

Le continu, le discontinu et le discret en informatique

Anne Nicolle

Résumé

Le rapport de l' informatique au continu est présenté sous deux aspects : le premier aspect est celui des théories mathématiques du continu et du discret, le deuxième aspect est celui de la continuité des processus socio-techniques dans lesquels les ordinateurs et les réseaux ont actuellement une place centrale. Ces deux aspects ne sont pas indépendants, ils sont reliés par la place du langage en informatique. Une catégorisation des types de logiciels actuels permet d'analyser leurs rapports au temps, à l'espace et à l'évolution des phénomènes socio-techniques et de rendre ainsi plus concrètes ces analyses.

Abstract

The continuous link to computer systems is here presented by two of its aspects : the mathematical theories of continuous and discrete and the continuity of sociotechnical proceedings in which computers and networks have today a central position. These two aspects are not independent, they are connected through the importance of language in computer science. A classification of the software allows to analyze their relation with time, space and the evolution of sociotechnical phenomena, and therefore to render these analyses more concrete.

Citer ce document / Cite this document :

Nicollé Anne. Le continu, le discontinu et le discret en informatique. In: Espaces Temps, 82-83, 2003. Continu/Discontinu. Puissances et impuissances d'un couple. pp. 97-109;

doi : <https://doi.org/10.3406/espat.2003.4224>

https://www.persee.fr/doc/espat_0339-3267_2003_num_82_1_4224

Fichier pdf généré le 14/05/2018

Anne Nicolle

Le continu, le discontinu et le discret en informatique.

Le rapport de l'informatique au continu est présenté sous deux aspects : le premier aspect est celui des théories mathématiques du continu et du discret, le deuxième aspect est celui de la continuité des processus socio-techniques dans lesquels les ordinateurs et les réseaux ont actuellement une place centrale. Ces deux aspects ne sont pas indépendants, ils sont reliés par la place du langage en informatique. Une catégorisation des types de logiciels actuels permet d'analyser leurs rapports au temps, à l'espace et à l'évolution des phénomènes socio-techniques et de rendre ainsi plus concrètes ces analyses.

The continuous link to computer systems is here presented by two of its aspects: the mathematical theories of continuous and discrete and the continuity of sociotechnical proceedings in which computers and networks have today a central position. These two aspects are not independent, they are connected through the importance of language in computer science. A classification of the software allows to analyze their relation with time, space and the evolution of sociotechnical phenomena, and therefore to render these analyses more concrete.

Anne Nicolle est professeure en informatique à l'Université de Caen, Laboratoire GREYC, UMR CNRS 6072, Pôle Modescos (Modélisation en sciences cognitives et sociales) de la MRS de Caen et pilote du RTP 14 du département STIC du CNRS.

Le continu en informatique peut être étudié selon deux points de vue, relativement à l'opposition continu/discret en mathématiques ou relativement à l'opposition continu/discontinu dans le domaine socio-technique. Dans les théories mathématiques du continu, l'opposition continu/discontinu est interne au continu : 1) une fonction est continue ou elle a des points de discontinuité, ou elle est partout discontinue, mais pour parler de discontinuités, il faut être dans un domaine continu, 2) les théories mathématiques traitent soit de domaines discrets, qui s'énumèrent (1 2 3 4...), soit de domaines rationnels, qui ajoutent les fractions aux entiers, soit de domaines continus. Le continu est complet au sens où tout sous intervalle borné d'un domaine continu a des limites faisant partie du domaine alors que le rationnel ne l'est pas.

Les technologies de l'information et de la communication modernes sont le domaine du discret puisque tout y est représenté par deux états d'un média matériel, conventionnellement notés 0 et 1, ce qui amène à parler, tout aussi conventionnellement de "numérisation". Pourquoi parle-t-on de "numérique" plutôt que de "discret" quand il s'agit des instruments et des modèles informatiques ? Comment la science informatique décrit-elle et manipule-t-elle le continu et le discontinu à partir du discret ? Les humains ont-ils des moyens décrire et de manipuler le continu qui ne seraient pas ceux des ordinateurs ? Les effets d'échelle et d'interprétation nous serviront de fil directeur pour présenter ces questions. Mais l'enjeu principal de l'informatique comme science n'est peut-être ni de l'ordre des calculs, ni de l'ordre des représentations, mais de l'ordre des processus de durée indéfinie qu'elle gère dans le monde humain socio-technique. Le rapport de l'informatique au continu est alors d'assurer la continuité d'un service dans des conditions changeantes. Commençons par un tour d'horizon sur les types d'usage de l'informatique, en soulignant quels rapports au monde, et en particulier à l'espace et au temps sont mis en jeu dans chaque cas.

La différence de sens entre continu/discontinu et continu/discret peut s'approcher par les opérations correspondantes à chacun de ces domaines : le continu se mesure, le discontinu se repère, le discret se compte.

Les fonctions du logiciel.

L'informatique fait partie du monde physique par les machines et les réseaux qui sont construits à partir de matériaux physiques. Elle fait partie du monde social par ses productions et par ses usages : elle conçoit des modèles et des instruments pour analyser, conserver, transformer, transporter, présenter, produire et reproduire des phénomènes sociaux symboliques : textes, images, musique, vidéo, programmes de contrôle de processus, calculs. Par ses modèles et ses logiciels, elle est un outil pour décrire le monde, prédire ses évolutions, le construire par l'évolution des interactions sociales qu'elle permet et qu'elle soutient. Les machines, les réseaux et les logiciels informatiques assurent plusieurs types de fonctions :

Les systèmes d'information ou SI.

Ce sont des moyens de représenter et d'organiser des connaissances pour manipuler, traiter, conserver et présenter l'information sous toutes ses formes. On peut citer les SI des entreprises (bulletins de salaire, bons de commandes, factures, états), les SI géographiques (données, cartes, photos aériennes, textes, graphiques), les SI médicaux (renseignements administratifs, diagnostics, traitements prescrits, compte rendu d'exa-

mens, radios). Ils assurent le partage des bases de données, présentent des interfaces unifiées pour s'adapter aux habitudes des usagers, échangent des flux d'information en interne et avec l'extérieur. Les SI font partie du monde social, ils sont situés dans l'espace et dans le temps. Ils représentent l'état d'un monde actuel et ils doivent conserver une correspondance entre ce monde et sa représentation tant au niveau conceptuel qu'au niveau historique, puisqu'ils doivent produire des documents et des événements qui vont y jouer un rôle. Ils sont mis à jour par saisie des nouvelles informations, donc de manière discontinue et discrète. Ils sont dans le temps social, où chaque chose doit arriver à son heure et où les retards doivent être négociés. Les réseaux permettent de délocaliser certaines fonctions assurées par les SI, instaurant une discontinuité dans l'espace qui est invisible pour les usagers sauf en cas de panne de réseau.

La commande de machines physiques.

Les machines physiques sont dans le temps et l'espace physique continus. Leur commande s'est d'abord faite par des procédés continus, mécaniques, puis électromécaniques. Un tableau de commande cablé fait le lien entre les entrées et les sorties. Il doit être fixé lors de la conception. Depuis l'invention des microprocesseurs dans les années 80, la commande peut aussi être assurée par des systèmes informatiques et, progressivement, les systèmes de contrôle numériques de processus physiques ont remplacé les systèmes de contrôle mécaniques ou électroniques. Tous les appareils ménagers sont à l'heure actuelle équipés de microprocesseurs. Les usines, les équipements scientifiques comme le Ganil¹, sont contrôlés par ordinateur. Les pilotes automatiques d'avion ou de métro peuvent remplacer le pilotage humain, et l'assistance au conducteur des voitures se développe. Les programmes informatiques fonctionnant sur du discret contrôlent donc des processus continus.

La commande logicielle peut s'adapter aux changements du monde et des buts qui sont assignés aux artefacts qu'elle contrôle. Elle assure donc une continuité de service meilleure que la commande cablée. La mise à jour de la connaissance du monde actuel concerné par l'équipement est faite par des capteurs, en continu, sans intervention humaine (voir *infra*). Elle permet de faire de nombreux contrôles, des raisonnements sur l'état de l'environnement, sur les temps de réaction des acteurs humains, de traiter des exceptions et de prévenir les erreurs. La commande des satellites, des stations orbitales, serait impossible par des moyens traditionnels vu la précision demandée. Grâce à leur contrôle par des programmes, ils sont reconfigurables par radio, sans transformation physique des machines. Les fonctions assignées à ces engins peuvent évoluer longtemps après leur lancement, comme le montre l'attribution d'un nouveau programme à la sonde envoyée vers Mars² par les Américains plusieurs années après son lancement. Les programmes de contrôle peuvent s'adapter au contexte, comme le montre l'atterrissage de la station spatiale MIR³. Le contrôle peut même se reconfigurer automatiquement par apprentissage (logique floue, réseaux connexionnistes) pour maintenir des buts dans un environnement imparfaitement connu au départ.

La simulation.

Les logiciels de simulation représentent des états du monde non actuels, ou plus exactement, un point de vue sur une partie du monde dont on a fait un modèle, qui doit être paramétré et validé par l'expéri-

**Les systèmes d'information
représentent un état actuel
du monde et permettent
de le gérer.**

¹ Grand Accélérateur National à Ions
Lourds : <http://ganinfo.in2p3.fr/>

**Les systèmes de commande
de machines physiques
sont dits "intelligents"
lorsqu'on remplace
le tableau de commandes
câblé par un processus
programmé qui peut
envisager un nombre de cas
beaucoup plus important
et être reprogrammé sans
modification des machines.**

² [http://www.msss.com/mars_images/
moc/index.html](http://www.msss.com/mars_images/moc/index.html)

³ [http://spaceflight.nasa.gov/history/shut-
tle-mir/](http://spaceflight.nasa.gov/history/shuttle-mir/)

ence. Ils permettent d'expérimenter en étant hors du temps. Ils discrétisent le temps et l'espace, mais ils doivent assurer une correspondance entre le monde et sa représentation discrète. Cette correspondance au niveau des modèles n'implique pas une correspondance historique comme les SI puisqu'il s'agit de concentrer le temps pour pouvoir prédire l'évolution des phénomènes. Ils peuvent servir à expérimenter les modèles en les comparant aux phénomènes observés dans le passé, et à prédire leurs évolutions futures si le modèle est validé. Ils sont couplés à des systèmes de graphiques, de statistiques, de comptage. Ils concentrent le temps passé ou futur sur un temps présent beaucoup plus court, le temps de l'observateur, introduisant par là des discontinuités dans le temps vécu.

Les mondes virtuels.

Les mondes virtuels peuvent être des reconstitutions de monuments ou de villes ayant existé. On peut y entrer, s'y promener, se déplacer pour les voir sous d'autres angles. Par rapport aux maquettes construites par des moyens analogiques, comme le plan de Rome de l'Université de Caen⁴, les reconstitutions virtuelles sont dynamiques. Elles peuvent montrer l'état du monde à des moments différents. Les mondes virtuels peuvent aussi faire exister des mondes imaginaires : environnements de jeu, pilotes de voitures ou d'avion, installations de cuisine. Ils n'ont pas de contraintes de validité sur la représentation du monde aussi fortes que les logiciels de simulation. Par exemple, dans les jeux vidéo la gravité n'est pas toujours prise en compte.

Ils ont le même rapport au monde, à l'espace et au temps que les fictions littéraires ou cinématographiques : ils jouent sur l'espace et le temps en rendant présents des mondes absents. Ils sont dans le temps de celui qui les regarde et qui interagit avec eux, mais le temps qu'ils présentent est un temps imaginaire.

Le contrôle de flux.

Les flux de données traités par les ordinateurs peuvent provenir d'appareils enregistrant des données visuelles, sonores, des mesures de température, de pression. Il s'agit alors d'un signal continu qui est discrétisé par les capteurs. Ils peuvent provenir d'un périphérique comme le clavier et être discrets par nature. Ils peuvent être transmis par les réseaux : textes, musique, images animées, séquences vidéo. La surveillance de flux est bien caractéristique du rapport de l'informatique au continu socio-technique. Elle assiste en temps réel l'analyse des enregistrements d'une caméra dans un lieu public, ou l'analyse des dépêches d'agences de presse ou des cours de la bourse. Les événements intéressants étant trop rares ou trop fréquents dans les flux, les observateurs humains risquent de relâcher leur vigilance. Leur analyse automatique permet d'attirer l'attention des observateurs sur des événements intéressants, ou de décider ce qu'il faut mémoriser et sous quelle forme, ou de déclencher des actions dans des processus contrôlés, comme des ouvertures ou fermetures de portes, de vannes.

Le flux, qu'il provienne d'un signal ou qu'il contienne des éléments discrets, est continu parce que les éléments qu'il transporte peuvent arriver à tout moment. Les flux sont discrets parce qu'ils sont composés d'objets qui arrivent l'un après l'autre, soit par nature, soit parce qu'ils ont été discrétisés par les capteurs perceptifs ou informatiques. La continuité du

Les simulations et les mondes virtuels créent des discontinuités dans l'espace et le temps vécus de leurs usagers.

⁴ <http://www.unicaen.fr/rome/>

Le contrôle de flux est imparfait mais ses erreurs et ses oublis ne sont pas les mêmes que les nôtres.

flux n'est pas saisie d'emblée, elle doit être reconstruite par les processus qui les analysent. Lorsqu'un processus produit un flux, il peut être continu, car le mouvement est continu, contrairement à la perception.

Cette énumération des principales fonctions des logiciels ne vise pas à l'exhaustivité. Elle sert de support à l'étude des rapports entre discret, continu et discontinu qui va être entreprise dans la section 3.

**L'appareil cognitif humain
comme les processus
informatique saisissent
un flux par une action
qui le discrétise.**

Phénomènes, Modèles et Instruments.

Le continu, le discontinu et le discret peuvent être abordés selon plusieurs points de vue : celui des phénomènes, celui des modèles proposés pour les décrire, les contrôler ou les prévoir, celui des artefacts construits pour étudier des phénomènes (instruments, appareils de mesure et d'enregistrement,...) ou pour produire des phénomènes nouveaux (outils, appareils ménagers, logiciels de traitement de texte,...). Précisons ces points de vue avant de montrer leur prise en charge par l'informatique.

Les phénomènes.

Les phénomènes physiques, biologiques et socio-techniques présentent une alternance de discret et de continu suivant l'échelle d'observation. Les phénomènes continus peuvent produire des effets discrets et des phénomènes discrets peuvent être perçus comme des phénomènes continus. Ce jeu du discret et du continu sera illustré sur quelques exemples, naturels ou technologiques.

Observons une espèce biologique à différentes échelles. On peut compter les individus de l'espèce : les populations sont des phénomènes discrets formés d'individus. Les individus ont une continuité d'existence spatio-temporelle ; leurs caractéristiques comme le poids et le taille se mesurent ; leur peau forme une enveloppe continue distinguant l'intérieur et l'extérieur. La peau et les tissus fonctionnent comme des substances continues. Ils sont formées de cellules bien individualisées si le grossissement du microscope est suffisant. Elles ont une membrane, un noyau continu. Mais les cellules à une autre échelle sont formées de molécules, donc d'éléments discrets et les discontinuités permettent les échanges entre l'intérieur et le milieu.

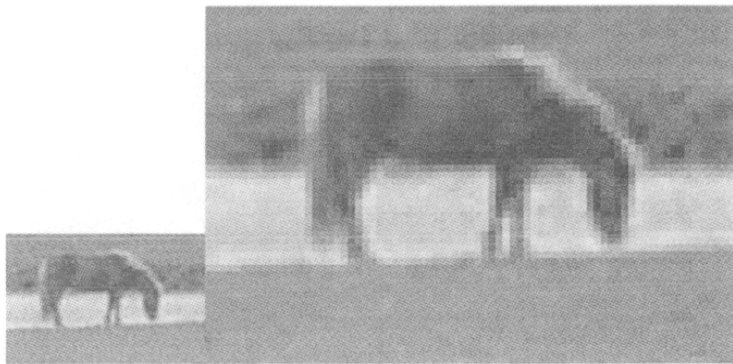
La vie est un phénomène biologique continu bien qu'elle soit rythmée par des pulsations qu'on peut compter : respiration, battements du cœur. Elle passe par des étapes irréversibles, comme l'acquisition de la marche par les enfants, créant des discontinuités dans l'unité de l'individu.

Le langage est une activité symbolique humaine qui transforme du continu en discret, par exemple en désignant les actions par des verbes. Si on enregistre un énoncé de parole, on obtient une courbe continue/discontinue car l'énoncé est un phénomène continu du point de vue du son. L'écriture de la parole crée une représentation discrète des énoncés, par des caractères graphiques. Elle trouve les principes structurants des énoncés (syllabes, phonèmes) pour les évoquer par des caractères graphiques. Elle crée aussi des discontinuités dans les énoncés en insérant des espaces entre les mots, espaces qui ne sont pas visibles sur les courbes des enregistrements de parole. Les caractères manuscrits sont tracés par un ou des mouvements continus, l'imprimerie conserve la continuité des tracés des

**Continu et discret sont
des effets d'échelle pour
les phénomènes.**

caractères (mais crée des discontinuités entre les caractères qui n'existent pas toujours dans l'écriture manuscrite), alors que l'informatique remplacera le tracé des caractères par des codes.

Le cinéma présente des images discrètes à un rythme suffisant (24 images par seconde) pour que notre perception recrée le continu des mouvements qui ont été discrétisés par la caméra. Le continu perçu est une construction de l'esprit à partir d'une perception discontinue. Elle vient de l'expérience du mouvement, par rétro-action de l'action sur la perception. C'est sur cette propriété qu'est fondée la possibilité du codage numérique des images. Les images codées en pixels apparaissent continues si l'échelle est appropriée et discontinues si on les agrandit.



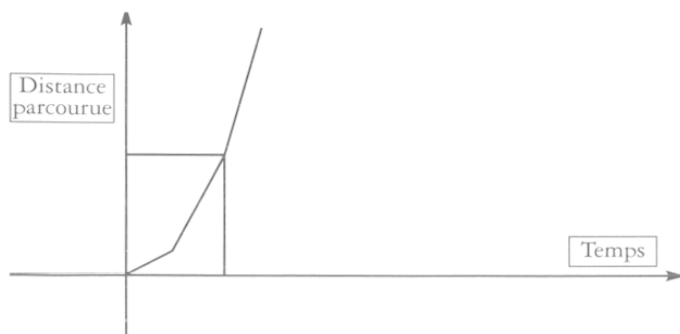
La question des rapports entre discret et continu est donc bien antérieure à la numérisation imposée par l'utilisation des ordinateurs.

Les modèles.

Les modèles des phénomènes peuvent être descriptifs, servant à se remémorer les choses importantes, prédictifs (retour des saisons, éclipses,...), ou être des modèles de contrôle des artefacts. Nous prendrons comme exemple de phénomène continu un objet tombant avec une accélération constante.

- Les modèles analogiques décrivent un phénomène continu par un autre phénomène continu analogue, dont on peut inférer des propriétés. Dans l'exemple de la distance parcourue, on peut tracer une courbe avec un appareil enregistreur et lire la distance sur la courbe.

Les modèles peuvent être continus ou discrets, que le phénomène visé soit continu ou qu'il soit discret.



- Les modèles symboliques décrivent les régularités et les discontinuités des phénomènes, qui sont des principes structurants, pour les conserver et les reproduire d'une autre manière. La distance peut être représentée par une fonction : $d = g.t^2$ qui permet de calculer un des termes quand on connaît les deux autres.
- Les modèles discrets par approximation décrivent les phénomènes par découpage en éléments assez fins dont les mesures sont conservées dans une table. Pour obtenir la valeur entre deux éléments de la table, on utilisera une méthode d'interpolation, par exemple par une droite, pour faire des calculs numériques approchés. Les tables de logarithmes, de trigonométrie en sont de bons exemples.

temps	0	1	2	3
distance	0	9,81	39,24	88,29

Le premier type de modèle est un modèle continu du continu, mais les deux autres sont des modèles discrets du continu. Les modèles des phénomènes discrets sont en général discrets (théorie des nombres, théorie des graphes, combinatoire), mais certaines pratiques mathématiques font appel au continu pour trouver des solutions de phénomènes discrets lorsque le nombre de cas est très important : recherche de nombre premiers très grands, méthodes du point fixe en recherche opérationnelle. Comme modèle continu de phénomènes discrets, on peut aussi citer l'application de la théorie des catastrophes en linguistique⁵ pour décrire la continuité du sens par des systèmes dynamiques. Une bonne étude des différents types de modèles et un débat sur leurs conséquences a été faite récemment⁶.

Les instruments.

Les instruments analogiques utilisent un phénomène continu pour décrire ou étudier un autre phénomène continu ayant des propriétés analogues (modèles réduits). Les appareils informatiques utilisent un média discret, formé de deux états physiques d'un support assimilés à des 0 et des 1. En cinquante ans, la plupart des modes de codage continus et des appareils analogiques ont été remplacés par des codages numériques sur des appareils contenant des microprocesseurs (règles à calcul/calculettes, disques analogiques et les bandes magnétiques/CD et DVD, photo argentique/photo numérique, caractères de plomb/codage numérique pour l'imprimerie).

La fiabilité, la facilité d'utilisation et les capacités des instruments numériques sont supérieurs à ceux des instruments analogiques, qui sont sensibles au bruit et à l'usure des supports, et qui ne peuvent pas être reproduits sans perte d'information. Mais les usagers ont souvent plus de difficultés à comprendre le fonctionnement des appareils numériques que des appareils analogiques, qui permettent des transferts de compréhension réciproques entre le phénomène et l'appareil.

Les instruments informatiques mettent en œuvre des modèles numériques et des processus pour décrire, contrôler ou prédire des phénomènes continus.

Les formules des fonctions sont des objets discrets, formés à partir de caractères d'un alphabet suivant des règles syntaxiques et sémantiques.

5 •Sabine Ploux, "Modélisation et traitement informatique de la synonymie." *Linguisticae Investigationes*. XXI (1), Amsterdam : John Benjamins, 1997.

6 •Guiseppe Longo, "Laplace, Turing et le 'jeu de l'imitation'", *Intellectica* n°35, Paris : ARCO, 2002, p. 131-161.

C'est l'indépendance de l'information au support qui caractérise les objets numériques, ce qu'on appelle la "dématérialisation de l'information", bien qu'elle nécessite toujours un média matériel.

Les représentations numériques du continu.

Utiliser un média discret pour représenter un phénomène continu ne suffit pas pour parler de “numérique”, le sablier par exemple utilise un média discret, les grains de sable, pour représenter l’écoulement du temps, mais il n’a pas les propriétés des instruments informatiques car les grains de sable ne constituent pas un codage du temps. Les photos argentiques ont du “grain” car elles sont aussi formées d’éléments discrets qui changent de couleur pour produire la photo, mais on ne peut pas transporter cette information sur les réseaux sans passer par un scanner pour la numériser, car c’est une propriété du support. Ce qui caractérise le numérique, c’est le codage, qui assure l’indépendance de l’information avec son support, et qui s’applique aussi bien au discret qu’au continu.

On peut coder des nombres entiers ou rationnels approchés avec deux états, c’est le codage binaire des nombres. On peut aussi coder des valeurs discrètes en nombre fini, en associant un nombre à chaque valeur : c’est le principe du codage des caractères des alphabets. Pour coder la couleur, on décompose le spectre lumineux en éléments discrets en fonction de l’intensité de chacune des couleurs fondamentales. Avec un code de couleur à 16 positions, on peut coder 65536 couleurs différentes. Les humains repèrent les couleurs par leurs noms, et suivant les professions, on peut en distinguer quelques dizaines, quelques centaines et peut-être quelques milliers pour les peintres. Mais les couleurs distinguées par les ordinateurs en fonction de leur codage n’ont pas toutes un nom, car ce codage résulte d’une discrétisation par découpage alors que la nomination résulte d’une discrétisation par symbolisation.

Pour savoir ce que signifie un code enregistré, il faut donc connaître son type. On pourrait avoir par exemple :

code	nombre entier	caractère	couleur
000000000011011	27	A	Bleu outremer
000000000011100	28	B	Bleu foncé

Il est donc nécessaire de coder non seulement la valeur des objets, mais aussi leur type, et de savoir quelle place il faut pour les représenter. La place est comptée en octets, correspondant à 8 éléments binaires. Une suite d’octets formera un nombre, une expression mathématique, un mot, un texte, une image ou une séquence vidéo suivant le type et le découpage de l’espace mémoire en éléments signifiants de 1, 2, 3, 4 octets ou plus. La structure dans laquelle les objets sont trouvés doit donc aussi être représentée. On peut en avoir un exemple avec les pages HTML en mode source où les objets sont encadrés par des balises décrivant leur type ou donnant des commandes de visualisation. Pour éviter les erreurs de recopie ou de transport, on peut ajouter aux codes des éléments qui permettent de savoir si tout c’est bien passé, c’est le rôle par exemple de la clé associée au numéro de sécurité sociale, qui peut être calculée à partir des chiffres qui composent le numéro : s’il y a eu une erreur, la clé n’est plus conforme, et on peut demander la retransmission.

Comme nous l’avons vu sur l’exemple des couleurs, il existe deux formes de représentation discrète du continu : l’approximation par

Pour coder tous les alphabets du monde, Unicode utilise des codes à 16 positions, qui permettent de coder 65536 caractères différents.

Les langages informatiques organisent la mémoire des machines en structures, types et valeurs.

découpage et la symbolisation. La symbolisation consiste à nommer les objets, leurs relations, leurs rôles, et à décrire leur fonctionnement par des expressions, des textes ou par des programmes⁷. Par exemple, l'écriture de la parole est une représentation symbolique des énoncés alors que l'enregistrement de la parole en est une approximation. Une partition musicale décrit la musique par symbolisation alors que l'enregistrement de la musique est une approximation.

7 • Anne Nicolle, "La question du symbolique en informatique", in *La cognition entre individu et société*, ARCO, 2001, Paris : Hermès, 2001 pp. 345-358.

L'approximation et l'interpolation.

L'approximation consiste à remplacer un réel par un rationnel suffisamment proche pour l'usage qu'on en a : par 3,1416 par exemple. Pour la musique et la parole, les différents composants du son (fréquence, intensité, timbre...) sont discrétisés et codés. L'interprétation du son numérisé par des instruments analogiques comme les haut-parleurs, passe par un transcodage qui interpole entre les valeurs connues pour restaurer le continu. Les images sont codées en pixels dont la couleur est une moyenne de la couleur de la zone. La couleur aussi est discrétisée, les images JPEG sont codées avec 16,7 millions de couleurs. Pour restituer le continu des images et du cinéma, l'interpolation par des appareils n'est pas nécessaire, le continu est reconstruit par la perception humaine.

Pour choisir la précision, il faut trouver un équilibre entre la qualité et le coût. Plus l'approximation est précise, meilleure est la qualité, mais plus la place occupée est grande et plus les temps de calcul et de transport sont importants.

Avec un modèle de l'objet codé et un modèle du bruit, on peut isoler le bruit du signal intéressant et restaurer des enregistrements sonores ou des images abîmés en calculant les valeurs probables des éléments détruits par lissage.

Lorsque le volume de l'information à mémoriser ou à transporter est important, on utilise des méthodes de compression : MP3 pour le son, JPEG pour l'image par exemple. La compression réalise un nouveau compromis entre la qualité et la quantité.

La compression des images ou des flux sonores permet d'augmenter la précision des données en conservant un volume acceptable.

La symbolisation.

La symbolisation des phénomènes continus est la première forme de discrétisation puisqu'elle est à l'œuvre dans le langage, puis dans l'écriture de la parole et des partitions musicales, enfin dans les conventions de notation des réels, et la notation mathématique des formules de calcul. Les modèles informatiques du symbolique datent des années 60. Afin de représenter des formules mathématiques pour utiliser la puissance de calcul des ordinateurs pour vérifier les calculs sur les formules, Mac Carthy a défini un langage symbolique, Lisp. Considérons l'expression $a + b + c$, si les valeurs de a , b , et c sont données, on peut calculer numériquement la valeur de $a + b + c$. Mais on peut aussi faire des manipulations formelles pour dire : $a + b + c = c + b + a$ en utilisant les règles d'associativité et de commutativité de l'addition. Les formules sont des chaînes particulières de caractères où certains symboles représentent des opérations et des relations. Elles obéissent à une syntaxe stricte (formules bien formées). Elles peuvent tantôt être manipulées par des règles de transformation tantôt être évaluées. C'est la base des systèmes de calcul formel

comme Mapple™ ou Mathématica™. En calcul formel, la représentation de grandeurs réelles par des symboles comme $\sqrt{2}$ est possible et les calculs formels sur ces grandeurs aussi. Par exemple, $\sqrt{2} \times 2 = 2\sqrt{2}$ par calcul formel et 1,999999999 par calcul avec une valeur approchée de $\sqrt{2}$.

En informatique, le jeu entre numérique et symbolique est fréquent. Un bon exemple d'articulation nécessaire entre représentations approchées et représentations symboliques est la fabrication de cartes routières. Entre les photos prises par avion ou par satellite et la carte, il y a un gros travail de symbolisation : les routes sont représentées en rouge ou en jaune suivant leur importance, on peut faire figurer des routes en projet avant qu'elles n'existent. Les fleuves et les lacs sont représentés en bleu. On supprime les détails sans intérêt et on augmente la taille ou le contraste des objets qui doivent être repérés. À faible échelle, certains éléments sont remplacés par des symboles (un rectangle pour un bâtiment, une croix pour une église). Pour passer d'une carte à grande échelle à une carte à petite échelle, une photocopie en réduction est inappropriée, car les indications deviennent illisibles. Il faut procéder par généralisation.

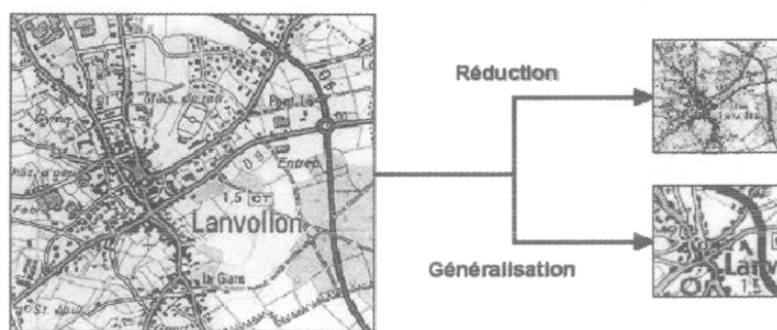


Figure extraite de la thèse de F. Hubert⁸.

Les images sont discrétisées soit par approximation en pixels codés par la valeur moyenne de la couleur dans cette zone, soit par symbolisation en définissant les lignes, les courbes, les surfaces qui composent l'image et en la reconstruisant à partir de commandes de dessin vectoriel (dessin technique, cartes de géographie, schémas statistiques). Même avec une représentation vectorielle des images, la représentation des courbes sur les écrans et les imprimantes est une illusion d'optique puisque les images sont représentées par des pixels, mais sur des appareils spécialisés, on peut commander des stylets qui dessinent en continu pour faire des cartes de géographie ou des plans d'architectes.

En intelligence artificielle, les premiers modèles utilisés ont été des modèles symboliques, pour représenter des connaissances et des raisonnements. Des modèles logiques, décrivant des processus par analogie avec des démonstrations, ont été développés à cet effet⁹. Un autre courant symbolique de l'intelligence artificielle est basé sur des modèles systémiques, décrivant les phénomènes en terme de structure, fonctions et évolution et mettant en œuvre une méthode expérimentale¹⁰. Les modèles symboliques ont été inefficaces pour simuler les phénomènes biologiques, comme la

Le calcul n'est pas seulement du calcul numérique : le raisonnement peut être vu comme un calcul.

8 • Frédéric Hubert, *Modèle de traduction des besoins d'un utilisateur pour la dérivation de données géographiques et leur symbolisation par le Web*, Caen : GREYC, 2003.

Approximation et symbolisation du continu sont deux formes de discrétisation complémentaires.

9 • Alain Colmerauer, "Prolog in Ten Figures.", *IJCAI* 1983, p. 487-499.

10 • H. A. Simon, "Artificial intelligence: an empirical Science", *AI* vol.77, n°1 Amsterdam : Elsevier, 1995, p. 95-127.

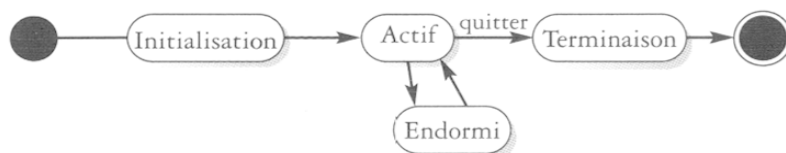
marche ou la vision, des modèles continus numériques ou statistiques donnant de meilleurs résultats. Actuellement, l'articulation entre les deux types de modèles dans les d'agents hybrides¹¹ permet d'utiliser des modèles numériques pour le bas niveau et des modèles symboliques pour le haut niveau.

De même que discret et continu sont nécessaires à différentes échelles pour décrire les phénomènes, symbolique et numérique sont nécessaires pour la conception des logiciels. Les méthodes de discrétisation par découpage ou par symbolisation concernent des objets et des phénomènes réifiés dans les logiciels, mais ce qui caractérise l'informatique n'est pas tant la manière de représenter les objets que la possibilité de faire exister des processus artificiels.

Les processus interactifs de durée indéfinie.

Les deux visions classiques de l'informatique : la théorie du calcul ou le traitement de l'information, la considèrent comme une mise en œuvre de représentations d'objets déjà existantes. Voir l'informatique comme une implantation des théories du calcul la ramène à l'étude de processus terminatifs calculant des fonctions de manière adéquate. Voir l'informatique comme la science du traitement de l'information déplace le centre d'intérêt sur les flux et les traces consommés ou produits par les machines et la ramène à l'étude de processus périodiques. Ces deux points de vue cachent un phénomène important : les ordinateurs mettent en route des processus interactifs de durée indéfinie qui communiquent entre eux et avec des êtres humains : les systèmes d'exploitation des ordinateurs, les traitements de texte, tableurs, gestionnaires de bases de données ou de mails, butineurs Web. À l'intérieur de ces applications, il existe des composants actifs comme des applets Java ou des agents, et certains de ces composants actifs peuvent évoluer à partir de leur expérience. Même la cybernétique n'en rend compte que très partiellement car elle voit les processus comme des boîtes noires alors que les processus informatiques sont observables de l'intérieur.

Un processus interactif de durée indéfinie¹², où PII est une abstraction d'un processus concret du point de vue de son fonctionnement de processus et de ses interactions avec les autres processus. On distingue trois étapes dans le fonctionnement des processus : la mise en route, la fin et le cœur du processus, qui fait souvent alterner des phases où le processus est actif et des phases où le processus est endormi.



Les états d'un processus de durée indéfinie

11 •Michael Wooldridge. "Intelligent Agents" in Gerhard Weiss, eds, *Multiagent Systems, a modern Approach to distributed artificial Intelligence*, The MIT Press, 1999, p. 27-78.

En intelligence artificielle, le conflit entre symbolique et numérique est dépassé.

Les objets actifs animent les pages Web, surveillent les flux de données, simulent les processus biologiques.

12 Il serait plus classique de parler de processus infinis, mais le terme "de durée indéfinie" est plus précis puisque tout processus informatique finit par arrêter soit par lui même, soit en erreur ou par une action "Quitter" de l'utilisateur, soit parce qu'il est remplacé par un processus plus performant.

Un PII est par nature spatio-temporel et événementiel : il capte et lance des événements dans le temps et l'espace, à l'attention des autres processus. Les Applets Java sont des PII informatiques simples qui permettent d'animer des pages HTML : la création, l'initialisation, la terminaison et le passage de l'état actif à l'état endormi dépendent de l'état de la page où elles sont affichées et non d'un calcul interne, c'est pour cette raison que ce sont des processus de durée indéfinie. Elles sont dans l'état actif tant que la page qui les contient est au premier plan et dans l'état endormi quand une autre page ou une autre application est active. Elles se terminent quand la page est fermée. Les Applets peuvent capter des événements comme des clics souris et les applets de la même page HTML peuvent communiquer.

Le temps des processus est d'abord une ressource, un temps "qui compte", ce n'est ni un temps compté, ni un temps représenté, mais un temps où des événements ont lieu, un temps continu. Les fonctions sont calculées par des processus terminatifs, qui ne dépendent pas du temps où ils s'exécutent. Par contre, un processus qui capte et lance des événements est dans le temps car il ne peut capter qu'un événement à la fois et les événements non captés sont perdus. Le moment où ils produisent leurs sorties est signifiant car les processus avec lesquels ils sont en interaction vont pouvoir prédire l'arrivée d'événements par comparaison entre leur temps propre et le rythme des arrivées précédentes.

Certains processus ont un temps propre rythmé par une ou des pulsations : temps nécessaire pour réaliser une action élémentaire, temps de capture d'un événement par exemple. On les appellera des processus pulsés. Les êtres vivants ont des pulsations qui leur sont propres comme la respiration ou les battements du cœur. Les artefacts mécaniques ont des pulsations qui proviennent des fonctionnements périodiques de la machine (moteur, balancier d'horloge, ressort), pour les artefacts informatiques, la pulsation est donnée par le cycle de base ou les tops d'horloge du processeur. Les pulsations sont l'introduction d'un rythme discret dans le continu du temps. Le temps propre est premier, le temps partagé va intervenir comme conséquence des interactions et permettre les synchronisations.

Tous les types de logiciels présentés dans la section 2 sont des PII. Bien entendu, ils font du calcul et ils traitent des informations. Mais leur point commun est d'être des processus de durée indéfinie, en interaction avec des usagers, ou avec des processus physiques, biologiques, industriels. Ils sont dynamiques. Ils font des actions physiques (ouvrir une vanne) ou signifiantes (afficher une question). Ils modifient le monde dans lequel nous vivons. Leur rapport essentiel à la continuité est de participer à la continuité du monde socio-technique humain.

Conclusion.

Les phénomènes continus comme l'espace, le temps et le mouvement sont perçus comme continus par reconstruction à partir de nos sensations primaires, produites par des capteurs biologiques discrets. La langue et les mathématiques les appréhendent de façon symbolique, par des noms, des

L'horloge des ordinateurs compte le temps, se synchronise sur le temps social par le réseau, s'affiche dans le temps propre des usagers.

attributs et des propriétés. À ses débuts, l'informatique n'est que la généralisation et la systématisation de cet état de fait. Elle permet de décrire, d'analyser et de modéliser les phénomènes continus et leurs discontinuités selon les deux modes de saisie connus des humains : l'approximation et la symbolisation. Le codage numérique permet de transférer aux ordinateurs une partie des tâches associées à ces différents types de représentation, ce qui n'est possible ni avec le langage, ni avec les mathématiques, tant qu'ils ne sont pas associés à des processeurs externes.

Lorsque les ordinateurs sont devenus interactifs et interconnectés dans les années 80, ils ont pris une place essentielle dans les sociétés humaines, assurant des tâches de communication, de prévision, de gestion des flux bancaires, de gestion des processus industriels, en exécutant des processus informatiques qui ne s'arrêtent jamais. Ces processus ne doivent pas s'arrêter même quand il faut changer de version du logiciel. Ils migrent sur la nouvelle version sans interruption. Ils ne doivent pas s'arrêter quand on change les machines qui les font tourner. Ils passent sur la nouvelle machine quand elle est prête sans interruption de fonctionnement, car elle les reprend en charge dans l'état où ils sont. C'est un autre type de rapport à la continuité, la continuité du temps, de l'espace, de l'organisation de la vie sociale.

L'appareil cognitif humain construit du continu à partir du discret, et du discret à partir du continu.