



Décision dans les systèmes cyber-physiques et humains : application à l'élevage de précision

Eric Villeneuve, Christophe Merlo, Guillaume Terrasson, Audrey Abi Akle,
Dimitri Masson, Alvaro Llaría

► To cite this version:

Eric Villeneuve, Christophe Merlo, Guillaume Terrasson, Audrey Abi Akle, Dimitri Masson, et al..
Décision dans les systèmes cyber-physiques et humains : application à l'élevage de précision. CIGI
QUALITA 2019 - 13th International Conference CIGI QUALITA, Jun 2019, Montréal, Québec,
Canada. hal-02268577

HAL Id: hal-02268577

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02268577>

Submitted on 21 Aug 2019

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

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

Décision dans les systèmes cyber-physiques et humains : application à l'élevage de précision

ÉRIC VILLENEUVE¹, CHRISTOPHE MERLO², GUILLAUME TERRASSON¹, AUDREY ABI AKLE¹,
DIMITRI MASSON¹, ALVARO LLARIA¹

¹ UNIV. BORDEAUX, ESTIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

F-64210 Bidart, France

e.villeneuve@estia.fr, a.abiakle@estia.fr, d.masson@estia.fr, g.terrasson@estia.fr, a.llaria@estia.fr,

² UNIV. BORDEAUX, ESTIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, IMS, UMR 5218

F-64210 Bidart, France

c.merlo@estia.fr

Résumé – L'élevage de précision a pour objectif d'améliorer la productivité des exploitations agricoles et s'appuie sur un ensemble d'équipements technologiques qui produisent des données qu'il convient de collecter, stocker et analyser et qui concernent chaque animal et son environnement. Cette nouvelle façon de gérer une exploitation agricole constitue un domaine d'application privilégié pour les travaux de recherche sur les Cyber-Physical and Human Systems. La problématique explorée dans cet article part du constat que les éleveurs font face à une augmentation considérable de la quantité de données qu'ils doivent traiter. Il est alors nécessaire de mettre au point un système d'aide à la décision prenant en compte les données « temps réel » mais aussi la connaissance experte pour permettre aux éleveurs d'agir au mieux. Dans cette communication, nous mettons en évidence les défis spécifiques au développement d'un système d'aide à la décision pour le domaine de l'élevage de précision et nous présentons une méthodologie pour l'implémenter dans ce contexte.

Abstract - Precision livestock farming aims to improve the farm productivity and relies on a set of technological equipment producing data that must be collected, stored and analyzed and concern each animal and its environment. This new way of managing a farm is a prime area of application for research work on Cyber-Physical and Human Systems. The issue explored in this article is based on the observation that breeders face a considerable increase in the amount of data they must deal with. It is then necessary to develop a decision support system considering the "real time" data but also the expert knowledge to allow the farmers to act at best. In this work, we first highlight the specific challenges presented by the field of precision sheep farming to the development of a decision support system. We then introduce a methodology to implement decision support in this context.

Mots clés – Systèmes cyber-physiques et humains, Élevage de précision, Aide à la décision, Décision collective, Interopérabilité, Données hétérogènes.

Keywords – Cyber-physical and human systems, Precision livestock farming, Decision support system, Collective Decision, Interoperability, Heterogeneous data.

1 INTRODUCTION

Depuis quelques années, les systèmes cyber-physiques (Cyber-Physical Systems – CPS) font l'objet de nombreux travaux de recherches. Ils ont récemment été caractérisés comme des systèmes combinant des sous-systèmes physiques et non physiques, certains soutenant des activités de contrôle et de coordination [Rajkumar, 2012 ; Lee, 2008 ; Zheng et al., 2016]. Un CPS intègre généralement des composants mécaniques et électroniques et des systèmes embarqués et intègrent des fonctionnalités de transmission et/ou de stockage des données. De plus, l'évolution des travaux de recherche tend vers l'interaction de plus en plus importante entre l'Humain (utilisateur) et les CPS [Baheti et Gill, 2011]. Cette tendance a conduit à la définition de la notion de systèmes cyber-physiques et humains (Cyber-Physical and Human Systems – CPHS) où l'Humain est considéré comme faisant partie intégrante du

système (à la fois comme utilisateur mais aussi comme source de données et/ou comme actionneur).

L'agriculture de précision se développe énormément de nos jours et constitue un domaine d'application privilégié pour les travaux sur les CPHS. Cette nouvelle façon de gérer une exploitation agricole, s'appuie, en effet, sur l'utilisation de capteurs, de réseaux de communication, de robots et de systèmes informatiques pour améliorer la productivité des exploitations agricoles. Dans ce contexte, l'élevage de précision s'appuie sur un ensemble d'équipements technologiques qui produisent des données qu'il convient de collecter, stocker et analyser et qui concernent chaque animal et son environnement (c'est-à-dire l'exploitation agricole). La mise en œuvre de l'élevage de précision fournit ainsi des données venant supporter l'aide à la décision. L'éleveur fournissant le travail et exploitant les données, une exploitation agricole appliquant l'élevage de

précision peut ainsi être considérée comme un CPHS selon la définition précédemment énoncée.

Dans une démarche globale visant à améliorer la conception des CPHS, nous nous intéressons à l'aide à la décision dans ce cadre technologique. La suite de cet article s'articule donc en cinq parties. La section suivante approfondit la notion d'élevage de précision (dans le cas particulier de l'élevage ovin de précision), et le besoin d'un système d'aide à la décision dans ce contexte. La section 3 détaille les contraintes liées à la gestion des données hétérogènes et imparfaites pour la conception d'un système d'aide à la décision. La section 4 s'intéresse à l'intégration de l'Humain dans le système en tant que décideur (dans un contexte collectif) mais aussi en tant qu'utilisateur via les interfaces homme-machine. La section 5 décrit la méthodologie d'aide à la décision proposée pour tenir compte de l'ensemble des contraintes identifiées précédemment et la dernière section conclut cet article et offre quelques perspectives aux travaux engagés.

2 ÉLEVAGE OVIN DE PRÉCISION

L'élevage ovin de précision connaît aujourd'hui une croissance importante car la filière ovine doit faire face à une situation paradoxale : elle voit la taille des cheptels nationaux et le nombre d'exploitations baisser alors que les tailles de troupeaux augmentent¹. À titre d'exemple, en France, il y a eu une perte de 54000 exploitations entre 2000 et 2016 et le nombre de moutons a baissé de près de 30% depuis 1996². La filière a donc réagi par le lancement de différents programmes aux niveaux national et européen ayant pour objectif de produire plus et mieux, avec moins d'intrants (autonomie alimentaire, réduction des intrants médicamenteux et phytosanitaires) et dans une approche agroécologique qui vise la triple performance économique, environnementale et sociale. Un des effets attendus réside dans l'augmentation des revenus des éleveurs tout en améliorant leurs conditions de travail et l'attractivité du métier. L'élevage de précision apparaît donc, dans ce contexte, comme une solution afin de rendre possible cette évolution en fournissant des outils à l'éleveur pour mieux gérer son exploitation et améliorer sa productivité.

L'introduction de l'élevage de précision impacte profondément les méthodes de travail des éleveurs [Houstiou et al., 2017] en leur fournissant de nouvelles informations – souvent en quantité importante – sur l'état de santé, le bien-être et les besoins nutritionnels des animaux afin de préserver et d'améliorer les performances techniques, environnementales et économiques des exploitations fermières [Pannell, 1999].

Aujourd'hui, l'identification des animaux, en utilisant le marquage de chaque individu d'un troupeau par radio-identification (Radio Frequency Identification – RFID), est l'application de l'élevage de précision la plus utilisée [Bocquier et al., 2014]. Cette technologie permet non seulement aux éleveurs l'identification de leurs animaux mais aussi de garantir

leur traçabilité dans la chaîne agroalimentaire et de gérer individuellement l'alimentation et la production laitière de chaque animal.

La technologie de positionnement par satellites, souvent désignée sous le sigle GNSS pour Global Navigation Satellite System, est également appliquée à l'élevage de précision. Dans [Brown et al., 2013] et [Llaria et al., 2015], cette technologie est utilisée pour localiser les animaux, porteurs de colliers GNSS et composants le troupeau, dans le but de proposer des solutions de clôtures virtuelles. Ces solutions sont exploitées par les éleveurs afin de superviser à distance, via un système d'information géographique (Geographic Information System – GIS), leur troupeau, notamment lors des périodes d'estive, mais aussi pour mieux gérer les ressources des zones pastorales.

Combinés à des algorithmes plus ou moins sophistiqués, des capteurs inertiels, intégrés dans ces mêmes colliers (par exemple un accéléromètre) laissent envisager la possibilité de connaître les activités journalières d'un animal. Dans [Terrasson et al., 2016], l'accéléromètre est utilisé pour déterminer si l'animal porteur du collier est en mouvement ou non alors que dans [Collins et al., 2015], les données issues de ce même type de capteur sont utilisées pour différencier de nombreux comportements (marche, repos, course...). Ces comportements peuvent ensuite être mis en relation avec la santé ou le bien-être des animaux pour détecter des maladies ou la présence d'un prédateur à proximité du troupeau. D'autres technologies plus intrusives peuvent être utilisées pour détecter la mise-bas ou superviser la santé des animaux [Bocquier et al., 2014].

Comme le démontrent les exemples précédents, la démocratisation de l'agriculture de précision impacte le secteur agricole qui connaît aujourd'hui une tendance similaire à celle du monde industriel dans les années 90. Ce secteur est confronté à des problèmes concernant la capitalisation et l'exploitation des connaissances générées par les outils de l'élevage de précision, outils qui peuvent être assimilés à ceux induits par l'arrivée des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) dans l'Industrie. La quantité de données collectées et la diversité des sources d'information rendent très complexes la compréhension et le contrôle du système par des opérateurs humains tels que les éleveurs.

Dans le cadre de l'élevage ovin de précision, les données collectées doivent aider l'éleveur à prendre des décisions concernant notamment la détection précoce de brebis malades, la limitation de l'usage des antibiotiques (pour améliorer la qualité de la viande ou du lait), la productivité de son exploitation et l'optimisation de sa charge de travail (physique ou cognitive) tout en tenant compte du bien-être du bétail. L'exploitation de l'ensemble des données collectées nécessite donc des outils pour formaliser, interpréter et aider les utilisateurs (éleveurs, vétérinaires...) à prendre les décisions appropriées. Dans cette optique, la mise en œuvre de l'aide à la décision se confronte à de nombreux défis tels que l'hétérogénéité ou la fiabilité des données collectées. En effet, les données utiles ne proviennent pas uniquement des capteurs mais également des systèmes d'information existants ou des experts (vétérinaires, éthologues...). La conception d'un système d'aide à la décision doit aussi prendre en considération la capacité de chaque source de données et de chaque système d'information, qui composent la solution technologique mise en œuvre pour implémenter

¹ Selon le ministère français de l'agriculture et de l'alimentation : <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/conjsynt270201506ov.in.pdf>

² Chiffres-clés de la filière ovine française (2018) – Programme Inn'Ovin : <http://www.inn-ovin.fr/wp-content/uploads/2018/10/2018-Chiffres-cles-ovins-par-page-v.pdf>

l'élevage de précision, à être interopérable tout en considérant les besoins des utilisateurs finaux.

3 GESTION DES DONNÉES HÉTÉROGÈNES ET IMPARFAITES

La section précédente met en évidence les bénéfices attendus de l'élevage de précision. Cependant, ce type de système complexe, comme n'importe quel CPHS, implique de considérer de nombreuses technologies différentes et leur intégration dans une application commune en tenant compte de l'utilisabilité de la solution finale. Cette section décrit les aspects liés à la multidisciplinarité nécessaire à la conception d'un tel système ainsi que les contraintes liées à l'interopérabilité des différentes solutions technologiques choisies. Pour finir, du fait de la diversité des sources d'informations qu'offre les CPHS, la problématique de l'imperfection des données est détaillée.

3.1 Une problématique multidisciplinaire

Les produits destinés à l'élevage de précision, comme illustrés précédemment, sont basés sur les Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) telles que des capteurs, des systèmes d'informations, des algorithmes d'aide à la décision et des Interfaces Homme-Machine (IHM). Le passage d'une exploitation agricole à l'élevage de précision implique donc :

- la conception et l'intégration de systèmes physiques pour mesurer l'activité (capteurs), stocker et traiter l'information (ordinateurs, serveurs) et parfois, agir (automates, robots) ;
- la conception et l'intégration de systèmes digitaux (cyber) pour stocker les données, extraire la connaissance et prendre automatiquement ou aider l'utilisateur à prendre des décisions ;
- la définition d'une organisation pour gérer les ressources (humaines et matérielles), communiquer avec les parties prenantes et piloter le système.

Ce couplage technologique a pour but d'offrir de nouveaux services aux éleveurs afin de les aider dans leur processus de prise de décision en améliorant la gestion quotidienne de leurs activités et la conduite de leurs troupeaux.

Malgré toutes les possibilités offertes par l'utilisation de ces nouvelles technologies, il faut prendre en considération le fait que l'évolution des pratiques des éleveurs s'accompagne d'un changement de leurs besoins. Cet aspect renvoie à un problème plus vaste : quels sont les besoins des utilisateurs ? Quel est l'impact de la technologie sur les tâches quotidiennes de l'éleveur ? Un éleveur ne peut être forcé à utiliser un système qui implique plus de contraintes dans son travail qu'il n'y en avait avant l'installation du système et sans que les avantages soient évidents. C'est le système qui doit être adapté à l'utilisateur, pas l'inverse. Identifier les besoins des utilisateurs est inhérent aux développements technologiques. L'une des raisons de cette importance est que si le système ne répond pas à un besoin, il ne sera pas utilisé par l'utilisateur [Banhazi et al., 2012]. En outre, de nombreux autres aspects importants doivent être pris en compte : être éleveur dans un pays A n'est pas la même chose qu'être éleveur dans un pays B ou les besoins des jeunes agriculteurs sont différents de ceux très expérimentés. De plus, l'éleveur n'est pas le seul utilisateur : les animaux doivent également être pris en compte. Les comportements des brebis diffèrent d'un animal à l'autre. Tous ces aspects conduisent à définir de nombreuses situations de travail différentes [Pilnière et

Merlo, 2011]. Enfin, il ne faut pas oublier que le secteur agricole est en évolution constante. Il est donc nécessaire de réfléchir aux changements futurs et le système technologique pourrait prendre en compte ces changements, créant ainsi un cercle vertueux. Pour effectuer un changement, il est essentiel d'identifier les utilisateurs dès les premières phases du projet et de les intégrer au processus de développement.

L'étude d'un système complexe, comme le sont les CPHS (et donc une exploitation agricole appliquant l'élevage ovin de précision), implique de considérer une large diversité de technologies, une organisation particulière coordonnant un nombre important de parties prenantes (technologiques, humaines ou organisationnelles) et la prise en compte de l'humain dans le fonctionnement du système. La problématique de l'aide à la décision pour l'élevage ovin de précision est donc au croisement de plusieurs domaines scientifiques (électronique, informatique, écologie, agronomie, ergonomie, sociologie...) et l'Humain ne doit pas être négligé lors de la conception du système mais être considéré comme une partie importante du CPHS [Terrasson et al., 2017].

3.2 Interopérabilité

L'interopérabilité est généralement décrite comme la capacité de deux systèmes (ou plus) à échanger de l'information et à atteindre réciproquement leurs fonctionnalités [Bourey et al., 2007]. Dans le cadre de la conception d'un CPHS, la diversité des technologies utilisées et les nombreux systèmes d'information permettant de stocker les données générées rendent cette notion d'interopérabilité incontournable pour parvenir à un CPHS fonctionnel.

Il existe trois approches permettant d'éviter les problèmes d'incompatibilité entre systèmes, qui sont la principale cause de non-interopérabilité :

- Les « approches intégrées » sont basées sur la définition d'un format partagé pour tous les modèles et correspondent à l'implémentation d'interfaces dédiées entre un système et le format partagé.
- Les « approches unifiées » s'appuient sur la caractérisation d'un métamodèle partagé pour la cartographie des concepts basée sur un point de vue sémantique. Un moyen de définir un métamodèle est d'utiliser des ontologies de concepts.
- Les « approches fédérées » sont généralement plus compliquées à implémenter et permettent aux systèmes de s'adapter dynamiquement pour recevoir les données d'autres systèmes. Une ontologie [Wache et al., 2001] est utilisée pour structurer la connaissance du domaine de travail puis pour gérer une cartographie dynamique entre les concepts des différents systèmes.

Plusieurs ontologies pour l'agriculture existent dans la littérature avec des domaines de connaissances dédiés comme Agrovoc [Soerge et al., 2004] ou AgOnt [Hu et al., 2011] – spécialement conçues pour les objets connectés dans l'agriculture. Ces travaux mettent en évidence une problématique globale récurrente lors de l'introduction d'objets connectés et de savoir humain dans des applications à base de connaissances pour l'agriculture, à savoir l'interopérabilité des différents systèmes en jeu. Dans le cadre de l'approche intégrée, il faut développer autant d'interfaces de communication que de systèmes, et veiller aux synchronisations éventuelles entre certains de ces systèmes. La production

d'ontologies, notamment dans le cadre de l'approche unifiée, auprès de chacun des systèmes principaux permet de faciliter ce travail en procédant à l'alignement de ces ontologies puis en intégrant les résultats de ces alignements par configuration plutôt que par développement lors de l'ajout de nouveaux systèmes. L'approche fédérée, plus complexe, est intéressante lorsque de nombreux acteurs (éditeurs, producteurs d'objets connectés par exemple) interviennent au sein d'un environnement complexe d'objets connectés et de systèmes. Dans les travaux que nous poursuivons, il s'agit en premier lieu de construire une solution à base de connaissances et de l'expérimenter pour en démontrer l'intérêt, l'approche intégrée suffit généralement dans cette première phase. L'extension de nos travaux s'orientera dans une seconde phase vers la construction d'ontologie afin de permettre un déploiement limité et l'introduction de nouveaux objets connectés.

Une seconde problématique qu'il est nécessaire de traiter réside dans la prise en compte des différents aspects de l'interopérabilité (données, service, processus et métier) ainsi que les différents niveaux de problèmes d'incompatibilité (conceptuel, technologique et organisationnel). La problématique de l'interopérabilité est réputée comme ne pouvant pas être résolue uniquement par l'angle technique vu précédemment (c'est-à-dire par la gestion des problèmes technologiques et conceptuels). En nous basant sur une approche d'ingénierie dirigée par les modèles, définie par l'Object Management Group [Object Management Group, 2003], nous nous appuyons sur l'étude des Architectures Dirigées par les Modèles (Model Driven Architecture® - MDA) destinée à étudier les problèmes d'interopérabilité. Ainsi nous considérons la modélisation multi-niveau [Merlo et al., 2014] suivante pour formaliser ce problème de l'interopérabilité :

- Un niveau « métier » afin de caractériser les différentes parties prenantes (humaines et technologiques) du système étudié, leurs rôles, leurs relations, leurs processus métier et les décisions qu'elles prennent.
- Un niveau « système d'information » dédié à l'identification des données, informations et connaissances et aux flux d'informations entre les parties prenantes (en incluant les outils numériques) afin de caractériser les collaborations et les échanges entre les parties prenantes. C'est la description fonctionnelle de l'ensemble de la plateforme numérique.
- Un niveau « technologique » qui permet de prendre en considération les contraintes techniques pour spécifier et implémenter la plateforme numérique intégrant le système d'aide à la décision.

Au niveau « métier » ce n'est pas seulement l'agriculteur en tant que futur utilisateur qui est concerné, mais bien l'ensemble des acteurs participant à la production de connaissances. La façon dont ces acteurs travaillent ensemble dans le cadre de processus collaboratifs doit permettre d'anticiper sur les futurs processus métiers une fois les systèmes, que nous étudions, opérationnels. Il s'agit d'une étape nécessaire s'intégrant dans une démarche d'accompagnement à ces acteurs.

D'autre part, au niveau « système d'information », ce sont l'ensemble des fournisseurs d'objets connectés et de systèmes informatiques qui doivent être considérés afin prendre en compte les médias de communication adéquats avec le système à base de

connaissances que nous étudions et de concevoir une architecture fonctionnelle.

Par conséquent, les solutions techniques du système d'aide à la décision doivent être définies en accord avec les modèles organisationnels [Baïna, 2006] à partir des niveaux « métier » et « système d'information ».

3.3 Données imparfaites

La gestion des connaissances est un facteur critique pour n'importe quel système d'aide à la décision. En effet, la notion de choix, qui est centrale en aide à la décision, implique de maîtriser et de comprendre la connaissance permettant de caractériser le problème étudié, notamment en ce qui concerne son contexte, les alternatives possibles et les indicateurs (ou critères de décision) qu'il faut optimiser. Le concept de connaissance peut être perçu sur trois niveaux :

- La connaissance concernant les objets, les concepts et les différentes entités qui constituent le problème étudié. Dans notre cas, ce niveau comprend, entre autres, les éleveurs, leur bétail et les différentes caractéristiques physiologiques observables ;
- La connaissance issue de l'observation du système, c'est-à-dire les événements, les changements d'état et les interactions entre les différents objets qui composent le problème. Dans notre cas, ce niveau inclut l'évolution des caractéristiques physiologiques observées grâce à des capteurs, des bases de données (sur la production de lait ou les naissances dans le troupeau) ou l'observation du comportement des animaux par l'éleveur ;
- Le savoir-faire sur le système résultant d'une perspective humaine plus large sur le fonctionnement de système(s) similaire(s) au problème étudié. Dans notre cas, ce niveau s'intéresse, par exemple, à l'expertise de l'éleveur ou du vétérinaire.

La modélisation de la connaissance – c'est-à-dire sa représentation dans un cadre formel permettant la mise en œuvre de mécanismes de raisonnement – est une étape critique dans la construction d'un système d'aide à la décision.

Le passage de la donnée brute ou de l'opinion experte à la connaissance formalisée nécessite de considérer l'imperfection de l'information disponible. Selon [Dubois et Prade, 2009], il est possible de distinguer quatre grandes catégories d'imperfections :

- L'incomplétude qui caractérise l'impossibilité pour la source de fournir une information sur l'ensemble ou une partie d'un phénomène. L'imprécision est une forme d'incomplétude car il manque une partie de l'information permettant d'améliorer la précision. Dans le cadre du déploiement d'une solution de clôture virtuelle sur surfaces pastorales, équiper l'ensemble des animaux d'un troupeau avec un collier GPS est souvent peu envisageable du fait des coûts engendrés. D'autres solutions sont utilisées comme l'équipement des animaux leaders du troupeau afin d'avoir une vision la plus complète possible de la localisation d'un troupeau. De ce fait, les données concernant chaque individu ne sont pas collectées rendant l'information incomplète.
- L'incertitude caractérise la mesure d'un degré de conformité d'une information par rapport à la réalité d'un phénomène. Il

existe deux sortes d'incertitudes : aléatoire (variabilité d'une entité dans une population et conséquence du hasard – par exemple la température corporelle d'un mouton est comprise entre 38,5°C et 39,5°C) et épistémique (qui caractérise le manque de connaissance et donc qui est liée à la notion d'incomplétude – par exemple le vétérinaire n'est pas capable d'identifier la maladie par simple observation de l'animal).

- L'ambiguïté caractérise le fait qu'une information peut avoir plusieurs interprétations (par exemple, l'augmentation du rythme cardiaque d'une brebis à cause de la peur d'un prédateur ou du cycle de reproduction). Elle peut être levée par une meilleure modélisation du problème (mise en relation de variables par exemple).
- La granularité qui caractérise la difficulté à distinguer deux valeurs très proches en fonction du moyen d'observation du phénomène. Dans le cas d'un système de clôture virtuelle comme celui présenté dans [Llaria et al., 2015], la précision de mesure obtenue avec un module GPS dépasse très souvent la dizaine de mètres. Cela peut causer des problèmes d'interprétation lorsque le système d'information doit exploiter ces données pour statuer sur le fait que l'animal porteur du GPS est à l'intérieur ou à l'extérieur de la zone délimitée par la clôture virtuelle. Ce type d'imperfection s'apparente à la notion d'imprécision et donc d'incomplétude.

Le formalisme de représentation et la modélisation décisionnelle du système doivent donc présenter une forme de résilience à l'imperfection de l'information en permettant une représentation explicite de cette imperfection. La notion d'incertitude est particulièrement critique dans cette réflexion car le formalisme doit prendre en compte l'incertitude inhérente à la connaissance humaine et le besoin de raisonner à partir de cette connaissance au moyen d'un système informatique. Il est donc nécessaire, à ce niveau, de considérer plusieurs problèmes relatifs à la modélisation de l'incertitude des données technologiques (fiabilité des données transmises ou stockées, défaillances ou erreurs de capteurs...) et des données humaines (confiance dans l'expert, confiance de l'expert dans son évaluation, modélisation de l'intuition humaine...).

D'autre part, le caractère hétérogène des sources d'information impose que le formalisme de représentation de la connaissance choisi permette la prise en considération de cette hétérogénéité (capteurs, systèmes d'information, outils métier ou expertise humaine). De plus, il doit également permettre la définition de mécanismes de fusion qui seront utilisés pour hybrider la connaissance provenant de sources technologiques (bases de données, capteurs...) et humaines (vétérinaires, éleveurs...). La notion de conflit [Smets, 2005] est une contrainte qu'il est nécessaire d'intégrer lors de cette opération de fusion. En effet, il est fréquent dans les problèmes de décision multi-experts ou dans les systèmes complexes avec de nombreux capteurs que plusieurs sources aient des interprétations différentes d'un même phénomène. Le formalisme doit permettre de représenter ce conflit pour qu'il soit pris en compte dans les mécanismes d'aide à la décision.

Par conséquent, le formalisme de représentation de la connaissance choisi doit être identifié ou développé en fonction des besoins des utilisateurs, des caractéristiques des données collectées et des contraintes d'interopérabilité. Les méthodes

probabilistes, la théorie des possibilités et les théories évidentiels sont des solutions possibles, tout comme l'ensemble des combinaisons de ces différentes approches [Dubois et Prade, 2009].

4 L'UTILISATEUR DANS LA DÉCISION COLLECTIVE

Comme évoqué précédemment, il est impératif de considérer les besoins de l'utilisateur dans la conception du CPHS. De plus, l'Humain doit également être pris en compte en tant que décideur mais aussi en tant qu'expert sur le système (et donc en tant que source de connaissance). Pour finir, la complexité des CPHS implique qu'il y a plusieurs Humains interagissant avec le système à différents niveaux du processus décisionnel. Dans cette section, nous nous intéressons à la notion de décision collective (c'est-à-dire impliquant plusieurs Humains) et à l'interaction entre ces utilisateurs et le système au travers des Interfaces Homme-Machine (IHM).

4.1 Décision collective

Dans le contexte de l'élevage de précision, nous définissons les éleveurs comme des décideurs, car ils peuvent être considérés comme des experts dans leur domaine, dirigeant leurs exploitations et leurs productions, suivant les indicateurs de risques et gérant les données utiles à leur activité de pilotage.

Dans ce cadre, nous allons définir notre cas d'étude se rapportant à une approche basée sur la prise de décision multicritères qui se caractérise par la prise en compte de variables décisionnelles nombreuses et variées généralement en conflit [Zanakis et al., 1998]. Les décisions prises par l'éleveur sont, plus particulièrement, relatives au domaine de la prise de décision multi-attributs, c'est-à-dire basée sur un nombre discret et généralement limité d'alternatives prédéfinies qui nécessitent des comparaisons inter- et intra-attributs pour que le décideur puisse réaliser un compromis [Yoon et Hwang, 1995].

Ce type de modèle décisionnel implique, pour le décideur, l'exploration d'un « ensemble universel », c'est-à-dire l'ensemble des critères et des alternatives. Ce type de processus de prise de décision a fait l'objet d'une synthèse de la littérature par [Miller et al., 2013] qui met en évidence les caractéristiques des décideurs :

- Les décideurs sont adaptables ;
- Les choix des décideurs sont basés sur leur conscience ;
- Les décideurs sont soumis à des inversions de préférences contextuelles ;
- Les préférences des décideurs peuvent être vues comme des processus stochastiques.

Le premier point met en évidence l'aspect itératif de ce type de décision tandis que le second se concentre sur la conscience du décideur (parfois appelée « conscience situationnelle »), relative à la notion de « décision informée » [Abi Akle et al., 2017b]. Les troisième et quatrième points permettent d'introduire la complexité de la prise de décision en fonction des préférences du décideur. En effet, en plus de considérer la dimension stochastique, les préférences du décideur doivent généralement être gérées dans un contexte de décision collective.

Cette notion de décision dans un contexte collectif peut être perçue selon trois modalités différentes : la codécision, la

décision coopérative ou la décision collaborative. Dans [Seguy et al., 2010], les auteurs définissent :

- La codécision comme étant le résultat de l'implication de plusieurs acteurs avec des ressources partagées et où chaque acteur est impliqué dans la prise d'une décision conjointe,
- La décision coopérative comme étant une simple juxtaposition d'activités individuelles et sporadiques des acteurs sans partage d'un objectif commun,
- La décision collaborative comme étant le résultat d'une production et d'objectifs communs où chaque acteur réalise une partie du travail avec des ressources, des bénéfices et des risques partagés.

Cependant, nous postulons que le partage d'informations ne suffit pas mais qu'il est nécessaire de comprendre ces informations. D'après [Karacapilidis et Papadias, 2001], la prise de décision collaborative est un processus argumentatif où chaque acteur doit prendre en compte les autres pour comprendre les contraintes et les solutions du problème tout en considérant les intérêts et les priorités de chacun. Ce point de vue est nuancé dans [Jankovic et al., 2007] en ajoutant une dimension liée au risque de conflit. En effet, les auteurs définissent la décision collaborative comme une activité où chaque acteur, impliqué dans le processus de prise de décision, a des objectifs différents et souvent conflictuels avec les autres.

Nous positionnons notre cas d'étude comme étant une situation de codécision ou de décision collaborative – par exemple les objectifs des éleveurs et des vétérinaires peuvent parfois être commun ou en conflit. Cette situation variable implique donc que le système d'aide à la décision soit conçu de manière à être flexible et adaptable.

4.2 Usages et utilisateurs

Les Interfaces Homme-Machine (IHM) et, plus précisément, les supports graphiques pour la décision font partie des outils permettant d'atteindre la flexibilité et l'adaptabilité, énoncées précédemment, durant les différentes phases du processus de prise de décision pour l'utilisateur. Ce processus comprend trois grandes phases nommées : (i) *Conscience situationnelle*, (ii) *Alerte* et (iii) *Stratégie*.

Il est nécessaire pour l'utilisateur d'acquérir une « *Conscience situationnelle* », notamment par l'observation des interactions entre les variables décisionnelles [Ireson, 2009]. Dans cette phase du processus de prise de décision, les utilisateurs doivent être en mesure de détecter des informations pertinentes afin d'avoir une connaissance de la situation et, par conséquent, le support IHM doit leur offrir une vue d'ensemble des données qui constituent un vecteur de décision.

La seconde phase du processus décisionnel, appelée « *Alerte* », est destinée à focaliser l'attention de l'utilisateur sur un point particulier. À ce stade, les décideurs approfondissent leur exploration du jeu de données pour obtenir plus de détails. C'est à eux d'identifier les spécificités et donc de pouvoir se concentrer sur un point particulier. L'IHM doit donc permettre aux décideurs d'analyser un jeu de données restreint pour analyser la sensibilité des variables décisionnelles. Généralement c'est durant cette phase que le décideur procède à des comparaisons entre les différentes alternatives en tenant compte de chaque critère de décision l'un après l'autre. Le système

d'aide à la décision doit permettre la mise en œuvre de cette étape de focalisation.

Pour finir, la dernière phase, appelée « *Stratégie* » - également nommée « sélection » ou « choix » en ingénierie de la décision – est critique car c'est là que les décideurs font des compromis. Nous parlons ici de stratégie car il est nécessaire de sélectionner une alternative parmi l'ensemble des alternatives concurrentes. L'alternative choisie doit respecter les contraintes liées au problème et satisfaire les préférences des décideurs. Par conséquent, l'IHM doit permettre à l'utilisateur de comparer conjointement tous les critères de décision pour toutes les alternatives admissibles à ce stade (dans la phase précédente, cette comparaison est faite pour chaque critère indépendamment des autres) [Abi Akle et al., 2017a].

Si les éleveurs peuvent être considérés comme des experts en termes de décision dans le contexte de l'élevage de précision, il est peu probable qu'ils soient des utilisateurs experts en ce qui concerne le système d'aide à la décision. Par conséquent, la conception de l'IHM d'un tel système doit tenir compte de cet état de fait. En effet, la conception de l'IHM est cruciale pour le développement du système d'aide à la décision car c'est elle qui va conditionner son acceptabilité par les utilisateurs. L'utilisation de la plateforme numérique aura également un impact sur la collecte des observations des éleveurs qui seront intégrées au système d'aide à la décision. Par conséquent, la conception de ce système doit s'appuyer sur les meilleures pratiques d'ingénierie relative aux IHM [Vredenburg et al., 2002].

5 MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE

La méthodologie proposée dans cette section a pour objectif de permettre la mise en œuvre d'un système d'aide à la décision permettant d'outiller le processus décisionnel dédié à la gestion d'un CPHS. Cette méthodologie est illustrée ici au travers de l'exemple d'une exploitation agricole spécialisée dans l'élevage ovin de précision mais peut être transposé à toutes sortes de CPHS en adaptant les sources d'informations en fonction du système étudié et les mécanismes d'aide à la décision aux décisions à prendre. Cette section décrit la collecte et de la capitalisation des données avant de détailler le fonctionnement du système d'aide à la décision.

5.1 Collecte et capitalisation des données

La section 4.2 présente un processus de prise de décision en trois phases (conscience situationnelle, alerte et stratégie) qui permet au décideur d'évoluer à partir d'observations élémentaires vers une décision comprise et maîtrisée. Cette évolution est rendue possible par les flux de données présentés dans la Figure 1.

Les parties prenantes identifiées comme sources de données du système d'aide à la décision (en bleu dans la Figure 1) sont les ovins, en tant qu'entités individuelles ou en tant que troupeau, les éleveurs, les vétérinaires et l'ensemble des experts avec des connaissances pertinentes relatives à l'élevage ovin (associations professionnelles, instituts de recherche, organismes de certification...).

Les éléments dédiés à l'acquisition des données qui alimentent le processus décisionnel (en orange dans la Figure 1) peuvent être divisés en trois groupes :

- Les capteurs, placés sur les ovins ou dans leur environnement, qui capturent le comportement du système,

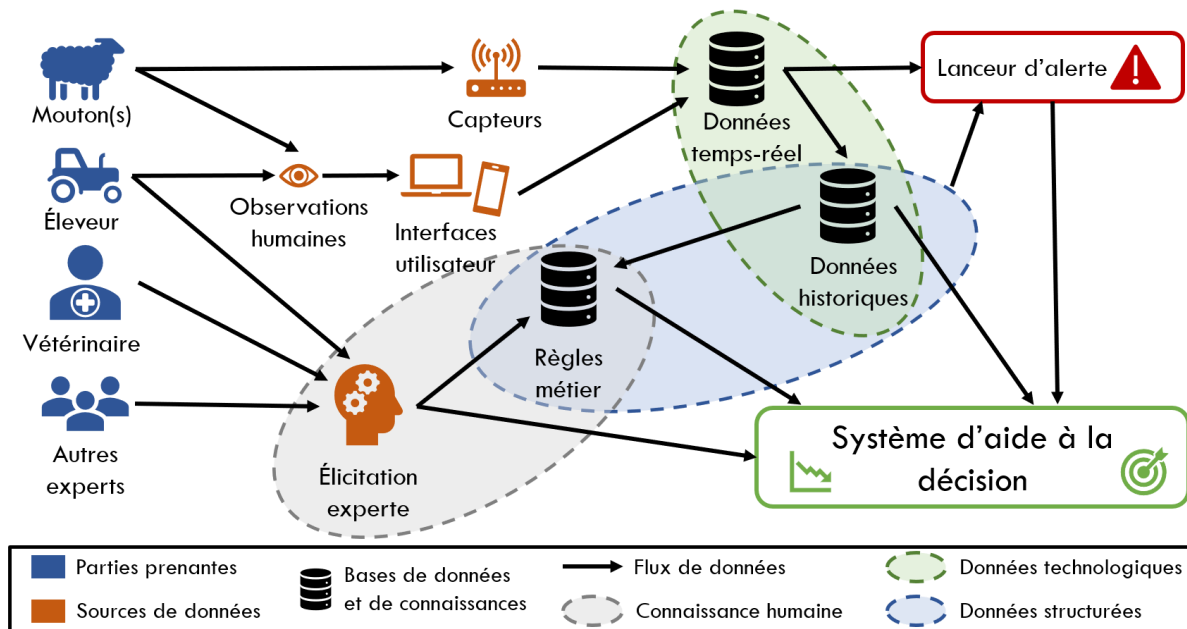


Figure 1. Flux de données du système d'aide à la décision

- Les interfaces utilisateur (IHM) qui permettent à l'éleveur de renseigner leurs observations sur l'évolution du système,
- Les mécanismes d'élicitation qui extraient la connaissance à partir de l'analyse du système par des experts.

Les données et les connaissances générées par ces éléments sont stockées dans plusieurs bases de données (ou de connaissances) et peuvent être divisées en trois grandes catégories :

- Les données dites « technologiques », générées par les capteurs (par exemple le rythme cardiaque, la température corporelle...) ou par l'éleveur (par exemple l'état apparent d'un animal), sont tout d'abord stockées dans une base de données « temps-réel ». Puis, grâce à un moteur de retour d'expérience (non représenté dans la Figure 1), ces données sont structurées et synthétisées dans une base de données « historiques » (par exemple le rythme cardiaque moyen du troupeau ou la courbe de température sur le dernier mois).
- La connaissance experte (c'est-à-dire humaine), issue de l'élicitation des avis d'expert, est utilisée directement dans le processus d'aide à la décision et combinée avec les données historiques dans le moteur de retour d'expérience, afin de construire des règles métiers (par exemple du type : SI l'animal semble faible ET sa température est supérieure à 40°C ALORS il faut appeler un vétérinaire) qui sont également utilisées dans le système d'aide à la décision.
- Les données dites « structurées » sont les règles produites par le moteur de retour d'expérience à partir des données « historiques » et la connaissance « experte ». Ces règles sont ensuite utilisées dans le système d'aide à la décision.

5.2 Fonctionnement du système d'aide à la décision

Pour aider l'utilisateur à évoluer dans les trois phases du processus décisionnel présenté dans la section 4.2 (conscience situationnelle, alerte et stratégie), deux mécanismes d'intelligence artificielle sont mis en œuvre au travers de 3 étapes :

1. Le mécanisme lanceur d'alerte compare les données en temps réel avec les bases de connaissances (données structurées) et déclenche une alerte quand une anomalie est détectée pour avertir l'utilisateur d'un problème potentiel sur un animal (maladie, vêlage...) ou sur le troupeau (prédateur...). Ce mécanisme est donc destiné à outiller la seconde phase du processus décisionnel décrit dans la section 4.2.
2. L'utilisateur analyse le problème ou consulte un spécialiste pour ajouter de la connaissance experte dans le système.
3. Le système d'aide à la décision aide les utilisateurs à prendre les mesures appropriées en s'appuyant sur les données technologiques (observations sur l'état du système), les connaissances expertes et les données structurées (règles métier). Il est donc destiné à faciliter le travail de l'utilisateur dans la phase « Stratégie » du processus décisionnel décrit dans la section 4.2.

Le processus mis en œuvre dans le système d'aide à la décision est une adaptation des travaux présentés dans [Villeneuve et al., 2017]. Ce processus est présenté dans la Figure 2 et distingue six étapes principales :

1. La gestion des données technologiques consiste à collecter et stocker ces données (sous leur forme brute ou après structuration – voir la section 5.1) puis à extraire les informations utiles à la décision en cours par des requêtes.
2. La gestion des connaissances expertes a pour but d'éliciter les avis des experts (éleveurs, vétérinaires, éthologues) pour les confronter aux données technologiques afin de confirmer ou d'infirmer l'interprétation du système sur le sujet de la décision en cours.
3. La formalisation des connaissances consiste à formater l'ensemble des données et connaissances sélectionnées aux étapes précédentes à l'aide du formalisme de représentation choisi. L'imperfection des données (section 3.3), et en particulier l'incertitude, est également prise en compte pour

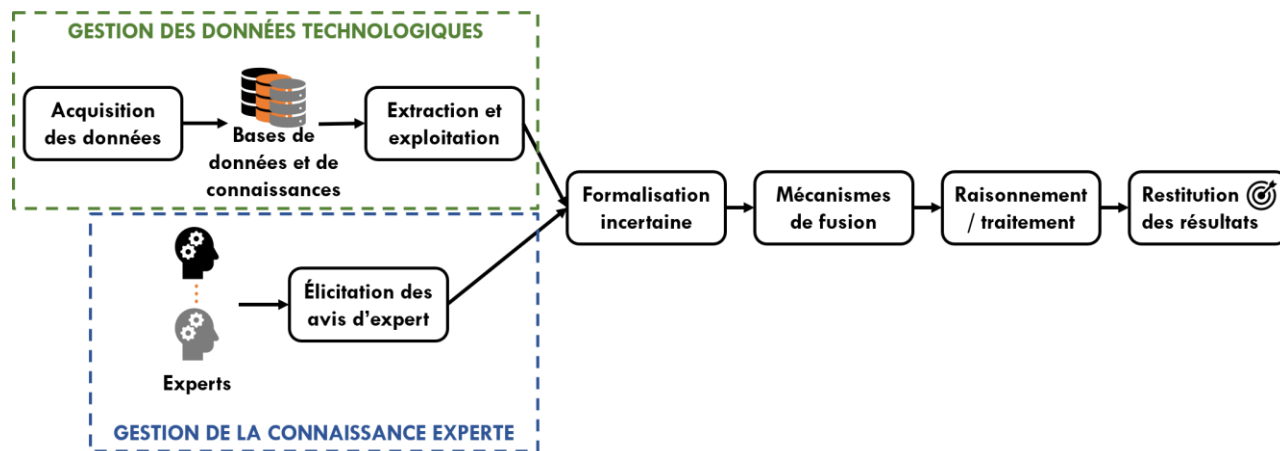


Figure 2. Fonctionnement du système d'aide à la décision

pondérer ou adapter l'information, notamment à l'aide des règles métiers stockées dans les bases de connaissances.

4. Les mécanismes de fusion ont pour objectif de concaténer l'ensemble des connaissances sans perdre l'information concernant l'incertitude. Le conflit entre les sources d'information est lui aussi mis en évidence pour que l'utilisateur soit pleinement conscient des possibles faiblesses présentes dans les données utilisées pour l'aider dans sa décision. Le choix de ces mécanismes est dépendant du formalisme de représentation choisi.
5. Le traitement permet l'introduction de la connaissance formalisée dans le modèle d'aide à la décision et le raisonnement, à partir de cette connaissance (et des règles métiers), pour calculer les indicateurs (critères de décision) afin d'aider à la décision.
6. La restitution des résultats a pour objectif de mettre en forme les indicateurs pour qu'ils puissent être interprétés par un décideur humain. En effet, un inconvénient commun à de nombreux formalismes de représentation de la connaissance incertaine réside dans la complexité pour un utilisateur non averti à interpréter un résultat incertain. Il existe des méthodes pour supprimer ce caractère incertain. Cependant, cette information a pourtant de l'importance pour le décideur pour quantifier la confiance du système dans son évaluation. La retranscription claire et cohérente des informations relatives à l'incertitude et au conflit, en plus des indicateurs, est donc un facteur critique pour permettre une décision éclairée par le décideur.

Ce processus doit être implémenté en choisissant un formalisme de représentation de la connaissance et en construisant un modèle réaliste avec l'aide des utilisateurs et des experts du domaine de l'élevage de précision (éleveurs, vétérinaires, organismes de certification...).

6 CONCLUSION

Dans cet article, l'élevage ovin de précision est perçu au travers du prisme des systèmes cyber-physiques et humains (CPHS). La conception et le développement d'un système d'aide à la décision dans ce contexte permet d'illustrer, par un exemple concret, les problématiques de collaboration et de codécision spécifiques aux CPHS. Les challenges liés au traitement des données hétérogènes, à l'interopérabilité des systèmes

d'information et à l'intégration de l'utilisateur dans un système d'aide à la décision doivent être considérés dans la conception de n'importe quel CPHS.

La méthodologie proposée précédemment, bien que détaillée ici dans le cadre de l'élevage ovin de précision, peut aisément être adaptée à n'importe quel CPHS. Elle vise à répondre aux challenges identifiés et doit maintenant faire l'objet d'une implémentation dans le cadre du projet PASTORE (projet financé par la région Nouvelle Aquitaine en France). Ce projet a pour objectif de rassembler des partenaires académiques et industriels pour couvrir l'ensemble des parties prenantes, décrites dans la section 5.1 et dans la Figure 1, d'un système d'élevage ovin de précision (concepteurs de capteurs connectés, professionnels de l'élevage, vétérinaires et spécialistes du traitement de données incertaines). Plusieurs troupeaux seront équipés avec des capteurs et un système interopérable de stockage et d'analyse des données sera déployés. Le système d'aide à la décision sera développé et testé sur le terrain dans des fermes expérimentales pour évaluer à échelle réelle les mécanismes proposés.

7 RÉFÉRENCES

- Abi Akle, A., Minel, S., et Yannou, B. (2017a). Information visualization for selection in design by shopping. *Research in Engineering Design*, 28(1), 99–117.
- Abi Akle, A., Yannou, B., et Minel, S. (2017b). Design space visualization for efficiency in knowledge discovery leading to an informed decision. *In Proc. 21st International Conference on Engineering Design (ICED17)*, Vancouver, Canada.
- Baheti, R. et Gill, H. (2011). Cyber-physical Systems. *The Impact of Control Technology*, 1, 161-166.
- Baina, S. (2006). Interopérabilité dirigée par les modèles: Une approche orientée produit pour l'interopérabilité des systèmes d'entreprise. *PhD thesis, University Henri Poincaré, Nancy I*.
- Banhazi, T.M., Lehr, H., Black, J.L., Crabtree, H., Schofield, P., Tscharke, M., et Berckmans, D. (2012). Precision livestock farming: an international review of scientific and commercial aspects. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 7(3), 1–7.

- Bocquier, F., Debus, N., Lurette, A., Maton, C., Viudes, G., Moulin, C.H., et Jouven, M. (2014). Precision farming in extensive livestock systems. *INRA Productions Animales*, 27, 101–112.
- Bourey, J.P., Segur, R.G., Doumeingt, G., et Berre, A.J. (2007). Report on model driven interoperability. *DTG2.3 deliverable, INTEROP Network of Excellence*.
- Brown, D.D., Kays, R., Wikelski, M., Wilson, R., et Klimley, A.P. (2013). Observing the unwatchable through acceleration logging of animal behavior. *Animal Biotelemetry*, 1–20.
- Collins, P.M., Green, J.A., Warwick-Evans, V., Dodd, S., Shaw, P.J.A., Arnould, J.P.Y., et Halsey, L.G. (2015). Interpreting behaviors from accelerometry: a method combining simplicity and objectivity. *Ecology and Evolution*, 5(20), 4642–4654.
- Dubois, D. et Prade, H. (2009). Formal representation of uncertainty. *Decision-Making Process*.
- Hostiou, N., Fagon, J., Chauvat, S., Turlot, A., Kling- Eveillard, F., Boivin, X., et Allain, C. (2017). Impact of precision livestock farming on work and human-animal interactions on dairy farms : a review. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 21(4), 268–275.
- Hu, S., Wang, H., She, C., et Wang, J. (2011). Agont: Ontology for agriculture internet of things. In *Proc. 4th Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture (CCTA'11)*, AICT-344(1), 131–137.
- Ireson, N. (2009). Local community situational awareness during an emergency. In *Proc. 3rd IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies, DEST'09*, 49–54.
- Jankovic, M., Le Cardinal, J., et Bocquet, J.C. (2007). Integration of different contexts in collaborative decision making in new product development. In *Proc. International Conference on Engineering Design, ICED'07, Paris, France*.
- Karacapilidis, N. et Papadias, D. (2001). Computer supported argumentation and collaborative decision making: the HERMES system. *Information systems*, 26(4), 259–277.
- Lee, E.A. (2008). Cyber Physical Systems: Design Challenges. In *11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, 363-369. IEEE, Orlando, FL.
- Llaria, A., Terrasson, G., Arregui, H., et Hacala, A. (2015). Geolocation and monitoring platform for extensive farming in mountain pastures. In *Proc. IEEE International Conference on Industrial Technology, Seville, Spain*, 2420–2425.
- Merlo, C., Vicien, G., et Ducq, Y. (2014). Interoperability modelling methodology for product design organisations. *International Journal of Production Research*, 52(15), 100–120.
- Miller, S.W., Simpson, T.W., Yukish, M.A., Bennett, L.A., Lego, S.E., et Stump, G.M. (2013). Preference construction, sequential decision making, and trade space exploration. In *Proc. ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*.
- Object Management Group (2003). Mda guide version 1.0.1, document number: omg/2003-06-01. ed. *Object Management Group*.
- Pannell, D.J. (1999). Social and economic challenges in the development of complex farming systems. *Agroforestry Systems*, 45, 393–409.
- Pilnière, V. et Merlo, C. (2011). Une approche transdisciplinaire et systémique pour favoriser le changement dans l'entreprise. *International Journal of Projectics*, 7(1), 63-73.
- Rajkumar, R. (2012). A cyber-physical future. *Proceedings of the IEEE*, 100, 1309-1312.
- Ruiz-Garcia, L., Lunadei, L., Barreiro, P., et Robla, J.I. (2009). A review of wireless sensor technologies and applications in agriculture and food industry: State of the art and current trends. *Sensors*, 9, 4720–4750.
- Seguy, A., Noyes, D., et Clermont, P. (2010). Characterisation of collaborative decision-making processes. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 23(11), 1046–1058.
- Smets, P. (2005). Analyzing the combination of conflicting belief functions. *Information Fusion*, 8(4), 387-412.
- Soerge, D., Lauser, B., Liang, A.C., Fisseha, F., Keiser, J., et Katz, S. (2004). Reengineering thesauri for new applications: the agrovoc example. *Digital Information*, 4(4), 1–23.
- Terrasson, G., Llaria, A., Marra, A. et Voaden, S. (2016). Accelerometer based solution for precision livestock farming: geolocation enhancement and animal activity identification. In *Proc. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 138(1).
- Terrasson, G., Villeneuve, E., Pilniere, V., et Llaria, A. (2017). Precision livestock farming: A multidisciplinary paradigm. In *Proc. Symposium for Empowering and Smart Interfaces in Engineering, Smart Interfaces 2017, Venice, Italy*.
- Vredenburg, K., Mao, J.-Y., Smith, P.-W. et Carey, T. (2002). A survey of user-centered design practice. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '02)*. ACM, New York, NY, USA, 471-478.
- Villeneuve, E., Béler, C., Pérès, F., Geneste, L., et Reubrez, E. (2017). Decision-support methodology to assess risk in end-of-life management of complex systems. *IEEE Systems Journal*, 11(3), 1579–1588.
- Wache, H., Vögele, T., Visser, U., Stuckenschmidt, H., Schuster, G., Neumann, H., et Hübner, S. (2001). Ontology-based integration of information - a survey of existing approaches. In *Proc. IJCAI-01 Workshop: Ontologies and Information Sharing*, 108–117.
- Yoon, K.P. et Hwang, C.L. (1995). Multiple attribute decision making: an introduction (vol. 104). *Sage Publications*.
- Zanakis, S.H., Solomon, A., Wishart, N., et Dubliss, S. (1998). Multi-attribute decision making: A simulation comparison of select methods. *European journal of operational research*, 107(3), 507–529.
- Zheng, C., Le Duigou, J., Bricogne, M., and Eynard, B. (2016). Multidisciplinary interface model for design of mechatronic systems. *Computers in Industry*, 76, 24-37.