

Espaces d'hybridation en conception architecturale. Modalités collaboratives entre cognitions naturelles et artificielles

Hybridization areas in architectural design. Collaborative modalities between natural and artificial cognition

Louis Roobaert^{1,2,3,*}, Damien Claeys^{1,2}, et Sheldon Cleven^{1,2,4}

¹ TSA-LAB, LAB, UCLouvain, Rue Wafelaerts 47/51, 1060 Bruxelles, Belgique

² LOCI, UCLouvain, Rue Wafelaerts 47/51, 1060 Bruxelles, Belgique

³ Architecte Designer Senior, Directeur du département R&D, B2Ai, Belgique

⁴ Architecte, membre du département R&D, B2Ai, Belgique

Résumé. Les développements récents de l'intelligence artificielle (IA) forcent la reconfiguration des interactions humains-machines (IHM). Initiée par la cybernétique, cette évolution s'est déroulée en trois phases : standardisation, automatisation, adaptabilité. Permettant une collaboration entre conception et computation, l'IA favorise des réseaux d'hybridation entre mondes physique et numérique, où cognition humaines et artificielles interagissent pour renforcer l'émulation créative et décisionnelle. En conception architecturale, ces réseaux sont peu développés. Pour révéler ce potentiel, une analyse des réseaux de conception hybrides et une comparaison des niveaux de cognition sont proposées à l'aide de la taxonomie de Bloom croisée avec le modèle Cattell-Horn-Carroll.

Mots clés. intelligence artificielle, conception architecturale, réseau d'hybridation, IHM, spectre cognitif

Abstract. Recent developments in artificial intelligence (AI) are forcing a reconfiguration of human-machine interactions (HMI). Initiated by cybernetics, this evolution has unfolded in three phases: standardization, automation, adaptability. Facilitating collaboration between design and computation, AI promotes hybridization networks between physical and digital worlds, where human and artificial cognitions interact to enhance creative and decision-making emulation. In architectural design, however, these networks are still underdeveloped. To unveil this potential, an analysis of hybrid design networks and a comparison of levels of cognition are proposed using Bloom's taxonomy crossed with the Cattell-Horn-Carroll model.

Keywords. artificial intelligence, architectural design, hybridisation network, human-machine collaboration, cognitive spectrum

* Corresponding author: louis.roobaert@uclouvain.be

1 Introduction : niveaux d'interaction humain-machine (IHM)

Des phénomènes tels que la « silicolonisation » du réel [1] et l'externalisation des routines mentales [2] marquent notre quotidien, renforçant la dépendance de la « biosphère » à la « technosphère » [3]. Les multiples hybridations de réalités physiques et numériques redéfinissent la manière dont les architectes abordent la propretation. Ces changements questionnent leur avenir professionnel, particulièrement en matière de gestion des données, de prise de décision et de créativité [4] pour éviter leur « obsolescence programmée » [5]. Plus précisément, le développement de l'intelligence artificielle (IA) interroge les modalités de l'interaction humain-machine (IHM) dans les écosystèmes de concepteurs [6,7]. Strictement, l'IA est un ensemble bien défini d'apports théoriques et technologiques inscrits dans une tradition intellectuelle cybernétique. Plus largement, elle inclut tout ce qui contribue à l'élargissement de la « numérisphère », c'est-à-dire l'ensemble des processus et des systèmes qui offrent une autre lecture du réel [8].

Nous décrivons le développement de l'IA en trois étapes principales : (1) la *standardisation* économique des processus, initiée dès le XIX^e siècle dans le sillage de la seconde révolution industrielle et forgeant les prémisses de l'automatisation et de la computation (machine de Babbage, taylorisme, fordisme...); (2) l'*automatisation* cybernétique de tâches spécifiques, souvent répétitives, à partir de règles prédéfinies, permise par l'arrivée des grands calculateurs, des ensembles de données et des logiciels (systèmes experts, bases de données relationnelles, logiciels de bureautique...); (3) l'*adaptabilité* systémique des processus, générée à partir de systèmes d'apprentissage dynamiques, capables de s'autoorganiser en fonction de l'évolution des données disponibles pour résoudre des problèmes plus complexes (apprentissage machine, apprentissage profond, réseaux de neurones artificiels...).

Bien qu'elles soient distinctes, nous postulons que les humains (H) et les machines (M) possèdent tous des capacités cognitives. Nous distinguons trois niveaux de « dialogue » en conception architecturale [5,6] : (a) l'*automatisation* par M des tâches répétitives, pénibles pour H, mobilisant faiblement les capacités cognitives de l'IA (2^e étape historique) ; (b) la sélection par H de procédures compatibles avec les capacités cognitives de M (de la 1^{re} à la 2^e étape) ; (c) une collaboration dynamique où H et M échangent et intègrent mutuellement leurs méthodes de traitement de l'information, leurs techniques de résolution de problèmes et de prise de décisions (3^e étape).

Dans la présente contribution, nous analysons l'interaction fluide et adaptative entre H et M et la constitution de réseaux hybrides de conception. Nous soutenons que ce troisième niveau d'IHM est faiblement développé en conception architecturale, alors qu'il ouvre un vaste champ de recherche portant sur de nombreuses possibilités inexplorées d'hybridation, de collaboration et d'émulation. Nous nous focalisons ici sur l'interaction entre la cognition naturelle et artificielle : d'abord, les divers réseaux de conception sont examinés ; ensuite, une analyse des acteurs est menée ; enfin, nous proposons une classification des niveaux d'activité cognitive pour H et M à l'aide de la taxonomie de Bloom croisée avec le modèle Cattell-Horn-Carroll.

2 Les réseaux de conception

La conception architecturale est un processus qui dépend de la compréhension du monde de ceux qui la pense. Elle est envisagée ici comme une séquence de capture et de transfert de données, permettant à chacun de construire un rapport personnalisé au réel. Cette perspective dynamique s'apparente à une forme d'improvisation collective, émanant d'échanges de donnée partiellement imprévisibles [9]. S'effectuant circulairement depuis et vers le réel, ces flux invitent à la formulation d'hypothèses, la construction de représentations, l'orientation

des actions au moyen d'un processus de conception. Ainsi la conception architecturale, loin d'être l'œuvre isolée d'un individu, se révèle comme un processus collaboratif [10,11].

Dans sa quête d'appréhension du réel, le concepteur, se heurte aux limites de sa propre cognition. En d'autres mots, il souffre de « *bounded rationality* » [12], une limite cognitive le rendant incapable de saisir le réel dans son intégralité. Pour surmonter cette contrainte, il transforme des artefacts en instruments, les investissant de signification et les intégrant dans son activité cognitive et physique [13]. En segmentant et en traitant une fraction des données disponibles, le concepteur crée un instrument cognitif personnalisé qui, tout en étendant ses capacités, influence et restreint sa perception du réel, en canalisant les échanges de données à travers les médias employés [14]. Le passage d'artefact à instrument souligne leur rôle, non seulement comme extensions fonctionnelles, mais aussi comme éléments constitutifs de l'humanité elle-même [15,16].

Nous proposons un *spectre* de valeurs pour décrire le degré variable d'hybridation de H et M. Ce spectre est borné par deux *polarités* abstraites (cf. fig. 1) : (1) une existence purement organique *hors* de la « technosphère » ; (2) une existence purement artificielle *hors* de la « biosphère ». Toutefois, ces pôles sont théoriques car, à la fois, la technologie est intrinsèquement liée à l'humanisation et l'artificialité dans toutes ses formes est inextricablement liée à la main des humains. Entre les pôles théoriques, l'ensemble des configurations hybrides opérantes en conception architecturale se déploient, là où technique et humanité coévoluent et se façonnent mutuellement.

Ces dernières décennies, l'intégration croissante de formes artificielles dans les réseaux de conception s'inscrit dans le continuum d'externalisation des capacités humaines [15]. Cependant nous postulons que ce processus n'a pas atteint sa forme définitive. En effet, les outils, les machines et les technologies évoluent parallèlement aux transformations continues de notre monde. Cette dynamique perpétuelle assure que les formes M actuelles ne sont que des instantanés dans un flux évolutif. Se distinguant fondamentalement des générations précédentes par sa capacité adaptative, le troisième niveau d'IA illustre cette évolution, où nous considérons plus les objets techniques comme des entités figées, mais comme des acteurs enrichissant l'expérience humaine [14]. Cette évolution suggère une analogie avec les mythes de Frankenstein, de Pinocchio, ou du Golem, où le créateur H *semble donner vie* à la créature M. En conséquence, peuplés de machines et d'entités artificielles en tous genres, les réseaux de conception, par définition hybrides, tendent à se rapprocher du bornage artificiel [17].

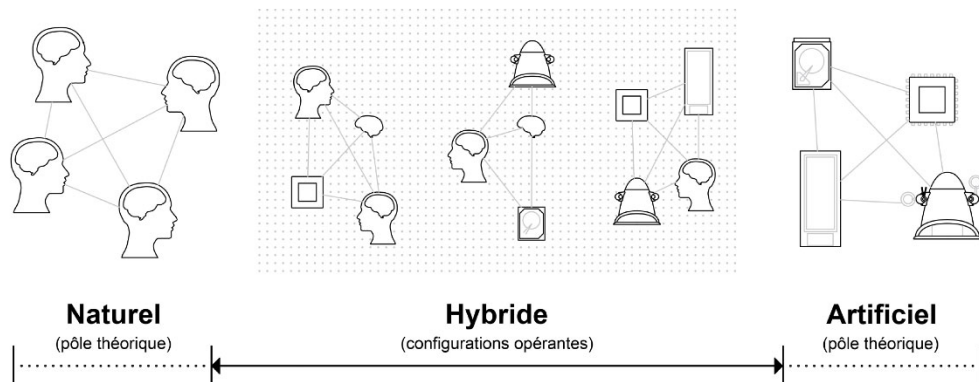


Fig. 1. Les configurations opérantes entre les deux pôles théoriques du spectre d'hybridation des réseaux de conception.

3 Les acteurs

L'intégration d'artefacts dans des dynamiques collaboratives engendre un double phénomène : la *déshumanisation* de l'être humain et l'*humanisation* de la machine [18]. Ce constat permet de mieux comprendre comment un rapprochement s'opère jusqu'à provoquer une forme d'*hybridation* : les humains adoptent des traits artificiels, tandis que les machines acquièrent – ou sont programmées pour présenter – des comportements semblables à ceux des êtres vivants [4].

Dans le contexte de la Seconde Guerre mondiale, la « cybernétique » de Wiener [19] embrasse d'abord tous les aspects liés au contrôle et à la communication des systèmes comprenant des animaux, des humains et/ou des machines. Menés à la NASA pendant la course de la conquête spatiale, Clynes et Kline [20] créent le mot « cyborg » – contraction et abréviation de l'expression *cybernetic organism* – et ils posent les bases de cette hybridation entre organismes vivants et non vivants à travers trois concepts principaux : (1) l'*homéostasie* manifeste l'intégration de dispositifs technologiques régulant et maintenant dynamiquement les fonctions nécessaires à un équilibre physiologique, notamment en contrôlant la communication permise par l'interaction des H et des M ; (2) l'*auto-organisation* définit la capacité d'un système à se reconfigurer structurellement et fonctionnellement, tout en conservant une « clôture opérationnelle » [21] pour créer des comportements émergents ; (3) la *virtualisation* utilise les techniques de l'information et de la communication (TIC) pour étendre ou augmenter les capacités cognitives, par une extension des capacités sensorielles ou motrices, ou par une modification de la perception et du traitement de l'information par le cerveau.

En 1985, du côté des *cultural studies*, Haraway [22] initie une « *cyborg anthropology* » sous la forme d'une épistémologie qui remet en question les frontières traditionnelles entre H et M, en critiquant les dualismes traditionnels. Elle propose également une politique du cyborg axée sur l'affinité plutôt que sur l'identité. L'« être-cyborg » devient progressivement vecteur d'une relation conduisant à l'établissement d'une hybridation multi-scalaire. Cette perspective a donné naissance à divers concepts tels que le « cyberpunk », la « cyberculture », la « ville-cyborg » [23] et le « cyberspace » [24], notamment incarné dans le « métaverse » [25]. Plus tard, en décrivant l'évolution de la société industrielle vers un système global polymorphe, centré sur l'information et la technologie, Ronfeldt [24] propose la mise en place d'une « *cyberology* », avant que Gray et al. popularisent le concept de « *cyborgology* » [26].

En tant qu'étude des diverses formes d'association entre l'humain et la machine, la *cybergologie* est un champ de recherche multidisciplinaire renforcé par d'autres théories, parmi lesquelles : (1) la « théorie de la conversation » (CT) de Pask [27], développée depuis les années 1950, offre un cadre analytique pour comprendre la nature des participants d'une conversation, lorsque le concepteur s'intègre dans un écosystème numérique, peuplé d'humains, de machines et d'outils interconnectés [9]. Pour définir les membres d'une conversation, Pask distingue chaque participant en deux organisations biophysiques : « P-individual » [individu-P] et « M-individual » [individu-M]. Un individu-P est un « opérateur » symbolique sans réelle matérialité, jouant le rôle d'acteur et associé à un personnage (par exemple, un profil ou une personnalité humaine). Tandis qu'un individu-M est un « processeur », une matrice biologique ou artificielle, contenant l'équivalent d'un cerveau, dans lequel un individu-P peut s'incarner [4] ; (2) la « théorie de l'acteur-réseau » (ANT) [28], développée en sociologie depuis les années 1980, enrichissant cette vision en considérant les objets technologiques comme des acteurs à part entière dans les réseaux sociaux et architecturaux. En d'autres mots, la cybergologie postule que les technologies s'intègrent et redéfinissent notre environnement social et urbain, créant de nouvelles dynamiques dans laquelle les distinctions traditionnelles entre nature et culture et entre H et M deviennent de plus en plus floues.

Dans le contexte de la conception architecturale, par analogie avec la cyborgologie, la CT et l'ANT, cette contribution identifie deux classes de cyborgs (cf. fig. 2) : (1) les *cyborgs métaphoriques* (individu-P) représentent une extension ou une imbrication des capacités cognitives entre l'humain et l'artificiel [29], manifestée par l'immersion d'une personnalité dans des environnements numériques par l'*augmented reality* (AR) ou la *virtual reality* (VR) [4] ; (2) les *cyborgs techniques* (individu-M), organismes biologiquement hybridés, utilisent la technologie pour s'adapter et interagir avec leur environnement. Sans se limiter au remplacement de fonctions physiologiques, ces dispositifs étendent les capacités du concepteur, permettant des formes réelles de perception et d'interaction inaccessibles auparavant [30].

En explorant l'interconnexion entre les cyborgs métaphoriques/techniques et leur capacité à s'incarner dans des individuations -M et/ou -P (humaines et/ou artificielles), nous observons que leur interdépendance se renforce et contribue à l'émergence d'un tissu d'interaction complexe. Dans ce tissu, en tant qu'entités cognitives, les individu-P peuvent s'exprimer à travers de multiples individus-M, et réciproquement, mutualisant leurs compétences. De ce postulat, nous proposons que les réseaux de conception hybride deviennent des systèmes dynamiques récurrents, ou chaque entité, cherche à s'augmenter, tout en se diminuant, pour faire face aux problématiques telles que la gestion de donnée, la créativité ou encore la prise de décision. Ces réseaux hybrides, où les acteurs sont eux-mêmes des hybridités, tendent à redéfinir les rôles et les capacités des entités. Dans ces espaces, nous observons que la distinction entre naturel et artificiel s'altère et que la collaboration devient essentielle [31].

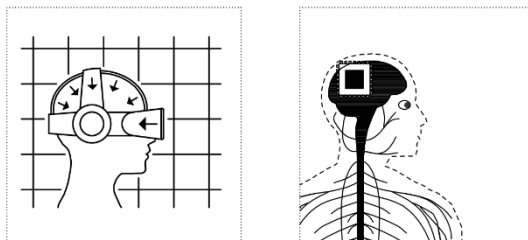


Fig. 2. Cyborg métaphorique (à gauche) et cyborg technique (à droite).

4. Distribution de l'effort cognitif et spectres cognitifs

Actuellement, aucun modèle général expliquant la distribution de la cognition ne fait l'unanimité [32]. Cet article se limite à l'exploration des dynamiques en jeu dans la conception architecturale, lorsque les énergies cognitives sont distribuées dans un réseau en prenant en compte la dimension collaborative et la mutualisation des compétences entre les acteurs.

L'intégration d'acteurs de différentes natures dans le réseau de conception engendre une relation bidirectionnelle : M peut améliorer ses performances par ses contacts répétés avec H et par l'accumulation de données, tandis que H peut accroître ses propres capacités cognitives et interactionnelles, mais également externaliser certaines de ses fonctions au profit d'autres [33].

En d'autres mots, une approche systémique de l'acte cognitif, est proposée ici dans le sens où, lorsqu'il est réparti sur l'ensemble d'un système, il est considéré comme étant plus que la somme des cognitions individuelles des membres du réseau. De ce postulat, nous soutenons que l'acte cognitif ne se limite pas à une individualité, mais s'étend à travers un réseau : les objets, les artefacts, les individus et l'environnement [34]. Cette perspective s'appuie sur les concepts d'« autopoïèse » et d'« énaction » de Maturana et Varela [21], qui

reconnaissent l'interdépendance entre les organismes et leur environnement dans les processus cognitifs. Varela, Thompson et Rosch [35] étendent cette idée, en soulignant que la cognition s'incarne non seulement dans l'individu, mais aussi dans ses interactions avec l'environnement écosocial. Ainsi, la distribution de la cognition est envisagée non seulement comme une propriété émergente d'un réseau de cognitions individuelles, mais également comme un phénomène intégré et étendu, où les interactions entre les individus, les objets, et l'environnement façonnent collectivement le processus cognitif [36].

Dans le cas d'un projet d'architecture, pour enrichir la connaissance de l'artefact en cours de projection, les concepteurs humains s'appuient notamment sur des composants externes : maquettes physiques, logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) ou échanges avec le maître d'ouvrage. Ce faisant, les efforts cognitifs sont partagés sur l'ensemble du réseau et sont réalisés grâce à la coopération et à la communication entre les composants internes (mémoire, perception, raisonnement...) et externes des individus [37]. La distribution de la cognition sur un réseau implique deux aspects : l'*aspect écologique* suggère que la cognition est transférée sur le réseau pour économiser les ressources cognitives de l'individu ; l'*aspect social* souligne l'importance des échanges de contenus, de signification et de contenus sémantique pour une coordination des acteurs. Ces échanges ne se limitent pas à la transmission d'informations. Ils englobent un partage dynamique et interactif d'idées, de concepts et d'interprétations qui enrichissent le processus créatif. Ainsi, la coordination entre les acteurs du projet devient une question de logistique ou de technique, mais également une danse complexe d'échange de connaissances, où le sens et la signification sont constamment co-construits et réinterprétés, ajoutant une richesse et une profondeur essentielles à l'acte de création architecturale.

En développant le concept de « cognition distribuée » (CD) proposé par Hutchins, il est suggéré que l'analyse des tâches cognitives doit prendre en compte le réseau d'acteurs contribuant à leur exécution. La CD accepte donc que l'effort s'étend au-delà du corps des individus pour s'inscrire notamment dans les interactions entre humains, machines, objets et cyborgs. Toutefois, nous reconnaissons que la CD présente des limites notamment en termes de quantification et d'applicabilité de mesures standards, telles que le test d'intelligence [36]. En réponse, cet article propose une analyse complémentaire, visant à évaluer les spectres cognitifs des différents acteurs (H, M). L'objectif est d'analyser comment les interactions entre l'intelligence humaine (IH) et l'intelligence artificielle (IA) peuvent se compléter au sein d'un réseau.

5. Spectre cognitif humain

Le concept fourre-tout d'*intelligence* (I) est difficile à définir [38], le terme n'est déposé nulle part et il ne semble pas posséder un caractère homogène. La diversité des approches en psychologie reflète les multiples facettes de sa structuration [39]. Dans cet article, nous l'abordons dans le cadre particulier de la conception architecturale, perçu comme lié à la résolution de problème en situation créative. Une posture qui considère l'intelligence comme étant multifactorielle est adoptée et celle-ci peut se définir comme la capacité de comprendre, d'apprendre et de faire face à de nouvelles situations en utilisant des raisonnements pour résoudre des problèmes et s'adapter à l'environnement [40]. Elle englobe une gamme de compétences cognitives, y compris la mémoire, la compréhension, la résolution de problèmes, et l'adaptation formant un ensemble de processus mentaux qui travaillent ensemble [41].

Dans ce contexte, nous mobilisons la psychométrie, via le modèle Cattell-Horn-Carroll (CHC) (*cf.* fig. 3), pour mesurer le spectre cognitif de l'humain. Le modèle CHC soutient la multifactorialité de l'intelligence et il fournit une méthodologie plus complète pour analyser

ses divers aspects. Aujourd’hui, ce modèle est la référence dans la construction et l’interprétation des tests d’aptitudes cognitifs [42].

À partir des années 1940, Cattell [43,44] développe un modèle affirmant que l’intelligence n’est pas un trait unitaire et qu’elle est composée d’au moins deux capacités cognitives : (1) l’« intelligence fluide » (Gf) ou la capacité à penser de manière logique et à résoudre des problèmes ; (2) l’« intelligence cristallisée » (Gc) ou la capacité à utiliser des compétences et des connaissances issues d’expériences précédentes [45]. Dans les années 1990, Horn étend le modèle en enrichissant sa structure multifactorielle par l’intégration de quatre autres compétences [46]. Enfin, en effectuant une méta-analyse de 477 études sur l’intelligence, avec un échantillon total de 130 000 participants [41,47], Carroll [41], définit une hiérarchie des aptitudes cognitives, structurée à l’aide de trois stratum : (1) le *stratum* III (ou facteur « g ») correspond au facteur général de l’intelligence ; (2) le *stratum* II (ou compétence large) intègre les critères multifactoriels de l’intelligence similaire au modèle Cattell-Horn ; (3) le *stratum* I (ou compétence étroite) intègre les sous-facteurs qui influencent les facteurs de groupe. Enfin, en associant le modèle multifactoriel de Cattell-Horn et la structure hiérarchique de Carroll, McGrew donne naissance au modèle Cattell-Horn-Carroll (CHC) [48].

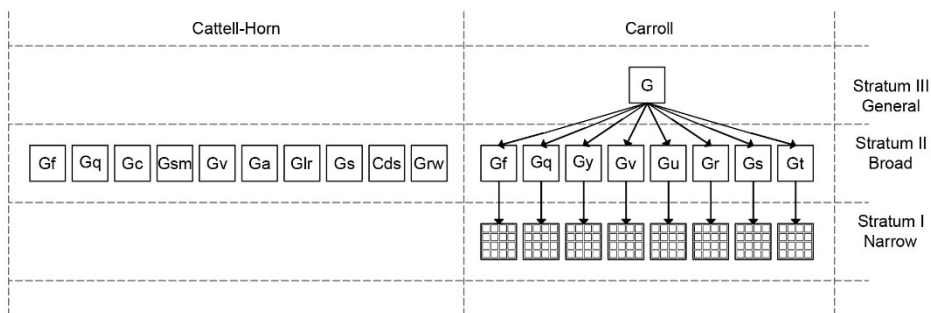


Fig. 3. Reconstitution du modèle CHC en séparant l’apport de Cattell-Horn et celui de Carroll, d’après Flanagan & Dixon (2014).

Dans cet article, nous adaptons le modèle CHC pour illustrer l’étendue, la diversité et la multidimensionnalité du spectre cognitif humain (*cf.* fig. 4). Sous cette nouvelle forme évoquant un tableau périodique, nous décomposons les capacités cognitives larges permettant d’observer la réactivité propre à chaque élément et les relations entre les différentes compétences étroites. Cette organisation permet de relier toutes les procédures cognitives mises en œuvre lorsqu’un concepteur aborde un problème (en référence au tableau de Mendeleïev, où chaque atome peut se combiner pour former une multitude de molécules, de manière similaire ici, chaque compétence étroite peut s’assembler).

Par analogie à son parent chimique – structuré en bloc, familles et périodes – le tableau périodique du spectre de l’IH adopte une configuration similaire. (1) Dix *familles* verticales distinguées par une stratification de base, correspondant aux différentes compétences larges du spectre cognitif humain ; (2) quatre *blocs* répètent cette stratification et regroupent les familles suivant leur domaine d’application ; (3) six *périodes* segmentent horizontalement le tableau par une échelle verticale décrivant le niveau de complexité cognitif des compétences étroites ; (4) une *étiquette* [*label*] identifie individuellement chaque compétence étroite.

(1) Les *familles* représentent chacune des dix aptitudes larges d’IH. Leur explication est reconstituée à partir des travaux de McGrew [48,49], de Flanagan et Dixon [42], de Carroll [41], de Cattell [45] et de Horn [50] :

- I. intelligence cristallisée (Gc) : capacité à invoquer des connaissances et des expériences accumulées pour résoudre des problèmes ;

- II. compétence de lecture et d'écriture (Grw) : compétences de base en lecture et en écriture et capacité d'expression de la pensée par l'écriture ;
- III. connaissance quantitative (Gq) : ensemble des connaissances mathématiques et capacité à utiliser des informations quantitatives et à manipuler des symboles numériques ;
- IV. intelligence fluide (Gf) : les opérations mentales qu'un individu utilise lorsqu'il doit résoudre de nouveau problème – qui ne peuvent pas être exécutées automatiquement – indépendamment des connaissances précédemment acquises ;
- V. mémoire à court terme (Gsm) : capacité à stocker des informations dans la conscience immédiate et de les ré-utiliser de façon presque immédiate ;
- VI. stockage à long terme (Glr) : capacité à stocker des informations dans la mémoire à long terme et à les récupérer dans un temps relativement long ;
- VII. traitement auditif (Ga) : capacité à détecter et à traiter des informations non verbales ;
- VIII. traitement visuel (Gv) : capacité à effectuer une projection mentale pour résoudre des problèmes, capacité à percevoir, analyser et synthétiser des configurations visuelles (y compris la reconnaissance et la manipulation d'objets dans l'espace (qui peut être mental) ;
- IX. vitesse de traitement (Gs) : capacité à effectuer rapidement et avec fluidité des tâches cognitives simples ;
- X. vitesse de décision (Gt) : capacité de réaction et de prise de décisions.

(2) Les *blocs* regroupent des compétences similaires en fonction de leur domaine d'application. Ils soulignent les interconnexions et les relations entre différentes familles de compétences :

- *bloc a.* des connaissances acquises : regroupe les compétences qui sont principalement fondées sur l'accumulation et l'intégration de connaissances. Elles englobent les compétences larges tels que les mathématiques, la lecture, l'écriture et la connaissance générale. Elles sont souvent développées par l'expérience, et les interactions répétées avec l'environnement social et culturel ;
- *bloc b.* des capacités générales : compétences impliquées dans le raisonnement logique, la mémoire à court terme et la récupération à long terme. Elles sont liées à l'apprentissage, la résolution de problèmes et la pensée critique ;
- *bloc c.* du sensori-moteur : compétences impliquées dans la perception et le traitement des informations en provenance de l'environnement par la vue ou l'audition. Elles permettent d'interpréter et de réagir aux stimuli sensoriels ;
- *bloc d.* de la vitesse : regroupe les compétences impliquées dans la rapidité et l'efficacité du traitement des informations.

(3) Les *périodes* organisent hiérarchiquement des compétences étroites en reflétant la progressivité de la complexité cognitive. Considérant que le processus de conception est une conversation itérative d'apprentissage [9,51], nous utilisons la taxonomie de Bloom pour évaluer l'acquisition des compétences cognitives par un apprenant [52]. Cette taxonomie se divise en six catégories allant de compétences cognitives faiblement ordonnées jusqu'à d'autres hautement organisées. La taxonomie de Bloom [53], actualisée par Anderson & Krathwohl [54] propose une structuration hiérarchique en six niveaux ou chaque niveau doit être acquis avant de tenter d'acquérir le suivant : (1) « mémoriser », (2) « comprendre », (3) « appliquer », (4) « analyser », (5) « synthétiser », (6) « créer » [52].

Après avoir établi la structure générale du modèle tabulaire du spectre cognitif humain (familles, blocs, périodes), la pertinence de celui-ci est testée par un positionnement non exhaustif de variétés des compétences cognitives étroites. Cette approche méthodologique intègre la possibilité d'adapter et d'ajouter d'autres compétences, reflétant ainsi le caractère dynamique et cyclique des recherches menées en sciences cognitives et en psychologie.

Cependant bien que le modèle CHC soit largement reconnu et qu'il permette de conceptualiser l'intelligence humaine, une question demeure. Comment est-il possible de le transposer à l'IA, afin de pouvoir comparer les deux spectres cognitifs et de déterminer leur potentiel combinatoire ?

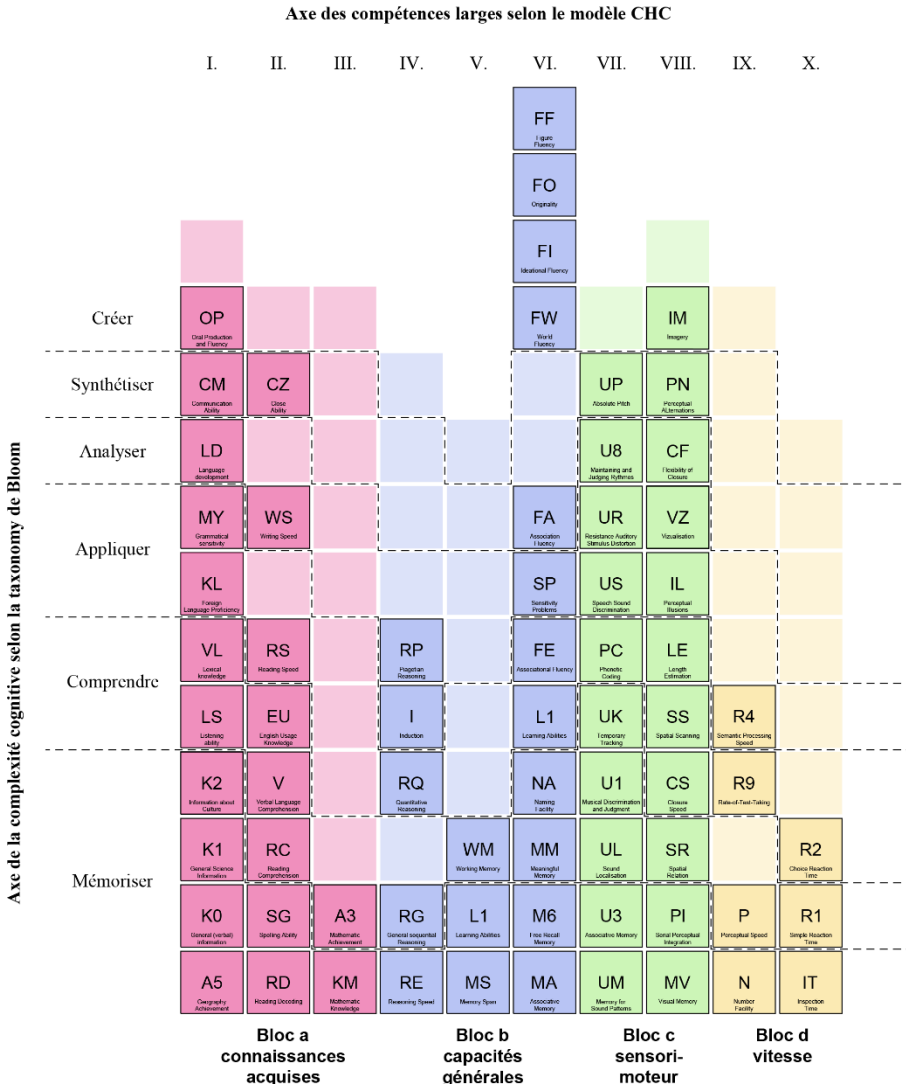


Fig. 4. Le spectre cognitif humain d'après le modèle CHC et la taxonomie de Bloom.

6 Spectre cognitif artificiel

Malgré son développement initial basé sur une analogie avec l'organisation supposée du cerveau biologique ou de raisonnement logique de l'être humain, l'intelligence artificielle, fonctionne différemment. Dans cet article, nous la positionnons au sein de la philosophie de la connaissance. Ses succès et échecs sont autant de tentatives pour explorer les bases de l'IH [55].

Dans l'analyse du spectre cognitif de l'IA, correspondant à la strate II du modèle CHC, seules deux compétences larges semblent pertinentes [47] : l'intelligence fluide (Gf) et

l'intelligence cristallisée (Gc). Les autres sont considérées ici comme secondaire parce qu'elles sont fortement influencées par la technologie (*hardware* et *software*). En effet, elles ne sont pas intrinsèques à l'intelligence machine, mais dépendent plutôt des limitations de notre époque. Lorsque nous transposons les concepts de Gf et de Gc à l'IA, ceux-ci sont utilisés dans leur sens métaphorique ou analogique puisque l'IA n'est pas dotée de conscience [56].

D'un côté, la Gc concerne les compétences acquises grâce à l'entraînement préalable de M par H, des bases de données structurées et/ou des règles programmées que l'IA peut convoquer pour effectuer des tâches bien spécifiques [57]. Cinq analogies ressortent entre la Gc et l'IA : (1) les bases de données et les systèmes experts ; (2) le traitement du langage naturel (TLP) ; (3) la mémoire sémantique neuronale ; (4) l'apprentissage supervisé ; (5) apprentissage par transfert.

De l'autre, la Gf concerne la capacité de M à raisonner et à résoudre de nouveaux problèmes abstraits de manière autonome sans être explicitement programmée pour cela. Elle s'exprime au moins dans les domaines suivants : (1) l'apprentissage non supervisé ; (2) les réseaux de neurones profonds ; (3) l'apprentissage par renforcement. En résumé, l'intelligence cristallisée est la capacité à utiliser des modèles préétablis ou des bases de données étiquetées, tandis que l'intelligence fluide est celle d'apprendre de nouvelles tâches sans avoir été explicitement programmé pour les traiter.

7 Vers une comparaison des spectres cognitifs

La comparaison effectuée entre les cognitions humaine et artificielle révèle des modes de fonctionnement distincts. En nous focalisant spécifiquement sur l'étude de l'intelligence cristallisée et de l'intelligence fluide – uniques compétences larges partagés entre H et M –, un parallèle peut être établi entre ces deux dimensions cognitives du modèle CHC et la taxonomie de compétences cognitives de Bloom [53]. Les deux premiers niveaux qui comprennent la « mémorisation » et la « compréhension », sont associés à la Gc. Ils impliquent respectivement, de reproduire une information emmagasinée (base de données et systèmes experts) et tandis que la « compréhension » implique de répondre de manière correcte mais différente de l'information mémorisée (ce qui est lié à l'apprentissage par transfert). Le troisième niveau, celui d'« appliquer » des règles, se situe à l'intersection de la Gc et de la Gf, selon que les compétences sont préalablement acquises ou doivent être découvertes. En revanche, les niveaux supérieurs « analyser », « évaluer » et « créer » sont uniquement liés à la Gf. Ils requièrent des processus cognitifs complexes, de la pensée abstraite et une capacité de prise de décision. Ainsi, l'intelligence cristallisée et l'intelligence fluide divisent le modèle de Bloom en deux parties distinctes, différenciant les capacités déjà acquises des compétences nécessaires à la résolution de problèmes inédits.

Cependant, l'IA actuelle ne s'aligne pas aux intersections de la taxonomie de Bloom et du modèle CHC. Malgré les récents progrès, l'IA n'a pas encore atteint une forme finale, telle qu'une fusion des IA symbolique et connexionniste prophétisée par les spéculations cybernétiques [58]. Pour parvenir à une intégration complète de l'IA dans le cadre du modèle CHC enrichi par la taxonomie de Bloom, il est proposé d'y intégrer ses formes potentielles : (1) l'IA réactive : système élémentaire et purement réactif (2^e étape historique) ; (2) l'IA à mémoire limitée, entre Gc et Gf, capable d'utiliser des expériences passées pour informer des décisions actuelles ; (3) la théorie de l'esprit (encore inexistante) : système le plus proche de la Gf pour un humain, aurait la capacité de comprendre et d'interagir avec les états mentaux d'autres entités (traitement de la donnée et abstraction très complexe) [59] ; (4) l'IA consciente (actuellement inexistante) : combinerait la Gc et la Gf pour générer une forme d'intelligence et de conscience comparable à celle d'un humain.

En prenant en considération quatre grands types d'IA (certaines formes étant utilisées et d'autres n'ayant aujourd'hui aucune existence, si ce n'est spéculative), une comparaison entre les spectres cognitifs de H et de M (limités aux composantes Gc et Gf) est proposée ici, par le prisme conjoint de la taxonomie de Bloom et du modèle CHC. Cette méthode fait ressortir des distinctions entre les deux spectres cognitifs (cf. fig. 5). D'un côté, H est capable de naviguer à travers l'ensemble des six niveaux cognitifs, cependant l'accès aux niveaux supérieurs exige une plus grande allocation de ressources et une maîtrise de chaque catégorie inférieure [54]. D'un autre côté, à l'inverse, les capacités de M varient selon le type d'apprentissage machine mobilisé, en la cantonnant à l'une ou l'autre compétence. De plus, M nécessite souvent une assistance humaine à divers niveaux d'apprentissage, alors que H peut utiliser M pour augmenter ses capacités, sans assistance directe de M. Enfin, le tableau met en évidence que l'IA actuelle ne peut opérer efficacement que jusqu'au quatrième niveau de la taxonomie de Bloom. Les niveaux supérieurs restent spéculatifs pour M, tandis que H possède un spectre cognitif englobant l'intégralité des facteurs.

Après plus de cinq décennies de développements [60], l'IA a connu des progrès significatifs, mais cette contribution fait ressortir qu'elle n'atteint pas l'intégralité du spectre cognitif humain (cf. fig 5). Alors pourquoi investir encore dans la recherche et le développement de machines dotées de capacités cognitives ?

Nous proposons une réponse partielle : sa valeur ajoutée réside dans sa capacité à compléter, plutôt qu'à remplacer l'IH. L'IA est spécialisée dans des domaines tels que le traitement rapide de grandes quantités de données, l'apprentissage de modèles complexes ou encore l'assistance dans des tâches répétitives. Mais elle réalise également des analyses prédictives et prescriptives, notamment par l'exploration de domaines fonctionnels, comme les systèmes experts, et la découverte de nouveaux champs d'application, tels que l'apprentissage machine et le traitement du langage naturel, la robotique, la planification et l'optimisation. Malgré cela, la cognition artificielle ne peut reproduire l'entièreté du spectre cognitif humain, puisqu'elle ne possède ni conscience, ni capacité à éprouver des émotions.

L'intelligence constitue une énigme dont ses parties, l'IH, et l'IA semblent liées. Chaque progrès de l'IA semble révéler que l'intelligence humaine ne se trouve pas là où elle pensait en trouver une trace, autrement appelé l'*effet IA* ou à tort le *théorème de Tesler* [61]. Le but poursuivi par l'IA tel qu'il est pensé aujourd'hui, et ce depuis sa création par les fondateurs cybernétiques, ressort comme une utopie créant l'illusion que l'intelligence n'est rien d'autre qu'un ensemble de capacités à reproduire. Dans les années 1950, les investissements ont été motivés par une promesse d'une fusion entre la partie symbolique et connexionniste qui pourrait être réalisée en 20 à 30 ans. Cependant, ces attentes ont rencontré des limitations technologiques, conduisant au premier « hiver de l'IA ». La décennie suivante, avec sa renaissance, des promesses similaires ont été renouvelées pour attirer de nouveau les financements et un regain d'intérêt dans la recherche, sans pour autant aboutir à cette fusion. Le récent regain d'intérêt pour l'IA est toujours motivé par le même objectif. Cette fusion semble incertaine, soulevant des doutes quant à la réalisation de cet objectif et inaugurent la possibilité d'un troisième hiver. Dans son état actuel, l'IA est impuissante devant de nombreux types de problèmes accessibles à l'IH. Cela est partiellement explicable car le spectre de l'IH est multifactoriel et se décline en de multiples compétences étroites. Tandis que l'IA ne possède aucune unité intrinsèque et se présente comme un ensemble de systèmes spécialisés. Cette configuration est définie par Stuart Russel comme le « modèle standard de l'IA » [62], où les agents humains ont des préférences déterminées qui fixent les objectifs qu'ils veulent atteindre, et il incombe alors à l'IA de réaliser ces objectifs. Ainsi dans sa forme actuelle, l'IA ne semble pas capable de réaliser autre chose que les volontés des humains puisque les progrès en IA ne viennent pas de nos tentatives pour reproduire le contenu de l'esprit humain, apparemment trop complexe et changeant pour être directement

modélisé, mais de nos capacités à traiter des masses toujours plus grandes de données. Pour cette raison, nos progrès sont donc strictement corrélés aux capacités de calcul disponibles.

Face à ces constats, une réflexion s'impose sur les objectifs fondamentaux de l'IA : doit-elle vraiment chercher à imiter l'ensemble du spectre cognitif humain ? L'IA devrait plutôt être considérée à partir de ses propres formes de cognitions (distinctes de celles de l'IH). Au lieu de se limiter à une augmentation de puissance ou de rapidité dans des compétences partagées avec l'IH, l'IA pourrait développer des compétences inédites, exploitant ses capacités uniques de traitement de l'information et d'analyse des données. Cela implique de repenser fondamentalement l'objectif de l'IA non pas comme une simple mimétique de l'IH, mais comme une entité dotée de capacités cognitives et de fonctionnalités intrinsèques.

IH

dimension proc. cogn.	(Gf), (Gc), (Gq), (Gv), (Gsm), (Grw), (Ga), (Glr), (Gs), (Gt)						Cattell-Horn-Carroll
	Niveau 1 Mémoriser	Niveau 2 Comprendre	Niveau 3 Appliquer	Niveau 4 Analyser	Niveau 5 Evaluer	Niveau 6 Créer	Taxonomie de Bloom
Analyse du spectre	Mémorisation		Compréhension	Application	Analyse	Evaluation	
Capacité à	Restituer	Interpréter	Transférer	Distinguer	Estimer	Concevoir	
Habilité requise	Mémorisation		Compréhension	Application	Analyse	Evaluation	
Ressources cognitives	Faible		Moyenne		Grande		
Opérationnelle	Oui						

IA

dimension proc. cogn.	(Gc)			(Gf)			Cattell-Horn-Carroll
	Niveau 1 Mémoriser	Niveau 2 Comprendre	Niveau 3 Appliquer	Niveau 4 Analyser	Niveau 5 Evaluer	Niveau 6 Créer	Taxonomie de Bloom
Analyse du spectre	IA Réactive		IA mémoire limité		Théorie de l'esprit	IA consciente	
Capacité de	IA Réactive		IA mémoire limité		Théorie de l'esprit	IA consciente	
Méthode d'apprentissage	Supervisé		Semi	Non-supervisé			
Assistance Humaine	Grande		Moyenne		Faible		
Opérationnelle	Oui				Non		

Fig. 5. Comparaison des spectres cognitifs.

Références

1. E. Sadin, *La silicolonisation du monde : l'irrésistible expansion du libéralisme numérique* (L'Échappée, Paris, 2016)
2. G. Bronner, *Apocalypse cognitive* (Presses universitaires de France, Paris, 2021)
3. B. Barraud, *L'intelligence artificielle : dans toutes ses dimensions* (L'Harmattan, Paris, 2019)
4. D. Claeys and L. Roobaert, *Trois systèmes de raisonnement en conception architecturale*, *Lieuxdits* **22**, 10–21 (2022)
5. D. Claeys, Construction historique de la figure de l'architecte : mythe analogique et fiction numérique, in *Anticrise architecturale : analyse d'une discipline immergée dans un monde numérique*, edited by D. Claeys (Presses universitaires de Louvain, Louvain-la-Neuve, 2021), pp. 249–272
6. N. Negroponte, *Toward a Theory of Architecture Machines*, *Journal of Architectural Education* **23**, 9–12 (1969)
7. W. Bauer and C. Vocke, *Work in the Age of Artificial Intelligence – Challenges and Potentials for the Design of New Forms of Human-Machine Interaction in Advances in*

- Human Factors, Business Management and Leadership*, edited by J. I. Kantola and S. Nazir (Springer International Publishing, Cham, 2020), pp. 493–501
8. D. Andler, *Intelligence artificielle, intelligence humaine: la double énigme* (Gallimard, Paris, 2023)
 9. L. Roobaert and D. Claeys, *Trois modalités conversationnelles en conception architecturale : apports de la théorie de la conversation de Gordon S. Pask*, SHS Web of Conferences **147**, (2022)
 10. S. Ben Rajeb, *Modélisation de la collaboration distante dans les pratiques de conception architecturale : caractérisation des opérations cognitives en conception collaborative instrumentée* (ENSA de Paris La Villette, 2012)
 11. D. Claeys, *Architecture et complexité : un modèle systémique du processus de (co)conception qui vise l'architecture* (PUL, Louvain-la-Neuve, 2013)
 12. H. A. Simon, *Models of Man: Social and Rational. Mathematical Essays on Rational Human Behavior in Society Setting*. (Wiley, New York, 1957)
 13. P. Rabardel, *From artefact to instrument*, *Interacting with Computers* **15**, 641–645 (2003)
 14. G. Simondon, *Du mode d'existence des objets techniques*, (Aubier, Paris, 2012)
 15. A. Leroi-Gourhan, *Évolution et technique II. Milieu et techniques* (Albin Michel, Paris, 1945)
 16. Lévy, Pierre, *Cyberculture: rapport au Conseil de l'Europe* (Odile Jacob, 1997)
 17. S. Chaillou, *AI + Architecture | Towards a New Approach* (Harvard University Press: Cambridge, 2019)
 18. D. Claeys and L. Roobaert, *Cybernétique, interactivité et conversation : retour sur les effets des expériences de Gordon Pask en architecture*, SHS Web Conf. **147**, (2022)
 19. N. Wiener, *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine* (MIT Press: Cambridge, 1948)
 20. R. Kline, *Where are the Cyborgs in Cybernetics?* *Social Studies of Science* **39**, 3 331–362 (2009)
 21. H. R. Maturana and F. J. Varela, *De máquinas y seres vivos, Autopoiesis: La organización de lo vivo* (Editorial Universitaria, Santiago, 1972)
 22. D. J. Haraway, *A cyborg manifesto: science, technology and socialist-feminism in the 1980's*, *Socialist Review* **2,4** 1–42 (1985)
 23. A. Picon, *Smart Cities : Théorie et Critique d'un Idéal Auto-Réalisateur*, B2 ed. (Paris, 2013)
 24. D. F. Ronfeldt, *Cyberocracy, Cyberspace, and Cyberology: Political Effects of the Information Revolution* (RAND: Santa Monica, 1991)
 25. M. Pearson, H. Khalil, and V. Butucea, *Interference* (Bloomsbury Publishing, 2019)
 26. C. H. Gray, S. Mentor, and H. J. Figueroa-Sarriera, *Cyborgology: constructing the knowledge of cybernetic organisms*, edited by C. H. Gray (Routledge: New York, 1995), pp. 1–14
 27. G. Pask, *Conversation Theory: Applications in Education and Epistemology* (Elsevier, Amsterdam, 1976)
 28. A. Yaneva, *Latour for Architects: Thinkers for Architects* (Routledge: London, 2022)
 29. P. R. Smart, *Human-extended machine cognition*, *Cognitive Systems Research* **49**, 9 (2018)

30. D. Davis and S. Shelby, *The Machine as an Extension of the Body: When Identity, Immersion and Interactive Design Serve as Both Resource and Limitation for the Disabled*, *Human-Machine Communication* **2**, 121 (2021)
31. A. Romani, F. Casnati, and A. Ianniello, *Codesign with more-than-humans: toward a meta co-design tool for human-non-human collaborations*, *European Journal of Futures Research* **10**, 17 (2022)
32. B. A. Nardi, *Context and Consciousness: Activity Theory and Human-Computer Interaction* (MIT Press, Cambridge, Mass., 1996)
33. P. R. Daugherty and H. J. Wilson, *Human + Machine: Reimagining Work in the Age of AI* (Harvard Business Review Press, Boston, Massachusetts, 2018)
34. E. Bonjour, *Contributions à l'instrumentation du métier d'architecte système : de l'architecture modulaire du produit à l'organisation du système de conception*, thesis, Université de Franche-Comté, 2008
35. F. J. Varela, E. Thompson, and E. Rosch, *The Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience* (MIT Press: Cambridge, 1991)
36. J. Hollan, E. Hutchins, and D. Kirsh, *Distributed cognition: Toward a new Foundation for Human-Computer Interaction Research*, *ACM* **7**, 2 174–196 (2000)
37. E. Hutchins, *Cognition in the Wild* (MIT Press, Cambridge, Mass, 1995)
38. I. Reverte, *L'analyse de la structure factorielle du WISC-IV selon la classification des aptitudes cognitives de Cattell-Horn-Carroll (CHC)* (Université de Genève : Genève, 2015)
39. P. Chartier and E. Loarer, *Évaluer l'intelligence logique : approche cognitive et dynamique* (Dunod : Paris, 2008)
40. R. J. Sternberg, B. E. Conway, J. L. Ketrone, and M. Bernstein, *People's conceptions of intelligence*, *Journal of Personality and Social Psychology* **41**, 1 37–55 (1981)
41. J. B. Carroll, *Human Cognitive Abilities: A Survey of Factor-Analytic Studies*, 1st ed. (Cambridge University Press, 1993)
42. D. P. Flanagan and S. G. Dixon, *The Cattell-Horn-Carroll Theory of Cognitive Abilities in Encyclopedia of Special Education*, edited by C. R. Reynolds, K. J. Vannest, and E. Fletcher-Janzen, 1st ed. (Wiley, 2014)
43. R. B. Cattell, *A Culture-Free Intelligence Test I in The Measurement of Intelligence* (Springer Netherlands, Dordrecht, 1940), pp. 155–173
44. R. B. Cattell, *Personality Traits Associated with Abilities. I. With Intelligence and Drawing Ability*, *Educational and Psychological Measurement* **5**, 2 131–146 (1945)
45. R. B. Cattell, *Theory of fluid and crystallized intelligence: A critical experiment*. *Journal of Educational Psychology* **54**, 1 1–22 (1963)
46. J. L. Horn and J. Noll, *Human cognitive capabilities: Gf-Gc theory* edited by D.P. Flanagan, J.L. Genshaft (The Guilford Press: New York, 1997) pp. 53–91
47. I. Davidson and P. B. Walker, *Towards Fluid Machine Intelligence: Can We Make a Gifted AI?*, *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence* **33**, 9760 (2019)
48. K. S. McGrew, *The Cattell-Horn-Carroll Theory of Cognitive Abilities: Past, Present, and Future in Contemporary Intellectual Assessment: Theories, Tests, and Issues*. (The Guilford Press, New York, NY, US, 2005), pp. 136–181
49. K. S. McGrew, *CHC theory and the human cognitive abilities project: Standing on the shoulders of the giants of psychometric intelligence research*, *Intelligence* **37**, 1 (2009)

50. J. L. Horn, *A rationale and test for the number of factors in factor analysis*, *Psychometrika* **30**, 2 179–185 (1965)
51. G. Pask, *Conversation, Cognition and Learning: A Cybernetic Theory and Methodology* (Elsevier, Amsterdam, 1975)
52. L. Roobaert, D. Claeys, S. Cleven, and J. M. Perez Perez, *Grille d'évaluation en conception et fabrication assistées par ordinateur : retour sur une double expérience pédagogique pour former des futurs architectes*, *DNArchi* **3**, (2023)
53. B. Bloom, *Taxonomy of Educational Objectives : Cognitive Domain* (Longman, London, 1956)
54. D. R. Krathwohl, *A Revision of Bloom's Taxonomy: An Overview*, *Theory Into Practice* **41**, 212 (2002)
55. M. Dascal, *Artificial intelligence and philosophy: The knowledge of representation*, *Systems Research* **6**, 39 (1989)
56. G. Marcus, *The Next Decade in AI: Four Steps Towards Robust Artificial Intelligence*, (2020)
57. D. R. Hofstadter, *Analogy as the core of cognition in The Analogical Mind: Perspectives from Cognitive Science*, edited by D. Gentner, K. J. Holyoak, and B. N. Kokinov, 499–538 (MIT Press, Cambridge, 2001)
58. M. Minsky, *The Society of Mind* (Simon and Schuster, New York, 1986)
59. H. L. Gallagher and C. D. Frith, *Functional imaging of 'theory of mind,'* *Trends in Cognitive Sciences* **7**, 77–83 (2003)
60. J. McCarthy, *What is artificial intelligence?*, University Stanford Press (2007)
61. Marcello. Vitali-Rosati, *De l'intelligence artificielle aux modèles de définition de l'intelligence, le cas des variations dans l'Anthologie Grecque*, Sens Public (2024)
62. S. J. Russell, *Rationality and intelligence*, *Artificial Intelligence* **94**, 57–69 (1997)