



HAL
open science

Du dessin à l'humain : space syntax et cognition spatiale

Arthur-Henri Michalland, Hassan Ait-Haddou, Vinicius Raducanu, Laurent
Viala

► To cite this version:

Arthur-Henri Michalland, Hassan Ait-Haddou, Vinicius Raducanu, Laurent Viala. Du dessin à l'humain : space syntax et cognition spatiale. 2021. hal-03774890

HAL Id: hal-03774890

<https://hal.science/hal-03774890v1>

Submitted on 12 Sep 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Du dessin à l'humain : space syntax et cognition spatiale

Arthur-Henri Michalland, Hassan Ait-Haddou, Vinicius Raducanu, Laurent Viala

Biographie

Arthur-Henri Michalland a soutenu en septembre 2019 une thèse en Psychologie cognitive et expérimentale sur le rôle du système haptique dans la cognition et les interactions humain-machine sous la direction des Prs. Denis Brouillet (Psychologie Cognitive, Epsilon) et Philippe Fraisse (Robotique, LIRMM), à Montpellier. Après un premier post-doctorat avec Anna Maria Borghi à l'université Sapienza (Rome) portant sur l'embodiment des concepts et les affordances, il est maintenant post-doctorant à l'université Montpellier dans le cadre du projet HUT (HUMAN at home projecT), cofinancé par le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER) et la Région Occitanie. Dans le cadre de ce post-doctorat, accueilli au sein du LIFAM (Laboratoire Innovation Formes Architectures Milieux, ENSA de Montpellier), il étudie l'interaction des individus avec leur logement intelligent (Smart Building), avec Hassan Ait-Haddou, Laurent Viala et Vinicius Raducanu. Il est membre de ce laboratoire, ainsi que des laboratoires BALLab (Body, Action, Language Lab, Borghi Anna's Lab, Rome, Italie), et Epsilon (EA4556, Montpellier).

Résumé

Les dessins des environnements futurs dans lesquels l'être humain évoluera sont « l'instrument d'un contrôle exercé par l'architecte sur l'espace et les formes »¹ mais aussi d'un contrôle sur l'habiter, les déplacements des individus, et le sens donné à l'environnement. L'espace est une ressource primordiale pour l'être humain, tant dans son organisation personnelle que dans ses liens sociaux (Tversky, 2003). Si la co-construction entre l'être humain et son environnement (Varela et al., 1993), pousse à considérer la cognition comme liée à son environnement et à l'état corporel de l'individu (Wilson, 2002), la *space syntax* (Hillier et al., 1987) considère que les déplacements dans l'espace construit dépendraient essentiellement d'indices extrasomatiques évalués par des mesures allocentriques. Nous présentons ici cette approche en regard de théories incarnées et situées de la cognition, avant d'ouvrir l'analyse aux Smart Buildings et Smart Cities, dont les technologies de l'information et de la communication (TIC) offrent de nouvelles voies d'interaction sociale et de perception de l'espace qui renouvellent le cadre physique actuellement pris en compte, à notre connaissance, dans la space syntax.

Mots clefs : Psychologie Cognitive, Architecture, Syntaxe spatiale, Environnement intelligent

Abstract

The drawings and plans of future environments in which human beings will live are “the architect's tool for controlling space and shape”¹ but also for guiding living habits, movement of individuals, and the meaning given by inhabitants to their surroundings. Space is a crucial resource for humans, both for their personal organization and for social relationships (Tversky, 2003). If the mutual relations and development between human beings and environment (Varela et al., 1993) leads us to consider human cognition as closely linked to its environment and body states (Wilson, 2002), space syntax theory (Hillier et al., 1987) suggests that movement in built environment largely depends on exosomatic clues measured by allocentric criteria. We present here this theory along with theories of embodied and situated cognition, before considering Smart Buildings and Smart Cities, of which

¹ Tiré de l'appel à communication : « le dessin est à l'époque contemporaine l'instrument principal d'un contrôle exercé par l'architecte sur l'espace et les formes, dans une démarche aussi bien analytique (relevé, croquis) que créative (esquisse, projet). »

Information and Communication Technologies (ICT) create new kinds of social interactions and space perception that may renew the physical frame currently taken into account, to our knowledge, by space syntax theory.

Keywords : Cognitive Psychology, Architecture, Space syntax, Smart Environment (Smart City, Smart building)

Introduction

L'architecture et le dessin des environnements futurs dans lesquels l'être humain évoluera (habitat, bâtiment, ville) sont bien « l'instrument [...] d'un contrôle exercé par l'architecte sur l'espace et les formes »¹. En ce sens le dessin de l'architecte (ici le plan) est le moule qui formera l'environnement, tant dans ses volumes que dans ses détails. Mais c'est aussi le prototype de l'écosystème dans lequel les êtres humains évolueront. Ainsi par le dessin l'architecte encadre et accompagne l'habiter et les déplacements des individus. Par ce biais, il oriente donc le sens que les habitants donneront à ce nouvel environnement. La difficulté réside alors dans la prise en compte à la fois des perceptions collectives, partagées par la majorité des habitants, qui guideront les flux dans la ville ou le logement futur, mais aussi des perceptions individuelles, qui dépendront des possibilités effectives de chacun.

En effet c'est à travers l'interaction de l'individu avec son environnement qu'un sens sera donné au monde (Thompson, 2005). Dans cette perspective énaïviste (Varela, Thompson & Rosch, 1993), l'être humain est considéré comme un agent autonome créant ses propres domaines de compétence cognitive en s'appuyant sur le lien entre ses actions et les conséquences perceptibles qu'elles entraînent. Plus précisément, c'est grâce à l'interprétation des conséquences perceptibles de ses actions que l'individu va générer du sens (Friston, 2010, 2011). Cette interprétation repose sur les relations cycliques entre perceptions et actions (et conséquences perçues) qui vont, par leur stabilité, progressivement permettre l'émergence d'une sensation de sens, de congruence, et d'agentivité, c'est-à-dire la sensation d'être à l'origine de ses propres décisions et actions (Bandura, 2006). Ainsi l'architecte, en jouant sur les interactions entre l'individu et l'environnement, va moduler les relations perceptions-actions, et les attributions cognitives qui en découleront (Marcus et al., 2016). En d'autres termes, en modulant la structure de l'environnement et en imaginant dans son esprit les actions qui y seront réalisables (autrement dit en créant des affordances ; Gibson, 1979 ; Chemero, 2003 ; Borghi, 2018), et les conséquences de ces actions (e.g. s'asseoir dans l'herbe n'entraîne pas les mêmes conséquences que s'asseoir sur un banc) l'architecte impactera le champ des affordances offertes à l'individu, en modulant leur probabilité d'être perçues et leur attractivité, c'est-à-dire la tendance des individus à réaliser les actions qu'elles auront pré-activées (Costantini et al., 2010 ; Eder & Hommel, 2013 ; Bruineberg & Rietveld, 2014 ; Hommel, 1996, 2015). Ce constat s'étendra tant aux habitants de logements variés, qu'aux passants dans chaque ville du monde.

Le point crucial est qu'en modulant les actions potentielles, leurs conséquences, et l'agentivité de l'individu, l'architecte guidera le sens donné à l'environnement, et la place ressentie par l'individu dans cet environnement.

De ce point de vue énaïviste, et plus largement dans la perspective d'une cognition incarnée et située (Versace, Brouillet & Vallet, 2018), c'est-à-dire faisant partie d'un corps et étant dépendante du contexte dans lequel ses processus se déroulent (Wilson, 2002), l'environnement seul ne peut être en cause dans cette création de sens.

En premier lieu, la cognition étant incarnée, la structure corporelle et sensorielle de l'individu va jouer tant sur ses perceptions que sur ces capacités motrices (Mori & Kuniyoshi, 2010 ; Wiertelowski & Hayward, 2012 ; Witzel, Cinotti, O'Regan, 2014 ; Michalland, 2019), et par là même sur le sens donné aux situations auxquelles il sera confronté (Bompas, O'Regan 2006 ; Witt, 2011 ; Brouillet et al., 2018 ; Michalland et al., 2019). La disposition des membres constituant le corps, ainsi que leur taille, sont des paramètres qui joueront sur la détermination des trajectoires de mouvement d'atteinte, sur l'espace atteignable et les possibilités de déplacement (Khalil, & Dombre, 1999 ; Wolpert, Ghahramani, & Flanagan, 2001), et les matériaux composant le corps auront aussi un impact direct sur la perception de l'espace environnant (Pfeifer, Fumiya, & Lungarella, 2014). Ainsi, les contraintes d'une action, en impactant la quantité d'énergie nécessaire à sa réalisation, vont moduler la perception de l'espace extrapersonnel² et des distances à parcourir (Josa et al., 2019).

En conséquence, face à un amphithéâtre, les individus percevront des environnements différents selon la taille de leurs jambes (Warren, 1984). Certains pourront monter directement les gradins et percevront un environnement complètement libre à la circulation, tandis que d'autres seront obligés de passer par les escaliers et percevront un environnement dont les flux sont contrôlés par des passages dédiés.

En second lieu, la cognition étant située, le contexte jouera un rôle significatif dans l'activation et le déroulement de divers processus cognitifs. Ce contexte, s'il comprend bien sûr une dimension physique : l'environnement dans lequel l'individu doit agir (Costantini et al., 2010 ; Kalénine et al. 2014), comprend aussi une dimension sociale et culturelle d'importance similaire (Becchio et al., 2008 ; Ferri et al., 2011 ; Constable et al., 2011, 2014). La dimension physique, comme nous l'avons souligné plus haut, va moduler la perception des possibilités d'action des individus, ainsi le fait de se trouver dans une cuisine ou dans un atelier facilitera des actions dirigées respectivement vers des ustensiles de cuisine (e.g. un fouet) ou des outils de bricolage (e.g. un tournevis ; Wokke et al., 2016). Mais le contexte culturel et social va aussi jouer un rôle direct dans la perception de l'espace, en modulant par exemple la distance perçue vis-à-vis d'objets présents dans l'environnement en fonction de la présence d'un individu à proximité de ces objets (Fini et al., 2015) ainsi que les concepts mobilisés pour appréhender l'environnement, qui *in fine* peuvent modifier la perception de cet environnement (Dale, & Lupyan, 2012 ; Lupyan, 2012).

La cognition spatiale reposera donc sur plusieurs composantes qui différencieront selon la tâche en cours, et qui pourront impliquer par exemple l'espace du corps, l'espace péripersonnel², l'espace extrapersonnel², l'espace de navigation et l'espace graphique (Tversky, 2003). Nous nous concentrerons ici sur l'espace de navigation et l'espace graphique. L'espace de navigation est un espace que l'on explore en se déplaçant, comme un immeuble ou un quartier. Il est donc constitué d'éléments perceptibles et d'éléments non perceptibles à un instant donné, combinés pour permettre à l'individu de naviguer dans son environnement. Cet espace par essence multisensoriel est schématisé pour intégrer ses différentes parties à mesure qu'il est exploré, et se caractérise par des points de repères et des chemins, ou plus schématiquement des nœuds, des liens et des orientations par rapport à un cadre de référence, qui peut être l'individu, un objet, ou un élément caractéristique de l'environnement (Taylor, & Tversky, 1996). Ainsi, certaines caractéristiques de l'environnement physique, telle que les distances métriques, ont tendance à être déformées lors de l'intégration, ou du « collage », des différentes parties (Tversky, 1993). Si l'on considère classiquement que les cartes spatiales cérébrales à l'origine de cet espace de navigation se composent de cellules de lieu et de cellules « réseau » qui permettent de quadriller les espaces en reliant les cellules de lieux

² On distingue classiquement l'espace péripersonnel, atteignable par l'individu sans nécessiter de déplacement (locomotion), et l'espace extrapersonnel, qui nécessitera des déplacements pour être atteint.

(Wilson & McNaughton, 1993), ces réseaux cérébraux sont aussi en étroite collaboration avec d'autres réseaux neuronaux (e.g. liés à la position de la tête, ou encore avec le cortex pariétal impliqué dans le traitement des positions du corps ; Moser et al., 2008). Ainsi ces cellules de lieux et ne s'activent pas seulement à la perception de l'environnement extérieur, mais aussi grâce aux déplacements de l'individu dans cet environnement et à une intégration continue des chemins empruntés (Rowland et al., 2016), soulignant l'aspect multisensoriel de la cognition spatiale.

L'espace graphique (e.g. plans, cartes) se caractérise aussi par une schématisation importante, pour supprimer les caractéristiques non pertinentes de l'environnement que l'on veut décrire. Ainsi certaines représentations graphiques conserveront les métriques à des échelles moindres (e.g. plan d'immeuble, de ville, carte topographique), tandis que d'autres modifieront à la fois les métriques et les angles reliant différents points d'intérêt (e.g. plan de métro). Néanmoins, l'espace des graphiques conservera une structure similaire à l'espace cognitif de navigation : des points d'intérêts, ou nœuds, et les relations spatiales entre ces points d'intérêts (Tversky, 2003). Si le passage de l'espace de navigation à l'espace graphique va dépendre du degré de spécialisation des individus, le point qui nous intéresse est le passage d'un espace graphique pensé par un individu, un architecte ou un urbaniste ici, à un espace de navigation prédictible, dans lequel les flux des habitants pourront être anticipés. Et c'est précisément l'objet de la syntaxe spatiale (*space syntax* ; Hillier et al., 1987).

Nous avons vu que de nombreuses variables corporelles, situationnelles, culturelles et sociales devraient influencer sur la perception de l'espace et sur les déplacements des individus. Néanmoins, l'objectif de la syntaxe spatiale est de formaliser les relations entre la configuration de l'espace construit et les flux des habitants en considérant des propriétés de l'espace qui seraient par nature extrasomatiques, c'est-à-dire indépendantes du corps de l'individu, et indépendantes du contexte social et culturel (Hillier et al., 1993 ; Penn, 2003). Une partie des traitements cognitifs seraient donc déchargés dans l'environnement construit (Wilson, 2002) qui guiderait les déplacements. Ainsi la syntaxe spatiale vise à élaborer des descriptions de l'espace habité et des indicateurs (une syntaxe de l'environnement) qui seront corrélés à des probabilités de coprésence, et *in fine* à de potentiels impacts sociaux. En effet un des prémices centraux de la syntaxe spatiale est que les structures sociales sont intrinsèquement spatiale, et que la configuration des espaces habités relève fondamentalement d'une logique sociale (Hillier et al., 1987 ; Bafna, 2003). De la même manière que l'individu et le monde se co-construisent, la société et les espaces se nourrissent et se transforment mutuellement. Comme dans l'interaction de l'individu et du monde, des récurrences apparaissent et l'espace, par sa configuration qui offre des accès variables entre les différentes structures, ou encore une visibilité plus ou moins étendue (voir aussi les *visibility graphs* ; Turner et al., 2001), va donc générer des patterns de mouvements probabilistes : certains espaces seront plus propices à des fréquences importantes de passage et donc, par une coprésence accrue, seront plus susceptibles de générer des rencontres, tandis que d'autres offriront une certaine intimité (voir aussi la notion de gradient d'intimité ; Alexander, 1977). Ainsi, si les indicateurs considérés seront par nature extrasomatiques et indépendants du contexte social et culturel, la probabilité de coprésence jouera ensuite un rôle majeur sur les interactions sociales et sur la structure de la société (Van Nes, & Yamu, 2018), et donc sur la psychologie des individus. Dans cette perspective la syntaxe spatiale peut permettre d'évaluer les potentiels de coprésence d'un lieu existant, mais aussi hiérarchiser en amont de la construction une répartition de ces probabilités de coprésence pour satisfaire une structure sociale déjà existante, ou tenter d'en créer une nouvelle (Dursun, 2007).

Concrètement, la syntaxe spatiale dérivera d'un plan (de bâtiment ou de ville) un graphe non-dirigé et non-pondéré dans lequel des lignes droites (qui correspondent aux rues, ou aux possibilités de passage entre les pièces d'un bâtiment) seront représentées par les nœuds du graphe, tandis que les intersections entre ces lignes (qui correspondent aux possibilités de bifurquer) seront représentées par les branches reliant ces nœuds (Hillier et al., 1987 ; Penn, 2003 ; Bafna, 2003). L'intérêt d'un tel graphe sera donc de supprimer totalement les propriétés métriques du plan, pour se concentrer uniquement sur les possibilités de déplacement qu'il contient. A partir de ce graphe, quatre indicateurs principaux seront fortement corrélés aux flux dans un espace : la connectivité, le contrôle, l'intégration et l'intelligibilité. La connectivité correspond au nombre de branche qui sont directement reliées à un nœud (elle représente donc par exemple les bifurcations potentielles sur une rue). Le contrôle quantifie le degré de choix qu'offre un nœud pour accéder à ses voisins (e.g. si un nœud est l'unique point de passage vers un de ses voisins, il devient un passage obligé et exerce un contrôle total sur ce voisin, c'est le cas par exemple lorsqu'une route unique mène à un quartier résidentiel, cette route/ligne/nœud exerce un contrôle total sur l'accès au quartier résidentiel). L'intégration correspond à l'écart moyen d'un nœud à tous les autres dans un nombre de pas donné (elle représente donc une sorte de connectivité étendue, l'accessibilité de cette ligne par d'autres lignes, et inversement l'accessibilité d'autres lignes par cette ligne). Enfin, l'intelligibilité correspond à la corrélation entre la connectivité et l'intégration. Cette mesure d'intelligibilité représente donc la prédictibilité de la structure globale d'un environnement à partir de ses propriétés locales : plus la corrélation sera grande plus l'individu sera en mesure de naviguer efficacement dans son environnement, augmentant ainsi son sentiment d'agentivité par l'atteinte autonome de ses objectifs (Penn, 2003).

Ainsi, lors du dessin des plans d'un bâtiment ou d'un quartier, les variations de connectivité, de contrôle, d'intégration et d'intelligibilité refléteront les probabilités de coprésence dans les pièces ou dans les rues, et *in fine* l'impact social, économique et culturel de la construction. En d'autres termes, la syntaxe spatiale permettra d'évaluer dans quelle mesure l'architecture va « créer la vie » (Hillier et al., 1987). Dans cette optique la syntaxe spatiale a été utilisée dans différents projets tels que la rénovation de Trafalgar Square et du Millenium Bridge, la place du marché de Nottingham ou le centre des affaires de Beijing (Karimi, 2012), et permet de formuler des propositions pour faciliter les déplacements des touristes (Xu et al., 2020), anticiper les besoins d'éclairage des rues (Leccese et al., 2020), ou promouvoir la marche comme facteur de santé et de bien-être (Koohsari et al., 2019).

Des limites dans la stabilité de cette méthode peuvent apparaître quant au choix du graphe utilisé (*boundary partition, convex map, axial map, visibility graph*), des limites de l'espace à étudier, et dans la prise en compte d'autres facteurs comme les transports publics, la taille des bâtiments, les éléments servant de point de repère pour les habitants (Penn, 2003 ; Ratti, 2004), et l'impact des variables corporelles et situationnelles présentées au début de ce papier. Ainsi les relations entre les indices calculés et les probabilités de flux et de coprésence réelles pourront fluctuer en fonction de ces différents facteurs (Ericson et al., 2020). Néanmoins l'intérêt d'une telle méthode, en interaction avec les processus de création inhérents aux métiers de l'architecture et de l'urbanisme, réside dans la prise en compte des impacts comportementaux, et *in fine*, cognitifs, culturels, sociaux et économiques, que peuvent avoir les constructions futures, et qu'ont les constructions actuelles (Marcus et al., 2016). Dans ce contexte, il peut être intéressant de se demander dans quelle mesure la syntaxe spatiale pourra être utilisée pour évaluer le rôle et l'impact des environnements intelligents (logements et villes connectés, *smart buildings et smart cities*). En effet, le développement croissant de l'internet des objets et de l'environnement intelligent (Serrenho & Bertoldi, 2019) dans lequel

différentes informations sur l'environnement accompagnées de possibilités d'action variées seront accessibles à l'utilisateur, pourrait renouveler la question de l'impact de la configuration de l'espace construit sur les comportements des usagers. Dans cette perspective, le bien-être des habitants pourrait être amélioré en facilitant les interactions sociales, le sentiment d'autonomie et de compétence (Ryan & Deci, 2000), en mêlant des développements technologiques « *high tech* » et architecturaux « *low tech* » centrés sur les utilisateurs plutôt que sur la technologie elle-même (Griego et al., 2017 ; Marikyan et al., 2019 ; Colding et al., 2020 ; Ait Haddou et al., 2020 ; Viala, 2020). Ainsi se pose la question par exemple de l'impact des véhicules autonomes, des services connectés et/ou basés sur la géolocalisation, des espaces de co-working ou du travail à domicile sur les probabilités de coprésence et sur le bien-être des habitants dans les villes intelligentes (Fusero et al., 2013 ; Tao, 2013 ; Colding et al., 2020 ; Raducanu, 2020). De plus, l'utilisation des données collectées dans le cadre de la *smart city* (e.g. qualité de l'air, environnement sonore, exposition solaire, densité de population, données physiologiques) permettra elle aussi de proposer de nouveaux modèles de développement de villes ou de bâtiments, qui pourront intégrer à la fois les indices de la *space syntax* et les caractéristiques plus contextuelles de la cognition humaine, dans une perspective incarnée et située (Fusero et al., 2013 ; Mattoni et al., 2015).

Bibliographie

- Ait Haddou (Hassan), Chante (Alain), Dousson (Lambert), & Viala, (Laurent), « Une maison intelligente pour quoi faire? », *Communication management*, 17, 2020/1, p.5-6.
- Alexander (Christopher), *A pattern language: towns, buildings, construction*, Oxford, Oxford university press, 1977.
- Bafna (Sonit), « Space syntax : A brief introduction to its logic and analytical techniques », *Environment and behavior*, n°35, 2003/1, p. 17–29.
- Bandura (Albert), « Toward a psychology of human agency », *Perspectives on psychological science*, n°1, 2006/2, p.164-180
- Becchio (Cristina), Sartori (Luisa), Bulgheroni (Maria) & Castiello (Umberto), « The case of Dr. Jekyll and Mr. Hyde: a kinematic study on social intention », *Consciousness and cognition*, n°17, 2008, p.557–564.
- Borghi (Anna Maria), « Affordances, context and sociality », *Synthese*, n°1, 2018/31.
- Bompas (Aline), O'Regan (Kevin), « Evidence for a role of action in color perception », *Perception*, n°35, 2006/1, p.65-78
- Bruineberg (Jelle), & Rietveld (Erik), « Self-organization, free energy minimization, and optimal grip on a field of affordances », *Frontiers in human neuroscience*, n°8, 2014, p.599.
- Brouillet (Denis), Michalland (Arthur-Henri), Guérineau (Ronan), Draushika (Mooruth), & Thébault (Guillaume), « How does simulation of an observed external body state influence categorisation of an easily graspable object? », *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, n°72, 2018/6, p.1466-1477.
- Chemero (Anthony), « An Outline of a Theory of Affordances », *Ecological Psychology*, n°15, 2003, p.181–195.
- Colding (Johan), Wallhagen (Marita), Sörqvist (Patrik), Marcus (Lars), Hillman (Karl), Samuelsson (Karl), & Barthel (Stephan), « Applying a systems perspective on the notion of the smart city », *Smart Cities*, n°3, 2020/2, p.420-429.
- Constable (Merryn), Kritikos (Ada), & Bayliss (Andrew), « Grasping the concept of personal property », *Cognition*, n°119, 2011, p.430–437.
- Constable (Merryn), Kritikos (Ada), Lipp (Ottmar), & Bayliss, (Andrew), « Object ownership and action: The influence of social context and choice on the physical manipulation of personal property », *Experimental Brain Research*, n°232, 2014, p.3749–3761.
- Costantini (Marcello), Ambrosini (Ettore), Tieri (Gaetano), Sinigaglia (Corrado), &

Committeri (Giorgia), « Where does an object trigger an action? An investigation about affordances in space », *Experimental brain research*, n°207, 2010, p.95–103.

Rick (Dale), & Lupyan (Gary), « Understanding the origins of morphological diversity: The linguistic niche hypothesis », *Advances in complex systems*, n°15.03n04, 2012, p.1150017.

Dursun (Pelin), « Space syntax in architectural design », In *6th international space syntax symposium*, 2007, p. 01–56.

Eder (Andreas), & Hommel (Bernhard), « Anticipatory control of approach and avoidance: an ideomotor approach », *Emotion Review*, n°5, 2013, p.275–279.

Ericson (Jonathan), Chrastil (Elizabeth), & Warren (William), « Space syntax visibility graph analysis is not robust to changes in spatial and temporal resolution », *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2020.

Ferri (Francesca), Campione (Giovanna Cristina), Dalla Volta (Ricardo), Gianelli (Claudia), & Gentilucci (Maurizio), « Social requests and social affordances: how they affect the kinematics of motor sequences during interactions between conspecifics », *PLoS One*, n°6, 2011.

Fini (Chiara), Brass (Marcel), & Committeri (Giorgia), « Social scaling of extrapersonal space : target objects are judged as closer when the reference frame is a human agent with available movement potentialities », *Cognition*, n°134, 2015, p.50–56.

Fusero (Paolo), Massimiano (Lorenzo), Tedeschi (Arturo), & Lepidi (Sara), « Parametric urbanism: A new frontier for smart cities », *Planum the journal of urbanism*, n°2, 2013/27, p.1-13.

Friston (Karl), « The free-energy principle : a unified brain theory ? », *Nature reviews neuroscience*, n°11, 2010/2, p.127.

Friston (Karl), Mattout (Jérémie), & Kilner (James), « Action understanding and active inference », *Biological cybernetics*, n°104, 2011/2, p.137–160.

Gibson (James J), « The ecological approach to visual perception », Boston, MA : Houghton-Mifflin, 1979.

Griego (Danielle), Buff (Varin), Hayoz (Eric), Moise (Izabello), & Pournaras (Evangelos), « Sensing and Mining Urban Qualities in Smart Cities », In *IEEE 31st International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*, Taipei, 2017, p. 1004-1011.

Hillier (Bill), Burdett (Richard), Peponis (John), & Penn (Alan), « Creating life : Or, does architecture determine anything ? », *Architecture & Comportement/Architecture & Behaviour*, n°3, 1987/3, p.233–250.

Hillier (Bill), Penn (Alan), Hanson (Julienne), Grajewski (Tadeusz), & Xu (Jianming), « Natural movement: or, configuration and attraction in urban pedestrian movement », *Environment and Planning B: planning and design*, n°20, 1993/1, p.29-66.

Hommel (Bernhard), « The cognitive representation of action: Automatic integration of perceived action effects », *Psychological Research*, n°59, 1996, p.176–186.

Hommel (Bernhard), « The theory of event coding (tec) as embodied-cognition framework », *Frontiers in Psychology*, n°6, 2015, p.1318.

Josa (Romàn Vicenze), Camus (Thomas), Murday (Vincent), Morgado (Nicolas), Palluel-Germain (Richard), Brunel (Lionel), & Brouillet (Denis), « The action constraints of an object increase distance estimation in extrapersonal space », *Frontiers in psychology*, n°10, 2019, p.472.

Kalénine (Solène), Shapiro (Allison D), Flumini (Andrea), Borghi (Anna Maria), & Buxbaum (Laurel J), « Visual context modulates potentiation of grasp types during semantic object categorization », *Psychonomic bulletin & review*, n°21, 2014, p.645–651.

Karimi (Kayvan), « A configurational approach to analytical urban design :‘space syntax’ methodology », *Urban Design International*, n°17, 2012/4, p.297–318.

Khalil (Wisama), & Dombre (Etienne), « Modélisation, identification et commande des robots », Hermès science publications, Paris, 1999.

Koohsari (Mohammad Javad), Oka (Koichiro), Owen (Neville), & Sugiyama (Takemi), « Natural movement: A space syntax theory linking urban form and function with walking for transport », *Health & place*, n°58, 2019, p.102072.

Leccese (Francesco), Lista (Davide), Salvadori (Giacomo), Beccali (Marco), & Bonomolo (Marina), « On the applicability of the space syntax methodology for the determination of street lighting classes », *Energies*, n°13, 2020/6, p.1476.

Lupyan (Gary), « Linguistically modulated perception and cognition: the label-feedback hypothesis », *Frontiers in psychology*, n°3, 2012, p.54.

Marcus (Lars), Giusti (Matteo), & Barthel (Stephan), « Cognitive affordances in sustainable urbanism: contributions of space syntax and spatial cognition », *Journal of Urban Design*, 2016.

Marikyan (Davit), Papagiannidis (Savvas), & Alamanos (Eleftherios), « A systematic review of the smart home literature : A user perspective », *Technological Forecasting and Social Change*, n°138 , 2019, p.139–154.

Mattoni (B), Pagliaro (F), Gugliermetti (L), Bisegna (F), & Cellucci (L), « A territorial based strategy for the distribution of sensor networks in smart cities », In *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)* (p. 653-658). IEEE, 2015.

Michalland (Arthur-Henri), Main et cognition : les relations bidirectionnelles entre processus cognitifs et motricité manuelle, *Thèse de doctorat*, Montpellier, Université Montpellier 3, 2019.

Michalland (Arthur-Henri), Thébault (Guillaume), Briglia (Johan), Fraisse (Philippe), & Brouillet (Denis), « Grasping a chestnut burr : Manual laterality in action's coding strategies », *Experimental Psychology*, n°66, 2019/4, p.310–317.

Mori (Hiroki), & Kuniyoshi (Yasuo), « A human fetus development simulation : Self organization of behaviors through tactile sensation », In *2010 IEEE 9th international conference on development and learning* (p. 82–87), 2010

Moser (Edvard I), Kropff (Emilio), & Moser (May-Britt), « Place cells, grid cells, and the brain's spatial representation system », *Annual Review of Neuroscience*, n°31, 2008, p.69-89.

Penn (Alan), « Space syntax and spatial cognition : or why the axial line ? », *Environment and behavior*, n°35, 2003/1, p.30–65.

Pfeifer (Rolf), Iida (Fumiya), & Lungarella (Max), « Cognition from the bottom up: on biological inspiration, body morphology, and soft materials », *Trends in cognitive sciences* n°18, 2014/8, p.404-413.

Raducanu (Vinicius), « Habitat déconnecté, habitat reconnecté—architecture du logement et transition numérique », *Communication management*, 17, 2020/1, p.7-22.

Ratti (Carlo), « Space syntax : some inconsistencies », *Environment and Planning B : Planning and Design*, n°31, 2004/4, p.487–499.

Rowland (David C), Roudi (Yasser), Moser (May-Britt), & Moser (Edvard I), « Ten years of grid cells », *Annual review of neuroscience*, n°39, 2016, p.19-40.

Ryan (Richard M), & Deci (Edward L), « Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being », *American psychologist*, n°55, 2000/1, p.68.

Serrenho (T), & Bertoldi (P), « Smart home and appliances : State of the art », *Joint Research Centre (JRC), European Commission's science and knowledge service, Publications Office of the European Union*, Luxembourg, 2019.

Taylor (Holly A), & Tversky (Barbara), « Perspective in spatial descriptions », *Journal of Memory and Language*, n°35, 1996, p.371-391.

- Tao (Wang), « Interdisciplinary urban GIS for smart cities: advancements and opportunities », *Geo-spatial Information Science*, n°16, 2013/1, p.25-34
- Thompson (Evan), « Sensorimotor subjectivity and the enactive approach to experience », *Phenomenology and the cognitive sciences*, n°4, 2005/4, p.407–427.
- Turner (Alasdair), Doxa (Maria), O'Sullivan (David), & Penn (Alan), « From isovists to visibility graphs: a methodology for the analysis of architectural space », *Environment and Planning B: Planning and design*, n°28, 2001/1, p.103-121.
- Tversky (Barbara), « Structures of mental spaces : How people think about space », *Environment and behavior*, n°35, 2003/1, p.66–80.
- Tversky (Barbara), « Cognitive Maps, Cognitive Collages, and Spatial Mental Models », In Frank, A.U. and Campari, I. (Eds.) *Spatial Information Theory: A Theoretical Basis for GIS*, Proceedings COSIT '93. Lecture Notes in Computer Science, 716, p.14-24, Springer: Berlin, 1993.
- Van Nes (Akkelies), & Yamu (Claudia), « Space syntax : A method to measure urban space related to social, economic and cognitive factors », In C. Yamu, A. Poplin, O. Devisch, & G. de Roo (Eds.), *The virtual and the real in planning and urban design : Perspectives, practices and applications*. Routledge : Oxon, UK / New York, 2018.
- Varela (Francisco J), Thompson (Evan), & Rosch (Eleanor), *L'inscription corporelle de l'esprit : sciences cognitives et expérience humaine*, Paris, Editions du Seuil, 1993.
- Versace (Rémy), Brouillet (Denis), & Vallet (Guillaume), *Cognition incarnée : Une cognition située et projetée*, Bruxelles, Mardaga, 2018.
- Viala (Laurent), « De la domestication technologique à la domesticité numérique: le futur des conditions éthiques de l'habiter (I) », *Communication management*, 17, 2020/1, p.85-95.
- Warren (William H), « Perceiving affordances : Visual guidance of stair climbing », *Journal of experimental psychology : Human perception and performance*, n°10, 1984/5, p.683–703.
- Wiertlewski (Michael), & Hayward (Vincent), « Mechanical behavior of the fingertip in the range of frequencies and displacements relevant to touch », *Journal of biomechanics*, n°45, 2012/11, p.1869–1874.
- Wilson (Margaret), « Six views of embodied cognition », *Psychonomic bulletin & review*, n°9, 2002/4, p.625–636.
- Wilson (Matthew A), & McNaughton (Bruce L), « Dynamics of the hippocampal ensemble code for space », *Science*, n°261.5124, 1993, p.1055-1058.
- Witt (Jessica K), « Action's effect on perception », *Current Directions in Psychological Science*, n°20, 2011/3, p.201–206.
- Witzel (Christoph), Cinotti (François), & O'Regan (Kevin), « How color language is shaped by the variability of reflected light under changes of illumination », *Conference AISB*, 2014.
- Wokke (Martijn E), Knot (Sarah L), Fouad (Aisha), & Ridderinkhof, (K Richard), « Conflict in the kitchen : Contextual modulation of responsiveness to affordances », *Consciousness and cognition*, n°40, 2016, p.141–146.
- Wolpert (Daniel M), Ghahramani (Zoubin), & Flanagan (J Randall). « Perspectives and problems in motor learning », *Trends in cognitive sciences*, n°5, 2001/11, p.487-494.
- Xu (Yabing), Rollo (John), Jones (David S), Esteban (Yolanda), Tong (Hui), & Mu (Qipeng), « Towards sustainable heritage tourism : A space syntax-based analysis method to improve tourists' spatial cognition in chinese historic districts », *Buildings*, n°10, 2020/2, p.29.