Simulation multi-agent de l'activité humaine : une concrétisation en ergonomie du programme de recherche technologique « cours d'action »

*Multi-agent simulation of human activity: a concretization in ergonomics of the
technological research program "course of action"*

Yvon Haradji

Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/activites/6166>

DOI : 10.4000/activites.6166

ISSN : 1765-2723

Éditeur

ARPACT - Association Recherches et Pratiques sur les ACTIVités

Référence électronique

Yvon Haradji, « Simulation multi-agent de l'activité humaine : une concrétisation en ergonomie du programme de recherche technologique « cours d'action » », *Activités* [En ligne], 18-1 | 2021, mis en ligne le 15 avril 2021, consulté le 17 avril 2021. URL : <http://journals.openedition.org/activites/6166> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/activites.6166>

Ce document a été généré automatiquement le 17 avril 2021.

Activités est mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

Simulation multi-agent de l'activité humaine : une concrétisation en ergonomie du programme de recherche technologique « cours d'action »

Multi-agent simulation of human activity: a concretization in ergonomics of the technological research program “course of action”

Yvon Haradji

NOTE DE L'ÉDITEUR

Article soumis le 2 mars 2020, accepté le 5 mai 2020

NOTE DE L'AUTEUR

Ces travaux n'auraient pas été possibles sans de multiples contributions de recherche et d'ingénierie. Tout d'abord, bien sûr, différents responsables de la R&D d'EDF ont rendu possibles ces travaux qui n'étaient pas toujours dans l'air du temps. D'un point de vue technique, l'idée d'une recherche multi-agent a été élaborée avec Alexis Drogoul ; elle a été ensuite principalement portée par Nicolas Sabouret, François Sempé, Quentin Raynaud, Thomas Huraux et Jérémie Albouys-Perrois. La nécessaire articulation avec une problématique en thermique du bâtiment est aujourd'hui réalisée par Christian Inard et Benoit Charrier. Du côté de l'ergonomie, l'idée a mûri au sein du réseau ACT'ING, mais s'est concrétisée avec Mariane Galbat, Julien Guibourdenche et Germain Poizat. Élise Prieur en Design et Bruno Delenne pour les courbes de charge ont été indispensables lorsqu'il s'est agi de valider nos travaux. Mathieu Schumann enfin, a été

un acteur convaincu en thermique du bâtiment, déterminant dans des moments difficiles ; il porte aujourd'hui le projet.

Introduction

- 1 Ce document porte sur les travaux de recherche d'hier et d'aujourd'hui concernant la simulation de l'activité humaine et des consommations dans l'habitat (SMACH¹). SMACH est devenue un service destiné aux experts de l'énergie (thermicien, experts des offres tarifaires, des courbes de consommation, du véhicule électrique, etc.) souhaitant anticiper une situation future : les données réalistes produites par SMACH, les aident à calculer les effets de leurs innovations sur la consommation d'énergie. SMACH, c'est aussi un ensemble d'actions de recherche et d'ingénierie qui visent à faire évoluer la simulation au rythme des transformations majeures et actuelles du monde de l'énergie (l'autoconsommation collective, le véhicule électrique, etc.).
- 2 La plateforme SMACH résulte d'une construction progressive, sur plusieurs années (de 2007 à 2019). Son originalité, depuis le début, réside dans un principe de conception très structurant : le primat donné à l'activité humaine. Nous considérons que la consommation d'énergie s'inscrit dans un univers technique (le bâtiment, les équipements), mais qu'elle résulte en premier lieu de l'activité humaine dans l'habitat. C'est la dynamique de vie quotidienne des personnes du foyer qui structure la dynamique de l'écosystème simulé. Cette orientation première n'aurait pas été envisagée si nous n'avions pas eu connaissance des possibilités conceptuelles et techniques des systèmes multi-agents (SMA). Ce courant de l'Intelligence Artificielle s'appuie sur quelques principes simples : une approche distribuée, une autonomie des agents, une place centrale attribuée à l'interaction, et une conception de l'émergence comme manifestation de l'organisation collective des agents (Ferber, 1995). Les SMA ont déjà été mis en œuvre en ergonomie pour concevoir des systèmes coopératifs complexes (Dugdale, Pavard, & Soubie, 2000) et ont permis d'orienter les décisions concernant des collectifs professionnels du SAMU, du contrôle aérien (Pavard, 2002). Il était donc presque naturel de s'orienter vers ces systèmes pour simuler la vie quotidienne dans l'habitat pour des problématiques d'efficacité énergétique dans l'habitat.
- 3 Dans ce document, nous proposons de retracer l'histoire de cette recherche dans notre contexte industriel. Notre objectif est de proposer un regard réflexif sur notre pratique de recherche afin de caractériser ce que peut être, en ergonomie, un programme de recherche technologique « cours d'action » (Durand, 2008 ; Theureau, 2006, 2009b). Pour cela, nous proposons une analyse longitudinale de cette recherche avec pour ambition principale de montrer comment la relation organique à l'activité humaine structure un programme de recherche technologique. Nous décrirons également la dynamique interne de la recherche, les moteurs de sa croissance, la qualité qui est reconnue et qui aboutit à la création d'un service pour les experts de l'énergie. Nous nous appuierons pour cela sur la description des trois étapes de la recherche SMACH, sur ces moments particuliers d'incertitude et de recherche qui ont amené à cette innovation. Cet article peut être vu comme un plaidoyer pour un renforcement de la relation organique entre conception et analyse de l'activité en ergonomie, mais aussi comme une base pour généraliser et préciser les critères effectifs de validation d'un programme de recherche technologique.

1. Un programme de recherche technologique sur la simulation de l'activité humaine

1.1. La simulation SMACH pour anticiper les effets de l'activité humaine sur les consommations d'énergie dans l'habitat

- 4 La simulation est un outil méthodologique connu et reconnu en ergonomie. Elle a très souvent pour fonction d'anticiper une situation future. L'environnement de travail est simulé (espace de travail transformé, maquette d'architecture ou d'interface, simulateur échelle 1, etc.) et l'activité des opérateurs y est mise en scène (Béguin & Weill-Fassina, 1997 ; Van Belleghem, 2018). Ces auteurs utilisent principalement la simulation pour impliquer des opérateurs dans la conception de leur situation de travail future selon les principes du design participatif. Notre objectif avec la simulation est de simuler des situations dans lesquelles l'activité humaine a un impact sur un système technico-organisationnel-culturel futur à concevoir (Kashif, Ploix, Dugdale, & Le, 2013). La simulation est ici un moyen pour répondre au problème bien connu du paradoxe de l'ergonomie de conception (Pinsky & Theureau, 1984) : il est possible de dire quelque chose de réellement fondé sur une situation de travail quand celle-ci est complètement conçue, mais il est alors trop tard pour intervenir dans la conception. La simulation favorise l'anticipation, car elle fonctionne comme un « laboratoire virtuel » : elle « ouvre l'espace de conception » et nourrit l'interaction (discussion et négociation) entre les acteurs engagés dans la conception (Barcellini, Van Belleghem, & Daniellou, 2013).
- 5 La simulation SMACH s'inscrit dans cette perspective d'anticipation d'une situation future : c'est un outil d'aide à la décision et à l'imagination des concepteurs pour répondre à des problématiques d'efficacité énergétique (Guibourdenche, Salembier, Poizat, Haradji, & Galbat, 2007) dans des situations qui n'existent pas encore (autoconsommation collective, véhicule électrique...). Des hypothèses de transformation de l'activité humaine peuvent alors être jouées pour anticiper l'impact des innovations technologiques sur la consommation d'énergie. C'est une plateforme utilisable pour des études qui se situent à l'échelle d'un foyer ou d'une population. La simulation met en scène des agents informatiques qui organisent leur vie quotidienne individuelle et collective dans un habitat numérique. Ils génèrent des consommations d'électricité du fait de leurs actions quotidiennes avec des appareils électriques, de leur perception du confort et d'un souci plus ou moins marqué d'efficacité énergétique. Le fonctionnement général de SMACH est le suivant :
- *Les données de base de SMACH* correspondent à une description statique d'un foyer et comprend le nombre de personnes dans le foyer, l'âge, le sexe, les actions possibles, des préférences de confort, les équipements, le type d'habitat. Ces données sont issues d'enquêtes, principalement de l'INSEE.
 - *Le moteur d'activité humaine* correspond au moteur multi-agent qui au lancement de la simulation va mettre en interaction tous les éléments de description du foyer de la simulation. À chaque pas de temps (correspondant à une minute de simulation), les agents peuvent réaliser des actions individuelles, interagir avec les autres agents de la situation (les membres du foyer) ou avec l'environnement (l'habitat, le chauffage, etc.).

- 6 Nous distinguons ainsi dans la simulation (Figure 1) ce qui est de l'ordre du cadrage statique de la simulation (les données de base du foyer) et ce qui est de l'ordre de la dynamique des agents (le moteur d'activité humaine).

Figure 1 : Logique de fonctionnement de SMACH.

Figure 1: SMACH's operating logic

- 7 Différentes IHM² sont associées à la plateforme SMACH afin de mettre la simulation à disposition d'utilisateurs ayant des profils et des visées d'utilisation très variées (experts de l'énergie, habitants, visiteurs dans les showrooms).

1.2. Le programme de recherche technologique du cours d'action

- 8 Leonardo Pinsky, lors de son intervention au XXVI^e congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française (Pinsky, 1990a) proposait de développer une recherche technologique, une théorie de la pratique. Lors de cette intervention, il indique tout d'abord qu'une recherche technologique n'est pas réductible à une science, à une discipline, car, citant Koyré (Koyré, 1971), il précise que la pensée pratique est essentiellement différente de la pensée théorique, scientifique ; et qu'elle s'en distingue par son autonomie qui se manifeste dans l'inventivité et la créativité dont elle fait preuve. Elle est d'autant moins réductible à une science qu'elle est fondamentalement le résultat d'une interdiscipline pour la conception. Il se situe dans le prolongement de la conception centrée utilisateur (Norman & Draper, 1986 ; Pinsky, 1990b) et considère que l'action des ergonomes dans la conception passe par la réalisation de modèle pratique, c'est-à-dire de modèle visant l'action de transformation sur la base du diagnostic/pronostic que l'ergonome fait de la situation. Il précise également que la conception d'une situation nouvelle a besoin de critères pour l'orienter. Selon lui, la charge de travail est l'un de ces critères qui permet d'orienter la recherche technologique dans le sens d'une amélioration des conditions de réalisation de l'activité. L'auteur prend bien soin de préciser que la charge de travail n'est pas pour lui une notion scientifique, mais qu'elle est une notion technologique utile « Autant la "charge de travail" comme notion scientifique, quantifiable ou même seulement formalisable est une aberration dont l'ergonomie s'est débarrassée avec raison, autant la "charge de travail" comme notion technologique, informée au fur et à mesure par les progrès de la recherche scientifique, est, d'après nous, à garder et même à développer »

(Pinsky, 1990a). Ce texte et celui de 1987 (Pinsky & Theureau, 1987) sont, comme indiqué dans l'introduction à ce dossier, des textes fondateurs, qui jettent les bases de ce que nous entendons par recherche technologique : une recherche sur la pratique de conception, interdisciplinaire, fondée sur la connaissance de l'activité humaine (et plus précisément du cours d'action) et qui intègre le diagnostic/pronostic³ de l'ergonome très tôt dans la conception, par la modélisation, pour contribuer directement à la conception des situations futures.

- 9 Le programme du Cours d'Action a distingué et articulé très tôt deux programmes de recherche : « le programme de recherche empirique du cours d'action » qui porte sur la connaissance scientifique de l'activité et « le programme de recherche technologique du cours d'action » relatif à la connaissance produite sur la pratique de conception. À la suite des auteurs, (Durand, 2008 ; Pinsky & Theureau, 1987 ; Theureau, 2006, 2019) nous caractérisons un programme de recherche technologique (PRT) du cours d'action comme suit :

- Un PRT, comme toute recherche technologique, n'est pas l'application d'une science (une science appliquée), mais résulte d'une influence réciproque entre des connaissances théoriques et empiriques sur l'activité humaine et des connaissances théoriques et techniques liées à la conception des situations. Le PRT est alors le résultat d'une relation organique avec un ou plusieurs programmes de recherche empiriques qu'ils soient du cours d'action ou pas.
- L'objet de conception d'un PRT a, dans un premier temps, porté sur la question de l'aide à l'activité humaine. La conception ne vise pas des artefacts qui se substituent à l'opérateur, mais a pour objet de concevoir une aide à l'utilisateur/opérateur dans l'interaction, dans ses décisions d'action, dans l'évaluation de ses actions (Jeffroy & Lambert, 1992 ; Pinsky & Theureau, 1987). L'utilisateur/opérateur agit et transforme la situation à partir de son point de vue, de son flux d'interactions asymétriques ; la conception en termes d'aide consiste à concevoir un environnement (technique, organisationnel...) qui va favoriser son interaction asymétrique à la situation.
- L'objet de conception s'est progressivement élargi. De la conception d'un système d'aide il est passé à la conception d'une situation appropriable (Poizat, Durand, & Theureau, 2016 ; Theureau, 2009b). Concevoir, c'est anticiper une situation future dans la globalité des effets qu'elle peut être amenée à produire sur l'opérateur, c'est construire un environnement (technique, culturel, organisationnel...) qui s'inscrit dans le processus continu de transformation de l'activité. Theureau (Theureau, 2011) précise que la conception de l'appropriabilité doit porter sur l'appropriation de la situation (le couplage de l'acteur en activité avec l'environnement et les autres acteurs), l'appropriation au corps (faire corps avec...) et l'appropriation culturelle (relative au système de valeurs de l'utilisateur/opérateur).
- Un PRT peut être évalué au regard de deux critères. Le premier critère est son pouvoir heuristique c'est-à-dire sa capacité à répondre à des besoins, mettre en évidence de nouveaux besoins, à résister à la contestation des acteurs de la conception, à formuler de nouvelles questions de conception. Le deuxième critère est celui de sa capacité de croissance, c'est-à-dire sa capacité à élargir son domaine initial, son ouverture/développement à d'autres domaines, son incidence en termes de nouvelles questions posées aux programmes de recherche empirique qui sont en relation organique avec le PRT.
- Enfin, nous retenons également de ces auteurs le critère primordial de l'efficacité technico-organisationnelle culturelle qui ouvre vers des critères et indices de qualité technologique

(comme par exemple, l'utilité, l'utilisabilité, la charge de travail...) et sur une instance de test/validation de cette efficacité.

- 10 Nous nous appuyerons, dans ce document, sur la notion de programme de recherche technologique (PRT) pour rendre compte de la démarche que nous avons mise en œuvre pour concevoir la simulation SMACH. Cette expérience de conception nous servira de base pour préciser ce qu'est un programme de recherche technologique. Nous chercherons à mettre en évidence comment nous avons construit le PRT SMACH dans une relation organique à l'activité humaine, sur quelle base nous avons évalué sa qualité technologique, son pouvoir heuristique et sa capacité de croissance. En nous appuyant sur l'expérience SMACH, il ne s'agira donc pas d'aborder la question du PRT dans toute sa généralité (PRT générique du cours d'action), mais plutôt d'y réfléchir à partir d'un PRT spécifique que nous nommons « simuler l'activité humaine in silico ».

1.3. Le programme de recherche technologique SMACH en plusieurs étapes

- 11 La recherche SMACH a nécessité d'innover d'un point de vue conceptuel (les relations entre modèles d'activité et multi-agents), méthodologique (la validation qualitative et quantitative) et technique (le développement de la plateforme multi-agent). Il s'agit plus précisément d'un programme de recherche technologique⁴ (PRT) spécifique à la simulation de l'activité humaine in silico. Il a été élaboré progressivement sur la base d'une relation structurelle entre une recherche empirique sur la connaissance de l'activité humaine de vie quotidienne dans l'habitat et la conception informatique d'une simulation de l'activité humaine et de ses consommations dans l'habitat. En ce qui concerne la simulation SMACH, nous avons décliné cette logique générale de conception pour les deux parties constitutives de la simulation : l'IHM et le moteur de simulation (voir Figure 2).

Figure 2 : Les deux axes de la conception centrée activité dans SMACH.

Figure 2: The two axes of activity-centred design in SMACH

- 12 Comme le montre le schéma, nous devons distinguer deux parties distinctes dans une plateforme de simulation :
- L'IHM qui porte l'interaction avec l'utilisateur. Elle est conçue dans une perspective d'aide à l'utilisateur, c'est-à-dire en définissant les fonctionnalités utiles, un dialogue facile d'utilisation. Les IHM ont été systématiquement évaluées en situation réelle ou réaliste chaque fois que nous visions les experts de l'énergie ou le grand public ;
 - Le moteur d'activité et de consommation SMACH correspond à la simulation agents de l'activité humaine et des consommations d'énergie. Il est conçu pour permettre une simulation la plus plausible possible de façon à proposer des résultats de calcul qui soient pertinents pour les besoins de l'expert énergétique. La validation consiste alors à qualifier la simulation au regard du phénomène réel. Ce texte portera principalement sur la conception du moteur d'activité.
- 13 La recherche technologique SMACH se déroule sur 12 ans : il est possible d'en distinguer 3 étapes, très structurantes, comme nous le présentons dans la figure 3.

Figure 3 : Les étapes du programme de recherche technologique SMACH.

Figure 3: The stages of the SMACH technological research program

- L'étape initiale, correspond à ce que l'on peut appeler une preuve de concept, une étape de faisabilité dans laquelle nous cherchons à définir s'il est possible de simuler une activité domestique tout en respectant les grandes caractéristiques génériques de l'activité humaine.
 - L'étape 2 est l'étape qui structure la recherche en différents axes de recherche nécessaires au développement de la plateforme de simulation pour qu'elle soit utile et utilisable.
 - La réussite des étapes précédentes aboutit à la conception d'une plateforme de simulation et débouche, lors de l'étape 3, sur le développement d'une ingénierie de service et sur le renouvellement des questions de recherche du fait des multiples demandes des experts de l'énergie.
- 14 Cette présentation de l'organisation du PRT SMACH sur plusieurs années ne doit pas masquer le fait qu'il s'agit d'un déroulement sans déterminisme : à tout moment la recherche, et pour différentes raisons (scientifique, stratégique, budgétaire, réglementaire...), peut être arrêtée ou prendre des chemins différents. Dans les chapitres suivants, nous reprenons les différentes étapes de cette recherche technologique pour suivre les principales dynamiques de son engendrement et de son organisation. La recherche technologique telle que nous l'abordons correspond à la construction d'un « cours de recherche » qui s'élabore dans l'articulation de différentes recherches empiriques et techniques.

2. Étape 1 : Évaluer la faisabilité de la simulation de l'activité humaine

- 15 La question qui se pose lors de cette étape initiale de la recherche SMACH est la suivante : est-il possible techniquement et raisonnable, sans trop déformer un phénomène réel comme la vie quotidienne dans l'habitat, de simuler « in silico » une activité humaine. Nous avons alors considéré que l'approche multi-agent était intéressante :
- Les Systèmes Multi-Agents présentent des caractéristiques qui les rendent aptes à simuler en partie un comportement humain du fait de l'autonomie des agents (Ferber, 1995). La modélisation multi-agent rend ainsi possible des simulations dynamiques du fait des interactions entre agents ou de l'interaction des agents avec leur environnement.
 - Il est possible de simuler certaines dimensions de l'expérience humaine en s'appuyant sur une modélisation informatique qui correspond à une réduction de processus sociaux (Lefèvre, 2016). Notre idée est alors que des agents autonomes représentent des acteurs humains qui organisent leurs activités individuelles et collectives dans l'habitat.
- 16 Sur ces bases, nous avons organisé notre engagement dans la recherche technologique SMACH autour de deux questions (voir Figure 4) : 1) quelle modélisation de l'activité humaine pour respecter un niveau suffisant de similarité avec l'activité humaine ? 2) comment confronter le phénomène simulé au phénomène réel pour s'assurer de ce niveau suffisant de similarité ?

Figure 4 : Un engagement structuré autour de la question de la simulation de l'activité et de sa validation.

Figure 4: A commitment structured around the issue of activity simulation and its validation

- 17 Ces deux questions vont organiser cette étape de faisabilité et en définir les bornes. Nous développons ces deux points ci-dessous.

2.1. Un modèle synthétique pour une réduction acceptable in silico de l'activité humaine

- 18 Notre engagement dans cette recherche a tout d'abord été guidé par une hypothèse ontologique. Nous considérons que le monde du vivant (la connaissance empirique de l'activité humaine) ne doit pas être confondu avec la simulation du vivant. Les logiques que nous créons dans la simulation n'ont de sens que pour ce monde computationnel. La modélisation multi-agent de l'activité a seulement pour fonction de produire une

imitation acceptable de l'activité humaine. L'activité humaine est alors une source d'inspiration et nous n'attribuons aucune réalité cognitive, émotionnelle, culturelle, etc. à la simulation que nous réalisons. Notre objectif est alors d'atteindre un niveau satisfaisant d'imitation, de définir la réduction du phénomène qui sera pertinente, qui ne le dénaturera pas : nous parlerons alors de plausibilité de la simulation.

- 19 Lors de cette première étape, nous avons réalisé quelques essais infructueux de modélisation multi-agent comme, par exemple, modéliser les processus cognitifs de décision de différents acteurs. Nous nous sommes finalement focalisés sur le niveau organisationnel de l'activité humaine dans l'habitat : les dynamiques individuelles et collectives des agents font émerger une organisation de vie quotidienne dans le foyer. Ce premier type de modélisation correspond à un modèle synthétique, c'est-à-dire un modèle formel multi-agent de l'activité humaine. Cet essai de modélisation est apparu satisfaisant, car il s'appuie sur trois hypothèses théoriques de l'énaction et du cours d'action :

- La première hypothèse est relative à l'autonomie des systèmes vivants dans le courant théorique de l'énaction (Varela, 1989 ; Winograd & Flores, 1986). Tout système vivant constitue un système autonome qui doit maintenir son équilibre dans la dynamique de ses interactions avec l'environnement.
- La deuxième hypothèse (Theureau, 2006 ; Varela, 1989) est relative à l'acteur humain qui détermine son activité en fonction de son histoire et de l'environnement dans lequel il se trouve. Il transforme son environnement et se transforme dans la dynamique de ses interactions. Cette interaction est asymétrique, car c'est l'acteur qui définit ce qui est significatif/pertinent pour lui dans la situation.
- Enfin, avec la troisième hypothèse (Theureau, 2006), nous considérons l'activité collective comme une totalité dont l'organisation est constamment remise en cause par les activités individuelles et constamment reconstruite par ces mêmes activités individuelles. Le collectif n'est donc pas une unité autonome, car il correspond à une « totalité » constamment « détotalisée » et « retotalisée » par l'activité de ses composants.

- 20 Nous illustrons dans l'exemple ci-dessous, généré automatiquement, cette incorporation des principes théoriques dans la structuration de la simulation. Sur la figure 5, chaque ligne horizontale correspond à un agent et chaque couleur à une action. Par exemple, l'agent-Luc (le père) va enchaîner un ensemble d'actions visant à s'occuper de l'agent-Tom (son fils en bas âge), à se coordonner avec l'agent-Ève (sa compagne) et à organiser ensuite sa soirée (repas et télévision).

Figure 5 : Enchaînement et coordination d'actions individuelles et collectives dans le modèle initial de SMACH.

Figure 5: Sequencing and coordination of individual and collective actions in the initial SMACH model

- 21 Nous considérons que cette modélisation synthétique de l'activité humaine⁵ produit une simulation plausible de l'activité humaine, car elle se structure autour des axes suivants :
- Il s'agit de simuler une dynamique d'activité, c'est-à-dire une réalisation d'actions qui évoluera en fonction de l'environnement et des agents. Les actions et interactions ne sont pas prédéterminées : les agents ont un certain niveau d'autonomie⁶.
 - L'activité de chaque agent est liée au point de vue spécifique qu'il a de la situation (la pièce dans laquelle il se situe, les actions réalisées et celles possibles).
 - L'activité collective des agents est possible, car ils communiquent pour se coordonner que ce soit pour manger ensemble, préparer un enfant le matin, etc.
- 22 Notre modèle synthétique, lors de cette étape, est très limité : il ne permet que des simulations de quelques heures, ne dispose pas de calcul intégrant le bâtiment, les équipements, la météo, etc. Pour autant, il montre qu'il est possible de réaliser une simulation plausible de l'activité de vie quotidienne dans l'habitat. Ce modèle synthétique multi-agent correspond à une « réduction acceptable in silico de l'activité humaine », car il est structuré autour de quelques grands principes théoriques de l'activité humaine et respecte des dynamiques de vie quotidienne décrites dans nos recherches empiriques sur l'activité humaine dans l'habitat (Guibourdenche *et al.*, 2007 ; Haué, 2003).
- 23 Ce modèle synthétique pour la conception est, pour reprendre les termes de Vinck et Laureillard (Vinck & Laureillard, 1995) un objet intermédiaire de conception qui rend compte de la construction collective dans la conception. Il est un médiateur qui matérialise les intentions des concepteurs et qui dépasse leurs apports respectifs. Mais ce modèle synthétique est plus que cela, car il correspond à ce que Haué (Haué, 2003), nomme un modèle pivot : il est construit en articulant la description de l'activité humaine à la modélisation informatique. Il existe des distinctions proches en conception multi-agent (Guyot, 2006 ; Le Page, 2017) où trois types de modèle sont distingués. Le modèle de l'expert du domaine, le modèle intermédiaire, formel, qui est le modèle de conception. Enfin, le modèle technique qui est réalisé par l'informaticien. Cette description générale est proche de notre pratique de modélisation sans pour autant être bien précise sur ce qui est nommé « modèle métier ». En ce qui nous

concerne, le modèle de l'activité humaine s'appuie sur notre diagnostic/pronostic et le modèle synthétique l'intègre dans le cadre des logiques formelles de la modélisation agents. Nous reprenons ci-dessous le schéma de Haué (Haué, 2003) et nous le spécifions afin qu'il corresponde à notre pratique.

Figure 6 : Le modèle synthétique comme modèle pivot de la conception.

Figure 6: The synthetic model as a pivotal design model

- 24 Le modèle synthétique tel que nous le proposons est **un résultat de modélisation significatif pour la recherche technologique** : il concrétise ce que peut être une « réduction acceptable in silico de l'activité humaine », il apporte une réponse à notre besoin de simuler l'activité humaine. Un résultat de modélisation significatif a un rôle directeur dans les actions futures sur la plateforme multi-agent : les choix qui sont retenus vont être déterminants pour la suite des travaux.
- 25 Ce modèle synthétique est une base minimale de modélisation structurée autour de grands principes théoriques et pratiques de l'activité et de la simulation agents : c'est un modèle limité, une esquisse du modèle futur. S'il est validé, il ne pourra plus être remis en question.

2.2. La simulation participative pour évaluer le modèle synthétique limité de l'activité humaine

- 26 Il est essentiel, dans le cadre de cette étape de faisabilité, de s'assurer du potentiel du modèle synthétique à simuler une activité humaine, à vérifier sa facilité de mise en œuvre, à estimer sa capacité d'évolution. La question, qui est alors posée à ce stade, est celle de la construction d'un observatoire suffisamment réaliste pour pouvoir confronter le phénomène simulé au phénomène réel.
- 27 La simulation participative interactive (Le Page, 2017) est un moyen méthodologique fréquemment mis en œuvre dans les approches agents. La simulation participative place l'acteur humain au cœur du système (Guyot, 2006) en l'impliquant dans la situation simulée. Un acteur humain, avec la simulation participative de SMACH, peut

se situer dans un habitat simulé et réaliser des actions du quotidien : l'acteur humain, via son avatar, réalise des actions (se lever, se laver, etc.), se coordonne avec les autres acteurs, etc.

- 28 Une expérimentation est réalisée pour évaluer la plausibilité de la simulation, pour s'assurer que cette modélisation synthétique minimale est un point de départ adapté pour rendre compte de l'activité humaine dans l'habitat. L'expérimentation est élaborée sur les bases méthodologiques de l'évaluation ergonomique visant à s'approcher au plus proche d'une situation future (Pinsky & Theureau, 1984). Pour cela, nous avons simulé une situation de colocation, proposé à trois personnes de participer à l'expérimentation et défini deux personnages virtuels interagissant dans la scène simulée. L'expérimentation est donc composée de trois acteurs humains et de deux agents automatiques. Les modalités de l'expérimentation sont les suivantes :
- Les acteurs humains ignorent le rôle que jouent les autres acteurs humains. Ils ne savent pas non plus quels personnages sont joués par les agents automatiques.
 - L'expérimentation se déroule en plusieurs phases pour représenter plusieurs journées.
 - L'expérimentation est filmée et un entretien est réalisé en fin d'expérimentation
- 29 Le résultat le plus important de l'expérimentation porte sur la validation du modèle synthétique de la simulation. Les acteurs humains ont réussi à créer ou recréer des moments de vie réalistes. Par exemple, un acteur humain vivant lui-même en colocation nous a indiqué avoir reproduit des comportements qu'il avait chez lui. Nous avons également vu des comportements collectifs significatifs et non anticipés : d'une phase à l'autre de l'expérimentation, certains acteurs humains construisent une expérience et adaptent leurs actions en conséquence. Par exemple, une personne n'a pas souhaité faire la vaisselle, car dans les deux phases précédentes elle l'avait faite. De plus, les agents automatiques n'ont été identifiés que tardivement. La capacité des acteurs humains à « vivre » ces moments et à interagir « naturellement » avec des agents automatiques montre le bon niveau de plausibilité du modèle.
- 30 Cette expérimentation a montré que la simulation participative est un outil méthodologique possible pour qualifier le niveau de plausibilité de la simulation d'une activité humaine. En créant une situation d'utilisation réaliste, nous avons créé un objet intermédiaire de conception qui, cette fois, porte une finalité méthodologique relative à l'expérience humaine. Cette construction correspond à un **résultat méthodologique significatif pour la recherche technologique** qui porte sur l'adéquation de la simulation à l'activité humaine. Ce choix de conception méthodologique « conception participative orientée validation » correspond alors à une instance de test du modèle synthétique. Nous pouvons reprendre le schéma de Haué (Haué, 2003) et le compléter (voir Figure 7), dans sa partie inférieure, pour rendre compte de cette construction méthodologique. Le choix de conception méthodologique est, cette fois-ci, le résultat d'un processus inversé relativement à la conception : les considérations techniques (modèle synthétique, IHM pour l'interaction de simulation participative...) sont au service de la situation pivot d'expérimentation.

Figure 7 : La conception participative comme méthodologie pivot de l'évaluation/validation de la simulation.

Figure 7: Participatory design as a pivotal methodology for simulation evaluation/validation

- 31 Cette expérimentation de simulation participative correspond à la fin de cette première étape de la recherche technologique SMACH. La conception d'un premier modèle d'activité dans l'habitat, très simplifié, et sa confrontation à des acteurs humains ont permis d'aller au-delà d'une intuition : la simulation multi-agent de l'activité humaine dans l'habitat devient une réelle possibilité. Ces premiers travaux ont démontré la faisabilité de cette orientation de recherche. Ils ont également montré la relation structurelle existante dans ce PRT 1) entre l'activité humaine et la conception d'un modèle synthétique 2) entre cette modélisation et sa confrontation à une situation expérimentale de simulation participative (Haradji, Poizat, & Sempé, 2012). Les résultats positifs de cette étape sont déterminants : ils ouvrent une nouvelle étape de la recherche technologique.

3. Étape 2 : Le développement du Programme de recherche Technologique pour simuler à l'échelle d'un foyer et d'une population

- 32 Les conclusions positives de l'étape de faisabilité ont rendu possible le développement du programme de recherche technologique SMACH. Deux moments de la recherche ont été importants lors de cette deuxième étape 1) concevoir la simulation d'un foyer et sa validation 2) concevoir la simulation d'une population et sa validation. Nous développons ci-dessous ces deux moments du PRT SMACH.

3.1. Le modèle synthétique avancé à l'échelle d'un foyer et sa validation

- 33 Le modèle synthétique limité, développé lors de l'étape 1 de faisabilité, s'est avéré prometteur. Il a servi de point de départ à la réalisation d'un modèle plus complet de l'activité humaine dans son écosystème. Nous avons souhaité, dans un premier temps, simuler la continuité de l'activité humaine sur de longues périodes. Pour comprendre comment s'organise l'activité humaine d'un jour sur l'autre, nous sommes repartis de nos études empiriques du cours d'action relatives à la vie quotidienne dans l'habitat (Guibourdenche *et al.*, 2007). Le modèle synthétique initial a ainsi été complété pour intégrer des habitudes de vie dans le déroulement de la simulation (Haradji *et al.*, 2018). Dans un deuxième temps, nous avons souhaité modéliser l'environnement de l'habitat pour créer une situation d'interaction la plus plausible possible pour les agents. Nous avons alors intégré des modèles techniques de thermique du bâtiment (Plessis, Amouroux, & Haradji, 2014), de météo, d'équipements électriques (e.g., réfrigérateur, chauffage...), et d'offres tarifaires. Le modèle multi-agent qui en résulte est un modèle synthétique avancé qui correspond à une « réduction acceptable in silico d'un foyer dans son écosystème » (voir figure 8) : il permet de simuler l'activité d'un foyer et sa consommation d'énergie.

Figure 8 : Le développement du modèle synthétique avancé pour un foyer et sa validation.

Figure 8: Development of the advanced synthetic model for a household and its validation

- 34 Ce modèle synthétique avancé est un modèle formel multi-agent qui rend compte de la complexité des interactions dans l'habitat et qui respecte les hypothèses théoriques de l'énaction et du cours d'action (voir chapitre précédent). Ainsi, nous pouvons alors distinguer dans le schéma multi-agent de la figure 9 :

- *L'autonomie et la dynamique de l'activité individuelle de l'agent.* L'activité individuelle est portée par un agent (un individu?) qui réalise de façon autonome des tâches. Des *habitudes* émergent au cours de la simulation et elles sont influencées par des *modes de vie* liés à l'efficacité énergétique, au confort, au budget.
- *La construction de l'activité collective d'un agent avec d'autres agents.* L'activité collective se construit dans l'interaction entre agents (les individus) qui réalisent ensemble des tâches et forment pour l'occasion des *groupes* (ou collectifs) éphémères composés de tout ou partie des membres du foyer (adultes, enfants, proches...).
- *Le couplage asymétrique de l'agent avec son environnement.* Le couplage structurel avec l'environnement résulte des agents (les individus) qui, engagés dans leurs activités

individuelles et collectives, sont en interaction avec un *environnement* composé d'*appareils* (chauffage, ballon d'eau chaude, réfrigérateur, etc.) et de *pièces* qui forment un *logement* ayant un niveau d'isolation. De plus, le *fournisseur* propose des offres tarifaires.

Figure 9 : Le modèle de l'organisation multi-niveau de l'activité humaine (Huraux, Sabouret, & Haradji, 2015).

Figure 9: The model of the multi-level organization of human activity

- 35 Comme précédemment, il s'agit d'un modèle pivot de conception, un modèle synthétique avancé, qui a donné lieu à un modèle informatique.
- 36 Pour la validation du modèle, nous avons repris le principe méthodologique de la simulation participative et nous l'avons mis en œuvre dans des situations naturelles en impliquant de vraies familles. Nous avons respecté trois principes pour améliorer le caractère « naturel » de l'expérimentation :
- *Utiliser une situation réelle de référence sur les consommations d'électricité permettant la comparaison avec la simulation.* EDF réalise différentes expérimentations en situation réelle. L'expérimentation « Une Bretagne d'avance » a été choisie, car disposant de données quantitatives sur la consommation d'environ 500 familles.
 - *Confronter les membres d'une famille à la simulation de leur vie quotidienne.* Pour évaluer le réalisme de la simulation, nous avons impliqué des familles à l'aide de la simulation participative et les avons confrontées à la simulation de leur vie quotidienne.
 - *Articuler les validations qualitative et quantitative.* Nous avons souhaité valider la simulation sous un angle qualitatif (l'activité dans l'habitat), mais également sous un angle quantitatif (les courbes de consommation d'énergie).
- 37 Pour créer des conditions satisfaisantes d'expérimentation, nous avons 1) développé une interface de simulation participative rendant possible la manipulation d'un avatar par un acteur humain qui peut alors modifier le cours de la simulation (Figure 10) ; 2) réalisé des entretiens préalables auprès de dix familles issues de l'expérimentation « Une Bretagne d'avance » afin d'être en mesure de réaliser une simulation d'une semaine pour chacune des dix familles ; 3) confronté un acteur humain de la famille à sa dynamique de vie quotidienne simulée. Il décrit et commente cette activité « in silico » en lien avec son activité réelle.

Figure 10 : Conception d'un environnement réaliste pour la simulation participative.

Figure 10: Designing a realistic environment for participatory simulation

- 38 Les résultats de l'expérimentation sont concluants en ce qui concerne la dynamique de vie quotidienne dans l'habitat. Aucun des mécanismes de base de la simulation (autonomie des agents, dynamique individuelle et collective, couplage avec l'environnement) n'a été remis en question. Cette validation qualitative du modèle synthétique avancé est complétée par une validation des consommations. Nous avons alors comparé les courbes de charge simulées de ces familles avec leurs consommations réelles enregistrées dans le cadre de l'expérimentation « Une Bretagne d'avance » (Figure 11).

Figure 11 : Exemple de comparaison de la courbe de charge simulée (en bleu) avec les courbes de charge réelles de la famille (en rouge).

Figure 11: Example of comparison of the simulated load curve (in blue) with the family's actual load curves (in red)

- 39 Les résultats de l'évaluation du moteur SMACH se sont révélés positifs (Haradji *et al.*, 2018) : à l'échelle d'un foyer, ils sont plausibles au niveau de l'activité humaine (validation qualitative) et les consommations d'énergie sont comparables aux consommations réelles (validation quantitative).
- 40 Le modèle synthétique avancé est validé : il permet de simuler l'activité d'un foyer et de calculer les consommations d'énergie qui en découle. Des premiers calculs d'efficacité énergétique deviennent possibles (par exemple, calculer l'impact d'un nouveau tarif sur la consommation d'énergie).

3.2. Le modèle synthétique avancé à l'échelle d'une population et sa validation

- 41 L'anticipation des consommations énergétiques se pose rarement à l'échelle de quelques foyers. La simulation doit être envisagée à différents niveaux de population pour pouvoir répondre à la plupart des enjeux métiers liés à l'énergie dans l'habitat (évaluer l'impact d'une nouvelle offre tarifaire, l'impact d'une évolution réglementaire, l'impact d'écogestes, etc.). Ce passage de quelques foyers à la simulation d'une population (voir Figure 12) correspond à un nouvel enjeu du PRT SMACH : comment simuler la multiplicité et diversité de groupes humains présents dans une population tout en respectant le réalisme individuel de chaque foyer. Le passage à l'échelle ne doit pas s'accompagner d'un « écrasement » des diversités relatives à l'activité et aux consommations des foyers : le global ne doit pas être déconnecté du local.

Figure 12 : Le développement du modèle synthétique avancé pour une population et sa validation.

Figure 12: The development of the advanced synthetic model for a population and its validation

- 42 Nous sommes alors confrontés, avec ce passage à l'échelle, à un problème épistémologique : il n'est pas possible d'observer et d'analyser l'activité de milliers de foyers, pour, à grande échelle, définir les modèles synthétiques de chaque foyer d'une population. Pour dépasser cette contrainte, nous avons distingué ce qui est de l'ordre de la description globale statistique d'une population de foyers (population et emploi du temps) de ce qui est de l'ordre de l'activité locale de chaque foyer dans son habitat. Nous articulons ainsi deux points de vue. Le premier point de vue, statistique, repose sur l'enquête emploi du temps de l'INSEE où chacun des 27 000 foyers de l'enquête a indiqué, sur deux jours, ce qu'il faisait toutes les dix minutes. Cette base de données socio-statistiques présente ainsi l'avantage 1) de refléter un état des actions réalisées dans l'habitat, 2) de décrire une diversité de foyers réalisant une diversité d'actions à

l'échelle d'une population. Ce point de vue global sur les actions possibles (les descriptions statistiques pour chaque foyer) est alors articulé au point de vue local porté par le moteur d'activité SMACH : les agents vont alors « faire vivre » les données statistiques. Ils vont s'adapter à leur environnement thermique, tarifaire, météorologique et, avec une certaine autonomie, construire leurs interactions individuelles et collectives dans l'habitat. Nous articulons ainsi la méthode statistique, basée sur des modèles visant un réalisme statistique global, et la méthode agent, basée sur des modèles visant un réalisme local dans l'habitat (Reynaud, Haradji, Sempé, & Sabouret, 2017). La simulation couplée aux données statistiques correspond à un modèle synthétique avancé qui produit une « description de l'activité grande échelle acceptable pour anticiper des consommations d'énergie ».

- 43 Avec ce modèle, il devient possible de calculer des consommations d'énergie à l'échelle d'un groupe de foyers, d'une ville, d'un pays, etc. La démarche adoptée pour la validation des consommations grande échelle (Delenne, 2018) a consisté à confronter, dans un premier temps, 1 000 courbes de consommation simulées par SMACH avec des valeurs de référence du distributeur Enedis (voir en exemple la figure 13). Dans un deuxième temps, des courbes de consommation simulées ont été comparées à des courbes de consommation agrégées réelles de 10 foyers ayant participé à une expérimentation à Lyon.

Figure 13 : Comparaison des profils hebdomadaires pour les clients en option Base.

Figure 13: Comparison of weekly profiles for customers with a Base option

- 44 La comparaison des consommations simulées et réelles a montré que SMACH est suffisamment réaliste pour analyser l'impact sur les consommations d'énergie de nouveaux comportements, nouveaux matériels ou nouvelles offres.
- 45 La réalisation de la simulation grande échelle et sa validation clôturent cette deuxième étape de la recherche technologique ; elle correspond à la fin du processus de conception de la plateforme de simulation. C'est à ce moment de la recherche technologique que la simulation de l'activité dans l'habitat s'est révélée très utile pour les métiers de l'énergie. La capacité à simuler à l'échelle d'une population avec SMACH a ouvert la porte à une utilisation importante des diagrammes d'activité et des courbes de consommation. Plusieurs dizaines de milliers de fichiers de données ont ainsi été produits pour répondre à des problématiques métiers telles que la présence du véhicule électrique dans l'habitat, l'impact des gestes d'économie d'énergie à l'échelle du territoire, ou encore l'évaluation de l'impact d'une offre tarifaire sur la courbe de charge, etc.

4. Étape 3 : Développer le service et la recherche technologique associée

- 46 Les demandes nombreuses en simulation ont démontré que la plateforme SMACH répondait à un besoin. Elles ont permis aussi d'identifier que notre engagement dans le PRT SMACH devait évoluer. D'une organisation centrée sur la faisabilité et le développement de la simulation, nous sommes passés à une organisation centrée sur la production de données réalistes pour anticiper les situations futures⁸. C'est ce besoin des clients SMACH qui dirige maintenant la dynamique des travaux, qu'il s'agisse de faire évoluer la plateforme (ingénierie du service) ou de recherche sur les modèles (voir Figure 14).

Figure 14 : L'étape actuelle pour le développement d'un service SMACH.
Figure 14: The current stage for the development of a SMACH service

- 47 Pour répondre à la demande en données réalistes (diagramme d'activité et courbes de consommation) nous avons conçu une IHM métier dédiée à des spécialistes de l'énergie (économiste, thermicien, spécialiste en réseau électrique...). Nous avons suivi un processus classique de conception centrée activité humaine (Haradji & Faveaux, 2006) avec 1) une définition du besoin des experts à partir d'une analyse de leurs demandes et d'une série d'entretiens, 2) une spécification de l'IHM et une évaluation sur maquette auprès des experts (voir Figure 15), 3) un développement informatique de l'IHM métier, de l'architecture et de la base de données. Nous avons également, dans une perspective de service, développé de nouveaux modèles techniques (des modèles de rénovation du bâtiment, des modèles de pompe à chaleur, des modèles d'équipements électriques, etc.) qui ne demandent pas (ou peu) de regard sur le modèle d'activité humaine.

Figure 15 : Développement d'une maquette et d'une application métier pour l'utilisation de SMACH.

Figure 15: Development of a mock-up and a specialism-related application for using SMACH

- 48 Nous devons par contre distinguer cette ingénierie (de l'IHM, des modèles techniques) des questions de recherche qui nécessitent de nouvelles modélisations de l'activité humaine. Par exemple, pour calculer la consommation du véhicule électrique lors de sa recharge dans l'habitat nous devons modéliser les types de trajet que fait l'habitant avec son véhicule, s'il recharge son véhicule sur son lieu de travail, dans un centre commercial, dans un espace public... Le niveau de charge de son véhicule va déterminer son besoin en recharge dans l'habitat. Ce travail, en cours de développement, met en scène des hypothèses qui s'appuient sur les données statistiques d'activités des personnes lors de leurs déplacements.
- 49 L'extension de SMACH vers l'autoconsommation collective ouvre un domaine de recherche encore plus large, car il porte une nouvelle logique de consommation de l'électricité. Avec la plateforme actuelle, tous les foyers sont indépendants ; mais, avec l'autoconsommation collective, les agents, et plus largement les foyers, vont devoir communiquer pour partager de l'énergie. Nous sommes alors confrontés à une double question de recherche. Tout d'abord, comment faire évoluer techniquement la simulation SMACH afin qu'elle intègre les mécanismes multi-agents de partage de l'énergie entre foyers ou groupements de foyers (Albouys-Perrois, Sabouret, Haradji, Schumann, & Inard, 2019). Il s'agit d'une transformation profonde de la modélisation agent du fait de la création de la notion d'échange d'énergie qui ouvre sur un niveau de modélisation supérieur à celui du foyer. Cette question de conception oblige aussi à transformer le modèle de l'activité humaine pour intégrer la décision individuelle et collective dans le partage entre foyers d'une production intermittente de l'énergie (photovoltaïque, éoliennes). Nos travaux antérieurs en ergonomie ne nous permettent pas de le faire, car ce type d'expérience humaine est rare. Une recherche est actuellement en cours en design et ergonomie (Bonnardot, Vial, Salembier, Prieur, & Haradji, 2021) qui vise à documenter l'activité humaine, individuelle et collective, pour une situation future qui transforme le rapport à l'énergie, les relations sociales et la dimension économique des foyers impliqués dans cette transition. Cette recherche permettra alors de proposer des hypothèses réalistes d'évolution de l'activité future dans un contexte d'autoconsommation collective.

50 Notre engagement dans un service SMACH prend ainsi deux directions complémentaires. Les travaux d'ingénierie visent à répondre à des demandes d'expert en énergie. Nous les distinguons des questions de recherche technologique qui induisent de nouvelles modélisations tant sur la dimension technique (les équipements) que sur la formalisation de l'activité humaine (véhicule électrique et autoconsommation collective). Dans tous les cas, la plateforme doit pouvoir évoluer en fonction des enjeux liés à l'énergie et la connaissance de l'activité humaine apparaît centrale pour évaluer d'un côté l'adéquation de la plateforme aux besoins des experts énergéticiens et d'un autre côté pour faire évoluer les modèles de la simulation.

5. Dynamique et organisation du programme de recherche technologique SMACH

51 Dans ce chapitre, et dans un premier temps, nous proposons d'expliciter la dynamique d'engendrement du PRT SMACH. Ainsi, en nous inspirant de la modélisation du programme de recherche technologique générique définie par (Theureau, 2009b, 2019), nous considérons que la dynamique interne de la recherche SMACH résulte de la combinaison des tensions suivantes :

- L'impulsion initiale correspond à la définition de notre objet de conception. Nous abordons la simulation, dès le départ, comme un problème d'*aide*⁹ à l'utilisateur, faire en sorte qu'un expert puisse anticiper les transformations futures liées à l'énergie. Il ne s'agit donc pas d'utiliser un système multi-agent pour se substituer à l'expert, mais au contraire d'utiliser les possibilités de calcul de l'intelligence artificielle pour aider l'expert énergétique dans ses décisions d'action.
- Cette impulsion initiale s'appuie également sur notre positionnement théorique. Les *hypothèses ontologiques et théoriques* de l'énaction et du cours d'action (dynamique de l'activité individuelle/collective, couplage avec l'environnement, autonomie des acteurs...) font que l'activité humaine simulée doit être réaliste.
- Ce réalisme *in silico* est alors envisagé comme possible à partir du couplage structurel entre nos recherches sur la connaissance empirique de l'activité humaine et les recherches en informatique sur les systèmes multi-agents. C'est ce noyau central de la collaboration *disciplinaire* qui agrège ensuite toutes les autres contributions.
- L'*engagement* dans la recherche évolue, d'une étape à l'autre de la conception, d'un enjeu à l'autre (faisabilité, développement de la recherche, développement du service) et cadre l'implication dans les différentes actions de recherche.
- Les contributions disciplinaires sont structurées autour de cet objectif de réalisme *in silico* et s'appuient sur un *observatoire* des situations réelles de vie quotidienne et sur des situations réalistes d'expérimentation.
- Les outils de la recherche (*l'atelier*) permettent de produire des résultats de recherche en termes de modèles synthétiques pour la conception et de méthodologies de validation.

52 Ainsi, c'est la conjugaison de ces différentes tensions qui porte la dynamique interne de la recherche technologique SMACH. Nous la représentons ci-dessous (voir la Figure 16) en reprenant le formalisme en signe hexadique proposé par Theureau (Theureau, 2009b, 2019) : cette représentation montre la convergence des forces pour la production d'un résultat de recherche symbolisé ci-dessous (et sur les autres figures) par un point orange.

Figure 16 : Dynamique interne de la recherche technologique SMACH.

Figure 16: Internal dynamic of SMACH technological research

53 C'est cette dynamique générale qui détermine le PRT SMACH et qui va progressivement générer une organisation en différentes unités significatives qui structurent la recherche technologique. Ces unités sont significatives des différents niveaux de couplage structurel existants entre la technique et la description de l'activité humaine. Nous précisons ci-dessous ces niveaux d'organisation de la recherche technologique SMACH.

54 Le premier niveau d'organisation est celui des **résultats significatifs de la recherche technologique**, représentés sur la figure 17 par un point orange. Ces résultats, comme vus précédemment, sont le produit de la dynamique interne au PRT et correspondent principalement dans SMACH à des résultats de modélisation (le modèle synthétique) ou à des résultats méthodologiques (la simulation participative). Ils correspondent à des choix de conception technologique déterminants dans le développement des questions de recherche.

Figure 17 : les niveaux d'organisation significatifs de la recherche technologique SMACH.

Figure 17: The significant levels of organization in SMACH technological research

- 55 Le deuxième niveau d'organisation est celui des **séquences significatives de la recherche technologique**. Ce niveau d'organisation de la recherche rend compte de la relation qui existe entre des résultats significatifs de modélisation et des résultats significatifs méthodologiques (les flèches sur la figure 17). Il existe ici une dépendance forte entre ces deux types de résultats significatifs. Par exemple, la séquence « validité du modèle synthétique limité » correspond à l'articulation entre la simulation participative et la modélisation synthétique limitée.
- 56 Le dernier niveau d'organisation est celui de **l'étape de recherche technologique**. Ce niveau d'organisation correspond à celui des enjeux stratégiques du programme de recherche technologique. Par exemple, l'étape de faisabilité est un moment de vérité qui doit lancer la recherche... ou la stopper. Ce niveau est essentiel, car il détermine le type d'engagement dans la recherche, il détermine en partie les niveaux d'organisation enchâssés qui le composent. Par exemple l'engagement dans l'étape 1 de faisabilité va induire la conception d'un modèle synthétique limité et d'un essai de la méthode de simulation participative. Il s'agit alors d'évaluer les possibilités scientifiques et techniques de ce type de simulation. En complément, nous dirons qu'une étape peut être composée d'une ou plusieurs séquences significatives. Par exemple, l'étape de développement de la plateforme est composée de deux séquences significatives de recherche (séquence « validité de la simulation d'un foyer » et séquence « validité de la simulation d'une population »).
- 57 Nous pouvons, dès lors, sur la base de ces différents niveaux d'organisation de la recherche, préciser les critères qui définissent le programme de recherche technologique SMACH :
- **La relation organique à l'activité** est présente à plusieurs niveaux du PRT SMACH. Chaque résultat significatif de recherche (qu'il s'agisse des choix de modélisation ou des choix méthodologiques) est élaboré dans une relation structurelle à la connaissance empirique de l'activité humaine. De plus, les séquences significatives de la recherche sont construites autour d'une boucle itérative de modélisation/validation qui renforce la relation organique à l'activité humaine.
 - Le **pouvoir heuristique** du PRT SMACH est très visible au niveau des séquences et des étapes significatives de la recherche. La possibilité de simuler l'activité humaine ouvre sur le besoin de simuler à l'échelle d'un foyer, puis d'une population, ouvre aussi sur de nouveaux besoins avec la simulation de l'autoconsommation collective et le véhicule électrique. Ces possibilités ouvrent finalement sur le besoin d'un service de génération de données pour des experts de l'énergie.
 - Le **pouvoir de croissance** de la recherche se construit dans l'enchaînement des résultats significatifs sur les axes modélisation, méthodologie et service (voir Figure 17) ouvrant chaque fois sur de nouvelles questions de recherche. Par exemple, la recherche pour un modèle synthétique a évolué tout au long du PRT en passant du modèle synthétique limité au modèle synthétique avancé, puis au modèle synthétique grande échelle et ensuite aux modèles pour le véhicule électrique et pour l'autoconsommation collective. Il en est de même sur l'axe méthodologique où la recherche a porté sur la définition d'une instance de test qu'il s'agisse de valider la simulation d'une activité humaine ou la simulation des consommations d'électricité (simulation participative, validation quantitative pour la consommation d'électricité).
 - Enfin, il y a le **critère de l'efficacité technico-organisationnelle culturelle** qui ouvre vers des critères et indices de qualité technologique. Nous évaluons cette qualité à partir de l'axe

méthodologique où tous les modèles synthétiques ont pu être évalués dans le cadre d'expérimentations ergonomiques. Nous le faisons également à partir de l'axe service où la qualité technologique se vérifie dans l'évaluation de l'aide apportée aux experts de l'énergie (utilisabilité de l'application), mais aussi par le service rendu (utilité du service et de l'application) à ces experts en réponse à leurs demandes en données réalistes de simulation.

- 58 Sur un plan plus général, et comme nous l'indiquons dans les dynamiques d'engendrement, le PRT SMACH est le fruit d'une relation structurelle avec les différentes recherches empiriques et techniques qui l'ont nourrie ou qu'il a sollicitées (Durand, 2008 ; Theureau, 2009b). Ainsi, les modèles synthétiques sont élaborés sur la base des connaissances acquises dans les différents travaux de recherche empirique sur la vie quotidienne dans l'habitat (Guibourdenche, 2013 ; Guibourdenche *et al.*, 2007 ; Haué, 2003). Le PRT SMACH s'est également nourri des recherches techniques sur la modélisation et la simulation multi-agent (Huraux *et al.*, 2015 ; Plessis *et al.*, 2014 ; Reynaud *et al.*, 2017). Le programme de recherche technologique SMACH est aussi à l'origine de nouvelles questions qui interrogent la recherche empirique et technique. C'est le cas, par exemple, pour l'autoconsommation collective. Bonnardot (Bonnardot *et al.*, 2021) pose la question de l'anticipation des expériences collectives futures pour partager l'énergie produite localement. Sous l'angle technique, Albouys-Perrois (Albouys-Perrois *et al.*, 2019) pose la question de la création des mécanismes multi-agents pour simuler des groupements d'autoconsommation collective. La dynamique interne du programme de recherche technologique SMACH, comme tout PRT, est structurellement dépendante de sa relation organique à des recherches empiriques et techniques.
- 59 Nous concluons cette caractérisation du programme de recherche technologique SMACH en abordant la question des collaborations de recherche et d'ingénierie. Chaque étape, chaque séquence, chaque résultat significatif de la recherche technologique sont construits autour de la définition d'un objet de recherche dont l'unité de conception s'appuie sur les rationalités limitées des différentes disciplines qui y contribuent (Theureau, 2009a). Les modèles pivots de conception (par exemple le modèle synthétique) et méthodologiques (par exemple la simulation participative) sont les moments privilégiés de cette construction disciplinaire. Plus encore, il nous semble ici que la recherche technologique renvoie à une transdisciplinarité de conception c'est-à-dire à la conception d'un objet qui transcende les différences disciplinaires : cet objet a une cohérence qui ne se trouve dans aucune des disciplines prise indépendamment l'une de l'autre. Le modèle synthétique n'aurait pas existé sans les apports de l'ergonomie de l'activité et de la modélisation multi-agent. La simulation participative n'aurait pas existé sans les apports de l'évaluation ergonomique, du design d'interaction et de la méthodologie agent. Le ciment de cette transdisciplinarité de conception est ici porté par la relation organique entre la connaissance empirique de l'activité et la conception technique. Cette transdisciplinarité orientée activité humaine est constitutive de nos objets de recherche elle l'est aussi des connaissances en ingénierie que nous mettons en œuvre.

Conclusion

- 60 Notre objectif, avec ce texte, était de caractériser ce qu'est un programme de recherche technologique spécifique en nous appuyant pour cela sur plusieurs années de travaux

dans le cadre de la recherche SMACH. Nous avons principalement insisté sur l'importance de la relation organique à l'activité humaine. L'engagement dans une recherche technologique veut alors dire une articulation de tous les instants entre les dimensions techniques et la connaissance empirique de l'activité humaine. Articulation d'une étape à l'autre de la recherche, d'une séquence à l'autre et au sein de chaque résultat de recherche pris indépendamment l'un de l'autre. C'est ce mouvement, construit dans une relation organique à différents programmes de recherche scientifiques (empirique et technique), qui génère cette dynamique de croissance de la recherche, qui permet de répondre à des besoins de simulation de plus en plus larges. C'est aussi, certainement, ce mouvement qui porte la qualité technologique de la situation conçue.

- 61 Pour conclure et reprendre les propos de Pinsky (Pinsky, 1990a), nous souhaitons avec ce texte nous situer dans une réflexion sur la conception, apporter une pierre à une théorie de la pratique. Nous avons décrit ici le PRT spécifique « simuler l'activité humaine in silico » en nous appuyant sur la recherche SMACH. Une perspective à ce travail serait de comparer cette recherche à d'autres recherches intégrant l'activité humaine dans la simulation afin de préciser les règles de ce type de programme de recherche technologique spécifique. Bien sûr, en comparant différents PRT spécifiques nous contribuons aussi à une réflexion plus générale sur la conception et plus particulièrement sur le programme de recherche technologique générique du cours d'action.

BIBLIOGRAPHIE

Albouys-Perrois, J., Sabouret, N., Haradji, Y., Schumann, M., & Inard, C. (2019). A Co Simulation Of Photovoltaic Power Generation And Human Activity For Smart Building Energy Management And Energy Sharing. *Proceeding of 16th IBPSA International Conference & Exhibition Building Simulation 2019*. Florence, Italie.

Barcellini, F., Van Bellegem, L., & Daniellou, F. (2013). Les projets de conception comme opportunité de développement des activités. In P. Falzon (Ed.), *Ergonomie constructive* (pp. 191–206). Paris : Presses Universitaires de France.

Béguin, P., & Weill-Fassina, A. (1997). *La Simulation en ergonomie : connaître, agir et interagir*. Toulouse : Octarès.

Bonnardot, Z., Vial, S., Salembier, P., Prieur, E., & Haradji, Y. (2021). Créer des interactions humaines réalistes par le design : le cas de l'autoconsommation collective pour la transition énergétique (Texte soumis). *Actes Du 55^e Congrès de La SELF, Paris, 11-13 Janvier 2021*.

Delenne, B. (2018). Eléments de validation des courbes de charge simulées par SMACH. In *Document interne EDF. Mémo E74/18/010/A*.

Dugdale, J., Pavard, B., & Soubie, J.-L. (2000). A Pragmatic Development of a Computer Simulation of an Emergency Call Centre. In G. Dieng, R. Giboin, A., Karsenty, L., & De Michelis (Eds.),

- Proceedings of the 4th International Conference on the Design of Cooperative Systems* (pp. 241–256). Amsterdam : IOS Press.
- Durand, M. (2008). Un programme de recherche technologique en formation des adultes. *Éducation et Didactique*, 2(3), 97–121. <https://doi.org/10.4000/educationdidactique.373>
- Ferber, J. (1995). *Les Systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*. InterEditions.
- Guibourdenche, J. (2013). *Préoccupations et agencements dans les contextes d'activité domestique : Contribution à la conception de situations informatiques diffuses, appropriables et énergétiquement efficaces*. Thèse de doctorat, Institut de psychologie Lyon 2.
- Guibourdenche, J., Salembier, P., Poizat, G., Haradji, Y., & Galbat, M. (2007). A Contextual Approach to Home Energy Management Systems Automation in Daily Practices. *Proceedings of the European Conference on Cognitive Ergonomics 2015*. <https://doi.org/10.1145/2788412.2788436>
- Guyot, P. (2006). *Simulations multi-agents participatives. Faire interagir agents et humains pour explorer, modéliser et reproduire les comportements collectifs*. Thèse de doctorat, Université Paris 6.
- Haradji, Y., & Faveaux, L. (2006). Évolution de notre pratique de conception (1985-2005). *Activites*, 03(1). <https://doi.org/10.4000/activites.1852>
- Haradji, Y., Guibourdenche, J., Reynaud, Q., Poizat, G., Sabouret, N., Sempé, F., Huraux, & Galbat, M. (2018). De la modélisation de l'activité humaine à la modélisation pour la simulation sociale : entre réalisme et fécondité technologique. *Activites*, 15(1). <https://doi.org/10.4000/activites.3106>
- Haradji, Y., Poizat, G., & Sempé, F. (2012). Human Activity and Social Simulation. *Advances in Applied Human Modeling and Simulation*. CRC Press.
- Haué, J.-B. (2003). *Conception d'interfaces grand public en termes de situations d'utilisation : le cas du Multi-Accès*. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne.
- Huraux, T., Sabouret, N., & Haradji, Y. (2015). Study of Human Activity Related to Residential Energy Consumption Using Multi-level Simulations. *Proceedings of the International Conference on Agents and Artificial Intelligence*, 133–140. <https://doi.org/10.5220/0005197401330140>
- Jeffroy, F., & Lambert, I. (1992). An ergonomics framework for user activity centred software design. *Human Factors in Information Technology*, 9, 43–92. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-89301-7.50009-5>
- Kashif, A., Ploix, S., Dugdale, J., & Le, X. H. B. (2013). Simulating the dynamics of occupant behaviour for power management in residential buildings. *Energy and Buildings*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.042>
- Koyré, A. (1971). *Études d'histoire de la pensée philosophique*. Gallimard.
- Le Page, C. (2017). *Simulation multi-agent interactive : engager des populations locales dans la modélisation des socio-écosystèmes pour stimuler l'apprentissage social*. Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- Lefèvre, A. (2016). Simulation sociale et simulacre structural. *Variations*, (19), 1–23. <https://doi.org/10.4000/variations.720>
- Norman, D. A., & Draper, S. W. (1986). *User Centered System Design. New Perspectives on Human-Computer Interaction*. CRC Press.
- Pavard, B. (2002). Complexity paradigm as a framework for the study of cooperative systems. *Revue d'intelligence Artificielle*, 16(4–5), 419–442. <https://doi.org/10.3166/ria.16.419-442>

- Pinsky, L. (1990a). Définir l'ergonomie comme une technologie. *Communication Au XXVI^e Congrès de La Société d'Ergonomie de Langue Française, Montréal.*, pp. 1–10.
- Pinsky, L. (1990b). User activity centered design. In Elsevier (Ed.), *Work with display units* (L. Berling (pp. 119–150). North-Holland.
- Pinsky, L., & Theureau, J. (1984). Paradoxe de l'ergonomie de conception et logiciel informatique. *Revue Des Conditions de Travail*, 9, 1–15.
- Pinsky, L., & Theureau, J. (1987). *L'étude du cours d'action*. Collection d'Ergonomie et de Neurophysiologie du Travail CNAM N° 88. Paris.
- Plessis, G., Amouroux, É., & Haradji, Y. (2014). Coupling occupant behaviour with a building energy model-A FMI application. *Proceedings of the 10th International ModelicaConference*, 321–326. <https://doi.org/10.3384/ECP14096321>
- Poizat, G., Durand, M., & Theureau, J. (2016). The challenges of activity analysis for training objectives. *Le Travail Humain*, 79(3), 233. <https://doi.org/10.3917/th.793.0233>
- Reynaud, Q., Haradji, Y., Sempé, F., & Sabouret, N. (2017). Using Time Use Surveys in Multi Agent based Simulations of Human Activity. *Proceedings of the 9th International Conference on Agents and Artificial Intelligence*, 67–77. <https://doi.org/10.5220/0006189100670077>
- Theureau, J. (2006). *Le cours d'action : méthode développée*. Toulouse : Octarès.
- Theureau, J. (2009a). Comment l'interdisciplinarité peut-elle être un rassemblement fécond des ignorants ? In *La mise à l'épreuve. Le transfert des connaissances scientifiques en questions* (QUAE, (pp. 121–139). Versailles.
- Theureau, J. (2009b). *Le cours d'action : méthode réfléchie*. Toulouse : Octarès.
- Theureau, J. (2011). *Appropriations 1, 2, 3. Appropriation, Incorporation, In-culturation*. Retrieved from <http://www.coursdaction.fr/02-Communications/2011-JT-C136.pdf>
- Theureau, J. (2019). *Cerisy : La construction de programmes de recherche technologique en relation organique avec des recherches en sciences humaines & sociales*. Cerisy.
- Van Belleghem, L. (2018). La simulation de l'activité en conception ergonomique : acquis et perspectives. *Activites*, 15(1), 0–22. <https://doi.org/10.4000/activites.3129>
- Varela, F. J. (1989). *Autonomie et connaissance : essai sur le vivant*. Éditions du Seuil.
- Vinck, D., & Laureillard, P. (1995). Coordination par les objets dans les processus de conception. *Journées CSI - "Représenter, Coordonner, Attribuer,"* 13. Retrieved from <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00134434>
- Winograd, T., & Flores, F. (1986). *Understanding computers and cognition: a new foundation for design*. Norwood : Ablex.

NOTES

1. La signification de l'acronyme SMACH a évolué. A l'origine il signifie Simulation Multi-Agent des Comportements Humains. Aujourd'hui il signifie Simulation Multi-agent de l'Activité humaine et des Consommations dans l'Habitat.
2. IHM signifie ici Interaction Humain-Machine et focalise sur l'aide que cette IHM apporte dans son interaction avec l'activité de l'utilisateur.

3. Le pronostic/diagnostic de l'ergonome repose sur les critères d'aide (charge de travail, facilité d'utilisation, utilité etc.) et sur la description qu'il fait de l'activité humaine.
 4. Nous utiliserons le plus souvent l'abréviation PRT pour parler du Programme de Recherche Technologique du « cours d'action ». Les termes, programme de recherche technologique spécifique, PRT SMACH, recherche technologique SMACH, seront utilisés dans ce texte comme des termes équivalents.
 5. La conception du modèle synthétique et sa relation à l'analyse empirique de l'activité de vie quotidienne sont présentées dans (Haradji, Guibourdenche, Reynaud, Poizat, Sabouret, Sempé *et al.*, 2018)
 6. Un agent aura la possibilité de réaliser une action en fonction de périodes préférentielles (par exemple souhaiter dormir la nuit), de préférences sur les actions (préférer lire plutôt que faire le ménage), de réaction à l'environnement (avoir chaud ou froid), de coordinations avec d'autres agents (sortir faire une promenade), etc. L'ensemble de ces contraintes est calculé à un pas de temps d'une minute et détermine le poids respectif (valeur numérique) de chaque action pour chaque agent : une action peut alors être activée, continuée, interrompue...
 7. Les termes en italique correspondent à des termes de la figure 9.
 8. Les travaux présentés dans ce chapitre sont en cours et ne peuvent pas être développés avec le même niveau de précision que ceux présentés dans les chapitres précédents.
 9. Les termes en italique correspondent aux composantes du signe hexadique présentées dans la figure 16.
-

RÉSUMÉS

SMACH (Simulation Multi-agent de l'Activité humaine et des Consommations dans l'Habitat) est une plateforme de simulation qui s'inscrit pour EDF dans un cadre de recherche et développement. Elle vise à utiliser la simulation pour l'anticipation et la réduction des consommations d'énergie à différentes mailles d'analyse (habitat, quartier, ville, pays). Notre objectif, avec ce texte, est de caractériser ce qu'est un programme de recherche technologique cours d'action en nous appuyant pour cela sur plusieurs années de travaux de recherche SMACH. Nous insistons principalement sur l'importance de la relation organique entre technique et activité humaine et nous montrons l'évolution de cette relation organique au fur et à mesure des différentes étapes qui caractérisent ce programme de recherche technologique. Cet article peut être vu comme une base pour généraliser et préciser les critères effectifs de validation d'un programme de recherche technologique, comme une contribution à une réflexion sur la conception en ergonomie.

SMACH (Multi-Agent Simulation of Human Activity and Consumption in the Home) is a simulation platform that is part of EDF's research and development framework. It aims to use simulation to anticipate and reduce energy consumption at different levels of analysis (housing, neighborhood, city, country). The aim of this article is to characterize a "course-of-action" technological research program by referring to several years of SMACH research work. We mainly focus on the importance of the organic relationship between technology and human activity and we show the evolution of this organic relationship as we follow the different stages that characterize this technological research program. This article can be seen as a basis for

generalizing and specifying the effective criteria for validating a technological research program and as a contribution to a reflection on design in ergonomics.

INDEX

Mots-clés : programme de recherche technologique, modèle synthétique, conception, simulation participative, cours d'action, analyse de l'activité, système multi-agent

Keywords : technological research program, synthetic model, design, participatory simulation, course of action, activity analysis, multi-agent system

AUTEUR

YVON HARADJI

yvon.haradji@gmail.com