriétés importantes de l'entropie de Shannon :

- $H(X) \geq 0$ avec égalité si et seulement s'il existe i tel que $P(X = x_i) = 1$
- $$H(X) = - \sum_i p_i \log p_i \leq - \sum_i p_i \log q_i$$
 où q_i est une distribution de probabilité quelconque sur la variable X (Inégalité de Gibbs).

Démonstration

- $H(X) \leq \log_2(n)$. La quantité $\log_2(n)$ est l'entropie maximale, correspondant à une distribution uniforme, c'est-à-dire quand tous les états ont la même probabilité. L'entropie maximale augmente avec le nombre d'états possibles (ce qui traduit l'intuition que plus il y a de choix possibles, plus l'incertitude peut être grande). Cependant, cette augmentation de l'entropie n'est qu'une possibilité : l'entropie où beaucoup d'états sont possibles mais avec une très faible probabilité pour la plupart d'entre eux peut tout à fait être inférieure à l'entropie du pile ou face (le bit). Par exemple, s'il y a 100 états, dont l'un probable à 99 % et les autres également improbables, l'entropie est de seulement 0,14 bit.

Démonstration

- Elle est symétrique : $H(X, Y) = H(Y, X)$
- Elle est continue
- $H(X, Y) = H(X) + H(Y | X)$
- $H(X, Y) \leq H(X) + H(Y)$ avec égalité si et seulement si les variables sont indépendantes.
- $H(Y | X) \leq H(Y)$
- $H(Z | X, Y) \leq H(Z | X)$
- $H(X_1, \dots, X_n) = H(X_1) + H(X_2 | X_1) + \dots + H(X_n | X_1, \dots, X_{n-1})$
 - Utilité pratique

L'entropie de Shannon est utilisée pour numériser une source en utilisant le minimum possible de bits sans perte d'information. Si le canal de transmission de l'information a une capacité de C bits par seconde et si les symboles qu'envoie la source ont une entropie H , alors la vitesse maximale de transmission des symboles est de C/H symboles par seconde, cette vitesse pouvant être approchée d'autant près que l'on veut au moyen d'un système de codage adéquat des symboles.

De plus, si du bruit brouille la transmission, la capacité C du canal de transmission diminue. En effet, des informations supplémentaires doivent être envoyées par la source afin que le récepteur puisse reconstituer le message sans erreur. Ces informations occupent une place supplémentaire qui diminuent la capacité C . Soit p la probabilité qu'un bit 0 soit modifié en 1 et inversement. Les informations supplémentaires envoyées par la source doivent permettre au récepteur de savoir si le bit envoyé est erroné (avec une probabilité p) ou s'il est correct (avec une probabilité $1 - p$). La quantité d'information correspondante par bit est $-p \log_2(p) - (1-p) \log_2(1-p)$. La capacité de transmission devient alors $C(1 + p \log_2(p) + (1-p) \log_2(1-p))$. Elle est nulle si $p = 1/2$, cas correspondant à un message totalement brouillé.

L'entropie de Shannon permet aussi de quantifier le nombre minimum de bits sur lesquels on peut coder un fichier, mesurant ainsi les limites que peuvent espérer atteindre les algorithmes de compression sans perte comme le codage de Huffman, puis ultérieurement l'algorithme LZH. Elle est également utilisée dans d'autres domaines, par exemple la sélection du meilleur point de vue d'un objet en trois dimensions.

L'entropie de Shannon est utilisée également en imagerie (médicale ou spatiale) à la base de la théorie de l'information Mutuelle (Mutual Information (MI)). Elle permet notamment de recaler deux images différentes l'une sur l'autre en minimisant l'entropie des deux images. En pratique cela permet de comparer les scanners d'un patient A quelconque avec un patient de référence B. Enfin, en génétique, l'entropie de Shannon permet de repérer sur un chromosome les portions d'ADN contenant le plus d'information

Entropie conjointe

L'Entropie conjointe est une mesure d'entropie utilisée en théorie de l'information. L'entropie conjointe mesure combien d'information est contenu dans un système de deux variables aléatoires. Comme les autres entropies, l'entropie conjointe peut être mesurée en bits ou en nats, selon la base du logarithme utilisée.

Définition

Si chaque paire d'états possibles (x, y) des variables aléatoires (X, Y) ont une probabilité $p_{x,y}$ alors l'entropie conjointe est définie par :

$$H(X, Y) = - \sum_{x,y} p_{x,y} \log_2(p_{x,y})$$

Propriétés

- L'entropie conjointe est supérieure ou égale à l'entropie d'une seule variable :
$$H(X, Y) \geq H(X)$$
- Nous avons toujours l'entropie conjointe positive ou nulle :

$$H(X, Y) \geq 0$$

- Deux systèmes considérés ensemble ne peuvent pas apporter plus d'information que la somme des apports d'information de chacun :

$$H(X, Y) \leq H(X) + H(Y)$$

avec égalité si X et Y sont des variables aléatoires indépendantes.

Entropie conditionnelle

L'**entropie conditionnelle** est une mesure d'entropie utilisée en théorie de l'information. L'entropie conditionnelle mesure l'entropie restante provenant de la variable aléatoire Y , si l'on connaît parfaitement la seconde variable aléatoire X . C'est l'entropie de Y conditionnée par X . Cette entropie est notée $H(Y|X)$. Comme les autres entropies, l'entropie conditionnelle se mesure généralement en bits.

Étant donné deux variables aléatoires X et Y avec pour entropies respectives $H(X)$ et $H(Y)$, et pour entropie conjointe $H(X, Y)$, l'entropie conditionnelle de Y étant donné X est définie par : $H(Y|X) \equiv H(X, Y) - H(X)$

Intuitivement, si le système combiné contient $H(X, Y)$ bits d'information, et si nous connaissons parfaitement la variable aléatoire X , pour coder le système on peut économiser $H(X)$ bits, et on n'a plus besoin que de $H(Y|X)$ bits.

$H(Y|X) = 0$ si et seulement si la variable aléatoire Y est complètement déterminée par la variable aléatoire X . Inversement $H(Y|X) = H(Y)$ si et seulement si Y et X sont des variables aléatoires indépendantes.

Entropie de Rényi

L'**entropie de Rényi**, due à Alfréd Rényi, est une fonction mathématique qui correspond à la quantité d'information contenue dans la probabilité de collision d'une variable aléatoire.

Définition

Étant donnés une variable aléatoire discrète X à n valeurs possibles (x_1, x_2, \dots, x_n) , ainsi qu'un paramètre réel α strictement positif et différent de 1, l'*entropie de Rényi d'ordre α de X* est définie par la formule :

$$H_\alpha(X) = \frac{1}{1-\alpha} \log \sum_{i=1}^n P(X = x_i)^\alpha$$

Cas particuliers

L'entropie de Rényi généralise d'autres acceptations de la notion d'entropie, qui correspondent chacune à des valeurs particulières de α .

Hartley

Le cas $\alpha = 0$ donne :

$$H_0(X) = \log n = \log |X|$$

ce qui correspond au logarithme du cardinal de X , qui correspond à l'entropie de Hartley.

Shannon

D'après la règle de L'Hôpital, on peut trouver une limite à $H_\alpha(X)$ quand α tend vers 1:

$$\lim_{\alpha \rightarrow 1} H_\alpha(X) = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i$$

Cette expression correspond à l'entropie de Shannon.

Collision

Dans le cas où $\alpha = 2$, on trouve l'entropie dite de collision, appelée parfois simplement "entropie de Rényi":

$$H_2(X) = - \log \sum_{i=1}^n p_i^2 = - \log P(X = Y)$$

où Y est une variable aléatoire indépendante et identiquement distribuée par rapport à X .

Min

En faisant tendre α vers l'infini, on trouve:

$$H_\infty(X) = - \log \sup_{i=1..n} p_i$$

Il s'agit de l'entropie min.

Règle de L'Hôpital

En mathématiques, et plus précisément en analyse, **la règle de L'Hôpital** (également appelée règle de l'Hospital ou **règle de Bernoulli**) utilise la dérivée dans le but de déterminer les limites difficiles à calculer de la plupart des quotients. Le théorème de Stolz-Cesàro est un résultat analogue concernant des limites de suites, mais utilisant les différences finies au lieu de la dérivée.

Historique

La règle porte le nom d'un mathématicien français du XVII^e siècle, Guillaume François Antoine, marquis de L'Hôpital, qui a publié l'*Analyse des infiniment petits pour l'intelligence des lignes courbes* (1696), premier livre de calcul différentiel à avoir été écrit en français. La règle de L'Hôpital apparaît dans cet ouvrage et constitue la prop.1 de la section IX, §163, p. 145¹: l'objet de cette proposition consiste à donner la valeur d'une quantité ydépendant d'une variable x pour la valeur a de cette variable, lorsque y s'écrit comme une fraction dont le numérateur et le dénominateur s'annulent tous deux en a .

L'auteur du livre est sans doute Jean Bernoulli, car L'Hôpital payait à Bernoulli une pension de 300 francs par an pour le tenir informé des progrès du calcul infinitésimal, et pour résoudre les problèmes qu'il lui posait (comme celui de trouver la limite des formes indéterminées); de plus, ils avaient signé un contrat autorisant L'Hôpital à utiliser les découvertes de Bernoulli à sa guise². Quand L'Hôpital publia son livre, il reconnut ce qu'il devait à Bernoulli, et, ne voulant pas se voir attribuer son travail, publia anonymement. Bernoulli prétendit alors être l'auteur de l'ouvrage entier, ce qui fut longtemps cru, mais la règle n'en fut pas moins nommée d'après L'Hôpital, bien qu'il n'ait jamais prétendu l'avoir inventée³.

Énoncé des règles de L'Hôpital

Principe

Soit a réel ou égal à $\pm\infty$, tel que les fonctions réelles f et g soient définies et dérivables « au voisinage » de a , la dérivée de g ne s'y annulant pas. Si nous essayons de déterminer la limite en a du quotient f/g , où le numérateur et le dénominateur tendent soit les deux vers zéro, soit les deux vers l'infini, alors nous pouvons dériver le numérateur et le dénominateur et déterminer la limite du quotient des dérivées. Si elle existe, la règle affirme que cette limite sera égale à la limite cherchée.

La règle, pour f et g définies (au moins) sur un intervalle d'extrémités a et b , est exposée ici pour des limites à droite en a avec $-\infty \leq a < b$. Elle est bien sûr transposable à gauche avec $b < a \leq +\infty$ et la règle bilatérale, pour des limites épointées en un réel a , se déduit de la conjonction de ces deux règles latérales.

Énoncé simple

Dans l'ouvrage de M. de l'Hôpital, la règle qui apparaît est celle communément utilisée dans le

cas de deux fonctions dérivables en a et telles que le quotient $\frac{f'(a)}{g'(a)}$ soit défini :

Si f et g sont deux fonctions définies sur $[a, b]$, dérivables en a , s'annulant en a et telles

$$\text{que le quotient } \frac{f'(a)}{g'(a)} \text{ soit défini, alors } \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{f'(a)}{g'(a)}.$$

Généralisations

Cependant, la règle de l'Hôpital se généralise à des situations où f et g sont supposées définies et dérivables à droite de a , mais pas en a (a pouvant être réel ou infini) :

Première généralisation à des fonctions f et g pour lesquelles la limite en a est nulle.

Si f et g sont deux fonctions dérivables sur $]a, b[$ dont la limite en a est nulle, si g' ne

$$\text{s'annule pas sur }]a, b[\text{ et si } \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f'(x)}{g'(x)} = \ell, \text{ alors } \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f(x)}{g(x)} = \ell.$$

Le résultat est valide que ℓ soit une limite réelle ou infinie⁴.

Seconde généralisation à des fonctions f et g pour lesquelles la limite de g en a est infinie.

Si f et g sont deux fonctions dérivables sur $]a, b[$, si g a une limite infinie en a , si g' ne

$$\text{s'annule pas sur }]a, b[\text{ et si } \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f'(x)}{g'(x)} = \ell, \text{ alors } \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f(x)}{g(x)} = \ell.$$

Le résultat est valide que ℓ soit une limite réelle ou infinie.

Démonstrations

Démonstration de la règle simple

C'est une simple opération sur les limites. Comme $f(a) = g(a) = 0$, on a :

$$\frac{f(x)}{g(x)} = \frac{f(x) - f(a)}{x - a} \frac{x - a}{g(x) - g(a)}.$$

$$\frac{f'(a)}{g'(a)}$$

Comme f et g sont dérivables en a et que le quotient $\frac{f'(a)}{g'(a)}$ est défini, on peut affirmer que :

1. $g'(a)$ est non nul, donc que, selon la propriété liant limite et relation d'ordre, $g(x)$ est non nul sur un intervalle $]a, c]$;

$$2. \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f(x) - f(a)}{x - a} \frac{x - a}{g(x) - g(a)} = \frac{f'(a)}{g'(a)}.$$

Démonstration de la première généralisation

Pour tout réel x de $]a, b[$ (que a soit fini ou pas), on applique le « théorème de la moyenne de Cauchy » (cf.théorème des accroissements finis généralisé⁵) à f et g entre a et x . On obtient ainsi^{6,7} un réel c_x de $]a, x[$ tel que

$$\frac{f(x)}{g(x)} = \frac{f'(c_x)}{g'(c_x)}.$$

Puisque

$$\lim_{x \rightarrow a^+} c_x = a, \quad c_x > a \text{ et } \lim_{c \rightarrow a^+} \frac{f'(c)}{g'(c)} = \ell,$$

on obtient

$$\lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f(x)}{g(x)} = \ell.$$

Démonstration de la deuxième généralisation

La démonstration de la deuxième généralisation utilise le même théorème des accroissements finis généralisé, avec plus de précaution^{8,9}.

Dans tout intervalle non vide $]x, y[$ inclus dans $]a, b[$, il existe un réel c tel

que $\frac{f(x) - f(y)}{g(x) - g(y)} = \frac{f'(c)}{g'(c)}$, autrement

dit $f(x) = (g(x) - g(y)) \frac{f'(c)}{g'(c)} + f(y).$

Lorsque $g(x)$ est non nul, l'expression précédente peut s'écrire :

$$\frac{f(x)}{g(x)} = \left(1 - \frac{g(y)}{g(x)}\right) \frac{f'(c)}{g'(c)} + \frac{f(y)}{g(x)}.$$

Comme $\lim_{t \rightarrow a^+} \frac{f'(t)}{g'(t)} = \ell$, on peut choisir y dans $]a, b[$ tel que, si c appartient à $]a, y[$, $\frac{f'(c)}{g'(c)}$ soit aussi proche que l'on veut de ℓ .

Puis, pour un tel y , comme $g(x)$ tend vers l'infini, on peut trouver un intervalle non vide $]a, b[$ inclus dans $]a, y[$ tel que $g(x)$ soit non nul et $\frac{g(y)}{g(x)}$ et $\frac{f(y)}{g(x)}$ soient aussi proche de 0 que l'on veut, pour tout x de $]a, b[$.

Utilisations

La règle n'est utilisable qu'en cas d'indétermination. Par exemple¹⁰

$$-4 = \lim_{x \rightarrow 1} \frac{3x^2 + 1}{2x - 3} \neq \lim_{x \rightarrow 1} \frac{6x}{2} = 3.$$

Dans le cas d'indétermination de la forme « 0/0 », la première forme peut souvent être utilisée :

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin(x)}{x^2 + 3x} = \frac{\cos(0)}{2 \times 0 + 3} = \frac{1}{3}.$$

Dans le cas d'indétermination de la forme « ∞/∞ », c'est la seconde généralisation que l'on va employer :

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\sqrt{x}}{\ln(x)} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\frac{1}{2\sqrt{x}}}{\frac{1}{x}} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\sqrt{x}}{2} = +\infty.$$

Parfois, il faudra utiliser plusieurs fois la règle de l'Hôpital pour parvenir au résultat :

$$\begin{aligned} & \bullet \quad \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\cos(2x) - 1}{x^3 + 5x^2} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{-2 \sin(2x)}{3x^2 + 10x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{-4 \cos(2x)}{6x + 10} = \frac{-2}{5}. \\ & \bullet \end{aligned}$$

$$\forall n \in \mathbb{N} \quad \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\exp(x)}{x^n} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\exp(x)}{nx^{n-1}} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\exp(x)}{n(n-1)x^{n-2}} = \dots = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\exp(x)}{n!} = +\infty.$$

Certaines limites, qui n'apparaissent pas comme des limites de quotients, peuvent être obtenues avec cette règle :

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} x - \sqrt{x^2 - x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1 - \sqrt{1 - 1/x}}{1/x} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1 - \sqrt{1 - h}}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\frac{1}{2\sqrt{1-h}}}{1} = \frac{1}{2}.$$

Précautions à prendre

On remarquera que les formes généralisées ne donnent que des conditions suffisantes d'existence de la limite. Il existe donc des cas où la limite du quotient des dérivées n'existe pas et pourtant la limite du quotient des fonctions existe :

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^2 \sin(1/x)}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} x \sin(1/x) = 0$$

alors que

$$\frac{2x \sin(1/x) - \cos(1/x)}{1} \text{ n'admet pas de limite en } 0.$$

Enfin, on prendra soin de vérifier que $g'(x)$ est bien non nul au voisinage de a (et donc que g n'oscille pas trop autour de 0), sinon la règle n'est pas applicable. Par exemple¹², si

$$f(x) = x + \cos(x)\sin(x) \text{ et } g(x) = e^{\sin(x)}(x + \cos(x)\sin(x))$$

alors

$$f'(x) = 2\cos^2(x) \text{ et } g'(x) = e^{\sin(x)}\cos(x)(x + \sin(x)\cos(x) + 2\cos(x))$$

donc

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f'(x)}{g'(x)} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{2\cos(x)}{e^{\sin(x)}(x + \sin(x)\cos(x) + 2\cos(x))} = 0,$$

mais

$$\frac{f(x)}{g(x)} = \frac{1}{e^{\sin(x)}} \text{ n'admet pas de limite en } +\infty \text{ car } \frac{1}{e^{\sin(x)}} \text{ oscille entre } 1/e \text{ et } e.$$

Entropie métrique

En mathématiques et plus précisément, dans la théorie des systèmes dynamiques, l'**entropie métrique**, ou **entropie de Kolmogorov** (appelée également en anglais **measure-theoretic entropy**) est un outil développé par Kolmogorov vers le milieu des années 1950, issu du concept probabiliste d'entropie de la théorie de l'information de Shannon. Kolmogorov montra comment l'entropie métrique peut être utilisée pour montrer si deux systèmes dynamiques ne sont pas conjugués. C'est un invariant fondamental des systèmes dynamiques mesurés. En outre, l'entropie métrique permet une définition qualitative du chaos : une transformation chaotique peut être vue comme une transformation d'entropie non nulle.

Construction de l'entropie métrique

Présentons tout d'abord le cadre mathématique dans lequel on se place. (X, \mathfrak{M}, μ) est un espace de probabilité, et $f : X \rightarrow X$ est une application mesurable, qui représente la loi d'évolution d'un système dynamique à temps discrets sur l'espace des phases X . On impose à f de préserver la mesure, c'est-à-dire que $\forall M \in \mathfrak{M}, \mu(f^{-1}(M)) = \mu(M)$. Partant d'un état initial x , on peut définir la suite de ses itérés par f : $x, f(x), \dots, f^n(x), \dots$. L'ensemble $\{f^n(x) : n \geq 0\}$ des états par lesquels passe le système s'appelle l'orbite de x .

Si l'on se donne une partition finie α de X constituée d'ensembles mesurables $\alpha = \{A_1, \dots, A_p\}$ et un état initial x , les états $f^n(x)$ ($n \geq 0$) par lesquels le système passe tombent chacun dans une des parties de la partition α . La suite de ces parties fournit de l'information sur l'état initial x . L'entropie correspond à la quantité moyenne d'information apportée par une itération. La construction de l'entropie métrique est un processus qui se déroule en trois étapes, que nous allons expliciter ci-dessous. Dans un premier temps, on définit l'entropie $\mathcal{H}(\alpha)$ d'une partition α (information moyenne issue de la connaissance de la partie de α dans laquelle se situe un point de x). Puis, on définit l'entropie $h(f, \alpha)$ de la transformation f relativement à la partition α (information moyenne apportée par une itération). Enfin, l'entropie métrique $h(f)$ est la borne supérieure des entropies de f relativement aux partitions de X .

Entropie d'une partition

Soit α une partition finie de X en ensembles mesurables. Un point $x \in X$ est d'autant mieux localisé qu'il se situe dans une partie $A \in \alpha$ de faible mesure $\mu(A)$. Ceci justifie l'introduction de la fonction information $I(\alpha) : X \rightarrow [0; +\infty]$ définie par :

$$\forall x \in X, I(\alpha)(x) = - \sum_{A \in \alpha} \log \mu(A) \chi_A(x)$$

c'est-à-dire $I(\alpha)(x) = - \log \mu(A)$ si $x \in A$.

L'entropie de la partition α est la moyenne de $I(\alpha)$:

$$\mathcal{H}(\alpha) = \frac{1}{\mu(X)} \int_X I(\alpha)(x) d\mu(x) = - \sum_{A \in \alpha} \mu(A) \log \mu(A)$$

On prend $0 \log 0$ égal à 0. Si α et β sont deux partitions mesurables de X , on définit le joint de α et β , $\alpha \vee \beta$ la plus grande partition plus fine que α et β : $\alpha \vee \beta = \{A \cap B : A \in \alpha, B \in \beta, A \cap B \neq \emptyset\}$. On dit que β est plus fine que α , et on note $\beta \geq \alpha$ si tout élément de A de α s'écrit comme union d'éléments de β .

L'entropie d'une partition vérifie les propriétés intuitives suivantes :

- Si α et β sont deux partitions mesurables, alors $\mathcal{H}(\alpha \vee \beta) \leq \mathcal{H}(\alpha) + \mathcal{H}(\beta)$.
- Notons $f^{-1}(\alpha) = \{f^{-1}(A) : A \in \alpha\}$. On a : $\mathcal{H}(\alpha) = \mathcal{H}(f^{-1}(\alpha))$.

La première propriété signifie que l'information apportée par la connaissance simultanée des positions des états du système relativement à deux partitions est supérieure à la somme des informations apportées relativement à chacune des partitions. La deuxième propriété provient du fait que f préserve la mesure.

Entropie d'une transformation relativement à une partition

α est une partition mesurable. On définit l'entropie $h(f, \alpha)$ de la transformation f relativement à α par :

$$h(f, \alpha) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{n} \mathcal{H}\left(\bigvee_{i=0}^{n-1} f^{-i}(\alpha)\right)$$

On peut voir la transformation f comme le passage d'un jour au suivant lors d'une expérience. Au temps zéro, on ne parvient pas à distinguer tous les états, on regroupe les états non distinguables par paquets, on forme de cette manière une

$$\bigvee_{i=0}^{n-1} f^{-i}(\alpha)$$

partition α . $\bigvee_{i=0}^{n-1} f^{-i}(\alpha)$ représente ainsi tous les résultats possibles au bout de n jours. $h(f, \alpha)$ est donc l'information moyenne quotidienne que l'on obtient en réalisant l'expérience.

$$a_n = \mathcal{H} \left(\bigvee_{i=0}^{n-1} f^{-i}(\alpha) \right)$$

La limite définie existe bien. Si on note suite $(a_n)_{n \in \mathbb{N}^*}$ est sous-additive car :

$$a_{n+p} = \mathcal{H} \left(\bigvee_{i=0}^{n+p-1} f^{-i}(\alpha) \right) \leq \mathcal{H} \left(\bigvee_{i=0}^{n-1} f^{-i}(\alpha) \right) + \mathcal{H} \left(\bigvee_{i=n}^{n+p-1} f^{-i}(\alpha) \right) \leq a_n + a_p$$

On a utilisé respectivement les deux propriétés de la section précédente. $(a_n/n)_{n \in \mathbb{N}^*}$ admet donc une limite.

Dernière étape : entropie métrique d'une transformation

L'entropie métrique de f , notée $h(f)$ est la borne supérieure des entropies de f relativement aux partitions finies mesurables de X

$$h(f) = \sup_{\alpha} h(f, \alpha)$$

$h(f)$ est éventuellement infinie.

Exemples de systèmes dynamiques et calcul d'entropie

Le calcul de l'entropie métrique est facilité lorsque la borne supérieure est atteinte, i.e lorsqu'il existe une partition α telle que l'entropie métrique et l'entropie relativement à α soient confondues. À titre d'exemple, traitons le cas de l'application identité de X . Alors,

$$h(id, \alpha) = \frac{1}{n} \mathcal{H} \left(\bigvee_{i=0}^{n-1} id^{-i}(\alpha) \right) = \frac{1}{n} \mathcal{H}(\alpha) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$$

L'identité a une entropie nulle, ce qui est prévisible en raison de son caractère peu chaotique.

Dans beaucoup de cas moins triviaux, le théorème suivant, d'Andrei Kolmogorov et Iakov Sinaï, est l'un des outils les plus pratiques pour calculer une entropie, car il évite de prendre la borne supérieure sur toutes les partitions mesurables de X .

$$\left(\bigvee_{i=0}^n f^{-i}(\alpha) \right)_{n \in \mathbb{N}}$$

Si α est une partition mesurable de X telle que la suite engendre la tribu \mathfrak{M} , ou bien si f est inversible (f^{-1} est mesurable et préserve la mesure) et la suite engendre la tribu \mathfrak{M} alors on dit que α est génératrice.

Le **théorème de Kolmogorov-Sinai** affirme que si α est génératrice, alors $h(f) = h(f, \alpha)$.

Rotations du cercle

$\mathbb{U} = \mathbb{R}/\mathbb{Z}$ est le cercle unité, muni de la mesure d'angle $d\theta$. Analysons l'effet d'une rotation

$$f : x \mapsto a + x \mod 1$$

lorsque $a = p/q$ est rationnel. Soit α une partition :

$$h(f, \alpha) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{qn} \mathcal{H} \left(\bigvee_{i=0}^{qn-1} f^{-i}(\alpha) \right) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{qn} \left(\bigvee_{i=0}^{q-1} f^{-i}(\alpha) \right) = 0$$

Dans le cas où a est irrationnel, on montre également que l'entropie métrique de f est nulle.

Doublement des angles

Toujours sur le cercle unité, on prend cette fois l'application

$$f : x \mapsto 2x \mod 1$$

qui double les angles. On considère la même partition

$$\alpha = \left\{ \left[0, \frac{1}{2} \right], \left[\frac{1}{2}, 1 \right] \right\}$$

On observe que :

$$\alpha \vee f^{-1}(\alpha) = \left\{ \left[0, \frac{1}{4} \right], \left[\frac{1}{4}, \frac{1}{2} \right], \left[\frac{1}{2}, \frac{3}{4} \right], \left[\frac{3}{4}, 1 \right] \right\}$$

Puis par récurrence, on déduit plus généralement que :

$$\bigvee_{i=0}^{n-1} f^{-i}(\alpha) = \left\{ \left[\frac{i}{2^n}, \frac{i+1}{2^n} \right] : 0 \leq i \leq 2^n - 1 \right\}$$

Comme les ensembles du type $\left[\frac{i}{2^n}, \frac{i+1}{2^n} \right]$ engendrent la tribu \mathfrak{M} , le théorème de Kolmogorov-Sinai montre que $h(f) = h(f, \alpha)$ et :

$$\mathcal{H} \left(\bigvee_{i=0}^{n-1} f^{-i}(\alpha) \right) = - \sum_{i=0}^{2^n-1} \mu \left(\left[\frac{i}{2^n}, \frac{i+1}{2^n} \right] \right) \log \mu \left(\left[\frac{i}{2^n}, \frac{i+1}{2^n} \right] \right) = n \log 2$$

L'entropie métrique de f est donc $\log 2$.

Décalage de Bernoulli

On dispose d'un alphabet fini $\Lambda = \{1, \dots, k\}$. Soit $(p_i)_{1 \leq i \leq k}$ des nombres strictement positifs de somme 1. On assigne à chaque lettre i la probabilité $m(\{i\}) = p_i$

d'apparition. $(\Lambda, 2^\Lambda, m)$ est un espace de probabilité. On introduit l'espace des mots

$$(\Lambda^\mathbb{Z}, \mathfrak{M}, \mu) = \prod_{-\infty}^{+\infty} (\Lambda, 2^\Lambda, m)$$

infinis

On définit l'application décalage σ par $\sigma(x)_n = x_{n+1}$ pour $n \in \mathbb{Z}$. $(\Lambda^\mathbb{Z}, \mathfrak{M}, \mu, \sigma)$ est un système dynamique inversible.

On partitionne $\Lambda^\mathbb{Z}$ en $\alpha = \{P_i\}_{1 \leq i \leq k}$ où P_i est l'ensemble des mots $(x_n)_{n \in \mathbb{Z}}$ tels

que $x_0 = i$. $\bigvee_{i=-n}^n f^{-i}(\alpha)$ est la partition par les cylindres $\mathcal{C}_{\lambda_{-n}, \dots, \lambda_n} = \{(x_n) \in \Lambda^{\mathbb{Z}} : x_i = \lambda_i, -n \leq i \leq n\}$. L'ensemble de ces cylindres engendrent la tribu de $\Lambda^{\mathbb{Z}}$ et le théorème de Kolmogorov-Sinai s'applique. On calcule alors facilement :

$$\mathcal{H}\left(\bigvee_{i=0}^{n-1} \sigma^{-i}(\alpha)\right) = - \sum_{(\lambda_0, \dots, \lambda_{n-1}) \in \Lambda^n} p_{\lambda_0} p_{\lambda_1} \cdots p_{\lambda_{n-1}} \log(p_{\lambda_0} p_{\lambda_1} \cdots p_{\lambda_{n-1}}) = -n \sum_{\lambda \in \Lambda} p_{\lambda} \log p_{\lambda}$$

Donc
$$h(\sigma) = h(\sigma, \alpha) = - \sum_{\lambda \in \Lambda} p_{\lambda} \log p_{\lambda}$$
.

Entropie différentielle

L'**entropie différentielle** est un concept de la théorie de l'information qui étend le concept de l'entropie de Shannon aux distributions de probabilités continues.

Définition

Pour une variable aléatoire X avec une distribution de probabilité f et définie sur un ensemble (X) on définit l'entropie différentielle $h(x)$ par:

$$h(x) = - \int_X f(x) \ln f(x) dx.$$

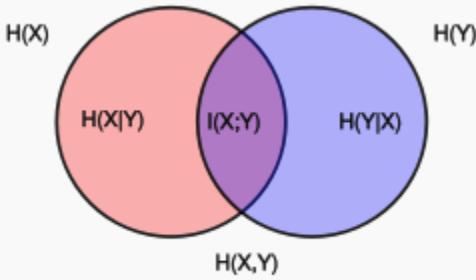
Entropie différentielle pour plusieurs distributions

Table d'entropies différentielles.

Distribution	Fonction de distribution de probabilités	Entropie
<u>Loi uniforme continue</u>	$f(x) = \frac{1}{b-a}$ pour $a \leq x \leq b$	$\ln(b-a)$
<u>Loi normale</u>	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$	$\ln(\sigma\sqrt{2\pi e})$
<u>Loi exponentielle</u>	$f(x) = \lambda \exp(-\lambda x)$	$1 - \ln \lambda$

<u>Loi de Cauchy</u>	$f(x) = \frac{\lambda}{\pi} \frac{1}{\lambda^2 + x^2}$	$\ln(4\pi\lambda)$
<u>Loi du χ^2</u>	$f(x) = \frac{1}{2^{n/2}\sigma^n\Gamma(n/2)}x^{\frac{n}{2}-1}\exp\left(-\frac{x}{2\sigma^2}\right)$	$\ln 2\sigma^2\Gamma\left(\frac{n}{2}\right) - \left(1 - \frac{n}{2}\right)\psi\left(\frac{n}{2}\right) + \frac{n}{2}$
<u>Distribution Gamma</u>	$f(x) = \frac{x^{\alpha-1}\exp(-\frac{x}{\beta})}{\beta^\alpha\Gamma(\alpha)}$	$\ln(\beta\Gamma(a)) + (1-\alpha)\psi(\alpha) + \alpha$
<u>Loi logistique</u>	$f(x) = \frac{e^{-x}}{(1+e^{-x})^2}$	2
<u>Statistique de Maxwell-Boltzmann</u>	$f(x) = 4\pi^{-\frac{1}{2}}\beta^{\frac{3}{2}}x^2\exp(-\beta x^2)$	$\frac{1}{2}\ln\frac{\pi}{\beta} + \gamma - 1/2$
<u>Distribution de Pareto</u>	$f(x) = \frac{ak^a}{x^{a+1}}$	$\ln\frac{k}{a} + 1 + \frac{1}{a}$
<u>Loi de Student</u>	$f(x) = \frac{(1+x^2/n)^{-\frac{n+1}{2}}}{\sqrt{n}B(\frac{1}{2}, \frac{n}{2})}$	$\frac{n+1}{2}\psi\left(\frac{n+1}{2}\right) - \psi\left(\frac{n}{2}\right) + \ln\sqrt{n}B\left(\frac{1}{2}, \frac{n}{2}\right)$
<u>Distribution de Weibull</u>	$f(x) = \frac{c}{\alpha}x^{c-1}\exp\left(-\frac{x^c}{\alpha}\right)$	$\frac{(c-1)\gamma}{c} + \ln\frac{\alpha^{1/c}}{c} + 1$
<u>Loi normale multidimensionnelle</u>	$f_X(x_1, \dots, x_N) = \frac{1}{(2\pi)^{N/2} \Sigma ^{1/2}}\exp\left(-\frac{1}{2}(x-\mu)^\top\Sigma^{-1}(x-\mu)\right)$	$\frac{1}{2}\ln\{(2\pi e)^N \det(\Sigma)\}$

Information mutuelle



Entropies individuelles ($H(X), H(Y)$), jointes ($H(X, Y)$), d'une paire de sous-systèmes (X, Y), avec l'information mutuelle $I(X; Y)$.

Dans la théorie des probabilités et la théorie de l'information, l'**information mutuelle** de deux variables aléatoires est une quantité mesurant la dépendance statistique de ces variables. Elle se mesure souvent en bit.

L'information mutuelle d'un couple (X, Y) de variables représente leur degré de dépendance au sens probabiliste. Ce concept de dépendance logique ne doit pas être confondu avec celui de causalité physique, bien qu'en pratique l'un implique souvent l'autre.

Informellement, on dit que deux variables sont indépendantes si la réalisation de l'une n'apporte aucune information sur la réalisation de l'autre. La corrélation est un cas particulier de dépendance dans lequel la relation entre les deux variables est strictement linéaire.

L'information mutuelle est nulle si et seulement si les variables sont indépendantes, et croît lorsque la dépendance augmente.

Définition

Soit (X, Y) un couple de variables aléatoires de densité de probabilité jointe données par $P(x, y)$ (on fait, dans cet article, l'abus de notation $P(x)$ pour représenter la probabilité de l'événement $X = x$). Notons les distributions marginales $P(x)$ et $P(y)$. Alors l'information mutuelle est dans le cas discret:

$$I(X, Y) = \sum_{x,y} P(x, y) \log \frac{P(x, y)}{P(x) P(y)},$$

et, dans le cas continu:

$$I(X, Y) = \int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}} p(x, y) \log \frac{p(x, y)}{p(x) p(y)} dx dy.$$

où $p(x, y)$, $p(x)$ et $p(y)$ sont respectivement les densités des lois de (X, Y) , X et Y .

Cas gaussien

L'information mutuelle dans le cas d'une distribution gaussienne s'écrit sous la forme suivante:

$$I(X, Y) = \frac{1}{2} \log \frac{\det(P(X))}{\det(P(X/Y))}$$

Avec P dénote dans ce cas la matrice de covariance

Propriétés

- $I(X, Y) = 0$ ssi X et Y sont des variables aléatoires indépendantes.
- L'information mutuelle est positive ou nulle.
- L'information mutuelle est symétrique.
- *Data processing theorem:* si $g1$ et $g2$ sont deux fonctions mesurables alors $I(g1(X), g2(Y)) \leq I(X, Y)$. Ceci signifie qu'aucune transformation sur les données brutes ne peut faire apparaître de l'information.
- Lorsque la distribution jointe des variables aléatoires X et Y suit une loi normale multidimensionnelle $\mathcal{N}(\mu, \Sigma)$, il a été montré¹ que l'information mutuelle est directement reliée au coefficient de corrélation ρ entre ces deux variables :

$$I(X, Y) = -\frac{1}{2} \log(1 - \rho^2)$$

Plusieurs généralisations de cette quantité à un nombre plus grand de variables ont été proposées, mais aucun consensus n'a encore émergé.

Liens avec la théorie de l'information

Entropie

L'information mutuelle mesure la quantité d'information apportée en moyenne par une réalisation de X sur les probabilités de réalisation de Y . En considérant qu'une distribution de probabilité représente notre connaissance sur un phénomène aléatoire, on mesure l'absence d'information par l'entropie de cette distribution. En ces termes, l'information mutuelle s'exprime par:

$$I(X, Y) = H(X) - H(X|Y) = H(Y) - H(Y|X) = H(X) + H(Y) - H(X, Y).$$

où $H(X)$ et $H(Y)$ sont des entropies, $H(X|Y)$ et $H(Y|X)$ sont des entropies conditionnelles, et $H(X, Y)$ est l'entropie conjointe entre X et Y .

Ainsi on voit que $I(X, Y) = 0$ ssi le nombre de bits nécessaires pour coder une réalisation du couple est égal à la somme du nombre de bits pour coder une réalisation de X et du nombre de bits pour coder une réalisation de Y .

Divergence de Kullback-Leibler

L'information mutuelle peut aussi être exprimée par la divergence de Kullback-Leibler. On a

$$I(X, Y) = KL(P(X, Y), P(X)P(Y)) = \sum P(X, Y) \log \frac{P(X, Y)}{P(X)P(Y)}.$$

Ainsi $I(X, Y)$ mesure une sorte de "distance" entre les distributions $P(X, Y)$ et $P(X) * P(Y)$. Comme, par définition, deux variables sont indépendantes ssi ces deux distributions sont égales, et

comme $KL(p, q) = 0$ ssi $p = q$, on retrouve l'équivalence entre $I(X, Y) = 0$ et indépendance.

Intuitivement $P(X, Y)$ porte plus d'information lorsque les variables sont dépendantes que lorsqu'elles ne le sont pas. Si les deux variables sont discrètes à N cas, il faut, au pire, $N^2 - 1$ coefficients pour spécifier $P(X, Y)$, contre seulement $2N - 1$
si $P(X, Y) = P(X)P(Y)$.

La divergence KL donne le nombre de bits d'information apportés par la connaissance de $P(X, Y)$ lorsqu'on connaît déjà $P(X)$ et $P(Y)$.

Théorème du codage de source

Le **Théorème du codage de source** (ou premier théorème de Shannon, ou moins usité en français, théorème de codage sans bruit) est un théorème énoncé par Claude Shannon en 1948, qui énonce la limite théorique pour la compression d'une source.

Le raisonnement de Shannon se base sur des vecteurs de n symboles et sur une source q -aire stationnaire (suite de variables indépendantes et identiquement distribuées). Le théorème montre que lorsque $n \rightarrow +\infty$, la longueur moyenne du code tend vers l'entropie.

Pour les codes par symboles, le théorème se simplifie

$$\text{en: } \frac{H(X)}{\log(q)} \leq E[l(X)] < \frac{H(X)}{\log(q)} + 1$$

avec $l(X)$ la longueur du code pour le mot X , et E l'espérance.

Codage de l'information

On considère une suite de symboles. Chaque symbole peut prendre deux valeurs s_1 et s_2 avec des probabilités respectivement $p_1 = 0,8$ et $p_2 = 0,2$. La quantité d'information contenue dans un symbole est :

$$p_1 \times \log_2 \frac{1}{p_1} + p_2 \times \log_2 \frac{1}{p_2} \approx 0,7219$$

Si chaque symbole est indépendant du suivant, alors un message de N symboles contient en moyenne une quantité d'information égale à $0,72N$. Si le symbole s_1 est codé 0 et le symbole s_2 est codé 1, alors le message a une longueur de N , ce qui est une perte par rapport à la quantité d'information qu'il porte. Les théorèmes de Shannon énoncent qu'il est impossible de trouver un code dont la longueur moyenne soit inférieure à $0,72N$, mais qu'il est possible de coder le message de façon que le message codé ait en moyenne une longueur aussi proche que l'on veut de $0,72N$ lorsque N augmente.

Par exemple, on regroupe les symboles trois par trois et on les code comme suit :

symboles à coder	probabilité du triplet	codage du triplet	longueur du code
$s_1 s_1 s_1$	$0,8^3 = 0,512$	0	1

$s_1 s_1 s_2$	$0,8^2 \times 0,2 = 0,128$	100	3
$s_1 s_2 s_1$	$0,8^2 \times 0,2 = 0,128$	101	3
$s_2 s_1 s_1$	$0,8^2 \times 0,2 = 0,128$	110	3
$s_1 s_2 s_2$	$0,2^2 \times 0,8 = 0,032$	11100	5
$s_2 s_1 s_2$	$0,2^2 \times 0,8 = 0,032$	11101	5
$s_2 s_2 s_1$	$0,2^2 \times 0,8 = 0,032$	11110	5
$s_2 s_2 s_2$	$0,2^3 = 0,008$	11111	5

Le message $s_1 s_1 s_1 s_1 s_1 s_2 s_2 s_2 s_1$ sera codé 010011110.

La longueur moyenne du code d'un message de N symboles

$$\text{est : } \frac{N}{3}(0,512 + 3 \times 0,128 \times 3 + 3 \times 0,032 \times 5 + 0,008 \times 5) = 0,728N$$

Limites de cette théorie

L'une des caractéristiques fondamentales de cette théorie est l'exclusion de la sémantique. La théorie de l'information est indifférente à la signification des messages. Le sens d'un message peut pourtant être considéré comme essentiel dans la caractérisation de l'information. Mais le point de vue de la théorie de l'information se limite à celui d'un messager dont la fonction est de transférer un objet.

La théorie de l'information de Shannon est toujours relative à un ensemble de données, une famille de chaînes de caractères, caractérisée par une loi de distribution bien précise. Elle donne donc un contenu en information en moyenne, ce qui en fait une théorie *probabiliste*, particulièrement bien adaptée au contexte de la transmission de donnée, et dans ce cadre cette théorie a produit des résultats importants. En revanche, elle n'est pas en mesure de quantifier le contenu en information d'une chaîne prise isolément, un brin d'ADN par exemple, alors que la théorie algorithmique de l'information en est capable jusqu'à un certain point. Mais cette dernière théorie possède également ses propres limitations. C'est pourquoi il ne faut pas considérer que la notion d'information est entièrement cernée par la théorie de l'information de Shannon, ou la théorie algorithmique de l'information, mais que cette notion a besoin d'une variété de modélisations formelles pour s'exprimer.

L'information de Fisher semble ainsi parfois avantageusement remplacer l'information de Shannon dans la mesure où elle est une quantification locale et non globale de l'information contenue dans une distribution. Cela dit, les deux notions sont liées¹⁰ et peuvent dans diverses applications mener aux mêmes résultats.

Théorie algorithmique de l'information

La **théorie algorithmique de l'information**, initiée par Kolmogorov, Solomonov et Chaitin dans les années 1960, vise à quantifier et qualifier le contenu en information d'un ensemble de données, en utilisant la théorie de la calculabilité et la notion de machine universelle de Turing.

Cette théorie permet également de formaliser la notion de complexité d'un objet, dans la mesure où l'on considère qu'un objet (au sens large) est d'autant plus complexe qu'il faut beaucoup d'informations pour le décrire, ou — à l'inverse — qu'un objet contient d'autant plus d'informations que sa description est longue. La théorie algorithmique de l'information est fondée sur cette équivalence : la *description* d'un objet est formalisée par un algorithme d'une machine de Turing, et sa complexité, ou son contenu en information, est alors formalisé par certaines caractéristiques de l'algorithme : sa longueur ou son temps de calcul.

Ces fondements sont différents de ceux de la théorie de l'information de Shannon : cette dernière n'utilise pas la notion de calculabilité et n'a de sens que par rapport à un ensemble statistique de données. Cependant, les deux théories sont compatibles et des liens formels entre elles peuvent être établis.

Tandis que la théorie de l'information de Shannon a eu de nombreuses applications en informatique, télécommunications, traitement de signal et neurosciences computationnelles, la théorie algorithmique de l'information a été utilisée avec succès dans les domaines de la biologie, de la physique et même de la philosophie.

Présentation informelle

L'idée principale de la théorie algorithmique de l'information est qu'une chose est d'autant plus *complexe*, ou contient d'autant plus d'information, qu'elle est difficile à expliquer, c'est-à-dire *fondamentalement longue* à expliquer. Voici par exemple trois descriptions d'objets :

D1 : « un mur tout blanc de 1 m sur 1 m. »

D2 : « un mur tout blanc de 1m sur 1m, avec une rayure rouge horizontale de 2 cm de large en bas, une autre 8 cm au-dessus, encore une autre 8 cm au-dessus et une dernière encore 8 cm au-dessus. »

D2' : « un mur tout blanc de 1 m sur 1 m, avec des rayures rouges horizontales de 2 cm de large, de bas en haut tous les 8 cm. »

En termes de longueur de description, **D1** est plus courte que **D2'** qui est plus courte que **D2**. Que **D1** soit la plus courte description semble normal, et est lié au fait que l'objet décrit est « plus simple ». Mais en ce qui concerne **D2** et **D2'**, les objets décrits sont identiques bien que **D2'** soit plus courte que **D2**. Ainsi la longueur brute d'une description n'est pas une mesure parfaitement adaptée.

L'idée « algorithmique » est alors de considérer, comme complexité de l'objet décrit, sa *plus courte description* possible. Idée « algorithmique » dans le sens où la description n'est pas forcément extensive, mais peut — comme **D2'** dans l'exemple ci-dessus — décrire un procédé d'obtention de l'objet (ici : tracer des bandes horizontales à intervalles réguliers).

Ainsi, un objet sera d'autant plus compliqué qu'on ne peut le décrire plus brièvement qu'une liste exhaustive de ses propriétés... Ce dernier cas constitue le cas limite d'une complexité maximale.

Théorie de la complexité

- L'étude des systèmes complexes ;
- La théorie de la complexité, un domaine de l'informatique théorique visant à quantifier les ressources nécessaires à la résolution d'un problème ;
- La théorie algorithmique de l'information : théorie visant à qualifier et quantifier la notion de complexité et de contenu en information d'un ensemble de données, notamment par la complexité de Kolmogorov.

Théorie de la simplicité

La **théorie de la simplicité** est une théorie du domaine des sciences cognitives qui cherche à expliquer l'intérêt des situations et des événements pour l'esprit humain. Cette théorie est fondée sur les travaux scientifiques de Nick Chater, Paul Vitanyi, Jean-Louis Dosalles, Jürgen Schmidhuber. Elle fait l'hypothèse que les situations intéressantes sont celles qui apparaissent de manière inattendue comme les plus simples aux yeux de l'observateur.

Généralités

Techniquement, la simplicité correspond à une baisse soudaine de complexité au sens de Kolmogorov, c'est-à-dire que la plus courte description de la situation est plus courte encore que celle anticipée par l'observateur. Par exemple, la description d'un tirage du Loto tel : 22-23-24-25-26-27, est plus courte que celle d'un tirage typique tel : 12-22-27-37-38-42. La première description ne nécessite qu'une instance (le choix d'un numéro parmi tous-ceux qui peuvent apparaître au Loto), suivi des cinq numéros suivants, tandis que la seconde nécessite six instances différentes.

La théorie de la simplicité établit plusieurs prédictions quantitatives quant à la manière dont la « distance », la « proéminence » (lieux, individualités) et le caractère atypique, influencent l'intérêt porté à une situation.

Formalisation

La théorie de la simplicité donne un calcul au concept de l'*inattendu* : ce serait la différence entre la complexité attendue (en anglais *expected*) C_{exp} et la complexité observée C_{obs} :

$$U = C_{exp} - C_{obs}$$

C_{exp} correspond généralement à la complexité de *génération* de la situation, c'est-à-dire la complexité de son explication causale la plus simple (le nombre de paramètres qui doivent être en présence afin que ladite situation existe). Dans l'exemple du Loto, pour autant qu'il n'y ait pas tricherie, la complexité de *génération* est identique pour toute les combinaisons possibles. Elles correspondent simplement à 6 tirages.

La théorie de la simplicité évite la plupart des critiques adressées à la complexité de Kolmogorov en ne considérant que les descriptions *disponibles* pour un *observateur* donné (plutôt que toutes descriptions *imaginables*). Cela revient à dire que la complexité, et donc l'inattendu, sont dépendants de l'observateur. Une même combinaison qui apparaît très complexe à la plupart des gens comme 12-22-27-37-38-42 peut apparaître très simple à une personne, par exemple si cela correspond à son numéro de sécurité sociale. Il a alors un moyen très simple de décrire la combinaison que les autres n'ont pas, sa complexité observée est alors plus petite et son inattendu plus grand.

Lien avec les probabilités

L'inattendu U est lié à la probabilité subjective P à travers la formule :

$$P = 2^{-U}$$

L'avantage de cette formule est que la probabilité subjective peut être décrite sans connaître nécessairement toutes les alternatives. Les approches classiques en probabilité considéreraient toutes les situations possibles dans le monde comme n'ayant virtuellement aucune probabilité d'intervenir, chacune étant unique et complexe. La théorie de la simplicité évite ce piège en considérant que l'improbabilité subjective est seulement due à une baisse de complexité.

Systémique

La **systémique** est une méthode d'étude ou une façon de penser les sujets complexes. Elle privilie^g une approche globale, holistique, la multiplication des perspectives selon différentes dimensions ou à différents niveaux d'organisation, et surtout la prise en compte des relations et interactions entre composants. Grâce à cette façon d'observer multiple et globale, la systémique permet d'aborder des sujets complexes réfractaires à une approche analytique qui elle tend à découper le tout en parties indépendantes, ou à d'autres formes de réductionnisme

L'adjectif *systémique* désigne « ce qui concerne un système ou qui agit sur un système ». Le mot *système* est issu du grec ancien *systema*, signifiant « ensemble organisé ».

Apparue progressivement pendant la deuxième moitié du XX^e siècle, la systémique est un mode d'apprehension qui peut être considéré comme un langage, un état d'esprit ou même une philosophie. La systémique n'est ainsi pas une science, mais une méthode, et aussi un mouvement international (*systems science* ou *systems theory* en anglais) visant à dépasser les limites des approches réductionnistes, qui aujourd'hui touche de nombreuses sciences. On peut la comparer à la méthode de Descartes ou tout simplement aux mathématiques : d'ailleurs de nouvelles branches des mathématiques sont consacrées à l'études des systèmes dynamiques.

Éclairage

Les principes de la systémique ont la particularité de venir d'à peu près tous les domaines de la science et d'être également applicable à chacun d'eux. De l'informatique à la psychologie en passant par les neurosciences, les domaines d'études qui sont à la fois une de ses origines et un de ses domaines d'application sont innombrables.

Ainsi, les références à la systémique que l'on retrouve en informatique, en psychothérapie, en épistémologie ou encore en sciences de l'information et de la communication font bel et bien référence au même sujet et aux mêmes principes, même si chaque discipline présente la systémique sous une forme qui lui est propre, en mettant généralement l'accent sur ce qui lui est le plus utile.

Concrètement, la pensée systémique consiste à regrouper les éléments individuels d'un système sous des points de vue particuliers. Selon l'International Project Management Association, la pensée systémique est définie comme « une façon de voir les phénomènes et les corrélations complexes dans leur intégralité selon une approche interdisciplinaire ». L'objectif de l'approche systémique est la modélisation, c'est-à-dire la figuration d'une réalité complexe sous la forme d'un modèle simplifié, plus facilement compréhensible.

Historique

L'abbé Étienne Bonnot de Condillac (1715-1780) a notamment écrit un ouvrage remarquable intitulé *Traité des Systèmes* (1749). Cet ouvrage dresse tout un cadre de ce qui va devenir l'approche systémique. Ses exemples concernent la science politique.

En 1906, l'économiste Vilfredo Pareto introduisait la notion de *théorie systémique* dans l'un de ses ouvrages d'économie politique : *Manuel d'économie politique*. Il serait cependant abusif d'en faire le fondateur de cette orientation théorique. On pourrait également se référer à

l'article *Système* de Vauban dans l'*Encyclopédie de Diderot et D'Alembert*. Mais la théorie systémique ne commence vraiment qu'avec la cybernétique.

Le mot « systémique » est apparu dans la deuxième moitié du *XX^e* siècle et découle de la théorie systémique (ou théorie des systèmes) qui est l'une des bases de la systémique.

Les courants de pensée porteurs

L'étude formelle des systèmes est apparue au *XIX^e* siècle avec la naissance de l'industrie. C'est à ce moment-là que furent conceptualisées les notions de régulation et de contrôle, essentielles au fonctionnement sans risque des machines à vapeur.

Dès la fin de ce siècle, l'intégration en sciences humaines et sociales des logiques plus vastes apparaissent avec le holisme en sociologie (qui est la compréhension de l'individu à travers les logiques sociales) et le structuralisme en linguistique (qui est l'analyse du signe linguistique à travers plusieurs composants).

La réunion des différentes approches est notamment catalysée par les conférences Macy qui réunissent des spécialistes dans des domaines très variés (des mathématiques à la neuropsychiatrie en passant par l'hypnose). Elles commencent en 1942 par l'étude des mécanismes de causalité circulaire pour tenter d'en dégager un principe généralisé, alors décrit comme ce qui serait une « science générale du fonctionnement de l'esprit ».

Après cette réunion fondatrice, un premier cycle de ces conférences (de 1946 à 1948) donne l'impulsion à Norbert Wiener pour formaliser la cybernétique en 1948. Cette schématisation mathématique de la théorie de la communication influencera considérablement tous les domaines des sciences et reste très présente sous cette forme première en électronique, en informatique ou encore en robotique.

Pour comprendre l'intérêt de cette évolution, il faut se rappeler que depuis René Descartes (et même déjà depuis Aristote), la recherche scientifique est fondée sur le postulat de la causalité : les phénomènes du monde peuvent être expliqués par un enchaînement de causalités. Si un phénomène apparaît d'abord comme trop complexe, il suffit de le décomposer en plusieurs enchaînements de causalités. Cette démarche est ce que l'on peut appeler une démarche analytique.

Avec la théorie systémique, la démarche est totalement différente. On admet la téléologie (étude de la finalité) comme un postulat opératoire. On va donc représenter ce que l'on ne comprend pas dans un phénomène que l'on cherche à étudier sous l'aspect d'une *boîte noire*. Cette boîte noire est considérée comme un phénomène actif dont on connaît le comportement mais non le fonctionnement. Dans la mesure où l'on peut connaître les informations entrant dans cette boîte noire et que l'on en connaît les réactions (informations sortantes), on peut en déduire une rétroaction (*feed-back*) informationnelle (fonction de transfert) qui va permettre progressivement de décrire le *système de commande* de la boîte noire.

Outre la cybernétique (très médiatisée aux États-Unis), cette même époque voit émerger d'autre courants très proches³ : les sciences de la communication et de la commande de Norbert Wiener et Claude Shannon, la computation de Alan Turing, les organisations sociales de Herbert Simon et la complexité de Warren Weaver. Tous peuvent être vus comme des prémisses de la systémique.

Un deuxième cycle de conférences (de 1949 à 1953) se rapporte surtout à l'étude de l'évolution des systèmes dynamiques. On parle d'une « cybernétique de 2^e génération » qui contient déjà beaucoup d'éléments constitutifs de la systémique ; mais il manque encore l'expression unifiée de la façon dont l'ensemble des systèmes étudiés peuvent s'imbriquer (bien que l'idée ait toujours été sous-jacente).

L'émergence de la systémique

C'est en 1968 que Ludwig von Bertalanffy théorise le fonctionnement global des systèmes biologiques dans l'ouvrage *General System Theory*, ouvrage reconnu depuis comme l'élément fondateur de la systémique bien que les bases soient multiples, la principale étant certainement le mouvement cybernétique.

À travers le principe de système ouvert (qu'il a introduit en 1937), il présente une « interaction dynamique » des systèmes qui permet de théoriser un lien avec un système général (qui inclut la complexité induite par leurs interactions). Il réintègre aussi des domaines d'influences variés qui vont ancrer les bases de la systémique au-delà de la simple influence du mouvement cybernétique.

Il s'ensuivra une série d'ouvrages américains qui seront considérés comme des classiques sur le sujet⁴ : *Systems Approach* de C. West Churchman, *Systems Analysis* de J. Van Court Hare, *System Theory* de L. Zadeh, *System Dynamics* de J. Forrester et *Management System* de C. Schoderbeck.

Les références sont depuis innombrables, et parfois divergentes selon les domaines d'étude. Malgré l'importance que peuvent avoir les évolutions de la théorie depuis l'œuvre de Bertalanffy, le manque de recul fait qu'aucune autre référence n'est unanimement reconnue.

Les courants liés

La théorie systémique

Dans le domaine des sciences humaines, dès 1952 les principes émergeant de la systémique sont déjà appliqués à la communication sociale. Il s'agit de recherches effectuées par un collège de participants qui sera appelé plus tard l'École de Palo Alto. Ce courant reste toujours très proche de la naissance de la systémique (son initiateur, Gregory Bateson, est d'ailleurs l'un des participants des conférences Macy). Pourtant, bien qu'étroitement lié, il a la particularité de s'être constitué parallèlement, ce qui se retrouve dans une terminologie qui renvoie majoritairement à la théorie systémique, donc aux bases constitutives, plus qu'à la systémique elle-même.

La systémique de 3^e génération

Face aux difficultés rencontrées dans l'application de la cybernétique aux systèmes sociaux, que sont les entreprises ou les organisations en général, Karl E. Weick (USA) et Peter Checkland (Angleterre) jetèrent dans les années 1970 les bases d'une « systémique de 3^e génération », entièrement axée sur les systèmes sociaux. Bien que s'en réclamant, cette théorie est loin d'avoir eu l'effet d'un mouvement de pensée contrairement aux sources sur lesquelles elle s'appuie.

Les fondateurs

La théorie générale des systèmes (Bertalanffy)

Biologiste de formation, savant aux intérêts variés, Ludwig von Bertalanffy s'intéresse tôt à la conception de l'organisme comme système ouvert. Il participe à l'émergence d'une théorie « holiste » de la vie et de la nature. Son approche de la biologie sera à la base de sa théorie générale des systèmes. Dans ce cadre, le scientifique est amené à explorer divers champs d'application de sa théorie – psychologie, sociologie ou histoire – comme autant de « niveaux d'organisation ».

Le paradigme systémique considère de façon indissociable les éléments des processus évolutifs (qui assemblent les éléments de manière non-linéaires ou aléatoire, dans les systèmes dits complexes). La « théorie générale des systèmes » constitue essentiellement un modèle pouvant s'illustrer dans diverses branches du savoir, par exemple la théorie de l'évolution.

On peut distinguer trois niveaux d'analyse :

- *La science des systèmes*, consistant à la fois en une étude des systèmes particuliers dans les différentes sciences et une théorie générale des systèmes comme ensemble de principes s'appliquant à tous les systèmes. L'idée essentielle ici est que l'identification et l'analyse des éléments ne suffisent pas pour comprendre une totalité (comme un organisme ou une société) ; il faut encore étudier leurs relations. Bertalanffy s'est attaché à mettre en lumière les correspondances et les isomorphismes des systèmes en général : c'est tout l'objet d'une théorie générale des systèmes.

- *La technologie des systèmes*, concernant à la fois les propriétés des matériels et les principes de développement des logiciels. Les problèmes techniques, notamment dans l'organisation et la gestion des phénomènes sociaux globaux (pollutions écologiques, réformes éducation, régulations monétaires et économiques, relations internationales), constituent des problèmes incluant un grand nombre de variables en interrelation. Des théories « globales » comme la théorie cybernétique, la théorie de l'information, la théorie des jeux et de la décision, la théorie des circuits et des files d'attente, etc., en sont des illustrations. De telles théories ne sont pas « fermées », spécifiques, mais au contraire interdisciplinaires.
- *La philosophie des systèmes*, promouvant le nouveau paradigme systémique, à côté du paradigme analytique et mécaniste de la science classique. La systémique constitue, selon les propres termes de Bertalanffy, « une nouvelle philosophie de la nature », opposée aux lois aveugles du mécanisme, au profit d'une vision du « monde comme une grande organisation ». Une telle philosophie doit par exemple soigneusement distinguer systèmes réels (une galaxie, un chien, une cellule), qui existent indépendamment de l'observateur, systèmes conceptuels (théories logiques, mathématiques), qui sont des constructions symboliques, et systèmes abstraits (les théories expérimentales), comme sous-classe particulière des systèmes conceptuels qui correspondent à la réalité. À la suite des travaux sur la psychologie de la forme et les déterminismes culturels, la différence entre systèmes réels et systèmes conceptuels est loin d'être tranchée. Cette ontologie des systèmes ouvre donc sur une épistémologie, réfléchissant sur le statut de l'être connaissant, le rapport observateur/observé, les limites du réductionnisme, etc. L'horizon ultime est alors de comprendre la culture comme un système de valeurs dans lequel l'évolution humaine est enchaînée.

Le structuralisme

La notion centrale est la structure - étudiée à la fois en linguistique, en anthropologie et en psychologie :

- *En linguistique* : Ferdinand de Saussure s'inspire de l'analyse économique et introduit le couple conceptuel signifiant/signifié. Ses travaux sont repris par le danois Louis Hjelmslev et le russe Roman Jakobson : Hjelmslev présente le langage comme la double implication de deux structures indépendantes, expression et contenu.
- *En anthropologie* : développant avec l'anthropologie structurale une branche du structuralisme très proche du paradigme systémique, se distinguant des courants ultérieurs plus formalistes du structuralisme linguistique, Claude Lévi-Strauss pose le primat des structures intellectuelles sur le développement social et adopte un point de vue synchronique, étudiant les sociétés dites primitives à la lumière des structures dégagées, réduisant ainsi le rôle de l'histoire. Il cherche les invariants capables d'expliquer l'équilibre social. Dès le début de ses travaux dans les années 1950, il fait régulièrement référence à la théorie des jeux, à la cybernétique et à la théorie de la communication^{5 6}.
- *En psychologie* : c'est la *Gestalttheorie* de l'école allemande (travaux sur la psychologie de la forme dans le domaine des perceptions) ; puis Jean Piaget, qui s'intéresse au développement de l'intelligence chez l'enfant. L'intelligence est décrite, à travers une série de stades de développement, comme la capacité de construire en permanence des structures, qui s'établissent par autorégulation.

La cybernétique

« Cybernétique » est le nom choisi par le mathématicien Norbert Wiener pour désigner la représentation de « ce qui dirige », dans le sens de l'identification de la logique sous-jacente, du mécanisme de communication qui induit qu'une chose se passe ou non. Surdoué aux centres d'intérêts nombreux et variés, participant aux prémisses de la robotisation et de l'électronique, il est l'un des participants des conférences Macy (voir Les courants de pensée porteurs). Il est connu pour sa faculté à pouvoir tout schématiser, et sera donc celui à qui incombe la tâche de formaliser un langage de représentation des mécanismes de la communication en général.

Il le fera dans *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine* paru en 1948 qui établit ainsi une science générale de la régulation et des communications dans les systèmes naturels et artificiels et propose pour la première fois d'élever l'idée de la *boîte noire* au rang de concept instrumental de la modélisation scientifique. Il la nomme cybernétique en référence au grec *kubernētikē* (ce qui dirige), terme que Platon utilisait pour désigner le pilotage d'un navire. Il déplora ensuite⁷ ne pas avoir eu connaissance de l'utilisation faite par André-Marie Ampère du terme dans le sens dérivé de l'art de gouverner les hommes⁸.

La cybernétique se concentre sur la description des relations entretenues avec l'environnement. Pour cela, il faut identifier les structures communicantes de l'objet étudié (machine, animal ou autre), en se concentrant exclusivement sur l'effet externe (sans considérer les raisons internes de ces effets d'où la schématisation en boîte noire). La représentation se fait en utilisant uniquement quelques briques élémentaires :

- les affecteurs (ou capteurs) qui représentent la perception des modifications de l'environnement ;
- les effecteurs, les moyens d'action sur l'environnement ;
- la boîte noire, élément structurel dont le fonctionnement interne est ignoré et qui n'est considéré que sous l'aspect de ses entrées et de ses sorties ;
- les boucles de rétroactions (ou *feed-back*) : on constate une boucle de rétroaction lorsque la grandeur de sortie d'une boîte noire réagit sur la grandeur d'entrée, selon un processus de bouclage. Dans ce dernier cas, on n'a plus seulement affaire à une simple relation de cause à effet, mais à une causalité non-linéaire, plus complexe, où l'effet rétroagit sur la cause. Il existe deux sortes de rétroactions : la rétroaction positive (amplificateur) et la rétroaction négative (compensateur).

Le rôle de la cybernétique est donc ensuite de prévoir selon cette représentation l'évolution de son comportement dans le temps. Elle a ainsi permis de faire émerger les bases scientifiques d'une analyse rigoureuse des concepts d'organisation et de commande.

La théorie de l'information

La théorie de l'information schématisé la communication ainsi : toute information est un message envoyé par un émetteur à un récepteur en fonction d'un code déterminé. Claude Shannon choisit, pour théoriser l'information, de faire abstraction de la signification des messages. C'est un point de vue de théoricien, mais aussi d'ingénieur : le contenu du message n'a pas en soi d'incidence sur les moyens de le transporter. Seule compte une quantité d'information à transmettre, mesurable selon la théorie de Shannon (et qui ne correspond pas à ce que nous entendons dans le langage courant par « quantité d'information »). L'objectif de Shannon, ingénieur à la compagnie téléphonique (BELL), était d'utiliser le plus efficacement possible les canaux de transmission.

La théorie de l'information de Claude Shannon regroupe les lois mathématiques concernant le transfert de signaux dans des canaux matériels dotés d'un rapport signal/bruit. Cette théorie est applicable à la transmission des signaux artificiels aussi bien qu'à la linguistique ou au système nerveux. Le problème de son application aux langues vernaculaires est qu'elle se fait au détriment du sens et du contexte culturel.

Elle conduit aussi à des paradoxes : « Médor est un chien » contient moins de *bits* d'information au sens technique que « Médor est un quadrupède », et véhicule pourtant bien plus d'information sémantique, puisque tous les chiens sont des quadrupèdes (alors que tous les quadrupèdes ne sont pas des chiens).

La notion de système

Historique

Le concept moderne de système date des années 1940. Il est dû à l'apport de différents personnalités. Outre Ludwig von Bertalanffy, Norbert Wiener, Claude Shannon, dont nous venons de parler, il faut aussi évoquer :

- Warren McCulloch : à l'origine neuropsychiatre, il étend ses recherches aux mathématiques et à l'ingénierie. Pionnier de la théorie moderne des automates, il est le premier à comparer le fonctionnement en réseau des composantes d'une machine à celui des neurones dans le cerveau. Il engage des travaux importants sur l'intelligence artificielle et fonde une nouvelle science, la bionique.
- Jay Wright Forrester : ingénieur en électronique, il élargit à partir de 1960 le champ d'application de la nouvelle théorie des systèmes à la dynamique industrielle, puis élaboré une « dynamique générale des systèmes » (Voir Dynamique des systèmes).
- Herbert A. Simon : Prix Turing (1975) et « prix Nobel d'économie » (1978), Herbert Simon a développé une vision de l'organisation, de la cognition et de l'ingénierie largement inspirée de la théorie de systèmes. Refusant la dichotomie entre science pure et science appliquée, son œuvre se situe à l'interface de l'informatique, de l'économie, de la psychologie et de la biologie. Il fut parmi les premiers théoriciens de la rationalité limitée des agents économiques et administratifs. Traquant « la forme ordonnée cachée dans l'apparent désordre », Simon a postulé que la distinction entre artificiel et naturel n'est pas opérante au niveau des modes de traitement de l'information par des systèmes complexes (cerveau ou ordinateur), dont l'organisation est assurée par des règles formelles d'adaptation à leur environnement. En 1956, Herbert A. Simon a réalisé avec Allen Newell ce qui est généralement considéré comme le premier système informatique d'intelligence artificielle (*Logic theorist*, pour la RAND Corporation).

La nouvelle approche des systèmes se développe aux États-Unis pour répondre à des problèmes divers : mise au point d'instruments de guidage des missiles, modélisation du cerveau humain et du comportement, stratégie des grandes entreprises, conception et réalisation des premiers grands ordinateurs...

Quatre concepts fondamentaux

Quatre concepts sont fondamentaux pour comprendre ce qu'est un système :

- *L'interaction* (ou *l'interrelation*) renvoie à l'idée d'une causalité non-linéaire. Ce concept est essentiel pour comprendre la coévolution et la symbiose en biologie. Une forme particulière d'interaction est la rétroaction (ou *feed-back*) dont l'étude est au centre des travaux de la cybernétique.
- *La totalité* (ou *la globalité*). Si un système est d'abord un ensemble d'éléments, il ne s'y réduit pas. Selon la formule consacrée, le tout est plus que la somme de ses parties. Bertalanffy montre, contre l'avis de Russell qui rejette le concept d'organisme, « qu'on ne peut obtenir le comportement de l'ensemble comme somme de ceux des parties et [qu'on doit] tenir compte des relations entre les divers systèmes secondaires et les systèmes qui les coiffent [pour] comprendre le comportement des parties ». Cette idée s'éclaire par le phénomène d'émergence : au niveau global, apparaissent des propriétés non déductibles des propriétés élémentaires, ce qu'on peut expliquer par un effet de seuil.
- *L'organisation* est le concept central pour comprendre ce qu'est un système. L'organisation est l'agencement d'une totalité en fonction de la répartition de ses éléments en niveaux hiérarchiques. Selon son degré d'organisation, une totalité n'aura pas les mêmes propriétés. On arrive ainsi à cette idée que les propriétés d'une totalité dépendent moins de la nature et du nombre d'éléments qu'ils contiennent que des relations qui s'instaurent entre eux. On peut donner deux exemples :
 - les isomères sont des composés chimiques de même formule et de même masse, mais ayant des agencements structurels différents et, de ce fait, des propriétés différentes.
 - les cerveaux humains possèdent tous à peu près le même nombre de neurones, mais ce qui va décider des différentes aptitudes, c'est la nature et le nombre de relations entre eux dans telle ou telle aire. On peut dire que, en s'organisant, une totalité se structure (une structure est donc une totalité organisée).

L'organisation est aussi un processus par lequel de la matière, de l'énergie et de l'information s'assemblent et forment une totalité, ou une structure. Certaines totalités développent une forme d'autonomie ; elles s'organisent de l'intérieur : on parle alors d'auto-organisation.

Il existe deux sortes d'organisation : l'organisation en modules, en sous-systèmes (qui renvoie aussi à l'organisation en réseaux) et l'organisation en niveaux hiérarchiques. L'organisation en sous-systèmes procède par intégration de systèmes déjà existants, tandis que l'organisation en niveaux hiérarchiques produit de nouvelles propriétés, à chaque niveau supplémentaire. La notion d'organisation retrouve donc celle d'émergence, dans la mesure où c'est le degré d'organisation d'une totalité qui fait passer d'un niveau hiérarchique à un autre, et fait émerger de nouvelles propriétés. L'émergence est la création d'un niveau hiérarchique supérieur.

De manière générale, on s'aperçoit donc que la notion d'organisation recouvre un aspect structurel (comment est construit la totalité) et un aspect fonctionnel (ce que la structure lui permet de faire). On peut représenter une structure par un organigramme, la fonction par un programme.

- *La complexité* d'un système tient au moins à trois facteurs :
 - le degré élevé d'organisation ;
 - l'incertitude de son environnement ;
 - la difficulté, sinon l'impossibilité, d'identifier tous les éléments et toutes les relations en jeu. D'où l'idée que les lois qui permettent de décrire ce type de système ne conduisent pas à sa reproduction à l'identique, mais à la détermination d'un comportement global caractérisé par une prédictivité réduite.

Description d'un système

Sous son aspect structurel, un système comprend quatre composants :

- *les éléments constitutifs* : on peut en évaluer le nombre et la nature (même si ce n'est qu'approximativement). Ces éléments sont plus ou moins homogènes (ex. automobile : groupe motopropulseur, châssis, habitacle, liaison au sol, carrosserie). Dans une entreprise commerciale, les éléments sont hétérogènes (capitaux, bâtiments, personnel, ...),
- *une limite (ou frontière) qui sépare la totalité des éléments de son environnement* : cette limite est toujours plus ou moins perméable et constitue une interface avec le milieu extérieur. C'est par exemple, la membrane d'une cellule, la peau du corps, la carrosserie d'une voiture. La limite d'un système peut être plus floue, ou particulièrement mouvante, comme dans le cas d'un groupe social,
- *des réseaux de relations* : les éléments sont en effet inter-reliés. Nous avons vu que, plus les interrelations sont nombreuses, plus le degré d'organisation est élevé et plus grande est la complexité. Les relations peuvent être de toutes sortes. Les deux principaux types de relations sont les transports et les communications. En fait, ces deux types peuvent se réduire à un seul, puisque communiquer c'est transporter de l'information, et transporter sert à communiquer (faire circuler) des matériaux, de l'énergie ou de l'information.
- *des stocks (ou réservoirs)* où sont entreposés les matériaux, l'énergie ou l'information constituant les ressources du systèmes qui doivent être transmises ou réceptionnées.

Sous son aspect fonctionnel, un système comprend :

- *des flux* de matériaux, d'énergie ou d'informations, qui empruntent les réseaux de relations et transitent par les stocks. Ils fonctionnent par entrées/sorties (ou *inputs/outputs*) avec l'environnement ;
- *des centres de décision* qui organisent les réseaux de relations, c'est-à-dire coordonnent les flux et gèrent les stocks ;
- *des boucles de rétroaction* qui servent à informer, à l'entrée des flux, sur leur sortie, de façon à permettre aux centres de décision de connaître plus rapidement l'état général du système ;
- *des ajustements* réalisés par les centres de décisions en fonction des boucles de rétroaction et de délais de réponse (correspondant au temps que mettent les informations « montantes » pour être traitées et au temps supplémentaire que mettent les informations « descendantes » pour se transformer en actions).

Il existe deux sortes de systèmes : les systèmes ouverts et les systèmes fermés. Comme leur nom l'indique, les systèmes ouverts ont plus d'échanges avec leur environnement, les systèmes fermés jouissent d'une plus grande autonomie (auto-organisation). Évidemment, cette distinction n'est pas tranchée : aucun système n'est complètement fermé sur lui-même, ni complètement perméable. Cette distinction a été introduite par la thermodynamique au milieu du XIX^e siècle : un système fermé échange uniquement de l'énergie avec son environnement, contrairement à un système ouvert, qui échange énergie, matière et information. La notion de système ouvert s'est considérablement élargie avec les travaux sur le vivant de Cannon vers 1930 et de Bertalanffy dans les années 1940. La notion de système fermé n'est en fait qu'un concept théorique, puisque tout système est plus ou moins ouvert.

Conservation des systèmes : état constant et homéostasie

La fonction première d'un système est sa propre conservation. Un système doit rester dans un état constant, orienté vers un optimum. Or, une des caractéristiques des systèmes qui « fonctionnent » est qu'ils sont tous dans un état de déséquilibre thermodynamique, dans la mesure où ils ne cessent d'échanger de l'énergie avec leur environnement. Ils se retrouvent donc obligés de se maintenir dans un état constant, caractérisé par une relative stabilité au sein même de laquelle existent des déséquilibres provoqués par les flux d'entrées et de sorties. L'image mécanique pour comprendre cette dynamique interne du système est celle du vélo qui doit avancer pour être en état d'équilibre dynamique.

Un système se retrouvant dans un état d'équilibre en ayant épousé tous les échanges possibles avec son environnement a atteint le stade de la « mort thermique » (pour reprendre l'expression de Boltzmann). La loi physique montrant que tous les systèmes fermés finissent tôt ou tard de cette façon s'appelle l'entropie (dit aussi 2^e principe thermodynamique).

La conservation d'un état constant est aussi une nécessité des systèmes cybernétiques (qu'ils soient organiques ou artificiels) : leur autorégulation dépend des boucles de rétroaction négatives, qui ont une fonction de contrôle et de stabilisation autour d'une valeur moyenne.

On trouve un processus particulier dans les systèmes vivants : l'homéostasie. L'homéostasie (*d'homios*, le même, et *stasis*, l'arrêt, la mise au repos) désigne la capacité d'un système à se maintenir dans un état constant, dans sa forme et ses conditions internes, en dépit des perturbations externes. Dans le cas des animaux, les conditions internes sont nombreuses et dépendent de sous-systèmes (maintien de la température interne, de la pression artérielle, de la teneur en eau et autres substances vitales, etc.). Le terme d'homéostasie est forgé par le physiologiste Walter Cannon dans les années 1920 ; mais la propriété est découverte dès le milieu du XIX^e siècle par Claude Bernard, qui décrit les principes de régulation du milieu interne. Théoriquement, un système parfaitement auto-régulé impliquerait de pouvoir revenir à son état initial, suite à une perturbation. Néanmoins, si le monde vivant lutte contre la flèche du temps (tous les êtres vivants créant des boucles de néguentropie provisoires), ils ne reviennent cependant jamais à un état identique, mais évoluent vers un état légèrement différent, qu'ils s'efforcent de rendre aussi proche que possible de leur état initial. C'est pourquoi le système vivant maintient sa forme malgré des échanges avec l'environnement ; c'est également pourquoi sa stabilité n'exclut pas une certaine évolution. En bref, la simple régulation cybernétique pour maintenir un système dans un état constant (comme c'est le cas pour un thermostat) diffère de l'homéostasie qui, malgré son nom, est un processus complexe et autonome d'autorégulation, impliquant un renouvellement des éléments et une réorganisation structurelle autonomes.

Variété d'un système

La variété d'un système est le nombre de configurations ou d'états que ce système peut revêtir. Cette propriété est nécessaire pour éviter la sclérose. Cela dit, la variété du système ne doit pas excéder les capacités de contrôle de ce système, ce que le cybernéticien R. Ashby a exprimé par la loi dite de la variété requise : « Pour contrôler un système donné, il faut disposer d'un contrôle dont la variété est au moins égale à la variété de ce système ».

Typologie des systèmes

Il existe plusieurs typologies. Citons-en deux :

- La typologie de Jacques Lesourne⁹ qui distingue :
 - Les systèmes à états (transformations entrées/sorties, sans régulation interne. Ex : un moteur de voiture).
 - Les systèmes à buts (régulation interne intégrée, capacité d'atteindre des objectifs. Ex : une chambre avec thermostat, une fusée à tête chercheuse).
 - Les systèmes à apprentissage (incluant mémoire, mécanismes de calcul, et capacité de prise de décision et d'adaptation en fonction des données enregistrées et de processus par essais et erreurs. C'est à ce niveau que l'auto-organisation devient possible. Ex : systèmes experts en stratégie économique ou militaire).
 - Les systèmes à décideurs multiples (structure complexe de plusieurs systèmes à buts, s'organisant de manière spontanée (jeux) ou de façon hiérarchique (organisations). Lorsque les hiérarchies sont enchevêtrées en un système encore plus large et complexe, on parle de sociétés).
- La typologie de Jean-Louis Le Moigne¹⁰ qui sépare :
 - Les systèmes-machines, qui relèvent de la mécanique et de l'ingénierie.
 - Les systèmes vivants (et systèmes artificiels complexes), dans lesquels apparaissent les processus de mémorisation, des centres de décision (ou de commande) et de coordination (ou de pilotage).
 - Les systèmes humains et sociaux, avec l'apparition de l'intelligence (ou capacité à traiter des informations symboliques), permettant une auto-organisation par des mécanismes abstraits d'apprentissage et d'invention, mais aussi avec la finalisation (l'intentionnalité), réorganisant tout le système en fonction de fins sélectionnées de manière autonome.

Un type nouveau de système a émergé dans la deuxième moitié du xx^e siècle dans le champ des recherches scientifiques sur le chaos déterministe : le système dynamique. La première idée caractérisant ce champ est que, derrière l'apparent désordre, se cache un ordre plus complexe que l'ordre visible. La deuxième idée est que cet ordre se produit par auto-organisation et émergence de nouvelles caractéristiques et propriétés absentes auparavant.

Outils et domaines d'application

Les deux systémiques

On distingue couramment deux systémiques (en fait deux apports successifs à l'approche systémique) :

- La première systémique, née du structuralisme, de la cybernétique, de la théorie de l'information et de l'analyse des systèmes de Bertalanffy et apparue dans les années 1950 : elle est centrée sur les concepts de structure, d'information, de régulation, de totalité et d'organisation. Le concept essentiel est sans doute ici celui de régulation, tel qu'il est défini à travers la notion de boucle de rétroaction.
- La deuxième systémique, née dans les années 1970 et 1980, et intégrant deux autres concepts essentiels : la communication et l'auto-organisation (ou autonomie). À la base du concept d'auto-organisation, on trouve celui de système ouvert développé par Bertalanffy : un système ouvert est un système qui, à travers ses échanges de matière, d'énergie et d'information, manifeste la capacité de s'auto-organiser. La propriété d'auto-organisation existe déjà dans le monde physique, comme l'a montré Ilya Prigogine avec les structures dissipatives (d'énergie). Si l'auto-organisation respecte bien le second principe de la thermodynamique (dans la mesure où elle ne concerne que les systèmes ouverts, capables de créer des boucles de négentropie, donc essentiellement les êtres vivants, mais aussi les systèmes organisationnels et sociaux), en revanche elle contredit les lois déterministes, qui ne s'appliquent complètement qu'aux systèmes physiques ou chimiques.

Les outils systémiques

- **Le raisonnement analogique** : si l'on dépasse la simple idée mathématique d'égalité de rapports, de proportion, l'analogie est le type de raisonnement qui permet de rapprocher des

domaines différents. Tenue en suspicion dans la connaissance, elle jouit d'un regain de faveur en partie grâce à la systémique. Les principales formes d'analogie sont :

- La métaphore.
- L'isomorphisme : analogie entre deux objets présentant des similitudes structurelles.
- Le modèle : élaboration d'un cadre théorique, qu'on peut en général schématiser, permettant de décrire et de représenter théoriquement un ensemble de faits. Un modèle peut être constitué à partir d'une métaphore. Par exemple, Antoine Lavoisier, comparant le cœur à un moteur, offre un modèle mécanique de la circulation sanguine.

L'analogie paraît peu fiable au niveau disciplinaire et analytique. En revanche, au niveau interdisciplinaire, elle peut s'avérer particulièrement féconde. Ainsi, elle permet de transposer des notions pertinentes pour un domaine dans d'autres domaines où elles ne le sont pas moins :

- Dans la théorie cinétique des gaz, Ludwig Boltzmann s'inspire des lois statistiques de comportement de populations humaines.
- À partir des années 1950, on utilise le concept d'information en matière génétique.
- Les **techniques d'aide à la décision** (en matière stratégique) : elles proviennent de la discipline dénommée *recherche opérationnelle* qui consiste en l'application des méthodes scientifiques d'analyse et des techniques de calcul à l'organisation des opérations humaines. Elles constituent des outils au sein de trois domaines distincts : la combinatoire, l'aléatoire et la concurrence.
 - **La combinatoire** : elle intervient dès lors qu'il faut combiner, dans le processus de décision, un nombre trop importants de paramètres. Ce domaine utilise deux méthodes : l'algorithme, prescription détaillée des opérations à réaliser pour obtenir avec certitude la solution du problème posé ; et la programmation linéaire, cherchant à déterminer les valeurs de variables ou d'activités, en fonction des ressources disponibles, et en vue d'un résultat optimum.
 - **L'aléatoire** : lorsqu'on a affaire à des situations au dénouement incertain, où la détermination de valeurs précises n'est pas possible, on a recours aux probabilités et aux moyennes.
 - **La concurrence** : bien souvent, les contraintes tiennent autant à la complexité des paramètres du domaine considéré qu'à la nécessaire prise en compte des décisions de partenaires ou d'adversaires. Cet aspect du processus de décision a été analysé par la théorie mathématique des jeux et du comportement économique, née en 1944 d'un ouvrage de John von Neumann et Oskar Morgenstern : *Théorie des jeux et comportements économiques*. La *théorie des jeux* s'applique aux situations de concurrence, que ce soit en matière politique, militaire ou économique. Dans de telles situations, deux stratégies sont possibles : la coopération et la lutte, et il existe trois classes de jeux, relevant de stratégies différentes :
 - Les **jeux de coopération pure**, où l'on additionne les préférences individuelles pour obtenir l'utilité collective.
 - Les **jeux de lutte pure**, dont le paradigme est le duel, où seules comptent des préférences individuelles antagonistes : il n'y a pas d'utilité collective possible, une préférence individuelle doit l'emporter sur les autres. Dans ce cadre, on cherche à anticiper le comportement des adversaires :
 - premièrement en délaissant leurs intentions, subjectives et par définition inaccessibles ;
 - deuxièmement en supposant leur comportement rationnel (recherche du maximum de gains pour le minimum de pertes).
 - Les **jeux mixtes**, où il faut prendre en compte la rationalité des divers joueurs, mais aussi l'utilité collective : des procédures de marchandage, de négociation ou d'arbitrage sont alors utilisées.
 - Les **représentations graphiques** : les travaux en systémique ont recours fréquemment à des graphiques pour communiquer des ensembles de données qu'il serait fastidieux et contre-intuitif de présenter de manière linéaire, discursive. Trois sortes de représentations graphiques :

- *Le diagramme* : représentation graphique des relations entre plusieurs ensembles. Ex : soit l'histogramme représentant le pourcentage d'enfants en échec scolaire selon les différentes catégories socioprofessionnelles. En abscisses, on a les différentes catégories socioprofessionnelles, en ordonnées, le pourcentage des enfants en échec scolaire, chaque rectangle représentant le rapport entre deux paramètres (une catégorie et un pourcentage) des deux ensembles considérés ;
- *La carte* : c'est la représentation en deux dimensions d'un objet en trois dimensions (un lieu, la formation géologique d'un sous-sol, une machine, un édifice, etc.). L'exemple le plus connu est évidemment la carte géographique, dont les deux dimensions représentent la surface plane d'un site, en fonction d'une échelle donnée, la hauteur étant restituée grâce à des courbes de niveau ;
- *Le réseau* : c'est le graphique des relations entre les éléments d'un même ensemble (arbre généalogique, organigramme d'une société, programme d'ordinateur, réseau routier, etc.).
- **La modélisation systémique** : au sens scientifique le plus général, le modèle désigne la transcription abstraite d'une réalité concrète. Les modèles sont nés des maquettes et des schémas. Aujourd'hui, les modèles cybernétiques (servant à étudier les conditions de régulation d'un système dans les sciences de l'ingénieur ou dans les sciences du vivant) et les modèles informatiques sont les plus répandus en sciences. Le langage graphique est le langage par excellence de la modélisation systémique (par exemple "Diagrammes d'influence" en Dynamique des Systèmes, "Modèles de processus et procédures" dans la méthode OSSAD)

Les domaines d'application

Cette théorie est apparue progressivement comme une approche très puissante qui a connu diverses applications, en biologie notamment, mais également dans les sciences sociales en économie ou en psychologie avec Gregory Bateson et ce que l'on a appelé l'École de Palo Alto.

Cette école est une source majeure de l'introduction des principes de la systémique dans le domaine des sciences humaines, notamment en anthropologie et en psychologie. La terminologie de *théorie systémique* est souvent associée à cette application où elle est en général synonyme de celle de *systémique* utilisée préférentiellement dans le cadre des sciences exactes.

Les principaux domaines sont les suivants :

- les sciences de la nature : la sciences de la vie et de la Terre, l'écologie
- la géographie au travers de la création de modèles, et principalement la chorématique
- les échanges économiques et l'entreprise : l'économie, le management, la bureautique,
- la méthode sociologique : la typologie des organisations, les sciences sociales, les sciences politiques,
- les recherches sur le comportement humain : les sciences cognitives, la psychologie, la thérapie familiale, les thérapies de groupe, la pédagogie, la linguistique, le coaching*, la stratégie militaire,
- les recherches en ingénierie : l'informatique, l'automation (robotique), l'intelligence artificielle et les réseaux de communications.

La systémique est ainsi un **nouveau paradigme** qui :

- *regroupe des démarches* :
 - théoriques,
 - pratiques,
 - méthodologiques,
- *pose des problèmes concernant les modes* :
 - de l'observation,
 - de représentation,
 - de modélisation,

- de simulation,
- se donne pour objectifs de préciser la notion de système :
 - ses frontières,
 - ses relations internes et externes,
 - ses structures,
 - ses lois ou propriétés émergentes.

Systémique et psychothérapie

La systémique a aussi été féconde dans le domaine de la psychologie clinique, et plus particulièrement de la thérapie familiale. Ainsi, Paul Watzlawick, psychologue, psychothérapeute et psychanalyste américain, fonda dans les années 1960 les thérapies systémiques familiales. C'est une thérapie brève, par opposition aux thérapies de type psychanalytique et psychothérapie de longue durée ou de *fidélisation*. Elle s'est développée au sein de l'école de Palo Alto. Elle consiste dans une approche globale du *problème* vécu par le patient, considérant que le symptôme que celui-ci présente est le résultat d'un dysfonctionnement de l'ensemble de l'environnement dont il fait partie intégrante. Selon les systémiciens, il n'y aurait pas de *fou*, mais seulement des *relations folles*. Autrement dit, tout comportement est adopté en interaction avec autrui, enchevêtré dans un réseau relationnel.

Par exemple, considérant un alcoolique, cette approche thérapeutique va traiter l'ensemble du système relationnel de la personne, de sorte qu'elle n'ait plus l'éventuel rôle de bouc émissaire dans lequel elle a pu être placée. Le comportement d'alcoolisme peut donc avoir été adopté pour se conformer aux attentes communiquées. Dans ce cas, le thérapeute ne va pas rechercher à retracer la genèse du problème, mais plutôt chercher comment agir sur cet état relationnel pour que la « part sociale » de ce qui entraîne ce comportement cesse le plus rapidement possible (sans remettre en cause la dépendance physique).

La théorie des jeux psychiques développée par l'analyse transactionnelle s'inspire aussi, dans une moindre mesure de la systémique. Elle montre que dans une communication défaillante ou une relation pathogène, chaque acteur adapte son comportement à celui de l'autre selon un scénario prédéfini afin de maintenir l'ensemble des acteurs dans leurs états (pathogènes ou non) respectifs. Le modèle général de ces jeux psychiques est le triangle dramatique de Karpmann.

Systémique et économie

La systémique inspire certains économistes et dirigeants pour amener des solutions non-linéaires. Les politiques d'austérité par exemple, linéaires, peuvent provoquer plus de dégâts que de solutions, du moins sur le court terme. Les solutions systémiques, qui amènent des solutions à plusieurs enjeux au sein d'une seule mesure, ont un impact macroéconomique positif. Les liens invisibles entre les métiers, les sujets de société, sont à exploiter. L'économie systémique inventée par Michel de Kemmeter en 2012 propose 3 principes:

1. Chaque entreprise ou projet contribue au bien commun
2. Elle a 7 niveaux de bilans (terre, financier, processus, émotionnel, communication, connaissance, bien commun)
3. Elle crée de la valeur dans tout son écosystème de parties prenantes, lui permettant d'activer de nouvelles ressources

Cette nouvelle théorie, s'inspirant des écosystèmes dans la nature, considère chaque acteur de société comme relié à l'ensemble. Elle amène aussi la notion de "fonctions vitales de la société" (mobilité, santé, éducation, habitat, entrepreneuriat, lien social,...). Les liens entre les fonctions vitales montrent clairement comment certains métiers viennent couvrir d'autres fonctions pour innover.

Axiomatique

[A vérifier : il semble plutôt s'agir d'un cahier des charges que d'une base axiomatique]

Dans son ouvrage "Systémique : vie et mort de la civilisation occidentale" paru en 2002, Jean-Pierre Algoud propose un paradigme systémique comme base de réflexion, organisée autour de 7 axiomes fondateurs à la démarche systémique :

- **Axiome 1** : "*Reconstruire le système dans sa totalité*" par un remembrement et un rassemblement des savoirs nécessaires à la compréhension de l'objet étudié.
- **Axiome 2** : "*Refondre l'apprentissage individuel des connaissances*" par le développement de la polyvalence et le décloisonnement des savoirs pour une réinsertion totale de l'Homme dans l'Univers dont il est partie prenante.
- **Axiome 3** : "*Réintégrer l'Homme dans l'Univers*" par la suppression de l'opposition entre sciences exactes (i.e. les « sciences dures ») et sciences humaines (i.e. les « sciences molles »), afin d'unifier le tandem sujet/objet.
- **Axiome 4** : "*Savoir énumérer les critères d'identification d'un système*" afin d'éviter le flou sur l'objet étudié et formalisé par la théorie scientifique associée.
- **Axiome 5** : "*Maîtriser l'évolution de l'objet par la Dynamique des Systèmes*" dans un cadre heuristique où le moteur de l'évolution est l'énergie.
- **Axiome 6** : "*Piloter le système naturel ou artificiel à l'aide de théories systémiques à caractère prédictif*" dans le cadre des limites de l'évolution naturelle possibles de l'Univers.
- **Axiome 7** : "*Penser la Partie comme une réduction du Tout*".

L'autorégulation est la régulation d'un système par lui-même. C'est le cœur de ce qui constitue l'autonomie du système¹ : ce qui fait qu'il se maintient et se transforme en partie selon ses propres règles et non pas seulement en fonction de facteurs externes. L'autorégulation de l'état, des processus, de l'évolution du système sont des dimensions reliées de son autonomie. L'autorégulation est également directement liée à la notion de complexité : si un système est autorégulé, il est forcément complexe. L'autorégulation est également liée aux notions d'auto-organisation et d'émergence, qui désigne la façon dont un système se forme ou transforme par lui-même, généralement à un niveau de complexité supérieur.

Le principe de base de l'autorégulation est la notion de rétroaction, l'action indirecte d'un élément ou facteur sur lui-même, via d'autres éléments ou facteurs ; on retrouve la notion d'autonomie à l'échelle d'un système, où se forme en réseau une sorte de régulation globale via de multiples rétroactions indirectes. L'autorégulation et l'autonomie ne signifient pas indépendance, bien au contraire la majorité des systèmes autorégulés le sont à travers l'interdépendance, l'interrelation, l'interaction avec des éléments, voire la totalité, d'un « super-système » dont ils font partie. Les relations avec l'extérieur sont intégrées en facteurs qui participent à l'activité interne.

L'autorégulation est étudiée par des disciplines telles que la cybernétique, la systémique, la théorie des systèmes dynamiques, qui historiquement sont distinctes. Ces domaines convergent en mettant à jour des schémas et principes communs d'autorégulation, et ce aussi bien concernant les systèmes matériels (physiques, chimiques), que vivants (organismes simples et complexes, communautés organiques, sociétés), ou les artefacts technologiques (machines, réseaux) voire des systèmes intégrant en réseau le vivant et le technique. Des découvertes importantes sont issues de recherches plus spécialisées sur notamment les systèmes chaotiques, les systèmes dissipatifs, et les systèmes autopoïétiques.

Trois exemples typiques

Neige

L'exemple le plus simple est celui de la neige : il est commun d'en observer parce qu'elle se trouve être blanche, c'est-à-dire réfléchit la plupart des longueurs d'onde qui l'atteignent, et fond donc d'autant moins vite. Si la neige se trouvait être noire, elle n'en existerait pas moins, mais nous aurions moins le temps de l'observer. Cet exemple montre aussi que l'autorégulation :

- ne nécessite pas la vie ;
- ne nécessite pas de processus *intentionnel* pour se mettre en place.

Cette considération simple marque la frontière entre l'hypothèse Gaïa de James Lovelock, hypothèse scientifique comme une autre, et la Théorie Gaïa d'aspect plus mystique qui en a été induite par quelques-uns de ses lecteurs, et qui est plus contestée - y compris par Lovelock lui-même.

Solutions tamponnées en chimie

Les réactions chimiques répondent à une loi d'équilibre nommée loi d'action de masse qui peut être utilisée pour réaliser des solutions-tampon : de telles solutions montrent un pH beaucoup plus stable en présence d'un acide ou d'une base que ne le ferait de l'eau pure : une autorégulation se produit donc.

De tels effets tampon s'observent en biologie, et fournissent une stabilité propice au bon déroulement des processus vitaux.

Autorégulation dans le monde vivant

Dans le cas des êtres vivants, le processus darwinien de sélection naturelle constitue une forme complexe d'autorégulation : en effet, une espèce elle-même ne s'autorégule pas (excepté par l'épuisement de ses ressources), mais un système composé par des proies et des prédateurs s'autorégule selon un mécanisme décrit par l'équation de Bernoulli² - faute de quoi proies comme prédateurs disparaissent. Voir Théorie de la reine rouge.

Les autorégulations de la cellule sont étudiées sous le nom d'homéostasie.

Pour la petite histoire, les animaux à sang chaud ont une température autorégulée, ce qui rend bien plus simple le développement de l'embryon. Richard Dawkins signale que le code génétique des batraciens est plus complexe que celui de l'homme, et attribue la différence à la complexité accrue de développement des embryons à température incontrôlée (pour information, la vitesse d'une réaction chimique, y compris biochimique, double à peu près quand la température augmente de 10 °C).

Autorégulation physique

Thermostat

Régulateur à boules de James Watt

Le problème de faire conserver à une machine à vapeur une vitesse constante sous la charge sans agir constamment sur ses manettes a été posé et résolu par James Watt.

Autorégulation du Soleil

Le fonctionnement du Soleil est à la base une transformation continue d'hydrogène en hélium par fusion, avec perte continue de masse (4×10^6 tonnes par seconde).

- Si pour des raisons d'agitation thermique (chaleur de la réaction thermonucléaire) le Soleil augmente de taille, le résultat est un plus grand écartement moyen des atomes d'hydrogène, donc un ralentissement de la réaction.
- Réciproquement, une diminution de taille se traduit par une plus grande densité de l'hydrogène et une plus grande fréquence des réactions de fusion.

Autorégulation en chimie

Principe de Le Chatelier

Le chimiste Henry Le Chatelier remarqua plusieurs phénomène de stabilité dans le monde chimique : une réaction favorisée par la chaleur, par exemple, en absorbait. Une réaction favorisée par la pression se traduisait par une plus grande absorption de gaz, etc. De façon plus générale :

« Toute action suscitait une réaction qui aurait eu l'effet inverse si elle s'était produite seule. »

Il en tira la *loi de stabilité de l'équilibre chimique* qui porte aujourd'hui son nom³.

Loi d'action de masse et effet tampon

La loi de Le Châtelier, qui n'était que qualitative, avait donné naissance à d'autres lois du même ordre comme celle de Van't Hoff. Les travaux de Guldberg et Waage donnèrent naissance en 1864 à la loi d'action de masse, quantitative, qui fut très étudiée par Marcellin Berthelot et Svante Arrhenius (Berthelot était si admiratif de cette loi qu'il en vint à supposer que *la chimie serait bientôt une science achevée*). Le comportement bizarre de ces solutions chimiques qui semblaient s'adapter comme rentrent les cornes comme un escargot quand elles

touchent un obstacle se révélait n'être en fin de compte qu'une affaire de concentration d'ions conduite spontanément à minimiser un potentiel chimique.

Autorégulation en ergothérapie

Le terme autorégulation est utilisé en ergothérapie selon une perspective neurologique. Il se définit comme la capacité à prendre conscience de son propre niveau d'éveil et des exigences d'une situation ou d'une tâche afin de déployer des moyens permettant d'atteindre, de maintenir ou de modifier son niveau d'éveil pour répondre adéquatement aux exigences. L'autorégulation est une capacité fondamentale chez tous les êtres vivants considérant que le niveau d'éveil, soit le niveau d'alerte du système nerveux, fluctue au cours d'une journée et que chaque situation compose des demandes différentes. Ainsi, chaque individu développe des techniques conscientes ou inconscientes visant à s'adapter aux demandes des situations changeantes auxquelles il fait face en gérant son niveau d'éveil afin qu'il soit fonctionnel et optimal. Ces moyens se développent et se catégorisent en trois niveaux, soit le premier ordre incluant des moyens inconscients, correspondant aux fonctions automatiques du corps tel que la respiration. Puis, le second ordre, comportant aussi des moyens inconsciemment, mais correspondant plutôt à des stratégies sensori-motrices tel que les vocalises et les mouvements du corps. Puis enfin, le troisième ordre consistant en l'utilisation d'habiletés cognitives de haut niveau telles que la résolution de problème. L'autorégulation représente donc un processus complexe prenant racine dans de nombreuses connexions nerveuses au sein de multiples structures dans le cerveau (tronc cérébral, formation réticulée, hypothalamus, thalamus, système nerveux autonome, cervelet, système limbique et systèmes sensoriels). Tout d'abord, l'autorégulation se base sur la réception, l'intégration et le traitement de l'information sensorielle. En effet, le corps saisit, par le biais des récepteurs sensoriels, des informations provenant des sens. Ceux-ci sont ensuite acheminés au cerveau, puis filtrés. Ils détermineront le niveau d'éveil de la personne en plus de lui permettre de saisir les exigences de la tâche à réaliser. Le cerveau sélectionnera ensuite les moyens nécessaires pour maintenir ou modifier son niveau d'éveil afin de produire subséquemment des comportements adaptés à la situation présentée.

Bien que cette capacité soit partagée par tous, certaines personnes présentent des déficits sur le plan de l'autorégulation, par exemple les enfants à troubles d'apprentissage, faisant en sorte qu'ils utilisent des moyens inadéquats, insuffisants ou socialement inadaptés, générant ainsi une difficulté à se concentrer et à performer dans une tâche vue leur incapacité à atteindre un niveau d'éveil optimal et approprié. Ces difficultés expliquent souvent des comportements incompris qui sont faussement attribués à des troubles de comportements. C'est alors qu'une prise en charge en ergothérapie voit sa pertinence, entre autres, afin d'aider l'enfant à utiliser des moyens visant à moduler son niveau d'éveil. Selon les capacités de l'enfant, l'ergothérapeute pourra aussi cibler la capacité à prendre conscience de son propre niveau d'éveil et des exigences d'une situation ou tâche dans son plan d'intervention.

Autorégulation et économie

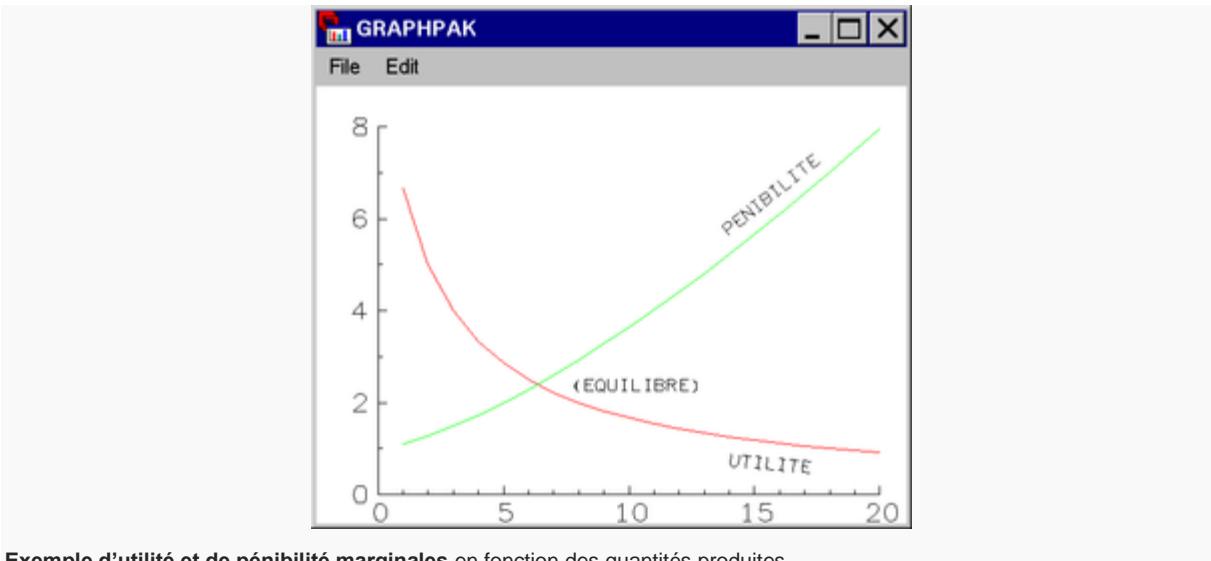
Il existe au sein d'une société ou d'un groupe d'agents économiques des phénomènes économiques d'autorégulation. Pour l'école néoclassique, ils découlent des comportements de rationalité des agents économiques individuels. L'école marxiste y voit au contraire le jeu social des forces productives et des rapports de production.

Ces mécanismes se sont en général mis en place à *l'insu* des hommes eux-mêmes (du moins en tant que mécanisme de régulation); la science économique - qui n'a commencé à vraiment émerger que vers les XVIII^e et XIX^e siècle - ne les étudient que rétrospectivement.

Monnaie

La monnaie constitue un outil de régulation efficace des biens matériels dans une société artisanale, rurale ou nomade, et cela pour une raison structurelle :

- les conditions de production les plus favorables (bonne forme physique en début de journée, meilleure terre, meilleures bêtes) étant exploitées en premier (voir : loi des rendements décroissants), le coût de production unitaire *augmente* dans un tel type de société avec les quantités produites ;



Exemple d'utilité et de pénibilité marginales en fonction des quantités produites.

- en revanche, ces productions ont elles-mêmes, en raison de la même *loi des rendements décroissants* appliquée par le consommateur, une *utilité de plus en plus faible*. L'économiste Charles Gide donne comme exemple⁵ le seau d'eau que l'on extrait du puits :
 - le premier sert par priorité à assurer la ration d'eau de la famille,
 - le second à donner à boire au bétail,
 - le troisième à arroser le potager,
 - le quatrième à faire un brin de toilette,
 - le cinquième à laver le sol,
 - le sixième peut-être à arroser quelques fleurs d'agrément.

La conjonction des *coûts unitaires croissants* et de la *valeur unitaire décroissante* garantit que l'on arrivera à un équilibre. Il existera un moment où on ne jugera plus intéressant de tirer du puits, pour ce jour-là, un seul seau d'eau de plus. Le point d'équilibre s'atteint *structurellement*, et obligatoirement, *dans ce cas précis*. L'existence de cet équilibre et les forces de retour vers cet équilibre constituent un mécanisme d'autorégulation

Dans le monde réel, toutefois :

- les utilités peuvent ne pas être décroissantes, mais au contraire croissantes (s'il n'existe qu'un téléphone dans le monde, son utilité pour le monde est nulle; plus il en existe, plus l'utilité possible de chacun augmente ou, du moins, il est facile de démontrer qu'elle ne saurait diminuer);
- les coûts unitaires peuvent ne pas être croissants : si mille lecteurs ont besoin d'un journal, celui-ci reviendra relativement cher. Si c'est un million de lecteurs, il sera possible de répartir les coûts sur une plus large base.

L'existence d'un point d'équilibre *unique* peut alors ne pas être garantie. Il peut par exemple en exister plusieurs distincts qui seront comme autant d'optimums *locaux*.

Autorégulation du niveau de concurrence

Dans le cas du monopole (concurrence des divers emplois de la monnaie pour le consommateur)

Sauf cas très particuliers (eau, médecine, etc.), le producteur ne peut augmenter *indéfiniment* son prix, sans quoi le consommateur pourrait à son tour réorienter sa consommation. Ainsi, s'il estime les voyages trop chers, il peut décider d'occuper ses loisirs à autre chose comme le cinéma, le jardinage ou le bricolage.

La « main invisible » d'Adam Smith

Métaphore de la *main invisible* d'Adam Smith (« l'homme est conduit par une main invisible à remplir une fin qui n'entre nullement dans ses intentions ; tout en ne cherchant que son intérêt personnel »). Ainsi le marché s'autorégule et maximise la *seule production*; Le consommateur et le producteur, cherchant leur intérêt individuel, participerait à l'amélioration de la société toutefois. Ce modèle ne règle pas le problème de la répartition. (Il faut considérer ce concept sous son seul aspect *technique* et non sous d'éventuels aspects de propagande ou de dénigrement de la théorie libérale.) L'expression de Smith n'apparaît qu'une fois dans *La Richesse des nations* et dans le contexte d'un raisonnement contre ce que nous appelons aujourd'hui le néolibéralisme. Il avait compris

que sa théorie ne fonctionnerait pas s'il y avait libre circulation et libre investissement des capitaux (voir l'article détaillé).

Limitations structurelles de l'autorégulation

Pour l'économiste Boukharine, toute structure économique viable est un équilibre dynamique. Les éléments de dynamique et les éléments d'équilibre doivent garder entre eux des rapports proportionnés, permettant dans chacun de leurs cycles d'interaction contrariés le rétablissement d'un équilibre supérieur. Dans cette compréhension, l'auto-régulation atteint une limite structurelle dès lors qu'une disproportion trop grande entre l'un ou l'autre de ces groupes d'éléments apparaît, soit que les facteurs d'équilibre prennent le pas sur les facteurs de dynamique, soit l'inverse - par exemple le progrès technique mal régulé peut amener la chute du taux de profit et éventuellement en fonction des modes de répartition, par extension à court ou moyen terme celle de la consommation populaire.

- Perte d'efficacité de la monnaie comme régulateur avec la révolution industrielle.
 - Importance croissante des *frais fixes* : la *loi des rendements décroissants*, même globalement vraie, devient parfois *localement* fausse.
 - Instabilité associée

Ce phénomène technique peut engendrer des crises économiques.

- Analyse de Karl Marx (se limiter aussi à l'aspect *technique*; bien qu'indissociable de l'aspect politique)
- Effets pervers de la non-concavité.
- Problème de la régulation de l'immatériel. Conséquences de quelques dérégulations (le désert des Mojaves).

Modèles proies-prédateurs de Bernoulli

Le modèle linéaire propose l'étude de l'évolution d'une colonie de proies en croissance permanente en présence de prédateurs qui s'en nourrissent ; le nom du modèle vient de Nicolas Bernoulli.

$$\frac{dx_1}{dt} = k * x_1$$

Avec la décroissance de la colonie des prédateurs :

$$\frac{dx_2}{dt} = -h * x_2$$

Mais les prédateurs peuvent survivre grâce aux proies :

$$\frac{dx_2}{dt} = -h * x_2 + b * x_1$$

De même la colonie des proies va-t-elle diminuer :

$$\frac{dx_1}{dt} = k * x_1 - a * x_2$$

On verra dans une approche avancée le modèle de Volterra-Lotka.

Ce type de modèle, peu à peu complexifié en augmentant le nombre d'espèces de proies et celles de prédateurs, et surtout en introduisant des rétroactions et interactions avec le climat planétaire a été utilisé par James Lovelock pour élaborer son Hypothèse Gaïa. Dans ce cas, le modèle montre que plus le nombre d'espèces de proies et de prédateurs est grand, plus le système climatique et les équilibres prédateurs-proies sont régulés, et moins les épidémies ou perturbations écologiques ont d'effet sur le système global.

Mathématiques de l'autorégulation

Systèmes dynamiques, suites mathématiques

Une expression simple de l'autorégulation est celle des suites arithmético-géométriques, très liée à la rétroaction :

$$x(t) = a \cdot x(t-1) + b$$

Le système est en équilibre lorsque :

$$x(t) = x(t-1)$$

soit :

$$x = a \cdot x + b$$

le point d'équilibre est donc :

$$x = \frac{b}{1-a}$$

Lorsque $|a| < 1$, la suite converge toujours vers le point d'équilibre, quelle que soit la valeur initiale, et donc quelle que soit la perturbation ponctuelle appliquée au système.

Lorsque $|a| > 1$ ou si $a = 1$, le système diverge et tend vers l'infini : c'est une auto-amplification.

Dans le cas où $a = -1$, on a un système oscillant autour de x_0 et $-x_0 + b$:

$$x_1 = -x_0 + b$$

$$x_2 = -x_1 + b = -(-x_0 + b) + b = x_0$$

et donc très sujet à une perturbation ponctuelle, qui modifie le point d'oscillation.

Équilibre stable

Par exemple, en météorologie, des équilibres stables peuvent exister¹⁰.

Valeurs propres

Lorsqu'au voisinage d'un de ses points d'équilibres un système peut être approximé par un modèle linéaire de rétroaction, alors ses valeurs propres sont nécessairement négatives (ce qui constitue une expression de cette stabilité).

Cercles de Gerschgorin

Le calcul exact des valeurs propres, incommoder pour les matrices de très grande dimension, n'est pas toujours indispensable. Le théorème de Gerschgorin démontre en effet que toutes ces valeurs propres sont situées, dans le plan complexe, à l'intérieur de cercles nommés *cercles de Gerschgorin*. Indépendamment de l'autorégulation, ces cercles possèdent une caractéristique intéressante : s'ils sont disjoints, la matrice est inversible (ce qui signifie qu'on peut sans difficulté particulière « remonter le temps » en ce qui concerne l'évolution du système, d'autant plus loin que la précision de l'approximation linéaire du comportement du système autour de ce point de stabilité local est bonne¹¹).

Équations de Volterra-Lotka

L'équation de Volterra-Lotka régit au départ des modèles composés de proies et de prédateurs ; qualitativement :

- plus les proies sont nombreuses et plus les prédateurs vont survivre et se reproduire ;
- plus les prédateurs sont nombreux à la génération suivante, plus nombreuses sont les proies qui seront alors consommées ;
- au bout de quelque temps, cela aboutira à une diminution des proies, donc à une famine des prédateurs et à une réduction de leur nombre.

Le résultat peut être un cycle amorti, un cycle non-amorti, ou une excursion qui peut se traduire par la disparition des deux espèces.

Cybernétique

La **cybernétique** (en anglais *cybernetics*) est un terme, formé à partir du grec κυβερνήτης (*kubernêtēs*) « pilote, gouverneur », proposé en 1947 par le mathématicien américain Norbert Wiener pour promouvoir une vision unifiée des domaines naissants de l'automatique, de l'électronique et de la théorie mathématique de l'information, en tant que « théorie entière de la commande et de la communication, aussi bien chez l'animal que dans la machine »¹. Des scientifiques d'horizons très divers et parmi les plus brillants de l'époque participèrent, autour des « conférences Macy » organisées de 1946 à 1953, à ce projet interdisciplinaire : mathématiciens, logiciens, ingénieurs, physiologistes, anthropologues, psychologues... Les contours parfois flous de cet ensemble de recherches s'articulent toutefois autour du concept clé de *rétroaction* (en anglais *feedback*) ou *mécanisme téléologique*.

L'ouvrage *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*² de Wiener, publié en 1948, est considéré comme fondateur de la cybernétique et assura à celle-ci une large diffusion publique. Malgré le succès populaire du terme³, son usage déclina rapidement dans le contexte scientifique⁴ après la dispersion des participants aux conférences Macy et la mort de Norbert Wiener en 1964. L'ambition développée par la cybernétique a pourtant constitué un creuset formidable pour l'élaboration des sciences cognitives, de l'intelligence artificielle, des thérapies systémiques de l'école de Palo Alto, ou encore des théories biologiques de l'auto-organisation⁵.

Histoire du mouvement cybernétique

Le terme cybernétique fut popularisé en 1948 par le mathématicien Norbert Wiener dans son ouvrage fondateur de la discipline *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*; ce domaine sera plus tard désigné comme « la science des analogies maîtrisées entre organismes et machines »⁶.

Les bases

Étymologie



Représentation du gouvernail sur un bateau romain datant du premier siècle

Platon utilisait le terme « κυβερνητική » (*kubernētikē*) pour désigner le pilotage d'un navire. Les termes « gouverne », « gouvernail », « gouvernement » ou encore « gouverneur » partagent cette étymologie commune avec le terme « cybernétique ».

En 1834, André-Marie Ampère parle de *cybernétique* pour désigner l'art de gouverner les hommes⁷. Il s'agit ici d'une utilisation politique de la même base étymologique, dont Norbert Wiener déclarera ne pas avoir eu connaissance lorsqu'il a utilisé le terme cybernétique pour la première fois en 1947⁸. Wiener déclare avoir fait dériver le mot cybernétique « du mot grec *kubernetes*, ou *pilote*, le même mot grec dont nous faisons en fin de compte notre mot *gouverneur* »⁹.

Les principes

L'utilisation des logiques qui seront décrites par la cybernétique ne peut être datée puisque l'on peut déjà la voir dans des mécanismes antiques.

Des précurseurs emblématiques de celle-ci sont le régulateur à boules de James Watt 1788, qui a été l'un des premiers mécanismes de rétroaction utilisé dans le domaine industriel, et le servomoteur pour les machines à vapeur créé par Joseph Farcot (1824-1908) en 1859, qui a été d'abord appliqué au gouvernail des navires (l'action de la vapeur agissant sur le piston commandant le gouvernail à partir d'une information prélevée sur la position de celui-ci).

Alfred Wallace, parlant de la sélection naturelle décrit celle-ci en la comparant au contrôle automatique d'un moteur à vapeur:

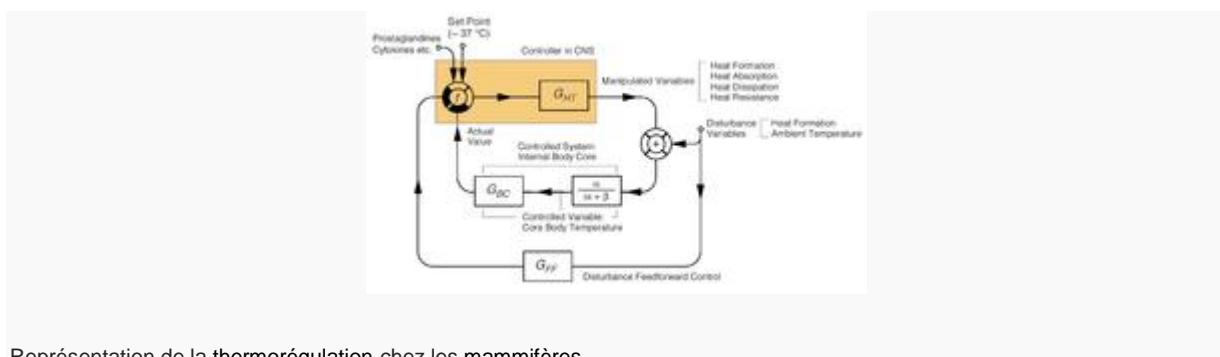
« L'action de ce principe est exactement comme celle du gouvernail centrifuge d'un moteur à vapeur, qui contrôle et corrige toute irrégularité presque avant qu'elle ne devienne perceptible; et d'une façon semblable aucun défaut d'équilibre dans le règne animal ne peut jamais atteindre un degré significatif, car cela le rendrait sensible dès le premier pas, rendant l'existence difficile et l'extinction quasiment sûre de s'ensuivre. »

— Alfred Wallace, *On the Tendency of Varieties to Depart Indefinitely From the Original Type*

La sélection naturelle est ainsi justement décrite comme une autorégulation qui maintient la stabilité de l'écosystème et prévient toute évolution. Bateson dirait ensuite « que Wallace dit là probablement la chose la plus puissante qui fut dite au XIX^e siècle. »

Les théories

La thermodynamique, souvent citée en référence par Wiener, est probablement la science préexistante qui s'apparente le plus à la cybernétique. On citera en particulier Rudolf Clausius qui développe le concept d'entropie de 1850 à 1865. En 1894, Ludwig Boltzmann fait le lien entre l'entropie et l'information en remarquant que l'entropie est liée à de l'information à laquelle on n'a pas accès.



Représentation de la thermorégulation chez les mammifères

La pensée atomiste, fille du structuralisme, va aussi faire son chemin dans le domaine des sciences et contribuer aux progrès de schématisation (réduction) de la diversité du monde à la combinatoire d'éléments simples, plus faciles à appréhender par les systèmes informatiques. On peut citer parmi les travaux importants le théorème d'incomplétude de Kurt Gödel (1931) et les travaux sur la Machine de Turing d'Alan Turing (1936).

La physiologie lui a également apporté de nombreux éléments. Par exemple, le principe d'homéostasie, mis en évidence par Claude Bernard puis étudié de façon approfondie par Walter Cannon en 1932, est une base directe des réflexions préliminaire à la cybernétique.

La cybernétique est aussi une suite de la phénoménologie, dans ce sens qu'elle ausculte les phénomènes pour en saisir l'autonomie et la particularité, notamment par la forme pour ensuite passer à un autre type d'analyse : modélisation, mécanique...

Dès 1938, la thèse de Louis Couffignal *L'analyse mécanique, application aux machines à calculer et à la mécanique céleste*, et plus tard son étude des systèmes nerveux avec Louis Lapicque, dénotent un développement en parallèle des principes de la future cybernétique.

Le premier mouvement cybernétique

Rencontres scientifiques

La première cybernétique s'établit dans le cadre des conférences Macy qui réunissent entre 1942 et 1953 un groupe interdisciplinaire de mathématiciens, logiciens, anthropologues, psychologues et économistes qui s'étaient donné pour objectif d'édifier une science générale du fonctionnement de l'esprit. Parmi les participants les plus illustres, on trouve le neurophysiologiste Arturo Rosenblueth, les mathématiciens John von Neumann et Norbert Wiener, l'ingénieur Julian Bigelow le neurophysiologiste Warren McCulloch, le logicien Walter Pitts, le psychanalyste Lawrence Kubie et les anthropologues Gregory Bateson et Margaret Mead. Ce qui rapproche les différents participants est leur intérêt commun pour les mécanismes de causalité circulaire (notamment le concept de *feedback*) qu'ils étudient dans leurs disciplines respectives.

Suite à la première conférence de 1942, sont publiés en 1943 les deux articles fondateurs de la cybernétique: « Behavior, Purpose and Teleology » dans lequel Arturo Rosenblueth, Norbert Wiener et Julian Bigelow étudient les modèles d'organisation sous-jacents aux comportements finalisés et « A Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity » dans lequel Warren McCulloch et Walter Pitts étudient les modèles d'organisation sous-jacents à la perception.

En 1947, Wiener est invité à un congrès d'analyse harmonique à Nancy, organisé par Szolem Mandelbrojt, l'oncle du célèbre mathématicien Benoît Mandelbrot. Lors de ce congrès, auquel participe notamment Louis Couffignal, on lui propose d'écrire une caractérisation unifiée du mouvement brownien (processus stochastique aussi appelé « processus de Wiener »). Il décide à son retour d'introduire le néologisme *Cybernétique* dans sa théorisation scientifique. En 1948, Wiener définit la cybernétique comme une science qui étudie exclusivement les communications et leurs régulations dans les systèmes naturels et artificiels¹⁰.

À partir de 1949, un autre groupe interdisciplinaire, le Ratio Club, commence une série de rencontres informelles pour discuter de sujets ayant trait à la cybernétique. On compte parmi eux William Ross Ashby, William Grey Walter, Alan Turing et Georges R. Boulanger, mathématicien qui fut président de l'Association internationale de cybernétique.

À partir de 1950, le mot cybernétique est inclus dans le titre des conférences Macy. La même année, Wiener popularise les implications sociales de la cybernétique, en figurant l'analogie entre les systèmes automatiques et les institutions humaines dans son best-seller *Cybernétique et société*, sous-titré *De l'usage humain des êtres humains*.

Dès le milieu des années 1950, en France, le terme « cybernétique » est rejeté par les ingénieurs et les chercheurs qui s'occupent d'ordinateurs et de programmation¹¹. La "cybernétique" a en effet attiré trop de spéculations hasardeuses et de journalistes en quête de reportages à sensation. Norbert Wiener lui-même est déjà passé à d'autres sujets plus spécialisés.

Principes de Wiener

La cybernétique désigne d'abord un moyen de connaissance, qui étudie l'information au sens de la physique, dans la définition qu'en donne Norbert Wiener: « De même que l'entropie est une mesure de désorganisation, l'information fournie par une série de messages est une mesure d'organisation »¹². Dans cette acception première, la cybernétique est une approche phénoménologique qui étudie l'information, sa structure et sa fonction dans les interactions systémiques. Ce qui peut être traduit par la science générale de la régulation et des communications dans les systèmes naturels et artificiels.



Représentation d'une boucle de rétroaction (*feedback*) négative

La cybernétique décrite par Norbert Wiener est un moyen d'expliquer et de comprendre tous les mécanismes rencontrés avec quelques briques logiques simples :

- La boîte noire : un élément relié à d'autres, dont on ne se soucie pas de savoir ce qu'il contient (ou son fonctionnement d'après sa structure interne, inaccessible de façon momentanée ou définitive), mais dont on déduit la fonction apparente à partir de l'étude de ses entrées/sorties.
 - L'émetteur, qui agit sur l'environnement, donc envoie de l'information, sorte de *porte de sortie*.
 - Le récepteur, qui en intègre depuis l'environnement, donc capte les informations, comme une *porte d'entrée* de la boîte noire.
- Le flux d'information : ce qui est transmis, donc envoyé et effectivement reçu, autrement dit l'information efficace.
 - La rétroaction (*feedback*) : c'est l'information en retour de l'état.

Le *feedback* est mis en évidence par cette approche car il est indispensable pour concevoir une logique d'autorégulation. On voit donc émerger des boucles de rétroaction, mécanismes circulaires qui mettent en évidence des *systèmes*. Si les systèmes sont mis en évidence par cette cybernétique (parfois dite *du premier ordre*), il ne le sont d'abord que par voie de conséquence d'une étude strictement limitée aux échanges d'information et à l'évolution de ces échanges dans le temps. Plus tard se constituera un paradigme propre à l'étude des systèmes en tant que tels, la *systémique*.

Portés par les participants du mouvement cybernétique, pour la plupart des auteurs majeurs dans leur discipline, les concepts de la cybernétique se diffusent rapidement. La cybernétique marque le moment d'une rupture épistémologique majeure qui a profondément influencé tous les domaines de la science et ses retombées sont innombrables.

Le deuxième mouvement cybernétique

Marvin Minsky présente la première cybernétique comme un tronc commun qui se serait divisé en trois branches: la « simulation cognitive » à la Allen Newell et Herbert Simon, l'« intelligence artificielle » et la « seconde cybernétique » ou théorie des systèmes auto-organisateurs¹³.

Morphogenèse & émergence

Alors que la première cybernétique étudie comment les systèmes maintiennent l'homéostasie (morphostase) par des mécanismes d'autorégulation, la « deuxième cybernétique » du psychiatre William Ross Ashby et des biologistes Humberto Maturana et Francisco Varela étudie comment les systèmes évoluent et créent des nouvelles structures (morphogenèse). Ashby parle d'auto-organisation, Maturana et Varela d'autopoïèse. Cette étude des systèmes éloignés de leur point d'équilibre se rapproche des travaux sur les structures dissipatives du prix Nobel de chimie belge Ilya Prigogine. Au lieu de se demander comment se maintient un certain équilibre, on observe comment un nouvel équilibre peut émerger d'une situation de déséquilibre. Prigogine a montré que contrairement à ce que l'on croyait, dans certaines conditions, en s'éloignant de son point d'équilibre, le système ne va pas vers sa mort ou son éclatement mais vers la création d'un nouvel ordre, d'un nouvel état d'équilibre. Les situations extrêmes recèlent la possibilité de créer une nouvelle structure. On voit ici la possibilité de recréer du vivant, de l'organiser là où il n'y avait plus que du chaos.

On emploiera bientôt également le terme d' *émergence* pour désigner non seulement les nouvelles formes, mais aussi les propriétés et processus nouveaux qui apparaissent lors de la réorganisation spontanée d'un système. Ce type de phénomène met parfois en jeu, plus qu'une réorganisation du système, une organisation à un degré supérieur de complexité. Pour imager, là où on avait un système de 5 éléments en interaction, on les voit se grouper en sous-systèmes de 2 et 3 éléments, eux-mêmes en relation.

Inclusion de l'observateur

Dans la cybernétique de *deuxième ordre*, qui prend forme avec Heinz von Foerster à partir de 1950-1953 avec les dernières conférences Macy, l'observateur s'inclut lui-même dans le système

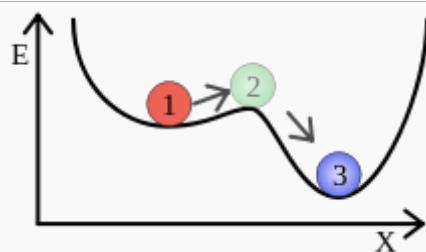
observé. Comme le rappelle von Foerster, « pour écrire une théorie du cerveau, il faut un cerveau ». En ce sens, cette conception de la cybernétique est une composante importante du constructivisme radical. La cybernétique de *deuxième ordre* vise à l'élaboration d'une méthode de description « universelle » commune aux différents champs de la science. Foerster précise que :

« L'effort d'unification entrepris par les cybernéticiens ne se situe pas au niveau des solutions, mais à celui des problèmes. Certaines classes de problèmes, définies par une même structure logique, traversent les disciplines les plus variées. La cybernétique s'est édifiée autour de deux de ces classes : les problèmes de communication, et les problèmes posés par l'étude des mécanismes qui produisent eux-mêmes leur unité (*self-integrating mechanisms*) »

Pour William Ross Ashby, « la cybernétique se situe comme une approche indépendante de la nature des éléments qu'elle étudie ».

Développements ultérieurs et champs d'influence

Cybernétique et systémique



Exemple de représentation de l'évolution de la stabilité d'un système

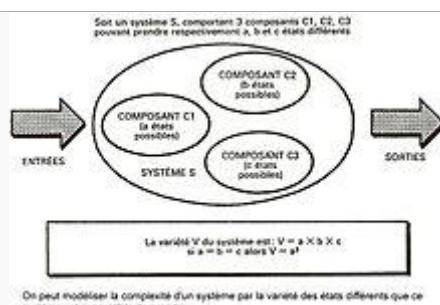
L'implication de la cybernétique dans la systémique est historiquement plus liée au « deuxième mouvement cybernétique ». En effet, si selon Norbert Wiener la cybernétique étudie exclusivement les échanges d'information (car c'est « ce qui dirige » les logiques des éléments communicants d'où le mot cybernétique), dans son évolution qui engendrera la systémique, on réintègre les caractéristiques des composantes du système, et on reconsidère les échanges d'énergie et de matière indépendamment des échanges d'information.

Pourtant, au-delà des querelles d'école entre la cybernétique et la systémique issue des travaux de Ludwig von Bertalanffy, on peut, à la suite de Gregory Bateson, considérer ces deux mouvements de pensée comme faisant partie d'un ensemble d'idées relativement unifié.

Ainsi, avec l'assimilation des théories cybernétiques par la systémique, on a été amené à comprendre les mécanismes d'autorégulation des systèmes comme des processus de feedback négatif visant à empêcher une déviation. Les systèmes cybernétiques visent à maintenir un état stable viable d'interaction au sein d'environnements changeants via un processus stochastique d'essais et erreurs.

En France, Joël de Rosnay a été parmi les premiers à populariser les grands thèmes de la cybernétique et à les appliquer à l'approche systémique de la complexité : cellule, corps, ville, économie, écosystème.

Variété d'un système



La loi de la variété indispensable : un principe qui montre que la régulation au sens strict d'un système réclame un système de contrôle dont la complexité doit être égale ou supérieure à celle du système à gérer¹⁵.

La notion de système s'applique à tout processus, qu'il soit physique, chimique, biologique, économique ou social. Ainsi par exemple, une entreprise ou même chacune des parties qui la compose (division, service, atelier,...) peuvent être considérés comme un système.

On peut modéliser la complexité d'un système par la variété des états *differents* que ce système est susceptible de prendre. Lorsque l'on fusionne plusieurs systèmes, leurs variétés (ou complexités) ne s'additionnent pas, elles se multiplient entre elles.

Le contrôle d'un système¹⁶ consiste à lui associer un autre système dont le rôle sera de maintenir aussi faible que possible, la variété des résultats (ou objectifs). Par exemple, le système à étudier étant une voiture, le système de contrôle sera son conducteur. L'objectif est alors de maintenir quasi-constant l'écart entre le véhicule et le bord de la route, tout au long du parcours.

On constate alors que la variété des résultats ou objectifs (V_0) ne peut être moindre que :

$$V_0 = V/VC = \text{Variété du système à gérer} / \text{Variété du système de contrôle}$$

La variété des résultats étant minimum, elle ne peut diminuer que si la variété du système de contrôle croît.

Cette loi est la loi de la variété indispensable qui établit que seule la variété du système de contrôle peut réduire celle qui résulte du processus à contrôler, que seule la complexité peut détruire la complexité.

La cybernétique assimilée à son application technique

Dans son champ d'application, la cybernétique peut signifier le moyen d'organiser les échanges pour les rendre efficaces, et poussée à l'extrême le moyen de contrôler plus efficacement. Le mot cybernétique est parfois interprété comme une méthode, qui passe par la science en question mais qui la lie à l'utilisation qui en est faite. On trouve ainsi le mot cybernétique expression du moyen de contrôle, rejoignant ainsi la définition d'Ampère.

Par exemple, Louis Couffignal, participant du premier mouvement cybernétique, la définira ainsi (en 1953 ou 1956 selon les sources) : « La cybernétique est l'art de rendre l'action efficace¹⁷. » Georges R.Boulanger, président de l'Association Internationale de Cybernétique, mathématicien formé aux disciplines de la technologie, énonce que « la logique peut être mécanisée¹⁸. » Il définit la cybernétique comme « la science de la communication dans l'être vivant et dans la machine¹⁹ ».

Le mot cybernétique est souvent utilisé en laissant de côté le principe scientifique d'accès à la connaissance, et il est confondu avec ce qu'il étudie, c'est-à-dire le moyen de contrôle.

Il y a parfois aussi un sous-entendu de contrôle de la personne humaine au sens de manipulation, et parfois même le sous-entendu d'utilisation par l'État pour la manipulation des masses. C'est donc également un terme polémique qui sous cet angle n'a plus grand chose à voir avec son origine scientifique. On peut supposer que le titre de l'ouvrage de Norbert Wiener de 1950 *Cybernetics and Society, The Human Use of Human Beings* (cybernétique et société, l'usage humain de l'être humain) n'est pas étranger à cette vision.

Le cas des sciences sociales

Une branche de l'école de pensée cybernétique, que l'on peut lier à l'école de Palo-Alto, s'est formée principalement sous l'impulsion de Gregory Bateson. Ce dernier organisait des conférences en parallèle des conférences Macy pour faire passer ce courant de pensée dans les sciences sociales, de l'anthropologie à la psychanalyse. C'est une référence en matière de thérapie familiale par exemple, et beaucoup de définitions actuelles de la cybernétique y sont rattachées.

« L'existence de science dites sociales indique le refus de permettre aux autres sciences d'être sociales. »

— von Foerster

« ... et de permettre aux sciences sociales d'être physiques. »

— Edgar Morin

La cybernétique a mis en évidence que n'importe quel organisme est constitué d'un ensemble plus ou moins grand d'organes, appartenant à un nombre très limité de types (fonctions élémentaires) combinés en un certain ordre pouvant être traduit par des règles d'assemblage ou de disjonction.

Une organisation (ou organisme de nature quelconque) est, le plus souvent, décrite en termes de structure (ce qu'elle est) et parfois comme une fonction (ce qu'elle fait), mais rarement en termes de correspondance (évolution adaptative).

La description d'une organisation en termes de correspondance, d'adaptation et d'adéquation aux conditions du contexte et de l'environnement, révèle l'explication cybernétique qui, dans la terminologie de Bateson²⁴, est d'un type logique différent de celui de l'explication causale : il ne s'agit plus de savoir *pourquoi quelque chose s'est produit* mais de savoir quelles contraintes ont fait que *n'importe quoi ne se soit pas produit*. L'un des membres du mouvement cybernétique, Bateson, fait une description de la démarche cybernétique :

« [...] En termes cybernétiques, on dit que le cours des événements est soumis à des restrictions, et on suppose que, celles-ci mises à part, les voies du changement n'obéiraient qu'au seul principe de l'égalité des probabilités. En fait, les restrictions sur lesquelles se fonde l'explication cybernétique peuvent être considérées, dans tous les cas, comme autant de facteurs qui déterminent l'inégalité des probabilités... Idéalement — et c'est bien ce qui se passe dans la plupart des cas — dans toute séquence ou ensemble de séquences, l'événement qui se produit est uniquement déterminé en termes d'une explication cybernétique. Un grand nombre de restrictions différentes peuvent se combiner pour aboutir à cette détermination unique. Dans le cas du puzzle, par exemple, le choix d'une pièce pour combler un vide est restreint par de nombreux facteurs : sa forme doit être adaptée à celle des pièces voisines et, en certains cas, également à celle des frontières du puzzle ; sa couleur doit correspondre à celles des morceaux environnants... Du point de vue de celui qui essaie de résoudre le puzzle, ce sont là des indices, autrement dit des sources d'information qui le guideront dans son choix. Du point de vue de la cybernétique, il s'agit de restrictions. De même, pour la cybernétique, un mot dans une phrase, une lettre à l'intérieur d'un mot, l'anatomie d'un quelconque élément d'un organisme, le rôle d'une espèce dans un écosystème, ou encore le comportement d'un individu dans sa famille, tout cela est à expliquer (négativement) par l'analyse des restrictions²⁵. »

La description d'une organisation n'est donc adéquate que si l'on inclut une description des contraintes exercées par le contexte et l'environnement sur ses possibilités d'action (comportement, fonction et processus), d'agencement (structure) et de devenir (évolution). Il est de même du comportement conçu comme un construit organisé d'activités, de la cellule jusqu'à la machine et aux institutions, en passant par l'animal et l'homme, la société.

- Dans **l'explication causale**, dite positive (où, par exemple, une boule de billard B se déplace parce qu'elle est heurtée par une boule A sous tel angle et à telle vitesse), la trajectoire ou le comportement de la boule B est considéré entièrement prédictible à partir des conditions initiales.
- Dans l'explication **cybernétique**, dite négative, l'examen des restrictions ou contraintes du système montre que n'importe quoi ne peut se produire et que seule une réponse appropriée à ces contraintes peut survivre, se développer et se reproduire. À partir de l'explication cybernétique se déploient les principes de l'équifinalité et de multifinalité qui sont très loin du précepte déterministe ou peut-être plus exactement causaliste de René Descartes de la relation directe linéaire (proportionnalité de l'effet à la cause et antécédence : la cause précède l'effet). Le comportement d'une fourmi devient intelligible

en regard des contraintes topographiques du parcours et des contraintes du ravitaillement à rapporter dans un processus stochastique du hasard des rencontres et de la nécessité de ramener la nourriture.

L' « équifinalité », formulée par Ludwig von Bertalanffy, désigne un même état final qui peut être atteint à partir de différents états initiaux, à travers différentes voies et avec différents moyens. En d'autres termes, des effets identiques peuvent avoir des causes différentes. C'est une sorte de suite convergente²⁶. La « multifinalité » dans la théorie des contextes d'Anthony Wilden, en termes de causes et d'effets, énonce que des causes identiques peuvent produire des effets différents en une sorte de suite divergente.

Cinéma

La Cybernétique, film écrit et réalisé par Jean-Marie Piquint. Conseiller scientifique, le professeur Georges R. Boulanger, docteur en science mathématique de la Sorbonne, président de l'Association internationale de cybernétique, professeur à l'ULB (Université de Bruxelles). Primo Premio Assoluto au Festival International du film scientifique de Vicenza, Prix spécial au Festival International du Film Industriel de Rouen, etc... Le film figure dans la collection de la cinémathèque de la fédération Wallonie Bruxelles.

Science-fiction

La cybernétique fut à l'origine de la dénomination du personnage du cyborg en science-fiction. Cyborg est la contraction de l'anglais « cybernetic organism » (organisme cybernétique). Les concepts émergeant de la cybernétique sont largement représentés en science-fiction et les exemples abondent (une partie importante des travaux de Isaac Asimov, avec les robots et la psychohistoire, le film Blade Runner, le manga Gunnm, etc...).

Il en est résulté, quand on évoque le mot cybernétique, dans le langage courant, une empreinte liée au préfixe *cyber* que l'on retrouve dans cyberspace par exemple, et parfois bien éloigné de sa définition initiale.

Codage de l'information

On s'intéresse ici aux moyens de formaliser l'information afin de pouvoir la manipuler (principalement pour la transmettre). On ne s'intéressera donc pas au contenu mais seulement à la forme.

Alphabet, mot, langages

Définitions

On définit un **alphabet** comme un ensemble non vide de symboles, par exemple :

- A = {a,b,c,...,z}, l'alphabet latin ;
- A = {0,1,2,...,9}, les chiffres dits arabes
- A = {0,1,...,9,A,B,...,F}, les chiffres hexadécimaux.
- A = {0,1}, l'alphabet de la logique booléenne.
- A = {A,T,G,C}, les bases de l'ADN qui codent notre génome (cet alphabet est le sujet principal de la bio-informatique).

On nomme **lettre** un élément d'un alphabet.

On nomme **mot** une suite finie de lettres.

La suite de 0 lettre est nommée le **mot vide**, notée ϵ .

On nomme **langage** un ensemble de mots associé à certaines *règles d'interprétation* (sans cette dernière restriction, n'importe quelle table de valeurs aléatoires pourrait être nommée *langage*).

Dans le cas de l'ADN, ces règles sont contenues dans le ribosome, dans les langues naturelles,

elles sont contenues dans leur lexique, sur un ordinateur, elles sont présentes dans les circuits de l'unité centrale.

Opérations

Soit un alphabet A et un entier naturel n .

On note A^n l'ensemble de tous les mots de longueur n sur A et A^* l'ensemble de tous les mots de A .

$$A^* = \bigcup_{n \geq 0} A^n$$

On dispose de : (fermeture de Kleene).

On définit l'opération de concaténation $\cdot : A^* \times A^* \rightarrow A^*$ qui à (u, v) associe un mot w qui est constitué de la suite de lettres de u puis celle de v .

Exemple : « marc » . « et sophie » = « marc et sophie » (les guillemets servent à délimiter les symboles, ce ne sont pas des éléments de A).

- **Propriétés :**

- . est associatif : $\forall u, v, w \in A^*, (u \cdot v) \cdot w = u \cdot (v \cdot w)$
- . admet ϵ comme élément neutre : $\forall u \in A^*, u \cdot \epsilon = \epsilon \cdot u = u$
- . n'est pas commutative.

Codages et codes

Codage

Soit L et M deux langages.

Un codage c de L dans M est un morphisme (pour l'opération \cdot) injectif. En d'autres termes, c'est une correspondance entre les mots de L et ceux de M , où à tout mot de L est associé un unique mot de M et tel que le codage de la concaténée soit égale à la concaténée des codages. ($\forall u, v \in L, c(u \cdot v) = c(u) \cdot c(v)$).

Code

Un langage L sur un alphabet A est un code si et seulement s'il n'existe pas deux factorisations différentes des mots A^* avec des mots de L .

Compression de données

La compression de données ou codage de source est l'opération informatique consistant à transformer une suite de bits A en une suite de bits B plus courte pouvant restituer les mêmes informations en utilisant un algorithme particulier. Opération de codage, elle raccourcit la taille (de transmission ou de stockage) des données au prix d'un effort de compression et de décompression. La décompression est l'opération inverse de la compression.

Un algorithme de compression sans perte restitue après les opérations successives de compression et de décompression une suite de bits strictement identique à l'originale. Les algorithmes de compression sans perte sont utiles pour les documents, les archives, les fichiers exécutable ou les fichiers texte.

Pour la compression de données sans pertes, on distingue principalement deux types de codage : le codage entropique et le codage algorithmique.

Dans la première catégorie on retrouve entre autres le codage de Huffman. Le codage entropique se base sur des a priori sur la source. On est par exemple obligé pour le codage de Huffman de transmettre la table de probabilités pour les symboles de la source contrairement au codage algorithmique. Le codage algorithmique n'a en effet pas besoin de transmettre des

informations autres que le résultat du codage. On peut prendre l'exemple des codages par dictionnaire comme LZ77, LZ78 et LZW.

Avec un algorithme de compression **avec perte**, la suite de bits obtenue après les opérations de compression et de décompression est différente de l'originale, mais l'information restituée est en revanche voisine. Les algorithmes de compression avec perte sont utiles pour les images, le son et la vidéo.

Les formats de données tels que Zip, RAR, gzip, ADPCM, MP3 et JPEG utilisent des algorithmes de compression de données.

Gagner 5 % en efficacité de compression par rapport aux grands algorithmes courants peut typiquement multiplier par 100 le temps nécessaire à la compression¹.

La théorie de la compression de données utilise une considération venant de la théorie de l'information : celle d'entropie au sens de Shannon.

Types de compression

Compression sans perte

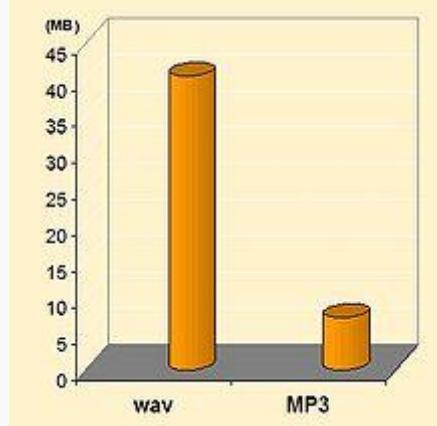
La compression est dite *sans perte* lorsqu'il n'y a aucune perte de données sur l'information d'origine. Il y a autant d'information après la compression qu'avant, elle est seulement réécrite d'une manière plus concise (c'est par exemple le cas de la compression gzip pour n'importe quel type de données ou du format PNG pour des images synthétiques destinées au Web). La compression sans perte est dite aussi compactage.

L'information à compresser est vue comme la sortie d'une source de symboles qui produit des textes finis selon certaines règles. Le but est de réduire la taille moyenne des textes obtenus après la compression tout en ayant la possibilité de retrouver exactement le message d'origine (on trouve aussi la dénomination *codage de source* en opposition au *codage de canal* qui désigne le codage correcteur d'erreurs).

Il n'existe pas de technique de compression de données sans perte universelle, qui pourrait compresser n'importe quel fichier : si une technique sans perte compresse au moins un fichier, alors elle en « grossit » également au moins un.

Les formats de fichier de compression sans perte sont connus grâce à l'extension ajoutée à la fin du nom de fichier (« *nomdefichier.zip* » par exemple), d'où leur dénomination très abrégée.

Compression avec pertes



Comparaison des tailles d'un fichier audio non compressé (en PCM dans un conteneur WAV) et compressé (en MP3).

La compression avec pertes ne s'applique qu'aux données « perceptibles », en général sonores ou visuelles, qui peuvent subir une modification, parfois importante, sans que cela soit perceptible par un humain. La perte d'information est irréversible, il est impossible de retrouver

les données d'origine après une telle compression. La compression avec perte est pour cela parfois appelée *compression irréversible* ou *non conservative*.

Cette technique est fondée sur une idée simple : seul un sous-ensemble très faible de toutes les images possibles (à savoir celles que l'on obtiendrait par exemple en tirant les valeurs de chaque pixel par un générateur aléatoire) possède un caractère *exploitable et informatif* pour l'œil. Ce sont donc ces images-là qu'on va s'attacher à coder de façon courte. Dans la pratique, l'œil a besoin pour identifier des zones qu'il existe des *corrélations* entre pixels voisins, c'est-à-dire qu'il existe des zones contiguës de couleurs voisines. Les programmes de compression s'attachent à découvrir ces zones et à les coder de la façon aussi compacte que possible. La norme JPEG 2000, par exemple, arrive généralement à coder des images photographiques sur 1 bit par pixel sans perte visible de qualité sur un écran, soit une compression d'un facteur 24 à 1.

Puisque l'œil ne perçoit pas nécessairement tous les détails d'une image, il est possible de réduire la quantité de données de telle sorte que le résultat soit très ressemblant à l'original, voire identique, pour l'œil humain. L'enjeu de la compression avec pertes est de réduire la quantité de données d'un fichier tout en préservant la qualité perceptible et en évitant l'apparition d'artefacts.

De même, seul un sous-ensemble très faible de sons possibles est exploitable par l'oreille, qui a besoin de régularités engendrant elles-mêmes une *redondance* (coder avec fidélité un bruit de souffle n'aurait pas grand intérêt). Un codage éliminant cette redondance et la restituant à l'arrivée reste donc acceptable, même si le son restitué n'est pas en tout point identique au son d'origine.

On peut distinguer trois grandes familles de compression avec perte :

- par prédiction, par exemple l'ADPCM ;
- par transformation. Ce sont les méthodes les plus efficaces et les plus utilisées. (JPEG, JPEG 2000, l'ensemble des normes MPEG...) ;
- compression basée sur la récurrence fractale de motifs (Compression fractale).

Les formats MPEG sont des formats de compression avec pertes pour les séquences vidéos. Ils incluent à ce titre des codeurs audio, comme les célèbres MP3 ou AAC, qui peuvent parfaitement être utilisés indépendamment, et bien sûr des codeurs vidéos — généralement simplement référencés par la norme dont ils dépendent (MPEG-2, MPEG-4), ainsi que des solutions pour la synchronisation des flux audio et vidéo, et pour leur transport sur différents types de réseaux.

Compression presque sans perte

Les méthodes de compression sans perte significative sont un sous-ensemble des méthodes de compression avec perte, parfois distinguées de ces dernières. La compression sans perte significative peut être vue comme un intermédiaire entre la compression conservative et la compression non conservative, dans le sens où elle permet de conserver toute la *signification* des données d'origine, tout en éliminant une partie de leur *information*.

Dans le domaine de la compression d'image, la distinction est faite entre la compression sans perte (parfaite au bit près ou *bit-perfect*) et la compression sans perte significative (parfaite au pixel près ou *pixel-perfect*). Une image compressée *presque sans perte* (à ne pas confondre avec une image compressée avec peu de pertes) peut être décompressée pour obtenir les pixels de sa version non-compressée à l'identique. Elle ne peut en revanche pas être décompressée pour obtenir sa version non compressée intégralement à l'identique (les métadonnées peuvent être différentes).

Techniques de compression sans perte

Parmi les algorithmes de compression presque sans perte, on retrouve la plupart des algorithmes de compression sans perte spécifiques à un type de données particulier. Par exemple, JPEG-LS permet de compresser presque sans perte du Windows bitmap et Monkey's Audio permet de compresser sans perte les données audio du wave PCM : il n'y a pas de perte de qualité, l'image et le morceau de musique sont exactement ceux d'origine.

Les algorithmes tels que Lempel-Ziv ou le codage RLE consistent à remplacer des suites de bits utilisées plusieurs fois dans un même fichier. Dans l'algorithme de codage de Huffman plus la suite de bits est utilisée souvent, plus la suite qui la remplacera sera courte.

Les algorithmes tels que la transformée de Burrows-Wheeler sont utilisés avec un algorithme de compression. De tels algorithmes modifient l'ordre des bits de manière à augmenter l'efficacité de l'algorithme de compression, mais sans compresser par eux-mêmes.

Codage par répétition

Codage RLE

Les lettres **RLE** signifient *run-length encoding*. Il s'agit d'un mode de compression parmi les plus simples : toute suite de bits ou de caractères identiques est remplacée par un couple (nombre d'occurrences ; bit ou caractère répété).

Exemple: AAAA AAZZ ZEEE ER donne : 8A2Z6E1R, ce qui est beaucoup plus court.

Compression CCITT

C'est une compression d'images utilisée par les télécopieurs (ou fax), standardisée par des recommandations de l'Union internationale des télécommunications (anciennement appelée CCITT). Elle est de type RLE (on code les suites horizontales de pixels blancs et de pixels noirs) et peut-être bidirectionnelle (on déduit une ligne de la précédente). Il existe plusieurs types de compressions ("groupes") suivant l'algorithme utilisé et le nombre de couleurs du document (monochrome, niveau de gris, couleur).

Deux compressions existent, celle du Groupe 3 (recommandation ITU T.4) et celle du Groupe 4 (recommandation ITU T.6), utilisées pour les fax :

- Le Groupe 3 utilise comme indiqué une compression RLE, mais les symboles représentant les longueurs sont définis par le CCITT en fonction de leur fréquence probable et ceci pour diminuer la taille des messages à transmettre par les fax.
- La compression du Groupe 4, elle, représente une ligne par les différences avec la ligne précédente. Ainsi un carré noir sur une page blanche n'aura que la première ligne du carré à transmettre, les suivantes étant simplement la "différence", c'est-à-dire rien. Et la page complète revient à envoyer 3 lignes et un symbole de "répéter la précédente" pour toutes les autres.

Ceci est théorique : en pratique, il faudra transmettre plus de symboles, mais envoyer une page blanche est tout de même beaucoup plus rapide avec le Groupe 4 qu'avec le Groupe 3.

Codage de Huffman

L'idée qui préside au codage de Huffman est voisine de celle utilisée dans le code Morse : coder ce qui est fréquent sur peu de place, et coder en revanche sur des séquences plus longues ce qui revient rarement (entropie). En morse le « e », lettre très fréquente, est codé par un simple point, le plus bref de tous les signes.

L'originalité de David A. Huffman est qu'il fournit un *procédé d'agrégation objectif* permettant de constituer son code dès lors qu'on possède les statistiques d'utilisation de chaque caractère.

Le Macintosh d'Apple codait les textes dans un système inspiré de Huffman : les 15 lettres les plus fréquentes (dans la langue utilisée) étaient codées sur 4 bits, et la 16^e combinaison était un code d'échappement indiquant que la lettre était codée en ASCII sur les 8 bits suivants. Ce système permettait une compression des textes voisine en moyenne de 30 % à une époque où la mémoire était extrêmement chère par rapport aux prix actuels (compter un facteur 1 000).

Le défaut du codage Huffman est qu'il doit connaître la fréquence des caractères utilisés dans un fichier avant de choisir les codes optimaux. Et il doit donc **lire tout le fichier** avant de comprimer. Une autre conséquence est que pour décompresser il faut connaître les codes et donc la table, qui est ajoutée devant le fichier, aussi bien pour transmettre que stocker, ce qui diminue la compression, surtout pour les petits fichiers. Ce problème est éliminé par le **codage Huffman**

adaptatif, qui modifie sa table au fil des choses. Et peut donc démarrer avec une table de base. En principe il commence avec les caractères à même probabilité.

Code Baudot

00	01	02	03	04	05	06	07
NUL	E 3	LF	A -	SP	S '	I 8	U 7
08	09	0A	0B	0C	0D	0E	0F
CR	D ENQ	R 4	J BEL	N ,	F !	C :	K (
10	11	12	13	14	15	16	17
T 5	Z +	L >	W 2	H £	Y 6	P 0	Q 1
18	19	1A	1B	1C	1D	1E	1F
O 9	B ?	G &	FIGS	M .	X /	V ;	LTRS
Letters		Figures			Control Chars.		

Table de caractère du code Baudot

Le code Baudot est un exemple de compression concret, simple et représentatif. Ce code utilise une base de 5 bits pour coder les caractères alors que la table des caractères, étalée sur 6 bits, contient $2^6 = 64$ éléments. Cette dernière est séparée en deux jeux de $2^5 = 32$ éléments et deux caractères *Inversion Lettres* (code 31) et *Inversion Chiffres* (code 27) permettent de commuter entre les deux ensembles. Si les caractères étaient utilisés de manière aléatoire, ce système n'aurait aucun intérêt et entraînerait même un surplus de données avec une moyenne de $(1/2) * 5 + 5 = 7,5$ bits par caractère. Cependant, les lettres sont codées sur le premier jeu de caractère tandis que les chiffres et caractères spéciaux sur le second. Or la nature des caractères utilisés n'est pas aléatoire. En effet, lorsque l'on écrit un texte cohérent, les chiffres sont séparés des lettres et les ponctuations sont rares.

Ainsi, on écrira :

le prix moyen d'une encyclopédie est de 112,45 euros (52 caractères)

```
L E [SP] P R I X [SP] M O Y E N [SP] D [FIGS] ' [LTRS] U N E [SP] E N C Y C
L O P E D I E [SP] E S T [SP] D E [SP] [FIGS] 1 1 2 , 4 5 [SP] [LTRS] E U R
O S
```

($56 * 5 = 280$ bits)

Alors qu'il est peu probable que l'on ait à taper :

le pr1 moyen d'une encyclop3d1 e5t 2 cent12,45 euros (52 caractères)

```
[FIGS] 1 [LTRS] E [SP] P R [FIGS] 1 [SP] [LTRS] M [FIGS] 0 [LTRS] Y E N
[SP] D [FIGS] ' [LTRS] U N E [SP] E N [FIGS] 5 [LTRS] Y C [FIGS] 1 0 [LTRS]
P [FIGS] 3 [LTRS] D [FIGS] 1 [SP] [LTRS] E [FIGS] 5 [LTRS] T [SP] [FIGS] 2
[SP] [LTRS] C E N T [FIGS] 1 2 , 4 5 [SP] [LTRS] E U R [FIGS] 0 [LTRS] S
```

($74 * 5 = 370$ bits)

Sans compression, c'est-à-dire en codant chaque caractère sur 6 bits, ces chaînes de caractères auraient le même poids de $52 * 6 = 312$ bits.

Ici on remarque qu'en utilisant le code Baudot le premier texte a été compressé de manière bénéfique contrairement au second. En effet, alors que la première chaîne était prévisible, la seconde ne l'était clairement pas.

Le code Baudot joue donc sur la probabilité de la répartition des caractères au sein d'un texte intelligible.

Codage arithmétique

Le codage arithmétique est assez similaire au codage de Huffman en ceci qu'il associe aux motifs les plus probables les codes les plus courts (entropie). Contrairement au codage de Huffman qui produit au mieux des codes de 1 bit, le codage arithmétique peut produire des codes vides. Le taux de compression obtenu est par conséquent meilleur.

Codage par dictionnaire

Lempel-Ziv 1977 (LZ77)

La compression LZ77 remplace des motifs récurrents par des références à leur première apparition.

Elle donne de moins bons taux de compression que d'autres algorithmes (PPM, CM), mais a le double avantage d'être rapide et asymétrique (c'est-à-dire que l'algorithme de décompression est différent de celui de compression, ce qui peut être exploité pour avoir un algorithme de compression performant et un algorithme de décompression rapide).

LZ77 est notamment la base d'algorithmes répandus comme Deflate (ZIP, gzip) ou LZMA (7-Zip, xz)

Lempel-Ziv 1978 et Lempel-Ziv-Welch (LZ78 et LZW)

LZW est basée sur la même méthode, mais Welch a constaté que, en créant un dictionnaire initial de tous les symboles possibles, la compression était améliorée puisque le décompresseur peut recréer le dictionnaire initial et ne doit donc pas le transmettre ni envoyer les premiers symboles. Elle a été brevetée par UNISYS et ne pouvait donc être utilisée librement dans tous les pays jusqu'à l'expiration du brevet en 2003. Elle sert dans les modems, mais UNISYS s'est engagé à vendre une licence à tout fabricant avant d'être acceptée comme norme de compression internationale pour les modems.

La compression Lempel-Ziv-Welch est dite de type dictionnaire. Elle est basée sur le fait que des motifs se retrouvent plus souvent que d'autres et qu'on peut donc les remplacer par un index dans un dictionnaire. Le dictionnaire est construit dynamiquement d'après les motifs rencontrés.

Codage par modélisation de contexte

Prédiction par reconnaissance partielle (PPM)

La prédiction par reconnaissance partielle se base sur une modélisation de contexte pour évaluer la probabilité des différents symboles. En connaissant le contenu d'une partie d'une source de données (fichier, flux...), un PPM est capable de deviner la suite, avec plus ou moins de précision. Un PPM peut être utilisé en entrée d'un codage arithmétique par exemple.

La prédiction par reconnaissance partielle donne en général de meilleurs taux de compression que des algorithmes à base de Lempel-Ziv, mais est sensiblement plus lente.

Pondération de contextes (CM)

La pondération de contextes consiste à utiliser plusieurs prédicteurs (par exemple des PPM) pour obtenir l'estimation la plus fiable possible du symbole à venir dans une source de données (fichier, flux...). Elle peut être basiquement réalisée par une moyenne pondérée, mais les meilleurs résultats sont obtenus par des méthodes d'apprentissage automatique comme les réseaux de neurones.

La pondération de contextes est très performante en termes de taux de compression, mais est d'autant plus lente que le nombre de contextes est important.

Actuellement, les meilleurs taux de compression sont obtenus par des algorithmes liant pondération de contextes et codage arithmétique, comme PAQ.

Transformée de Burrows-Wheeler (BWT)

Il s'agit d'un mode de réorganisation des données et non un mode de compression. Il est principalement destiné à faciliter la compression de texte en langue naturelle, mais il est également utilisable pour compresser n'importe quelles données binaires. Cette transformation, qui est complètement réversible, effectue un tri sur toutes les rotations du texte source, ce qui tend à regrouper les caractères identiques ensemble en sortie, ce qui fait qu'une compression simple appliquée aux données produites permet souvent une compression très efficace.

Techniques de compression avec pertes

La compression avec pertes ne s'applique que sur des données perceptuelles (audio, image, vidéo), et s'appuie sur les caractéristiques du système visuel ou du système auditif humain pour ses stratégies de réduction de l'information. Les techniques sont donc spécifiques à chaque média. Ces techniques ne sont pas utilisées seules mais sont combinées pour fournir un système de compression performant.

Sous-échantillonnage

En image et en vidéo, il est fréquent d'effectuer un sous-échantillonnage spatial des composantes de chrominance. Le système visuel humain étant plus sensible aux variations de luminance que de couleur, la suppression d'une partie importante de l'information couleur n'est que peu visible³.

Quantification

La quantification est l'étape la plus importante dans la réduction de l'information. C'est sur la quantification que l'on joue lorsque l'on souhaite atteindre un débit cible, généralement en utilisant un modèle débit-distorsion.

Lors d'un codage par transformation (ondelettes ou DCT par exemple), la quantification s'applique sur les coefficients dans l'espace transformé, en réduisant leur précision.

Taux de compression

Le taux de compression τ est relié au rapport entre la taille b du fichier comprimé B et la taille a du fichier initial A . Le taux de compression est généralement exprimé en pourcentage. Un taux de 50 % signifie que la taille b du fichier comprimé B est la moitié de a . La formule pour calculer ce taux est :

$$\tau = 1 - (b/a)$$

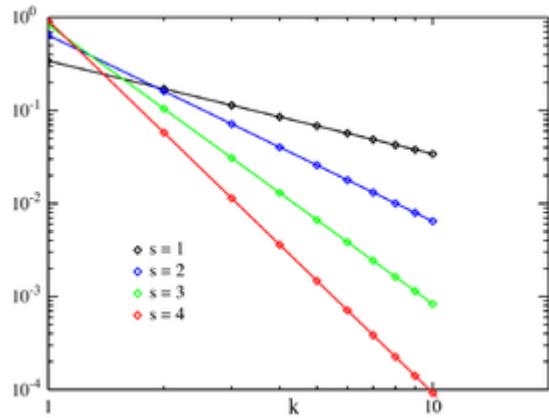
Exemple : $a=550 \text{ Mo}$, $b=250 \text{ Mo}$
 $\tau = 1 - (250/550) = 54\%$

L'algorithme utilisé pour transformer A en B est destiné à obtenir un résultat B de taille inférieure à A . Il peut paradoxalement produire parfois un résultat de taille supérieure : dans le cas des compressions sans pertes, il existe *toujours* des données incompressibles, pour lesquelles le flux compressé est de taille supérieure ou égale au flux d'origine.

Démonstration de l'existence de fichiers non-compressibles avec un algorithme de compression sans pertes

Loi de Zipf

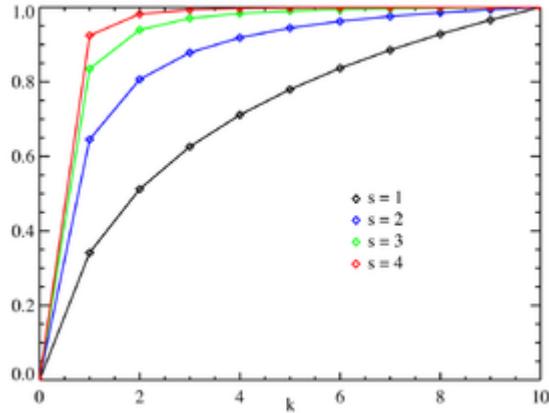
Loi de Zipf



Densité de probabilité (ou fonction de masse)

pour $N = 10$ dans un repère log-log. L'axe horizontal est l'indice k .

(la fonction est discrète, les droites de couleur n'indiquent pas de continuité.)



Fonction de répartition

pour $N = 10$. L'axe horizontal est l'indice k . (la fonction est discrète, les courbes de couleur n'indiquent pas de continuité.)

Paramètres $s > 0$
 $N \in \{1, 2, 3, \dots\}$

Support $k \in \{1, 2, \dots, N\}$

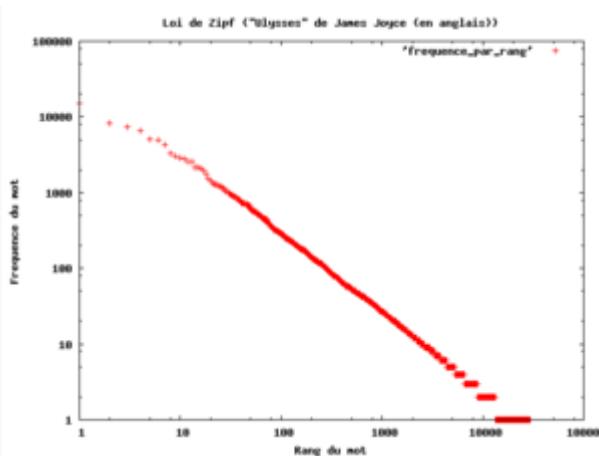
Densité de probabilité (fonction de masse) $\frac{1}{H_{N,s}} \frac{1}{k^s}$

<u>Fonction de répartition</u>	$\frac{H_{k,s}}{H_{N,s}}$
<u>Espérance</u>	$\frac{H_{N,s-1}}{H_{N,s}}$
<u>Mode</u>	1
<u>Entropie</u>	$\frac{s}{H_{N,s}} \sum_{k=1}^N \frac{\ln(k)}{k^s} + \ln(H_{N,s})$
<u>Fonction génératrice des moments</u>	$\frac{1}{H_{N,s}} \sum_{n=1}^N \frac{e^{nt}}{n^s}$
<u>Fonction caractéristique</u>	$\frac{1}{H_{N,s}} \sum_{n=1}^N \frac{e^{int}}{n^s}$

[modifier](#) ⓘ

La **loi de Zipf** est une observation empirique concernant la fréquence des mots dans un texte. Elle a pris le nom de son auteur, George Kingsley Zipf (1902-1950). Cette loi a d'abord été formulée par Jean-Baptiste Estoup¹ et a été par la suite démontrée à partir de formules de Shannon par Benoît Mandelbrot. Elle est parfois utilisée en dehors de ce contexte, par exemple, la taille et le nombre des villes dans chaque pays, lorsque cette loi semble mieux répondre aux chiffres que la distribution de Pareto².

Genèse



Fréquence des mots en fonction du rang dans la version originale d'*Ulysse* de James Joyce.

Zipf avait entrepris d'analyser une œuvre monumentale de James Joyce, *Ulysse*, d'en compter les mots distincts, et de les présenter par ordre décroissant du nombre d'occurrences. La légende dit que :

- le mot le plus courant revenait 8 000 fois ;
- le dixième mot 800 fois ;
- le centième, 80 fois ;
- et le millième, 8 fois.

Ces résultats semblent, à la lumière d'autres études que l'on peut faire en quelques minutes sur son ordinateur, un peu trop précis pour être parfaitement exacts — le dixième mot dans une étude de ce genre devrait apparaître dans les 1 000 fois, en raison d'un effet de coude observé dans ce type de distribution. Reste que la loi de Zipf prévoit que dans un texte donné, la fréquence d'occurrence $f(n)$ d'un mot est liée à son rang n dans l'ordre des fréquences par une loi

$$f(n) = \frac{K}{n}$$

de la forme où K est une constante.

Point de vue théorique

Mathématiquement, il est impossible pour la version classique de la loi de Zipf de tenir exactement s'il existe une infinité de mots dans une langue, puisque pour toute constante de proportionnalité $c > 0$, la somme de toutes les fréquences relatives est proportionnelle à la série harmonique et doit être

$$\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{c}{n} = +\infty \neq 1.$$

Des observations citées par Léon Brillouin dans son livre *Science et théorie de l'information* suggèrent qu'en anglais, les fréquences parmi les 1 000 mots les plus

1

fréquemment utilisés étaient approximativement proportionnels à n^s avec s juste légèrement plus grand que 1. On sait toutefois que le nombre de mots d'une langue est limité. Le vocabulaire (passif) d'un enfant de 10 ans tourne autour de 5 000 mots³, celui d'un adulte moyennement cultivé de 20 000⁴, et les dictionnaires en plusieurs volumes peuvent contenir de 130 000 à 200 000 mots.

Définition mathématique

Notons les paramètres de la loi de Zipf par $N \in \mathbf{N}^*$ pour le nombre d'éléments (de mots), $k \in \mathbf{N}^*$ leur rang, et le paramètre $s > 0$. La fonction de masse de la loi de Zipf est donnée par :

$$f: k \mapsto \frac{1}{H_{N,s}} \frac{1}{k^s},$$

$$H_{N,s} = \sum_{n=1}^N \frac{1}{n^s}$$

où $H_{N,s}$ est le N^{e} nombre harmonique généralisé. Cette loi est bien définie pour tout N entier fini.

La loi de Zipf où le paramètre N est infini (loi zêta), n'est définie que pour $s > 1$. En effet, la somme des valeurs de la fonction de masse est alors égale à la fonction zêta de Riemann :

$$\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{n^s} = \zeta(s) < +\infty \iff s > 1.$$

Un cas particulier d'une loi générale

Benoît Mandelbrot démontra dans les années 1950 qu'une classe de lois dont celle de Zipf est un cas particulier pouvait se déduire de deux considérations liées à la théorie de l'information de Claude Shannon.

Loi statique de Shannon

Selon la loi statique, le coût de *représentation* d'une information augmente comme le logarithme du nombre des informations à considérer.

Il faut par exemple 5 bits pour représenter les entiers de 0 à 31, mais 16 pour les entiers de 0 à 65 535. De même, on peut former 17 576 sigles de 3 lettres, mais 456 976 de 4 lettres, etc.

Loi dynamique de Shannon

La loi dynamique indique comment maximiser l'utilité d'un canal par maximisation de l'entropie en utilisant prioritairement les symboles les moins coûteux. Ainsi en code Morse le e, lettre fréquente, est codé par un simple point (.) tandis que le x, lettre plus rare, se représente par un trait point point trait (-.-). Le codage de Huffman met en application cette loi dynamique.

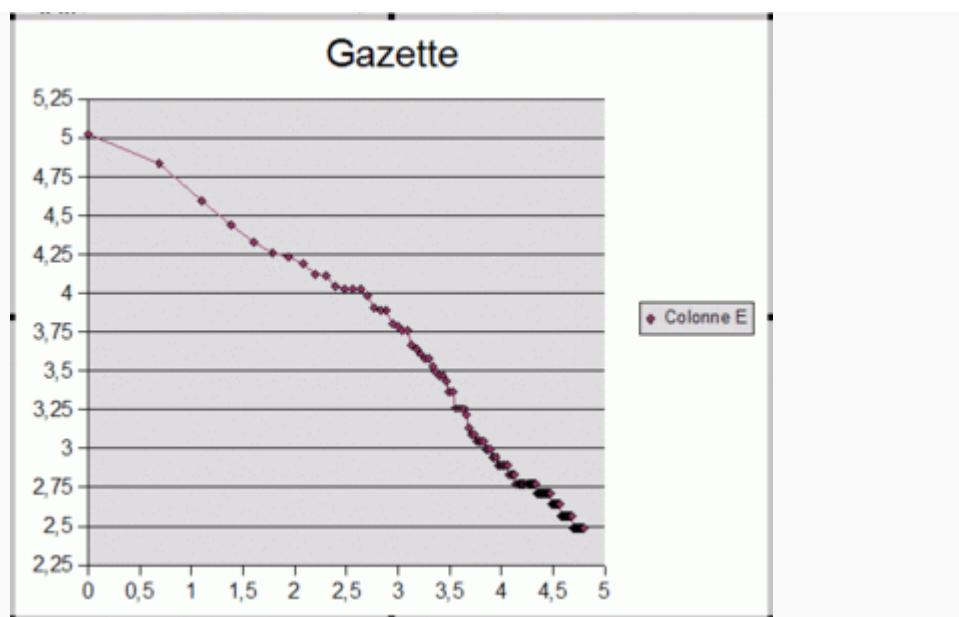
La synthèse de Mandelbrot

Mandelbrot émet l'hypothèse audacieuse que le coût d'utilisation est directement proportionnel au coût de stockage, ce qu'il constate comme étant vrai sur tous les dispositifs qu'il a observés, de l'écriture comptable jusqu'aux ordinateurs⁵.

Il élimine donc le coût entre les deux équations et se retrouve avec une famille d'équations liant nécessairement la fréquence d'un mot à son rang si l'on veut que le canal soit utilisé de façon optimale. C'est la loi de Mandelbrot, dont celle de Zipf ne représente qu'un cas particulier, et qui est donnée par la loi :

$$f(n) \times (a + bn)^c = K \text{ où } K \text{ est une constante.}$$

la loi se ramenant à celle de Zipf dans le cas particulier où a vaudrait 0, b et c tous deux 1, cas qui ne se rencontre pas dans la pratique. Dans la plupart des langues existantes, c est voisin de 1,1 ou 1,2, et proche de 1,6 dans le langage des enfants⁵.



Courbe log-log de la fréquence en fonction du rang dans un forum du Net nommé **Gazette**.

Les lois de Zipf et de Mandelbrot prennent un aspect spectaculaire si on les trace selon un système de coordonnées log-log : la loi de Zipf correspond alors à une belle droite, et celle de Mandelbrot à la même chose avec un coude caractéristique. Ce coude se retrouve précisément dans les textes littéraires disponibles sur la Toile, analysables en quelques minutes sur ordinateur domestique. La courbe fournie ici représente le logarithme décimal du nombre d'occurrences des termes d'un forum sur internet tracé en fonction du logarithme décimal du rang de ces mots.

- On constate que le mot le plus fréquent y apparaît un peu plus de 100 000 fois (10^5).
- La taille du vocabulaire effectivement utilisé (il serait plus exact de parler de la taille de l'ensemble des formes fléchies) est de l'ordre de 60 000 (# $10^{4.7}$).
- L'aspect linéaire de Zipf y apparaît clairement, bien que le coude caractéristique expliqué par Mandelbrot n'y soit que léger. On notera aussi que la pente n'est pas exactement de -1 comme le voudrait la loi de Zipf.
- L'intersection projetée de cette courbe avec l'axe des abscisses fournirait à partir d'un texte de taille limitée (quelques pages A4 dactylographiées) une estimation de l'étendue du vocabulaire d'un scribeur. Précisions :
 - Nous nous livrons déjà subjectivement à la même estimation en lisant quelques pages d'un écrivain que nous ne connaissons pas, et c'est ce qui nous permet en feuilletant un ouvrage d'estimer si l'étendue de son vocabulaire est en adéquation avec la nôtre.
 - La répétition de mots se voulant savants comme *extemporanément* ou *hiératique* ne fera pas illusion, puisque c'est la répétition elle-même qui constitue l'indice de pauvreté du vocabulaire et non les mots utilisés, quels qu'ils soient.

Ces deux derniers points sont signalés par le physicien Léon Brillouin dans son ouvrage *Science et théorie de l'information*.

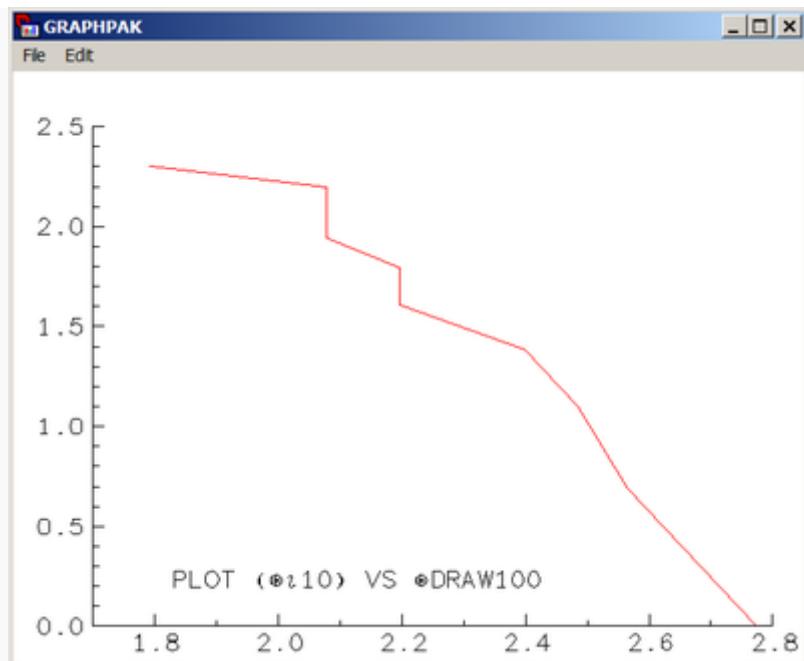
Similitudes

Le rapport entre lois de Zipf et de Mandelbrot d'une part, entre lois de Mariotte et de van der Waals d'autre part est similaire : on a dans les premiers cas une loi de type hyperbolique, dans les seconds une légère correction rendant compte de l'écart entre ce qui était prévu et ce qui est observé, et proposant une justification. Dans les deux cas, un élément de correction est l'introduction d'une constante manifestant quelque chose d'« incompressible » (chez Mandelbrot, le terme « a » de la loi).

On peut aussi noter une ressemblance avec la loi de Benford qui porte sur le premier chiffre de chaque nombre d'un ensemble de données statistiques, et qui se démontre aussi, cette fois-ci par des considérations d'invariance en fonction du système d'unités utilisé.

La distribution des vitesses dans un gaz répond aussi à une exigence d'invariance par rotation des coordonnées. Ce domaine des *lois stables* a été largement étudié par le mathématicien Paul Lévy, que Mandelbrot eut précisément à Polytechnique comme professeur.

Une loi à utiliser avec prudence



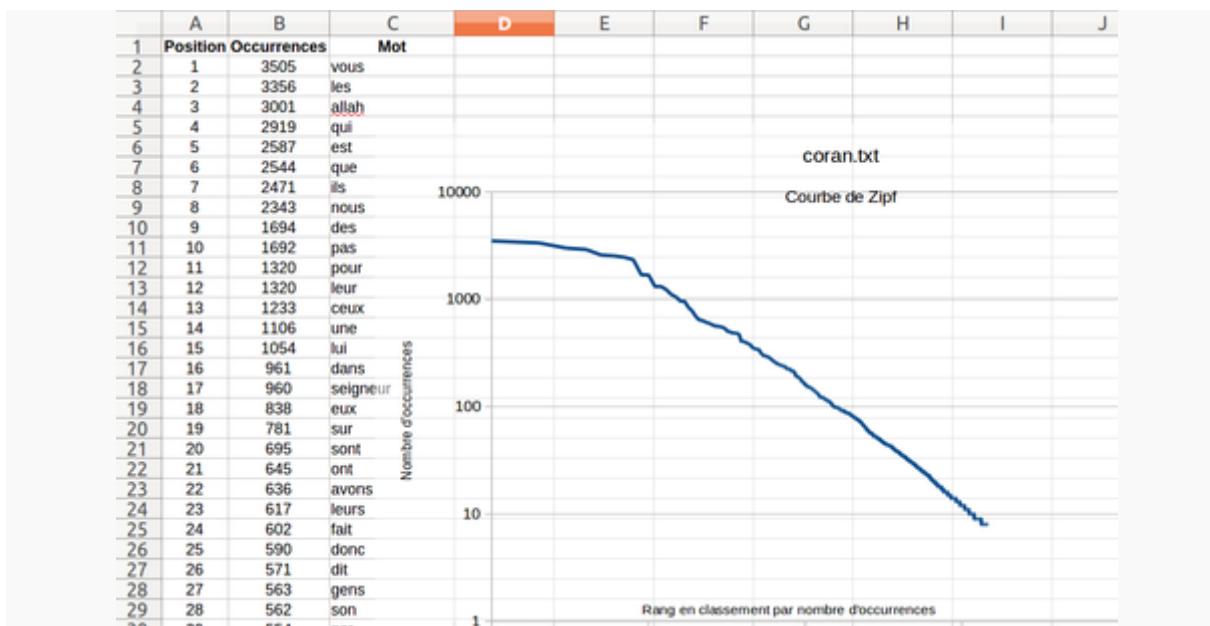
Apparence « zipfienne » d'une loi uniforme

Il est tentant chaque fois que l'on voit des informations classées par ordre décroissant de se dire : « Elles doivent suivre une loi de Zipf ». Sans que ce soit nécessairement faux, il serait dangereux de le considérer comme allant de soi. Si nous prenons par exemple 100 entiers aléatoires entre 1 et 10 selon une loi uniforme discrète, que nous les regroupons et que nous trions le nombre d'occurrences de chacun, nous obtenons la courbe ci-contre.

On admettra que si l'on se fie juste à une première impression visuelle, cette courbe paraît très « zipfienne », alors que c'est un tout autre modèle qui a engendré la série des données. Or il n'est pas possible de faire commodément un Khi sur la loi de Zipf, le tri des valeurs venant faire obstacle à l'usage d'un modèle probabiliste classique (n'oublions pas en effet que la répartition des occurrences n'est pas celle des probabilités d'occurrences, et que cela peut conduire à beaucoup d'inversions dans les tris).

La famille de distributions de Mandelbrot est certes démontrée adéquate de façon formelle pour un langage humain sous ses hypothèses de départ concernant le coût de stockage et le coût d'utilisation, qui découlent elles-mêmes de la théorie de l'information. En revanche il n'est pas prouvé qu'utiliser la loi de Zipf comme modèle pour la distribution des populations des agglomérations d'un pays soit un modèle pertinent — bien que le contraire ne soit pas prouvé non plus.

En tout état de cause, il ne faut pas non plus s'étonner outre mesure qu'une loi prédisant une décroissance se vérifie sur des données que nous avons *nous-mêmes* classées au préalable en ordre décroissant!



Représentation en coordonnées log-log du nombre d'occurrences des mots d'une version française du coran (titres des sourates inclus)

De plus l'estimation des paramètres de Mandelbrot à partir d'une série de données pose également problème et fait encore aujourd'hui l'objet de débats. Il ne saurait être question par exemple d'utiliser une méthode de moindres carrés sur une courbe en log-log⁷ dont de surcroît le poids des points respectifs est loin d'être comparable. Mandelbrot lui-même n'a apparemment plus fait de nouvelle communication sur le sujet après la fin des années 1960.

Sur la distribution d'un texte, comme celui d'une traduction française du Coran (164 869 unités lexicales⁸, 1 477 formes fléchies distinctes), le "coude" de la distribution de Mandelbrot apparaît de façon franche (voir ci-contre), et les pentes de deux segments de droite peuvent être estimées visuellement. Des textes de ce type peuvent ainsi être comparés par les seuls termes a et c des distributions (b s'en déduisant).

Sciences de l'information et de la communication

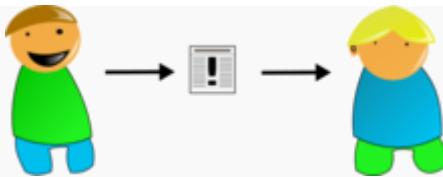


Schéma simpliste de la transmission linéaire de l'information dans la communication (paradigme mécaniste)

Les **sciences de l'information et de la communication** (SIC) forment en France un champ de recherches universitaires créé au cours du XX^e siècle, en écho aux *Media Studies* américaines ou la *Publizistikwissenschaft* allemande. Domaine scientifique pluridisciplinaire, les SIC empruntent largement aux sciences humaines sans ignorer pour autant les sciences de l'ingénieur : la cybernétique, les théories du signal, etc. ; les recherches sur la communication organisationnelle (institution, organisation, entreprise...) ; les sciences de l'information (documentation, bibliologie, bibliothéconomie...) ; les sciences de la communication (études des média, culture, société).

Historique des SIC

Le champ de connaissance a émergé après la seconde guerre, sans que l'histoire des sciences de la communication et de l'information ne se confondent entièrement¹. L'histoire des sciences de l'information s'enracine dans l'évolution des techniques documentaires et le développement de l'informatique.

Le versant communicationnel des SIC s'est constitué par la diffusion d'un discours utopique sur la communication (Norbert Wiener, Harold Innis, Marshall Mac Luhan²) ou critique (Herbert Schiller, Armand Mattelart), ainsi que par l'usage grandissant de techniques de sondage d'opinion (George Gallup, Jean Stoetzel).

En France, dans les années 1970, le projet scientifique concerne également la schématologie, la publicité et l'édition ; à partir des années 1990, il inclut de nombreuses recherches concernant les technologies de l'information et de la communication, l'Internet et les nouveaux médias, les communications organisationnelles.

L'absence de nom collectif rend ardue la visibilité de la discipline : on parle de "communicologie"³ au début des années 1980 ; on tente la "médiologie" au début des années 1990 ; on essaie la "médialogie" depuis peu... Mais, dans les médias, les communicologues sont souvent étiquetés "sociologues", "philosophes", "politologues", voire "historiens", ce qui laisse dans le flou l'existence d'une discipline universitaire⁴.

Institutionnalisation

Les Sciences de l'information et de la communication existent aussi grâce à la création en 1975 d'une "section" (la 71e) au Conseil national des universités. Entre 2008 et 2013, une "Commission interdisciplinaire" (CID 42) intitulée "Sciences de la communication" a fonctionné au sein du CNRS. Dans les deux cas, ces instances revêtent une importance réelle en matière de recrutement et de carrière.

Les SIC existent également au travers de sociétés savantes, telles la SFSIC (Société française des sciences de l'information et de la communication), l'ACC (Association canadienne de communication), l'AIÉRI (Association internationale des études et recherches sur l'information), l'ICA (International communication association), l'ECREA (European Communication Research and Education Association), l'AMIC (Asociación mexicana de Investigadores de la comunicación)... Elles existent également au plan scientifique au travers des groupes d'études et

des recherches labellisés par la SFSIC comme le groupe d'études sur les communications organisationnelles (Org&Co), ou le Groupe Industrialisation de la formation.

Technologies de l'information et de la communication

Soumises à débat, les « Sciences et technologies de l'information et de la communication » (STIC) sont à la fois un domaine d'application de l'informatique, des statistiques, des mathématiques et de la modélisation, et à la fois un champ de recherche des Sciences de l'information et de la communication. Les STIC rejoignent tout autant l'industrie (ex : télécommunications, reconnaissance des formes, reconnaissance vocale), que les autres domaines scientifiques (ex : médecine, astronomie, sciences sociales, et environnement).

Entre 2000 et 2006, un département multidisciplinaire a été désigné ainsi au sein du CNRS. Le projet, après une phase d'euphorie œcuméniques, a fini par regrouper les seuls spécialistes des sciences dures, excluant de fait ceux des sciences humaines et sociales. Peu après, la Direction du CNRS a décidé de ne pas poursuivre plus loin l'expérience. Compte tenu de l'apport de ces méthodologies, et de leur usage de plus en plus systématique pour améliorer la vie de tous les jours et la prise de décision publique, des conférences initiées par le CNRS continuent à être très régulièrement organisées sur ces thèmes par différents acteurs (université, institut de recherche INRA, CEMAGREF, École des mines, INSA, INRIA, etc.) sur les sujets tels que : STIC & Santé, STIC & Transport, STIC & Environnement, STIC & Systèmes aéro-spatiaux, STIC & Production coopérative médiatisée, STIC & Énergie, etc.

Sciences de l'information et des bibliothèques

Les **sciences de l'information et des bibliothèques** (SIB) sont la convergence des deux champs disciplinaires que sont la bibliothéconomie et la science de l'information. Elles regroupent l'ensemble des savoirs et savoir-faire utiles à la gestion de l'information consignée.

La notion de sciences de l'information se retrouve de plus en plus, depuis la fin du XXe siècle, dans les intitulés d'écoles ou de formations pour les professionnels de l'information consignée (personnes chargées de gérer une bibliothèque, un centre d'archives ou un service de documentation par exemple)

But

Les sciences de l'information ont pour but de retrouver l'information pertinente et éviter le chaos documentaire.

Son credo informel : Retrouver la bonne information au bon moment pour la bonne personne.

Elles favorisent le partage des connaissances et la préservation de la mémoire (et son corollaire : le droit à l'oubli).

Histoire

C'est en 1968, aux États-Unis, que l'expression « sciences de l'information » est développée, lorsque l'American Documentation Institute devient l'American Society for Information Science. L'expression apparaît en France dans les années 1970.

En France, l'appellation académique est plutôt « sciences de l'information et de la communication » (SIC), correspondant à celle de la 71^e section du Conseil national des universités (CNU)¹.

Définition

L'expression française « sciences de l'information et des bibliothèques » vient de l'expression anglaise *library and information science (LIS)*.

Il s'agit d'un champ de recherche et d'étude plutôt caractérisé par son objet (l'information, sa nature, ses propriétés, son transfert) que par ses méthodes, comme le sont par exemple le droit ou la philosophie. Des approches très différentes de cet objet sont en effet possibles et pratiquées. À côté de préoccupations théoriques, les sciences de l'information et des bibliothèques s'intéressent aussi aux institutions et aux pratiques de transmission de l'information. Les « sciences de l'information » se saisissent de cette problématique : les bibliothèques, et en particulier celles qui accompagnent les activités d'étude et de recherche, sont l'une des institutions associées à ce transfert.

Dans un sens très général, on peut donc considérer que les sciences de l'information englobent des disciplines telles que :

- la bibliothéconomie (gestion des bibliothèques) ;
- la bibliographie (recherche documentaire) ;
- la bibliologie (connaissance du livre, de l'édition et des différents types de documents) ;
- l'archivistique (gestion des archives).

Cependant, il existe des divergences sur la nature et sur les limites de ce champ scientifique. Par exemple, le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) et le Conservatoire national des arts et métiers (CNAM) incluent l'informatique dans les sciences de l'information. On peut aussi se demander si l'ingénierie linguistique (traduction assistée par ordinateur, « voyellisation » de l'arabe...) a sa place dans les sciences de l'information. Ces difficultés de définition et de délimitation sont caractéristiques d'un domaine du savoir en cours de constitution. De ce fait, une part importante de la production scientifique est centrée sur ces questions. Il semble au moins exister une forte distinction entre les spécialistes de l'information et ceux de la communication. Peut-être ce champ scientifique est-il appelé à se scinder en différents domaines.

Comment définir les sciences de l'information ? Elles ont pour objet l'étude des propriétés générales de l'information (nature, genèse, effets) ; elles se rangent dans le secteur des sciences sociales, principal moyen d'accès à une compréhension du social et du culturel et qui voient collaborer entre elles des disciplines telles que la psychologie, la linguistique, la sociologie, l'informatique, les mathématiques, le droit, l'économie, la philosophie, la politique... Les sciences de l'information répondent à une exigence de savoir et de communication née de la vie sociale. Une information peut revêtir différentes formes (texte, image, son), sur des médias variés (imprimés, films, disques, cédéroms, fichiers électroniques,...). Elle intègre à la fois des processus écrits, des processus oraux et visuels. L'information se transmet entre individus, au sein des sociétés ou des entreprises. Les sciences de l'information recouvrent tous ces cas de figures. Sciences sociales interdisciplinaires désormais, les sciences de l'information ont trouvé leurs lettres de noblesse : formations et diplômes universitaires incluent cette notion dans leurs intitulés.

Enseignement

Les principes et techniques en sciences de l'information s'acquièrent dans des écoles professionnelles, parfois rattachées à des universités (avec obtention de master/maîtrises professionnels).

Issu souvent des « Écoles de bibliothécaires », l'enseignement a peu à peu intégré les méthodes des sciences de l'information et d'autres disciplines comme l'archivistique ou l'informatique. Depuis les années 1970, de plus en plus d'écoles ou de formations ont adjoint la notion de « sciences de l'information à leur nom» ; par exemple, l'École de bibliothéconomie et des sciences de l'information de l'Université de Montréal prend ce nom en 1984.

Sciences de l'information et traitement des masses

De plus en plus, à l'heure de la société de l'information, les professionnels de l'information sont amenés à gérer une masse de données. Ils deviennent des concepteurs et des gestionnaires de systèmes d'information.

L'information devient une ressource à valeur économique pour les organisations. Sa gestion est prise en compte dans une gestion des risques.

Les outils et principes des sciences de l'information sont utilisés pour la gestion stratégique de l'information.

Spécificité française : les sciences de l'information et de la communication (SIC)

En France, les sciences de l'information ont une dénomination officielle, les « sciences de l'information et de la communication » (SIC). À l'étranger, l'information et la communication sont généralement séparées. À l'origine des SIC, on peut rappeler le rôle joué par Robert Escarpit et Jean Meyriat, puis d'autres penseurs tels Roland Barthes ou Greimas qui, peu à peu s'en démarquèrent. Elles se concrétisent par la mise en place de filières et de diplômes spécifiques à la documentation à partir des années 1960-1970 : les diplômes des instituts universitaires de technologie (DUT), la maîtrise des sciences et techniques (MST), puis, plus tard, des diplômes de plus en plus diversifiés. Vient ensuite la création de la Société française des sciences de l'information et de la communication (SFSIC), organe de réflexion sur les fondements théoriques et scientifiques de ces sciences, société aujourd'hui dynamique qui a sa propre revue (La lettre de l'Inforcom), tient des congrès annuels et collabore avec des sociétés européennes équivalentes. De nombreuses thèses en sciences de l'information sont soutenues chaque année dans les universités.

Cependant, la SFSIC n'est pas la seule instance représentative. Il est bon de signaler les nombreux enseignants-chercheurs qui contribuent au développement de ce champ de recherche.

Technologies de l'information et de la communication

Technologies de l'information et de la communication (TIC) (transcription de l'anglais *information and communication technologies, ICT*) est une expression, principalement utilisée dans le monde universitaire, pour désigner le domaine de la *télématique*, c'est-à-dire les techniques de l'informatique, de l'audiovisuel, des multimédias, d'Internet et des télécommunications qui permettent aux utilisateurs de communiquer, d'accéder aux sources d'information, de stocker, de manipuler, de produire et de transmettre l'information sous toutes les formes : texte, musique, son, image, vidéo et interface graphique interactive (IHM). Les textes juridiques et réglementaires utilisent la locution communications électroniques.

Les **nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC)** ouvrent des problématiques résultant de l'intégration de ces techniques au sein des systèmes institutionnels, recouvrant notamment les produits, les pratiques et les procédés potentiellement générés par cette intégration.

Histoire

Après les premiers pas vers une société de l'information qu'ont été l'écriture puis l'imprimerie, de grandes étapes ont été le télégraphe électrique, puis le téléphone et la radiotéléphonie. L'informatique a pris son essor grâce aux circuits imprimés les constructeurs d'informatique décentralisée innovant rapidement. La télévision, le Minitel et l'Internet puis les télécommunications mobiles ont associé l'image au texte et à la parole, "sans fil", l'Internet et la télévision devenant accessibles sur le téléphone portable qui fait aussi office d'appareil photo. Le rapprochement de l'informatique, de l'audiovisuel et des télécommunications, dans la dernière décennie du XX^e siècle a bénéficié de la miniaturisation des composants, permettant de produire des appareils « multifonctions » à des prix accessibles, dès les années 2000. L'augmentation rapide du nombre d'accès à internet à haut débit (par exemple avec l'ADSL ou avec les réseaux de la Télévision par câble) et d'accès à internet à très haut débit (avec les réseaux de lignes

terminales en fibre optique) a favorisé la diffusion de contenus audiovisuels à des prix abordables puisque cela a fait baisser les prix des TIC en deux ans¹.

Avec le développement d'Internet et du WEB 2.0, les usages des TIC se sont développés et la grande majorité des citoyens des pays industrialisés utilise ces outils pour accéder à l'information. Par contre², une fracture numérique géographique s'est développée avec les pays en développement où l'accès à internet à haut débit est hors de la portée de la plupart des ménages. Un grand nombre d'internautes, via des sites, des blogs ou des projets tels que le projet encyclopédique Wikipédia ajoutent de l'information à l'internet.

Le nombre de services disponibles explose, et génère des emplois liés à ces technologies, pour 3,2 % du PIB français vers 2010 et 5,5 attendu en 2015³.

Les emplois de la filière nécessitent de plus en plus de compétences de communication, de marketing et de vente, la technique n'étant qu'un support de la communication et d'organisation. Cela entraîne de nombreuses modifications dans les profils professionnels recherchés par les entreprises selon l'Observatoire International des Métiers Internet, qui analyse les profils et les compétences recherchés par le marché de l'emploi en Europe⁴.

Les usages des TIC ne cessent de s'étendre, surtout dans les pays développés, au risque d'accentuer localement la fracture numérique et sociale ainsi que le fossé entre les générations. De l'agriculture de précision et de la gestion de la forêt (traçabilité des bois pour lutter contre le trafic), au contrôle global de l'environnement planétaire ou de la biodiversité, à la démocratie participative (TIC au service du développement durable) en passant par le commerce, la télémédecine, l'information, la gestion de multiples bases de données, la bourse, la robotique et les usages militaires, sans oublier l'aide aux handicapés (dont aveugles qui utilisent des synthétiseurs vocaux avancés ainsi que des plages braille éphémère), les TIC tendent à prendre une place croissante dans la vie humaine et le fonctionnement des sociétés.

De 2007 à 2010, la proportion de sociétés équipées d'un extranet est passée de 17 % début 2007 à 35 % début 2010⁵.

Certains craignent aussi une perte de liberté individuelle (effet *Big Brother*, intrusion croissante de la publicité ciblée et non-désirée...)⁶. Les prospectivistes s'accordent à penser que les TIC devraient prendre une place croissante et pourraient être à l'origine d'un nouveau paradigme civilisationnel, avec peut-être une évolution des TIC vers les NBIC (Nanotechnologies, biotechnologies, informatique et sciences cognitives).

Concept

Définition

L'expression « technologies de l'information et de la communication » est la transcription d'une locution anglaise utilisée dans divers instances internationales qui correspond à peu près au domaine de la *télématique*. Il fait l'objet de différentes définitions selon le point de vue de la source utilisée ou selon l'époque de la définition en raison du brouillage progressif des frontières des domaines concernés et de l'évolution rapide des techniques avec la convergence numérique.

La définition des TIC reste particulièrement floue : le terme technologie qui signifie « discours sur la technique » est utilisé à la place de « technique », qui serait à la fois plus simple et plus exact. Les technologies de l'information et de la communication sont des outils de support au traitement de l'information et à la communication, le traitement de l'information et la communication de l'information restant l'objectif, et la technologie, le moyen.

Le dictionnaire Larousse définit les technologies de l'information et de la communication comme étant un "ensemble des techniques et des équipements informatiques permettant de communiquer à distance par voie électronique (câble, téléphone, Internet, etc.)"⁷. Mais cette définition se limite à la convergence de l'informatique et des télécommunications en vue de communiquer et ne tient pas compte de l'impact de la convergence numérique dans les multimédias et l'audiovisuel.

Le *Grand dictionnaire terminologique de l'OQLF*⁸ définit les technologies de l'information et de la communication comme étant un « Ensemble des technologies issues de la convergence de l'informatique et des techniques évoluées du multimédia et des télécommunications, qui ont permis l'émergence de moyens de communication plus efficaces, en améliorant le traitement, la mise en mémoire, la diffusion et l'échange de l'information ». Cette définition est beaucoup plus complète que la précédente en tenant compte de la convergence numérique dans son ensemble. Elle reflète davantage le point de vue des institutions internationales qui considèrent les technologies de l'information et de la communication comme étant l'intégration des techniques des télécommunications, de l'informatique, des multimédias et de l'audiovisuel⁹. La diffusion rapide des accès à l'Internet à haut débit a permis une explosion des usages des services audiovisuels qui prennent une importance accrue dans le concept des TIC, non seulement au niveau de la communication, mais aussi au niveau de la gestion des informations et des connaissances et au niveau de leur diffusion. Cette extension du concept des TIC est à l'origine de nombreux débats en raison de l'importance de son impact sur la société.

Selon une convention internationale fixée par l'OCDE, les technologies de l'information et de la communication (TIC) englobent les secteurs économiques suivants¹⁰ :

- secteurs producteurs de TIC (fabrication d'ordinateurs et de matériel informatique, de TV, radios, téléphone...) ;
- secteurs distributeurs de TIC (commerce de gros de matériel informatique...) ;
- secteurs des services de TIC (télécommunications, services informatiques, services audiovisuels...).

Évolution de la terminologie

L'avènement de l'Internet et principalement du Web comme média de masse et le succès des blogs, des réseaux sociaux, des wikis ou des technologies Peer to Peer confèrent aux TIC une dimension sociétale. Gérard Ayache dans *La Grande confusion*, parle d'« hyperinformation » pour souligner l'impact anthropologique des nouvelles technologies. De nombreux internautes, quant à eux, considèrent l'Internet comme une technologie de la relation (TR) : Joël de Rosnay a repris cette expression dans *La révolte du pronétariat : des mass média aux média des masses*. Le Web 2.0 est permis par les TIC. Le concept de technologies de l'information et de la communication est à rapprocher de celui de société de l'information en raison de leur impact sur le fonctionnement de la société.

TIC ou NTIC

Le terme NTIC (nouvelles technologies de l'information et de la communication) a souvent été utilisé dans la littérature francophone au cours des années 1990 et au début des années 2000 pour caractériser certaines technologies dites « nouvelles ». Mais les définitions fournies¹¹ sont généralement floues ou équivalentes à celles des TIC. La qualification de « nouvelles » est ambiguë, car le périmètre des technologies dites nouvelles n'est pas précisé et varie d'une source à l'autre. En raison de l'évolution rapide des technologies et du marché, des innovations déclarées « nouvelles » se retrouvent obsolètes une décennie plus tard. Parfois il s'agit de distinguer les technologies basées sur l'Internet par opposition aux télécommunications traditionnelles. Parfois, il s'agit de distinguer les plateformes du web 2.0 par opposition aux premières technologies de l'Internet qui ont maintenant trois décennies et sont tout à fait obsolètes. Parfois, il s'agit de caractériser les services issus de la convergence des télécommunications et des multimédias utilisant des accès à haut débit car les applications utilisant seulement les accès à bas débit peuvent difficilement être qualifiées de « nouvelles »¹². Parfois, les NTIC incluent aussi la téléphonie mobile, mais les premières technologies mobiles qui ont plus de trois décennies peuvent-elles être qualifiées de « nouvelles » ? Le sigle NTIC est source de confusion car il ne fait l'objet d'aucune définition officielle par les institutions internationales responsables de ce domaine alors que le terme de TIC (ou ICT en anglais) y est défini comme étant l'intégration des technologies des télécommunications, de l'informatique et des multimédias¹³. L'utilisation des moteurs de recherche montre que le sigle *NICT*, traduction de NTIC en anglais, est très rarement utilisé (en dehors de la traduction de documents d'origine

francophone) et qu'il est plutôt fait mention de l'évolution rapide de ce domaine en permanence. Cela montre qu'il n'est pas utile d'établir des catégories rigides pour distinguer ce qui est nouveau de ce qui ne l'est pas.

Appellations connexes

La désignation « communications électroniques », largement utilisée dans les textes juridiques et réglementaires européens, correspond aux TIC à l'exception de certains systèmes de diffusion de télévision et de radio qui ne sont pas soumis aux mêmes droits et obligations réglementaires. Cette distinction n'est pas sans poser des problèmes aux autorités chargées de la réglementation et de la régulation du fait de la convergence des technologies des télécommunications et de l'Internet. Cette convergence permet un usage croissant de la diffusion de la télévision et de la radio par Internet grâce aux technologies à haut débit¹⁶.

L'ARCEP évite l'utilisation du sigle TIC dans ses documents et utilise systématiquement le terme de Communications électroniques qui est défini ainsi: *On entend par communications électroniques les émissions, transmissions ou réceptions de signes, de signaux, d'écrits, d'images ou de sons, par voie électromagnétique¹⁷*. À noter que dans le document cité en référence, les termes de TIC ou Technologies de l'Information et de la Communication ne sont pas mentionnés.

Les sigles anglais correspondant sont *IT*, pour *information technology* et *ICT* pour *information communication technology*, le sigle *NICT*, pour *new information and communication technology* étant beaucoup plus rarement utilisé¹⁸.

Le terme infocommunications (ou info-com) a surtout été utilisé dans les années 1990 dans les pays anglo-saxons et les pays de l'Europe de l'Est pour désigner le concept de convergence entre télécommunications et informatique avec une approche équivalente au terme communications électroniques, mais en considérant particulièrement les questions de traitement de l'information et de manipulation de contenus avec l'utilisation d'Internet^{19,20}.

Dans le système éducatif français, on évoque plutôt les technologies usuelles de l'information et de la communication (TUIC) et les technologies de l'information et de la communication pour l'enseignement (TICE).

Enjeux des TIC et importance économique

Les TIC jouent un rôle majeur dans la compétitivité des entreprises et dans l'efficacité des administrations et des services publics (santé, éducation, sécurité). Les TIC sont devenus également un enjeu crucial pour la production et la diffusion des biens culturels. Selon le rapport « Technologies Clés 2015²¹ », le secteur des technologies de l'information et de la communication (TIC) est devenu un segment majeur de l'économie des principaux pays industrialisés avec une contribution directe de 5,9 % du PIB en Europe (et 7,5 % aux États-Unis). Au-delà du secteur lui-même, les TIC contribuent au développement de tous les autres secteurs économiques, les TIC représentant en effet plus de 50 % de la croissance de la productivité en Europe (source: Commission Européenne), les perspectives de croissances du secteur STIC (Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication) sont par ailleurs considérables avec +8 % de croissance par an pour l'économie d'internet d'ici 2016 comme le rapporte le Boston Consulting Group²².

Convergence des TIC et brouillage des frontières



Un téléphone mobile est aussi un terminal pour surfer sur Internet, consulter des vidéos ou utiliser diverses applications

Le phénomène le plus caractéristique des TIC est le brouillage des frontières entre télécommunications, informatique et audiovisuel/ multimédias. Un rapport des Nations Unies insiste sur l'impact de la convergence des TIC : "La convergence a supprimé nombre de distinctions entre les secteurs des TIC, notamment la radiotélédiffusion, l'informatique et les télécommunications, et a favorisé l'innovation dans des secteurs autres que les TIC, tels que les services financiers. Dès lors, les utilisateurs ont accès à du contenu, à des services et à des applications sur de multiples plates-formes, ce qui accroît la versatilité et la sophistication de l'accès à l'information et de l'utilisation des communications"²³.

La fertilisation croisée des produits issus de domaines autrefois bien séparés et maintenant confondus est à l'origine d'une multitude de services innovants. Les quelques exemples suivants montrent qu'il est de plus en plus difficile d'étudier l'un des domaines des TIC sans tenir compte des autres.

Exemple 1 : Les opérateurs de télécommunications ne sont plus seulement des exploitants de réseaux de télécommunications, ils deviennent des fournisseurs de services Internet en s'appuyant sur les accès aux abonnés qu'ils détiennent et la téléphonie n'est plus qu'un segment de service parmi bien d'autres^{24 25}. Par exemple France Telecom est devenue également un distributeur de chaînes de télévision et de musique.

Exemple 2 : les réseaux des TIC. Dans les années 1980 et 90, les réseaux étaient spécialisés par domaine et il fallait différents systèmes de transmission (et parfois différentes infrastructures) pour la téléphonie, la transmission de données entre ordinateurs, la radio et la télévision. Maintenant les réseaux en technologie IP à haut débit sont communs pour toutes les formes de service et les octets de la téléphonie sont acheminés par les mêmes routeurs sur les mêmes artères que les octets des consultations des sites Internet, des transferts de fichiers, du streaming de vidéos ou du courrier électronique^{26 27}.



Exemple d'utilisation d'Internet avec l'affichage du même contenu sur différents terminaux avec des écrans très différents

Exemple 3 : les ordinateurs personnels Dans les années 1980, un ordinateur servait essentiellement au traitement de texte et au calcul avec un tableur. Puis dans les années 1990 il a servi aussi au courrier électronique et aux présentations par diapositives. Un ordinateur était donc clairement un équipement informatique. Mais avec la convergence numérique, un ordinateur personnel devient un outil de base pour le domaine de l'audiovisuel et des multimédias, car il est aussi de façon routinière :

- un terminal téléphonique avec le service de la Voix sur IP ;
- un terminal de vidéocommunication (Skype, Messenger) ;
- un écran de télévision pour recevoir des émissions en ligne ou en mode de rattrapage ;
- un écran pour regarder les photos ou les vidéos des plateformes de services générés par l'utilisateur (Instagram, Flickr, Youtube, etc.) ;
- un outil pour monter des films à partir d'un ensemble de vidéos prises avec son caméscope ou son smartphone ;
- un outil professionnel dans les entreprises pour les applications de travail collaboratif et de communications intégrées où l'audiovisuel joue un rôle croissant.

Exemple 4 : les terminaux téléphoniques mobiles Au début des années 2000, un terminal téléphonique servait essentiellement aux communications téléphoniques et la facture était composée d'un abonnement et d'un montant proportionnel aux durées des communications par catégorie en fonction de la distance. La convergence numérique est particulièrement illustrée par les nouveaux terminaux téléphoniques appelés smartphones. Ils contiennent plus de capacité en mémoire et de puissance de calcul que les ordinateurs personnels des années 1980 et même 90. Ils permettent de prendre des photos et des vidéos avec des performances équivalentes à de bons appareils de photos ou caméscopes des années 1990. Ils sont utilisés comme des baladeurs pour écouter de la musique enregistrée ou voir des images ou des vidéos enregistrées.

Exemple 5 : les industriels producteurs de biens électroniques Un fabricant d'ordinateur (Apple) devient l'un des plus grands fabricants de terminaux téléphoniques et devient un intermédiaire de premier plan dans la vente de produits et services audiovisuels avec le logiciel multimédia iTunes. Apple développe aussi sa propre suite bureautique iWork, en concurrence directe avec Microsoft Office.

Techniques de l'information et de la communication

Les technologies de l'information et de la communication regroupent un ensemble de ressources techniques nécessaires à la mise en œuvre des services de l'information et de la communication pour produire, manipuler, convertir, stocker, gérer, transmettre et retrouver l'information et pour communiquer.

On peut regrouper ces techniques par catégories suivantes :

- la microélectronique et les composants ;
- l'équipement informatique, serveurs, matériel informatique, les ordinateurs et les logiciels ;
- les réseaux informatiques ;
- les réseaux, les infrastructures et les systèmes de télécommunications ;
- les terminaux de télécommunication (fixes ou mobiles) ;
- les réseaux de diffusion de la radiodiffusion et de la télévision (par voie hertzienne, par satellite, par réseau câblé) ;
- les postes récepteurs de radio et de télévision.

Services de l'information et de la communication

Les services de l'information et de la communication sont regroupés en différentes catégories dont les plus connues sont :

- les services de téléphonie vocale ;
- les services de transmission de données informatiques ;
- les services informatiques ;
- les services de communication par Internet (Voix sur IP) ;
- les services de multimédia et d'audiovisuel ;
- les services de commerce électronique.

Théorème de Cox-Jaynes

Le **théorème de Cox-Jaynes** (1946) codifie et quantifie la démarche d'apprentissage en se fondant sur cinq postulats (*desiderata*) simples. Cette codification coïncide en fait avec celle de probabilité, historiquement d'origine toute différente. Le théorème doit son nom au physicien Richard Threlkeld Cox ([en](#)) qui en a formulé la version originale.

Cox formalise la notion intuitive de plausibilité sous une forme numérique. Il démontre que, si les plausibilités satisfont à un ensemble d'hypothèses, la seule façon cohérente de les manipuler est d'utiliser un système isomorphe à la théorie des probabilités.

Ce système induit donc une interprétation « logique » des probabilités indépendante de celle de fréquence. Elle fournit également une base rationnelle au mécanisme d'induction logique, et donc de l'apprentissage par des machines. Qui plus est, le théorème, sous les conditions imposées par les postulats, implique que toute autre forme de prise en compte des informations dans le cadre de cette représentation particulière de la connaissance serait en fait biaisée. Il s'agit donc d'un résultat extrêmement fort.

Les résultats de Cox n'avaient touché qu'une audience restreinte avant qu'Edwin Thompson Jaynes ne redécouvrît ce théorème et n'en défrichât une série d'implications pour les méthodes bayésiennes, un peu comme Clausius redécouvrit Carnot. Irving John Good en explora les conséquences dans le domaine de l'intelligence artificielle².

Stanislas Dehaene utilise le théorème, sa construction et ses applications dans le cadre de l'étude des propres processus cognitifs³, suivant en cela une idée déjà énoncée en 1988 par Jaynes⁴.

Problèmes de validité de la démarche inductive avant Cox[

Réserves de Bertrand Russell

Dans son essai « La science est-elle superstitieuse ? », Bertrand Russell évoque le « scandale de l'induction » :

- Au nom de quoi affirmer, même de façon provisoire, que ce qui a été vérifié dans un nombre limité de cas se vérifiera aussi dans les cas qui n'ont pas été testés ?
- Au nom de quoi supposer, même sur ce qui a été mesuré, que ce qui a été vrai hier le sera toujours demain ?

Paradoxe de Hempel[

Ce paradoxe visait à montrer une faille dans le mécanisme d'induction, qui imposait que le domaine de validité de celui-ci fût précisé de façon plus rigoureuse : le *contexte* de ce dont on parle doit être toujours mentionné. Ainsi le comptage des oiseaux à la fois non-blancs et non-corbeaux dans une chambre ne renseigne pas sur la probabilité que tous les corbeaux soient blancs, mais que tous les corbeaux soient blancs *dans cette chambre* — affirmation parfaitement exacte quand il n'y a aucun corbeau dans la chambre, en vertu de la relation (qui définit l'implication logique, dans une logique purement déductive) :

$$(p \Rightarrow q) \Leftrightarrow ((p \wedge q) \vee \neg p)$$

Les « desiderata » (axiomes)

Cox cherche à poser les *desiderata* souhaitables pour un robot qui raisonnerait selon une *logique inductive* :

1. Les degrés de plausibilité sont représentés par des nombres réels

- Il faut bien, en effet, pouvoir à tout moment dire de deux plausibilités *laquelle est plus grande que l'autre*, ce qui suggère une représentation quantitative, et la forme numérique semble commode.

- Une représentation sous forme de nombres entiers poserait un problème de bruit discret, aucune plausibilité ne pouvant se glisser entre deux représentées par des entiers successifs.
- Des rationnels conviendraient. *A fortiori*, les nombres réels conviennent.

La convention adoptée, arbitrairement, est que *des plausibilités plus grandes seront représentées par des nombres plus grands*.

2. Les règles d'inférence ne doivent pas contredire les règles d'inférence communes

En d'autres termes, ce qui nous paraît évident ne doit pas être contredit par le modèle (à la différence de ce qui se passe avec le paradoxe de Condorcet en théorie du vote).

Exemple de règle :

- si A est préférable à B,
- et B est préférable à C,
- alors toutes choses égales par ailleurs et en l'absence de B, A est préférable à C.

(Cette règle simple n'est pourtant pas toujours facile à appliquer dans le cas de préférences collectives. Voir Paradoxe de Condorcet et Théorème d'impossibilité d'Arrow).

3. Règle de cohérence

Si une conclusion peut être obtenue par plus d'un moyen, alors tous ces moyens doivent bien donner le même résultat.

Cette règle élimine du champ d'examen les "heuristiques multiples" dès lors qu'elles pourraient contenir entre elles des contradictions (comme le font par exemple parfois les critères de Savage et de Wald, se réclamant tous deux du minimax de la théorie des jeux).

4. Règle d'honnêteté

Le robot doit toujours prendre en compte la totalité de l'information qui lui est fournie. Il ne doit pas en ignorer délibérément une partie et fonder ses conclusions sur le reste. En d'autres termes, le robot doit être totalement *non idéologique, neutre de point de vue*.

5. Règle de reproductibilité

Le robot représente des états de connaissance équivalents par des plausibilités équivalentes. Si deux problèmes sont identiques à un simple étiquetage de propositions près, le robot doit affecter les mêmes plausibilités aux deux cas.

Deux propositions doivent donc être considérées *a priori* comme de plausibilité équivalente quand elles ne se distinguent que par leur nom, ce qui n'arrive guère que dans des cas très particuliers, comme pour des pièces ou des dés non pipés.

Les règles quantitatives (lois de composition interne)

La règle de somme

Sans rentrer dans les équations, l'idée est que lorsque deux plausibilités du même état se composent, la plausibilité composée est nécessairement égale ou supérieure à la plus grande des deux.

La règle de produit

Il s'agit ici du cas inverse : quand deux plausibilités doivent toutes deux être vérifiées pour qu'un état puisse exister, cet état ne peut avoir de plausibilité plus grande que la plus petite des deux précédentes.

La notation d'I.J Good (*weight of evidence*)

Good a proposé une notation permettant de manipuler plus aisément les plausibilités. Alan Turing avait fait remarquer en son temps que l'expression des probabilités était beaucoup plus facile à manier en remplaçant une probabilité p variant de 0 à 1 par l'expression $\ln(p/(1-p))$ permettant une meilleure discrimination des très petites valeurs (très proches de 0) comme des très grandes (très proches de 1). En particulier, sous cette forme, un apport d'information par la règle de Bayes se traduit par l'ajout d'une quantité algébrique unique à cette expression (que Turing nommait *log-odd*), cela quelle que soit la probabilité *a priori* de départ avant l'observation¹. La notation de Good utilise, conformément à cette idée, une échelle logarithmique.

Échelle en décibans ou décibels (dB)

Irving John Good utilisa une variante de cette idée pour faciliter le travail avec ces nouvelles quantités. À la différence de Turing :

- il utilisa un logarithme décimal plutôt que naturel, afin que l'ordre de grandeur de la probabilité associée apparaisse à simple lecture et
- adopta un facteur 10 afin d'éviter la complication de manier des quantités décimales, là où une précision de 25 % suffisait.

Il nomma la mesure correspondante, $W = 10 \log_{10} (p/(1-p))$, *weight of evidence* parce qu'elle permettait de « peser » le témoignage des faits en fonction des attentes - manifestées par des probabilités « subjectives » antérieures à l'observation - *de façon indépendante de ces attentes*¹.

Dehaene préfère pour éviter toute connotation parasite parler plutôt de décibans que de décibels⁶.

En bits

Les évidences sont parfois exprimées aussi en bits, en particulier dans les tests de validité de lois scalantes.

En effet, quand une loi comme la loi de Zipf ou de Mandelbrot s'ajuste mieux aux données qu'une autre loi ne nécessitant pas de tri préalable, il faut tenir compte du fait que trier une séquence de n termes sélectionne **une** permutation parmi $n!$ possibles. Le tri représente un apport d'information (ou *d'ordre*) de l'ordre de $n \log_2 n$. Cet apport d'information pourrait être seul responsable du meilleur ajustement. On peut s'attendre à voir une répartition décroissante rendre mieux compte de ce qu'on vient de trier soi-même en ordre décroissant.

Si le gain d'évidence apporté par le tri représente moins de bits que celui qu'a coûté le tri, l'information apportée par la considération d'une loi scalante est nulle. L'ordre apporté est simplement celui que nous venons de mettre : le modèle ne doit donc pas dans ce cas être conservé. Dans d'autres, sa validité ressort nettement : voir Loi de Zipf-Mandelbrot.

Conséquences du théorème

Unification de l'algèbre de Boole et de la théorie des probabilités

On remarque que l'algèbre de Boole est isomorphe à la théorie des probabilités réduite aux seules valeurs 0 et 1.

- Et logique = produit de probabilités
- Ou logique = somme moins produit de deux probabilités ($p+p'-p.p'$)
- Non logique = complément d'une probabilité ($p \rightarrow 1-p$)

Cette considération conduit à l'invention dans les années 1970 des calculateurs stochastiques promus par la société Alsthom (qui s'écrivait avec un *h* à l'époque) et qui entendaient combiner le faible coût des circuits de commutation avec la puissance de traitement des calculateurs analogiques. Quelques-uns furent réalisés à l'époque.

Abandon du paradigme « fréquentiste »

Myron Tribus propose de considérer la probabilité comme la simple *traduction numérique d'un état de connaissance* et non comme le *passage à la limite de la notion de fréquence*. À l'appui, il prend l'image classique du dé dont la probabilité de sortie de chaque face est considérée au départ de $1/6^{\text{e}}$ même si le dé est en glace, donc ne peut être lancé plus d'un petit nombre de fois, ce qui interdit tout passage à la limite.

Il imagine alors l'objection d'un interlocuteur : "Si je me représente mentalement mille dés, je peux bel et bien envisager un passage à la limite", à laquelle il répond : "Tout à fait. Et donc si vous vous les *représentez simplement mentalement*, c'est qu'il s'agit bien d'un état de connaissance."

Les divergences entre approches fréquentistes et bayésiennes ont suscité beaucoup de passions dans les années 1970, où elles prenaient alors presque l'aspect d'une "guerre de religion". Leur coexistence "pacifique" est aujourd'hui admise, chacune ayant son domaine d'efficacité maximale et les deux approches convergeant de toute façon lorsqu'on passe aux grands nombres d'observations⁷ (il n'y a pas de conflit pour les petits nombres, les méthodes fréquentistes (statistiques) ne concernant pas ce domaine d'application).

Bases rationnelles de l'apprentissage machine

Edwin Thompson Jaynes, dans sa reprise et son approfondissement du théorème de Cox, utilise celui-ci pour montrer que tout apprentissage y compris automatique devra nécessairement soit utiliser l'inférence bayésienne (à un homomorphisme près si on le désire, comme un passage par une transformation logarithme simplifiant les calculs pratiques), soit donner quelque part des résultats incohérents et être, en conséquence, inadapté. Ce résultat extrêmement fort, nécessite l'acceptation de cinq *desiderata* simples, dont celui de la *continuité de méthode* (ne pas changer brusquement d'algorithme simplement parce qu'une donnée est modifiée de façon infinitésimale).

Rapport avec la "logique floue"

Les approches sont différentes : la logique dite floue est d'origine pragmatique (un exemple de "logique floue" est le classement d'élèves à un examen général par emploi de coefficients arbitraires pour chaque matière) et sans véritables théorèmes : il s'agit d'une simple *technique*. L'apprentissage bayésien relève d'une théorie solide fondée sur un édifice mathématique et des notions quantitatives, comme la maximisation d'entropie (MAXENT). Il est vrai que les deux approches ont fini par converger (détection automatique des scènes pour les appareils photo numériques, reconnaissance de voix et de caractères), mais uniquement parce que les approches bayésiennes ont largement phagocyté le reste.

Limitations importantes du théorème

Un paradoxe apparent

Chaque discipline possède ses mesures favorites : si la thermique s'occupe principalement de températures, la thermodynamique sera plus attachée à des mesures de quantité de chaleur, voire d'entropie. L'électrostatique s'intéresse plus aux tensions qu'aux intensités, tandis que c'est l'inverse pour les courants faibles, et qu'en électrotechnique c'est davantage en termes de puissance qu'on aura tendance à raisonner. Selon sa discipline d'origine, chaque expérimentateur tendra donc à effectuer ses estimations sur les unités auxquelles il est habitué.

Dans le cas d'un montage électrique, un spécialiste d'électrotechnique fera peut-être une estimation de puissance dissipée (R^2) tandis qu'un spécialiste des *courants faibles* préférera estimer l'intensité elle-même (I). Si la convergence à terme des estimations est assurée dans les deux cas, elle ne se fera pas de la même façon, même avec des distributions *a priori identiques*, car l'espérance mathématique d'un carré n'est pas mathématiquement liée au carré d'une espérance. Il s'agit là de la principale pierre d'achoppement des méthodes bayésiennes .

Le rôle du langage (formatage)

Indépendamment des probabilités *a priori* que nous attribuons aux événements, nos estimations sont également en partie « formatées » par le langage et la « déformation professionnelle » qui s'y attachent. Concrètement, cela rappelle qu'il n'existe pas seulement une, mais deux sources d'arbitraire dans les méthodes bayésiennes : celle, de mesure, qui entache les probabilités *a priori* choisies⁹ et celle, de méthode, qui correspond à notre représentation du problème. En revanche, l'arbitraire se limite à ces deux éléments, et les méthodes bayésiennes sont ensuite totalement impersonnelles.

Traitements de l'information

Le **traitement de l'information** est le processus de changement de l'information de toute manière détectable par un observateur. Comme tel, c'est un processus qui décrit toutes les choses qui arrivent (changement) dans l'univers, depuis la chute d'une pierre (un changement de position) jusqu'à l'impression d'un texte à partir d'un système informatique numérique. Dans ce dernier cas, un système de traitement de l'information (ordinateur) change la forme de la présentation de ce fichier texte. Le traitement de l'information peut plus spécifiquement être défini en termes par Claude E. Shannon comme la conversion d'information *latente* en information *manifeste*. L'information latente et manifeste est définie à travers les termes d'*« équivocation »* (incertitude résiduelle, quelle valeur a choisi l'émetteur), la dissipation (incertitude de l'émetteur sur ce que le récepteur a effectivement reçu) et transformation (effort économisé dans le questionnement - équivocation moins dissipation).

En psychologie cognitive, le traitement de l'information est une approche en vue de comprendre la pensée humaine. Elle apparut dans les années 1940 et 1950 aux États-Unis avec l'apparition de la cybernétique. L'essence de l'approche est de considérer la cognition comme étant essentiellement informatique par nature, avec l'*esprit* jouant le rôle de *logiciel* et le cerveau celui

de matériel. L'approche du traitement de l'information en psychologie est étroitement associée au cognitivisme en psychologie et au fonctionnalisme en philosophie, bien que les termes ne soient pas tout à fait synonymes. Le traitement de l'information peut être séquentiel ou parallèle, les deux pouvant être soit centralisés ou décentralisés (distribués).

Le traitement distribué parallèle, dans le milieu des années 1980, fut popularisé sous le nom de connexionisme. Dès le début des années 1950, Friedrich Hayek formula l'idée d'un ordre spontané dans le cerveau trouvant son origine dans des *unités simples de réseaux décentralisés* (neurones). Cependant, il est rarement cité dans la littérature du connexionisme.

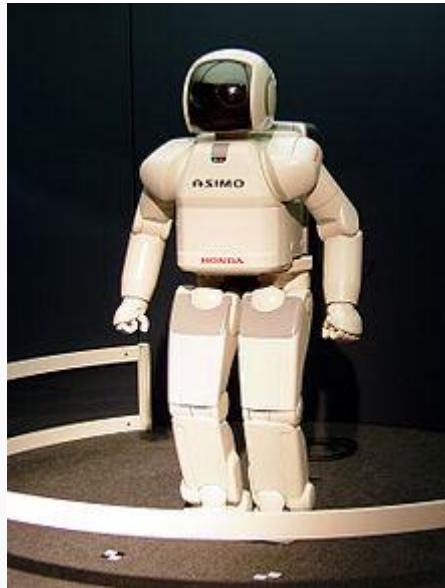
Typologie

Il existe deux grands groupes d'informations : le premier comprend les informations *additionnelles*, comme celles des systèmes mécaniques, représentant la famille des systèmes non-vivants ; le second englobe les informations *non additionnelles*, représentant les systèmes vivants. Cette catégorisation a été notamment traitée par Francisco Varela (1977).

Le premier groupe d'informations déboucha sur la cybernétique ; « le rassemblement de disciplines (mathématiques, électronique, mécanique) permis de créer la cybernétique dont le but était d'expliquer à l'aide des mathématiques, les phénomènes qui mettent en jeu les mécanismes du traitement de l'information »¹.

Quant au second groupe, ayant une architecture par mutation organisationnelle, il n'a pas de système mathématique précis de formalisation, il est plus particulièrement associé à la communication. Le monde de la communication est aussi celui du multimédia, le multimédia étant le monde de ceux qui sont chargés de traiter l'information et de la diffuser².

Intelligence artificielle



Le robot humanoïde ASIMO.



Un humain serrant la main d'un robot Enon ([en](#)) .

L'**intelligence artificielle** est le nom donné à l'intelligence des machines et des logiciels. Elle se veut discipline scientifique recherchant des méthodes de création ou de simulation de l'intelligence.

Définition

Le terme « intelligence artificielle », créé par John McCarthy, est souvent abrégé par le sigle « I.A. » (ou « A.I. » en anglais, pour *Artificial Intelligence*). Il est défini par l'un de ses créateurs, Marvin Lee Minsky, comme « la construction de programmes informatiques qui s'adonnent à des tâches qui sont, pour l'instant, accomplies de façon plus satisfaisante par des êtres humains car elles demandent des processus mentaux de haut niveau tels que : l'apprentissage perceptuel, l'organisation de la mémoire et le raisonnement critique »¹². On y trouve donc le côté « artificiel » atteint par l'usage des ordinateurs ou de processus électroniques élaborés et le côté « intelligence » associé à son but d'imiter le comportement. Cette imitation peut se faire dans le raisonnement, par exemple dans les jeux ou la pratique des mathématiques, dans la compréhension des langues naturelles,

dans la perception : visuelle (interprétation des images et des scènes), auditive (compréhension du langage parlé) ou par d'autres capteurs, dans la commande d'un robot dans un milieu inconnu ou hostile.

Même si elles respectent globalement la définition de Minsky, il existe un certain nombre de définitions différentes de l'IA qui varient sur deux points fondamentaux³ :

- Les définitions qui lient la définition de l'IA à un aspect *humain* de l'intelligence, et celles qui la lient à un modèle idéal d'intelligence, non forcément humaine, nommée *rationalité*.
- Les définitions qui insistent sur le fait que l'IA a pour but d'avoir *toutes les apparences* de l'intelligence (humaine ou rationnelle), et celles qui insistent sur le fait que le *fonctionnement interne* du système d'IA doit ressembler également à celui de l'être humain et être au moins aussi rationnel.

Historique



Deep Blue, premiersupercalculateur à battre un champion du monde d'échecs en titre.

L'origine de l'intelligence artificielle se trouve probablement dans l'article d'Alan Turing « *Computing Machinery and Intelligence* » (Mind, octobre 1950)⁴, où Turing explore le problème et propose une expérience maintenant connue sous le nom de test de Turing dans une tentative de définition d'un standard permettant de qualifier une machine de « « consciente ». Il développe cette idée dans plusieurs forums, dans la conférence « L'intelligence de la machine, une idée hérétique »⁵, dans la conférence qu'il donne à la BBC 3^e programme le 15 mai 1951 « Les calculateurs numériques peuvent-ils penser ? »⁶ ou la discussion avec M.H.A. Newman, Sir Geoffrey Jefferson et R.B. Braithwaite les 14 et 23 janvier 1952 sur le thème « Les ordinateurs peuvent-ils penser? »⁷.

On considère que l'intelligence artificielle, en tant que domaine de recherche, a été créée à la conférence qui s'est tenue sur le campus de Dartmouth College pendant l'été 1956⁸ à laquelle assistaient ceux qui vont marquer la discipline. Ensuite l'intelligence artificielle se développe surtout aux États-Unis à l'université Stanford sous l'impulsion de John McCarthy, au MIT sous celle de Marvin Minsky, à l'université Carnegie-Mellon sous celle de Allen Newell et Herbert Simon et à l'université d'Édimbourg sous celle de Donald Michie. En France, l'un des pionniers est Jacques Pitrat.

Test de Turing

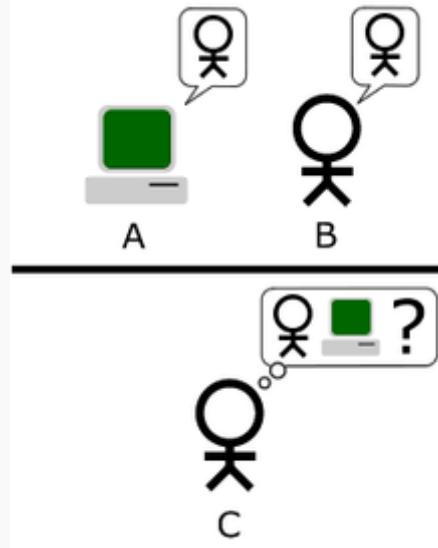


Schéma du test de Turing.

A l'orée des années 1950, entre la naissance de la cybernétique et l'émergence quelques années plus tard de l'intelligence artificielle (I.A), alors que les meilleurs esprits du temps s'interrogent sur la possibilité de construire des machines pensantes, Alan Turing propose, dès le début d'un article demeuré célèbre, un test pour déterminer si une machine peut être définie par « consciente »⁹.

Définir l'intelligence est difficile et il n'est pas certain qu'on puisse y arriver un jour d'une façon satisfaisante. C'est cette remarque qui poussa le mathématicien britannique Alan Turing, il y a soixante ans, à proposer "le jeu de l'imitation" qui fixait un objectif précis à la science naissante des ordinateurs que l'on appelait pas encore informatique. Ce "jeu de l'imitation" suggérait qu'un juge puisse dialoguer avec une machine et un humain à l'aide d'un terminal sans pouvoir les différencier l'un de l'autre¹⁰.

Jusqu'à ce jour, personne n'a encore pu réaliser ce test, malgré la tentative de nombreux programmes, et devant la pertinence de ses échecs certains informaticiens pensent que réaliser un programme aussi complexe ne permettrait pas de démontrer l'intelligence du programme et sa capacité à penser.

De nos jours, une machine peut certes réviser, faire évoluer des objectifs qu'on lui a attribués. Une machine peut même être programmée pour pouvoir réécrire, restructurer sa connaissance initiale à partir d'informations reçues/perçues. Mais la machine d'aujourd'hui ne pense pas : elle n'a pas conscience d'elle-même (et en particulier de ses limites), elle ne peut pas ultimement décider de ses buts ni sans doute imaginer de nouvelles formes de représentations du monde¹¹.

Intelligence artificielle forte

Définition

Le concept d'intelligence artificielle forte fait référence à une machine capable non seulement de produire un comportement intelligent, mais d'éprouver une impression d'une réelle conscience de soi, de « vrais sentiments » (quoi qu'on puisse mettre derrière ces mots), et « une compréhension de ses propres raisonnements »¹¹.

L'intelligence artificielle forte a servi de moteur à la discipline, mais a également suscité de nombreux débats. En se fondant sur l'hypothèse, que tendent à confirmer les neurosciences et que des chercheurs n'hésitent pas à affirmer¹², que la conscience a un support biologique et donc matériel, les scientifiques ne voient généralement pas d'obstacle de principe à créer un jour une intelligence consciente sur un support matériel autre que biologique. Selon les tenants de l'IA forte, si à l'heure actuelle il n'y a pas d'ordinateurs ou de robots aussi intelligents que l'être humain, ce n'est pas un problème d'outil mais de conception. Il n'y aurait aucune limite fonctionnelle (un ordinateur est une machine de Turing universelle avec pour seules limites les limites de la calculabilité), il n'y aurait que des limites liées à l'aptitude humaine à concevoir les logiciels appropriés (programme, base de données...). Elle permet notamment de modéliser des idées abstraites.

Estimation de faisabilité

Comparer la capacité de traitement de l'information d'un cerveau humain à celle d'un ordinateur peut aider à comprendre les ordres de grandeur pour estimer la possibilité pratique ou non d'une IA forte, de même qu'un

simple calcul de puissance en kW permet grossièrement de dire qu'un camion donné pourra espérer transporter commodément telle ou telle charge ou si cela sera impossible. Voici quelques exemples d'ordres de grandeur en traitement de l'information :

- balance de Roberval : 1 bit par seconde (comparaison de deux poids)
- mainframe typique des années 1970 : 1 million d'opérations par seconde sur 32 bits
- Intel Paragon XP/S, 4000 processeurs i860 @ 50 MHz (1992) : 160 **milliards** d'opérations par seconde

Cette puissance n'est pas à prendre au pied de la lettre. Elle précise surtout les ordres de grandeur en présence et leur évolution relativement rapide (2015).

L'intelligence artificielle n'avait donné que des résultats mitigés sur les ordinateurs typiques de 1970 effectuant 10^7 opérations logiques par seconde¹³. Le cerveau humain, formé de 2×10^{12} neurones ne pouvant chacun commuter plus de 100 fois par seconde en raison de leur temps de relaxation permettait beaucoup plus de traitements logiques par unité de temps (2×10^{14} opérations logiques par seconde). Ce handicap technique précis n'existe plus sur les ordinateurs actuels (2015), travaillant en 64 bits et avec des horloges cadencées à 4 GHz environ.

Il s'agit là de processeurs *destinés au particulier*. Concernant des machines comme Blue Gene, le rapport du nombre de comparaisons par seconde entre ordinateur et cerveau ont même changé de sens.

Un article de 2013¹⁴ examine par plusieurs voies quelle pourrait être la capacité mémoire nécessaire et, selon le mode de calcul, obtient des chiffres très différents : 1 To, 100 To, 2 500 To (voir big data), évoquant aussi par jeu 300 Mo, soit 60 MP3 de 3 minutes.

Le matériel serait donc maintenant présent. Du logiciel à la mesure de ce matériel resterait à développer. En effet, l'important n'est pas de raisonner plus vite, en traitant plus de données, ou en mémorisant plus de choses que le cerveau humain¹⁵, l'important est de traiter les informations de manière appropriée.

L'IA souligne la difficulté à *expliciter* toutes les connaissances utiles à la résolution d'un problème complexe. Certaines connaissances dites implicites sont acquises par l'expérience et mal formalisables. Par exemple, qu'est-ce qui distingue un visage familier de deux cents autres ? Nous ne savons pas toujours clairement l'exprimer¹⁶. L'apprentissage de ces connaissances implicites par l'expérience est exploitée depuis les années 1980 (voir Réseau de neurones). Néanmoins, un autre type de complexité apparaît : la complexité structurelle. Comment mettre en relation des modules spécialisés pour traiter un certain type d'informations, par exemple un système de reconnaissance des formes visuelles, un système de reconnaissance de la parole, un système lié à la motivation, à la coordination motrice, au langage, etc. En revanche, une fois un système cognitif conçu et son apprentissage par l'expérience réalisé, l'"intelligence" correspondante peut être distribuée en un grand nombre d'exemplaires, par exemple sur les portables d'actuaires ou de banquiers pouvant ainsi, comme le rappelle un slogan, *dire oui ou non, mais le dire tout de suite grâce à des applications dites de credit scoring*.

Enfin, au-delà de la simple technique, il reste à savoir de quel type serait la relation entre l'homme et la machine intelligente : bonne et peut-être non exempte de *bugs*, comme dans *Le Robots d'Asimov*, ou carrément hostile comme dans *Terminator* sont deux exemples possibles¹⁷.

Diversité des opinions

Les principales opinions soutenues pour répondre à la question d'une intelligence artificielle consciente sont les suivantes :

- **Impossible** : la conscience serait le propre des organismes vivants, et elle serait liée à la nature des systèmes biologiques. Cette position est défendue principalement par des philosophes et des religieux.
 - *Problème* : Elle rappelle toutefois toutes les controverses passées entre vitalistes et matérialistes, l'histoire ayant à plusieurs reprises infirmé les positions des premiers.
- **Impossible** avec des machines manipulant des symboles comme les ordinateurs actuels, **mais possible** avec des systèmes dont l'organisation matérielle serait fondée sur des processus quantiques. Cette position est défendue notamment par Roger Penrose. Des algorithmes quantiques sont théoriquement capables de mener à bien des calculs hors de l'atteinte *pratique* des calculateurs conventionnels (complexité en $N \ln(N)$ au lieu de N^2 , par exemple, sous réserve d'existence du calculateur approprié). Au-delà de la rapidité, le fait que l'on puisse envisager des systèmes quantiques en mesure de calculer des fonctions non-turing-calculables (voir Hypercalcul) ouvre des possibilités qui - selon cet auteur - sont fondamentalement interdites aux machines de Turing.
 - *Problème* : On ne dispose pas encore pour le moment d'algorithmes d'IA à mettre en œuvre dans ce domaine. Tout cela reste donc spéculatif.
- **Impossible** avec des machines manipulant des symboles comme les ordinateurs actuels, **mais possible** avec des systèmes dont l'organisation matérielle mimerait le fonctionnement du cerveau humain, par exemple avec des circuits électroniques spécialisés reproduisant le fonctionnement des neurones.

- *Problème* : Le système en question répondant exactement de la même façon que sa simulation sur ordinateur - toujours possible - au nom de quel principe leur assigner une différence ?¹⁸
- **Impossible** avec les algorithmes classiques manipulant des symboles (logique formelle), car de nombreuses connaissances sont difficiles à expliciter **mais possible** avec un apprentissage par l'expérience de ces connaissances à l'aide d'outils tels que des réseaux de neurones formels, dont l'organisation logique et non matérielle s'inspire des neurones biologiques, et utilisés avec du matériel informatique conventionnel.
 - *Problème* : si du matériel informatique conventionnel est utilisé pour réaliser un réseau de neurones, alors il est possible de réaliser l'IA avec les ordinateurs classiques manipulant des symboles (puisque ce sont les mêmes machines, voir Thèse de Church-Turing). Cette position paraît donc incohérente. Toutefois, ses défenseurs (thèse de l'IA forte) arguent que l'impossibilité en question est liée à notre inaptitude à tout programmer de manière explicite, elle n'a rien à voir avec une impossibilité théorique. Par ailleurs, ce que fait un ordinateur, un système à base d'échanges de bouts de papier dans une salle immense peut le simuler quelques milliards de fois plus lentement. Or il peut rester difficile à admettre que cet échange de bouts de papiers « ait une conscience ». Voir Chambre chinoise. Selon les tenants de l'IA forte, cela ne pose toutefois pas de problème.
- **Impossible** car la pensée n'est pas un phénomène calculable par des processus discrets et finis. Pour passer d'un état de pensée au suivant, il y a une infinité non dénombrable, une continuité d'états transitoires. Cette idée est réfutée par Alain Cardon (Modéliser et concevoir une Machine pensante).
- **Possible** avec des ordinateurs manipulant des symboles. La notion de symbole est toutefois à prendre au sens large. Cette option inclut les travaux sur le raisonnement ou l'apprentissage symbolique basé sur lalogique des prédictats, mais aussi les techniques connexionnistes telles que les réseaux de neurones, qui, à la base, sont définies par des symboles. Cette dernière opinion constitue la position la plus engagée en faveur de l'intelligence artificielle forte.

Des auteurs comme Hofstadter (mais déjà avant lui Arthur C. Clarke ou Alan Turing) (voir le test de Turing) expriment par ailleurs un doute sur la possibilité de faire la différence entre une intelligence artificielle qui éprouverait réellement une conscience, et une autre qui simulerait exactement ce comportement. Après tout, nous ne pouvons même pas être certains que d'autres consciences que la nôtre, y compris chez des humains, éprouvent réellement quoi que ce soit, si ce n'est par une pétition de principe qui spécule que chaque humain se retrouve à l'identique chez tous les autres. On retrouve là le problème connu du solipsisme en philosophie.

Travaux complémentaires

Le mathématicien de la physique Roger Penrose¹⁹ pense que la conscience viendrait de l'exploitation de phénomènes quantiques dans le cerveau (voir microtubules), empêchant la simulation réaliste de plus de quelques dizaines de neurones sur un ordinateur normal, d'où les résultats encore très partiels de l'IA. Il restait jusqu'à présent isolé sur cette question. Un autre chercheur a présenté depuis une thèse de même esprit quoique moins radicale : Andrei Kirilyuk²⁰

Cette spéculaction reste néanmoins marginale par rapport aux travaux des neurosciences. L'action de phénomènes quantiques est évidente dans le cas de la rétine (quelques quanta de lumière seulement suffisent à une perception) ou de l'odorat, mais elle ne constitue pas une condition préalable à un traitement efficace de l'information. En effet, le traitement de l'information effectué par le cerveau est relativement robuste¹ et ne dépend pas de l'état quantique de chaque molécule, ni même de la présence ou de la connexion de neurones isolés.

Cela dit, l'intelligence artificielle est loin de se limiter aux seuls réseaux de neurones, qui ne sont généralement utilisés que comme classifiants. Les techniques de résolution générale de problèmes et la logique des prédictats²¹, entre autres, ont fourni des résultats significatifs et sont exploités par des ingénieurs et chercheurs dans plusieurs domaines (en particulier depuis Mycin ([en](#)) en 1973 pour le diagnostic des maladies du sang).

Intelligence artificielle faible

La notion d'intelligence artificielle faible constitue une approche pragmatique d'ingénieur : chercher à construire des systèmes de plus en plus autonomes (pour réduire le coût de leur supervision), des algorithmes capables de résoudre des problèmes d'une certaine classe, etc. Mais, cette fois, la machine simule l'intelligence, elle semble agir *comme si* elle était intelligente. On en voit des exemples concrets avec les programmes conversationnels qui tentent de passer le test de Turing, comme ELIZA. Ces logiciels parviennent à imiter de façon grossière le comportement d'humains face à d'autres humains lors d'un dialogue.

Joseph Weizenbaum, créateur du programme ELIZA, met en garde le public dans son ouvrage *Computer Power and Human Reason* : si ces programmes « semblent » intelligents, ils ne le sont pas : ELIZA simule très grossièrement un psychologue en relevant immédiatement toute mention du père ou de la mère, en demandant des détails sur tel élément de phrase et en écrivant de temps en temps "Je comprends.", mais son auteur rappelle il s'agit d'une simple mystification : le programme ne *comprend* en réalité rien.

Les tenants de l'IA forte admettent que s'il y a bien dans ce cas simple simulation de comportements intelligents, il est aisément de le découvrir et qu'on ne peut donc généraliser. En effet, si on ne peut différencier expérimentalement

deux comportements intelligents, celui d'une machine et celui d'un humain, comment peut-on prétendre que les deux choses ont des propriétés différentes ? Le terme même de « simulation de l'intelligence » est contesté et devrait, toujours selon eux, être remplacé par « reproduction de l'intelligence ».

Les tenants de l'IA faible arguent que la plupart des techniques actuelles d'intelligence artificielle sont inspirées de leur paradigme. Ce serait par exemple la démarche utilisée par IBM dans son projet nommé Autonomic computing. La controverse persiste néanmoins avec les tenants de l'IA forte qui contestent cette interprétation.

Simple évolution, donc, et non révolution : l'intelligence artificielle s'inscrit à ce compte dans la droite succession de ce qu'ont été la recherche opérationnelle dans les années 1960, la supervision (en anglais : *process control*) dans les années 1970, l'aide à la décision dans les années 1980 et le data mining dans les années 1990. Et, qui plus est, avec une certaine *continuité*.

Il s'agit surtout d'intelligence humaine reconstituée, et de programmation *ad hoc* d'un apprentissage, sans qu'une théorie unificatrice n'existe pour le moment (2011). Le Théorème de Cox-Jaynes indique toutefois, ce qui est un résultat fort, que sous cinq contraintes raisonnables, tout procédé d'apprentissage devra être soit conforme à l'inférence bayésienne, soit incohérent à terme, donc inefficace²².

Estimation de faisabilité

Le sémanticien François Rastier, après avoir rappelé les positions de Turing et de Grice à ce sujet, propose²³ six « préceptes » conditionnant un système de dialogue évolué, en précisant qu'elles sont déjà mises en œuvre par des systèmes existants :

- objectivité (utilisation d'une base de connaissance par le système) ;
- textualité (prise en compte d'interventions de plus d'une phrase, qu'elles émanent du système ou de l'utilisateur) ;
- apprentissage (intégration au moins temporaire d'informations issues des propos de l'utilisateur) ;
- questionnement (demande de précisions de la part du système) ;
- rectification (suggestion de rectifications à la question posée, lorsque nécessaire) ;
- explicitation (explicitation par le système d'une réponse qu'il a apportée précédemment).

Il suggère aussi que le système devrait être en mesure de se faire par lui-même une représentation de l'utilisateur auquel il a affaire, pour s'adapter à lui. De son côté, l'utilisateur a tendance à s'adapter au système à partir du moment où il a bien compris qu'il s'adresse à une machine : il ne conversera pas de la même manière avec un système automatisé qu'avec un interlocuteur humain, ce qui présente pour le concepteur l'avantage pragmatique de simplifier certains aspects du dialogue.

Courants de pensée

La cybernétique naissante des années 1940 revendiquait très clairement son caractère pluridisciplinaire et se nourrissait des contributions les plus diverses : neurophysiologie, psychologie, logique, sciences sociales... Et c'est tout naturellement qu'elle envisagea deux approches des systèmes, deux approches reprises par les sciences cognitives et de ce fait l'intelligence artificielle : une approche par la décomposition (du haut vers le bas) et une approche contraire par construction progressive du bas vers le haut.

Ces deux approches se révèlent plutôt complémentaires que contradictoires : on est à l'aise pour décomposer rapidement ce que l'on connaît bien, et une approche pragmatique à partir des seuls éléments que l'on connaît afin de se familiariser avec les concepts émergents est plus utile pour les domaines inconnus. Elles sont respectivement à la base des hypothèses de travail que constituent le cognitivisme et le connexionnisme, qui tentent aujourd'hui (2005) d'opérer progressivement leur fusion.

Le HOWTO de Linux sur l'intelligence artificielle v3.0²⁴, révisé le 15 décembre 2012, adopte pour la commodité du lecteur la taxinomie suivante :

- Systèmes symboliques ;
- Connexionnisme ;
- Calcul évolutif (algorithmes génétiques, par exemple) ;
- Alife (vie artificielle) et Complexité ;
- Agents et robotique.

Cognitivisme

Le cognitivisme considère que le vivant, tel un ordinateur (bien que par des procédés évidemment très différents), manipule essentiellement des symboles élémentaires. Dans son livre *La société de l'esprit*, Marvin Minsky, s'appuyant sur des observations du psychologue Jean Piaget envisage le processus cognitif comme une

compétition d'agents fournissant des réponses partielles et dont les avis sont arbitrés par d'autres agents. Il cite les exemples suivants de Piaget :

- L'enfant croit d'abord que plus le niveau d'eau est élevé dans un verre, plus il y a d'eau dans ce verre. Après avoir joué avec des transvasements successifs, il intègre le fait que la notion de hauteur du liquide dans le verre entre en compétition avec celle du diamètre du verre, et arbitre de son mieux entre les deux.
- Il vit ensuite une expérience analogue en manipulant de la *pâte à modeler* : la réduction de plusieurs objets temporairement représentés à une même boule de pâte l'incite à dégager un concept de *conservation de la quantité de matière*.

Au bout du compte, ces jeux d'enfants se révèlent essentiels à la *formation de l'esprit*, qui dégagent quelques règles pour arbitrer les différents éléments d'appréciation qu'il rencontre, par essais et erreurs.

Connexionnisme

Le connexionnisme, se référant aux processus auto-organisationnels, envisage la cognition comme le résultat d'une interaction globale des parties élémentaires d'un système. On ne peut nier que le chien dispose d'*une sorte de connaissance* des équations différentielles du mouvement, puisqu'il arrive à attraper un bâton au vol. Et pas davantage qu'un chat ait aussi *une sorte de connaissance* de la loi de chute des corps, puisqu'il se comporte comme s'il savait à partir de quelle hauteur il ne doit plus essayer de sauter directement pour se diriger vers le sol. Cette faculté qui évoque un peu l'intuition des philosophes se caractériserait par la prise en compte et la consolidation d'éléments perceptifs dont aucun pris isolément n'atteint le seuil de la conscience, ou en tout cas n'y déclenche d'interprétation particulière.

Synthèse

Trois concepts reviennent de façon récurrente dans la plupart des travaux :

- la *redondance* (le système est peu sensible à des pannes ponctuelles) ;
- la *réentrance* (les composants s'informent en permanence entre eux ; cette notion diffère de la réentrance en programmation) ;
- la *sélection* (au fil du temps, les comportements efficaces sont dégagés et renforcés).

Différentes facettes

On peut considérer différents dispositifs intervenant, ensemble ou séparément, dans un système d'intelligence artificielle tels que :

- le dialogue automatique : se faire comprendre en lui parlant ;
- la traduction automatique, si possible en temps réel ou très légèrement différé ;
- le traitement automatique du langage naturel ;
- le raisonnement automatique (voir systèmes experts) ;
- l'apprentissage automatique ;
- la composition musicale automatique (voir les travaux de René-Louis Baron et de l'Ircam) ;
- la reconnaissance de formes, des visages et la vision en général, etc. ;
- l'intégration automatique d'informations provenant de sources hétérogènes, (fusion de données) ;
- l'émotion artificielle (voir les travaux de Rosalind Picard sur l'émotion) et l'éventualité d'une subjectivité artificielle ;
- etc.

Les réalisations actuelles de l'intelligence artificielle peuvent intervenir dans les fonctions suivantes :

- l'aide aux diagnostics ;
- l'aide à la décision ;
- la résolution de problèmes complexes, tels que les problèmes d'allocation de ressources ;
- l'assistance par des machines dans les tâches dangereuses, ou demandant une grande précision ;
- l'automatisation de tâches ;
- etc.

Conception de systèmes

Au fil du temps, certains langages de programmation se sont avérés plus commodes que d'autres pour écrire des applications d'intelligence artificielle. Parmi ceux-ci, Lisp et Prolog furent sans doute les plus médiatisés. Lisp constituait une solution ingénieuse pour faire de l'intelligence artificielle en Fortran. ELIZA (le premier agent conversationnel, donc pas de la « véritable » intelligence artificielle) tenait en trois pages de [SNOBOL](#). On utilise aussi, plus pour des raisons de disponibilité et de performance que de commodité, des langages classiques tels que [C](#) ou C++. Lisp a eu pour sa part une série de successeurs plus ou moins inspirés de lui, dont le langage Scheme et les langages typés de la programmation fonctionnelle comme Haskell ou OCaml.

Des programmes de démonstration de théorèmes géométriques simples ont existé dès les années 1960 ; et des logiciels tels que Maple ou Mathematica effectuent aujourd'hui des travaux d'*intégration symbolique* qui, il y a trente ans encore, étaient du ressort d'un étudiant de *mathématiques supérieures*.

Utilisation



Un robot NAO en 2014.

Domaines d'application

L'intelligence artificielle a été utilisée (ou intervient) dans une variété de domaines tels que :

- la banque, avec des systèmes experts d'évaluation de risque lié à l'octroi d'un crédit (*credit-scoring*) ;
- le militaire, avec les systèmes autonomes tels que les drones, lessystèmes de commandement et l'aide à la décision ;
- les jeux ;
- la médecine, avec les systèmes experts d'aide au diagnostic ;
- la logistique, au travers d'approches heuristiques de type résolution de problème de satisfaction de contraintes ;
- la robotique.

Jeux vidéo

L'intelligence artificielle a par exemple été utilisée depuis longtemps dans la conception de joueurs artificiels pour le jeu d'échecs. Toutefois, c'est dans les jeux vidéo que l'intelligence artificielle s'est le plus popularisée, et c'est aussi un des domaines où elle se développe rapidement.

Celle-ci bénéficie en effet des progrès de l'informatique, avec par exemple les cartes graphiques dédiées qui déchargent le processeur principal des tâches graphiques. Le processeur principal peut désormais être utilisé pour développer des systèmes d'IA plus perfectionnés. Par exemple, l'intelligence artificielle peut être utilisée pour 'piloter' des bots (c'est-à-dire les personnages artificiels) évoluant dans les MMOGs ou les mondes virtuels, mais on peut aussi citer son utilisation dans des jeux de simulation, ou pour animer des personnages artificiels.

Dans le domaine du jeu vidéo, l'IA caractérise toute prise de décision d'un personnage (ou d'un groupe) géré par le jeu, et contraint par l'intérêt ludique : une « meilleure » IA ne donne pas forcément un jeu plus jouable²⁵, l'objectif est de donner l'illusion d'un comportement intelligent²⁶. L'éventail de sujets (recherche de chemin, animation procédurale, planifications stratégiques...) sont réalisables par différentes techniques classiques issues de deux paradigmes distincts : IA symbolique (automates, script, systèmes multi-agents...), et IA située (réseau de neurones, algorithmes évolutionnistes...) ; où l'une est fortement dépendante de l'expertise humaine, et l'autre de l'expérience en situation²⁶. La première approche est globalement préférée, car mieux contrôlée; la deuxième est préférée pour certains comportements (déplacement d'une formation, désirs/satisfactions)²⁷. Elles partagent toutes les mêmes contraintes de ressources restreintes, que ce soit en mémoire, en temps de développement, ou en temps de calcul, même si globalement ces ressources augmentent plus les projets sont récents.

Jusqu'à la fin des années 1990, l'IA dans les jeux vidéo (plus particulièrement dans les jeux de stratégie en temps réel) a été délaissée par rapport au rendu visuel et sonore. L'« évolution vers des univers toujours plus réalistes, leur peuplement par des personnages [...] aux comportements crédibles devient une problématique importante »²⁸. Pour éviter ce contraste, et coupler dans le même temps au délestage d'une grosse partie de l'aspect graphique des processeurs vers les cartes graphiques²⁸, on constate à cette période une augmentation des ressources investies dans l'IA (temps de développement, ressource processeur). Certains jeux sont précurseurs (*Creatures, Black and White*) car l'IA y constitue l'élément central ludique¹. Partant d'une approche à base de règles rigides, les jeux utilisent alors des IA plus flexibles, diversifiant les techniques mises en œuvre²⁵. Aujourd'hui la plupart des jeux vidéo utilisent des solutions *ad hoc*, il existe néanmoins des solutions middleware et également des solutions matérielles²⁹ toutefois très minoritaires.

Avec les jeux en réseau, le besoin d'IA a tout d'abord été négligé²⁸, mais, particulièrement avec l'apparition des jeux massivement multijoueur, et la présence d'un nombre très important de joueurs humains se confrontant à des personnages non joueur, ces derniers ont un besoin très important de pouvoir s'adapter à des situations qui ne peuvent être prévues. Actuellement ces types de jeux intéressent particulièrement des chercheurs en IA, y trouvant un environnement adéquat pour y éprouver différentes architectures adaptatives²⁶.

L'« IA scriptée » est une forme d'intelligence artificielle sans apprentissage, du type : « si le joueur a telle position, alors faire prendre tel chemin à deux PNJ », sans que le logiciel sache que cela encercle le joueur, ou ne varie sa stratégie.

Précurseurs

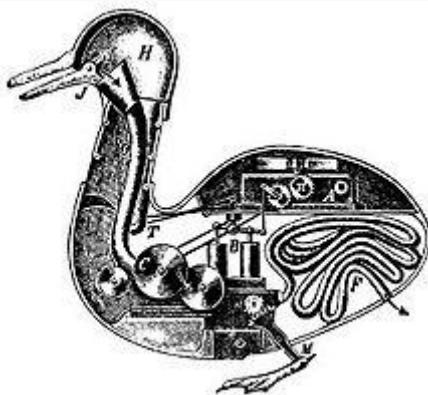
Si les progrès de l'intelligence artificielle sont récents, ce thème de réflexion est tout à fait ancien, et il apparaît régulièrement au cours de l'histoire. Les premiers signes d'intérêt pour une intelligence artificielle et les principaux précurseurs de cette discipline sont les suivants.

Automates

Une des plus anciennes traces du thème de « l'homme dans la machine » date de 800 avant notre ère, en Égypte. La statue du dieu Amon levait le bras pour désigner le nouveau pharaon parmi les prétendants qui défilaient devant lui, puis elle « prononçait » un discours de consécration. Les Égyptiens étaient probablement conscients de la présence d'un prêtre actionnant un mécanisme et déclarant les paroles sacrées derrière la statue, mais cela ne semblait pas être pour eux contradictoire avec l'incarnation de la divinité. Vers la même époque, Homère, dans *L'Iliade* (XVIII, 370–421), décrit les automates réalisés par le dieu forgeron Héphaïstos : des trépieds munis de roues en or, capables de porter des objets jusqu'à l'Olympe et de revenir seuls dans la demeure du dieu ; ou encore, deux servantes forgées en or qui l'assistent dans sa tâche. De même, le Géant de bronze Talos, gardien des rivages de la Crète, était parfois considéré comme une œuvre du dieu.

Vitruve, architecte romain, décrit l'existence entre le III^e et le I^{er} siècle avant notre ère, d'une école d'ingénieurs fondée par Ctesibius à Alexandrie, et concevant des mécanismes destinés à l'amusement tels des corbeaux qui chantaient. Héron L'Ancien décrit dans son traité « Automates », un carrousel animé grâce à la vapeur et considéré comme anticipant les machines à vapeur. Les automates disparaissent ensuite jusqu'à la fin du Moyen Âge. On a prêté à Roger Bacon la conception d'automates doués de la parole; en fait, probablement de mécanismes simulant la prononciation de certains mots simples.

Léonard de Vinci a construit un automate en forme de lion en l'honneur de Louis XII. Gio Battista Aleotti et Salomon de Caus, eux, ont construit des oiseaux artificiels et chantants, des flûtistes mécaniques, des nymphes, des dragons et des satyres animés pour égayer des fêtes aristocratiques, des jardins et des grottes. René Descartes, lui, aurait conçu en 1649 un automate qu'il appelait « ma fille Francine ». Il conduit par ailleurs une réflexion d'un modernisme étonnant sur les différences entre la nature des automates, et celles d'une part des animaux (pas de différence) et d'autre part celle des hommes (pas d'assimilation). Ces analyses en font le précurseur méconnu d'un des principaux thèmes de la science-fiction : l'indistinction entre le vivant et l'artificiel, entre les hommes et les robots, les androïdes ou les intelligences artificielles.



Le canard artificiel de Vaucanson(1738).

Jacques de Vaucanson a construit en 1738 un « canard artificiel de cuivre doré, qui boit, mange, cancane, barbote et digère comme un vrai canard ». Il était possible de programmer les mouvements de cet automate, grâce à des pignons placés sur un cylindre gravé, qui contrôlaient des baguettes traversant les pattes du canard. L'automate a été exposé pendant plusieurs années en France, en Italie et en Angleterre, et la transparence de l'abdomen permettait d'observer le mécanisme interne. Le dispositif permettant de simuler la digestion et d'expulser une sorte de bouillie verte fait l'objet d'une controverse. Certains commentateurs estiment que cette bouillie verte n'était pas fabriquée à partir des aliments ingérés, mais préparée à l'avance. D'autres estiment que cet avis n'est fondé que sur des imitations du canard de Vaucanson. Malheureusement, l'incendie du Musée de Nijni Novgorod en Russie vers 1879 détruisit cet automate.

Les artisans Pierre et Louis Jaquet-Droz fabriquèrent parmi les meilleurs automates fondés sur un système purement mécanique, avant le développement des dispositifs électromécaniques. Certains de ces automates, par un système de cames multiples, étaient capables d'écrire un petit billet (toujours le même). Enfin, Les Contes d'Hoffmann (et ballet) *L'Homme au sable* décrit une poupée mécanique dont s'éprend le héros.

Pensée automatique

Parmi les premiers essais de formalisation de la pensée, les tentatives suivantes peuvent être citées :

- Raymond Lulle, missionnaire, philosophe, et théologien espagnol du XIII^e siècle, a fait la première tentative pour engendrer des idées par un système mécanique. Il combinait aléatoirement des concepts grâce à une sorte de règle à calcul, un zairja, sur laquelle pivotaient des disques concentriques gravés de lettres et de symboles philosophiques. Il baptisa sa méthode Grand Art (*Ars Magna*), fondée sur l'identification de concepts de base, puis leur combinaison mécanique soit entre eux, soit avec des idées connexes. Raymond Lulle appliqua sa méthode à la métaphysique, puis à la morale, à la médecine et à l'astrologie. Mais il n'utilisait que la logique *déductive*, ce qui ne permettait pas à son système d'acquérir un apprentissage, ni davantage de remettre en cause ses principes de départ : seule la logique *inductive* le permet.
- Gottfried Wilhelm Leibniz, au XVII^e siècle, a imaginé un calcul pensant (*calculus rationator*), en assignant un nombre à chaque concept. La manipulation de ces nombres aurait permis de résoudre les questions les plus difficiles, et même d'aboutir à un langage universel. Leibniz a toutefois démontré que l'une des principales difficultés de cette méthode, également rencontrée dans les travaux modernes sur l'intelligence artificielle, est l'interconnexion de tous les concepts, ce qui ne permet pas d'isoler une idée de toutes les autres pour simplifier les problèmes liés à la pensée.
- George Boole a inventé la formulation mathématique des processus fondamentaux du raisonnement, connue sous le nom d'algèbre de Boole. Il était conscient des liens de ses travaux avec les mécanismes de l'intelligence, comme le montre le titre de son principal ouvrage paru en 1854 : « *Les lois de la pensée* » (*The laws of thought*), sur l'algèbre booléenne.
- Gottlob Frege perfectionna le système de Boole en formalisant le concept de prédicat, qui est une entité logique soit vraie, soit fausse (toute maison a un propriétaire), mais contenant des variables non logiques, n'ayant en soi aucun degré de vérité (maison, propriétaire). Cette formalisation eut une grande importance puisqu'elle permit de démontrer des théorèmes généraux, simplement en appliquant des règles typographiques à des ensembles de symboles. La réflexion en langage courant ne portait plus que sur le choix des règles à appliquer. Par ailleurs, l'utilisateur joue un rôle important puisqu'il connaît le sens des symboles qu'il a inventés et ce sens³⁰ n'est pas toujours formalisé, ce qui ramène au problème de la signification en intelligence artificielle, et de la subjectivité des utilisateurs.
- Bertrand Russell et Alfred North Whitehead publièrent au début du XX^e siècle un ouvrage intitulé « *Principia mathematica* », dans lequel ils résolvent des contradictions internes à la théorie de Gottlob Frege. Ces travaux laissaient espérer d'aboutir à une formalisation complète des mathématiques.

- Kurt Gödel démontre au contraire que les mathématiques resteront une construction ouverte, en publiant en 1931 un article intitulé « *Des propositions formellement indécidables contenues dans les Principia mathematica et autres systèmes similaires* ». Sa démonstration est qu'à partir d'une certaine complexité d'un système, on peut y créer plus de propositions logiques qu'on ne peut en démontrer vraies ou fausses. L'arithmétique, par exemple, ne peut trancher par ses axiomes si on doit accepter des nombres dont le carré soit -1. Ce choix reste *arbitraire* et n'est en rien lié aux axiomes de base. Le travail de Gödel suggère qu'on pourra créer ainsi un nombre arbitraire de nouveaux axiomes, compatibles avec les précédents, au fur et à mesure qu'on en aura besoin. Si l'*arithmétique* est démontrée incomplète, le *calcul des prédictats* (logique formelle) est au contraire démontré par Gödel comme *complet*.
- Alan Turing invente des machines abstraites et universelles (rebaptisées les machines de Turing), dont les ordinateurs modernes sont considérés comme des concrétisations. Il démontre l'existence de calculs qu'aucune machine ne peut faire (un humain pas davantage, dans les cas qu'il cite), sans pour autant que cela constitue pour Turing un motif pour douter de la faisabilité de machines pensantes répondant aux critères du test de Turing.
- Irving John Good³¹, Myron Tribus et E.T. Jaynes ont décrit de façon très claire les principes assez simples d'un *robot à logique inductive* utilisant les principes de l'inférence bayésienne pour enrichir sa base de connaissances sur la base du Théorème de Cox-Jaynes. Ils n'ont malheureusement pas traité la question de la façon dont on pourrait stocker ces connaissances sans que le mode de stockage entraîne un *biais cognitif*. Le projet est voisin de celui de Raymond Lulle, mais fondé cette fois-ci sur une logique inductive, et donc propre à résoudre quelques problèmes ouverts.
- Robot à logique inductive³²
- Des chercheurs comme Alonzo Church ont posé des limites pratiques aux ambitions de la raison, en orientant la recherche (Herbert Simon, Michael Rabin, Stephen Cook) vers l'obtention des solutions en temps fini, ou avec des ressources limitées, ainsi que vers la catégorisation des problèmes selon des classes de difficulté (en rapport avec les travaux de Cantor sur l'infini)

Questions soulevées

Essor

L'intelligence artificielle connaît un essor important pendant les 60 et 70, mais à la suite de résultats décevants eu égard aux capitaux investis, son succès s'estompe au milieu des 80. Par ailleurs, un certain nombre de questions restent posées telles la possibilité un jour pour les robots d'accéder à la conscience³³ ou d'éprouver des émotions.

D'après certains auteurs¹, l'intelligence artificielle pourrait avoir des inconvénients, si par exemple les machines devenaient plus intelligentes que les humains, et finissaient par les dominer, voire (pour les plus pessimistes) à les exterminer, de la même façon que nous cherchons à exterminer certains êtres vivants et la majorité des virus. On reconnaît le thème du film Terminator, mais des personnalités techniquement très compétentes, comme Bill Joy, appréhendent un réel risque à long terme. Toutes ces possibilités futures ont fait l'objet de quantités de romans de science-fiction, tels ceux d'Isaac Asimov ou William Gibson en passant par Arthur C. Clarke.

Espoirs et méfiances

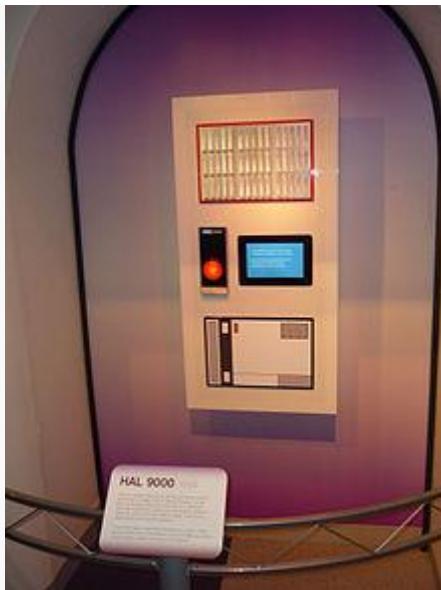
Une description spectaculaire d'un possible avenir de l'intelligence artificielle a été faite par I. J. Good : « supposons qu'existe une machine surpassant en intelligence tout ce dont est capable un homme, aussi brillant soit-il. La conception de telles machines faisant partie des activités intellectuelles, cette machine pourrait à son tour créer des machines meilleures qu'elle-même ; cela aurait sans nul doute pour effet une *réaction en chaîne* développement de l'intelligence, pendant que l'intelligence humaine resterait presque sur place. Il en résulte que la machine ultra intelligente sera la dernière invention que l'homme aura besoin de faire, à condition que ladite machine soit assez docile pour constamment lui obéir. »

La mutation qu'évoque Good correspond à un changement *qualitatif* du principe même de progrès, et certains la nomme « singularité »³⁴ qui est un concept central pour de nombreux transhumanistes, qui s'interrogent très sérieusement sur les dangers ou les espoirs d'un tel scénario, certains allant jusqu'à envisager l'émergence d'un « dieu » numérique appelé à prendre le contrôle du destin de l'humanité, ou à fusionner avec elle.

Good estimait à un peu plus d'une chance sur deux la mise au point d'une telle machine avant la fin du XX^e siècle. La prédiction ne s'est toujours pas réalisée, en 2012, mais elle avait imprégné le public à l'époque : le cours de l'action d'IBM quadrupla (bien que les dividendes trimestriels versés restèrent à peu près constants) dans les mois qui suivirent la victoire de Deep Blue sur Garry Kasparov. Une partie du grand public était en effet persuadée qu'IBM venait de mettre au point le vecteur d'une telle *explosion de l'intelligence* et que cette compagnie en tirerait profit. L'espoir fut déçu : une fois sa victoire acquise, Deep Blue, simple calculateur évaluant 200 millions de positions à la seconde, sans conscience du jeu lui-même, fut reconvertis en machine classique utilisée pour l'exploration de données. Nous sommes probablement encore très loin d'une machine possédant ce que nous nommons *intelligence générale*, et tout autant d'une machine possédant la *base de connaissances* de n'importe quel chercheur, si humble soit-il.

En revanche, un programme « comprenant » un langage naturel et connecté à l'Internet serait théoriquement susceptible de construire, petit à petit, une sorte de base de connaissances. Nous ignorons cependant tout, en 2012, tant de la structure optimale à choisir pour une telle base que du temps nécessaire à en rassembler et à en agencer le contenu

Dans la science-fiction



Hal 900 au Robert Hall of fame.

Le thème d'une machine capable d'éprouver une conscience et des sentiments — ou en tout cas de faire comme si — constitue un grand classique de la science-fiction, notamment dans la série de romans d'Isaac Asimov sur les robots. Ce sujet a toutefois été exploité très tôt, comme dans le récit des aventures de Pinocchio, publié en 1881, où une marionnette capable d'éprouver de l'amour pour son créateur, cherche à devenir un vrai petit garçon, ou dans *L'Homme le plus doué du monde*, une nouvelle de l'Américain Edward Page Mitchell où le cerveau d'un simple d'esprit est remplacé par un ordinateur inspiré des recherches de Charles Babbage. Le roman *Le Miroir flexible*, par Régis Messac, propose quant à lui le principe d'une intelligence artificielle faible, mais évolutive, avec des automates inspirés de formes de vie simples, réagissant à certains stimuli tels que la lumière. Cette trame a fortement inspiré le film *A.I. Intelligence artificielle*, réalisé par Steven Spielberg, sur la base des idées de Stanley Kubrick, lui-même inspiré de Brian Aldiss. L'œuvre de Dan Simmons, notamment le cycle d'Hypérion, contient également des exposés et des développements sur le sujet. Autre œuvre majeure de la science fiction sur ce thème, *Destination vide*, de Frank Herbert, met en scène de manière fascinante l'émergence d'une intelligence artificielle forte.

Les androïdes faisant preuve d'intelligence artificielle dans la fiction sont nombreux : *Data*, de Star Trek (Next generation), est un être cyborg doué d'intelligence, avec des capacités importantes d'apprentissage. Il est officier supérieur sur le vaisseau Enterprise et évolue aux côtés de ses coéquipiers humains qui l'inspirent dans sa quête d'humanité. Il est la représentation type de l'androïde, tel qu'il était pensé dans les années 1980. Dans *Ghost in the Shell*, une androïde s'éveille à la conscience. Dans la saga *Terminator* avec Arnold Schwarzenegger, le T-800 reprogrammé, conçu initialement pour tuer, semble dans la capacité d'éprouver des sentiments humains. Par ailleurs, les Terminators successifs sont envoyés dans le passé par Skynet, une intelligence artificielle qui a pris conscience d'elle-même, et du danger que représentent les humains envers elle-même.

- 1968 : *2001, l'Odyssée de l'espace* de Stanley Kubrick, inspiré de la nouvelle *La Sentinel* d'Arthur C. Clarke, également auteur du scénario du film, avec la lutte entre l'ordinateur HAL et Dave ;
- 1969 : *Colossus: the Forbin project* 1969, d'après le roman de Dennis Feltham Jones ([en](#)) de 1967 (un système d'IA militaire américain contacte son homologue russe pour qu'ils coopèrent à leur mission commune, éviter la guerre nucléaire... en neutralisant les humains !) ;
- 1981 : *Blade Runner* de Ridley Scott (1981), inspiré du roman éponyme de Philip K. Dick, où des hommes artificiels (des « répliquants ») reviennent sur terre après une mission spatiale, mais n'acceptent pas leur mort programmée à la suite au succès de leur mission ;
- 1982 : *Tron* de Steven Lisberger (1982), où le Maître contrôle principal (MCP) est un programme d'échecs qui a évolué en IA et tente de prendre le contrôle total du système ;
- 1985 : *D.A.R.Y.L.* est un androïde que le gouvernement américain cherche à détruire.

- 1999 : *Matrix*, trilogie cinématographique de science-fiction dans laquelle les humains, enfermés dans un monde créé par l'IA, sont asservis par les machines. Une petite poche de résistance humaine résiste et se bat encore dans l'espoir de la venue de l'Élu : Néo ;
- 1999 : *L'Homme bicentenaire (film)*: un exemplaire de NDR-114, dénommé « Andrew », poursuit un long chemin vers l'acquisition de la conscience, au point de se voir reconnaître le statut d'être humain à la fin de sa « vie » ;
- 2001 : *A.I. Intelligence artificielle* de Steven Spielberg, inspiré de la nouvelle de Brian Aldiss *Les Supertoys durent tout l'été*. Le personnage central est certainement un aboutissement - mais pour l'instant seulement imaginaire - de l'intelligence artificielle : un enfant-robot doué d'émotions et de sentiments ;
- 2004 : *I, Robot* avec Will Smith, inspiré de l'œuvre de Isaac Asimov et thème semblable au film *AI* ;
- 2012 - 2014 : la série télévisée suédoise *Real Humans : 100 % humain* décrit l'émergence de robots doués de conscience au sein de la société humaine ;
- 2015 : *Ex Machina* de Alex Garland, dans lequel un test de Turing d'une semaine va dégénérer en faveur d'un robot féminin révolutionnaire.

Actualités

L'intelligence artificielle est un sujet d'actualité au xxi^e siècle. En 2004, l'Institut Singularity a lancé une campagne Internet appelée « Trois lois dangereuses » : « *Three Laws Unsafe* » (en lien avec les trois lois d'Asimov) pour sensibiliser aux questions de la problématique de l'intelligence artificielle et l'insuffisance des lois d'Asimov en particulier. (Singularity Institute for Artificial Intelligence 2004).

En 2005, le projet Blue Brain est lancé, il vise à simuler le cerveau des mammifères, il s'agit d'une des méthodes envisagées pour réaliser une IA. Ils annoncent de plus comme objectif de fabriquer, dans dix ans, le premier « vrai » cerveau électronique. En mars 2007, le gouvernement sud-coréen a annoncé que plus tard dans l'année, il émettrait une charte sur l'éthique des robots, afin de fixer des normes pour les utilisateurs et les fabricants. Selon Park Hye-Young, du ministère de l'Information et de la communication, la Charte reflète les trois lois d'Asimov : la tentative de définition des règles de base pour le développement futur de la robotique. En juillet 2009, Californie, conférence organisé par l'Association for the Advancement of Artificial Intelligence (AAAI), où un groupe d'informaticiens se demande s'il devrait y avoir des limites sur la recherche qui pourrait conduire à la perte de l'emprise humaine sur les systèmes informatiques, et où il était également question de l'explosion de l'intelligence (artificielle) et du danger de la singularité technologique conduisant à un changement d'ère, ou deparadigme totalement en dehors du contrôle humain.

En 2009, le Massachusetts Institute of Technology (MIT) a lancé un projet visant à repenser la recherche en intelligence artificielle. Il réunira des scientifiques qui ont eu du succès dans des domaines distincts de l'IA. Neil Gershenfeld déclare « Nous voulons essentiellement revenir 30 ans en arrière, et de revoir quelques directions aujourd'hui gelées ».

En novembre 2009, l'US Air Force cherche à acquérir 2 200 playstation 3⁴⁰ pour utiliser le processeur cell à 7 ou 8 cœurs qu'elle contient dans le but d'augmenter les capacités de leur superordinateur constitué de 336 PlayStation 3 (total théorique 52,8 PetaFlops en double précision). Le nombre sera réduit à 1 700 unités le 22 décembre 2009⁴¹. Le projet vise le traitement vidéo haute-définition, et l'« informatique neuromorphiques », ou la création de calculateurs avec des propriétés/fonctions similaires au cerveau humain.

Le 27 janvier 2010, l'US Air Force demande l'aide de l'industrie pour développer une intelligence avancée de collecte d'information et avec la capacité de décision rapide pour aider les forces américaines pour attaquer ses ennemis rapidement à leurs points les plus vulnérables. L'US Air Force utilisera une intelligence artificielle, le raisonnement ontologique, et les procédures informatique basées sur la connaissance, ainsi que d'autres traitement de données avancées afin de frapper l'ennemi au meilleur point. D'autre part, d'ici 2020, plus de mille bombardiers et chasseurs F-22 et F-35 de dernière génération, parmi plus de 2 500 avions militaires, commenceront à être équipés de sorte que, d'ici 2040, tous les avions de guerre américains soient pilotés par intelligence artificielle, en plus des 10 000 véhicules terrestres et des 7 000 dispositifs aériens commandés d'ores et déjà à distance⁴².

Le 16 février 2011, Watson, le superordinateur conçu par IBM remporte deux des trois manches du jeu télévisé *Jeopardy !* en battant largement ses deux concurrents humains en gains cumulés. La performance a constitué pour cette AI à répondre à des questions de culture générale (et non un domaine technique précis) dans des délais très courts.

En mai 2013, Google ouvre un laboratoire de recherches dans les locaux de la NASA. Grâce à un superordinateur quantique conçu par D-Wave Systems et qui serait d'après cette société 11 000 fois plus performant qu'un ordinateur actuel (de 2013), ils espèrent ainsi faire progresser l'intelligence artificielle et notamment l'apprentissage automatique. Raymond Kurzweil est engagé en décembre 2012 par Google afin de participer et d'améliorer l'apprentissage automatique des machines et des IA.

En 2014-2015, suite au développement rapide du *deep learning*, et à l'encontre des penseurs transhumanistes, quelques scientifiques et membres de la communauté high tech craignent que l'intelligence artificielle ne vienne à

terme dépasser les performances de l'intelligence humaine. Parmi eux, l'astrophysicien britannique Stephen Hawking⁴⁶, le fondateur de Microsoft, Bill Gates et le PDG de Tesla, Elon Musk

Psychologie cognitive

La **psychologie cognitive** étudie les grandes fonctions psychologiques de l'être humain que sont la mémoire, le langage, l'intelligence, le raisonnement, la résolution de problèmes, la perception ou l'attention.

Plus généralement la cognition se définit comme l'ensemble des activités mentales et des processus qui se rapportent à la connaissance et à la fonction qui la réalise.

La psychologie cognitive part du principe que l'on peut inférer des représentations, des structures et des processus mentaux à partir de l'étude du comportement. Contrairement au behaviorisme, elle défend la thèse que la psychologie est bien l'étude du mental et non du comportement. À la différence des autres courants mentalistes, elle ne pense pas que l'introspection soit une voie d'accès particulièrement fiable pour explorer le mental.

Historique

Après le behaviorisme, Clark Hull et Edward Tolman sont les premiers à ouvrir la « boîte noire », c'est-à-dire l'ensemble des phénomènes qui prennent place entre la stimulation du sujet par l'environnement et la réponse observable de l'organisme.

La psychologie cognitive est véritablement née dans les années 1950, en même temps que l'intelligence artificielle. En effet, une fois admis le principe d'étudier le contenu de la boîte noire, il fallait développer des concepts pour décrire ce qui s'y passait. Les débuts de l'informatique ont justement permis de fournir un arsenal conceptuel permettant de penser la cognition : la notion d'information et de traitement de l'information.

Bien que des progrès considérables aient été réalisés depuis cette époque, la notion de système d'information reste au cœur des modèles cognitifs, que ceux-ci adoptent des formalisations plutôt symboliques (la cognition vue comme un système de manipulation de symboles), plutôt connexionnistes (la cognition vue comme circulation d'activation dans un grand réseau de neurones), ou hybrides (notion d'un grand réseau de neurones qui réalise fonctionnellement un système de symboles).

Notions de base

La psychologie cognitive utilise préférentiellement l'expérimentation et les mesures comportementales qui comprennent notamment la mesure de temps de réaction (TR), ou du temps nécessaire à une opération (temps de réalisation de la tâche, temps d'exposition en lecture), la précision de la réponse (par exemple taux de bonnes ou mauvaises réponses), ou même l'oculométrie cognitive ou des données physiologiques (imagerie fonctionnelle, potentiels évoqués, etc.) La modélisation informatique y joue également un rôle important.

Certains chercheurs se consacrent à l'étude de l'architecture cognitive. On trouve ainsi des expériences visant à élucider les différents « modules » qui prennent en charge les grandes fonctions de la cognition. Ces distinctions ne recouvrent pas nécessairement des unités cérébrales identifiées, mais correspondent plutôt à des entités fonctionnelles pouvant mobiliser une variété de structures cérébrales distinctes. Par exemple dans la mémoire, avec la distinction entre mémoire de travail et mémoire à long terme. On rencontre aussi différentes mémoires sensorielles, ou encore la distinction entre mémoire sémantique et mémoire épisodique. La psychologie cognitive travaille également avec le concept d'association.

D'autres chercheurs s'emploient à décrire les stratégies mises en place par les individus pour traiter les tâches de la vie quotidienne, tâches de résolution de problème, prise de décision, ou même tâches professionnelles (diagnostic médical, contrôle aérien, mémorisation chez les garçons de café, etc.). La psychologie cognitive trouve ainsi de nombreuses applications, notamment en ergonomie cognitive en ergomotricité ou en marketing.

Rétroaction



Représentation d'une boucle rétroactive négative

La **rétroaction** est l'action *en retour* d'un effet sur sa propre cause : la séquence de causes et d'effets forme donc une boucle dite *boucle de rétroaction*. Au niveau supérieur, un système comportant une boucle de rétroaction agit ainsi sur lui-même. Du point de vue de la distinction entre commande et action, la sortie de la commande et donc l'action font partie des facteurs qui influent en retour sur la commande du système (la rétroaction diffère de l'hypothèse de la causalité inversée, dans laquelle l'effet précède sa cause.)

Pionniers de l'expression de cette notion de *feedback*, Norbert Wiener, Arturo Rosenblueth et Julian Bigelow « l'emploient aussi dans un sens plus restreint pour signifier que le comportement d'un objet est déterminé par la marge d'erreur qui le sépare à un moment donné de l'objectif qu'il cherche à atteindre »¹.

L'automatique est une discipline qui étudie systématiquement les rétroactions. Les rétroactions sont très importantes dans de nombreux domaines, aussi bien pour les systèmes physiques, chimiques et biologiques que dans de nombreuses technologies.

On doit distinguer divers types de rétroaction :

- une *rétroaction positive* amplifie le phénomène, le système s'alimente lui-même comme dans le cas d'une explosion ;
- une *rétroaction négative* le réduit, provoque un amortissement qui permet une régulation ;
- la rétroaction peut avoir un effet variable (la rétroaction est parfois positive, parfois négative) selon les conditions et notamment selon le délai de transmission (paramètre important) et l'inertie du système, ce qui induit des effets très variés (cycle, comportement chaotique, etc.).

Origine et histoire

La rétroaction est un concept dont les origines se perdent dans l'histoire, mais on peut trouver les origines directes de la notion actuelle de *feedback* depuis l'industrialisation avec, par exemple, au XIX^e siècle, le servomoteur de Joseph Farcot, utilisé pour les machines à vapeur.

La théorisation des logiques mécaniques, en particulier avec la cybernétique, a mis en évidence le principe de *feedback* et, par voie de conséquence, les logiques d'évolution des systèmes étudiées en systémique.

Boucle, chaîne et oscillation

Une boucle de rétroaction est un dispositif qui lie l'effet à sa propre cause, avec ou sans délai.

La répétition de la réaction (réaction itérative) entraîne :

- son **amplification** continue (cercle vertueux ou vicieux, selon que cette amplification est jugée favorable ou non), dans le cas de rétroaction positive ;
- son **extinction** progressive ou non (avec pompage ou non) en cas de rétroaction négative. Le système se rapproche d'un **attracteur**, qui n'est pas forcément le point zéro.

Les comportements des systèmes se répartissent en trois grands types :

- **amplification**, voire **emballlement** tant que les limites physiques ne sont pas atteintes (effet boule de neige : effet Larsen, explosion nucléaire, etc.) ;
- régulation **stable** (aéronautique, aérospatial, régulation des processus industriels par l'automatique), éventuellement sous forme **cyclique**, avec ou sans amortissement : clignoteur, sonnette électrique, thermostat, etc. ;
- entre les deux, fonctionnement **chaotique**, qui peut néanmoins sous certaines conditions déboucher sur (émergence), ou ressembler à, un des deux autres. Un exemple de comportement émergent est donné par la fourmi de Langton.

Domaines d'application

La rétroaction existe dans de nombreux systèmes tant physiques, biologiques (équilibre des écosystèmes, endocrinologie) que sociaux (finance comportementale, psychologie sociale, sociologie). Elle est essentielle en communication avec la notion de processus de communication.

Biologie

Il existe deux types de rétroaction dans le domaine biologique : la rétroaction positive (ou rétroactivation) et la rétroaction négative (appelée également rétro-inhibition). Respectivement, la première augmente l'activité de ou des enzymes impliquées dans les processus concernés et la deuxième diminue l'activité de ou des enzymes. Il ne faut toutefois pas confondre le rétrocontrôle/feed-back (régule l'activité des enzymes) avec l'induction ou la (co)répression enzymatique (régule respectivement l'activation et l'inhibition de la synthèse des enzymes). Cette première définition convient lors de diverses régulations de l'activité génique (cf la répression catabolique ou encore la régulation du tryptophane). Néanmoins, ces termes sont également utilisés en endocrinologie. Dans ce cas-ci, une boucle de rétroaction positive va amplifier (c'est-à-dire augmenter et non créer) une réponse physiologique dû à une perturbation de l'homéostasie du corps. Tandis qu'une boucle de rétro-inhibition va réduire voire stopper une réponse physiologique (toujours dû à une perturbation de l'homéostasie).

Afin de mettre en évidence ces deux types de rétroactions (positive et négative), il faut montrer que le produit formé a une influence notable sur l'activité des enzymes, ce que révèlerait un impact quantitatif du produit formé sur sa propre production. Pour cela, il est envisageable de réaliser deux expériences. Une première expérience (1) dans laquelle on fait réagir les réactifs en présence d'enzymes. Puis, une deuxième expérience (2) dans laquelle on fait réagir les réactifs (marqués via un atome radioactif) en présence d'enzymes, avec cependant une quantité déjà non négligeable de produit. Le marquage permet de suivre l'évolution de la réaction, et d'observer au fil du temps la quantité de produit formé, sans pour autant la confondre avec les produits insérés initialement. Ainsi, il est possible de comparer la manière dont la quantité de produit formé évolue au cours du temps selon la configuration choisie (1) ou (2). Une évolution de la quantité plus rapide lorsque du produit est introduit en plus prouverait un processus de rétroactivation. Une évolution moins rapide au contraire pourrait être interprétée comme la manifestation d'une rétro-inhibition. Cette comparaison peut être exprimée graphiquement ou encore numériquement en calculant le taux d'accroissement de la fonction associée à l'évolution de la quantité de produit formé pour chacune des configurations. Cette expérience permet de mettre en évidence l'existence d'une rétroaction pour un processus donné et de préciser son type. En outre, la façon dont peuvent être collectées les mesures de quantité à partir des mesures de radioactivité ne sont ici pas précisées. Enfin, ce protocole représente une suggestion qui n'est pas nécessairement standardisée.

Économie

En économie (sujet non indépendant, mais tout de même distinct, de la finance), Nicolaï Kondratieff suggère vers 1920 l'existence de cycles liés aux phases de chaque innovation technologique (recherche, production, adoption progressive par le marché correspondant à une expansion (voir croissance exponentielle), saturation des besoins conduisant à un simple marché de renouvellement (voir courbe logistique), voire à une décroissance rapide quand l'ancienne

innovation est supplantée par une autre, pour laquelle le cycle recommence. Deux exemples typiques sont le cas du charbon en France, ou du chemin de fer aux États-Unis. Ce modèle a reçu une approbation enthousiaste dès les années 1930 de Joseph Schumpeter qui a popularisé le modèle et le nom de son inventeur. Il relève aujourd'hui plus de l'histoire de l'économie que de sa pratique : le phénomène, sans être nié, apparaît maintenant plus chaotique que réellement cyclique.

Plus généralement, en économie il est rare qu'un élément n'agisse pas sur l'économie en général, et donc sur lui-même. On peut citer des éléments aussi importants que le niveau des prix (l'inflation peut se nourrir elle-même), le chômage, le niveau des impôts, etc.

Finance

Les études de Benoît Mandelbrot sur les cours de la bourse révèlent un comportement chaotique des cours. En d'autres termes, les cours ne seraient pas indéterministes, ce qui signifie que des causes (notamment des informations financières, économiques, technologiques, géopolitiques et psychologiques) impactent les cours de manière déterministe (avec toujours la même conséquence), entraînant une dynamique du processus de formation des prix dépendante de conditions initiales. Certains organismes se sont ainsi intéressés à la finance comportementale, et notamment aux sur-réactions des agents à des informations sur la santé de l'entreprise à court terme. En sur-évaluant ou sous-évaluant les prix, les prix s'écarteraient de leur « vraie » valeur d'équilibre à court terme, amorçant par la suite un repli plus gradué vers leur « vraie » valeur.

Modélisation

Jay W. Forrester créa un langage pour fabriquer facilement sur ordinateur des simulations de modèles de rétroaction : le langage DYNAMO (*dynamic models*). Il s'en servira pour construire un modèle industriel décrit dans son livre *Industrial dynamics*. Il en arrivera ensuite à modéliser *le monde lui-même*, d'abord dans un premier modèle de 1973 manquant de détail (il considérait le monde comme une entité unique, sans le régionaliser) et utilisé par le Club de Rome, puis en segmentant le monde en régions homogènes pour un meilleur réalisme. Ces modélisations sont décrites dans son livre *World dynamics*.

L'étude de la rétroaction dans des cas simples peut se faire aussi au moyen d'équations différentielles comme celle de Lotka-Volterra ou de Verhulst qui modélise un équilibre entre proies et prédateurs dont l'étude introduit deux notions importantes : celle d'espace des phases et celle de domaine de stabilité.

Psychologie

En psychologie cette notion relève d'abord du conditionnement opérant où le sujet doit comprendre que le cours des événements dépend de son action initiale ce qui en permet la régulation. En [TCC](#) c'est un principe de base par lequel le thérapeute retourne au patient des informations sur la conduite ou la performance à améliorer. Le feed-back a une fonction de renforçateur positif ou négatif.

Régulation

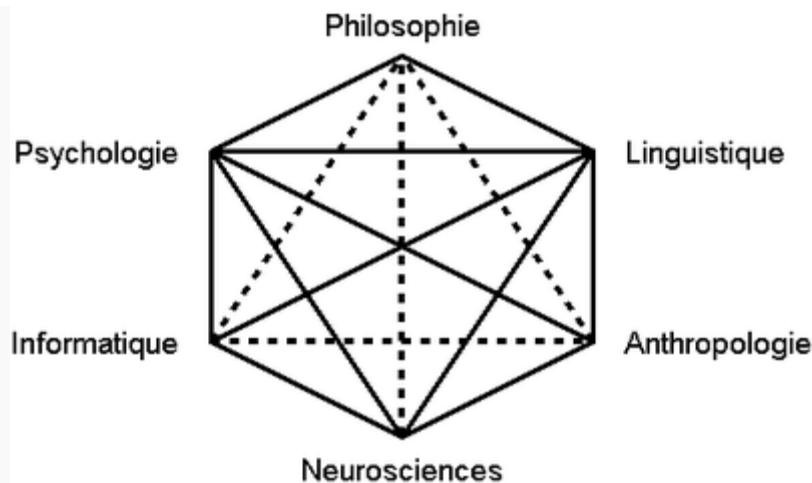
Le premier mécanisme de régulation par rétroaction automatique est bien antérieur au régulateur à boules de James Watt cité généralement comme exemple. Les mécaniciens grecs ont conçu une lampe à huile qui met en œuvre le principe du feed-back. Plus tard Francesco di Giorgio Martini fixera des masses sur l'axe en rotation dans le système bielle-manivelle. Le bâille-blé des moulins est un autre exemple d'utilisation de ce principe d'autorégulation. C'est son usage qui fera apparaître l'effet de pompage dont l'étude mathématique conduira à terme à la discipline nommée automatique.

Le régulateur rétroactif le plus familier au grand public est probablement le thermostat.

Selon la légende, Aristote utilisait pour se tenir éveillé une boule métallique dans sa main gauche, la boule tombant bruyamment dans un cuvier s'il la lâchait en cas d'assoupissement, le réveillant donc. Le système de veille automatique à contrôle de maintien d'appui (VACMA) de la SNCF (parfois appelé « dispositif de l'homme mort ») qui arrête immédiatement un train si son

conducteur est resté plus de quinze secondes sans toucher ou lâcher quelque chose (fût-ce un simple contact ne faisant rien hormis réarmer la VACMA) constitue également un exemple de rétroaction.

Sciences cognitives



Les six disciplines scientifiques constituant les **sciences cognitives** et leurs liens interdisciplinaires, par l'un des pères fondateurs du domaine, G. A. Miller¹. Les traits pleins symbolisent les disciplines entre lesquelles existaient déjà des liens scientifiques à la naissance des sciences cognitives ; en pointillés, les disciplines entre lesquelles des interfaces se sont développées depuis lors.

Les **sciences cognitives** regroupent un ensemble de disciplines scientifiques dédiées à la description, l'explication, et le cas échéant la simulation, des mécanismes de la pensée humaine, animale ou artificielle, et plus généralement de tout système complexe de traitement de l'information capable d'acquérir, conserver, utiliser et transmettre des connaissances. Les sciences cognitives reposent donc sur l'étude et la modélisation de phénomènes aussi divers que la perception, l'intelligence, le langage, le calcul, le raisonnement ou même la conscience. Les sciences cognitives utilisent conjointement des données issues d'une multitude de branches de la science et de l'ingénierie, comme la linguistique, l'anthropologie, la psychologie, les neurosciences, la philosophie, l'intelligence artificielle... Nées dans les années 1950, les sciences cognitives forment aujourd'hui un champ interdisciplinaire très vaste, dont les limites et le degré d'articulation des disciplines constitutives font toujours débat.

En France, où la tradition disciplinaire est forte, la question de leur statut entre en résonance avec des problématiques liées à la structuration de la recherche. Divers regroupements de chercheurs, mais aussi d'étudiants, s'attachent à valoriser la pertinence et la portée de l'interdisciplinarité en sciences cognitives au travers de sociétés savantes comme l'*Association pour la Recherche Cognitive* (ARCo) ou d'associations comme la Fresco. Si certains contestent le statut des sciences cognitives comme discipline scientifique en tant que telle, d'autres estiment, au contraire, que les sciences cognitives ont dépassé le simple stade d'une accumulation de connaissances pluridisciplinaires et ont donné naissance à deux disciplines autonomes :

- à une science fondamentale, dite science de la cognition, dont les spécialistes, parfois appelés *cogniticiens*², sont réunis en sociétés savantes et publient dans des revues scientifiques internationales transdisciplinaires.
- à un secteur applicatif industriel du domaine de l'ingénierie de la connaissance : la cognitique.

Il est à noter que le singulier *cognitive science* est d'usage courant dans les pays anglophones.

Histoire des sciences cognitives

Il est d'usage de dater la naissance des sciences cognitives de 1956. En effet, cette année voit s'organiser la toute première conférence consacrée à l'intelligence artificielle et à son application à la psychologie, à laquelle participent les informaticiens Allen Newell, John McCarthy et Marvin Minsky, le mathématicien Claude Shannon, l'économiste et psychologue Herbert Simon, le linguiste Noam Chomsky, les psychologues George Miller et John Swets les neurobiologistes David Hubel et Torsten Wiesel. L'année 1956 est aussi riche en publications fondamentales pour le domaine des sciences cognitives.

Quelques années auparavant pourtant, les conférences Macy organisées à New York par la fondation éponyme à partir de 1942 avaient rassemblé les mathématiciens John von Neumann, Norbert Wiener, Claude Shannon, le neurophysiologiste Warren McCulloch et les anthropologues Margaret Mead et Gregory Bateson dans le but de créer une science générale du fonctionnement de l'esprit. En outre, au sortir de la Seconde Guerre mondiale, la recherche en ce qui n'était pas encore identifié comme l'intelligence artificielle bénéficiait de soutiens importants en provenance de l'armée, notamment la DARPA américaine.

Disciplines

Linguistique cognitive et grammaire générative

La linguistique formelle et plus particulièrement les travaux de Noam Chomsky ont eu une influence décisive au moment de l'émergence des sciences cognitives à la fin des années 1950. Chomsky s'est notamment élevé contre la conception du langage comme un ensemble d'« habitudes » apprises par observation et conditionnement. Contre cette vision behavioriste, défendue entre autres, par B. F. Skinner, Chomsky défendit l'idée d'une « faculté de langage » s'appuyant sur des dispositions innées : observant que durant l'enfance, on n'est exposé à un trop petit nombre de situations de langage pour pouvoir en inférer les règles sous-jacentes — c'est l'argument dit de « la pauvreté du stimulus »³, Chomsky propose que la compétence linguistique humaine s'appuie, pour se développer, sur une connaissance innée (et implicite) d'une grammaire universelle dont on retrouve la structure formelle dans toutes les langues humaines naturelles.

Héritières des interrogations philosophiques sur le rôle du langage dans la pensée (voir aussi ci-dessous) et prolongeant les théories de Roman Jakobson sur les fonctions non purement communicatives du langage, les sciences cognitives s'intéressent non pas seulement aux processus mentaux de production du langage mais aussi au rôle de ce dernier dans les opérations mentales. Les idées de Chomsky ont ainsi été reprises et développées au delà de la linguistique par le philosophe Jerry Fodor, dans ses fameuses thèses sur la modularité de l'esprit, la notion que certaines opérations mentales (comme l'application des règles de grammaire) se déroulent de façon automatique et autonomes, et le mentalais, une métaphore d'un langage intérieur dans lequel seraient traduites les opérations mentales.

À la frontière avec l'anthropologie, le rôle du langage dans les représentations mentales est reposé. Les anthropologues Brent Berlin et Paul Kay contestent l'hypothèse Sapir-Whorf selon laquelle le langage et plus précisément les catégories linguistiques conditionneraient plus ou moins fortement les représentations mentales. S'appuyant sur une étude comparée des termes de couleur à travers les langues, Berlin et Kay défendent au contraire l'idée que cette apparente diversité culturelle dans le lexique est en réalité le produit d'une même structure hiérarchique dans l'organisation de la perception et de la représentation des couleurs ; selon leur travaux, c'est donc l'esprit qui conditionne le langage et non l'inverse.

Philosophie analytique et philosophie de l'esprit

Frege révolutionne la logique classique en introduisant le concept de dénotation dans son article *Sens et Dénotation* (*Sinn und Bedeutung*). Le sens de « étoile du matin » (a) est différent de celui de « étoile du soir » (b) puisque leurs réalisations acoustiques ou signitives diffèrent : « La différence de sens correspond à une différence du mode de donation de l'objet désigné »

néanmoins ils dénotent la même réalité : la planète Vénus d'où (a) = (b) a une valeur de connaissance car ce n'est pas tous les jours qu'on découvre qu'une étoile est une planète. Ainsi cit. « La dénotation d'« étoile du soir » et d'« étoile du matin » serait la même, mais leur sens serait différent ». Ce qui a permis d'actualiser le signe de Saussure qui refusait d'y attribuer la référence au monde. Il a introduit la quantification dans la logique formelle. On oppose le quantificateur universel : « Tous les hommes sont mortels » au quantificateur existentiel « Il existe au moins un homme mortel ». Il a fondé le calcul des prédictats.

Réseaux de neurones et connexionnisme

Issu de la cybernétique, le connexionnisme fait partie des sciences cognitives depuis l'origine. Après une éclipse au cours des années 1970, il regagne aujourd'hui en importance avec les progrès de l'imagerie cérébrale et des neurosciences. Partageant avec le cognitivisme l'idée de représentation, il rejette en revanche l'hypothèse d'un fonctionnement cognitif symbolique. Dans une perspective connexionniste, la cognition est le produit d'un calcul parallèle opéré par des entités sub-symboliques (neurone formel ou non) et la signification découle de l'état du réseau formé par ces entités à un moment donné.

Attention

L'attention est *grosso modo* la capacité à se concentrer sur certains stimuli ou, au contraire, l'impossibilité de traiter plus d'une certaine quantité d'informations à un moment donné.

Mémoire

La mémoire permet de retenir des informations pour les réutiliser ultérieurement. À l'inverse de l'apprentissage bémoriste, la notion de mémoire insiste sur les structures et processus intermédiaires entre l'acquisition de ces informations et leurs conséquences sur le comportement.

Elle fait l'objet de nombreux travaux en sciences cognitives, aussi bien du point de vue de la psychologie ou des neurosciences que de la modélisation. Les chercheurs se sont ainsi attachés à mettre en évidence les différentes structures composant la mémoire en se basant à la fois sur des expériences et sur les dysfonctionnements observés chez des patients cérébro-lésés.

Apparu dans les années 1960, le modèle modal de la mémoire a été l'un des plus influents. Il distingue le registre sensoriel (grande quantité d'informations sous forme visuelle pendant quelques millisecondes), la mémoire à court terme (nombre limité d'éléments sous forme verbale pendant quelques secondes) et la mémoire à long terme (informations sémantiques, en pratique sans limite de durée ou de capacité).

La notion de mémoire de travail a été présentée par Baddeley et Hitch en 1974. Ce modèle et d'autres plus récents comme celui de Cowan mettent en évidence les liens entre attention et mémoire. La mémoire de travail a ainsi pour rôle non seulement de contenir des informations en provenance des systèmes sensoriels mais aussi des informations extraites de la mémoire à long terme pour être utilisées par les processus de raisonnement et de prise de décision.

Dans le domaine de la mémoire à long terme, plusieurs distinctions ont été proposées comme celles entre mémoire épisodique (auto-biographique) et mémoire déclarative (connaissances générales) par Endel Tulving, entre mémoire sémantique et mémoire procédurale (gestes, comportements, savoir-faire) par John Anderson et entre mémoire explicite (utilisée de façon consciente et contrôlée) et mémoire implicite (automatique). De nombreuses recherches portent également sur les représentations mentales qui organisent ces informations.

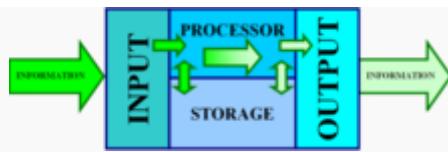
De leur côté, les neurosciences ont également cherché à identifier les structures cérébrales réalisant ces différentes fonctions et à décrire les processus biologiques permettant l'apprentissage et l'encodage des informations. Le phénomène de potentialisation à long terme explique notamment comment la stimulation répétée de certaines connexions neuronales

les rend plus susceptible de s'activer à l'avenir en réponse à un stimulus similaire (même partiellement).

Enfin, de nombreux travaux portent sur les processus d'encodage, de stockage et de récupération. Parmi les principaux résultats on peut citer la courbe de l'oubli d'Ebbinghaus, les notions d'effet de récence et de primauté ou encore l'amorçage. Enfin, plusieurs expériences soulignent le rôle de la mémoire dans l'expertise (ainsi les bons joueurs d'échecs ne diffèrent pas des débutants par leur vitesse de traitement mais par l'organisation des informations sur le jeu).

Un certain nombre de modèles de la mémoire dit « à traces » tendent à se développer dans la droite ligne du courant connexionniste. Il s'agit de théories profondément dynamiques cherchant à expliquer les conceptions modularistes comme émergentes d'un système complexe et non cloisonné qui conserverait toutes les informations sous formes de traces. Ces traces ne seraient pas forcément localisées sur le plan cérébral mais réparties et se définiraient par un grand ensemble de facteurs sémantiques, émotionnels, moteurs, etc.

Système de traitement de l'information



Système de traitement de l'information.

Un **système de traitement de l'information** est un ensemble d'appareils (électriques, mécaniques ou biologiques) permettant de traiter automatiquement des informations.

Les premiers systèmes permettant de traiter automatiquement des informations étaient des appareils mécaniques. Aujourd'hui il existe une panoplie d'appareils en électronique numérique permettant de traiter automatiquement des informations : ordinateur, console de jeu, distributeur automatique de billets, enregistreur vidéo personnel, GPS, téléphone portable ainsi que les appareils d'avionique, les systèmes d'arme et aussi les robots — ces derniers sont en plus dotés de capacité de mouvement.

Description

Un système de traitement de l'information est composé de quatre unités :

- l'unité *d'entrée* (anglais : *input*), qui permet de faire entrer les informations dans le système : l'entrée des informations utilise notamment des procédés de numérisation ;
- l'unité de *stockage* (anglais : *storage*) qui permet de conserver les informations ;
- l'unité de *traitement* (anglais : *processor*) qui comme son nom l'indique va traiter les informations :
Les informations seront traitées en suivant scrupuleusement les instructions d'un programme informatique ;
- l'unité de *sortie* (anglais : *output*) qui permet de faire sortir les résultats des traitements.

Chaque unité est composé d'un ou de plusieurs appareils. (voir matériel informatique), les appareils s'échangent des informations selon des protocoles normalisés.

Dans les appareils, les informations sont sous forme de nombres binaires (en base 2). Le système de numération binaire est utilisé du fait qu'il permet une grande fiabilité des résultats délivrés par les circuits électroniques numériques.

Histoire

Le concept de système de traitement de l'information est fondé sur le concept de calculateur universel programmable appelé machine de Turing inventé par Alan Turing en 1936. La thèse de Turing est aujourd'hui considérée comme l'article fondateur de l'informatique.

La Pascaline est le premier calculateur mécanique. Il a été construit par Blaise Pascal en 1642.

Le premier calculateur électronique à utiliser le système binaire est l'EDVAC. Construit en 1945, il occupait une salle de 45 m², et pesait près de 8 tonnes.

C'est l'invention du transistor en 1947 et celle du circuit intégré en 1958 qui ont permis la miniaturisation électronique des systèmes de traitement de l'information.

La première console de jeu, l'Odyssey a été construite en 1973.

Les informations à traiter

Le premier type d'informations que les systèmes étaient capables de manipuler étaient des nombres, puis des textes, jusqu'à l'arrivée dans les années 1980 des systèmes multimédia, c'est-à-dire capables de manipuler divers types d'informations: images, sons, vidéos...

Exemples d'informations :

- nombres : prix, poids, volume, température, vitesse, pression...
- textes : courrier, publications, articles de presse...
- images : plans, dessins, graphiques, diagrammes, cartes géographiques, photos, images 3D...
- sons : paroles, chants, bruitages ou musique ,
- vidéo : prises de vue, clips ou films ;

- les instructions d'un programme informatique sont aussi des informations.

Dans le système de traitement de l'information, les informations circulent sous forme de suite de bits (chiffres en base 2) et le octet groupés dans des fichiers ou des enregistrements (voir : électronique numérique).

Un **format** désigne la manière dont les bits sont disposés à l'intérieur du fichier ou de l'enregistrement pour stocker l'information.

Les protocoles

Un protocole est un ensemble de règles *normalisées* qui, lorsqu'elles sont appliquées de manière commune par deux appareils, leur permettent de s'échanger des informations.

Les règles établies par un protocole concernent autant le point de vue électronique (tensions, fréquences) que le point de vue informationnel (choix des informations, format) ainsi que le déroulement des opérations de communication (qui initie la communication, comment réagit le correspondant, combien de temps dure la communication...).

- Les protocoles sont utilisés en informatique et en télécommunication (téléphonie, télévision).

Les unités

Un système de traitement de l'information est composé de quatre unités :

- l'unité *d'entrée* (anglais : *input*), qui permet de faire entrer les informations dans le système ;
- l'unité de *stockage* (anglais : *storage*) qui permet de conserver les informations ;
- l'unité de *traitement* (anglais : *processor*) qui comme son nom l'indique va traiter les informations ;
- l'unité de *sortie* (anglais : *output*) qui permet de faire sortir les résultats des traitements.

Unité d'entrée

Les informations peuvent être introduites par une personne à l'aide d'un clavier et d'une souris, enregistrées à l'aide de différents appareils — microphone, caméra, scanner, appareil photo, ou apportées par des dispositifs de télécommunication (voir: réseau informatique).

Les premiers appareils permettant d'introduire des informations étaient des lecteurs de cartes perforées. Un dispositif semblable à celui des pianos mécaniques. Cette

technologie datant du XVIII^e siècle a été utilisée en informatique jusque dans les années 1980.

La première étape des traitements consiste en la réception des informations en provenance des différents appareils.

- La numérisation est le procédé qui consiste à transformer une information provenant du monde réel en une suite de chiffres qui seront utilisés dans le système de traitement de l'information.

Unité de stockage

Les informations stockées peuvent être des informations qui viennent d'être entrées dans la machine, ou résultats d'un traitement.

Les informations sont conservées dans des dispositifs de stockage tels que disque durs, DVD, CD-ROM ou mémoire flash.

La possibilité de stocker des informations existe depuis les années 1960, auparavant les informations étaient traitées à mesure qu'elles étaient entrées.

Unité de traitement

Le système de traitement des informations effectue les traitements en suivant scrupuleusement les instructions d'un programme informatique.

Les traitements peuvent consister à :

- à partir de certaines informations, d'obtenir d'autres informations, par exemple par calcul ;
- transformer les informations ;
- stocker les informations dans le système d'informations, en vue de d'effectuer des traitements plus tard ;
- extraire des informations préalablement stockées.

Exemples de traitements :

- tri, classement, recherche ;
- calculs de comptabilité, statistiques, analyses de physique ou d'économie ;
- correction orthographique ;
- reconnaissance de texte ;
- reconnaissance vocale ;
- traitement d'images tels que fausse couleur, négatif.

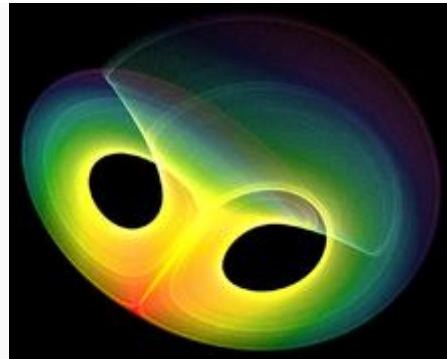
Un composant électronique qui effectue des traitements s'appelle un processeur.

Unité de sortie

La sortie est l'étape finale des traitements qui consiste à faire sortir les résultats du système d'informations.

Selon leur nature, les informations des résultats peuvent être restitués sur un écran, du papier par une imprimante ou un traceur, des enceintes audio ou tout autre appareil. Les informations peuvent aussi être transportées vers d'autres systèmes par des moyens de télécommunication (voir : réseau informatique).

Théorie du chaos



Attracteur de Lorenz

La **théorie du chaos** traite des systèmes dynamiques rigoureusement déterministes, mais qui présentent un phénomène fondamental d'instabilité appelé « sensibilité aux conditions initiales » qui, modulo une propriété supplémentaire de *récurrence*, les rend non prédictibles en pratique à « long » terme.

Cet théorie, à la base mathématique, trouve des applications dans des domaines très divers comme la biologie, l'économie ou la météorologie (le fameux « effet papillon » décrit par Edward Lorenz). Son universalité est à l'origine de recherches toujours plus nombreuses.

Introduction[

Définition heuristique d'un système chaotique

Un système dynamique est dit **chaotique** si une portion « significative » de son espace des phases présente simultanément les deux caractéristiques suivantes :

- le phénomène de sensibilité aux conditions initiales,
- une forte récurrence.

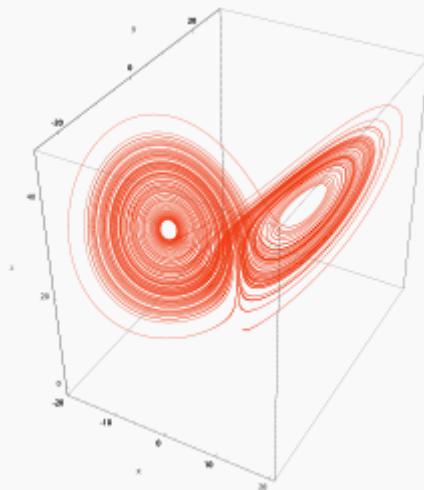
La présence de ces deux propriétés entraîne un comportement extrêmement désordonné qualifié à juste titre de « chaotique ». Les systèmes chaotiques s'opposent notamment aux systèmes intégrables de la mécanique classique, qui furent longtemps les symboles d'une régularité toute puissante en physique théorique. La dynamique *quasi-périodique* d'un système intégrable semblait elle-même trouver son illustration parfaite dans les majestueux mouvements des planètes du Système solaire autour du Soleil ; souvenons-nous que Voltaire, qui incita Émilie du Châtelet à entreprendre la traduction des *Principia Mathematica* de Newton, parlait de Dieu comme du « Grand Horloger »...

Qu'est-ce que la « théorie du chaos » ?

Au cours de son histoire, la physique théorique s'était déjà trouvée confrontée à la description de systèmes complexes macroscopiques, comme un volume de gaz ou de liquide, mais la difficulté à décrire de tels systèmes semblait découler du très grand nombre de degrés de liberté internes du système à l'échelle microscopique (atomes, molécules). La mécanique statistique avait dans ce cas permis de rendre compte de façon satisfaisante des propriétés macroscopiques de ces systèmes à l'équilibre. Ce fut donc une grande surprise lorsqu'on s'aperçut à la fin du XIX^e siècle qu'une dynamique d'une grande complexité pouvait résulter d'un système simple possédant un *très petit nombre de degrés de liberté*¹, pourvu qu'il possède cette propriété de sensibilité aux conditions initiales.

La théorie du chaos s'attache principalement à la description de ces systèmes à petit nombre de degrés de liberté, souvent très simples à définir, mais dont la dynamique nous apparaît comme très désordonnée².

La théorie du chaos est-elle née dans les années 1970 ?



Attracteur étrange de Lorenz (1963)

La réponse à cette question est : oui et non.

- Non, car le phénomène de sensibilité aux conditions initiales a été découvert dès la fin du XIX^e siècle par Henri Poincaré dans des travaux concernant le problème à N corps en mécanique céleste (notamment dans le volume 3 des Méthodes Nouvelles de la Mécanique Céleste), puis par Hadamard avec un modèle mathématique abstrait aujourd'hui baptisé « flot géodésique sur une surface à courbure négative ». Cette découverte a entraîné un grand nombre de travaux importants, principalement dans le domaine des mathématiques. Ces travaux sont évoqués dans le paragraphe *Développements historiques* situé plus loin.
- Oui, car ce n'est véritablement que dans les années 1970 que la théorie du chaos s'est progressivement imposée sur le devant de la scène scientifique, opérant une rupture épistémologique forte. Le terme suggestif de « chaos » n'a d'ailleurs été introduit qu'en 1975 par les deux mathématiciens Tien-Yien Li et James A. Yorke³. Otto E. Rössler, connu pour avoir découvert l'un des attracteurs chaotiques le plus étudié (et appelé aujourd'hui attracteur de Rössler⁴), utilisa le terme de « chaos » dans la plupart de ces articles dès 1976. Le caractère tardif de ce changement de paradigme s'explique aisément : la théorie du chaos doit en effet sa popularisation aux progrès fulgurants de l'informatique à partir des années 1960-70. Cette science nouvelle a en effet rendu accessible aux non-mathématiciens la visualisation directe de l'incroyable complexité de ces systèmes dynamiques, auparavant réservée aux seuls « initiés » capables d'absorber le formalisme mathématique idoine.

À titre d'illustration, la figure ci-contre est un exemple typique d'images produites par la théorie du chaos ; il s'agit ici d'un objet géométrique découvert par Lorenz en 1963, et initialement baptisé « attracteur étrange » à la suite de l'introduction de ce concept par David Ruelle et Floris Takens⁵. (Cet objet sera commenté plus bas, au paragraphe : *Lorenz et la météorologie*.)

La théorie du chaos est une véritable théorie scientifique. Elle repose sur la représentation des solutions des équations différentielles dans l'espace des phases associé : représenter les solutions sous forme de trajectoire dans l'espace plutôt que l'une des variables en fonction du temps permet de révéler la structure sous-jacente : c'est ce qui conduit à affirmer que la théorie du chaos contribue à «trouver de l'ordre caché sous un désordre apparent.»⁶. L'attracteur de

Lorenz précédemment représenté est un exemple d'une évolution d'un système dans l'espace des phases. Au déterminisme Laplacien permettant la prédition sur des temps arbitrairement long a succédé un déterminisme de nature fondamentalement différente. Il peut être approché de manière probabiliste⁷ et alors caractérisé par l'existence d'invariants prenant la forme de mesures de probabilités, de dimension fractale... ou par une description topologique des attracteurs⁸. Toutes les sciences, y compris sociales, sont concernées par ce changement de paradigme ; en particulier, cette théorie peut inclure l'organisation du vivant dans la nature⁹.

Le déterminisme, de Laplace à Poincaré

La stabilité du Système solaire

Le point de départ de la théorie du chaos est le problème à « 3 corps » qui consiste à étudier le mouvement de trois corps en interaction gravitationnelle, comme le système : { Soleil - Terre - Lune }, supposé isolé du reste de l'univers. Le but de cette recherche est de déterminer si le Système solaire est « stable » sur le long terme, ou bien si l'un des corps risque un jour de percuter un autre corps, ou encore être éjecté du Système solaire vers l'infini.

Le problème à 3 corps est aussi vieux que la mécanique newtonienne ; en effet, dès la naissance de cette théorie, son fondateur s'est intéressé au problème à trois corps dans le but de prédire le mouvement de la Lune. Tous les astronomes à sa suite ont abordé ce problème, dont Laplace, qui crut avoir prouvé la stabilité du Système solaire en utilisant la théorie des perturbations au premier ordre. Malheureusement, le développement perturbatif au premier ordre est insuffisant pour conclure définitivement. Un siècle après Laplace, Henri Poincaré s'est donc emparé du problème. On examine ci-dessous l'évolution des idées qui distinguent la pensée de Laplace de celle de Poincaré.

Notion de système dynamique différentiel conservatif

Pour un système possédant n degrés de libertés, l'espace des phases Γ du système possède $2n$ dimensions, de telle sorte que l'état complet $x(t) \in \Gamma$ du système à l'instant t est en général un vecteur à $2n$ composantes. On considère alors typiquement un système différentiel du premier ordre du type¹⁰ :

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x(t), t)$$

où la fonction f définit le système dynamique étudié (c'est en général également un vecteur à n dimensions, c'est-à-dire un ensemble de n fonctions scalaires). Ce système physique, supposé conservatif, est **déterministe** si et seulement si la dynamique du système associe à chaque condition initiale x_0 un et un seul état final $x(t)$. Il faut pour cela qu'il existe une application bijective $\phi_t : \Gamma \rightarrow \Gamma$ de l'espace des phases sur lui-même telle que :

$$x(t) = \phi_t(x_0)$$

Lorsque le temps t varie, cette bijection engendre un flot sur Γ , c'est-à-dire un groupe continu à un paramètre ϕ_t . Cette modélisation mathématique correspond par exemple au flot hamiltonien de la mécanique classique, ainsi qu'au flot géodésique.

Laplace, ou le déterminisme triomphant

Fort des succès obtenus en mécanique céleste, Laplace écrit en 1814 dans l'introduction de son *Essai philosophique sur les probabilités*¹¹ :

« Nous devons donc envisager l'état présent de l'univers comme l'effet de son état antérieur, et comme la cause de celui qui va suivre. Une intelligence qui pour un instant donné connaît toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent,

si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ses données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir comme le passé serait présent à ses yeux.

L'esprit humain offre, dans la perfection qu'il a su donner à l'Astronomie, une faible esquisse de cette intelligence. Ses découvertes en Mécanique et en Géométrie, jointes à celle de la pesanteur universelle, l'ont mis à portée de comprendre dans les mêmes expressions analytiques les états passés et futurs du système du monde. En appliquant la même méthode à quelques autres objets de ses connaissances, il est parvenu à ramener à des lois générales, les phénomènes observés, et à prévoir ceux que des circonstances données doivent faire éclore. Tous ces efforts dans la recherche de la vérité tendent à le rapprocher sans cesse de l'intelligence que nous venons de concevoir, mais dont il restera toujours infiniment éloigné. Cette tendance propre à l'espèce humaine est ce qui la rend supérieure aux animaux; et ses progrès en ce genre distinguent les nations et les siècles, et font leur véritable gloire. »

Ce texte aujourd'hui célèbre est en réalité largement prophétique, au sens où Laplace ne possède pas le théorème général d'existence et d'unicité de la solution d'une équation différentielle, qui sera démontré ultérieurement, et fait l'objet du paragraphe suivant.

Le théorème de Cauchy-Lipschitz

C'est le mathématicien Cauchy qui énonce en 1820 le théorème général d'existence et d'unicité de la solution d'une équation différentielle. Lipschitz lui donnera sa forme définitive en 1868.

Poincaré et l'imprédictibilité

Environ un siècle après Laplace, Poincaré écrit dans l'introduction de son *Calcul des Probabilités*^{12,13} un texte dont la tonalité est fort différente de celui de son illustre prédécesseur. C'est entre 1880 et 1910, que Poincaré, qui cherche à prouver la stabilité du Système solaire, découvre un nouveau continent issu des équations de Newton et jusqu'alors inexploré.

« Comment oser parler des lois du hasard ? Le hasard n'est-il pas l'antithèse de toute loi ? Ainsi s'exprime Bertrand, au début de son Calcul des probabilités. La probabilité est opposée à la certitude ; c'est donc ce qu'on ignore et, par conséquent semble-t-il, ce qu'on ne saurait calculer. Il y a là une contradiction au moins apparente et sur laquelle on a déjà beaucoup écrit.

Et d'abord qu'est-ce que le hasard ? Les anciens distinguaient les phénomènes qui semblaient obéir à des lois harmonieuses, établies une fois pour toutes, et ceux qu'ils attribuaient au hasard ; c'étaient ceux qu'on ne pouvait prévoir parce qu'ils étaient rebelles à toute loi. Dans chaque domaine, les lois précises ne décidaient pas de tout, elles traçaient seulement les limites entre lesquelles il était permis au hasard de se mouvoir. [...]

Pour trouver une meilleure définition du hasard, il nous faut examiner quelques-uns des faits qu'on s'accorde à regarder comme fortuits, et auxquels le calcul des probabilités paraît s'appliquer ; nous rechercherons ensuite quels sont leurs caractères communs. Le premier exemple que nous allons choisir est celui de l'équilibre instable ; si un cône repose sur sa pointe, nous savons bien qu'il va tomber, mais nous ne savons pas de quel côté ; il nous semble que le hasard seul va en décider. Si le cône était parfaitement symétrique, si son axe était parfaitement vertical, s'il n'était soumis à aucune autre force que la pesanteur, il ne tomberait pas du tout. Mais le moindre défaut de symétrie va le faire pencher légèrement d'un côté ou de l'autre, et dès qu'il penchera, si peu que ce soit, il tombera tout à fait de ce côté. Si même la symétrie est parfaite, une trépidation très légère, un souffle d'air pourra le faire incliner de quelques secondes d'arc ; ce sera assez pour déterminer sa chute et même le sens de sa chute qui sera celui de l'inclinaison initiale. »

« Une cause très petite, qui nous échappe, détermine un effet considérable que nous ne pouvons pas ne pas voir, et alors nous disons que cet effet est dû au hasard. Si nous connaissons exactement les lois de la nature et la situation de l'univers à l'instant initial, nous pourrions prédire exactement la situation de ce même univers à un instant ultérieur. Mais, lors même que les lois naturelles n'auraient plus de secret pour nous, nous ne pourrions connaître la situation qu'approximativement. Si cela nous permet de prévoir la situation ultérieure avec la même approximation, c'est tout ce qu'il nous faut, nous disons que le phénomène a été prévu, qu'il est

régi par des lois ; mais il n'en est pas toujours ainsi, il peut arriver que de petites différences dans les conditions initiales en engendrent de très grandes dans les phénomènes finaux ; une petite erreur sur les premières produirait une erreur énorme sur les derniers. La prédiction devient impossible et nous avons le phénomène fortuit. »

Sensibilité aux conditions initiales

Dans le paragraphe précédent, Poincaré met en exergue le phénomène connu aujourd'hui sous la dénomination de **sensibilité aux conditions initiales** : pour un système chaotique, une très petite erreur sur la connaissance de l'état initial x_0 dans l'espace des phases va se trouver (presque toujours) rapidement amplifiée.

Quantitativement, la croissance de l'erreur est localement *exponentielle* pour les systèmes fortement chaotiques, baptisés selon la théorie ergodique *K-systèmes* (le *K* est pour Kolmogorov), ainsi que pour les systèmes très fortement chaotiques, dits *B-systèmes* (le *B* est pour Bernoulli)¹⁴. Cette amplification des erreurs rend rapidement totalement inopérant le pouvoir prédictif qui découle de l'unicité de la solution, assurée par Cauchy-Lipschitz.

Typiquement, pour un système chaotique, les erreurs croissent localement selon une loi du type $e^{\frac{t}{T}}$, où T est un temps caractéristique du système chaotique, appelé parfois « *horizon de Lyapounov* »¹⁵. Le caractère prédictible de l'évolution du système ne subsiste que pour les instants $t \ll T$, pour lesquels l'exponentielle vaut approximativement 1, et donc tels que l'erreur garde sa taille initiale. En revanche, pour $t \gg T$, toute prédiction devient pratiquement impossible, bien que le théorème de Cauchy-Lipschitz reste vrai.

Poincaré et après

Poincaré et la stabilité du Système solaire

Un siècle après Laplace, Henri Poincaré s'est attelé au problème de la stabilité du Système solaire. Entre 1880 et 1886, il commence par publier une série de mémoires intitulés : « *Sur les courbes définies par une équation différentielle* » qui donne naissance à l'analyse *qualitative* des équations différentielles. Poincaré y introduit notamment la notion capitale de portrait de phase, qui résume géométriquement l'aspect des solutions dans l'espace des phases du système. Puis, en 1890, il publie le fameux mémoire intitulé : « *Sur le problème des trois corps et les équations de la dynamique* », qui lui vaudra le prix du roi Oscar, roi de Norvège et de Suède et passionné de mathématiques¹⁶. L'histoire est célèbre¹⁷ : le mémoire lauréat comportait une erreur détectée par le jeune mathématicien Phragmén alors qu'il prépare le manuscrit pour l'imprimeur. Cette erreur obligera Poincaré à procéder à de profonds remaniements dans son mémoire, et aussi à rembourser les frais d'impression du premier mémoire, une somme supérieure de quelque mille couronnes au prix qu'il avait reçu. Mais cette erreur fut féconde, car en lieu et place de la stabilité du Système solaire, Poincaré découvrit le chaos potentiel caché dans les équations de la dynamique.

Plus récemment, des calculs numériques effectués par l'astronome Jacques Laskar en 1989-1990¹⁸, puis confirmés par Sussman & Wisdom en 1992¹⁹, ont montré que le Système solaire est *chaotique*, avec un horizon de Lyapounov de l'ordre de 200 millions d'années.

L'école russe des années 1890-1950

Lyapounov et la stabilité du mouvement

Le 12 octobre 1892, Lyapounov soutient à l'Université de Moscou une thèse de doctorat intitulée : *Le problème général de la stabilité du mouvement*. Il y introduit l'idée de mesurer la divergence possible entre deux orbites issues de conditions initiales voisines et définit la « *stabilité de Lyapounov* ». Lorsque cette divergence croît *exponentiellement* avec le temps pour presque toutes les conditions initiales voisines d'un point donné, on a le phénomène de sensibilité aux conditions initiales, idée à laquelle sont attachés les exposants de Lyapounov, qui donnent une mesure quantitative de cette divergence exponentielle *locale*²⁰.

Andronov – Pontriaguine – Lefschetz

Émergence et développement de la théorie ergodique

Prédictibilité et calculabilité

Norbert Wiener et John von Neumann se sont préoccupés pourtant de la possibilité de prédire par le calcul une situation future à partir d'un état présent. Si Wiener jugeait la tâche ardue, voire impossible puisque de « petites causes » qu'on omettrait nécessairement d'inclure dans le modèle peuvent produire de « grands effets » (il donna l'image du « flocon de neige déclenchant une avalanche »), Von Neumann y voyait une occasion exceptionnelle pour les nouveaux appareils que l'on n'avait pas encore baptisés ordinateurs : « Si un flocon de neige peut déclencher une avalanche », répondait-il à Wiener, « alors la prédiction par le calcul nous dira très exactement quel flocon de neige précis intercepter pour que l'avalanche ne se produise pas ! » Wiener se montra sceptique : un état hypercritique restait un état hypercritique, et supprimer ce flocon particulier ne ferait à son avis que « permettre à un autre de le remplacer dans cette fonction ». Selon lui, rien ne serait donc résolu (point de vue admis aujourd'hui). Les deux hommes ne poussèrent pas plus avant ce différend.

Lorenz et la météorologie

Présentation

Bien que le caractère vraisemblablement chaotique de la météorologie fut pressenti par Henri Poincaré, le météorologue Edward Lorenz est néanmoins considéré comme étant le premier à le mettre en évidence, en 1963²².

Mathématiquement, le couplage de l'atmosphère avec l'océan est décrit par le système d'équations aux dérivées partielles couplées de Navier-Stokes de la mécanique des fluides. Ce système d'équations était beaucoup trop compliqué à résoudre numériquement pour les premiers ordinateurs existant au temps de Lorenz. Celui-ci eut donc l'idée de chercher un modèle très simplifié de ces équations pour étudier une situation physique particulière : le phénomène de convection de Rayleigh-Bénard. Il aboutit alors à un système dynamique différentiel possédant seulement trois degrés de liberté, beaucoup plus simple à intégrer numériquement que les équations de départ. Il observa alors, par pur hasard, qu'une modification minime des données initiales (de l'ordre de un pour mille) entraînait des résultats très différents. Lorenz venait de mettre en exergue la sensibilité aux conditions initiales

La métaphore du papillon

En 1972, Lorenz fait une conférence à l'*American Association for the Advancement of Science* intitulée²³ : « *Predictability: Does the Flap of a Butterfly's Wings in Brazil Set off a Tornado in Texas?* », qui se traduit en français par :

« *Prédictibilité : le battement d'ailes d'un papillon au Brésil provoque-t-il une tornade au Texas ?* ».

Cette métaphore, devenue emblématique du phénomène de sensibilité aux conditions initiales, est souvent interprétée à tort de façon causale : ce serait le battement d'aile du papillon qui déclencherait la tempête. Il n'en est rien ; Lorenz écrit en effet²⁴ :

« De crainte que le seul fait de demander, suivant le titre de cet article, "un battement d'aile de papillon au Brésil peut-il déclencher une tornade au Texas ?", fasse douter de mon sérieux, sans même parler d'une réponse affirmative, je mettrai cette question en perspective en avançant les deux propositions suivantes :

- Si un seul battement d'ailes d'un papillon peut avoir pour effet le déclenchement d'une tornade, alors, il en va ainsi également de tous les battements précédents et subséquents de ses ailes, comme de ceux de millions d'autres papillons, pour ne pas mentionner les activités d'innombrables créatures plus puissantes, en particulier de notre propre espèce.

- Si le battement d'ailes d'un papillon peut déclencher une tornade, il peut aussi l'empêcher. ».

Il serait plus juste de dire que la *différence de cause* (ici de conditions initiales) due à un battement d'ailes du papillon "*induit*" une *différence d'effet* qui est la tornade ; le battement d'ailes ne la provoque pas !

Observation :

Si l'homme est incapable d'appréhender la chaîne causale qui mènerait du simple battement d'aile particulier d'un papillon, au déclenchement d'une tornade au Texas, tout autant d'ailleurs d'une même conséquence se produisant à la suite d'un simple battement de son bras, il se trouve être alors dans l'incapacité de déterminer quels sont les effets de bout de chaîne d'une cause qu'il estimerait être mineure. Dans l'hypothèse où il pourrait appréhender l'ensemble de la chaîne qui mènerait d'une cause anodine à un effet majeur sans rapport évident, il serait alors dans la capacité d'en provoquer l'existence, ou non. Il s'ensuivrait donc qu'un événement anodin ne pourrait être considéré comme provoquant un effet dévastateur qu'à la condition que l'homme ait connaissance de la chaîne des causalités qui lie ses extrêmes, en n'en ayant la volonté de la mettre en œuvre.

D'où l'on pourrait déduire que nous sommes dans l'incapacité de déterminer ce qui a provoqué l'extinction des dinosaures, ni même si quelqu'un ou quelque chose en est la cause.

Stephen Smale : topologie et stabilité structurelle

Cette section est vide, insuffisamment détaillée ou incomplète. [Votre aide](#) est la bienvenue !

L'école russe des années 1950-1980

Anosov – Sinaï - Arnold

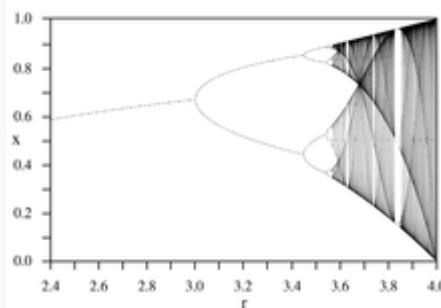
Transition d'une dynamique régulière vers le chaos

Soit un système dynamique dépendant d'un paramètre r :

$$\frac{dx(t)}{dt} = f_r(x(t), t)$$

Il arrive que la dynamique change de comportement lorsque le paramètre r varie. On a pu mettre en évidence trois grands scénarios de passage d'une dynamique régulière à une dynamique chaotique lors de la variation d'un paramètre.

Cascade de doublements de période



Bifurcation vers le chaos par doublement de période

Mitchell Feigenbaum a redécouvert une route vers le chaos qui avait été étudiée dans les années 60 par Myrberg. Aujourd'hui, cette route est appelée « *cascade de doublements de période* » pour décrire la transition entre un comportement périodique et un attracteur chaotique. Ce scénario est observé par exemple avec la suite logistique, qui est définie par récurrence par une application du segment $[0, 1]$ dans lui-même :

$$x_{n+1} = r x_n (1 - x_n)$$

où $n = 0, 1, \dots$ dénote le temps discret, x l'unique variable dynamique, et $0 \leq r \leq 4$ un paramètre²⁵. La dynamique de cette application présente un comportement très différent selon la valeur du paramètre r :

- Pour $0 \leq r < 3$, le système possède un point fixe attractif, qui devient instable lorsque $r = 3$.
- Pour $3 \leq r < 3.57\dots$, l'application possède un attracteur qui est une orbite périodique, de période 2^n où n est un entier qui tend vers l'infini lorsque r tend vers $3.57\dots$
- Lorsque $r = 3.57\dots$, l'application possède un attracteur chaotique fractal découvert par le biologiste May (1976)²⁶.
- Le cas $r = 4$ avait été étudié dès 1947 par Ulam et von Neumann²⁷. À noter qu'on peut dans ce cas précis établir l'expression exacte de la mesure invariante ergodique²⁸.

Lorsque le paramètre r augmente, on obtient donc une succession de bifurcations entre les comportements périodiques et le chaos, résumée sur la figure ci-contre.

Chaos quantique

Le terme « **chaos quantique** » désigne un champ de recherches ouvert dans les années 1970 qui est issu des succès de la théorie du chaos en dynamique hamiltonienne classique ; il tente essentiellement de répondre à la question :

Quel est le comportement en mécanique quantique d'un système classiquement chaotique ?

Résultats principaux

Les recherches ont montré que :

- il n'existe pas de « **chaos quantique** » au sens strict du terme, c'est-à-dire qu'il n'existe pas de divergence exponentielle des états quantiques au cours du temps dans l'espace de Hilbert qui serait l'analogie de la divergence exponentielle des orbites dans l'espace des phases classique. Cette absence de « **sensibilité aux conditions initiales** » en mécanique quantique est lié au fait que l'équation de Schrödinger est une équation linéaire ; c'est pourquoi Michael Berry a suggéré d'utiliser l'expression « **chaologie quantique** » à la place de « **chaos quantique** » ;
- cependant, les systèmes physiques classiquement chaotiques présentent certaines propriétés quantiques clairement distinctes de celles des systèmes classiquement intégrables : il existe en quelque sorte des « **signatures** » quantiques du chaos classique sous-jacent.

Signatures quantiques du chaos classique

Orbites périodiques et spectre d'énergie

En utilisant la formulation de Richard Feynman en intégrale de chemin de la mécanique quantique, Martin Gutzwiller¹ a démontré en 1971 une relation intégrale liant à la limite semi-

classique le spectre d'énergie quantique d'un système physique aux orbites périodiques classiques de ce même système. Cette relation est aujourd'hui appelée formule des traces de Gutzwiller². Or, les orbites périodiques ont des propriétés très différentes selon que la dynamique hamiltonienne classique est intégrable ou chaotique.

Il est intéressant de remarquer qu'il existe un système physique pour lequel la formule des traces approchée de Gutzwiller est en fait exacte : c'est le flot géodésique sur une surface compacte à courbure négative constante³. Une telle surface peut se représenter comme l'espace quotient du demi-plan de Poincaré par un sous-groupe discret du groupe $PSL(2, \mathbb{R})$ des isométries. Cette formule exacte a été établie en 1956 par le mathématicien Atle Selberg (indépendamment de la physique et des intégrales de chemin), et est aujourd'hui appelée formule des traces de Selberg en son honneur.

Propriétés statistiques du spectre d'énergie

Les propriétés statistiques du spectre d'énergie d'un système physique classiquement chaotique sont très différentes de celle d'un système intégrable. Oriol Bohigas, Marie-Joya Giannoni et Charles Schmidt (Institut de physique nucléaire, Orsay) ont conjecturé que les propriétés des *fluctuations statistiques* du spectre d'énergie d'un système physique classiquement chaotique sont *universelles* (une fois normalisées), et bien décrites par un ensemble de matrices aléatoires qui ne dépend que des symétries du système.

Fuite d'information

La **fuite d'information**, appelée aussi **fuite de données**, peut être soit une déperdition soit une divulgation inopportun de données ce qui met en cause la sécurité matérielle et juridique de l'information.

Elle peut être spontanée, involontaire ou provoquée. Dans ce dernier cas, elle est produite pour des motifs divers, parfois légaux, souvent sécuritaires, éventuellement salutaires (détection, sauvetage, etc.). Mais dans de nombreux cas de figure, la fuite est largement répréhensible techniquement (moyens de captage électroniques et numériques, désinformation, etc.), moralement (délation, atteintes à l'intimité, etc.) et/ou juridiquement (secret de l'instruction, protection des brevets, vie privée, violation de secrets d'État, etc.). C'est parfois un objet de controverse, mais les moyens sont souvent jugés illégitimes, même lorsqu'ils s'inspirent d'une contre-culture visant la transparence à tout prix¹.

Étant de différente nature, sa définition reste ouverte (Cf. *Description*). Elle touche toutes les activités humaines, économiques, sociales et professionnelles, parfois jusqu'à l'intimité même des personnes (Cf. *Typologie*) et peut avoir des répercussions individuelles, institutionnelles ou économiques parfois graves, voire traumatisantes, dans une société médiatique et perméable, paradoxalement, de plus en plus sécuritaire.

Parallèlement, le phénomène interroge nos modes de fonctionnement, individuels et collectifs, pas seulement dans le monde de la communication ou celui de la sécurité, mais de manière plus globale quant à nos rapports avec la vie privée, l'économie, la politique et, tout à la fois, le rôle et la protection de l'État dans un espace mondialisé et intrusif instable.



Stations d'interception faisant partie du réseau d'écoutes planétaire Echelon initié par les États-Unis sur la base de Menwith Hill



La presse écrite et le monde des médias en général sont un grand vecteur de fuite, dans tous les domaines politiques, économiques et sociétaux, outre le développement récent de la peopolisation



La guerre tout azimut à laquelle se livrent, entre autres, les services secrets, ainsi que l'action de nombreux professionnels du renseignement, de la sécurité, de l'investigation et de la communication, alimentent, autant qu'elles génèrent, la fuite d'information (Siège de l'Intelligence Service, Vauxhall, Londres)



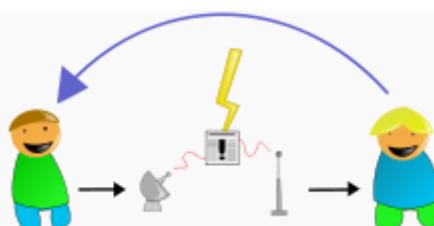
L'informatique, les multiples outils numériques et nouvelles technologies (NTIC) (ordinateurs, Wifi, smartphones, nanotechnologies, biométrie, etc.) ainsi que leurs diverses utilisations, par exemple sur les réseaux sociaux ou le fichage, sont déjà la source de nombreuses fuites malveillantes ou par imprudence pouvant envahir notre intimité.

Description

Si on laisse de côté la fuite d'information interprétée comme une information fuyante (inaccessible ou qui se dérobe) par exemple, dans la recherche, on peut cependant discuter la validité de la définition duale de l'introduction en remarquant, qu'au contraire de la *divulgation inopportune* qui laisse subsister l'information, la *déperdition* est une perte de l'information et non pas seulement une fuite. Cependant, cette perte n'est pas toujours irréversible et, à l'inverse, la divulgation porte souvent sur des informations tronquées dont les lacunes sont, de ce fait, parfois réellement perdues. On peut également invoquer que dans le cas de la divulgation, il y a appropriation de l'information par autrui, ce qui ne serait pas le cas dans la déperdition. Pourtant cela renvoie pratiquement aux mêmes exceptions. Par ailleurs, dans le cadre de cette dualité, on peut se demander ce qui n'est pas fuite d'information, exceptées les fuites de matières et de capitaux, lorsqu'elles ne véhiculent pas d'autres données que quantitatives. Ce qui revient à admettre une large palette de situations, conformément au postulat qui veut que tout est information². Toutefois, cette interprétation se traduit par un catalogue laissant à chacun la liberté de choisir une définition, plus restrictive ou plus large, de la notion.

La déperdition d'information

La déperdition d'information suppose une masse de données que viennent altérer certains éléments contingents. On raisonne plus ici en termes de stock que de flux, en l'espèce, s'agissant de sa diminution.



Le schéma très simplifié de Shannon

Les déperditions transactionnelles

Dans son schéma théorique de l'information Shannon pointe du doigt la déperdition de l'information durant le parcours que fait cette dernière entre l'émetteur (auteur) et le récepteur final (destinataire). Cette fuite est inhérente à la qualité des vecteurs qui justement s'approprient successivement cette information. Cela s'illustre, par exemple, dans la relation plus ou moins parfaite d'un fait, mais concerne aussi la copie matérielle plus ou moins fidèle d'une source sonore ou visuelle. S'agit-il plus ici d'une dépréciation que d'une fuite ? Notons que dans la relation défective d'un fait, l'information initiale ne disparaît pas forcément et peut même être retrouvée à l'état brut s'il est possible de remonter à sa source.

Les déperditions médiatiques

- Il peut s'agir aussi d'un phénomène tendanciel observé ces dernières décennies, visant l'affaiblissement du contenu informatif de différents médias (au sens large), journalistiques, publicitaires, cinématographiques, télévisuels, etc., notamment au profit de la place laissée aux messages ludiques, distractifs et flatteurs qui n'ont d'autres fonctions que d'exciter nos stimuli et notre émotivité. On y assimile parfois les messages commerciaux. Cette déperdition peut recouvrir une véritable rétention implicite de l'information que s'approprie l'un des détenteurs du contenu informatif qu'il ne retransmet pas ou peu. Mais cette notion de fuite de l'information controversée renvoie au choix de la définition que l'on retient pour identifier ce qu'est une information car, pour d'autres, plus en phase avec les idées de Weiner (cf. note 1), tout le domaine médiatique véhicule de l'information ; les modifications observées récemment ne seraient donc relatives qu'à la nature des informations et non à leur aménagement.
- Toutefois, une approche alternative relève au contraire une fuite d'information dans le trop plein d'informations qui assaille aujourd'hui nos sociétés par rapport à ce qui est réellement perçu par les destinataires³, au point que pour certains, se soustraire à cette vague d'informations permet au contraire de mieux s'informer⁴.

Les déperditions physiologiques

On peut évoquer un tout autre domaine où la fuite d'information est une déperdition, au sens génétique et médical cette fois, s'agissant des pathologies liées à la mémoire et au vieillissement comme, par exemple, dans le cas de la maladie d'Alzheimer. Certaines de ces fuites sont cependant réversibles (amnésies).

Les déperditions culturelles

- L'évasion culturelle est aussi une fuite d'information. On peut ainsi considérer le vandalisme ou le vol de livres, en tant que supports d'information, fréquents dans les bibliothèques, notamment universitaires⁵ ; idem pour les différents types d'archives, sources historiques parfois définitivement perdues. Les évasions patrimoniales (sculptures, peintures, architecture, etc.) sont également nombreuses, par exemple, les vols dans les églises françaises⁶, le pillage des sites archéologiques khmers⁷ ou, plus généralement, les vols dans les musées et les destructions dues aux guerres notamment.
- Dans cette catégorie, il faut aussi évoquer l'abandon à la dégradation du temps de chefs-d'œuvre architecturaux (ou vestiges significatifs), faute d'entretien ou d'en comprendre l'intérêt sur le moment, ou encore certaines restaurations controversées (par exemple en France, celles de l'architecte Viollet-le-Duc ou celles du sculpteur Girardon⁸) qui occasionnent une perte d'authenticité. Des territoires urbains ou ruraux peuvent aussi subir une fuite culturelle avec l'invasion du tourisme de masse et/ou le développement anarchique ou excessif de la construction. Tous ces types de fuites font disparaître, ou amoindrissent, des témoignages culturels, historiques et artistiques, souvent irremplaçables.
- D'une façon plus subtile, constituerait également une fuite d'information, le phagocytage d'une langue par une autre, c'est-à-dire un phénomène allant bien au-delà de

l'enrichissement naturel des langues entre elles. Tel serait le cas du franglais, par exemple. À ce titre, quelques pays francophones sont tentés d'avoir⁹, ou ont une législation protectrice à cet égard, comme le Québec et la France¹⁰.

Les déperditions numériques

Les déperditions informatiques résultent, notamment, des phénomènes des hackers et des virus. Ils peuvent engendrer une fuite d'information dans tous les sens des termes, perte et divulgation. Comme pour les livres, le voleur/hacker s'approprie réellement ou fictivement l'information qui disparaît de son lieu de stockage initial ou de son terminal de visibilité. Mais, comme pour les livres, les pertes de données informatiques peuvent parfois n'être que temporaires. Cependant, cette « fuite » les aura détournée de leur utilisation légitime. Au passage, elle aura fait craindre un partage partiel de l'information inopportun, donc une fuite réelle.

Les déperditions mémorielles

Enfin, l'oubli collectif et le temps qui s'écoule peuvent également être la cause d'une déperdition de certaines informations, d'un amoindrissement de ce que l'on appelle la mémoire collective, notamment de nature historique. Ces informations ne sont pas forcément perdues définitivement et peuvent parfois être retrouvées à plus ou moins long terme. Ici, la fuite emporte aussi la notion de dépréciation de l'information, c'est-à-dire non seulement de son oubli mais de sa perte d'intérêt en fonction d'une époque et/ou d'un pays donnés. D'où les commémorations et actions de mémoire destinées à lutter contre l'oubli (célébrations des anciens combattants, mémoire de la Shoah, etc.), mais aussi, la finalité des différentes disciplines historiques (histoire, archéologie, généalogie, etc), ainsi que les poursuites pour négationnisme. On peut toutefois revendiquer le droit à l'oubli dans un autre domaine qui est celui des condamnations pénales, dont le casier judiciaire garde normalement la trace. Dans beaucoup de pays, y compris en France, diverses mesures permettent de purger ledit casier de tout ou partie des informations qu'il contient (amnisties, effacements automatiques à condition de délai, réhabilitation, etc.). Ceci s'ajoute aux diverses prescriptions légales.

Autres déperditions et limites de la notion

Il y a d'autres types de déperditions pouvant être considérés comme une fuite d'information au sens large. Mais toutes ne rentrent pas dans notre notion. Par exemple, les déperditions de chaleur ne recouvrent qu'une notion quantitative, sauf lorsqu'il s'agit d'apprécier l'activité tellurique ou volcanique par ce biais, tout comme les fuites de matière et de gaz dans cette seule hypothèse car elles renseignent. Pareillement le corps produit et perd de la chaleur. Si on appréhende cette déperdition pour détecter la [vie](#) à distance, par l'infrarouge, par exemple, c'est une information. De même peut-on quantifier la température du corps par différents moyens, y compris extérieurs. Généralement c'est pour en tirer l'information consistant à savoir s'il y a fièvre ou non. C'est une fuite d'information, surtout si la prise de température est faite à l'insu et contre le gré de l'intéressé qui veut cacher son état de santé, par exemple. Mais ce que l'on exploite alors est une divulgation et non une déperdition. En outre, dans tous ces exemples, c'est le transfert de connaissances permettant l'interprétation de la fuite qui leur donne leur caractère informatif. Les fuites sonores, sauf à n'être qu'une nuisance diffuse, véhiculent généralement de l'information directe mais il s'agit également d'une divulgation inopportun et non d'une déperdition. Tout comme une déperdition d'OGM qui, en se transmettant, divulgue bien de l'information, génétique en l'espèce. Sans doute est-ce encore le même raisonnement qu'il faut suivre à propos des conséquences d'une pollution (chimique, par irradiation, etc.) si l'on veut bien considérer que cette forme de déperdition peut aboutir en définitive à divulguer et à transmettre, quel que soit le vecteur, une information (en l'espèce, de nature physiologique) aux êtres vivants et aux végétaux, susceptible de produire des effets réels sur l'organisme receveur. Enfin, peut-on aller jusqu'à considérer que l'embryon humain est en soi une masse d'informations génétiquement nécessaires à l'être potentiellement en devenir ? Si oui, sa destruction (réduction embryonnaire, destruction d'embryons surnuméraires ou inutilisés) serait aussi (toute autre considération mise à part) une déperdition d'information, en l'espèce définitive compte tenu de la singularité de chaque être humain.

La divulgation inopportunne d'information

Dans la compréhension habituelle, la fuite d'information concerne généralement la divulgation inopportunne de cette information. Il s'agit alors d'information censée devoir rester confidentielle voire secrète ou, en tout cas, qui a été divulguée au public ou à un tiers (institution ou autre personne privée) contre le gré ou, au moins, à l'insu de leurs détenteurs initiaux ou des personnes directement concernées par cette information. Intervient aussi le fait que le destinataire n'est pas toujours celui prévu et/ou que la divulgation est parfois seulement prématuée. Cela cause parfois un préjudice, variable suivant les circonstances. Cependant, il ne faut pas négliger les hypothèses où les fuites sont orchestrées au profit de la personne (ou l'institution) concernée par les informations divulguées.

On raisonne ici plus en termes de flux que de stock. La fuite d'information implique toujours un transfert de l'information et suppose au moins une source, un récepteur et, souvent, un vecteur de propagation. Le tout aboutissant à un partage non souhaitée de l'information. En cette matière, la presse et les journalistes sont en première ligne.

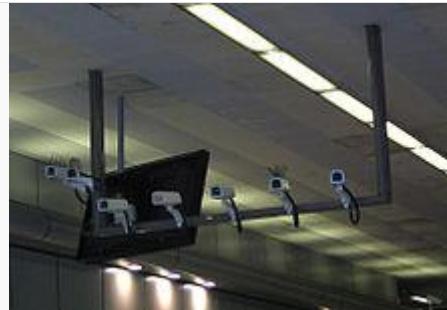
S'ils sont, en France, particulièrement exposés aux poursuites (perquisitions de la police, interrogatoires), la jurisprudence de la Cour européenne des droits de l'homme a depuis 1996 mises hors-la-loi ces poursuites, en estimant que la protection des sources d'information des journalistes est un pilier de la démocratie, sans lequel la liberté de la presse n'a plus de sens. La Cour européenne des droits de l'homme s'appuie sur l'Article 10 de la Convention européenne des droits de l'homme, qui précise de façon limitative les cas où la presse peut se voir sanctionnée en cas de publication (diffamation, sécurité des personnes) mais proscrit quoiqu'il arrive les perquisitions visant à empêcher les fuites d'information, au nom la protection des sources d'information des journalistes, principe de base de la Charte de Munich. En matière financière, elle a estimé que la publication par un journal de nouvelles sur une société cotée en Bourse, même s'il s'agit d'une "fuite d'information" contrevenant la volonté de ses dirigeants, était nécessaire pour empêcher le délit d'initié et respecter le principe d'égalité entre tous les actionnaires.

Distinction et assimilation

- *Quant au fait constitutif de la fuite* - L'influence du vecteur de propagation, notamment les médias, sur l'ampleur de la fuite peut inciter à distinguer la fuite d'information elle-même, de sa divulgation, bien que les deux phénomènes soient souvent intimement liés, notamment lorsque c'est la divulgation qui matérialise la fuite. Ainsi le viol de l'intimité du domicile ou du corps est l'occasion d'une fuite d'information qui en est la conséquence. Mais, sauf s'il y a vol d'un document ou captage visuelle (photo, vidéo), la fuite se confond avec l'acte.
- *Quant au fait générateur de la fuite* - Soulignons ainsi que la frontière est excessivement mince entre la fuite d'information et l'espionnage, l'un étant, dans ce cas, la conséquence de l'autre. En outre le processus est semblable, en particulier, chaque fois que la source de l'information est complice (de gré, de force ou involontairement). On peut donc, aussi, assimiler la négligence ou l'imprudence manifeste, conduisant à la divulgation non autorisée d'informations, à la fuite d'information, fut-elle dans ce cas, involontaire. Mais la fuite peut être générée par une obligation légale, consécutive au comportement volontaire de la personne concerné par la fuite, du fait que cette dernière ne mesure pas toujours la portée de son attitude puisqu'elle n'est que rarement informée de l'obligation de rompre le secret professionnel, dans certaines hypothèses, qu'ont certaines professions (avocats, professionnels du social, médecin, etc.), ou des possibilités de consultation et d'accès à des données sensibles qu'ont certaines administrations (Cf. infra).
- *Quant à la véracité du contenu* - Il faudrait sans doute distinguer entre la fuite d'informations vraies et la fuite d'informations fausses qui, elle, s'assimile plus à la rumeur et à la désinformation. Cependant, la fuite d'informations orchestrée par un délateur anonyme (corbeau) ou par un service de renseignement (à des fins d'intoxication) est à la frontière de ces deux sphères puisqu'il peut s'agir du colportage autant de fausses que de vraies informations, tout comme c'est le cas du contenu de la presse people et de ses supposées

fuites d'information. En outre, le caractère tronqué qui accompagne généralement toute fuite d'information a bien pour effet mécanique de travestir la vérité; sans compter que les sources sont parfois incertaines, erronées¹¹ou incomplètes¹².

Une notion multiforme



La vidéo-surveillance, parmi d'autres technologies et pratiques, alimente la crainte du Big-Brother (sortie de Birmingham new street station-Londres)

- *Quant aux motifs de la fuite* - La fuite d'information peut être faite avec des intentions malveillantes, voire pour manipuler les destinataires. Mais tel n'est pas toujours le cas. Le but peut seulement être informatif. Mais il peut aussi être sécuritaire, avec pour arrière plan, tout le débat sur le Big Brother qui nous guette.
- *Quant à la vectorisation de la fuite* - La divulgation d'information est surtout une fuite horizontale. En effet, diverses situations, notamment administratives, nous contraignent à divulguer ou à partager de l'information que l'on souhaiterait rester confidentielle. Le droit organise surtout leur cantonnement et leur cloisonnement, donc de manière horizontale, et c'est aussi de cette façon transversale que l'information peut fuir en sortant de son cocon initial vers d'autres sphères. Cependant, à l'intérieur d'une même sphère, l'information peut être utilisée à d'autre fins que celles qui sont prévues (par exemple, l'utilisation des données du recensement national par la commune). On est alors en présence d'une fuite de nature verticale. Plus indéterminées sont les fuites provenant du partage de l'information (du moins lorsqu'elles ne sont pas autorisées) entre les acteurs sociaux et les services de santé, ou/ et les services de police. Il s'agit plutôt d'une fuite verticale au sein de l'administration (envisagées globalement), mais d'une fuite transversale inter-service.
- *Quant aux modalités de la fuite* - La source peut se présenter de différentes façons : concours volontaire ou non, vol ou captage à l'insu de celle-ci. Surtout, il faut naturellement envisager l'information sans égard pour sa forme. Ainsi, la divulgation non voulue d'une photographie peut, d'une certaine façon, constituer une fuite d'information de par son contenu¹³. Comme pour la déperdition, il s'agit de toutes données divulguées.
- *Quant au caractère inopportun de la fuite* - Ainsi, en est-il aussi de toutes traces laissées par l'activité humaine. Mais, en ce domaine, toute fuite ne semble pas inopportune. Par exemple, c'est bien parce que notre corps génère une fuite d'informations diverses, que le chien d'avalanche ou de séisme, ou certains appareils de détection (sonores ou de chaleur), réussissent à détecter des ensevelis. Il s'agit là d'une fuite salutaire. Cependant, la même technique employée en cas de guerre pour détecter un ennemi caché, devient inopportune pour l'intéressé. On pourrait même envisager la fuite d'information au niveau spatial, celle que nous émettons au niveau terrestre, comme celle que nous tentons de détecter en vue de l'hypothèse qu'existe une autre civilisation, sans penser aux conséquences éventuellement néfastes qui pourraient en résulter. Cela incite donc à considérer toute fuite d'information, comme étant potentiellement inopportune.

En fait, ce qui semble définir la divulgation de fuite, ce n'est ni les circonstances, ni sa nature, ni son contenu, mais le fait qu'elle n'est pas voulue, ou non souhaitable, du moins en vue d'une utilisation donnée, à un moment donné. Enfin, l'appréhension d'une fuite illégitime par le droit

couvre généralement autant la fuite elle-même que ses manifestations. Ainsi, par exemple : la fuite d'intimité matérialisée par le viol du domicile ou le piratage de coordonnées bancaires qui se découvre à l'occasion d'une ponction illicite sur un compte.

Ainsi définie, la divulgation d'information s'observe notamment en matière judiciaire, en matière économique, en matière de sécurité-défense, en matière politique et en matière de vie privée. Les fuites ne sont pas systématiquement répréhensibles mais, suivant les pays, il s'agit souvent d'un délit, plus exceptionnellement d'un crime (sécurité de l'État).

Typologie des cas de divulgation inopportune

Les fuites policières et judiciaires

Notons d'abord que les fuites en matière judiciaire occasionnent une fuite de vie privée (voir ci-après cette notion) à laquelle elles portent généralement atteinte. C'est le cas en France où, bien souvent, elle écorchent le principe de présomption d'innocence que protège, en particulier, le secret de l'instruction - cela est particulièrement vrai, par exemple, dans l'affaire Baudis-Alègre qui éclata en France en 2003¹⁴ - et l'interdiction de diffuser des images du prévenu menotté¹⁵.

Les fuites policières

- La fuite d'information est par excellence ce que l'enquêteur de police judiciaire attend de son travail d'investigation, à l'affût des confidences de ses indicis ou citoyens-informateurs, au besoin rémunérés¹⁶, ou de la moindre trace laissée par l'auteur d'une infraction à son corps défendant. Ainsi par le passé, l'empreinte digitale; aujourd'hui, une quantité de moyens techniques, à la disposition des services scientifiques, pour détecter, par exemple, une empreinte génétique dans l'ADN, ou les traces de sang par chimiluminescence pour débusquer crimes et délits. Indépendamment du fichage de ces données qui peut donner lieu à des fuites policières, notamment en direction d'obscures officines¹⁷ recrutant d'anciens fonctionnaires de police qui continuent dans le privé leurs activités passées du fait de l'application parfois laxiste de la réglementation concernée (article 2 du Décret - Loi du 28 septembre 1942)¹⁸. Sans compter que ce fichage est lui-même ressenti comme une fuite d'intimité (Cf. supra). En Israël, une ville compte même établir un fichier ADN à partir des crottes de chiens pour verbaliser l'incivilité des maîtres¹⁹. Pour les besoins de l'enquête un juge français peut enfin décider des écoutes téléphoniques et des intrusions nécessaires²⁰ et l'infiltration des policiers est permise. La loi française prémunit les indicateurs contre toutes fuites concernant leur anonymat, y compris les repentis²², à charge pour les services de polices et la justice de le leur garantir. C'est aussi le cas au Canada, par exemple, avec le programme "Échec au crime".
- Par contre, les indiscretions concernant la connaissance des éléments de cette enquête de police judiciaire, par exemple le contenu d'une audition ou la publicité donnée à une perquisition, constituent, en France, une fuite d'information répréhensible, généralement du fait d'un fonctionnaire de police, le plus souvent au profit de journalistes qui s'en feront l'écho. En France, ledit fonctionnaire viole ainsi son devoir de réserve et le secret professionnel. Certains journalistes français comme Jean-Michel Decugis témoignent cependant que les services de police alimentent eux-mêmes les fuites²⁵. En outre, la pression des médias et la guerre entre services judiciaires incitent parfois les intéressés à s'exprimer largement sur leur enquête, comme ce fut manifeste, en France, lors de l'affaire Grégory-Villemin dans les années 1980. En outre, ces fuites sont courantes, notamment lors du transport du prévenu par la police sur les lieux d'investigation et de fouilles²⁶.
- En revanche, les fuites pourraient avoir des vertus civiques. Cas, en France, des forces de l'ordre faisant parfois de la rétention d'information afin de protéger leur activité. Ainsi, faute d'avoir bénéficié d'une fuite à ce propos, un avocat a dû aller devant la Cada (voir ci-dessous) pour obtenir le document concernant le bon usage de l'éthylotest lors des contrôles routiers d'alcoolémie²⁷.

Les fuites de l'instruction

- La fuite peut également intervenir au cours de l'instruction judiciaire proprement dite, sur le contenu du dossier, sur les investigations menées par le juge (perquisition, notamment documents et objets saisis²⁸, reconstitution, expertises, analyses génétiques, etc.) ou sur les décisions prises ou envisagées (mise en examen, non-lieu, etc.). Elles sont généralement le fait du personnel judiciaire (magistrats ou greffiers, voire d'un conseiller auprès du Garde des sceaux, notamment) et se produisent principalement au profit des médias ou d'une partie tiers. Il s'agit alors du viol du secret de l'instruction.



Les fuites peuvent provenir de la justice, mais elles peuvent aussi se terminer devant la justice lorsqu'elles sont répréhensibles (vue du palais de Justice de Paris - France)

- Toutefois, les parties au dossier, notamment les avocats, peuvent généralement, librement, en principe, livrer des informations au public concernant leurs clients et leurs affaires, si tel est le vœu et l'intérêt de ces derniers. Mais en France, il s'agit d'un fil d'équilibriste où les avocats ne peuvent se risquer qu'avec prudence. Il faut tenir compte des cas sanctionnés par la loi Perben II (mars 2004) et la justice est prompte à les condamner pour atteinte au secret de l'instruction, doublée de la violation du secret professionnel dans le cas de confidences imprudentes³², ou du fait que notre système inquisitorial ne les autorise pas à procéder à des investigations (voir ci-après, un exemple).
- Enfin les juges sont parfois conduits à faire eux-mêmes la publicité de leur instruction comme un moyen de se défendre d'un risque que l'affaire qu'ils instruisent soit étouffée; soit parce qu'elle est politique : on a vu ainsi en France les juges Jean-Pierre (affaire Urba) et le procureur de Montgolfier (affaire Tapie), notamment, utiliser les médias à cette fin; soit qu'elle est politico-mafieuse comme en Italie, pour surmonter la corruption de l'institution.

Les fuites du jury

Notons également les cas de fuites relatives aux délibérations des jurys d'assises, les jurés étant, comme les magistrats, tenus au secret professionnel. Cependant, en France, dans l'affaire d'Outreau (2001/2005), certains jurés ont violé le secret des délibérations pour faire part de leur malaise, voire de leur remords, sans qu'il y ait eu de suites judiciaires.

Répression des fuites relayées par la presse

- Dans l'un ou l'autre cas, la presse, qui publie ce type d'information (par exemple, un procès-verbal d'audition), est parfois inquiétée pour recel. En France, malgré la garantie théorique qu'offre en cette matière la Convention européenne des droits de l'homme (CEDH), interviennent alors, perquisition des locaux et garde à vue de journalistes. Il arrive donc que des journalistes français soient condamnés pour ce motif, ce qui provoque l'indignation de la profession³⁴. En fait est ici posé le problème général de la protection des sources journalistiques, en l'absence d'une reconnaissance du secret professionnel, et alors que la loi Perben II (précitée) indique qu'un journaliste refusant de témoigner en ce sens, pourra être « requis » de remettre des documents et qu'une perquisition pourra être ordonnée à cette fin³⁵.

- Les relations presse-Justice-police sont néanmoins ambiguës et complexes. La presse est aussi prompte à bénéficier des fuites policières³⁶ et judiciaires qu'à dénoncer les atteintes notamment au secret de l'instruction et la Justice, elle-même, se sert parfois de la presse³⁷, tout comme la police qui compte parfois, au titre de ses indicateurs référencés, un certain nombre de journalistes³⁸ ou qui les utilise pour publier les informations qu'elle souhaite, sans apparaître³⁹. Lorsque l'heure est à la répression, les juges n'ont cependant pas toujours la tâche facile. Pour exemple, la tentative avortée de perquisitionner les locaux du Canard enchaîné en mai 2007 par le juge français Cassuto qui cherchait à identifier la source ayant communiqué au journal le PV d'audition du général Rondot (affaire Clearstream)⁴⁰. Cette fois la fuite concernant les sources a été évitée, mais la fuite judiciaire est restée impunie. La loi sur la liberté de la presse du 29 juillet 1881 est en passe d'être renforcée pour, à la fois, mieux protéger les sources des journalistes (consulter l'article 109 du Code de procédure pénale) et réglementer les atteintes pouvant y être portées par exception.

Les fuites économiques

Le monde est en guerre économique et la guerre de l'information est au premier rang de ses manifestations. Par exemple, il existe de multiples officines d'intelligence économique, qui emploient tous les moyens, de l'exploitation des confidences lors d'un dîner d'affaires, jusqu'aux méthodes traditionnelles, numériques et technologiques de l'espionnage classique, et ce, jusqu'aux frontières de la légalité⁴². En ce domaine, la porosité avec le monde de l'entreprise ou des finances et celui de l'administration est de mise, soit par la corruption ou la déstabilisation, soit par le recrutement d'anciens cadres ou fonctionnaires retraités (notamment policiers, militaires ou gendarmes) qui importent leurs savoir-faire, leurs carnets d'adresses et leurs fichiers. Certaines administrations agissent parfois de concert avec ces officines¹⁷, au profit de la protection et du développement de leurs entreprises nationales sur les marchés mondiaux, comme aux États-Unis avec l'exemple du Cabinet Kroll qui emploie d'ailleurs quantité d'anciens de la CIA. En France, la prise de conscience est plus récente⁴³mais le même phénomène existe comme en témoigne, par exemple, Patrick Baptendier (Également supra).

Les fuites financières et boursières

Les fuites peuvent concerner la situation réelle d'une entreprise cotée en Bourse, des projets de rachat ou de fusion, de futurs projets ou contrats en cours de négociation, etc. En France, si la connaissance d'informations divulguées à un petit nombre débouche sur des opérations financières ou boursières concernant l'entreprise visée par ces fuites, en vue par exemple de vendre des actions (ou au contraire d'en acheter), avant que soient connues de tous des informations qui leur font perdre leur valeur (ou au contraire en rehaussent la valeur), cela peut constituer un recel de délit d'initié (exemple : l'affaire EADS). Mais ici, ce n'est pas la fuite qui est punissable mais son utilisation frauduleuse par les détenteurs privilégiés d'informations sensibles. En France, l'Autorité des marchés financiers (AMF) est chargée de s'en inquiéter et d'engager les poursuites devant les juridictions pénales, si nécessaire. Mais ce délit reste difficile à prouver.

Les fuites industrielles et commerciales

En ce domaine, les fuites sont nombreuses et pourtant, selon certains sondages, 95 % des entreprises ne seraient pas conscientes de celles qui concernent notamment leur fonctionnement⁴⁵. Pourtant, les fuites sont principalement consécutives à l'espionnage de leurs concurrents et selon Frédéric Ploquin, pour les « patrons-espions, tous les moyens sont bons »⁴⁶.



En matière économique, les espions et les hackers sont comme des pirates des temps modernes à l'affût de leur trésor : la fuite d'information

Les fuites par espionnage ou malveillance

- La fuite d'information peut intervenir à l'occasion d'un espionnage industriel, commercial ou scientifique dont est, par exemple, complice (volontaire ou négligent) un membre du personnel de l'entreprise spoliée. Au minimum, il s'agit d'une atteinte à la concurrence. Tel fut, par exemple, le cas en 2006/2007 en Formule 1 avec les affaires Ferrari-McLaren-Renault, celle de Coca-Cola ou celle chez Michelin-France. Le groupe Valeo-France n'a pas été épargné non plus⁵⁰. Il peut s'agir aussi de divulgations et de copies de licence, souvent par espionnage ou malveillance, qui visent notamment l'atteinte à la propriété intellectuelle (droit des marques, droit d'auteur, etc.) et éventuellement le domaine des contrefaçons. Il peut enfin s'agir de la revente des plans stratégiques de l'entreprise (plan recherche, plan financier, plan marketing, plan partenarial, etc.) ou de l'évaluation plus globale des acteurs d'un marché (financier ou commercial) ou encore de celle d'une transaction, d'un projet, etc.
- Cependant, le risque d'espionnage économique par voie numérique et internet est en passe de devenir le problème majeur. Différents stratégies et moyens d'intrusion à distance existent, à commencer par les enregistreurs de frappes (keylogger), matériels ou logiciels, permettant de trouver tous les mots de passe⁵¹ protégeant l'accès au réseau et aux fichiers de l'entreprise. Évoquons aussi la technique de l'abandon volontaire au bon endroit d'une clef USB, recelant un mouchard logiciel, dans l'espoir qu'elle soit ramassée puis connectée⁵². Cela permet ensuite de récupérer les données du réseau ainsi pénétré. À cela s'ajoutent toutes les techniques de hacking et d'intrusion logicielle. Bien que l'on retrouve aussi certaines de ces techniques en matière de viol de la vie privée par voie électronique (ci-après), ces risques de fuites ont fait naître un nouveau métier de spécialiste de la sécurité industrielle et commerciale, y compris au sein de la gendarmerie et de la police qui disposent, notamment, de cellules spécialisées dans l'intelligence économique⁵³ et d'une brigade centrale pour la répression des contrefaçons industrielles et artistiques.
- Enfin, plus encore, il y a les risques de fuites par l'exploitation malveillante du manque de précautions de la part de l'entreprise et de son personnel. Comme le souligne un

spécialiste, *l'information stratégique filtre sans que l'on en prenne conscience et peut être interceptée par la concurrence*⁵⁴. Hors des locaux de l'entreprise il faut tenir sa langue, masquer ses documents, utiliser des écouteurs pour travailler sur un enregistrement ou baisser la luminosité de son écran d'ordinateur, par exemple dans le train ou au restaurant; se méfier des imposteurs lors d'un salon ou d'un séminaire ; et sanctuariser ses données face au risque informatique, notamment les intrusions sans fil.

Les fuites à partir de l'entreprise

- Les fuites peuvent aussi résulter du cas plus banal du départ d'un employé s'en allant avec un savoir-faire spécifique ou un processus acquis dans l'entreprise (malgré les clauses de non concurrence). Même si dans la majorité des cas, ceci est à restituer dans le cadre de l'expérience engrangée par l'agent, et n'est pas nécessairement délictuel, il ne s'agit pas moins d'une fuite d'information, parfois irremplaçable quand seul cet agent avait acquis cette compétence particulière.
- Parfois, cependant, il peut également y avoir atteinte à la propriété intellectuelle de l'entreprise, par exemple, lorsqu'un employé part avec un fichier client qu'il a pourtant lui-même monté (qui, en France, demeure néanmoins la propriété de l'entreprise), ou s'envoie via internet, dans sa boîte mail personnelle, un document de travail quelconque (même remarque). À ce propos, il est pourtant à noter, que selon les spécialistes, la plupart des fuites d'informations en entreprise par voie numérique, résultent de simples erreurs et d'imprudences de la part des collaborateurs⁵⁵. Par exemple, l'oubli (assez fréquent) d'un document sensible sur une imprimante⁵⁶. Ces fuites peuvent cependant occasionner aussi un préjudice aux clients de l'entreprise, raison pour laquelle, aux États-Unis, une loi existe qui oblige les entreprises à prévenir leurs clients si elles ont été victimes d'une fuite d'informations⁵⁷.
- Enfin, les entreprises et les professionnels peuvent, comme les particuliers, être l'objet de perquisitions (voir ci-dessous). Certaines professions libérales bénéficient toutefois, en France notamment, de garanties supplémentaires, comme c'est le cas des avocats, des médecins, des notaires et des huissiers. La perquisition de leurs locaux professionnels nécessite la présence d'un magistrat et d'un membre de l'ordre concerné et ceci, dans le strict respect de la protection du secret professionnel (voir ci-dessous). Idem pour les entreprises de presse où la présence d'un magistrat doit garantir que les investigations conduites ne portent pas atteinte au libre exercice de la profession de journaliste, ni ne ralentissent ou n'interdisent la parution.

Les fuites sur les rémunérations des grands patrons

Contrairement au monde anglo-saxon, en France, les éléments de rémunération et les salaires des dirigeants des grandes entreprises sont un sujet tabou, bien que les rémunérations des patrons du CAC 40 soient publiées. Cependant, la publication par le *Canard enchaîné* en 1989 du fac-similé des avis d'imposition de Jacques Calvet, le patron de Peugeot, fut considérée comme une fuite admissible dès lors que son intérêt dépassait la personne concernée. Depuis les révélations du *Point* et du *Monde* en 2000 sur les conditions financières généreuses du départ forcé de Philippe Jaffré de chez ELF Aquitaine, l'attention du public français est constamment alimentée par des fuites sur les parachutes dorés, jugés scandaleux, dont bénéficient quelques grands dirigeants et notamment le montant de leurs stock-options et de leur retraite-chapeau (complément à leur retraite légale). Cas par exemple de Jean-Marie Messier en 2003 lorsqu'il fut contraint de démissionner de Vivendi. Idem en 2005 du départ en retraite de Daniel Bernard, PDG de Carrefour, ou en 2006 s'agissant des indemnités de départ de Noël Forgeard, coprésident du géant aéronautique EADS, etc⁶⁰. Ces fuites, et les polémiques qui s'ensuivirent, ont même amené l'un d'entre eux, Pierre Bilger, l'ex-patron d'Alstom, à rendre ses indemnités de départ en 2003⁶¹. Mais c'est encore grâce aux fuites que l'on sait que le problème demeure en France en 2008 avec, par exemple, le cas de Denis Gautier-Sauvagnac, patron démissionnaire de l'UIMM. Courant octobre, en pleine crise financière, les fuites concernant le parachute doré du patron de Dexia, Axel Miller, ont amené le Président de la République à confirmer sa volonté de mieux encadrer les modes de rémunération des dirigeants de manière à éviter à l'avenir de

nouveaux abus⁶³. Elles ont aussi poussé Bercy à exiger du groupe Dexia qu'il contraigne Axel Miller à renoncer à ses indemnités estimées à près de 3,7 millions d'euros⁶⁴. Une volonté qui s'est partiellement retrouvée, s'agissant de l'encadrement des rémunérations des dirigeants du secteur bancaire et financier, dans les décisions du G4 élargi qui s'est tenu à Paris en octobre 2008⁶⁵.

Les fuites de matière grise



Le professeur Montagnier, prix Nobel de médecine (2008), sera un temps la figure emblématique de la fuite des cerveaux français

On peut aussi évoquer ce que l'on nomme en France la fuite des cerveaux, à propos des chercheurs, universitaires, scientifiques qui s'en vont exporter leur savoir à l'étranger (divulgation du savoir national et déperdition de l'information générale du pays), soit parce qu'ils sont mis à la retraite d'office en vertu de règles trop rigides, comme pour le professeur Luc Montagnier⁶⁶, soit qu'ils s'en aillent rechercher des conditions de rémunération plus décentes, qu'ils soient seniors ou jeunes diplômés⁶⁷, ou bien simplement parce qu'il leur est parfois impossible de trouver un poste dans leur pays d'origine. Cette fuite qui existe dans les pays occidentaux (le gouvernement italien a récemment lancé une vaste opération destinée à aider les jeunes enseignants-chercheurs ayant trouvé un poste à l'étranger à revenir en Italie) est également observable dans les pays en développement, notamment en Afrique. Les pays riches favorisent ce mouvement. Ainsi, les politiques dites "d'immigration choisie", calquées sur le modèle nord-américain, ayant cours dans certains pays européens (Allemagne, France, etc.) ont bien pour effet notamment d'attirer dans ces pays les étrangers les plus qualifiés, de même que l'accueil d'étudiants étrangers dans certaines filières en fin de formation.

Les fuites technologiques

- On peut également considérer comme une fuite d'information les transferts de technologie inopinés. Il ne s'agit pas de ceux qui résultent légitimement de la vente clef en main d'une usine, avec formation des ingénieurs du pays, et qui sont l'objet même d'un contrat. Il s'agit plutôt de ceux qui suivent parfois la commercialisation des produits et la sous-traitance à l'export, qui sont l'occasion pour les pays émergents de s'accaparer les connaissances techniques en copiant les produits, avant de développer eux-mêmes des industries de pointe venant concurrencer celles des pays industrialisés. Ce fut le cas par le passé du Japon et des pays de l'Est. C'est en ce début de XXI^e siècle le cas des pays asiatiques, surtout de la Chine et de l'Inde, où la protection des brevets est quasi inopérante.
- Plus pernicieuses sont les fuites de savoir faire consécutives à la reprise prémeditée d'une entreprise par un groupe généralement étranger qui, avant de liquider ou délocaliser ladite entreprise, s'approprie tous les process et la clientèle de celle-ci.

- On craint aussi une fuite de technologie lors de la vente du nucléaire civil, qui peut être un apprentissage du nucléaire militaire pour des pays qualifiés de « pays-voyous » par l'administration américaine.

Les fuites marketing

Ces fuites, généralement publiées dans la presse, sont par exemple destinées à faire connaître en avant-première au public la sortie d'un nouveau produit.

- Dans le domaine industriel - La sortie d'un nouveau modèle automobile fait souvent l'objet de ce genre de fuites (exemple français de la nouvelle Laguna III de Renault), tout comme l'éventualité des dernières évolutions d'un produit, en particulier dans le multimédia. On pense, par exemple, aux spéculations qui entourent la sortie des nouveaux produits de la firme américaine Apple et aux fuites réelles ou supposées dont font état les sites de rumeurs spécialisés à son propos. Cela peut parfois donner lieu à des poursuites à l'encontre d'employés ayant manqué à leur devoir de confidentialité, notamment lorsque ces derniers s'étaient engagés à s'y soumettre⁶⁹, voire à l'encontre de distributeurs trop bavards ou des médias s'étant fait l'écho de fuites, comme des sites internet de rumeurs et de news informatiques⁷⁰. Certaines fuites peuvent cependant être orchestrées pour alimenter le buzz autour d'une marque⁷¹.
- Dans le domaine littéraire - La sortie d'un prochain livre peut aussi faire l'objet de fuites, parfois réprimées, comme en témoignent les prémisses de la publication des derniers titres d'Harry Potter (acheteurs canadiens interdits de lire le livre vendu par erreur avant l'heure⁷², publication sur internet d'une version traduite en français avant la publication en France⁷³) ou celle de certains livres politiques dont les principaux passages sont publiés avant leur sortie, pas toujours avec l'accord de l'éditeur ou de l'auteur⁷⁴ bien que cela puisse faire aussi partie d'un plan marketing.

Les fuites consécutives au piratage

- Les fuites au détriment de l'entreprise - Le piratage musical ou cinématographique et autres (vidéos), est en soi une fuite d'information frauduleuse, violant la propriété intellectuelle, susceptible de mettre en cause la survie de tout un secteur commercial et artistique. En particulier, cela concerne le débat autour du téléchargement P2P, ou celui concernant les DRM censés protéger de toute copie illicite, mais aussi celui autour de tous les sites hébergeant ou diffusant gratuitement de la vidéo comme YouTube, par exemple, parfois jugés responsables ou complices de cette éviction.
- Les fuites au détriment des clients - On pense principalement au piratage des fichiers ainsi qu'au piratage bancaire aboutissant à des escroqueries à la carte bancaire, notamment, dont les sources peuvent être diverses : imprudence des détenteurs, mais aussi, mauvaise sécurité des circuits de paiement sur Internet ou des systèmes informatiques des banques. Dans ces derniers cas, la responsabilité des entreprises bancaires est en cause et la fuite se fait finalement aussi à leur détriment. Le piratage du compte du président de la République française en septembre 2008 démontre que ce type de fuite peut toucher tout le monde. Cette affaire a d'ailleurs conduit à saisir le « Conseil consultatif du secteur financier » pour qu'il envisage une meilleure protection des données personnelles en France dans ce domaine.

Les fuites en matière de sécurité-défense

En France, comme dans de nombreux pays, la défense couvre le vaste champ du militaire, du civil et de l'économique, auxquels est venu s'adjointre le champ culturel, ce qui multiplie les domaines sensibles qui sont autant de risques de fuites de toute nature. Des mécanismes de protection sont prévus mais toutes les informations sensibles ne bénéficient pas ou ne méritent pas une protection renforcée. En revanche, dans beaucoup de pays, y compris en France, la notion de "secret d'État" est étendue à nombre d'informations pour bloquer certaines investigations jugées gênantes pour le pouvoir en place⁷⁵ ou empêcher toute fuite politique (voir ci-après). Par ailleurs, ici plus que dans tout autre domaine, l'informatique est un risque de fuite supplémentaire, en pleine mutation.

Une protection fragile tournée aussi vers l'exploitation de fuites

- La sécurité d'un pays est globalement organisée pour protéger les informations sensibles et empêcher leur fuite : sûreté générale, classification de certaines informations, droit d'accès, habilitation, classification et protection de points sensibles (lieux ou équipements stratégiques), etc. Cependant, aucun système n'est infaillible et les failles permettent parfois l'intrusion et les fuites, sans compter le relâchement et la négligence que peut connaître le système lui-même.



La CIA a été critiquée à maintes reprises pour sa manière parfois brutale d'obtenir de l'information

- À l'inverse, les nombreux services spécialisés de l'État, y compris l'armée, en France comme ailleurs, qui sont chargés de la sûreté du pays et du contre-espionnage, sont aussi dédiés, plus ou moins, au recueil du renseignement⁷⁸, c'est-à-dire à profiter, parfois en marge de la légalité, de toutes les failles sécuritaires et fuites d'information, de quelque nature et de quelque origine qu'elles soient (ROHUM, ROSO, ROEM ou ROIM).
- Les méthodes pour y arriver sont diverses⁷⁹, et parfois en marge de la légalité même dans des États de droit comme la France, où la légitimité primerait parfois sur la légalité. Elles sont nettement répréhensibles, et cela finit toujours par filtrer, lorsque certains services, y compris l'armée, recourent à la torture humaine ou à des moyens dégradants, comme ce fut le cas, par exemple, derrière le rideau de fer à l'époque de la guerre froide dans les années 1950-1970, voire de la part de certaines démocraties dans leurs luttes coloniales⁸¹ ou anti-terroristes récentes⁸². Il y a aussi l'usage de substances psychotropes (sérum de vérité) pour soutirer de l'information aux prisonniers de guerre ou aux personnes interrogées par la police ou les services spéciaux de certains pays peu respectueux des droits de l'homme. Sans compter les moyens de chantage appuyés sur un enlèvement ou toutes autres opportunités. L'utilisation d'un satellite, d'un avion espion ou d'un drone pour recueillir de l'information stratégique de terrain est tout autant illicite mais plus banale. En outre, et à cette fin, des avions comme le célèbre F-117 américain sont spécialement profilés pour être furtifs, c'est-à-dire avoir le moins de fuites électromagnétiques possibles pour ne pas être détectés. Il en est de même de certains navires de guerre et sous-marins.
- Certains pays, comme les États-Unis, ont de « grandes oreilles » (ensemble des technologies de captage et d'espionnage à distance) qui leur donnent des capacités d'écoute et de pistage au niveau planétaire pour surveiller tout échange par télécopie, téléphonie ou internet grâce notamment au réseau Echelon. En complément, des avions espions truffés d'électronique permettent la géolocalisation et l'interception des communications. En Suisse existe un système semblable à Echelon mais en plus modeste : Onyx. En France, en dehors de ces moyens qui existent aussi à une échelle plus modeste (par exemple les systèmes Emeraude et Frenchelon), les écoutes téléphoniques, dites « administratives » (par

opposition aux écoutes judiciaires) peuvent être ordonnées légalement en temps de paix, par le Premier ministre, notamment en cas d'affaires intéressant la sûreté de l'État, la Défense nationale ou la sauvegarde du potentiel économique ou scientifique de la nation⁸⁷. Ces écoutes qui génèrent des fuites d'intimité sont courantes et réglementées dans toutes les démocraties.

- Enfin, la lutte contre le terrorisme autorise notamment les États-Unis à des pratiques intrusives dans l'intimité des individus. Les douanes américaines questionnent par exemple les arrivants sur leur famille, leur pratique religieuse, etc. En outre, depuis 2007, elles peuvent voir, analyser et copier les documents personnels des voyageurs sans un soupçon préalable de violation de la loi. En pratique, cette investigation porte aussi bien sur les documents papiers, que les fichiers informatiques dans les ordinateurs portables, les téléphones mobiles ou autres appareils électroniques pouvant contenir des données.

Les fuites émanant des administrations de sécurité-défense et des organes politiques

- Le pouvoir politique pose également des problèmes de sécurité. Ainsi les déplacements et la présence d'un chef d'État ou d'un haut dignitaire en zone d'insécurité ne sont jamais annoncés à l'avance⁸⁸, de même que, d'une manière générale, les trajets empruntés et les dispositions prises pour ce faire. En dehors de l'espionnage classique, il arrive cependant que des fuites administratives, relayées par les médias, se produisent et soient susceptibles de les mettre en danger. On peut citer à cet égard l'exemple du voyage effectué par le président français Sarkozy en Afghanistan fin 2007, celui de la présence sur ce même théâtre d'opérations du prince Harry du Royaume-Uni début 2008 ou celui de la logistique des déplacements du président américain Bush fin 2007.
- À l'inverse, il arrive que les dirigeants politiques, le cas échéant imprudents, ou à leur insu, puissent être à l'origine de fuites d'informations sensibles à cause de leurs fréquentations douteuses. On se souvient par exemple du scandale Profumo qui toucha le Royaume-Uni en 1963⁸⁹ ou de celui que déclencha l'affaire Günter Guillaume en Allemagne (RFA) dans les années 1970. La fuite peut aussi être consécutive à leur distraction. Telle celle de l'ancien ministre des affaires étrangères canadien Maxime Bernier qui en mai 2008 oublie un document classifié chez son ex-épouse
- Cependant, pour des raisons politiques, les détenteurs de secrets d'État peuvent parfois être complices d'une fuite comme le président américain Bush en a été accusé en 2006 pour soutenir sa décision de déclencher la guerre en Irak.
- Une imprudence administrative au plus haut niveau politique peut également être à l'origine de fuites mettant en péril l'un des dispositifs de sécurité du pays⁹⁷, les fonctionnaires n'étant, par ailleurs, pas à l'abri de commettre des imprudences par distraction ou de laisser filtrer une information par pure malveillance. L'une des curiosités des agissements de l'administration américaine en matière de sécurité est qu'elle laisse se développer Intellipedia qui est un wiki classifié, semblable dans son fonctionnement à Wikipédia, mais utilisé pour partager des renseignements secrets entre les différents services des États-Unis et qui semble sans protection spéciale contre les fuites.
- Enfin, les fuites publiques en matière de sécurité et de défense ne sont pas anodines politiquement et participent souvent à la désinformation car elles sont ciblées. De ce fait, même lorsqu'elles sont exactes, formellement ou quant au fond, elles ne révèlent qu'une partie d'une situation ou néglige le niveau de leur crédibilité ou leur portée réelle. Ainsi en septembre 2008 lorsque la presse canadienne divulgue un supposé « rapport » secret de l'Otan qui semble pointer l'incompétence du détachement de l'armée française en Afghanistan.

Les fuites de technologie sensible

L'exportation du matériel sensible, en particulier de l'armement, fait l'objet de procédures spécifiques en vue d'éviter la fuite de technologie inopportunne. En dehors de l'aval des autorités du pays exportateur (en France, celui notamment de la Commission interministérielle pour l'étude des exportations de matériel de guerre), il faut respecter les accords internationaux de confidentialité qui obligent à demander l'autorisation du pays d'origine, dès lors qu'un armement contient dans son équipement un dispositif sensible d'origine étrangère. Le plus connu est l'accord américain ITAR (International Traffic in Arms Regulation). Ce dernier s'intéresse à la protection de tout le processus de commercialisation et de maintenance des équipements concernés. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle, certains armements sont parfois commercialisés dans une version simplifiée. Témoignent, entre autres, des exigences ITAR pesant sur certains équipements sensibles, les exemples français et espagnol concernant la vente de certains avions contenant de la technologie américaine.

La répression des fuites

- La divulgation d'informations sensibles, qu'elles soient codifiées comme telles (cas des démocraties), ou non, donnent généralement lieu à des poursuites. En France, la divulgation d'information classifiées peut constituer, par exemple, un viol du secret défense¹⁰² et peut donner lieu, plus généralement, aux délits et crimes pour atteinte à la sécurité de l'État¹⁰³, notamment à l'encontre de ceux qui recherchent ou provoquent ces fuites, comme de ceux qui en sont la source¹⁰⁴, ainsi que de ceux qui les divulguent. En particulier, les journalistes qui profitent de ces fuites en les publant s'exposent à des poursuites, comme en témoigne la mise en examen du journaliste français Guillaume Dasquié en décembre 2007. On peut relever de telles poursuites dans d'autres démocraties, comme au Royaume-Uni, en mars 2007, à la suite de la divulgation d'un mémo Blair-Bush classé « secret-personnel ». Cependant, en démocratie, ces poursuites sont rares car le pouvoir, en France notamment, serait parfois lui-même à la source de ces fuites, par ailleurs souvent véniales. Il monnayerait ainsi le suivisme journaliste à son profit en lâchant quelques informations aux médias. Pour une part, c'est donc quand les fuites journalistiques n'entrent pas dans ce "deal" entre pouvoir et médias qu'elles font éventuellement l'objet de poursuites¹⁰⁷. En outre, même lorsque les poursuites sont engagées il sera parfois estimé que l'intérêt public prévaut sur celui de l'État. Les militants écologistes sont tout autant exposés aux poursuites. Ainsi, en France, l'exemple du porte-parole du Réseau Sortir du Nucléaire qui s'est retrouvé en mars 2008 en garde à vue à la DST.
- Certaines fuites inopportunes et répréhensibles ne sont pas faciles à réprimer (faute d'en connaître l'origine ou parce qu'elles proviennent de l'étranger), comme les attaques informatiques envers les organismes de défense et de sécurité (État-major, ministère¹¹⁰, police¹¹¹, etc.). À l'inverse, le caractère extensif de la notion d'atteinte à la sécurité de l'État permet dans certains pays de contrôler, sous ce motif, toute fuite en réalité purement politique¹¹².
- En cas de guerre, il est habituel, y compris dans les démocraties, de filtrer l'information, notamment en provenance du front (censure ou encadrement médiatique et censure du courrier, ce qui suppose son ouverture). Cela fut également le cas en France dans les années 1960 lors des essais nucléaires dans le Sahara où les appelés en service étaient privés de correspondance et de tout contact le mois précédent l'explosion. De nos jours beaucoup de ces mesures de censure et de restriction se heurteraient à la multiplication des moyens individuels de filmer ou photographier et des possibilités de diffusion, notamment numérique (internet, SMS, MMS, téléphone satellitaire, etc.) malgré les moyens de brouillage.

Les fuites politiques

Comme en matière de sécurité, les fuites d'information en politique visent tout pareillement, dans certains cas, à donner au partenaire/adversaire l'avantage de connaître les stratégies de l'autre (on peut cependant dire la même chose en matière commerciale). Dans l'un et l'autre cas, elles

peuvent changer la donne d'une négociation comme, en France, lors du projet de réforme de la carte judiciaire début 2008¹¹⁴, contrecarrer une décision, comme celle d'une élection anticipée envisagée au Royaume-Uni en 2006¹¹⁵, ou compromettre l'application sereine d'une mesure, comme une dévaluation monétaire ou une volonté de réforme. En politique, s'y ajoute une volonté contemporaine de démystifier le pouvoir et d'exiger son exemplarité. Cela pousse à découvrir ses faces cachées et à profiter de la moindre fuite pour déclencher un scandale, par exemple autour des ébats intimes des grands de ce monde (cas de Bill Clinton en 1998 ou de la liaison du directeur du FMI avec l'une de ses subordonnées découverte en octobre 2008). En outre, la dérive people, accélérée par internet, a contribué à faire exploser l'exposition de la vie privée des hommes politiques¹¹⁷. Mais on y trouve aussi, parfois en France, mais surtout dans les régimes autoritaires, une même volonté d'ériger en secret d'État certaines informations qu'il serait légitime de connaître.

L'exploitation des confidences et le "off" journalistique

En politique, la fuite d'information n'est pas punissable en soi, dans une démocratie, si elle est seulement politique. C'est en particulier tout le domaine des confidences, volontaires ou non, exploité par les médias. On y trouve la notion de voix "off", c'est-à-dire, une sorte de contrat implicite entre journalistes et hommes politiques, censé permettre la libre parole des politiques dont tirent profit les journalistes pour leur compréhension personnelle, sans que ces derniers s'autorisent à en rendre compte. Ce qui n'est pas toujours respecté ! Gare aussi aux caméras, aux micros qui traînent, à l'insu de l'homme politique, ou aux documents préparatoires mal rangés. Certains journaux sont friands des fuites comme, en France, *Le Canard enchaîné*, par exemple, et le journalisme d'investigation s'en nourrit. Mais la politique est un terrain d'intoxication réciproque. Ainsi, l'homme politique peut volontairement entretenir l'ambiguïté afin de laisser publier à dessein une information, qu'il démentira ensuite pour se dédouaner.

Les fuites plus ou moins orchestrées

- La fuite peut d'ailleurs s'avérer orchestrée, avec l'autorisation plus ou moins explicite de l'intéressé. Voir par exemple, en France, les photos de Mazarine publiées dans le magazine *Paris Match* en 1994, après plusieurs années de silence d'État, organisé par son père, le président François Mitterrand lui-même, avec la complicité implicite de la presse. C'est cependant cette dernière qui, en 2005, révélera d'elle-même l'existence du fils naturel du Prince Albert de Monaco qui, une fois son accession au trône faite, et s'attendant à d'autres fuites, pris les devants en 2007 pour officialiser une nouvelle paternité. La publication de livres de confidences politiques participe également de ces fuites plus ou moins organisées. Ainsi, l'ouvrage *Verbatim* publié en France par Jacques Attali (entre 1986 et 1998), censé rendre compte de ses échanges confidentiels avec le même président Mitterrand, par ailleurs obsédé à forger sa postérité, ou celui de Françoise Giroud, témoignant en 1979 de ce qui se passe en France lors d'un conseil des ministres sous la présidence de Valéry Giscard d'Estaing alors que l'intéressé affichait vouloir désacraliser et dépoussiérer le pouvoir. Cet ouvrage en particulier ouvrit la brèche des confidences sur les coulisses du pouvoir, dont profitèrent ensuite un certain nombre d'anciens ministres français ou collaborateurs amers, non sans arrières pensées politiques, en général. Mais il peut s'agir aussi de manœuvres politiques, telles les fuites, avérées ou non, concernant un remaniement ministériel, ou celles qui constituent un ballon d'essai pour connaître l'impact que pourrait avoir une réforme envisagée.
- En décembre 2007, le président de la République française Sarkozy s'est volontairement affiché avec sa future épouse, Carla Bruni, laissant les paparazzis travailler, au motif d'éviter les fuites inopportunnes, inévitables selon lui, en raison de la pression médiatique qui s'exerce sur sa vie privée, et pour ne pas faire preuve de la même hypocrisie que ses prédécesseurs¹²². Il est vrai que les fuites concernant ses déboires conjugaux avaient précédemment largement alimenté les médias, faisant cependant écho à la manière dont on pouvait juger qu'il avait lui-même instrumentalisé sa famille auparavant. Il ne serait cependant pas le premier. Ainsi en fut-il, déjà en France, du candidat à la présidence de la République Jean Lecanuet qui en 1965 se servit de sa famille dans sa campagne et pour ses affiches, et de tous ceux qui l'on imité ensuite, dans un climat de connivence avec les média ;

à l'encontre d'une pratique anglo-saxonne, nettement plus irrévérenceuse à l'égard de ce genre de fuites généralement exploitées sans concession, même si tout le monde se souvient aussi de la célèbre photo de John-John, s'amusant en 1963 sous le bureau de son père, John Kennedy, alors président des États-Unis (photo largement plagiée, notamment pour une couverture de *Match* de 1993 visant à mettre en scène la dimension familiale du Premier ministre français Pierre Bérégovoy).

- La fuite peut aussi s'avérer orchestrée de l'intérieur, à l'encontre de l'intéressé. Par exemple, en France, l'affaire des carnets personnels de Yves Bertrand, ancien directeur des RG, dévoilée en octobre 2008 par *Le Point* alors qu'ils étaient sous scellés chez le juge d'instruction démontre un espionnage intimiste du politique, pour faire pression sur lui ou informer des tiers, qui parfois fuite volontairement dans la presse, ciblant ponctuellement telle ou telle personnalité politique. Cas également de l'affaire Clearstream où le nom d'Yves Bertrand était d'ailleurs apparu. Ceci s'ajoutant au fichage secret entretenu par lesdits RG.

Les fuites sur le fonctionnement des institutions dirigeantes

Régulièrement des confidences nous livrent ce qui se passe dans les arcanes du pouvoir, le secret des délibérations de certaines institutions et démyétifient ainsi certaines décisions ou nominations à des postes importants, ou dénoncent tel ou tel propos, etc. À l'exemple précité de l'ouvrage de Françoise Giroud sur le déroulement d'un Conseil des ministres en France, on peut ajouter l'exemple d'une fuite provenant du Vatican ayant violé le secret du conclave au cours duquel le pape Benoît XVI a été élu. Ainsi, en septembre 2005, la revue de géopolitique italienne *Limes* a publié un texte présenté comme le Journal du conclave d'un cardinal ayant pris part au vote. Enfin, les révélations sur les dessous de la diplomatie mondiale en novembre 2010 par le site WikiLeaks qui a publié les mémos de la diplomatie américaine sous forme de télégrammes ont déclenché de vives réactions au niveau international.

Les fuites concernant le train de vie des hommes politiques

Particulièrement en France, depuis les lois pour la transparence financière de la vie politique, les candidats aux élections et les membres du gouvernement, notamment, sont contraints de ne pas faire mystère de leur fortune en déclarant la totalité de leur patrimoine mobilier et immobilier et, le cas échéant, également après la fin de leur fonctions, afin de démontrer qu'il n'y a pas enrichissement personnel. Néanmoins, les avantages divers dont peuvent bénéficier les dirigeants politiques et leur entourage, comme un cadeau somptueux, un logement privilégié, un prêt avantageux, ou les notes de frais des élus et les rémunérations de leurs collaborateurs, etc., sont traqués par les journalistes et finissent souvent par faire l'objet de fuites.

Les fuites politiques délictuelles



Typique de fuites politiques orchestrées, l'affaire Clearstream 2 est intervenue en arrière-plan de la rivalité supposée entre le Premier ministre français d'alors, Dominique de Villepin, et le futur président de la République

- Même dans les régimes démocratiques, la fuite d'information politique peut être délictuelle, notamment en cas de fuite organisée, lorsqu'elle est faite dans l'intention de nuire, s'avère fausse et qu'elle porte préjudice à autrui, comme en 2004/2007, en France, dans l'affaire Clearstream 2 (délation et diffamation). Une affaire qui rappelle celle des fuites de 1956 concernant des informations ultra confidentielles sur l'effort de guerre français en Indochine communiquées au parti communiste, ce dont fut accusé faussement François Mitterrand. Par ailleurs, certaines informations politiques, comme la santé du président de la République française, érigée elle aussi en véritable secret d'État, restent en France encore couvertes par le secret professionnel, y compris lorsque l'intéressé feint d'afficher la transparence à ce propos (exemple des poursuites engagées consécutivement aux révélations du docteur Claude Gubler publiées en France, en 1996, concernant l'évolution réelle du cancer du président de la République française Mitterrand). On est cependant proche ici de la répression d'une fuite ordinaire de la vie privée à laquelle ont droit par ailleurs les hommes politiques, tant pour interdire l'utilisation de leur image dans des publicités, que pour éviter toute intervention mensongère dans leur vie affective, d'autant que toute transgression en ce domaine est susceptible d'atteindre la fonction ou de se répercuter sur leur image politique. Néanmoins, c'est pour cette raison que certaines informations privées seraient censées exiger la transparence (voir en France les exemples de la double vie du président Mitterrand ou du libertinage de DSK, directeur du FMI et présidentiable éphémère). Enfin, les publications répétées, de nature purement politique, par le site WikiLeaks (supra) lorsqu'ils s'agit de documents américains, notamment les télégrammes diplomatiques qui concernaient l'ensemble de la communauté internationale, sont jugées illicites.
- Mais il y a surtout le cas de certains régimes autoritaires où l'on considère le fait d'informer comme une fuite politique potentiellement néfaste, un comportement encore observé dans certains pays demeurés communistes après l'éclatement du bloc soviétique où cette pratique avait cours. À ce titre, pour que rien ne filtre des événements internes, considérés comme politiques (au sens large), on réprime leur diffusion sur internet comme de la cyber-délinquance, par exemple en Chine ou en Corée du Nord. Comme relevé précédemment, certains de ces pays utilisent volontiers également la notion de secret d'État, mais aussi tout l'arsenal pénal, pour limiter les fuites d'information sur la nature de leur régime ou ses difficultés. Les accusations d'atteinte à la sécurité de l'État, de désobéissance à l'autorité de l'État ou d'incitation à la révolte, etc., pèsent alors sur les dissidents et les journalistes contrevenants. C'est la raison initiale pour laquelle une communauté d'internautes a développé, à partir de fin 2006, le site WikiLeaks («leaks» signifie «fuites» en anglais) qui s'est donné pour mission de donner une audience planétaire aux fuites d'information en provenance «des régimes d'oppression en Asie, l'ancien bloc soviétique, l'Afrique subsaharienne et le Moyen-Orient», tout en sécurisant leurs sources, pour qu'il n'y ait pas de fuites sur les auteurs.
- En revanche, la fuite d'information en matière politique peut parfois elle-même servir de révélateur à des délits, comme en témoigne l'affaire du Watergate dans les années 1970 aux États-Unis¹⁴³ ou en France l'affaire Dumas-Deviers-Joncour en 1997. Certaines publications sur le site de WikiLeaks concernant les guerres conduites par les américains sont dans ce cas, telle la vidéo montrant deux photographes de Reuters, tués par un hélicoptère Apache américain en Irak et les documents sur la guerre en Afghanistan révélant d'éventuels crimes de guerre.

Les fuites en matière de vie privée

La divulgation de certaines informations personnelles peut constituer le délit d'atteinte à la vie privée et causer un grave préjudice dans la vie sociale, affective ou professionnelle. En France, le droit en vigueur est un des plus protecteurs au monde. Au titre de l'article 9 du Code civil français, qu'il interprète largement la jurisprudence, sont protégés, par exemple, l'image, la voix,

l'état de santé (y compris le fait d'être enceinte), le domicile, la correspondance et la vie sentimentale. En dehors des législations nationales propres à chaque pays, il faut se référer, au niveau européen, à l'article 8 de la Convention européenne des droits de l'homme et au niveau international, à l'article 12 de la Déclaration universelle des droits de l'homme de 1948.

Jusqu'ici, les atteintes à la vie privée concernaient surtout les médias, notamment la presse people avec le phénomène des paparazzis, subsidiairement, la vie professionnelle (notamment au moment du recrutement) et les rapports avec l'administration; plus rarement les relations entre particuliers. Aujourd'hui, il faut y ajouter le vaste domaine numérique avec le développement du fichage, du pistage et du contrôle sociétal. L'indiscrétion des particuliers a augmenté d'autant, notamment avec le phénomène des hackers. On note aussi la multiplication des biographies dites « non autorisées » dont, par exemple, Bernard-Henri Levy souligne qu'elles s'introduisent dans l'intimité sous prétexte d'authenticité et de transparence.

Les fuites d'intimité

Le viol de la correspondance et des conversations privées

- Les fuites d'intimité peuvent notamment passer par le viol de la correspondance privée. Le secret de la correspondance est pourtant protégé dans pratiquement tous les pays. En France, sont ainsi punis, l'ouverture ou la destruction de correspondances, le fait de la retarder ou de la détourner, ou d'en prendre frauduleusement connaissance. Cela vaut pour tous types de correspondance (papier, communication ou courriel) ainsi que pour l'installation d'appareils conçus pour réaliser leur interception. Cependant, cela ne dissuade pas toujours l'indiscrétion d'un amoureux éconduit ou celle des conjoints divorcés qui emportent la correspondance de leur ex, celle d'un voisin jaloux, celle d'un enfant facétieux ou celle d'un collègue indélicat, etc. La divulgation du contenu est évidemment prohibée et peut donner lieu à de multiples fuites concernant la vie privée, en matière affective ou concernant la santé, etc. Il semble que cette protection s'étende même aux enfants à l'encontre de leurs parents qui ont pourtant un devoir de surveillance à leur égard.
- En France, dérogent à cette protection générale quelques cas légaux comme les écoutes téléphoniques autorisées (administratives ou judiciaires) ou l'ouverture de la correspondance en milieu carcéral, de la part de l'administration pénitentiaire. Il y a cependant des dérives. On se souvient par exemple des écoutes illicites de l'Élysée dans les années 1980. Enfin on constate des pratiques beaucoup plus intrusives en cas de crise grave ou de guerre, ou dans le cadre de la lutte contre le terrorisme comme c'est le cas aux États-Unis (Cf. supra).
- En outre, il existe des hypothèses où l'interception illicite des conversations privées peut s'avérer validée comme preuve par le juge. Tel est le cas en France des enregistrements réalisés clandestinement au domicile de Liliane Bettencourt par son majordome (C. Cass. crim. 31 janvier 2012) même si leur auteur peut être poursuivi et que leur publication dans les médias est réprimée.

Le fuitage des données personnelles

- En dehors de la constitution de fichiers numériques (infra), le fuitage des données personnelles a souvent pour origine l'imprudence des personnes concernées : documents signifiants mis à la poubelle, qui par ailleurs sont laissées sans surveillance jusqu'à leur ramassage et informations imprudemment laissées sur internet. La fuite d'informations personnelles peut aussi être due à la malveillance active, comme la récupération d'informations par le vol de la correspondance dans les boîtes à lettres trop accessibles, la copie illicite d'un dossier personnel ou le hacking des terminaux personnels ou professionnels (ordinateurs, tablettes ou smartphones). Dans ce dernier registre, les Anonymous ont revendiqués en France, début 2012, la divulgation d'informations personnelles de militants extrémistes ou même de policiers. C'est un reproche similaire qui fut également adressé à WikiLeaks, à propos de la mise en ligne en 2009, du dossier de l'affaire Dutroux, mettant en pleine lumière des quantités d'informations personnelles (téléphones, adresses, relevés bancaires), de détails de l'enquête, de témoignages et de noms de personnes simplement entendues, sans être mises en cause.

- Des éléments même perceptibles concernant les relations amoureuses ou préférences sexuelles d'une personne ne peuvent être révélés impunément.
- En revanche, rien n'empêche vraiment de réaliser une étude graphologique sur la base d'un écrit obtenu légalement ou de dresser un profil astrologique, en dehors de leur usage discriminatoire ou malveillant (infra).

Le viol de l'intimité physique

- Dans nos sociétés civilisées fortement imprégnées du tabou de la nudité, il n'est sans doute pas pire fuite d'information privée que celle d'exposer à son insu ou contre son gré, tout ou partie de son intimité physique à autrui, en dehors des cas nécessaires (en milieu médical) et volontaires, par profession (stripteaseuse par exemple), ou par conviction (naturiste). À ce titre, pratiquement dans tous les pays mais de manière inégale, sont réprimés le voyeurisme, tous les gestes déplacés sur le corps manifestant un harcèlement sexuel ou un comportement impudique et surtout, le viol, avec une définition plus ou moins large des actes et parties du corps concernés suivant les époques et les pays. La diffusion, hors du consentement des personnes concernées, de photos ou de films intimes, voire d'œuvres artistiques suggestives dont le sujet est reconnaissable, est également répréhensible. Hors ces hypothèses, leur libre diffusion reste de toute façon bornée par le respect général du droit à l'image, assez bien observé de nos jours en France par les chaînes de télévision avec le développement du floutage, mais assez mal respecté sur internet. Cette protection du droit à l'image concerne tout le monde et pas seulement les "personnes publiques". Il existe néanmoins des limites tenant au cadre dans lequel une image a été réalisée. La participation volontaire à une manifestation ou une réunion publique emporte le risque d'être photographié ou filmé légalement, ainsi qu'en a jugé, sous certaines conditions, la jurisprudence française.
- Une difficulté peut survenir lors d'examens ou d'actes médicaux, en cabinet ou en milieu hospitalier, où l'intimité des personnes n'est pas toujours préservée. Cela peut être encore plus problématique sous le prétexte religieux, par exemple pour certaines femmes qui refusent pour ce motif d'être examinées par des hommes. Le sort du cadavre et de son intimité, dans les services ou à la morgue peut aussi être problématique.



Le peintre Boucher saisit ici l'abandon de pudeur de son modèle qui nous renseigne sur son intimité (Odalisque-1740)

- Suivant les époques et les cultures, apercevoir certaines parties du corps constitue une impudeur et un viol de l'intimité, hier une cheville découverte ou les cheveux d'une nonne, aujourd'hui ceux de certaines musulmanes voilées, par exemple. En Occident, cet acte, en quelque sorte passif, n'est toutefois pas répréhensible légalement, bien qu'il le soit socialement dans certaines communautés, non pas pour le voyeur, mais à l'encontre de celle qui ne se couvre pas.

Transport de l'information

Le **transport de l'information** décrit les différents canaux qui transportent par différents moyens une information d'un point A à un point B. Pour ce faire, l'être humain a utilisé au cours de l'histoire une foule de moyens des plus divers, allant du courrier à la fibre optique, en passant même par les pigeons voyageurs. Dans le même optique, l'être humain a aussi inventé une foule de procédés qui permettent de compresser et de mieux véhiculer cette information.

Survol des méthodes pour transporter de l'information

Pratiquement, une information peut-être transportée :

- par une conscience (par exemple, un valet qui effectue un trajet de 10 kilomètres pour véhiculer par voix verbale une information d'un conseiller au roi) ;
- par un support physique (lettre, disque compact, etc) (attention : plusieurs supports physiques peuvent aussi être considérés comme lumière dans la mesure où, comme la lettre postale, ils utilisent finalement la lumière et ses particularités pour transporter de l'information) ;
- par magnétisme (disquette, vidéocassette, etc) ;
- par le son (par exemple le code morse ou les modems téléphoniques) ;
- par la lumière (par exemple la fibre optique, communication optique) ;
- par les ondes (par exemple les routeurs Wifi) ;
- par un influx électrique.

Bruit et silence

Bruit

Dans les sciences de l'information et des bibliothèques, on parle de **bruit** lorsque des réponses non-pertinentes sont proposées par le système d'interrogation de la base de données. Ces réponses sont mêlées à des réponses pertinentes mais ces dernières risquent de ne pas être vues par l'utilisateur. Cela peut arriver notamment avec les catalogues de bibliothèque. Les causes du bruit peuvent être multiples :

- l'utilisateur n'utilise pas assez de termes dans sa requête ;
- l'utilisateur formule une requête comprenant trop de termes coordonnés par ou.

Soit un ensemble N de documents, A est un sous-ensemble de N et comporte les réponses pertinentes pour la recherche d'un usager, B est le sous-ensemble de N constitué des réponses obtenues. Plus A est inférieur à B, plus le bruit est grand et le taux de précision est faible.

Silence

Dans les sciences de l'information et des bibliothèques, on parle de **silence** lorsque des réponses pertinentes ne sont pas proposées par le système d'interrogation de la base de données, alors qu'elles existent. Cela peut arriver notamment avec les catalogues de bibliothèque. Les causes du silence peuvent être multiples :

- l'utilisateur formule une requête comprenant trop de termes coordonnés par et ;
- l'indexation de la base est insuffisante ;
- l'indexation de la base suit un langage rigide et compliqué que l'utilisateur ne connaît pas (exemple : indexation et recherche à partir seulement d'un thesaurus).

Soit un ensemble N de documents, A est un sous-ensemble de N et comporte les réponses pertinentes pour la recherche d'un usager, B est le sous-ensemble de N constitué des réponses obtenues. Plus A est supérieur à B, plus le silence est grand et le taux de rappel est faible.

Bruit et silence

Sur une même requête, on peut rencontrer du bruit et du silence. Des documents intéressants sont mal indexés (silence) et des documents inutiles répondent à l'équation de recherche. Par exemple, si un utilisateur tape Viking, les documents indexés avec le mot Normands peuvent ne pas apparaître (silence) et certains parlant des sondes spatiales apparaître (bruit).

Bit

Le **bit** est l'unité la plus simple dans un système de numération, ne pouvant prendre que deux valeurs, désignées le plus souvent par les chiffres **0** et **1**. Un bit ou *élément binaire* peut représenter aussi bien une alternative logique, exprimée par **faux** et **vrai**, qu'un chiffre du système binaire.

Dans la théorie de l'information, un bit est la quantité minimale d'information transmise par un message, et constitue à ce titre l'unité de mesure de base de l'information en informatique. La quantité d'information effectivement transmise s'exprime en Shannons, et ne peut dépasser la taille du message en bits.

Les systèmes numériques traitent exclusivement des informations réduites en bits, en général associés dans des groupes de taille fixe appelés **bytes** (/bait/).

Usages

Le mot « bit » est la contraction des mots anglais **binary digit**, qui signifient « chiffre binaire », avec un jeu de mot sur *bit*, « petit morceau ». On en doit la popularisation à Claude Shannon, qui en attribue l'invention à John Tukey¹.

Élément binaire

Le bit ou **élément binaire** est l'élément constitutif du système de numération binaire. Ce système, le plus analytique de tous les systèmes de numération, est à la base de presque tous les systèmes informatiques³.

Unité d'information

Selon la théorie mathématique de l'information de Shannon, lorsque l'on reçoit l'information correspondant à l'occurrence d'un évènement ayant 1 chance sur 2 de se produire, on reçoit **un bit** d'information.

Exemple - Pile ou face :

Lors du tir à pile ou face de l'engagement d'un match de football, quand l'arbitre indique que la pièce est tombée sur pile, il transmet un bit d'information aux 2 capitaines des équipes en compétition, parce qu'avant cette annonce, la probabilité d'obtenir l'un ou l'autre résultat était égale.

Le nom de l'unité élémentaire d'information est le **shannon**, symbole Sh^4 .

Dans un encodage idéal de l'information, tout bit (élément binaire) porterait un shannon d'information. Ce n'est pas le cas, parce que les informations environnant un bit dans un flux peuvent affecter sa probabilité d'avoir l'une ou l'autre valeur. L'information contenue dans un flux de n bits est au maximum de n shannons. Elle est en général moindre, parce que toutes les combinaisons ne correspondent pas à des messages valides de probabilité égale.

Exemple - bit de parité :

Pour assurer une détection d'erreur, on transmet volontairement des informations excédentaires, qui se déduisent des données transmises. Un des systèmes les plus simples consiste à coder sur 8 bits un mot de 7 bits, le huitième, appelé bit de parité, étant calculé de telle sorte que le nombre total de 1 dans l'ensemble soit toujours soit pair, soit impair, selon la convention en vigueur.

Un tel ensemble de 8 octets n'a que 2^7 valeurs possibles, et transporte 7 et non 8 shannons.

Outre ces redondances volontaires, introduites dans le but de corriger les erreurs de transmission, les encodages contiennent une part de répétition que l'on conserve parce qu'elles facilitent le traitement des données numériques.

Exemple - Nombre en virgule flottante :

En informatique, on code souvent les grandeurs en nombres à virgule flottante. La norme IEEE 754fixe, pour le codage sur 32 bits, un encodage qui détermine 4 286 578 689 valeurs valides sur les 2^{32} , soit 4 294 967 296 possibles.

Un nombre en virgule flottante de 32 bits apporte ainsi 31,997 et non 32 shannons d'information.

En outre, les communications humaines contiennent une part involontaire de répétition, qui peut être partiellement réduite par l'analyse statistique. La compression de données vise à rapprocher le nombre de bits d'un message de la quantité d'information qu'il transmet, élevant ainsi le nombre de shannons par bit.

Lorsqu'on ne se préoccupe pas de l'efficacité de l'encodage, un bit et un shannon sont pratiquement équivalents.

Ensembles ordonnés de bits

Il ne faut pas confondre un bit avec un byte, mot anglais qui se prononce /bait/ et se traduit par multiple⁵, ensemble ordonné de bits. En informatique, le byte est généralement un ensemble ordonné de 8 bits, ce qui dans ce cas fait un octet. Quand le nombre d'éléments binaires qui le compose est différent, cela est normalement précisé. On peut ainsi trouver les formes « doublet », « triplet », et plus généralement, « n -uplet ».

Notation des valeurs

Un bit ne peut prendre que deux valeurs. Selon le contexte, numérique, logique (voir algèbre de Boole),électronique numérique, ou magnétique, on les appelle « zéro » et « un » ce qui équivaut respectivement à « faux » et « vrai », « ouvert » et « fermé », ou « nord » et « sud » :

Contexte	Valeurs	
Numérique	0	1
Logique	faux	vrai
	non	oui
Espace	ici	là
Interrupteur	ouvert	fermé

Magnétique	nord	sud
Optique	noir	blanc

Technologiquement parlant, il existe une grande variété de moyens d'encodage binaire de l'information, selon le support de stockage ou de transmission utilisé : les propriétés physiques telle que la polarisation magnétique, la charge, le courant ou la tension électrique, l'intensité lumineuse, sont couramment utilisées.

L'essentiel est d'autoriser avec une très bonne fiabilité la distinction entre les deux états 0 et 1 de manière à limiter les erreurs.

Abréviation et symbole

Unités de bits v · d · m						
Ordre de grandeur	Système international (SI)			Préfixes binaires		
	Unité	Notation	Valeur	Unité	Notation	Valeur
1	bit	bit	1 bit	bit	bit	1 bit
10^3	kilobit	kbit	10^3 bits	kibibit	Kibit	2^{10} bits
10^6	mégabit	Mbit	10^6 bits	mébibit	Mibit	2^{20} bits
10^9	gigabit	Gbit	10^9 bits	gibibit	Gibit	2^{30} bits
10^{12}	térabit	Tbit	10^{12} bits	tébibit	Tibit	2^{40} bits
10^{15}	pétabit	Pbit	10^{15} bits	pébibit	Pibit	2^{50} bits
10^{18}	exabit	Ebit	10^{18} bits	exbibit	Eibit	2^{60} bits
10^{21}	zettabit	Zbit	10^{21} bits	zébibit	Zibit	2^{70} bits
10^{24}	yottabit	Ybit	10^{24} bits	yobibit	Yibit	2^{80} bits

Il n'y a pas de norme universellement acceptée au sujet des abréviations *debit* et *byte*. Un standard fréquemment cité est celui du Commission électrotechnique internationale IEC 60027 ([en](#)) qui définit *bit* comme étant le symbole de l'unité binaire (par exemple, *kbit* pour kilobit). Le même standard définit *o* et *B* pour le *byte*.

Aujourd'hui, le standard harmonisé ISO/IEC IEC 80000-13:2008 ([en](#)) remplace et annule les articles 3.8 et 3.9 de la norme IEC 60027-2:2005 (relatifs à la théorie de l'information et aux préfixes binaires).

Un autre standard souvent cité est IEEE 1541 ([en](#)) qui donne *b* comme symbole d'unité pour *bit* et *B* pour *byte*. Cette convention est fréquemment utilisée en informatique, mais elle s'oppose de plusieurs manières aux usages définis pour le système international d'unités (dont le bit ne fait pas partie)⁷ :

- ces deux symboles sont déjà utilisés pour d'autres unités : *b* pour le barn et *B* pour le bel ;
- *bit* est déjà l'abréviation de *binary digit*, il y a peu de raison de l'abréger encore ;
- dans le système international, seules les unités dont le nom provient de celui d'une personne ont un symbole abrégé en majuscule, le nom de l'unité s'écrivant sans majuscule initiale dans tous les cas⁸ : ainsi, l'ampère, du nom de André-Marie Ampère, a pour symbole A ;
- au lieu de *byte*, le terme *octet* est utilisé dans certains domaines (par l'UIT notamment) et dans les pays francophones, ce qui rend plus difficile l'adoption d'un standard ;
- *b* est parfois utilisé comme symbole du byte, ainsi que *bit* pour le bit.

Le *bel* est rarement utilisé tel quel, on emploie plutôt le décibel (dB), qu'il est peu probable de confondre avec *undécibyte*, puisqu'on n'emploie que des multiples du byte en télécommunications et en informatique.

Parallélisation du train de bits

Des années 1970 jusqu'à vers 1986, les fondeurs ont cherché à faire traiter les plus grands nombres entiers possibles par cycle d'horloge par leurs processeurs les plus puissants. En effet il est beaucoup plus efficace en termes de rapidité de faire par une instruction un calcul sur un chiffre codé sur grand nombre d'octets plutôt que de décomposer l'opération en plusieurs opérations qui manipulent des chiffres plus petits. Autrement dit, une multiplication sur 2 octets est beaucoup plus efficace que deux multiplications, un décalage et une addition à retenue sur 1 octet. Par exemple, en Hexadécimal $0x41 * 0x5$ (soit $0x145$) est plus rapide que $0x4 * 0x5$ (soit $0x14$), décalé d'un octet, plus $0x1 * 0x5$. Le résultat est similaire pour les additions.

L'Intel 4004 est le premier microprocesseur. Il manipulait des mots de 4 bits. Les processeurs 8 bits les ont remplacés, ont suivi les 16 bits, les 16-32, les 32 bits, les 64 bits qui équipent les ordinateurs personnels depuis 2002, et ce jusqu'au processeur Very Long Instruction Word.

Traitement parallèle des bits

Les circuits électroniques sont souvent conçus pour traiter plusieurs bits en parallèle. Ceci permet d'accélérer ou d'augmenter les capacités de traitement de l'information.

Exemple d'accélération de traitement :

Il faut une seconde pour transférer un mégaoctet de données à travers un bus informatique de 8 bits cadencé à 1 mégahertz. Si la largeur du bus est doublée à 16 bits, alors une demi-seconde suffit.

Exemple d'augmentation des capacités :

Un processeur 32 bits peut adresser directement 4 gibioctets de mémoire informatique. Un processeur 64 bits peut adresser 16 exubits.

Le sous-dimensionnement des capacités des processeurs est un problème historique posé par l'augmentation des capacités de mémorisation. Ainsi, les compatibles PC ont été initialement basé sur une architecture 16 bits (architecture x86, 1978) qui ne pouvait pas adresser plus de 64 kibioctets de mémoire sans passer par des complications (segmentation, mémoire étendue, mémoire paginée). Les capacités de traitement 32 bits furent introduites dans la famille x86 avec l'Intel 80386 (1986), mais ce n'est qu'avec un système d'exploitation conçu pour tirer parti des capacités 32 bits (Linux, Windows NT, Windows 95) que les 4 gibioctets d'adressage peuvent être pleinement exploités.

Les difficultés rencontrées pour augmenter les capacités en élargissant le nombre de bits traités simultanément constituent un défi technique. En effet, la plupart des opérations courantes utilisées dans un programme informatique ne nécessitent pas des nombres dépassant 16 ou 32

bits. Les jeux d'instructions ont ainsi été étendus de manière à réaliser par exemple deux opérations 32 bits en une fois sur un processeur 64 bits. Malheureusement, il est souvent difficile d'exploiter toujours au mieux les capacités d'un processeur 64 bits. Les gains réels d'un élargissement des capacités d'un processeur sont donc souvent atténués par la difficulté à optimiser la compilation des programmes de manière à tirer parti de ces architectures.

Nat (information)

Un **nat** (parfois aussi appelé **nit** ou **nepit**) est une unité logarithmique de mesure de l'information ou de l'entropie, basée sur le logarithme néperien et les puissances de e plutôt que sur le logarithme en base 2 qui définit le bit. Le nat est l'unité naturelle pour l'entropie en théorie de l'information. Les systèmes d'unités naturelles qui normalisent la constante de Boltzmann à 1 mesurent effectivement une entropie en nats. Quand l'entropie de Shannon est donnée avec le logarithme naturel,

$$H = - \sum_i p_i \ln p_i$$

elle donne implicitement une valeur en nats. Un nat vaut environ 1,44 [bits](#) (exactement $\frac{1}{\ln 2}$), ou 0,434 [bans](#) ($\frac{1}{\ln 10}$).

Historique

Alan Turing a utilisé le [ban](#). Boulton et Wallace (1970) employèrent le terme de *nit* pour la longueur minimale d'un message, qui a été par la suite remplacé par *nat* pour éviter toute confusion avec le *nit* comme unité de luminosité.

Byte

Le **byte** (prononcé [\[bart\]](#)), anglicisme de symbole **B**, ou **multiplet**, est la plus petite unité adressable d'un ordinateur. Aujourd'hui, les bytes de 8 bits se sont généralisés en informatique, alors qu'en télécommunications ils peuvent contenir 8 ou 9 bits. Mais jusque dans les années 1970, il existait des processeurs avec des bytes de 6, 7, 8 ou 9 bits, et il existe aujourd'hui pour la programmation des automates ou équipements industriels simples des processeurs très robustes utilisant des mémoires adressables par quantité de 4 bits voire 1 bit. En revanche, un octet, comme son nom l'indique, a une taille d'exactement 8 bits.

Histoire

Le terme est créé en 1956 par Werner Buchholz, alors qu'il travaille à la conception de l'IBM Stretch. *Byte* est une déformation de l'anglais *bite*, littéralement une bouchée, et désigne par analogie la plus petite unité de données accessible via un bus de données¹.

Distinction entre byte et octet

Historique

Aux origines de l'informatique, le byte était l'unité de stockage permettant de stocker un caractère. En anglais, on utilise fréquemment le mot « char » pour « byte », et réciproquement. Chaque constructeur, définissait la taille du byte en fonction de ses besoins du moment. Ainsi, pour exemple, le PDP-10 utilise un byte par le jeu d'instructions en langage machine, qui a une taille variable. Sur cette même architecture, les mots, utilisés pour l'adressage mémoire, font 36 bits.

Normalisation à 8

Dans la plupart des architectures matérielles, la capacité de la mémoire informatique est généralement exprimée en bytes, alors que sur les architectures « grand public » en français, on l'exprime en octets. La généralisation des bytes de huit bits amplifie cette confusion, en tirant un trait sur les architectures anciennes – essentiellement américaines. On trouve beaucoup de documentation en français exprimant improprement la capacité de mémoire en bytes par une confusion bytes/octets lors de la traduction.

Aujourd'hui, pour le *Dictionnaire du multimédia. Audiovisuel, informatique, télécommunications*² de l'AFNOR, le byte est « l'unité d'information correspondant à un octet, soit 8 bits ». La normalisation IEC 80000-13 va dans le même sens : normaliser la taille des bytes à 8 bits. C'est de cette normalisation à 8 bits que vient la confusion

Octet

Toutefois, en anglais comme en français, si l'on veut explicitement désigner une quantité de huit bits, on utilise le mot *octet* ; tandis que si l'on veut exprimer l'unité d'adressage indépendamment du nombre de bits, on utilise le mot *byte*. Ainsi la description formelle d'un langage de programmation utilisera sciemment le mot *byte* si le langage ne nécessite pas qu'un byte ait une taille d'un octet. C'est par exemple le cas du langage C, où un byte peut contenir plus de huit bits. Le mot *octet* est sciemment utilisé en français comme en anglais pour décrire un format de données au bit près. Ainsi, on trouve le mot *octet* dans des textes anglais comme le RFC 793 qui décrit le protocole de communication TCP d'Internet, ou dans le standard H.263 qui décrit une norme de codage vidéo numérique.

La même distinction entre *byte* et *octet* existe donc dans les deux langues, seul change le mot que l'on utilise couramment dans les cas où le byte mesure huit bits.

Confusion entre bit et byte

La capacité mémoire d'une puce de mémoire informatique est généralement donnée en bits (b), mégabits (Mb) ou gigabits (Gb), alors que la capacité mémoire de l'ensemble des puces d'un ordinateur est généralement donnée en bytes (B), mégabytes (MB) ou gigabytes (GB), ou en octets (o), mégaoctets (Mo) ou gigaoctets (Go). Des médias négligents font la confusion entre bit et byte et se trompent donc d'un facteur de huit, par exemple en écrivant « ordinateur doté de 4 Gb de RAM » au lieu de « ordinateur doté de 4 GB de RAM » ou « ordinateur doté de 4 Go de RAM »³.

La capacité des cartouches de jeu vidéo est généralement donnée en bits, ce qui fait exception à l'usage répandu du byte ou de l'octet pour la mesure d'une mémoire complète. Cela permet d'utiliser de plus grands nombres dans la communication, en écrivant « cartouche de 8 Mb » (8 mégabits) au lieu de « cartouche de 1 Mo » (1 mégaoctet).

Bytes multiples

Lorsqu'un processeur est capable de traiter plusieurs bytes en tant qu'entité unique, on appelle cette entité un « mot ». Les tailles de mot les plus courantes sont :

- 16 bits, rarement appelé « seize » ou « doublet » ;
- 32 bits, rarement appelé « trente-deuzet » ou « quadlet » ;
- 64 bits, rarement appelé « octlet » .

Par exemple, un « processeur 64 bits » est un processeur accédant aux données par unité de 64 bits.

Comme pour les octets, les multiples kilobyte, mégabyte, gigabyte, etc., sont utilisés avec des facteurs de 1 000 ou de 1 024 (2 puissance 10).

Voir les articles *unité de mesure en informatique* et *octet* pour plus de détails.

Inférence

L'**inférence** est un mouvement de la pensée allant des principes à la conclusion. C'est une opération qui permet de passer d'une ou plusieurs assertions, des énoncés ou propositions affirmés comme vrais, appelés prémisses, à une nouvelle assertion qui en est la conclusion.

On distingue les inférences déductives, inductives et abductives.

L'inférence peut prendre une forme probabiliste (inférence bayesienne) - il s'agit d'une opération logique portant sur des propositions tenues pour vraies (les prémisses) et concluant à la vérité d'une nouvelle proposition en vertu de sa liaison avec les premières. C'est pourquoi l'inférence est souvent réduite à la déduction nécessaire dans laquelle la vérité des prémisses assure totalement la vérité de la conclusion.

Cependant, pour les sémiologues, tels que Charles Peirce, la pensée n'opère pas sur des propositions, mais sur des signes. Ils proposent ainsi un modèle structuraliste, centré sur les relations formelles du langage, qui s'inspire de la linguistique. En effet, pour Ferdinand de Saussure, toute langue constitue un système au sein duquel les signes se combinent et évoluent d'une façon qui s'impose à ceux qui la manient. On est donc conduit, pour rendre compte de la sémiosis, à élargir la notion d'inférence à des opérations portant sur des symboles dicents (des quasi-propositions) et à remplacer la notion de vérité d'une proposition par celle de réalité d'une représentation pour un interprète particulier. Cette conception de l'inférence ouvre le champ à la description des opérations réellement effectuées dans la vie quotidienne et libère des contraintes imposées par le point de vue qui s'en tient uniquement à la production de vérités universelles, c'est-à-dire aux arguments valides. C'est ainsi que l'acte de poser une hypothèse qui consiste à tenir pour vraie, au moins provisoirement, une proposition n'entretenant aucun lien logique nécessaire avec les prémisses aura droit de cité dans cette perspective. On l'observe en effet dans toute activité de recherche dont elle constitue la part d'invention possible. Cela conduira à distinguer trois types d'inférence : la déduction, l'induction et l'abduction. Ce sont les trois types de raisonnement formalisés par Peirce en 1903.

Exemples

L'inférence implique le recours à l'interprétation, peu importe qu'il y ait une suggestion. Le principe est, quand on fait une inférence, que l'on rajoute une information à celle fournie. Michel Saucet, dans son ouvrage sur *la sémantique générale* (ed. Courrier du Livre) propose une histoire :

« *Imaginez, vous vivez en famille dans une maison. Devant la maison, une ambulance est arrêtée.* »

En pensant à la scène, en vous imaginant en situation, il est peu probable que vous ne fassiez pas d'inférence. Par exemple que vous envisagiez que chez vous une personne est malade ou même que la voiture soit en panne. Il est peu probable que vous en restiez au seul constat. L'inférence est moins l'interprétation faite que le seul fait d'ajouter une information.

En pragmatique linguistique

La pragmatique est la branche de la linguistique qui s'intéresse aux éléments du langage dont la signification ne peut être comprise qu'en connaissant le contexte de leur emploi. Elle s'appuie en particulier sur la distinction introduite par le philosophe américain Paul Grice entre le sens pour le locuteur et le sens proprement linguistique des énoncés. L'inférence est, en pragmatique, un mécanisme cognitif par lequel le récepteur d'un message interprète, pour un contenu propositionnel donné, une signification supérieure à la somme de ce qui a été simplement énoncé. Pour ce faire, le récepteur du message fait intervenir des éléments de contexte intra- et extra-textuels, issus à la fois de l'entourage linguistique et de l'univers de référence des interlocuteurs. Un des objectifs pédagogiques à l'école primaire est d'aider les enfants à

développer leur capacité à trouver les informations sous-tendues dans un texte à lire, c'est-à-dire leur apprendre à réfléchir à partir de ce qu'ils ont lu et compris.

•

L'**inférence statistique** consiste à induire les caractéristiques inconnues d'une population à partir d'un échantillon issu de cette population. Les caractéristiques de l'échantillon, une fois connues, reflètent avec une certaine marge d'erreur possible celles de la population.

Strictement, l'inférence s'applique à l'**ensemble des membres (pris comme un tout)** de la population représentée par l'échantillon, et **non pas à tel ou tel membre particulier** de cette population. Par exemple, les intentions de vote indiquées par l'échantillon, ne peuvent révéler l'intention de vote qu'a tel ou tel membre particulier de la population des électeurs de la circonscription électorale.

L'inférence statistique est donc un ensemble de méthodes permettant de tirer des conclusions fiables à partir de données d'échantillons statistiques. L'interprétation de données statistiques est, pour une large part, le point clé de l'inférence statistique. Elle est guidée par plusieurs principes et axiomes.

Histoire

Les méthodes d'inférence statistiques ont connu deux grandes phases de développement. La première commence à la fin du XIX^e siècle, avec les travaux de R. Fisher, K. Pearson, Jerzy Neyman, Egon Pearson et Abraham Wald qui dégagent les notions fondamentales de vraisemblance, de puissance des test d'hypothèse et d'intervalle de confiance.

La seconde période, qui perdure aujourd'hui, a été rendue possible grâce à la puissance de calcul des ordinateurs et à la banalisation de l'outil informatique à partir de la fin des années 1940. Ces calculateurs ont permis de dépasser les hypothèses traditionnelles d'indépendance et de normalité, commodes du point de vue mathématique mais souvent simplistes, pour donner toute leur fécondité à des concepts même anciens comme l'hypothèse bayésienne. L'informatique a permis aussi l'explosion des techniques de simulation par application des techniques de rééchantillonnage : méthode de Monte Carlo, bootstrap, jackknife etc. imaginées par John von Neumann, Stanislas Ulam, Bradley Efron, Richard von Mises.

Inférence bayésienne

L'**inférence bayésienne** est une méthode d'inférence permettant de déduire la probabilité d'un événement à partir de celles d'autres événements déjà évalués. Elle s'appuie principalement sur le théorème de Bayes.

Dans la logique d'Aristote développée dans l'algèbre de Boole et le calcul des propositions, une proposition ne peut être que *vraie* ou *fausse*, et les règles d'inférence ne font intervenir que ces deux valeurs.

Le raisonnement bayésien s'intéresse aux cas où une proposition pourrait être vraie ou fausse, non pas en raison de son rapport logique à des axiomes tenus pour assurément vrais, mais selon des observations où subsiste une incertitude. On attribue à toute proposition une valeur entre 0 (faux à coup sûr) et 1 (vrai à coup sûr). S'il s'agit d'un événement pouvant avoir plus de deux issues possibles, on considère la distribution de probabilité de ces issues. L'inférence bayésienne révise la probabilité des propositions au fur et à mesure des observations, incluant, dans l'analyse de Thomas Bayes qui lui donne son nom, la première opinion (*a priori*) sur la probabilité des prémisses.

Le raisonnement bayésien interprète la probabilité comme la traduction numérique d'un état de connaissance, du degré de confiance accordé à une hypothèse (voir le théorème de Cox-Jaynes). Jaynes utilisait à ce sujet avec ses étudiants la métaphore d'un *robot à logique inductive*. Pour les autres disciplines des statistiques et des probabilités, il s'agit du passage à la limite de la fréquence d'un événement.

Manipulation des probabilités : notation et règles logiques

L'inférence bayésienne effectue des calculs sur les énoncés probabilistes. Ces énoncés doivent être clairs et concis afin d'éviter toute confusion. L'inférence bayésienne est particulièrement utile dans les problèmes d'induction. Les méthodes bayésiennes se distinguent des méthodes dites standards par l'usage systématique de règles formelles raffinant les probabilités par l'observation. Avant de passer à la description de ces règles, familiarisons-nous avec la notation employée.

Notation courante

La notation probabiliste reprend pour base la notation classique des événements en probabilité qui elle-même s'inspire de la notation logique.

Soit deux événements A et B quelconques.

\bar{A} désigne l'événement « non survenue de A »

$A \cap B$ désigne l'événement « survenue de A et de B »

$A \cup B$ désigne l'événement « survenue de A ou de B »

La théorie bayésienne introduit les notations suivantes, exprimant la probabilité au sens bayésien et la notion de probabilité conditionnelle.

$p(A)$ désigne la probabilité de survenue de l'événement A .

$p(A|B)$ désigne la probabilité de survenue de l'événement A sachant que l'événement B est survenu.

Règles de la logique des probabilités

Il existe seulement deux règles pour combiner les probabilités, à partir desquelles est bâti tout l'édifice bayésien. Ces règles sont les règles d'addition et de multiplication.

La règle d'addition

$$P(A \cup B|C) = P(A|C) + P(B|C) - P(A \cap B|C)$$

La règle de multiplication

$$P(A \cap B) = P(A|B) \cdot P(B) = P(B|A) \cdot P(A)$$

Le théorème de Bayes, ou de *probabilité des causes*, s'en dérive aussitôt en mettant à profit la symétrie de la règle de multiplication

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)}.$$

En conséquence, si on connaît dans le détail les causes possibles d'une conséquence observée et leurs probabilités, **l'observation des effets permet de remonter aux causes**.

Remarquez que l'inversion de la probabilité introduit le terme $P(A)$, la probabilité *a priori* de l'événement A , indépendamment de l'événement B . Cette *estimation a priori* est ignorée par les autres méthodes probabilistes.

Notation d'évidence

Dans la pratique, quand une probabilité est très proche de 0 ou de 1, seule l'observation d'éléments considérés eux-mêmes comme très improbables est susceptible de la modifier.

On définit l'évidence par :

$$Ev(p) = \log \frac{p}{(1-p)} = \log p - \log(1-p)$$

Ev est une abréviation pour *weight of evidence*, parfois traduit en français par le mot « évidence » ; la formulation la plus conforme à l'expression anglaise d'origine serait le mot à mot « poids de témoignage » ou « poids de la preuve », mais par une coïncidence amusante « évidence » se montre très approprié en français pour cet usage précis.

L'utilisation du logarithme fait varier la valeur de l'évidence sur tout le domaine des nombres réels quand la probabilité va de 0 à 1, avec une meilleure lisibilité des très petites ($10^{-5}, 10^{-10}...$) et des très grandes (0,999999, 0,999999999) probabilités, faciles à confondre intuitivement (voir équation de Drake).

L'intérêt de cette notation, outre qu'elle évite d'avoir trop de décimales au voisinage de 0 et de 1, est qu'elle permet de présenter l'apport d'une observation sous une forme indépendante des observateurs, donc objective : il faut le même poids de témoignage pour faire passer un événement d'une plausibilité de -4 (probabilité 10^{-4} avec logarithme en base 10) à -3 (probabilité 10^{-3}) que pour le faire passer de -1 (probabilité 0,09) à 0 (probabilité 0,5 soit une chance sur deux), ce qui n'était pas évident en gardant la représentation probabiliste pure.

Si l'on choisit une base $10^{0.1}$ pour le logarithme, selon Tribus 1972 l'évidence peut s'exprimer en décibels (dB) : $Ev(p)=10 \log_{10} \frac{p}{(1-p)}$. Une évidence de -40 dB correspond à une probabilité de 10^{-4} , etc. En 2011, Stanislas Dehaene préconise le terme *décibans*¹, dont l'abréviation *dB* est identique. Le nom *ban* fut créé à partir du nom de la ville de Banbury, où on fabriqua durant la seconde Guerre mondiale des bandes de carton utilisée à Bletchley Park pour déchiffrer les messages produits par la machine Enigma. La technique, élaborée par Alan Turing, était appelée *banburismus* ([en](#)).

D'autres unités ont été utilisées :

- le *dit* (pour decimal digit)), avec des logarithmes à base 10 sans multiplicateur, aussi appelé *hartley* (symbole Hart), du nom de Ralph Hartley qui le proposa en 1928.
- le *NATS* utilisant les logarithmes népériens, dits aussi *naturels*.

Si on prend le logarithme en base 2, l'évidence s'exprime en bits : $Ev(p)=\log_2 \frac{p}{(1-p)}$. On a $Ev_{dB} \approx 3,0103 Ev_{bit}$.

Table d'équivalence

Probabilité	Évidence (dB)	Évidence (bits)
0,0001	-40,0	-13,3
0,0010	-30,0	-10,0
0,0100	-20,0	-6,6
0,1000	-9,5	-3,2

0,2000	-6,0	-2,0
0,3000	-3,7	-1,2
0,4000	-1,8	-0,6
0,5000	0,0	0,0
0,6000	1,8	0,6
0,7000	3,7	1,2
0,8000	6,0	2,0
0,9000	9,5	3,2
0,9900	20,0	6,6
0,9990	30,0	10,0
0,9999	40,0	13,3

Comparaison avec la statistique classique

L'usage de *probabilités a priori* a entraîné quelques reproches récurrents aux méthodes bayésiennes lors de leur introduction. On devait alors rappeler systématiquement les quatre points suivants :

1. l'effet de la distribution *a priori* s'estompe à mesure que les observations sont prises en compte ;
2. il existe des lois *impersonnelles*, comme la *maximisation d'entropie* ou l'*invariance de groupe* indiquant l'unique distribution possible *sans ajouter d'information propre à l'expérimentateur* ;
3. les probabilités *a priori* sont souvent dans d'autres méthodes utilisées inconsciemment (critère de Wald, critère du minimax...) ³ ;
4. comme pour tout autre modèle, les effets de différents choix *a priori* peuvent être considérés de front.

Différence d'esprit

Selon Myron Tribus,

- les méthodes bayésiennes utilisent des *méthodes impersonnelles* pour mettre à jour des *probabilités personnelles*, dites aussi *subjectives* (une probabilité est en fait toujours subjective, lorsqu'on analyse ses fondements) ;
- les méthodes statistiques classiques, dites aussi *fréquentistes* utilisent des *méthodes personnelles* pour traiter des *fréquences impersonnelles*.

Les bayésiens font donc le choix de *modéliser leurs attentes* en début de processus (quitte à réviser ce premier jugement en donnant des poids de plus en plus faibles aux *a priori* au fur et à mesure des observations), tandis que les statisticiens classiques se fixaient *a priori* une méthode et une hypothèse arbitraires et ne traitaient les données qu'ensuite.

La possibilité de diminuer automatiquement le poids des *a priori* au fur et à mesure de l'acquisition des données a permis aux modèles bayésiens d'être largement utilisés en *data mining*. En effet, contrairement aux méthodes classiques, il ne nécessitent que peu d'intervention humaine pour redéfinir à grande vitesse de nombreuses classes hypothèses en éliminant les moins validées par les données du moment.

Quand utiliser l'une ou l'autre ?

Les deux approches se complètent, la statistique étant en général préférable lorsque les informations sont abondantes et d'un faible coût de collecte⁴, la bayésienne dans le cas où elles sont rares et/ou onéreuses à rassembler⁵. En cas de profusion de données, les résultats sont asymptotiquement les mêmes dans chaque méthode, la bayésienne étant simplement plus coûteuse en calcul. La diminution énorme des coûts de calcul consécutive à la loi de Moore a joué dans la popularité grandissante des méthodes bayésiennes de 1970 à 2011. En revanche, la méthode bayésienne permet de traiter des cas où la statistique ne disposerait pas suffisamment de données pour qu'on puisse en appliquer les théorèmes limites.

Le *psi-test* bayésien (qui est utilisé pour déterminer la plausibilité d'une *distribution* par rapport à des *observations*) est asymptotiquement convergent avec le χ^2 des statistiques classiques à mesure que le nombre d'*observations* devient grand. Le choix apparemment arbitraire d'une distance euclidienne dans le χ^2 est ainsi parfaitement justifié *a posteriori* par le raisonnement bayésien.

Prise de décision bayésienne et neurosciences

Un cycle de cours de Stanislas Dehaene au Collège de France intitulé *Psychologie cognitive expérimentale* mentionne l'inférence bayésienne dans les titres de quatre de ses sept exposés. Une des conférences se nomme du reste *L'implémentation neuronale des mécanismes bayésiens*¹. C'est une revanche posthume pour Jaynes dont une communication de 1957 sur le probable fonctionnement bayésien du cerveau avait été rejetée comme « non en rapport avec le sujet des neurosciences »⁶. Les références données font état de travaux similaires dans plusieurs pays.

Historique

Cette démarche fut induite pragmatiquement par application du théorème de Bayes.

Après la publication posthume des travaux de Bayes, Abel et Laplace adhérèrent immédiatement au raisonnement bayésien (le second en tire même la *loi de succession* qui porte son nom). Le Théorème de Cox le formalisa sur des bases axiomatiques indépendantes de la théorie classique des probabilités et les travaux de Good, Jeffreys, Tribus et Jaynes la vulgarisèrent.

Controverses

Bien que les découvertes de Bayes (et Laplace) soient antérieures, les méthodes qui se sont historiquement imposées dans la pratique statistique sont celles de l'école portée par les travaux de Ronald Aylmer Fisher ou Richard von Mises. Cette approche est parfois appelée statistique fréquentiste mais le terme reste encore peu usité en français : la domination de cette école a été telle qu'en l'état actuel le terme "statistiques" renvoie le plus souvent implicitement à celle-ci.

Cette prééminence a longtemps été liée au fait que l'approche fréquentiste se prêtait mieux aux problèmes rencontrés et aux outils disponibles, l'usage de l'approche bayésienne étant limitée à un champ d'applications restreint. Cet état de fait a cependant été remis en question par le développement de l'informatique qui a trouvé et permis un usage plus courant des théories bayésiennes, notamment pour les intelligences artificielles.

Ce nouvel usage a contribué à raviver le débat théorique sur les pertinences comparées des deux approches⁹.

Notation d'évidence

Cette notation est souvent attribuée à I. J. Good. Ce dernier en attribuait cependant la paternité à Alan Turing et, indépendamment, à d'autres chercheurs dont Harold Jeffreys.

C'est peu après les publications de Jeffreys qu'on découvrit qu'Alan Turing avait déjà travaillé sur cette question en nommant les quantités correspondantes *log-odds* dans ses travaux personnels.

Exemples d'inférence bayésienne

Cette pièce est-elle biaisée ?

On lance quatre fois une pièce et elle tombe quatre fois du même côté. Est-elle biaisée ?

La position des statistiques classiques est de dire qu'on ne peut pas tirer de conclusion significative de trois tirages (en effet, un côté étant déterminé par le premier lancer, on a bien une probabilité 1/8 d'avoir les trois tirages suivants du côté identique avec une pièce parfaitement honnête, ce qui ne fournit pas les 95 % de certitude demandés traditionnellement).

L'approche bayésienne mesurera simplement que cette probabilité de 1/16 déplace linéairement de $10 \log_{10}(1/8 / 7/8) = -8,45$ dB l'évidence d'honnêteté de la pièce. Si nous lui accordions 40 dB (pièce sortie par exemple de notre propre porte-monnaie et lancée par nous), cette évidence passe à 31,55 dB. En d'autres termes, la probabilité subjective de sa normalité reste élevée (30 dB correspondent à une probabilité de 10^{-3} environ que la pièce soit biaisée).

Si en revanche la pièce est fournie par un individu que nous jugeons louche et que nous estimions à 0 dB son évidence d'honnêteté (autant de chances d'être bonne que biaisée), cette évidence passe à -8,45 dB, ce qui correspond maintenant à une probabilité subjective de 87,5 % que la pièce soit biaisée, et nous serions avisés de mettre fin au jeu.

(exemple cité par Myron Tribus)

Test médical

Énoncé

Un médecin effectue le dépistage d'une maladie à l'aide d'un test fourni par un laboratoire.

Le test donne un résultat booléen : soit positif, soit négatif. Les études sur des groupes tests ont montré que, lorsque le patient est porteur de la maladie, le test est positif dans 90% des cas. Pour un patient non atteint de la maladie, le test est positif dans un cas sur 100 (faux positif).

Le médecin reçoit un résultat positif pour le test d'un patient. Il souhaiterait savoir quelle est la probabilité que le patient soit réellement atteint de la maladie.

Résolution

Nous retenons la notation suivante, soient :

- M l'événement "le patient est atteint de la maladie" (\bar{M} son complémentaire "le patient n'est pas atteint de la maladie")
- T l'événement "le test est positif"

La grandeur recherchée est: $P(M|T)$ probabilité que le patient soit malade sachant que le test est positif.

Les hypothèses se traduisent ainsi:

- $P(T|M) = 0,9$
- $P(T|\bar{M}) = 0,01$

$$P(M|T) = \frac{P(T|M).P(M)}{P(T)} \quad (1)$$

Le théorème de Bayes donne le résultat suivant:

$P(T)$ s'évalue

par:

$$P(T) = P(T|M).P(M) + P(T|\bar{M}).P(\bar{M}) = P(T|M).P(M) + P(T|\bar{M}).(1 - P(M)) \quad (2)$$

(1) et (2) permettent de

$$P(M|T) = \frac{P(T|M).P(M)}{P(T|M).P(M) + P(T|\bar{M}).(1 - P(M))}$$

déduire:

L'application numérique avec les valeurs proposées

$$P(M|T) = \frac{0,9.P(M)}{0,9.P(M) + 0,01(1 - P(M))}$$

donne:

$$P(M|T) = \frac{0,9.P(M)}{0,89.P(M) + 0,01}$$

Soit:

Interprétation

Nous pouvons remarquer que le résultat du calcul dépend de $P(M)$ soit la probabilité globale que le patient soit malade, autrement dit, de la proportion de malades dans la population à laquelle appartient le patient.

Supposons que la maladie recherchée soit rare et touche 1/100 000 personnes dans la population. Alors:

$$P(M) = 0,00001 \text{ et } P(M|T) = 0,000899$$

Nous constatons que bien que le test soit positif pour 90% des personnes atteintes et produise seulement 1% de faux positif, le résultat est extrêmement peu concluant. Ce résultat qui peut sembler paradoxal paraît plus évident si nous effectuons une analyse de population sur 1 million de personnes.

Sur 1 million de personnes en moyenne:

- 10 personnes seront touchées par la maladie, 999 990 seront saines ;
 - sur les 10 personnes touchées 9 reviendront avec un test positif et 1 avec un test négatif (faux négatif) ;
 - sur les 999 990 saines, 1% soit environ 10 000 seront des faux positifs.

Finalement sur 1 million de tests, nous obtiendrons 10 009 tests positifs dont seulement 9 vrais positifs.

La probabilité qu'un patient ayant un résultat positif soit malade reste donc faible car la maladie est dans l'absolu extrêmement rare. D'un tel résultat nous pourrions conclure que le test est

complètement inutile, pourtant il faut noter que la probabilité de trouver un patient malade par ce test reste 90 fois supérieure à une recherche par tirage aléatoire ($P(M) = 0.00001$).

Supposons maintenant que la maladie ciblée soit **moins rare** et touche 1/1 000 personnes dans la population. Alors: $P(M) = 0,001$ et $P(M|T) = 0,0826$

Le résultat reste peu concluant. Sur 1 million de personnes:

- 1000 personnes seront touchées par la maladie, 999 000 seront saines ;
 - sur les 1000 personnes touchées 900 reviendront avec un test positif et 100 avec un test négatif (faux négatif);
 - sur les 999 000 saines, 1% soit 9 990 seront des faux positifs.

Finalement sur 1 million de tests, nous obtiendrons 10 890 tests positifs dont seulement 900 vrais positifs.

La probabilité qu'un patient ayant un résultat positif soit malade s'établit donc à $900 \div 10\,890$, soit 8,3 %, ce qui reste faible, mais est tout de même 83 fois plus que dans la population générale.

Si la maladie est épidémique, avec une personne sur dix touchée, on trouvera le test concluant, puisque la probabilité pour qu'une personne revenant avec un test positif soit malade sera de 91%.

Valeur du test et notation d'évidence

Reprendons les trois cas d'application du test.

Probabilité p et évidence $Ev(p)$ de la maladie						
Probabilit é avant test	$\frac{p}{(1-p)}$	$Ev(p) = \log \frac{p}{(1-p)}$	Probabilit é après test	$\frac{p'}{(1-p')}$	$Ev(p')$	$Ev(p') - Ev(p)$
1/100 00 0	0,00001	-5	0,000899	0,000900	-3,05	1,95
1/1 000	0,001	-3	0,0826	0,0900	-1,05	1,95
1/10	0,111	-0,954	0,909	10	1	1,95

On voit que le test déplace toujours l'évidence de la même valeur, qui se trouve ainsi caractériser le test. On peut montrer facilement que cette valeur est égale à

$$\log \frac{P(T|M)}{P(T|\bar{M})}$$

D'où vient ce biscuit ?

Énoncé

Imaginons deux boîtes de biscuits.

- L'une, A, comporte 30 biscuits au chocolat et 10 ordinaires.

- L'autre, B, en comporte 20 de chaque sorte.

On choisit les yeux fermés une boîte au hasard, puis dans cette boîte un biscuit au hasard. Il se trouve être au chocolat. De quelle boîte a-t-il le plus de chances d'être issu, et avec quelle probabilité ? Intuitivement, on se doute que la boîte A a plus de chances d'être la bonne, mais de combien ?

La réponse exacte est donnée par le théorème de Bayes :

Résolution

Notons H_A la proposition « le gâteau vient de la boîte A » et H_B la proposition « le gâteau vient de la boîte B ».

Si lorsqu'on a les yeux bandés les boîtes ne se distinguent que par leur nom, nous avons $p(H_A) = p(H_B)$, et la somme fait 1, puisque nous avons bien choisi une boîte, soit une probabilité de 0,5 pour chaque proposition.

Notons D l'événement désigné par la phrase « le gâteau est au chocolat ». Connaissant le contenu des boîtes, nous savons que :

- $p(D | H_A) = 30/40 = 0,75$ (évidence 4,77 dB, soit 1,44 bit)
- $p(D | H_B) = 20/40 = 0,5$ (évidence 0 dB, soit 0 bit)

Note: « $p(A | B)$ » se dit « la probabilité de A sachant B ».

La formule de Bayes nous donne donc :

$$\begin{aligned} p(H_A | D) &= \frac{p(H_A) \cdot p(D | H_A)}{p(H_A) \cdot p(D | H_A) + p(H_B) \cdot p(D | H_B)} \\ &= \frac{0,5 \times 0,75}{0,5 \times 0,75 + 0,5 \times 0,5} \\ &= 0,6 \end{aligned}$$

La probabilité $p(H_A | D)$ représente la probabilité d'avoir choisi la boîte A sachant que le gâteau est au chocolat.

Avant de regarder le gâteau, notre probabilité d'avoir choisi la boîte A était $p(H_A)$, soit 0,5. Après l'avoir regardé, nous révisons cette probabilité à $p(H_A | D)$, qui est 0,6 (1,76 dB ou 0,53 bit). L'observation nous a donc apporté 1,76 dB (0,53 bit).

Et puisque $p(H_A | D) + p(H_B | D) = 1$ (pas d'autre possibilité que d'avoir choisi la boîte A ou la boîte B sachant que le gâteau est au chocolat), la probabilité d'avoir choisi la boîte B sachant que le gâteau est au chocolat est donc de $1 - 0,6 = 0,4$.

Si nous imposons une probabilité *a priori* quelconque de suspecter une boîte particulière plutôt que l'autre, le même calcul effectué avec cette probabilité *a priori* fournit également 0,53 bit. C'est là une manifestation de la règle de cohérence qui constituait l'un des *desiderata* de Cox.

Exploration de données

L'exploration de données, connue aussi sous l'expression de **fouille de données, forage de données, prospection de données, data mining**, ou encore extraction de connaissances à partir de données, a pour objet l'extraction d'un savoir ou d'une connaissance à partir de grandes quantités de données, par des méthodes automatiques ou semi-automatiques.

Elle se propose d'utiliser un ensemble d'algorithmes issus de disciplines scientifiques diverses telles que les statistiques, l'intelligence artificielle ou l'informatique, pour construire des modèles à partir des données, c'est-à-dire trouver des structures intéressantes ou des motifs selon des critères fixés au préalable, et d'en extraire un maximum de connaissances.

L'utilisation industrielle ou opérationnelle de ce savoir dans le monde professionnel permet de résoudre des problèmes très divers, allant de la gestion de la relation client à la maintenance préventive, en passant par la détection de fraudes ou encore l'optimisation de sites web. C'est aussi le mode de travail du journalisme de données¹.

L'exploration de données² fait suite, dans l'escalade de l'exploitation des données de l'entreprise, à l'informatique décisionnelle. Celle-ci permet de constater un fait, tel que le chiffre d'affaires, et de l'expliquer comme le chiffre d'affaires décliné par produits, tandis que l'exploration de données permet de classer les faits et de les prévoirdans une certaine mesure ^{notes 2} ou encore de les éclairer en révélant par exemple les variables ou paramètres qui pourraient faire comprendre pourquoi le chiffre d'affaires de tel point de vente est supérieur à celui de tel autre.

Histoire



Collecter les données, les analyser et les présenter au client.

La génération de modèles à partir d'un grand nombre de données n'est pas un phénomène récent. Pour qu'il y ait création de modèle il faut qu'il y ait collecte de données. En Chine on prête à l'Empereur Tang Yao, la volonté de recenser les récoltes en 2238 av. J.-C.³; en Égypte le pharaon Amasis organise le recensement de sa population au cinquième siècle av. J.-C.³. Ce n'est qu'au XVII^e siècle qu'on commence à vouloir analyser les données pour en rechercher des caractéristiques communes. En 1662, John Graunt publie son livre « *Natural and Political Observations Made upon the Bills of Mortality* » dans lequel il analyse la mortalité à Londres et essaie de prévoir les apparitions de la peste bubonique. En 1763, Thomas Bayes montre qu'on peut déterminer, non seulement des probabilités à partir des observations issues d'une expérience, mais aussi les paramètres relatifs à ces probabilités. Présenté dans le cas particulier d'une loi binomiale, ce résultat est étendu indépendamment par Laplace, conduisant à une formulation générale du théorème de Bayes. Legendre publie en 1805 un essai sur la méthode des moindres carrés qui permet de comparer un ensemble de données à un modèle mathématique. Les calculs manuels coûteux ne permettent cependant pas d'utiliser ces méthodes hors d'un petit nombre de cas simples et éclairants.

De 1919 à 1925, Ronald Fisher met au point l'analyse de la variance comme outil pour son projet d'inférence statistique médicale. Les années 1950 voient l'apparition de calculateurs encore onéreux et des techniques de calcul par lots sur ces machines. Simultanément, des méthodes et

des techniques voient le jour telles que la segmentation, classification (entre autres par la méthode des nuées dynamiques), une première version des futurs réseaux de neurones qui se nomme le Perceptron, et quelques algorithmes auto-évolutifs qui se nommeront plus tard *génétiques*. Dans les années 1960 arrivent les arbres de décision et la méthode des centres mobiles; ces techniques permettent aux chercheurs d'exploiter et de découvrir des modèles de plus en plus précis. En France, Jean-Paul Benzécri développe l'analyse des correspondances en 1962. On reste cependant dans une optique de traitement par lots.

En 1969 paraît l'ouvrage de Myron Tribus *Rational descriptions, decisions and designs*⁴ qui généralise les méthodes bayésiennes dans le cadre du calcul automatique (professeur à Dartmouth, il utilise assez logiquement le langage BASIC, qui y a été créé quelques années plus tôt, et son interactivité). La traduction en français devient disponible en 1973 sous le nom *Décisions rationnelles dans l'incertain*. Une idée importante de l'ouvrage est la mention du théorème de Cox-Jaynes démontrant que toute acquisition d'un modèle soit se fait selon les règles de Bayes (à un homomorphisme près), soit conduit à des incohérences. Une autre est que parmi toutes les distributions de probabilité satisfaisant aux observations (leur nombre est infini), il faut choisir celle qui contient le moins d'arbitraire (donc le moins d'information ajoutée, et en conséquence celle d'entropie maximale). La probabilité s'y voit considérée comme simple traduction numérique d'un état de connaissance, sans connotation fréquentiste sous-jacente. Enfin, cet ouvrage popularise la notation des probabilités en décibels, qui rend la règle de Bayes additive et permet de quantifier de façon unique l'apport d'une observation en la rendant désormais indépendante des diverses estimations *a priori* préalables (voir Inférence bayésienne).

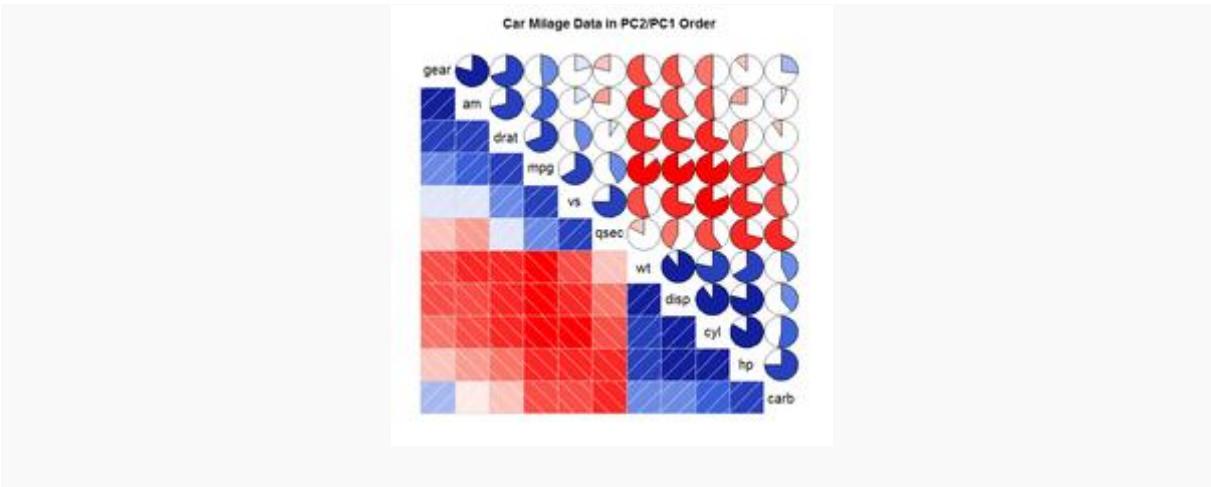
L'arrivée progressive des micro-ordinateurs permet de généraliser facilement ces méthodes bayésiennes sans grever les coûts. Cela stimule la recherche et les analyses bayésiennes se généralisent, d'autant que Tribus a démontré leur convergence, au fur et à mesure des observations, vers les résultats des statistiques classique tout en permettant d'affiner les connaissances au fil de l'eau sans nécessiter les mêmes délais d'acquisition).

L'affranchissement du protocole statistique classique commence alors : il n'est plus nécessaire de se fixer une hypothèse et de la vérifier ou non *a posteriori*. Au contraire, les estimations bayésiennes vont construire elles-mêmes ces hypothèses au fur et à mesure que s'accumulent les observations.

L'expression « *data mining* » avait une connotation péjorative au début des années 1960, exprimant le mépris des statisticiens pour les démarches de recherche de corrélation sans hypothèses de départ. Elle tombe dans l'oubli, puis Rakesh Agrawal l'emploie à nouveau dans les années 1980 lorsqu'il entamait ses recherches sur des bases de données d'un volume de 1 Mo. Le concept d'exploration de données fait son apparition, d'après Pal et Jain, aux conférences de l'IJCAI en 1989⁵. Gregory Piatetsky-Shapiro chercha un nom pour ce nouveau concept dans la fin des années 1980, aux GTE Laboratories. « *Data mining* » étant sous la protection d'un copyright, il employa l'expression « *Knowledge discovery in data bases* » (KDD)⁶.

Puis, dans les années 1990, viennent les techniques d'apprentissage automatique telles que les SVM^{b,1} en 1998, qui complètent les outils de l'analyste.

Au début du xxi^e siècle, une entreprise comme Amazon.com se sert de tous ces outils pour proposer à ses clients des produits susceptibles de les intéresser^{7,8}.



Un exemple de ce qu'on peut faire avec le logiciel [R](#) : ici un corrélogramme.

De nos jours, les techniques d'exploration de données peuvent être utilisées dans des domaines complètement différents avec des objectifs bien spécifiques. Les sociétés de vente par correspondance analysent, avec cette technique, le comportement des consommateurs pour dégager des similarités de comportement, accorder des cartes de fidélité, ou établir des listes de produits à proposer en vente additionnelle (vente croisée).

Un publipostage (*mailing*) servant à la prospection de nouveaux clients possède un taux de réponses de 10 % en moyenne. Les entreprises de marketing utilisent la fouille de données pour réduire le coût d'acquisition d'un nouveau client en classant les prospects selon des critères leur permettant d'augmenter les taux de réponses⁹ aux questionnaires envoyés.

Ces mêmes entreprises, mais d'autres aussi comme les banques, les opérateurs de téléphonie mobile ou les assureurs, cherchent grâce à l'exploration de données à minimiser l'attrition (ou *churn*) de leurs clients puisque le coût de conservation d'un client est moins important que celui de l'acquisition d'un nouveau.

Les services de police de tous les pays¹⁰ cherchent à caractériser les crimes (répondre à la question : « Qu'est-ce qu'un crime « normal » ? ») et les comportements des criminels (répondre à la question : « qu'est-ce qu'un comportement criminel « normal » ? ») afin de prévenir le crime, limiter les risques et les dangers pour la population.

Le *scoring* des clients dans les banques est maintenant très connu, il permet de repérer les « bons » clients, sans facteur de risque (Évaluation des risques-clients) à qui les organismes financiers, banques, assurances, etc., peuvent proposer une tarification adaptée et des produits attractifs, tout en limitant le risque de non-remboursement ou de non-paiement ou encore de sinistre dans le cas des assurances.

Les centres d'appel utilisent cette technique⁹ pour améliorer la qualité du service¹¹ et permettre une réponse adaptée de l'opérateur pour la satisfaction du client.

Dans la recherche du génome humain, les techniques d'exploration de données ont été utilisées pour découvrir les gènes et leur fonction¹².

D'autres exemples dans d'autres domaines pourraient être trouvés, mais ce qu'on peut remarquer dès à présent, c'est que toutes ces utilisations permettent de caractériser un phénomène complexe (comportement humain, expression d'un gène), pour mieux le comprendre, afin de réduire les coûts de recherche ou d'exploitation liés à ce phénomène, ou bien afin d'améliorer la qualité des processus liés à ce phénomène.