

Sport, réalité virtuelle et conception de simulations participatives

Illustration dans le domaine du football avec le simulateur CoPeFoot

Cyril Bossard**, Gilles Kermarrec*, Pierre De Loor**, Romain Bénard**, Jacques Tisseau**

RESUME : La simulation participative et la réalité virtuelle offrent des perspectives innovantes pour la recherche et la formation en sport. L'objectif de cet article est de proposer une réflexion sur la méthodologie de conception de simulateurs dans le domaine du sport, dans le but d'en améliorer la crédibilité. Un état de l'art présente l'intérêt, les propriétés et les limites des simulateurs actuellement développés pour la recherche et l'entraînement sportif. Nous présentons ensuite une expérience originale de développement d'une simulation participative en sport collectif : une approche ergonomique de l'activité en situation naturelle permet d'obtenir une modélisation de la prise de décision de joueurs de football experts ; celle-ci est utilisée pour guider le choix de modèles informatiques implémentés pour développer un environnement virtuel, CoPeFoot (Coopérative Perception in Football). Cette méthodologie et les résultats obtenus sont discutés à l'aune du paradigme de l'enaction. La crédibilité de la simulation pour l'usager reposeraient sur un équilibre entre régularité et surprise dans l'émergence des comportements des agents (joueurs) virtuels.

Mots clés : Simulation, Sport, Enaction, Conception, Réalité Virtuelle, Prise de Décision

ABSTRACT: Sport, virtual reality and design of participative simulations. Illustration in the field of football with the CoPeFoot simulator. New perspectives for research and training in sport could be offered thanks to participative simulation and virtual reality. This paper aims at reflecting about design processing in order to enhance simulation credibility. The literature is examined to present actual simulators' interests, properties and limits for sport research and training. An original experiment of participative simulation design in team sport is proposed: an ergonomic approach was used to study experts' decision making in soccer natural setting; the decision-making model constituted a guide for choosing and implementing computer science models for the development of the virtual environment CoPeFoot (Cooperative Perception in football). The process and the results obtained are discussed thanks to

· Université Européenne de Bretagne, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest, Laboratoire d'Informatique des Systèmes Complexes (EA 3883), Centre Européen de Réalité Virtuelle, 25 rue Claude Chappe, 29280 Plouzané. Courriel : {bossard, deloor, benard, tisseau}@enib.fr

· Université Européenne de Bretagne, U.F.R Sport et EP de Brest, Laboratoire d'Informatique des Systèmes Complexes (EA 3883), 20 av. Le Gorgeu, 29238 Brest Cedex 3. Courriel : gilles.kermarrec@univ-brest.fr

the enaction paradigm. Credibility of simulation for the user should need both of regularity and surprises in the emergence of agents' (players') behaviours.

Key words: Simulation, Sport, Enaction, Design, Virtual Reality, Decision-making

INTRODUCTION

L'objectif de cet article est de proposer une méthodologie de conception de simulateurs dans le domaine du sport, dans le but d'en améliorer la crédibilité. L'apport des nouvelles technologies a conduit les chercheurs en sciences du sport à s'interroger sur l'intérêt de la simulation pour la recherche et l'entraînement dans le sport de haut niveau (Ripoll *et al.* 2004). La simulation, c'est-à-dire le fait de faire semblant, d'imaginer ou de réaliser une action en dehors de son contexte habituel, peut remplir plusieurs fonctions dans le contexte du sport de haut niveau : se préparer à l'action, acquérir de nouvelles habiletés, ou étudier l'expertise (id.). La simulation peut reposer sur l'utilisation de la réalité virtuelle.

La réalité virtuelle est aujourd'hui considérée comme « un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs » (Fuchs *et al.*, 2003). La réalité virtuelle permet de développer des simulations participatives.

La notion de simulation participative met en avant le couplage entre un utilisateur et le système informatique utilisé (Bickhard, 1999 ; Trajkovski et Collins, 2006). Ce couplage entre un expert du domaine, un sportif, et l'environnement virtuel reposera sur la crédibilité de ce dernier (Loyall, 1997).

La crédibilité est le degré de confiance ou de véracité des attitudes et comportements que l'utilisateur accorde aux agents dans l'environnement virtuel (Burkhardt, 2007). Les travaux orientés sur la crédibilité d'agents virtuels sont basés soit sur la « logique des comportements » en utilisant des techniques d'intelligence artificielle (Laird et Duchi, 2000 ; Mac Namee, 2004), soit sur le « réalisme graphique » (Brogini *et al.*, 2007).

Dans la perspective d'améliorer la crédibilité des comportements des agents, il semble que le choix des modèles informatiques implémentés soit crucial (Alessi, 2004). Le modèle informatique qui commande les comportements des agents virtuels peut être lui – même prescrit par un « modèle de l'activité humaine ». Cette représentation de l'activité humaine (qu'elle soit une croyance ou une modélisation scientifique) est censée guider le processus de conception du simulateur. Cette crédibilité de la simulation est nécessaire par exemple pour proposer des situations d'étude privilégiées en biomécanique du mouvement (Filippeschi *et al.*, 2009) ou en psychologie du sport (Brault *et al.*, 2009).

Du point de vue des sciences informatiques, la crédibilité des comportements des agents repose sur la possibilité de maintenir un équilibre entre régularité et surprise dans les comportements des agents virtuels. Cela semble

possible en basant le programme informatique sur la prise en compte du contexte, c'est à dire « l'état du monde entourant les agents » avec lesquels l'utilisateur est en interaction. L'*interaction* est la possibilité pour les agents informatiques d'influencer l'utilisateur, mais aussi d'être transformés par l'activité de ce dernier. L'interaction est une condition d'*évolutivité* de la simulation. Si les comportements des agents évoluent, ils ne doivent être ni parfaitement prédictibles, ni complètement aléatoires. Cette évolutivité, cette capacité à produire du nouveau, repose en partie sur l'autonomie des agents (De Loor, 2006). L'*autonomie* peut être définie comme la capacité à s'adapter aux particularités du contexte et à prendre des décisions en fonction de celui-ci (Tisseau, 2001). Le véritable challenge est alors de permettre aux agents virtuels d'être progressivement « libérés ou affranchis » des prescriptions du concepteur (Pfeifer et Scheier, 1999). Si ce défi est relevé, chaque entité virtuelle devrait être capable de prendre des décisions selon son histoire, son état, ses possibilités d'actions et ses perceptions, de sorte que son comportement paraisse singulier.

Dans cet article, nous conduirons une réflexion pluridisciplinaire relative à la conception de simulateurs en sport. Comme point de départ de notre réflexion, nous présenterons un état de l'art des simulateurs proposés jusqu'à présent dans le domaine du sport. Nous montrerons que les simulateurs résistent mal aux exigences d'autonomie, d'évolutivité et d'interaction qui pourraient être recherchées dans les simulations participatives. Dans notre développement, nous proposerons une méthodologie qui articule étroitement l'analyse de l'activité humaine réelle (en situation sportive) et le choix de modèles informatiques. Nous illustrerons notre propos en nous appuyant sur une expérience de conception d'un environnement virtuel en sport collectif, CoPe-Foot (Collective Perception in Football), réalisée au CERV (Centre Européen de Réalité Virtuelle). Enfin, nous discuterons de cette démarche et des résultats obtenus, en les questionnant en référence au paradigme de l'énaction (Varela, 1988).

1. SIMULATION ET SPORT : ETAT DE L'ART

Deux catégories de simulateurs peuvent être identifiées dans le domaine du sport : les simulateurs liés à l'étude du geste technique et les simulateurs liés à l'étude de la prise de décision. Pour l'étude de la prise de décision, nous distinguerons les usages de la simulation pour l'analyse stratégique des situations sportives (pour une aide à l'entraînement, pour un travail de débriefing), et les usages orientés sur l'immersion « d'utilisateurs – joueurs » en situation de décision tactique. La crédibilité des comportements des agents est une condition de l'engagement des sportifs dans les simulations participatives. Il s'agit alors d'éviter que ces comportements ne paraissent totalement prescrits. Nous avons fait l'hypothèse que les principes d'autonomie, d'évolutivité et d'interaction pouvaient favoriser l'émergence de comportements nouveaux chez les agents. Nous examinons les simulateurs existants en sport en faisant de ces principes, des critères pour analyser leurs propriétés.

1.1 Les simulateurs pour l'étude du geste technique

Dans les simulateurs pour l'étude du geste technique, l'objectif est de recréer un environnement le plus crédible « du point de vue perceptif », principalement au niveau visuel, vestibulaire, tactile et sonore. L'interaction physique entre l'utilisateur et la machine est une condition essentielle de la crédibilité.

Pour augmenter l'impression d'immersion de l'utilisateur dans ces simulateurs, on a recours à des systèmes mécaniques permettant par exemple de reproduire les vibrations inhérentes à la pratique d'un sport comme le ski ou le vélo tout-terrain (Mester, 1999). L'immersion par l'interaction physique est aussi liée à l'échelle (1/1) du simulateur. On retrouve ces caractéristiques dans *Peloton*, un environnement qui reproduit des courses cyclistes virtuelles (Ensor *et al.*, 2000). De même, Bideau *et al.* (2003) proposent d'immerger un gardien de but de handball en le confrontant à des joueurs virtuels ; Huffman et Hubbard (1996), puis Kelly et Hubbard (2000) présentent un simulateur virtuel d'entraînement pour le pilotage de Bobsleigh.

Une des problématiques introduites par l'usage de ces simulateurs est l'évaluation de leur effet sur l'exécution du geste en situation réelle. Par exemple, Todorov *et al.* (1997) présentent une étude basée sur l'acquisition de gestes techniques au tennis de table dans un environnement virtuel ; ils étudient le transfert de ces gestes dans un environnement réel. Les études sur le transfert des acquisitions du virtuel vers le réel (Bossard *et al.* 2008) montrent la nécessité de réfléchir d'une part à l'alternance entre entraînement réel et simulation, d'autre part au contenu des acquisitions attendues et des informations fournies (en retour) par le contexte virtuel.

1.2 Les simulateurs pour l'analyse et l'aide à la décision stratégique

L'intérêt des simulations pour la prise de décision est de pouvoir expérimenter sans risque et de pouvoir analyser les conséquences des choix effectués. Une des fonctions principales des ces simulateurs est de « re-jouer » des séquences d'action. Le jeu peut être effectué à partir d'une capture de situations réelles. Il nous semble que le but est moins de simuler l'action, que de permettre une mise à distance de l'action. Comme dans l'analyse des séquences de jeu à partir d'images vidéo, le point de vue de l'utilisateur reste souvent exocentré. Du point de vue informatique, pour générer un environnement crédible, cet outil utilise du traitement et de la synthèse d'images. Pour l'analyse des séquences de jeu, il mobilise de l'acquisition et de la représentation des connaissances.

Par exemple, Singer *et al.* (1994), exploitant les apports de l'intelligence artificielle, proposent un système expert permettant la reconnaissance de séquences de jeu lors d'un match de rugby et ainsi l'entraînement de la prise de décision. Exploitant les apports de l'intelligence artificielle, ils proposent un système expert permettant l'entraînement de la prise de décision en rugby. La représentation des connaissances utilisée à des fins d'analyse est prescrite et figée : elle s'appuie sur les travaux de Deleplace (1979). L'aide à l'analyse des situations sportives par la technologie informatique se retrouve dans le simulateur *LIFT*, (Logique Informatique pour la Formalisation des connaissances en Tennis), développé par Denis et Pizzinato (1993). Le but est d'identifier les

caractéristiques techniques et tactiques des joueurs humains, plus précisément la stratégie employée, la zone visée et la nature du service.

Dans la même perspective, Ziane (2004) propose une contribution à la formation des entraîneurs à la lecture d'actions de jeu en basket-ball. Il utilise un modèle de reconstruction des séquences de jeu à partir d'un film, pour en extraire les mouvements des joueurs et du ballon. L'étude cinématique de l'action permet aux entraîneurs de représenter graphiquement et d'interpréter avec précision les variations de configuration des équipes, de surface occupée par chaque équipe, de distance entre joueurs, ballon et panier, de vitesse des joueurs et du ballon. D'autres modèles (réseaux bayésiens) permettent aussi d'identifier, parmi les points de vue proposés, celui qui est le plus pertinent pour étudier les corrélations entre les mouvements des joueurs, des équipes et du ballon. Cet outil présente l'intérêt de modifier « le point de vue sur l'action », et d'identifier des phénomènes peu perceptibles par l'observation spontanée.

Enfin, Metoyer et Hodgins (2000) proposent un simulateur dont le but est l'analyse du résultat des différentes combinaisons possibles au football américain. Ces combinaisons sont jouées par des agents virtuels. Selon les auteurs, il n'y a aucun intérêt à modéliser de manière très réaliste l'apparence des joueurs virtuels, car s'ils se comportent de manière non naturelle, l'illusion de réalité est alors perdue. Ainsi, la crédibilité reposeraient moins sur l'aspect graphique des joueurs que sur leurs comportements (leurs déplacements) en situation. L'intérêt est de tester différentes stratégies de déplacements pour évaluer les résultats avant de les appliquer dans le réel.

Tous ces travaux se placent dans la lignée de ceux de Calmet et Matet (1992) pour le judo, Parlebas (1988) pour le volley, ou encore ceux de Grossgeorges *et al.* (1991) pour le basket ; ils exploitent la connaissance humaine en sport pour aboutir à l'analyse de comportements et à la résolution de problèmes. Relevant du « modèle de la commande », l'analyse de l'activité des experts d'un domaine prescrit une reproduction informatisée de situations sportives. La crédibilité des comportements repose essentiellement sur un rendu « visuel » assuré par une capture d'image, ou sur la conformité comportementale obtenue à partir de la base de connaissances des experts du domaine. Ces approches permettent une amélioration de la décision stratégique, réalisée en dehors ou à distance de l'action, mais ne recherchent pas l'immersion participative de l'utilisateur.

1.3 Les simulateurs pour l'immersion en situation de décision tactique

Dans le but d'immerger l'utilisateur humain dans un environnement crédible, certains simulateurs tentent de doter des agents virtuels d'une certaine autonomie.

Les jeux vidéo proposent ainsi des simulations très efficaces. On peut citer par exemple, le système TeamVision de Konami qui est un système d'intelligence artificielle adaptatif pour le jeu Pro Evolution Soccer 2008. Les créateurs du jeu FIFA 2008 (Fédération Internationale de Football Association) appellent « opportunity map », un système qui évalue une trentaine d'options d'action à chaque instant. En l'état actuel de nos connaissances, les comportements obtenus sont réalistes, car ils sont issus d'une relative autonomie des joueurs vir-

tuels. Les choix sont effectués par chaque agent indépendamment d'un métamodèle. Toutefois, l'évolutivité des comportements est souvent absente et l'interaction est limitée par les options préprogrammées dans le système.

Sanza (2001) présente une simulation de football appelée *NeViS* pour *Networked Virtual Soccer* qui permet de faire coopérer des humains et des agents. Le comportement des agents est guidé par un système de classeur (Wilson, 1994). La répétition des interactions entre agents virtuels leur permet « d'apprendre » (de sélectionner) de nouvelles stratégies pour gagner. Les systèmes de classeurs implémentent un apprentissage par renforcement d'une base de règles de la forme « condition - action ». Chaque règle peut être pondérée par des attributs de qualité. Le système perçoit l'environnement, choisit une des règles applicables et exécute une action issue de ces règles. La règle qui est choisie peut être renforcée en fonction du résultat (rétribution). Les règles peuvent être croisées entre elles par des algorithmes génétiques pour en créer de nouvelles. Cette modélisation informatique autorise une bonne évolutivité des comportements des agents. Toutefois, Sanza *et al.* (1999) soulignent que, les nouvelles règles étant générées aléatoirement, elles peuvent générer un comportement efficace, mais « aberrant » du point de vue de la signification des situations sportives. La recherche de crédibilité des comportements est essentielle, si on souhaite concevoir des simulations « significatives » pour des experts du domaine. C'est une condition pour qu'ils transfèrent leurs compétences du réel vers le virtuel (Bossard *et al.*, 2008).

Walls *et al.* (1998) présentent une expérience réalisée avec un simulateur de voile. Le simulateur reproduit le pont du voilier qui est maintenu par deux supports qui sont dynamiquement contrôlés par un ordinateur, le rendu visuel des manœuvres telles que barrer, régler les voiles ou virer est très réaliste. Après une première étape de familiarisation avec le simulateur, les sujets, des marins de bon niveau, effectuent une régate de 1km avec le vent de face, le but étant évidemment d'être le plus rapide. Les classements obtenus par chaque sujet lors du test ont été comparés à leurs classements dans d'autres compétitions. Les résultats confirment la possibilité de transférer des compétences décisionnelles du réel au virtuel et, par conséquent, ils confortent « la crédibilité » de l'environnement.

Au terme de cet état de l'art relatif aux simulateurs dans le domaine du sport, nous pouvons avancer que :

- les simulations pour le geste technique recherchent la crédibilité en se focalisant principalement sur l'interaction « physique » ; le système est prescrit, sans autonomie et avec peu d'évolutivité ;
- les simulations pour l'analyse et l'aide à la décision stratégique s'intéressent plus à la qualité graphique des environnements ou à la conformité des comportements ; l'analyse des situations est prescrite par une représentation *ad hoc* du domaine. L'autonomie des agents et l'évolutivité de la simulation sont faibles ;
- les simulations qui visent l'immersion des utilisateurs dans des « situations tactiques » font de l'autonomie des agents et de l'évolutivité de leur comportement une nécessité pour produire des situations virtuelles crédibles.

Le tableau suivant présente les différentes applications recensées ci-dessus selon trois critères :

- 1- l'autonomie : le comportement des agents est-il autonome ou totalement contrôlé par l'utilisateur ? Une autonomie forte signifie que les agents sont totalement autonomes avec un comportement qui leur est propre.
- 2- l'évolutivité : les compétences du système sont-elles enrichies de manière automatique ou sont-elles saisies directement par un expert ? Une évolutivité forte implique que les connaissances du système peuvent être apprises de façon autonome.
- 3- l'interaction: quelles sont les possibilités d'interaction entre un utilisateur et le système ? Une interaction forte signifie que l'utilisateur peut fortement influencer le cours de la simulation.

Auteur	Année	Autonomie	Evolutivité	Interaction	Sport
Simulateurs pour l'étude ou l'entraînement du geste technique					
Huffman et Hubbard	1996	faible	faible	forte	Bobsleigh
Mester	1999	faible	faible	forte	VTT
Ensor et al.	2000	faible	faible	forte	Cyclisme
Bideau et al.	2003	faible	faible	forte	Handball
Pan et al.	2006	faible	forte	forte	Gymnastique
Les simulateurs pour l'analyse et l'aide à la décision stratégique					
Denis et Pizzinato	1993	faible	faible	forte	Tennis
Singer et al.	1994	fort	faible	forte	Rugby
Todorov et al.	1997	faible	faible	forte	Tennis de table
Metoyer et al.	2000	fort	moyenne	faible	Foot US
Sanza	2001	fort	forte	faible	Football
Ripoll et al.	2004	faible	faible	forte	Football
Les simulateurs pour l'immersion en situation de décision tactique					
Walls et al.	1998	faible	faible	forte	Voile
Ziane	2004	faible	forte	forte	Basket

Tableau 1 : analyse des simulateurs dans le domaine du sport

Cette analyse de la littérature relative aux simulateurs appliqués au domaine sportif montre que peu de simulateurs concilient les trois principes énoncés. Nous présentons ci-après une expérience de conception de simulateur qui tente de tenir ces trois principes dans la perspective de produire des comportements collectifs crédibles en football.

2. UNE METHODOLOGIE DE CONCEPTION DE SIMULATION PARTICIPATIVE

Nous présenterons ici une expérience de conception d'un environnement virtuel (EV). L'objectif de cet EV est de permettre l'immersion de footballeurs en situation de décision tactique. L'originalité de la méthodologie de conception réside dans l'étroite collaboration entre un chercheur en sciences de l'informatique et un chercheur en sciences du sport. Cette collaboration repose sur quatre étapes, dissociées ici pour les besoins de la présentation, mais qui constituent un processus interactif :

- 1- une analyse de l'activité d'experts en situation naturelle (réelle) de football est réalisée ;
- 2- cette analyse nourrit le choix et l'implémentation de modèles informatiques pour favoriser la crédibilité comportementale des agents virtuels ;
- 3- le résultat obtenu, l'environnement virtuel, permet alors d'engager des simulations (couplages sujets – environnement) et d'enrichir les modèles informatiques implémentés ;
- 4- l'usage de la simulation permet de tester la crédibilité des comportements des agents virtuels et d'évaluer le simulateur.

2.1 Une modélisation de la décision tactique en situation naturelle

A la différence des entreprises de simulation dite « anthropomorphiques » (Burkhardt, 2007), l'objectif de la conception d'un environnement virtuel n'est pas de reproduire la réalité, mais de rendre la simulation crédible. La notion de crédibilité nécessite une relative autonomie des agents et, pour le concepteur informaticien, un modèle d'agent autonome. Le rôle du chercheur en sciences du sport peut être de participer au choix, à l'élaboration de ce modèle « agent ». Si les connaissances issues de l'analyse de l'activité réelle commencent aujourd'hui à être exploitées dans le cadre de propositions de situations de formation (Ria *et al.*, 2006), leurs mobilisations pour les situations de simulation exploitant les techniques de la réalité virtuelle constituent une voie nouvelle. Pour simuler une contre-attaque en football, nous avons souhaité modéliser « la décision tactique » des joueurs à partir d'une étude en situation naturelle.

Exploitant l'approche NDM (Naturalistic Decision Making), qui étudie le couplage d'un acteur et d'un contexte, nous avons considéré la décision tactique comme un processus de reconnaissance de configuration spatio-temporelle (Klein, 2008). Le couplage peut être décrit comme un « package cognitif » (Klein, 2008) ou comme la « conscience de la situation » (Flach, 1995), c'est un ensemble d'éléments pertinents pour l'acteur. Ces éléments sont reconnus comme pertinents et constituent une configuration significative, car ils sont perçus à partir d'une structure d'arrière-plan issue de l'expérience. Par hypo-

thèse, cette structure fonctionnelle pour percevoir et agir renvoie au concept de schéma (Piegorsch *et al.*, 2006).

Afin de contribuer à la validation empirique de cette approche dans le cadre des sports collectifs, nous l'avons mise à l'épreuve d'une situation de contre-attaque au football. Des données comportementales sont enregistrées auprès de 12 joueurs de football de niveau national (catégorie -16ans) et complétées par des données verbales recueillies lors d'un entretien d'auto-confrontation. L'analyse de l'activité décisionnelle permet de décrire l'activation et les enchaînements préférentiels (i.e., les scénarii) de 16 schémas chez des experts en situation de forte contrainte temporelle :

1. Intercepter le ballon
2. Observer, analyser, anticiper l'évolution de la situation
3. S'engager vite vers l'avant pour profiter de la récupération du ballon
4. Aller vite vers l'avant avec le ballon tout en étant attentif au jeu
5. Proposer son aide à un partenaire pour conserver le ballon
6. Créer de l'espace pour permettre à des partenaires de s'engager vers l'avant
7. Se déplacer par rapport à ses partenaires dans l'espace de jeu pour proposer une solution de progression vers la cible
8. Choisir une solution de passe pour assurer la continuité du jeu
9. Attendre le soutien des partenaires
10. Se déplacer par rapport au hors-jeu, à l'adversaire et rechercher la rupture
11. Eliminer en dribblant pour progresser vers la cible
12. Fixer-passer pour progresser vers la cible
13. Se placer ou se déplacer pour recevoir un centre ou une passe décisive
14. Passer pour mettre le partenaire en situation favorable de frappe
15. Suivre l'action du partenaire pour une reprise
16. Chercher à tirer/frapper au but

Ces schémas constituent des structures d'arrière-plans qui articulent des éléments perceptifs et cognitifs et permettent la reconnaissance rapide d'une situation au cours d'une contre-attaque en football. Ces schémas nous renseignent sur les catégories d'informations mobilisées par des experts en situation : les buts plausibles pour le joueur (8,4%), les actions qu'il peut ou pense mobiliser (32,3%), les indices pertinents sur soi, les adversaires et/ou les partenaires (45,1%), les attentes relatives aux résultats de l'action (3,9%) et les connaissances sur le jeu, les partenaires ou les adversaires (10,3%). Nous avons également pu établir que la répartition et le poids de ces catégories d'informations varient en fonction des schémas utilisés. Ces informations sont précieuses pour guider l'implémentation des modèles informatiques.

2.2 Le choix et l'implémentation de modèles informatiques

La seconde étape du processus de conception a consisté à opérer un rapprochement entre le modèle de la décision tactique par « reconnaissance de configurations significatives » (Bossard, 2008) et un modèle informatique. La littérature regorge de systèmes de prise de décision issus d'un enrichissement

mutuel entre intelligence artificielle et psychologie. C'est le cas des architectures cognitives telles que Soar (Laird et Duchi, 2000) ou ACT-R (Anderson et Lebriere, 1998) qui sont basées sur des mémoires de travail et des règles d'inférences, manipulées en fonction de critères logiques, mais également de résultats provenant de la psychologie cognitive. Les présupposés épistémologiques sous-jacents font alors référence à des représentations et surtout à une explicitation du raisonnement. Des modèles, tels que les BDI (Belief, Desire, Intention) (Ambroszkiewicz et Komar, 2000), sont une illustration de l'exploitation à l'extrême d'une approche basée sur la notion de représentations mentales (croyances désirs et intentions) s'influencant les unes les autres selon des règles clairement déterminées et immuables. Ces modèles positionnent la prise de décision comme une fonction fortement décolérée de l'évolution, en temps réel, de la situation. Lorsqu'un raisonnement est lancé, le monde extérieur est figé. Si le calcul est très rapide, ceci n'a a priori que peu d'importance. Néanmoins, dans des simulations peuplées de nombreux agents, ce n'est pas toujours le cas. Mais surtout, si l'on considère la prise de décision comme une perpétuelle adaptation d'un comportement à un environnement dynamique, la notion d'inférence ayant un début et une fin dans l'objectif d'atteindre un but, pose problème. Il y a intérêt à donner une priorité à l'aspect réactif « temps-réel » de la décision et à l'adaptation. Dans le domaine des systèmes multi-agents, on retrouve les BDI mais également des architectures plus riches intégrant une simulation de critères émotionnels telles que PECS (Urban et Schmidt, 2001) ou Brahms (Acquisti, Clancey, van Hoof, Scott et Sierhuis, 2003). Néanmoins, le prérequis est encore très proche de la notion de manipulation de représentations et de planifications pour atteindre des buts. L'alternative se trouve alors en robotique ou en vie artificielle, avec en particulier l'usage de réseaux de neurones artificiels (Beer et Gallagher, 1992) ou des systèmes de classeurs (Holland et Reitman, 1978). Cette fois, aucune représentation explicite n'est manipulée, les symboles informatiques sont des « sous-symboles » desquels émergent des comportements liés aux interactions. Du point de vue des sciences cognitives, nous sommes proches du connexionnisme. Dans le cas de notre étude, ces approches présentent une difficulté majeure : Celle d'obtenir, d'une part, des comportements complexes permettant à des spécialistes du football d'identifier des tactiques ou des collaborations et, d'autre part, des représentations manipulables par les experts pour modifier et enrichir le modèle selon leurs expériences et leurs études sur le comportement des joueurs. Malheureusement, il semble contradictoire d'obtenir un modèle associant explicitation et absence de représentation. En revanche, nous avons tenté d'améliorer la réactivité et l'adaptabilité de modèles symboliques en gardant à l'esprit une approche écologique de la prise de décision et la nécessité de provoquer une diversité des situations par le biais d'interaction entre des agents perturbés par un ou des joueurs humains. Une piste intéressante consiste à passer par des modèles Baysiens de comportements (Le Hy, 2007). Néanmoins, la généralisation statistique s'accorde mal avec la notion de singularité ou d'exception. En particulier, elle est souvent basée sur une conjonction de faits, mais rarement sur d'autres types d'associations entre faits (négation ou exclusion par exemple). Pour les utiliser dans un cadre de prise de décision

complexe, il faut passer par une spécification explicite fine de règles comportementales stables, ce que nous cherchons à éviter.

Deux modèles informatiques ont été utilisés pour le développement du simulateur choisi pour illustrer notre démarche : un modèle de résolution de problème (Case Based Reasoning ; Aamodt et Plaza, 1994 ; Mille, 1999) et un modèle de représentation des connaissances du domaine (la notion de contexte empruntée à Kokinov, 1995 ; 1997). La figure 1 présente la relation entre ces deux modèles.

Le modèle RàPC, pour « raisonnement à partir de cas », est fondé sur l'hypothèse qu'un problème perçu (élaboration) peut être efficacement résolu en faisant appel à l'expérience passée. La recherche de la solution repose sur la reconnaissance dans la base des cas déjà résolus de l'épisode le plus proche de la situation actuelle (remémoration). Chaque cas constitue un potentiel pour l'action qui est spécifié en fonction du contexte (adaptation). Cette possibilité « d'adaptation » est un argument fort pour le choix du RàPC : les solutions de la base de cas ne sont pas directement appliquées mais adaptées à un contexte précis. La base de cas est un guide, pas un prescripteur. Ce modèle prend appui sur le concept de cadres (Minsky, 1975), proche du concept de schéma. En cela, le modèle RàPC se rapproche du modèle RPD utilisé pour l'analyse de l'activité réelle de footballeurs experts présentée dans l'étape précédente. L'adaptation du schéma est possible grâce à une représentation du contexte.

La représentation du contexte s'inspire du modèle développé par Kokinov (1995 ; 1997). Selon sa théorie dynamique du contexte, si le contexte d'une décision est toujours global, on peut, à des fins d'analyse et de représentation, distinguer différentes dimensions. Ainsi, il distingue un contexte externe et un interne. L'externe prend en compte les propriétés physiques de la situation, les éléments que l'on pourrait qualifier « d'objectif » d'un point de vue exocentré. Le contexte interne est défini comme l'état actif du système cognitif d'un agent à un instant t . Ce sont les éléments pris en compte par l'agent pour décider ; le contexte d'un point de vue égocentré. A partir de cette distinction initiale, le contexte d'un agent de CoPeFoot est séparé en plusieurs sous-contextes. Le contexte externe, ou environnemental, regroupe toutes les perceptions physiques de la situation. En fait, il s'agit d'une abstraction sémantique opérée sur les perceptions qui sont simulées au sein de l'outil informatique. Par exemple, un joueur ne peut pas percevoir l'ensemble de la scène, il n'a pas non plus une information aussi précise que ce que permet un simulateur. Ainsi, plutôt que de représenter la position topologique exacte des obstacles ou des joueurs, « visible » par l'avatar, l'abstraction contextuelle renvoie une indication de type « *il y a deux adversaires devant, dont un plus proche à droite et qui possède la balle* ». Le contexte interne est une représentation des aptitudes de l'agent ou la représentation de l'état d'un agent, par exemple sa fatigue. Du point de vue informatique, ce sont des variables continues qui évoluent selon des règles de bon sens, sans qu'il y ait eu recours à des données physiologiques réelles, mais c'est évidemment un objectif à atteindre. Chacun des sous-contextes est composé d'un ensemble de perceptions qui, une fois assemblées, forment le contexte de l'agent dans la situation. Cette représentation explicite du contexte a un double rôle. Le premier est de permettre une prise de décision contextualisée ; pour chaque agent, le contexte est alors un filtre actif induisant la situation

la situation courante. Le second est d'autoriser une visualisation graphique de chacune des perceptions et de chacun des contextes. On peut par exemple montrer graphiquement l'adversaire le plus proche ou celle de « distance de démarquage » à l'aide d'icônes dédiées. L'ensemble de ces abstractions sémantiques a été élaboré en collaboration avec des experts du domaine. Une représentation basée sur la notion de contexte est particulièrement intéressante pour hiérarchiser les perceptions des agents, choisir les éléments contextuels pertinents pour la prise de décision en football et finalement orienter leur comportement (crédibilité). L'utilisation de l'étude en situation réelle constitue alors une précieuse ressource pour l'enrichissement du modèle informatique.

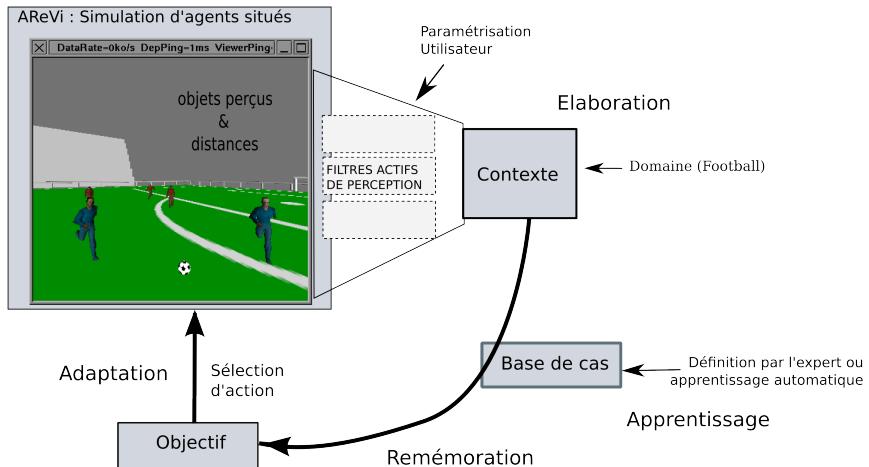


Image 1. Le modèle informatique RàPC et Contexte (Bénard, 2007)

2.3 La simulation et l'enrichissement des modèles (informatiques).

Pour améliorer la crédibilité comportementale des agents, le modèle informatique peut être doté de possibilités d'évolution. Nous avons envisagé l'évolutivité du comportement des agents selon trois voies que l'on peut situer à trois « niveaux » dans un rapport prescription – émergence.

- 1- A un premier niveau, le modèle empirique issu de l'analyse de l'activité humaine est utilisé (appliqué) pour enrichir la base de cas et spécifier les perceptions des agents dans le contexte. La description de schémas typiques des footballeurs experts constitue une base de données pour le chercheur en informatique. C'est pour cela qu'il nous semble intéressant que les modèles informatiques choisis puissent être compatibles, suffisamment proches des modèles utilisés pour étudier l'activité décisionnelle réelle des experts en football. Ici, la prescription est forte : il y a apprentissage explicite ou apprentissage par instruction.
- 2- A un second niveau, le modèle informatique est enrichi grâce à l'usage. Une interaction est proposée au sein de CoPeFoot : l'utilisateur clique « sur les zones » du contexte, importantes pour lui. Les informations

contextuelles sont représentées par des symboles de distance par rapport à la cible, ou aux agents partenaires et adversaires; des symboles soulignent que certains partenaires sont marqués ou disponibles, etc. Grâce à cet apport d'informations graphiques, l'utilisateur « explicite » les éléments significatifs dans l'action. Les renseignements fournis par l'utilisateur en cliquant sur ces éléments, permettent de réviser les poids associés à chaque élément de contexte, selon un algorithme décrit dans (Bénard, De Loor et Tisseau, 2006 ; Bénard et De Loor, 2007). La prescription est moyenne : l'apprentissage est lié à l'imitation par les agents des comportements perceptifs des usagers.

Image 2 : Représentation des perceptions d'un agent dans le contexte : point de vue exocentré.

- 3- A un troisième niveau, l'enrichissement est issu de la simulation. Le modèle informatique mémorise les nouveaux cas qui émergent de l'interaction. « L'arbre des cas » se diversifie pour offrir de nouvelles possibilités d'action aux agents virtuels. La prescription est faible : l'apprentissage est implicite.

Cette étape du processus de conception d'une simulation participative montre comment nous tentons de favoriser l'évolutivité des modèles implémentés, ce qui permet en conséquence une évolutivité des comportements émergents de la simulation.

2.4 Expérimentation et validation de la simulation participative

La crédibilité d'une simulation est difficile à évaluer. Certains simulateurs sont testés du point de vue du transfert d'apprentissage (pour une revue complète voir Bossard et al., 2008). Le transfert du virtuel au réel y est considéré comme une mesure de l'efficacité de l'EV comme outil de formation. Certaines études expérimentales ont montré un transfert d'apprentissage effectif (Rose *et al.*, 2000), alors que d'autres chercheurs ont été plus réservés (Kozak *et al.*, 1993). Les résultats de cette dernière étude ont été discutés, pointant surtout des limites méthodologiques et des limites liées à la démarche de conception

de l'environnement virtuel utilisé (Psotka, 1995). Ces évaluations menées *a posteriori* ne participent pas à la démarche de conception de l'environnement, et ne permettent pas d'ajuster la modélisation informatique. Pour remédier à cet écueil, nous avons mis en place une étude exploratoire *in virtuo* visant à évaluer la crédibilité comportementale de CoPeFoot en cours de conception. Inspirée du test de Turing (1950), l'expérimentation teste la possibilité pour un usager de distinguer ou non un joueur dirigé par un humain et un joueur virtuel autonome. Cet « effet leurre » a été étudié en comparant deux groupes de sujets (experts et novices), lors de trois mesures successives. Les résultats montrent un effet leurre plus marqué pour les novices par rapport aux experts et une amélioration des performances pour les deux groupes dans le temps. Ces premiers résultats attestent d'une bonne crédibilité des comportements adoptés par les agents. Ils montrent aussi une érosion de cette crédibilité avec l'usage et soulignent l'importance de l'évolutivité des modèles informatiques pour développer des simulations qui restent crédibles.

3. DISCUSSION : LA CONCEPTION DE SIMULATION PARTICIPATIVE, ENTRE PRESCRIPTION ET EMERGENCE

Le Centre Européen de Réalité Virtuelle associe la réalité virtuelle et des systèmes multi - agents, pour obtenir des simulations participatives crédibles. Nous avons tenté d'illustrer les difficultés et les enjeux d'une méthodologie de conception par la présentation du développement de CoPeFoot. Trois principes vont guider notre discussion: l'autonomie des agents, l'évolutivité des comportements et l'interaction agents – agents et agent – contexte. Ils nous permettent d'interroger notre méthodologie de conception de simulateurs au regard du paradigme de l'enaction.

3.1 Le principe d'autonomie des agents

Un agent autonome possède un comportement qui est régi par ses propres lois. Une vision énactive radicale impliquerait de développer des agents dont l'autonomie résulterait de leur capacité à résister à la perturbation de leur organisation, provoquée par un environnement non représenté explicitement. C'est un domaine de recherche à part entière en vie artificielle (Mc Mullin, 2004) et un nouveau champ de recherche en intelligence artificielle (Froese et Ziemke, 2009, De Loor *et al.*, 2010), loin de pouvoir donner lieu à une application, du moins à court terme, dans un système de simulation participative en sport. L'exemple du simulateur présenté (CoPeFoot) propose un compromis entre prescription et autonomie. D'une part, au sein de nos modèles-agents, les perceptions et les actions associées peuvent être explicitées. D'autre part, le simulateur tente de préserver une caractéristique essentielle de l'émergence : le comportement global du système n'est pas décrit explicitement par l'informaticien. Il évolue en fonction des interactions entre agents autonomes et entre l'utilisateur et le système multi – agents. Du point de vue informatique, notre travail peut donc être vu comme une application du paradigme agent à la simulation de situations dynamiques collaboratives.

3.2 Le principe d'évolutivité des comportements

Pour ne pas être en contradiction avec une approche énactive, il nous semble nécessaire d'obtenir des comportements évolutifs et adaptatifs guidés par l'histoire de la simulation et de l'interaction. Les agents artificiels doivent donc être dotés de mécanismes d'apprentissage ou d'enrichissement « en-ligne », influençables ou manipulables par l'utilisateur ou par l'expert du domaine. Cette propriété du simulateur repose sur un principe général qui lui, ne pourra évoluer. La question centrale est de choisir ce principe général et la procédure ou technique d'évolution de la façon la plus pertinente possible. Un premier intérêt de CoPeFoot est d'avoir choisi un modèle RàPC/contexte par analogie avec une approche contextualisée de la décision humaine (NDM) : chaque décision est une adaptation en contexte. L'autre intérêt par rapport aux simulateurs existants, est de proposer des apprentissages (implicites et explicites) et donc des enrichissements plus ou moins prescrits. Il ne s'agit pas d'une méta-heuristique d'optimisation travaillant à des niveaux sous-symboliques qui n'auraient de sens pour l'utilisateur et ne pourrait être modifiés par le biais d'une interaction sémantique avec le système.

Toutefois, si on examine de façon précise le rapprochement effectué entre les modèles informatiques (RàPC et contexte) et les modèles issus des sciences humaines (RPD et schémas), on peut s'interroger sur le processus de catégorisation utilisé par l'agent pour reconnaître une situation et décider. Ce processus, étudié en psychologie cognitive, oppose traditionnellement une reconnaissance d'un objet ou d'un événement basée sur l'exemplarité ou la typicalité et une reconnaissance basée sur l'assimilation à une classe ou à une catégorie (Dubois, 1991). Quand un agent virtuel reconnaît une configuration de jeu comme favorable pour tirer au but, il a rapproché cette situation d'un cas mémorisé proche et particulièrement significatif (avec un poids élevé) : un prototype, ou un cas exemplaire. Dans l'étude de Bossard (2008), quand un expert reconnaît une configuration de jeu, il l'assimile à une classe de situations, une catégorie abstraite d'un ensemble d'expériences ou de cas : un schéma. L'analogie opérée entre le modèle informatique (RàPC) et le modèle de l'activité humaine (NDM) minore ou masque la distinction entre une forme forte ou « radicale » du constructivisme (énaction), qui fait de la typicalité le ressort de la catégorisation et une forme faible ou « réaliste » (Mc Gee, 2005, 2007), issue du constructivisme structural, où la catégorisation repose sur des structures abstraites de niveaux « supérieurs ».

3.3 Le principe de l'interaction agents-contexte et agents-agents

Dans une perspective énactive, l'activité en situations collaboratives naît des interactions agent - agent et de l'influence du contexte collaboratif. Le simulateur CoPeFoot (éléments de représentation du contexte, base de cas, technique d'apprentissage implicite et explicite) est construit à partir de la notion de contexte inspirée des travaux de Kokinov (1995 ; 1997). Les interactions résultent « d'un environnement perturbateur du comportement » (Maturana, 2007). Cependant, une définition non prescriptive des éléments contextuels significatifs reste évidemment problématique.

En résumé, les caractéristiques principales de CoPeFoot qui le positionnent favorablement comme candidat à un futur environnement virtuel de formation

« énactif » (nous utilisons volontairement les guillemets) reposent sur les éléments suivants :

- 1- Un système basé sur des agents autonomes interactifs qui évoluent dans un contexte qu'ils peuvent percevoir et influencer ;
- 2- Pour chaque agent, un modèle d'autonomie (relative, car le programme est toujours écrit) localisé, qui comprend un processus de résolution de problème et une représentation du contexte perçu ou significatif ;
- 3- Des outils d'apprentissage permettant une évolutivité de la simulation (guidée par un expert ou par les utilisateurs).

3.4 Les limites de la simulation participative

Il nous semble important de bien distinguer l'aspect évolutif du comportement d'agents autonomes artificiels tels que le sont les joueurs virtuels de CoPeFoot, de l'aspect potentiellement « énactif » de l'usage de CoPeFoot.

Peut-on concevoir des « agents autonomes énactifs » au sens strict du terme ? Le développement de tels agents est le domaine de recherche récent de la « nouvelle intelligence artificielle » (Froeses et Ziemke 2009, De Loor *et al.*, 2010). Théoriquement, de tels agents sont des systèmes complexes qui ne possèdent aucune représentation de leur environnement et sont capables de compenser les perturbations de celui-ci par le biais de leur réorganisation à différentes échelles, afin de former leur propre identité. Clairement, nos agents ne sont pas énactifs. Nous tentons pour l'instant dans notre proposition, de préserver une des caractéristiques essentielles d'une approche énactive, telle que l'émergence de comportements collaboratifs, par le biais d'interactions entre agents, mais également d'interaction et de coordination avec un utilisateur. Cette notion de coordination est considérée par De Jaegher et Di Paolo (2007) comme moteur d'une cognition sociale énactive.

Du point de vue de l'usage, peut-on considérer que CoPeFoot propose une simulation énactive ? Une des limites évidentes de notre proposition repose sur la réduction des interactions motrices. Rappelons que selon (Noë, 2004 ; Lenay, 2002), la construction du sens se fait par le biais de l'acquisition d'invariants sensorimoteurs (Auvray et Fuchs, 2007). CoPeFoot n'offre pas une interaction corporelle forte (pas d'usage de retour d'effort ou d'immersion physique à l'échelle 1 par exemple). Toutefois, sans proposer une interaction incarnée, CoPeFoot présente des invariances qui peuvent faire sens et surtout qui évoluent au fil du temps par un couplage singulier utilisateur/système. Nous posons comme présupposé qu'à partir du moment où l'utilisateur « se sent immerger », il réagit « de façon incarnée » même s'il ne réalise que des actions triviales au joystick. Dans une expérimentation en sciences du sport, Zoudji *et al.* (2002) ont montré que des footballeurs experts, en situation de simulation et malgré des interactions triviales, modifiaient leur décision tactique (choix entre tirer, passer et dribbler) selon que la situation imposait à leur avatar de recevoir le ballon sur leur pied droit ou gauche (pied fort ou pied faible dans le réel). On peut donc penser que des simulations participatives peuvent se concentrer essentiellement sur l'aspect comportemental interactif des agents et minorer provisoirement les interactions motrices, tout en se ré-

clamant d'une « inspiration énactive ». Pour compenser l'absence d'interaction sensorimotrice, la possibilité d'adopter un point de vue égocentré (subjectif) est également un vecteur d'immersion intéressant (Ripoll *et al.*, 2004).

CONCLUSION

L'objectif de cette contribution était de montrer comment une approche pluridisciplinaire (sciences humaines et sciences informatiques) peut renouveler la conception de simulations participatives. Dans le domaine de la recherche en sport, on observe une évolution de la relation cognition – action, d'un modèle de la commande vers un modèle de l'autonomie. Ces évolutions peuvent aussi contribuer à renouveler les relations entre recherche, technologie et formation. Au CERV, la démarche de conception d'une simulation participative relève d'une co-construction. Entre la recherche en sciences humaines et la recherche en sciences informatiques, nous pouvons représenter deux systèmes clos, deux systèmes de pensée autonomes, mais en interaction. C'est ainsi, que nos propres représentations de la relation cognition – action se perturbent, s'adaptent et évoluent. Le développement du simulateur CoPeFoot est une première illustration de cette aventure au sein d'un contexte partagé.

BIBLIOGRAPHIE

- Aamodt, A. et Plaza, E. (1994). Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations and System Approaches. *Artificial Intelligence Communications*, 7(1), 39-59.
- Acquisti, A., Clancey, W. J., van Hoof, R., Scott, M. et Sierhuis, M. (2003). BRAHMS TUTORIAL, VÉRSION 1.0.
- Alessi, S. (2004). Five keys to successful simulations. In *Proceedings of the Third International Sport Sciences Days, The analysis of elite performance in its contextual environment* (pp. 141-143), Paris : INSEP.
- Ambroszkiewicz, S. et Komar, J. (2000). A Model of BDI-Agent in Game-Theoretic Framework, *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 1760, 8-19.
- Anderson, J. R. et Lebiere, C. (1998). The atomic components of thought. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates.
- Auvray, M. et Fuchs, P. (2007). Perception, immersion et interactions sensorimotrices en environnement virtuel. *Intellectica*, 45 (1), 23-35.
- Beer, R. et Gallagher, J. (1992). Evolving Dynamical Neural Networks for Adaptive Behavior, *Adaptive Behavior*, 1(1), 91-122.
- Bénard, R. et De Loor, P. (2007). Context-Based Decision-Making for Virtual Soccer Players. In *Proceedings of the international Conference on Context: Context' 07* (pp 2-15).
- Bénard, R., De Loor, P. et Tisseau, J. (2006). Understanding Dynamic Situations through Context Explanation. In *Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies: ICALT 2006* (pp. 1044-1046), Kerkrade, The Netherlands.
- Bideau, B., Kulpa, R., Ménardais, S., Fradet, L., Multon, F., Delamarche, P. et Arnaldi, B. (2003). Real Handball Goalkeeper vs. Virtual Handball Thrower. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 12(4), 411-421.

- Bénard, R. (2007). Raisonnement en contexte pour la simulation participative et l'étude des situations dynamiques collaboratives. Une application au sport collectif. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale.
- Bickhard, M. (1999). Interaction and representation, *Theory and representation*, 9, 435-458
- Bossard, C. (2008). L'activité décisionnelle en situation dynamique et collaborative. Application à la contre-attaque au football. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale.
- Bossard, C., Kermarrec, G., Buche, C. et Tisseau, J. (2008). Transfer of learning in virtual environments: A new challenge? *Virtual Reality*, 12, 151-161.
- Brault, S. Bideau, B., Kulpa, R., et Craig, C. (2009). How the global body displacement of a rugby player can be used to detect deceptive movement in 1vs 1. In S. Richir et A. Shirai (Eds), *Proceedings of the IEEE 11th Virtual Reality International Conference* (pp. 161-166), Laval.
- Brogni, A., Vinayagamoorthy, V., Steed, A. et Slater, M. (2007). Responses of Participants During an Immersive Virtual Environment Experience. *The International Journal of Virtual Reality*, 6, 1-10.
- Burkhardt, J. M. (2007). Immersion, représentation et coopération : discussion et perspectives de recherches empiriques pour l'ergonomie cognitive de la réalité virtuelle. *Intellectica*, 45(1), 59-87.
- Calmet, M. et Matet, P. (1992). Nouvelles technologies, nouveaux documents en formation : deux systèmes experts en judo. In *Actes du Premier Colloque International « Outils Informatiques : Applications au Sport et à l'Education Physique »* (pp. 26-27), Chatenay-Malabry, France.
- Deleplace, R. (1979). *Rugby de mouvement, rugby total*. Paris : Edition EPS.
- De Jaegher, H. et Di Paolo, E. (2007). Participatory Sense-Making. An Enactive Approach to Social Cognition, Phenomenology and the Cognitive Sciences, 6, 485-507.
- De Loor, P. (2006). Autonomisation des modèles pour les simulations participatives. *Habilitation à Diriger des Recherches*, Université Européenne de Bretagne.
- De Loor, P., Manac'h, K. et Tisseau, J. (2010). Enaction-Based Artificial Intelligence: Toward co-evolution with humans in the loop. *Minds and Machines*, à paraître.
- Denis, G. et Pizzinato, A. (1993). Formalisation des connaissances pour la simulation du service-retour en tennis : le système lift. *Mathématiques et Sciences Humaines*, 121, 5-21.
- Dubois, D. (1991). *Sémantique et Cognition. Catégories, prototypes, typicalité*. Paris : CNRS Editions.
- Ensor, J. R., Carraro, G. U. et Edmark, J. T. (2000). Accommodating performance limitations in distributed virtual reality systems. *Computer Communications*, 23 (3), 199-204.
- Filippeschi, A., Ruffaldi, E. et Frisoli, A. (2009). Dynamic models of team rowing for a virtual environment rowing training system. In S. Richir et A. Shirai (Eds), *Proceedings of the IEEE 11th Virtual Reality International Conference* (pp. 139-145). Laval.
- Flach, J. M. (1995). Situation awareness: proceed with caution. *Human Factors*, 37(1), 149-157.
- Froese, T. et Ziemke, T. (2009). Enactive artificial intelligence: Investigating the systemic organization of life and mind, *Artificial Intelligence*, 173, 466-500.

- Fuchs, P., Arnaldi, B., et Tisseau, J. (2003). La réalité virtuelle et ses applications. In P. Fuchs et G. Moreau (Eds), *Le traité de la réalité virtuelle, Volume 1* (pp 3-52). Paris : Les Presses de l'Ecole des Mines (2ème Edition).
- Grosgeorges, B., Dupuis, P. et Verez, B. (1991). Acquisition et analyse de déplacement en sports collectifs. *Science et Motricité*, 13, 27-38.
- Holland, J. H. et Reitman, J. S., (1978). Cognitive systems based on adaptive algorithms. In D.A. Waterman et F. Hayes-Roth (Eds), *Pattern-directed inference systems* (pp. 313-329), New York: Academic Press.
- Huffman, R. K. et Hubbard, M. (1996). A motion based virtual reality training simulator for bobsled drivers. In S. Haake (Ed), *The Engineering of Sport* (pp 195-203), Rotterdam: Balkema.
- Kelly, A. et Hubbard, M. (2000). Design and construction of a bobsled driver training simulator, *Sports Engineering*, 3(1):13-24.
- Klein, G. (2008). Naturalistic Decision Making, *Human Factors*, 50 (3), 456-460.
- Kokinov, B. (1995). A Dynamic Approach to Context Modeling, *IJCAI'95 Workshop on Modeling Context in Knowledge Representations and Reasoning*, IBP, LAFORIA 95/11, Paris.
- Kokinov, B. (1997). A Dynamic Theory of Implicit Context. In *Proceedings of the 2nd European Conference on Cognitive Science*, Manchester.
- Kozak, J. J., Hancock, P. A., Arthur, E. J. et Chrysler, S. T. (1993). Transfer of training from virtual reality. *Ergonomics*, 36(7), 777-784.
- Laird, J. E. et Duchi, J. C. (2000). Creating human-like synthetic characters with multiple skill levels: A case study using the Soar Quakebot. In *Proceedings of the AAAI 2000 Fall Symposium: Simulating Human Agents*.
- Le Hy, R. (2007). Programmation et apprentissage bayésien de comportements pour des personnages synthétiques, application aux personnages de jeux vidéo, Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble.
- Lenay, C. (2002). Ignorance et Suppléance : la question de l'espace. *Habilitation à diriger des recherches*, Université Technologique de Compiègne.
- Loyall, A. B. (1997). *Believable Agents: Building Interactive Personalities*, PhD Thesis, Carnegie Mellon University.
- McGee, K. (2005). Enactive cognitive science. Part 1: Background and research themes. *Constructivist Foundations*, 1(1), 19-34.
- McGee, K. (2006). Enactive cognitive science. Part 2: Methods, Insights, and Potential. *Constructivist Foundations*, 1(2), 73-82.
- Mac Mullin, B. (2004). Thirty Years of Computational Autopoiesis: A Review. *Artificial Life*, 10, 277-295.
- Mac Namee, B. (2004). Proactive Persistent Agents: Using Situational Intelligence to Create Support Characters in Character-Centric Computer Games. PhD thesis, University of Dublin.
- Maturana, H. (2007). The biological foundations of virtual realities and their implications for human existence. *Constructivist Foundations*, 3 (2), 109-114.
- Mester, J. (1999). Biological response to vibration load. In *Proceedings of the XVIIth congress of international society of Biomechanics* (pp. 32). Calgary: ISB.
- Metoyer, R. et Hodgins, J. (2000). Animating athletic motion planning by example. *Graphics Interface*, 61-68.
- Mille, A. (1999). Tutorial RàPC, état de l'art du raisonnement à partir de cas, Plateforme AFIA'99.

- Minsky, M. (1975). A framework for representing knowledge. In P.H. Winston (Ed), *The Psychology of Computer Vision* (pp 211-277). New York: McGraw-Hill.
- Noë, A. (2004). *Action in Perception*, Cambridge: MIT Press.
- Pan, Z., Ji, Q., Zhang, M., Li, Y. et Mei, L. (2006). Simulating pattern design and layout for group calisthenics and eurhythms. *Simulation & Gaming*, 37(4), 423-437.
- Parlebas, P. (1988). Analyse et modélisation du volley-ball de haute compétition : analyse des championnats du monde de 1986. *Science et Motricité*, 4, 3-22.
- Pfeifer, R. et Scheier, C. (1999). *Understanding intelligence*. Cambridge: MIT Press.
- Piegorsch, K. M., Watkins, K. W., Piegorsch, W. W., Reininger, B., Corwin, S. J. et Valois, R. F. (2006). Ergonomic decision-making: A conceptual framework for experienced practitioners from backgrounds in industrial engineering and physical therapy. *Applied Ergonomics*, 37, 587-598.
- Psotka, J. (1995). Immersive training systems: virtual reality and education and training, *Instructional Science*, 23 (5-6), 405-431.
- Ria, L., Leblanc, S., Serres, G. et Durand, M. (2006). Recherche et formation en « analyse des pratiques » : un exemple d'articulation. *Recherche et Formation*, 51, 43-56.
- Ripoll, H., Le Troter, A., Baratgin, J., Mavromatis, S., Faissolle, M., Zmilsony, F., Poplu, G., Petit, J. P. et Sequeira, J. (2004). The interest of simulation for research and training in sport: the example of football. In *Proceedings of the Third International Sport Sciences Days, The analysis of elite performance in its contextual environment* (pp. 147-148). Paris : INSEP.
- Rose, F. D., Atree, E. A., Perslow, D. M., Penn, P. R. et Ambihaipahan, N. (2000). Training in virtual environments: transfer to real world tasks and equivalence to real task training. *Ergonomics*, 43(4), 494-511.
- Sanza, C. (2001). Evolution d'Entités Virtuelles Coopératives par Système de Classificateurs. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier.
- Sanza, C., Panatier, C. et Duthen, Y. (1999). Adaptive behavior for cooperation: a virtual reality application. In *Proceedings of the 8th IEEE International Workshop on Robot and Human Interaction* (pp.76-81), Pise.
- Singer, B., Soubie, J. L. et Villepreux, P. (1994). Apports de l'intelligence pour l'acquisition et la représentation des connaissances en sports collectifs. Construction d'un système expert de prise de décision tactique en rugby. *Science et Motricité*, 21, 27-38.
- Tisseau, J. (2001). Réalité virtuelle : Autonomie in Virtuo, Habilitation à diriger des recherches, Université de Bretagne Occidentale.
- Todorov, E., Shadmehr, R. et Bizzi, E. (1997). Augmented feedback presented in a virtual environment accelerates learning of a difficult motor task. *Journal of Motor Behaviour*, 29(2), 147-158.
- Trajkovski, G. et Collins, S. G. (2006). Autochthony through self-organization: Interactivism and emergence in a virtual environment, *New Ideas in Psychology*, 24, 99-116.
- Turing, A. M. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind*, 59, 433-460.
- Urban, C. et Schmidt, B. (2001). Pecs-agent-based modelling of human behaviour. In *Emotional and Intelligent II - The Tangled Knot of Social Cognition*, AAAI Fall Symposium, AAAI Press.
- Varela, F. (1988). *Invitation aux sciences cognitives*. Paris : Editions du seuil.

- Walls, J., Bertrand, L., Gale, T. et Saunders, N. (1998). Assessment of upwind dinghy sailing performance using a virtual reality dinghy sailing simulator. *Journal of science and medicine in sport*, 1(2), 61-71.
- Wilson, S. W. (1994). ZCS: A zero level classifier system. *Evolutionary Computation*, 2 (1), 1-18.
- Ziane, R. (2004). Contribution à la formation des entraîneurs sportifs, caractérisation et représentation des actions de jeu : l'exemple du basket-ball. Thèse de doctorat, ENS Cachan.
- Zoudji, B., Debu, B. et Thon, B. (2002). Influence du type d'action et de la latéralisation sur la prise de décision chez les experts et novices en situation de jeu de football simulée. In D. Le Hénaff et C. Mathieu, *Expertise et Sport de Haut Niveau* (pp. 353-357). Paris : Cahier de l'INSEP.