

# Quel cadre épistémologique pour une science de l'interaction homme-machine ?

Mathieu Magnaudet      Stéphane Chatty  
Université de Toulouse - ENAC  
7 av. Edouard Belin, 31055 Toulouse, France  
prenom.nom@enac.fr

## RÉSUMÉ

Depuis ses origines, l'interaction homme-machine est traversée par une tension entre théorie des relations humains-systèmes informatiques et pratique qui vise à concevoir de nouveaux systèmes interactifs. Malheureusement l'IHM n'est pas encore parvenue à établir un lien clair entre les deux. Dans cet article nous proposons un nouvel examen de cette difficulté à travers une contribution de type épistémologique. Nous revenons tout d'abord sur le paradigme computationnel qui constitue, selon nous, le cadre théorique de référence de nombreuses théories en IHM. Nous rappelons ensuite un certain nombre de critiques adressées à ce paradigme, en provenance de plusieurs champs disciplinaires, afin de mettre en lumière ses limites et la nécessité de son dépassement. Enfin, nous proposons une nouvelle caractérisation de la science de l'IHM et nous esquissons les contours de ce qui pourrait en constituer un nouveau cadre structurant, à partir d'une ontologie fondée sur les processus.

## Mots Clés

Epistémologie, interaction, IHM, cognition, calcul, ontologie, processus, informatique, sciences naturelles

## ACM Classification Keywords

H.1.2 Models and principles: User/Machine Systems

## INTRODUCTION

Depuis ses débuts l'IHM est traversée par une tension. Elle poursuit en effet le double objectif d'être à la fois une théorie, qui cherche à décrire, comprendre et expliquer les relations entre humains et systèmes informatiques, et une pratique, qui vise à concevoir au mieux, et selon des critères qu'elle s'emploie à caractériser, de nouveaux systèmes interactifs. Cette dualité apparaît clairement dans la définition proposée par l'ACM [22] :

*Human-computer interaction is a discipline concerned with the design, evaluation and implementation of interactive computing systems for human use and with the study of major phenomena surrounding them.*

Ce positionnement n'est au fond pas si original, et trouve son pendant dans les sciences traditionnelles avec le lien qui existe entre d'un côté les théories physiques, chimiques ou biologiques et ce qu'on appelle communément le génie des procédés qui en dérive des méthodes de conception de nouveaux matériaux ou de nouvelles molécules. Mais la particularité de l'IHM tient à ce que ce lien entre théorie et pratique y est particulièrement distendu. Le constat n'est pas nouveau et a déjà fait l'objet d'analyses approfondies. Yvonne Rogers met ainsi en lumière le fait que d'une part l'IHM ne s'articule pas autour d'une théorie unifiée mais d'un ensemble hétérogène et pléthorique de cadres théoriques et que d'autre part les concepteurs d'IHM n'en font que très rarement usage et fondent plutôt leur activité sur un ensemble de recettes ou de bonnes pratiques [44].

On pourrait s'accommoder de cet état de fait, considérer que l'objet d'étude de l'IHM contient une complexité irréductible et qu'il est illusoire d'espérer en élaborer une théorie solide. Et l'on se contentera alors d'innover dans l'usage des technologies d'interaction, tout en poursuivant des travaux théoriques sur les thèmes qui s'y prêtent. Mais cette relative faiblesse théorique, comme cette difficulté à donner un ancrage théorique à des méthodes efficaces de conception ne sont pas sans conséquence. En effet, en l'absence de cadre de référence il est difficile de comparer les résultats et d'organiser le débat scientifique. Plus largement, cette fragilité théorique entraîne une fragilité académique qui rend parfois difficile la cohabitation avec d'autres branches de l'informatique, souvent présentées comme plus fondamentales et dont le statut théorique n'est pas remis en cause. On notera ainsi que, en France par exemple, dans le découpage disciplinaire que propose le CNRS, l'IHM n'est pas incluse dans la section informatique fondamentale mais est rattachée à une catégorie qui rassemble de multiples applications de l'informatique. Quant à l'absence de méthode clairement dérivée d'un cadre théorique elle est à la fois un frein à la construction d'un programme pédagogique clair pour de futurs ingénieurs concepteurs et un obstacle à l'intégration de l'IHM dans les processus industriels.

Plusieurs chercheurs s'en sont inquiétés et ont proposé des solutions que l'on peut placer sur une ligne qui va de l'effort d'unification [15] à la dérivation effective de méthodes de conception à partir d'un corpus théorique [2, 12]. Certains font même le choix explicite de renoncer à toute théorie généralisante pour proposer une sorte de niveau intermédiaire entre théorie et pratique [25]. Bien que s'appuyant sur le même constat, la contribution que

nous proposons dans cet article est sensiblement différente. Nous proposons ici une analyse de type épistémologique qui vise à interroger l'IHM en tant que science, en particulier la caractérisation de son objet d'étude et le paradigme sous-jacent à la plupart des théories qui jalonnent son histoire. Nous revenons dans un premier temps sur ce que les philosophes des sciences cognitives appellent la théorie computationnelle de l'esprit et qui constitue, selon nous, le cadre de référence fondateur de la science de l'interaction homme-machine. Dans un second temps, nous explorons un certain nombre de critiques qui ont été formulées à l'égard de ce paradigme en IHM, mais également en sciences cognitives ainsi qu'en informatique théorique. Par là, nous montrons qu'il existe une convergence entre ces critiques et qu'elles militent pour une forme de dépassement du paradigme classique. Nous nous attachons ensuite à caractériser l'IHM en tant que science, en nous intéressant à la fois à son objet d'étude et à sa finalité. Constatant que l'IHM puise son attirail théorique à de nombreuses sources : physique, sciences cognitives, calculabilité, systèmes réactifs ou systèmes concurrents, nous en déduisons la nécessité de disposer d'un cadre théorique compatible avec l'ensemble de ces disciplines. Nous esquissons finalement les contours d'un tel cadre en nous appuyant sur les ressources conceptuelles d'une ontologie fondée sur les processus.

## L'ESPRIT ET L'ORDINATEUR

### Les origines

En vertu de la tension signalée plus haut, entre science de l'interaction et méthode de conception, l'histoire de l'IHM peut s'écrire de deux manières. La première consiste à suivre le fil des inventions successives de nouvelles techniques d'interaction, à l'image de la brève synthèse proposée par Brad Myers [37]. La seconde s'attache plutôt à retracer les différentes propositions théoriques qui ont émergé depuis le milieu des années 1960 jusqu'à nos jours [44]. C'est cette seconde histoire qui nous intéresse, puisque c'est à travers elle que se dessinent les grandes orientations théoriques de la discipline. Mais, pour la comprendre, il est utile de remonter quelques années plus tôt encore.

Comme le suggère son nom, l'Interaction Homme-Machine emprunte son contenu théorique à deux disciplines, d'un côté les sciences de l'homme, et particulièrement la psychologie, de l'autre les sciences de l'artificiel et plus spécifiquement l'informatique. Or ces deux disciplines ont elles-mêmes une matrice commune. Elles trouvent l'essentiel de leurs principes fondateurs dans le bouillonnement intellectuel de l'immédiat après-guerre et de ce que l'on appelle la première cybernétique. Cette histoire est dans l'ensemble bien connue (voir par exemple [16] et [20]), mais il nous paraît important ici de revenir sur l'idée clé qui en a émergé, à savoir la comparaison croisée entre le cerveau et l'ordinateur.

Bien que son ambition fût au départ strictement mathématique, l'article de Turing de 1936 [53] a eu un impact beaucoup plus large sur ses contemporains, en donnant corps à l'idée qu'il est possible d'établir une relation d'équivalence entre l'esprit et une machine logique. En soi, cette thèse ne dit pas grand chose sur l'esprit, et

ce n'est d'ailleurs nullement son objet. En particulier, Turing n'affirme pas que l'esprit est lui-même incarné par une machine dont l'organisation fonctionnelle serait celle d'une machine de Turing. Si l'on voulait caractériser la thèse de Turing, on pourrait dire qu'il s'agit d'une thèse d'équivalence faible qui énonce *a minima* qu'à toute opération de l'esprit humain qui réalise un calcul on peut faire correspondre une machine qui réalisera un calcul identique, c'est-à-dire qu'elle produira les mêmes sorties à partir des mêmes entrées.

Ce n'est que quelques années plus tard, en 1943, avec l'article de McCulloch et Pitts [35], que sera avancée une thèse d'équivalence beaucoup plus forte. McCulloch et Pitts proposent en effet un modèle calculatoire du fonctionnement cérébral, en développant l'idée que le cerveau est un ensemble de calculateurs élémentaires, les neurones, connectés en réseau. Tout l'objet de leur papier consiste alors à montrer qu'un tel réseau a la puissance de calcul d'une machine de Turing<sup>1</sup>. Ils apportent ainsi le chaînon manquant permettant de penser pleinement l'esprit humain comme une machine à calculer d'un certain type. Si, comme le veut la thèse de Turing, le fonctionnement de l'esprit est équivalent à celui d'une machine de Turing, et si par ailleurs le cerveau peut lui-même être modélisé comme une machine dont la puissance de calcul est équivalente à une machine de Turing, alors il devient possible de développer une véritable théorie matérialiste de l'esprit. Dans sa formulation canonique, que l'on trouve notamment chez John Searle [45], on dira que l'esprit est au cerveau ce que le *software* est au *hardware*.

### Le paradigme computationnel

On retrouve des élaborations de cette thèse d'équivalence dans les disciplines que l'on regroupe aujourd'hui sous le chapeau de « sciences cognitives » : la linguistique cognitive (p. ex. [10]), la psychologie cognitive (p. ex. [43]), les neurosciences cognitives (p. ex. [11]), la philosophie de l'esprit (p. ex. [42]), et bien sûr l'informatique, notamment sous la plume de Newell et Simon [38, 39].

Si cette thèse a connu un tel succès c'est parce qu'elle a propulsé un champ, jusqu'alors principalement dévolu à la philosophie et à la métaphysique, dans le cadre épistémologique des sciences naturelles empiriques déjà établies. C'est en ce sens qu'on parle volontiers, en philosophie des sciences cognitives, d'un processus de naturalisation de l'esprit. Elle a ainsi servi de base à l'élaboration d'un véritable paradigme pour la constitution d'une science de l'esprit. Par paradigme nous entendons ici non pas une simple théorie mais bien un cadre de pensée qui structure un champ de recherche au sens où l'entendait Thomas Kuhn [30]. Cela comprend en particulier la délimitation d'un champ phénoménal, un ensemble de concepts pour catégoriser celui-ci, la définition d'un ensemble de problèmes à résoudre, ou la spécification des formes possibles de réponses à ces problèmes. C'est autour de ces éléments que vont pouvoir se structurer les activités usuelles menées par les scientifiques et les ingénieurs.

<sup>1</sup>En toute rigueur, leur modèle a seulement la puissance d'un automate fini déterministe. Une preuve d'équivalence entre réseaux de neurones formels et machine de Turing est donnée notamment par Siegelmann et Sontag [49].

La paradigme computationnel s'articule ainsi autour des concepts de fonction, d'entrées-sorties, de programme, d'algorithme et d'architecture fonctionnelle, pour n'en citer que quelques-uns. Les phénomènes cérébraux, ou psychologiques, doivent désormais être pensés comme des processus de transformation d'un ensemble d'entrées vers un ensemble de sorties. De cette catégorisation découle assez naturellement un ensemble de problèmes spécifiques. Par exemple : quels sont les différentes fonctions qui structurent le système cognitif humain ? Quel est l'algorithme qui permet de réaliser telle ou telle fonction ? Ou bien encore quelle est l'architecture fonctionnelle qui sert de support au calcul de telle ou telle fonction ? En troisième lieu enfin, ce paradigme va définir les normes de ce que peut être une explication acceptable d'un phénomène cognitif. En l'occurrence, il s'agira d'un modèle computationnel c'est-à-dire d'un programme qui détaille les différentes étapes de traitement permettant de réaliser telle ou telle fonction, ou bien d'un modèle d'organisation des structures qui exécutent ces programmes.

L'une des thèses essentielles associées à ce paradigme est que si l'on peut construire un modèle computationnel d'un processus cognitif alors il existe au moins une machine physique capable de le réaliser. Ce point est très bien explicité par le philosophe Jerry Fodor (cf [19, p. 13-14]). La calculabilité fournit un garde-fou contre toute explication magique des phénomènes mentaux, et garantit que l'on reste dans le champ d'une science naturelle de l'esprit.

### **Le paradigme computationnel en IHM**

L'impact de ce paradigme sur les premières recherches en Interaction Homme-Machine est prégnant et l'on voit bien pourquoi. Si l'esprit humain et l'ordinateur sont pensés comme deux machines du même type, capables d'exécuter les mêmes fonctions, alors il devient possible d'imaginer une substitution, voire une augmentation, de l'un par l'autre. C'est l'orientation que prennent respectivement Licklider [31] et Engelbart [18] par exemple, dans deux des textes reconnus comme fondateurs de la discipline. Précisons toutefois que, s'il est question d'interaction homme-machine, c'est bien parce que cette substitution n'est pas complète. Que ce soit pour des raisons contingentes, état de la connaissance sur la cognition, niveau d'élaboration des ordinateurs, ou pour des raisons essentielles, il semble que Licklider n'ait jamais cru à l'équivalence forte entre esprit et système computationnel, l'interaction humain-ordinateur s'avère indispensable pour la réalisation de nombreuses tâches. C'est donc un nouveau programme de recherche qui s'annonce avec d'un côté, un questionnement sur la répartition des processus entre opérateur humain et ordinateur, et de l'autre un questionnement sur les modalités ou les techniques d'interaction entre ces deux systèmes.

La mise en œuvre du paradigme computationnel apparaît de manière plus évidente encore avec le concept d'architecture cognitive. Les architectures cognitives, telles que SOAR ou ACT-R, sont des modèles exécutables décrivant l'organisation fonctionnelle supposée du système cognitif humain. Si elles sont étroitement liées aux progrès de la recherche en psychologie cognitive, qui raffine la décomposition du système cognitif en modules fonction-

nels, elles sont également exploitées dans le domaine de l'IHM. Newell, Card et Moran, par exemple, ont développé un modèle de processeur humain [6], qui leur a servi de base théorique pour développer GOMS et KLM, deux méthodes enseignées pour l'ingénierie de l'IHM.

Le paradigme computationnel détermine fortement la manière de conceptualiser l'interaction homme-machine. En effet, si l'homme et la machine sont deux types de systèmes cognitifs et qu'un système cognitif est un ensemble organisé de processus de traitement symbolique de l'information, alors l'interaction homme-machine n'est qu'un cas particulier d'interaction entre processus de ce type. Il s'agit de transmettre, stocker, représenter, manipuler de l'information. En ce sens, on peut donc parler d'interaction informationnelle ou, comme le propose Brey [5], d'interaction épistémique.

Penser l'esprit sur le mode du calcul permet également une interprétation du concept de tâche sur le même mode fonctionnel, où un résultat est produit à partir d'un ensemble d'entrées après un ensemble fini d'étapes. La tâche peut ainsi être décomposée en buts et sous-buts et sa réalisation répartie entre processeur humain et ordinateur. Le principe même de l'analyse et de l'allocation de tâches [48] dépend fondamentalement de cette conceptualisation. La forme d'interaction qui en découle est le schéma question-réponse, que l'on retrouve dans le fameux jeu de l'imitation de Turing. C'est dans ce schéma que s'inscrivent les dialogues homme-machine par lignes de commande, les systèmes vocaux et certaines séquences dans les logiciels graphiques.

Il y a cependant des limites à cette convergence entre calcul et interaction. Ainsi, certaines tâches ne se laissent pas facilement décomposer en buts et sous-buts. C'est le cas par exemple de celles qui consistent à maintenir des paramètres dans une certaine enveloppe, une activité caractéristique de la conduite d'un véhicule. De la même manière, l'interaction pensée sur le schéma du dialogue rend difficilement compte de formes d'interactions plus continues ou plus complexes, telles que l'interaction avec le volant d'une voiture. Mais, nous allons le voir, les difficultés sont en réalité plus nombreuses et plus profondes.

### **LES CRITIQUES DU PARADIGME COMPUTATIONNEL**

Au fil des ans, le paradigme computationnel a fait l'objet de nombreuses critiques dans les différents champs disciplinaires dans lesquels il est mis en œuvre. Certaines d'entre elles ont conduit à des amendements ou des extensions des théories existantes avec des apports exogènes au paradigme computationnel. D'autres ont mené à des prises de position plus radicales et à une remise en cause des principes fondamentaux que nous avons exposés au paragraphe précédent. Nous revenons ici sur quelques-unes d'entre elles, qui relèvent de l'IHM, de la philosophie des sciences cognitives, et de l'informatique théorique. Si ces critiques sont pour l'essentiel bien connues des acteurs de chacune de ces sciences, elles sont relativement ignorées en dehors de leur champ disciplinaire d'origine. En les mettant en parallèle, nous souhaitons montrer qu'il existe une convergence entre elles qui appelle, au minimum, à une forme de dépassement du paradigme classique.

### La cognition située

Le travail de Suchman [51] apparaît comme une première rupture par rapport au paradigme computationnel. Suchman a explicitement en ligne de mire les théories cognitivistes sur l'action et la coopération. En particulier elle s'oppose à l'idée selon laquelle l'action humaine devrait être comprise comme l'exécution séquentielle d'un plan préalablement défini et décomposable en sous-actions élémentaires. Elle met en avant le caractère situé de l'action, le fait que la prise de décision est locale et circonstancielle, et qu'elle résulte des interactions avec l'ensemble des éléments, objets ou personnes, qui constituent son contexte immédiat.

Si l'on voulait résumer, cette ligne critique a donné lieu à trois types de réactions. L'une, directement inspirée des orientations de Suchman, consiste en un renoncement au paradigme computationnel et à une forme de rejet de la cognition comme objet d'étude. Le cadre théorique de référence devient celui des sciences sociales et de l'ethnologie et l'objectif premier celui de développer de nouvelles méthodes de conception. Les travaux autour de la conception participative nous paraissent typiquement relever de ce mouvement [34]. Un second type de réactions consiste à prendre au sérieux les critiques de Suchman mais à en proposer une interprétation au sein du cadre computationnel, comme l'ont fait Vera et Simon [56]. Dans un esprit un peu différent, on notera également les travaux de Hutchins [26] et Kirsh [27, 28] qui proposent un certain nombre d'extensions au paradigme classique afin de tenir compte des apports de ces différentes critiques. La troisième attitude consiste à ne pas reconnaître la pertinence de ces critiques ou à considérer qu'elles ne constituent pas un obstacle dans le champ de l'IHM. Bien qu'ils ne contiennent pas de formulation explicite de cette attitude, il nous semble que la persistance des travaux autour des architectures cognitives en est symptomatique [33].

L'influence du travail de Suchman est indéniable et les différentes attitudes qu'il a suscitées permettent d'expliquer en partie la multiplication des approches théoriques en IHM. Néanmoins, s'il signe le point de départ d'une forme d'éparpillement théorique il n'a pas permis l'émergence d'un nouveau paradigme assez puissant pour venir concurrencer celui qu'il prend pour cible. Nous en retiendrons, pour notre part, *a minima* le fait que l'interaction homme-machine ne peut être comprise si on la réduit à une interaction informationnelle entre deux systèmes computationnels abstraits.

### Les approches dynamiques de la cognition

Dans le champ plus général des sciences cognitives et de la philosophie de l'esprit, les critiques à l'égard du paradigme computationnel sont nombreuses et variées. Certaines sont assez proches de celles de Suchman, comme l'illustre le concept de cognition incarnée [55, 52]. Adoptant une ligne critique très différente, d'autres ont tenté de montrer que l'esprit humain a des capacités qui excèdent celles d'une machine de Turing et donc qu'il ne saurait se réduire à elle (p. ex. [32] ou plus récemment [40]). D'autres encore ont mis en lumière le déficit explicatif de ce paradigme pour rendre compte de certaines propriétés

réelles ou supposées des états mentaux telles que l'intentionnalité [45] ou la conscience phénoménale [4].

Une nouvelle forme de critiques est apparue dans les années 1990, qui a pour particularité de s'accompagner de la proposition d'un nouveau paradigme. C'est ce que l'on appelle les approches dynamiques de la cognition [41]. L'une de ses motivations s'inscrit clairement dans la continuité des critiques de Suchman, avec ce constat que la cognition ne peut être comprise si on la réduit aux processus localisés dans la boîte crânienne. Elle résulte au contraire des interactions complexes entre processus cérébraux, dynamique corporelle, et variations environnementales. Les partisans de cette approche soulignent par ailleurs que la dimension temporelle est cruciale pour comprendre l'interaction entre ces différents processus. Or, selon eux, le concept de temps véhiculé par la théorie de la calculabilité, qui se réduit au nombre d'étapes nécessaires pour l'obtention d'un résultat, ne permet pas d'en rendre compte de manière satisfaisante [54].

Le « dynamicisme » propose donc de recourir à une formalisme qu'il juge plus adéquat, celui de la théorie mathématique des systèmes dynamiques. Cette théorie développe une approche dite qualitative des équations différentielles pour lesquelles il n'existe pas de solution explicite [23]. Pour un système d'équations différentielles donné, la théorie va permettre de visualiser l'ensemble de ses trajectoires en fonction des variations des conditions initiales et va s'intéresser au comportement du système lorsque  $t$  tend vers l'infini. La théorie permet de caractériser certaines propriétés du système, telles que des attracteurs, des points fixes, des cycles limites, etc. Or l'adoption de ce formalisme en sciences cognitives a des conséquences importantes sur la manière de conceptualiser les phénomènes cognitifs. Il n'est plus question en particulier de fonctions transformant entrées en sorties ou d'algorithme permettant de produire un résultat. On va plutôt s'intéresser au comportement asymptotique du système, à ses propriétés de stabilité, de convergence vers un état particulier, ou bien encore aux phénomènes de bifurcation (l'existence d'une valeur critique d'un paramètre), etc.

L'avenir de cette approche en sciences cognitives est incertain, elle a notamment peiné à formaliser une méthode d'investigation opérationnelle des phénomènes cognitifs [9]. Du point de vue de l'interaction homme-machine, elle n'offre pas non plus de ressource immédiate pour fonder une méthode de conception. Nous en retiendrons néanmoins deux points. Le premier est l'inadéquation du paradigme classique à rendre compte de certaines propriétés des phénomènes cognitifs, en particulier leur structure temporelle. La seconde est la nécessité de disposer d'un cadre théorique permettant de comprendre et modéliser de manière unifiée les interactions entre processus de nature différente.

### Les algèbres de processus

Nous nous sommes jusqu'à présent focalisés sur le rôle du paradigme computationnel pour penser la cognition. Il est pourtant intéressant de constater que, dans le même temps, des critiques sont apparues aussi dans le domaine de l'informatique théorique à la fin des années 70, avec

notamment les travaux de Hoare [24] et Milner [36].

Celles-ci se fondent sur le constat que la théorie de la calculabilité classique ne permet pas de rendre compte des propriétés de ce qu'ils nomment des systèmes communicants. Les ordinateurs ont en effet rapidement évolué depuis les calculateurs dotés d'un processeur central unique vers des systèmes plus complexes, éventuellement à base de processeurs multiples, et composés de sous-systèmes communicants exécutant des processus en parallèle. Avec ces systèmes ce sont de nouvelles propriétés et de nouveaux problèmes relatifs à l'interaction entre processus qu'il devient important de comprendre. On notera par exemple la répartition de processus entre différents processeurs, leur synchronisation, les problèmes d'interblocage (*deadlock*) et d'accès concurrent à des ressources, etc. Or la théorie de la calculabilité classique ne possède pas l'attirail conceptuel permettant de penser correctement ces problèmes, d'où le besoin de nouveaux formalismes tels que les algèbres de processus [1].

En marge de ces travaux a également émergé le concept de système réactif [3] et les problématiques associées à l'ingénierie de systèmes qui interagissent en temps réel avec des sources multiples d'événements. Là encore est apparue la nécessité de créer des outils conceptuels et des langages permettant de traiter ces nouvelles problématiques, étrangères à la théorie classique de la calculabilité.

Notons que ni les algèbres de processus ni les systèmes réactifs n'ont pour objet de dépasser les limites de la machine de Turing, de faire mieux qu'elle, comme le proposent certains travaux autour du concept d'hypercalcul [13]. Il s'agit plutôt de s'attaquer à des problèmes autres que la caractérisation de l'ensemble des fonctions calculables, ou des différentes classes de complexité algorithmique. Il est donc bien question de combler un déficit explicatif de la théorie, en un sens comparable à celui que nous avons signalé au paragraphe précédent en sciences cognitives.

A l'inverse, Wegner a produit un travail important pour caractériser le concept de système interactif mais n'a pas formulé clairement cette distinction. En conservant notamment le vocabulaire de la puissance de calcul pour affirmer la supériorité des systèmes interactifs [57], il reste sous l'influence des problématiques classiques au même titre que ceux qui affirment la supériorité de l'esprit sur la machine de Turing. Le résultat en est une critique des théories actuelles du calcul plus qu'une démarche de sortie du paradigme computationnel.

L'interaction homme-machine s'inscrit quant à elle sans ambiguïté dans la même perspective que Hoare et Milner : elle a besoin de cadres théoriques adaptés aux phénomènes qu'elle étudie, et pas nécessairement de se comparer aux théories du calcul. Il nous semble donc important de caractériser au mieux sa nature et ses objectifs avant toute tentative pour sélectionner ou pour ébaucher un cadre conceptuel.

## LA DISCIPLINE DE L'IHM ET SON OBJET

Nous n'allons pas chercher ici à clarifier la frontière entre une discipline scientifique et une discipline pratique de

l'IHM. Il nous suffit, en nous appuyant sur les exemples du génie mécanique et du génie génétique, d'admettre qu'au sein d'une même discipline interagissent des activités d'accumulation de connaissances et des activités de conception. Ce qui distingue la mécanique et la génétique, c'est le phénomène qu'elles étudient et la manière de le penser. Si l'IHM est une discipline de même nature, plutôt qu'un simple lieu d'interaction entre cadres de pensées hétérogènes, il faut alors caractériser son objet.

### Une diversité sans fin

La littérature de l'IHM est d'une très grande variété, tant au plan des phénomènes étudiés que des questions traitées. Y cohabitent l'exploration des espaces de conception ouverts par de nouvelles technologies, l'étude des architectures logicielles, la recherche théorique sur la cognition, la perception et l'action humaine, la physique et l'électronique appliquées, l'étude des méthodes d'ingénierie.

Face à cette diversité, plusieurs approches sont possibles pour caractériser l'IHM. On peut la considérer comme une branche de l'informatique, où de multiples disciplines scientifiques sont convoquées à la demande dans un but commun : la conception de systèmes informatiques interactifs. C'est probablement la perception qui prédomine chez les spécialistes des autres disciplines scientifiques. On peut la voir comme un assemblage d'informatique et de sciences cognitives, autour d'une question commune. Cette approche est cohérente avec le paradigme computationnel, et est répandue chez les ingénieurs des industries concernées. On peut à l'inverse la définir comme la science de l'interaction entre l'humain et la machine, qui est en cours de construction à partir de connaissances issues d'autres disciplines. C'est cette l'approche qui prévaut chez beaucoup de chercheurs en IHM.

Cette définition, celle d'une science de l'interaction entre humains et machines, est difficile à traduire en un cadre de pensée opérationnel. D'une part elle conduit rapidement à rechercher les points communs entre l'humain et la machine, ce qui ramène au paradigme computationnel. D'autre part elle amène à se concentrer sur le canal humain-machine, en repoussant les autres phénomènes environnants en dehors du cadre théorique. Les propriétés de ce canal n'étant mesurées qu'à l'aune des technologies disponibles, chaque nouvelle technologie apporte son lot de nouveautés. La discipline est née avec les formulaires informatiques, s'est remise en cause avec les interfaces graphiques, et a découvert la multimodalité, la réalité augmentée, et enfin la tangibilité qui l'amène à redécouvrir l'interaction entre l'humain et les objets physiques.

Ce lien avec l'innovation fournit certes une méthode de travail pour la communauté, mais il provoque périodiquement l'irruption dans la discipline de phénomènes et de cadres de pensée qui en étaient jusque-là tenus à l'écart : la physiologie de la perception, le traitement du signal, la physique des retours de force, l'holographie, et ainsi de suite. Tout phénomène d'interaction, qu'il s'agisse d'électromagnétisme, de gravitation, de réactions chimiques, d'échange d'informations entre des algorithmes, ou encore du fonctionnement d'une organisation humaine, est susceptible de jouer un rôle significatif dans le champ de

l'IHM. Tout comme pour Eco qui a dit renoncer à mettre à jour son ouvrage *Theory of Semiotics* tant l'informatique introduit rapidement de nouveaux phénomènes [17], maintenir un cadre de pensée unifié est un défi pour la communauté de l'IHM. Si un cadre de pensée stable et commun doit émerger, il doit offrir une place à tous ces phénomènes et cependant il doit éviter à l'IHM de devenir l'addition de toutes les sciences, ce qui reviendrait à n'en être aucune.

### Une science des interactions, pour les concepteurs

Comme ne le suggère pas son nom, l'IHM comme discipline a en réalité pour champ d'investigation une relation à trois termes : un artefact, un utilisateur, et un concepteur. Le rôle de l'humain comme utilisateur n'est pas véritablement déterminant : on développe déjà des dispositifs interactifs pour animaux sans que cela change fondamentalement la nature du travail. La première caractéristique de l'IHM est en réalité l'artefact, matériel ou abstrait, car la discipline n'existe que par et pour cela. Ainsi, tout comme la cognition humaine n'est un sujet d'étude pour l'IHM que parce qu'elle est mise en œuvre dans l'utilisation des objets, la chimie de la peau ne le deviendra que lorsqu'elle sera utilisable dans ce but. Qu'un humain danse ou regarde autour de lui, ce ne sont pas des phénomènes qui relèvent de l'IHM ; qu'il le fasse sur un tapis de jeu ou devant un système de suivi du regard, et tout change.

La seconde caractéristique de l'IHM, c'est l'étude des interactions au sens large. Cela recouvre les interactions entre humains et machines mais aussi toutes les interactions entre systèmes, qu'ils soient physiques, biologiques, ou encore abstraits, une procédure par exemple, car toutes ces interactions peuvent intervenir dans des systèmes homme-machine. Parce qu'elle se revendique comme une science, l'IHM souhaite disposer de théories descriptives des interactions, à l'image des travaux d'une partie de la communauté autour de la loi de Fitts [21]. Mais contrairement aux sciences traditionnelles, l'IHM n'est pas définie par un type d'interaction ou un type de système (mécanique, physique, cognitif, etc). Elle a donc vocation à la fois à s'appuyer sur des théories développées par d'autres disciplines, et à en créer de nouvelles lorsque c'est nécessaire.

Enfin, la troisième caractéristique est le rôle du concepteur. C'est à ce jour le seul humain qui est invariablement présent dans le champ d'investigation. En effet, c'est pour lui qu'est déployé l'effort pour comprendre et modéliser les interactions, afin qu'il puisse les contrôler, les « programmer ». Qu'il le fasse directement ou en déléguant la tâche à un outil automatique a peu d'importance, tant qu'il manipule des modèles qui permettent de définir des systèmes et de contrôler leur comportement ; qu'un jour les systèmes soient construits sans passer par une phase de modélisation, par exemple par intelligence artificielle, et la nature de la discipline changera alors sans doute.

Le rôle du concepteur marque une différence essentielle entre IHM et sciences traditionnelles : une théorie n'est pertinente pour l'IHM que si elle est utilisable par un concepteur. Qui plus est, l'informatique a introduit un changement sans doute irréversible dans le travail des

concepteurs : celui de la pensée numérique. Là où les automaticiens concevaient des systèmes principalement par le calcul et le dimensionnement de dispositifs physiques, les concepteurs modernes veulent exprimer leur volonté sous forme d'assemblages de constructions logiques qui pilotent les automatismes.

L'IHM est donc une discipline qui vise à mettre à disposition des concepteurs d'objets numériques tous les modèles et théories leur permettant de planifier les interactions de ces objets avec leur environnement. Cela recouvre autant la « programmation », c'est-à-dire la définition du comportement futur des systèmes en cours de conception, que la modélisation pour prédire le comportement des systèmes déjà existants. Bien que compatible avec la définition de l'ACM, cette caractérisation met l'accent sur ce que peut être l'ambition scientifique de l'IHM : d'une part, fournir un cadre descriptif pour tous les types d'interaction envisagés dans les autres sciences, et d'autre part rendre ce cadre opérant pour les concepteurs et ingénieurs.

### PENSER L'INTERACTION

Ainsi caractérisée, l'IHM comporte à la fois des traits des sciences naturelles et des sciences humaines, et des traits de l'informatique et de l'ingénierie. Des premières elle hérite des théories des interactions, des secondes elle reprend le souci de permettre à des concepteurs d'exprimer leur volonté à propos de ces interactions sous forme d'automatismes. Le paradigme computationnel, nous l'avons vu, s'inscrit dans ce schéma et offre un cadre pertinent pour les interactions que nous avons qualifiées d'informationnelles. Mais, nous l'avons vu également, l'interaction homme-machine ne se réduit pas à ce type d'interactions. Les artefacts produits par l'IHM interviennent dans un tissu d'interactions d'une très grande variété : interactions sociales (la collaboration de plusieurs personnes autour d'un système), physiques (la manipulation d'acteurs, la sensibilité aux variations environnementales), informatiques (l'interaction avec d'autres systèmes informatiques, des réseaux de capteurs, etc.), chimiques et biologiques (les prothèses numériques), etc. À chacune de ces interactions correspond un champ disciplinaire particulier avec ses propres modèles et formalismes.

Si l'IHM doit avoir une contribution théorique propre, nous pensons donc que ce doit être celle d'une théorie générale de l'interaction, capable de dépasser les particularismes disciplinaires, et mise sous une forme compatible avec le travail du concepteur, c'est-à-dire avec le langage qu'il va employer pour décrire et produire un système d'interactions. Bien sûr, il ne s'agit pas ici d'avoir la même puissance théorique dans chaque domaine que les théories spécialisées. Il s'agit plutôt de rendre tous les phénomènes accessibles de manière homogène à la modélisation et la programmation, de telle manière que les similitudes entre phénomènes soient exploitables.

### Sciences et ontologie

L'IHM se trouve dans une situation comparable sur ce point à celles des sciences de la nature contemporaines au moment de leur constitution au XVIII<sup>e</sup> siècle. Elle a besoin d'un langage qui lui permette à la fois de rendre compte de notre expérience quotidienne du monde et qui puisse

servir de support à l'élaboration d'un discours scientifique. Au XVIII<sup>e</sup> siècle, les philosophes ont accompli ce travail en remettant en cause certains principes hérités de l'aristotélisme. Descartes fonde ainsi sa physique sur une nouvelle métaphysique et en particulier sur une ontologie dont les sciences contemporaines sont encore largement tributaires. Celle-ci place au premier plan le concept de substance que Descartes définit comme « une chose qui existe en telle façon qu'elle n'a besoin que de soi-même pour exister » [14, Partie I-51]. La substance n'est pas de même nature que ses qualités ou ses attributs, qui ne sauraient exister indépendamment d'une substance qu'ils déterminent. Ainsi la couleur n'existe-t-elle que comme attribut d'un objet possédant une surface. Mais surtout, tous les objets, à l'exclusion notable de l'esprit, participent de la même substance, que Descartes nomme substance étendue, et peuvent donc être pensés selon le même cadre théorique : le corps humain, les boules de billard, les objets célestes, etc. Ils se distinguent uniquement par la spécificité de leurs attributs.

Les sciences de la nature s'appuient de manière essentielle sur cette distinction entre objets et attributs, et sur cette uniformisation ontologique de la nature. C'est elle qui sert de fondement à notre vision contemporaine du monde comme entièrement descriptible par un arrangement complexe d'atomes, eux-mêmes pensés comme de tout petits objets. Mais, à la différence de Descartes, la science moderne est un monisme matérialiste, au sens où elle n'admet qu'un seul type de substance, la matière, là où Descartes en admettait deux, la matière et l'esprit.

Cette ontologie s'accorde avec notre expérience des objets courants, comme des entités dénombrables, persistantes, localisées dans l'espace et le temps et remplit sa fonction de support à l'élaboration d'un discours scientifique. Le concept physique (classique) de masse par exemple, compris comme une propriété des corps, permet à la fois de rendre compte de notre expérience de la pesanteur des objets et d'exprimer le principe d'inertie ou de formuler la théorie de la gravitation. Cette unification des concepts pour penser l'expérience humaine du monde et les phénomènes célestes fut une révolution considérable.

Notre expérience du monde ne se réduit pourtant pas à la perception des objets et de leurs attributs. Il existe de nombreux énoncés, dans le langage courant, pour lesquels cette ontologie semble inadéquate : « il pleut », « la température ambiante a diminué de 2 degrés », « le feu se propage rapidement », etc. Ces énoncés n'ont pas pour sujet un individu, chose ou personne ; ils dénotent des processus, c'est-à-dire des éléments de l'expérience humaine caractérisés exclusivement par des changements, et donc par des interactions. Or, si la tradition philosophique occidentale est très majoritairement guidée par une ontologie substantialiste, il existe d'autres types d'ontologies qui ont mis au premier plan le concept de processus [47]. Longtemps cantonnés aux frontières de la métaphysique, ces travaux ont récemment fait l'objet d'un nouvel intérêt, principalement dans le champ de la physique théorique mais également en biologie. Ils semblent en outre converger avec certains travaux évoqués précédemment en sciences cognitives et en informatique.

## Une ontologie fondée sur les processus

Mettre au premier plan l'interaction, c'est renoncer d'une certaine manière à la nature propre des éléments impliqués dans l'interaction. C'est, par exemple, penser l'écoulement en tant que tel, indépendamment de ce qui s'écoule : eau, lave, etc. C'est aussi s'intéresser en priorité à la relation cause-effet, ou à la caractéristique discrète ou continue d'un phénomène, avant de considérer la nature spécifique des phénomènes en jeu. Dans le vocabulaire philosophique technique ce basculement est celui qui caractérise le passage d'une ontologie de type substantialiste à une ontologie fondée sur les processus.

Certains aspects de la théorie quantique des champs s'accordent en effet très mal avec une ontologie de type substantialiste [29] et trouvent une interprétation beaucoup moins problématique dans le cadre d'une ontologie fondée sur les processus. Depuis qu'au début du XX<sup>e</sup> siècle est apparue la dualité onde-corpuscule de la matière et de la lumière, les théories physiques fondamentales se sont détournées du concept d'objet pour lui préférer celui de champ, ce dernier étant à la fois sujet et vecteur des interactions. On conserve le monisme qui caractérise la science moderne, mais l'interaction s'y substitue à la matière comme axiome fondamental. Cette approche a connu le succès que l'on sait avec la mécanique quantique, mais crée une tension avec la vision substantialiste du monde qui tend à concevoir les objets comme entièrement déterminés indépendamment de leurs interactions. Nombre des paradoxes nés de la physique quantique découlent de cette tension et certains se résolvent lorsque l'on accepte de renoncer à associer des propriétés à une quelconque substance pour les associer uniquement à des interactions [47].

Il est aisé de trouver les signes d'un mouvement analogue en biologie. Notons par exemple les travaux en neurosciences autour des problématiques de synchronisation neuronale [50]. Ces travaux ont clairement pour ambition de comprendre les interactions entre processus répartis sur plusieurs régions du cortex cérébral, plutôt que celui de comprendre le fonctionnement de neurones isolés. De manière plus évidente encore, les travaux de modélisation des écosystèmes se fixent comme objet d'étude des réseaux d'interactions, et s'appuient pour cela sur une approche orientée processus, comme en témoigne par exemple la charte éditoriale de la revue *Ecological Modeling* :

*We aim to understand these basic ecosystem functions using mathematical and conceptual modelling, systems analysis, thermodynamics, computer simulations, and ecological theory. This leads to a preference for process-based models embedded in theory with explicit causative agents as opposed to strictly statistical or correlative descriptions.*

Bien qu'elles n'y fassent pas de référence explicite, il nous semble que les approches dynamiques de la cognition pointent également vers une ontologie de ce type au sens où elles cherchent à caractériser et décrire des phénomènes de changement et l'interaction entre ces phénomènes, indépendamment de la nature des systèmes impliqués. De la même manière les algèbres de processus s'ins-

crivent dans cette volonté de faire des processus des entités de première classe : ces derniers y sont caractérisés exclusivement par leurs interactions avec d'autres processus. Là encore le souci théorique premier est de formaliser les relations entre processus : parallélisme, synchronisation, concurrence quelle que soit la nature des éléments impliqués dans les interactions.

Nous pensons donc que l'IHM, précisément parce qu'elle fait de l'interaction son objet premier, doit s'inscrire dans ce même mouvement. Et que, pour ce faire, elle peut s'appuyer sur les ressources théoriques d'une ontologie fondée sur les processus, afin de se doter des outils conceptuels adéquats pour caractériser, comparer, classer les différents types de processus. À titre d'exemple, on peut citer le travail de Seibt [46], qui se donne pour ambition explicite de fournir les fondations ontologiques pour un programme de recherche qui mettrait au premier plan les concepts de « processus » et d'« interaction ».

## IHM ET PROCESSUS

Une ontologie fondée sur les processus fournit une base féconde pour l'IHM, car cela permet de combiner le mode de pensée des sciences naturelles avec celui de l'informatique et celui de l'ingénierie. Nous l'illustrons ci-dessous à partir des caractéristiques que nous avons établies pour l'IHM, c'est-à-dire une discipline qui vise à mettre à disposition des concepteurs d'objets numériques tous les modèles et théories leur permettant de planifier les interactions de ces objets avec leur environnement.

### Processus et systèmes interactifs

Les deux premières caractéristiques de l'IHM se résument comme suit : toutes les formes d'interaction sont susceptibles d'être mise en œuvre dans un système interactif. Considérons un smartphone tactile équipé de capteurs de luminosité et de température. Sa réalisation implique de raisonner d'une part sur les flux de photons mesurés en lumens, de l'autre sur l'état cognitif de l'utilisateur, et entre les deux sur les algorithmes des applications graphiques. Au sein de ces dernières, un simple dialogue de confirmation d'une action choisie peut mener à une grande diversité conceptuelle. À haut niveau, c'est une question qui admet les réponses OUI et NON et peut se penser selon un modèle fonctionnel. Mais si l'on veut autoriser la réponse par un geste, il faut passer à un modèle événementiel pour insérer la saisie du geste dans le fonctionnement du logiciel. Quant au feedback de saisie, on peut le concevoir comme un objet qui change d'état selon la réponse. Mais pour en faire une animation dont la nature évolue en fonction des progrès du geste, il faut un modèle de processus concurrents pour décrire clairement ce qui se passe.

Les ontologies à base de processus rendent parfaitement compte de cette diversité, car toutes les entités étudiées peuvent être considérées comme des processus en interaction sans perdre aucune précision dans leur description ni aucune cohérence dans le modèle d'ensemble. Pour commencer, les systèmes physiques peuvent tous se penser comme des processus. Ainsi, les particules ne sont définies que par leurs interactions, et l'observation est un

cas particulier d'interaction. Par exemple, dans l'expérience des interférences, un électron est dans un état superposé jusqu'à ce que l'interaction avec la fente qu'il franchit provoque un changement d'état en même temps qu'il donne l'information sur cet état. Ce mode de pensée, similaire à celui des algèbres de processus, se transpose aux objets plus complexes ; ces derniers sont des compositions de processus plus simples, dont les interactions entre eux et avec l'environnement conditionnent les interactions de l'objet macroscopique. Il en va de même pour les systèmes chimiques et biologiques et, par changements d'échelles successifs, un transistor, un écran tactile ou le corps humain deviennent alors des processus complexes susceptibles d'interagir ensemble.

Le logiciel se conçoit aisément sous forme de processus lui aussi, ainsi que le démontrent les algèbres de processus. Il en va de même pour les abstractions manipulées dans les logiciels ; ainsi, la constante OUI est un processus avec lequel les interactions produisent toujours le même effet. Les algorithmes eux-mêmes sont des processus, et il est alors facile de transformer un algorithme de reconnaissance de gestes en processus qui diffuse ses états intermédiaires pour offrir du feedback continu. Notons que raisonner en termes de processus n'impose pas de renoncer à raisonner en termes de calcul. Pour s'en convaincre, on peut soit s'appuyer sur les travaux formels de Milner ou Wegner, soit prendre une approche plus ontologique : un calcul est un processus avec lequel on interagit en lui soumettant des données puis en attendant sa réponse. Qui plus est, si l'on considère un calcul comme l'assemblage d'un processus de stockage d'état et d'un processus d'exécution d'opérations, alors la manipulation de cailloux par des humains et les traitements effectués par un processeur deviennent explicitement de même nature. Cela fournit un cadre descriptif pour des calculs effectués conjointement par un couple humain-machine, et permet d'employer les théories du calcul pour les décrire.

Plus généralement, les constructions abstraites dans leur ensemble peuvent se décrire comme des processus, produits par divers processus matériels ou abstraits. C'est le cas par exemple des processus cognitifs, qui peuvent donc être à la fois des processus abstraits et le produit de processus purement matériels ; on refonde ainsi un nouveau parallèle avec le logiciel. C'est le cas aussi des événements, des procédures, des organisations humaines, des lois, ou des tâches, ce qui permet d'expliquer pourquoi les outils de modélisation de tâche sont si similaires à des outils de programmation.

Les interactions sont elles-mêmes des processus. En physique, c'est ce qui permet d'analyser l'électromagnétisme soit comme un phénomène instantané, soit comme une série d'échange de photons. En IHM, c'est ce qui permet de traiter un geste soit comme un événement ponctuel soit comme une séquence complexe. Les différents choix pour la saisie d'une confirmation deviennent alors différentes configurations de processus, qui produisent toutes le même processus de haut niveau, et il devient possible de se focaliser sur un modèle de haut niveau sans craindre sa remise en question lors d'une analyse plus détaillée.



## Processus et contrôle

Basculer vers une ontologie fondée sur les processus revient à mettre au premier plan les caractéristiques des interactions et non plus les objets qui en sont les acteurs. C'est particulièrement adapté à la première et la troisième caractéristiques de l'IHM : le rôle central du concepteur qui doit penser les interactions de son artefact. En effet, penser une interaction, c'est souvent penser sa structure indépendamment de la nature de ce qui interagit. Cela permet à la fois de développer des théories et des pratiques communes pour les systèmes similaires, et de substituer à volonté ces systèmes lors des phases de conception.

Ainsi, il devient possible de caractériser comme similaires deux processus qui appartiennent à des univers différents, par exemple la variation d'une température ou de la luminosité, qui sont toutes deux des variations de grandeurs dans un espace continu à une dimension. On peut alors les utiliser de manière interchangeable pour piloter le même logiciel, ou le même processus mental.

Ce sont ainsi de multiples processus, que l'on peut nommer « structures de contrôle », qui deviennent compatibles avec les phénomènes les plus divers, que ce soit pour modéliser leur comportement ou le définir. Citons par exemple la relation de cause à effet, qui est à l'origine de l'utilisation du concept d'événement en IHM, et vis-à-vis de laquelle n'importe quel phénomène physique observable peut déclencher un processus logiciel, et réciproquement. C'est ce qui permet de traiter indifféremment le franchissement d'un seuil de température et une séquence de gestes sur l'écran tactile pour déclencher le chauffage d'une pièce depuis un téléphone. C'est aussi ce qui permet de modéliser le processus par lequel un événement dans un processus cognitif, la sensation de froid, déclenche le chauffage. Il devient ainsi possible de raisonner sur un système mixte humain-automatisme en restant dans le même cadre théorique.

Caractériser les différentes formes d'assemblage entre processus fait partie du programme de recherche sur les ontologies à base de processus [46]. L'enjeu est de produire un espace sur la base des dimensions duquel classer les processus, afin de servir de base théorique pour le travail de modélisation des interactions. Dans le cas de l'IHM et des systèmes complexes, on peut envisager d'y retrouver des notions comme l'apparition d'objets, la transmission de données, le parallélisme, ou encore la relation tout-partie et l'auto-similarité. C'est en combinant toutes ces formes de structures de contrôle que l'on peut espérer raisonner un jour formellement sur des systèmes aussi complexes que l'assemblage d'humains, de matériel, de logiciel, de procédures et d'environnement physique dont est constitué un avion, tout en manipulant un nombre raisonnable d'outils conceptuels.

## Applications pratiques

Les possibilités décrites ci-dessus ont des conséquences pratiques potentielles pour les scientifiques et les ingénieurs. Tout d'abord l'unification permise par l'ontologie fondée sur les processus permet de choisir arbitrairement un système, fût-il hétérogène, et d'employer une même méthode analytique : identification des processus signifi-

catifs dans le système puis modélisation de ces processus en utilisant des théories spécialisées si nécessaire. Cette méthode est déjà à l'œuvre de manière implicite dans les recherches sur les moyens de désignation, où l'on étudie un système constitué de l'oeil, de la main, et d'un processus de contrôle. Elle est également sous-jacente aux travaux sur les interfaces adaptatives réagissant à l'état cognitif de l'opérateur, qui mêlent processus physiologiques, processus d'acquisition et de traitement de données et processus complexes de réorganisation de l'interface. On peut s'attendre à ce qu'un cadre conceptuel permettant de mieux caractériser ces processus, en particulier leur structure temporelle respective, facilite la conception d'interactions complexes de ce type. Par exemple, dans un tel cadre conceptuel l'analyse de l'automatisation partielle sous forme d'affectation ou de migration de processus devient directement opérationnelle, et l'adaptation dynamique peut être traitée comme un processus de réaffectation de processus.

Nous y voyons également une opportunité pour élaborer de nouveaux outils d'analyse des dysfonctionnements des systèmes homme-machine. Une analyse en termes de processus et d'interaction entre processus permet en effet de mettre en lumière les problèmes liés à la concurrence, ou la co-occurrence de processus, les effets de renforcement, d'atténuation voire d'inhibition d'un processus par un autre, leur couplage ou au contraire leur absence de couplage. Il y a là, nous semble-t-il, des ressources théoriques importantes pour modéliser et comprendre des phénomènes accidentogènes tels que la mauvaise conscience de la situation, la persévération attentionnelle, la cécité aux changements ou les erreurs de diagnostic.

Enfin, nous l'avons vu, programmer en termes de processus est déjà une réalité dans d'autres domaines. Les langages à base de processus disponibles n'ont pas encore pris la mesure de la variété des interactions envisagées en IHM, et leur pouvoir d'expression reste limité. Mais les travaux décrits dans [7] et [8] montrent comment un environnement à base de processus peut être utilisé pour organiser le travail de conception multidisciplinaire et la production de logiciels interactifs tout en permettant la preuve automatique de propriétés de programmes.

## CONCLUSION

À travers cette étude épistémologique, nous avons cherché à montrer que l'IHM avait toute légitimité à se revendiquer comme une discipline scientifique à part entière pourvu qu'elle s'inscrive dans le développement d'une théorie générale de l'interaction. Nous avons esquissé quelques pistes en direction d'une telle théorie, en mettant au premier plan le concept de processus. Celle-ci reste à consolider et requiert la mise au point d'un ensemble de concepts et de dimensions permettant de caractériser, classer et comparer les différents types de processus rencontrés en IHM. Mais nous voulons voir dans l'élaboration de cette théorie le moyen pour la communauté des chercheurs de se doter d'un cadre épistémologique clair, de concepts communs et de définitions rigoureuses. Un tel cadre permettrait de structurer la variété de leurs travaux, et de fournir un support plus formel aux débats, aux collaborations, et à la production de consensus scientifique.

## BIBLIOGRAPHIE

1. Arbab F. Computing and interaction. In *Interactive Computation*, D. Goldin, S. Smolka, and P. Wegner, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2006, 9–23.
2. Beaudouin-Lafon M. Designing interaction, not interfaces. In *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces*, ACM (2004), 15–22.
3. Berry G. The foundations of Esterel. In *Proof, Language and Interaction: Essays in Honour of Robin Milner*, C. S. G. Plotkin and M. Tofte, Eds. MIT Press, 2000.
4. Block N. Troubles with functionalism. In *Perception and Cognition: Issues in the Foundations of Psychology*, C. W. Savage, Ed. University of Minnesota Press, 1978.
5. Brey P. The epistemology and ontology of human-computer interaction. *Minds and Machines* 15 (2005), 383–398.
6. Card S. K., Newell A. & Moran T. P. *The Psychology of Human-Computer Interaction*. Hillsdale: Erlbaum, 1983.
7. Chatty S. Réconcilier conception d'interfaces et conception logicielle : vers la conception orienté-systèmes. In *Proceedings of the 2012 Conference on Ergonomie Et Interaction Homme-machine* (2012), 73–80.
8. Chatty S., Magnaudet M. & Prun D. Verification of properties of interactive components from their executable code. In *Proceedings of the 7th ACM SIGCHI Symposium on Engineering Interactive Computing Systems* (2015), 276–285.
9. Chemero A. *Radical Embodied Cognitive Science*. MIT Press, 2011.
10. Chomsky N. *Aspects of the Theory of Syntax*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1965.
11. Churchland P. S., Koch C. & Sejnowski T. J. What is computational neuroscience? In *Computational Neuroscience*, E. L. Schwartz, Ed. MIT Press, 1990.
12. Conversy S., Chatty S. & Hurter C. Visual scanning as a reference framework for interactive representation design. *Information Visualization* 10, 3 (2011), 196–211.
13. Copeland B. J. Hypercomputation. *Minds and Machines* 12, 4 (2002), 461–502.
14. Descartes R. *Premiers Principes de la Philosophie*. Henri Le Gras, Paris, 1647.
15. Dittmar A. & Forbrig P. A unified description formalism for complex hci-systems. In *Third IEEE International Conference on Software Engineering and Formal Methods (SEFM 2005)* (2005), 342–351.
16. Dupuy J.-P. *Aux origines des sciences cognitives*. La Découverte, 1999.
17. Eco U. *Kant et l'ornithorynque*. Grasset, 1999.
18. Engelbart D. Augmenting human intellect: A conceptual framework. Tech. Rep. AFOSR-3223, Stanford Research Institute, Menlo Park, CA, 1962.
19. Fodor J. *Representations*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1981.
20. Gardner H. *The mind's new science*. BasicBooks, 1985.
21. Guiard Y. & Beaudouin-Lafon M. *International Journal of Human-Computer Studies. Special issue: Fitts law 50 years later: Applications and contributions from human-computer interaction*, vol. 61(6). Academic Press, Inc., 2004.
22. Hewett T. & Al. *ACM SIGCHI Curricula for Human-Computer Interaction*. ACM Press, New York, 1992.
23. Hirsh M. The dynamical system approach to differential equations. *Bulletin of the American Mathematical Society* 11, 1 (1984), 1–64.
24. Hoare C. A. R. Communicating sequential processes. *Communications of the ACM* 21, 8 (1978), 666–677.
25. Höök K. & Löwgren J. Strong concepts: Intermediate-level knowledge in interaction design research. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 19, 3 (2012), 23:1–23:18.
26. Hutchins E. *Cognition in the Wild*. MIT Press, 1995.
27. Kirsh D. The intelligent use of space. *Artificial Intelligence* 73, 1-2 (1995), 31–68.
28. Kirsh D. Embodied cognition and the magical future of interaction design. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction* 20, 1 (2013).
29. Kuhlmann M., Lyre H. & Wayne A., Eds. *Ontological Aspects of Quantum Field Theory*. World Scientific, 2002.
30. Kuhn T. S. *The Structure of Scientific Revolution*. The University Chicago Press, Chicago, 1962.
31. Licklider J. C. R. Man-computer symbiosis. *Institute of Radio Engineers Transactions on Human Factors Electronics HFE-1* (1960), 4–11.
32. Lucas J. R. Minds, machines, and Gödel. *Philosophy* 36 (1961), 112–137.
33. Lüdtké A., Osterloh J.-P. & Frische F. Multi-criteria evaluation of aircraft cockpit systems by model-based simulation of pilot performance. In *Proceedings of ERTS - Embedded Real Time Software and Systems 2012* (2012).
34. Mackay W. E. The interactive thread: Exploring methods for multi-disciplinary design. In *Proc. DIS '04*, ACM (2004).
35. McCulloch W. S. & Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical biophysics* 5, 4 (1943), 115–133.
36. Milner R. *A Calculus of Communicating Systems*. Springer-Verlag, 1980.
37. Myers B. A. A brief history of human computer interaction technology. *ACM interactions* 5, 2 (1998), 44–54.
38. Newell A. Physical symbol systems. *Cognitive Science* 4 (1980), 135–183.
39. Newell A. & Simon H. A. Computer science as empirical inquiry: Symbols and search. *Communications of the ACM* 19, 3 (1976), 113–126.
40. Penrose R. *Shadows of the Mind*. Oxford University Press, 1994.
41. Port R. & Van Gelder T., Eds. *Mind as Motion: Exploration in the Dynamics of Cognition*. MIT Press, 1995.
42. Putnam H. Minds and machines. In *Dimensions of Mind*, S. Hook, Ed. New York University Press, 1960.
43. Pylyshyn Z. W. *Computation and Cognition*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1984.
44. Rogers Y. New theoretical approaches for human-computer interaction. *Annual Review of Information Science and Technology* 38, 1 (2004), 87–143.
45. Searle J. Minds, brains and programs. *Behavioral and Brain Sciences* 3 (1980), 417–457.
46. Seibt J. Forms of emergent interaction in General Process Theory. *Synthese* 166 (2009), 479–512.
47. Seibt J. Process philosophy. In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, E. N. Zalta, Ed. 2013.
48. Sheridan T. B. Task analysis, task allocation and supervisory control. In *Handbook of Human-Computer Interaction*, M. G. Helander, T. K. Landauer, and P. V. Prabhu, Eds. Elsevier, 1997.
49. Siegelmann H. T. & Sontag E. On the computational power of neural nets. *Journal of Computer and System Sciences* 50, 1 (1995), 132–150.
50. Singer W. Neuronal synchrony: A versatile code for the definition of relations? *Neuron* 24 (1999), 49–65.
51. Suchman L. A. *Plans and Situated Actions: The problem of human-machine communication*. Cambridge University Press, 1987.
52. Thompson E. *Mind in Life: Biology, Phenomenology, and the Sciences of Mind*. Harvard University Press, 2007.
53. Turing A. On computable numbers, with an application to the entscheidungsproblem. *Proceedings of the London Mathematical Society* 2, 42 (1936), 230–265.
54. Van Gelder T. It's about time: An overview of the dynamical approach to cognition. In *Mind as Motion: Exploration in the Dynamics of Cognition*. MIT Press, 1995.
55. Varela F., Thompson E. & Rosch E. *The Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience*. MIT Press, 1991.
56. Vera A. H. & Simon H. A. Situated action: A symbolic interpretation. *Cognitive Science* 17 (1993), 7–48.
57. Wegner P. Why interaction is more powerful than algorithms. *Communications of the ACM* 40, 5 (1997), 80–91.