



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/11800>

To cite this version :

Patrick MARTIN, Jacques MARSOT, Bruno DAILLE-LEFEVRE, Aurélien LUX, Nicholas DE GALVEZ, Ismail EL MOUAYNI, Xavier GODOT, Ali SIADAT, Jean-Yves DANTAN, Alain ETIENNE - Ingénierie de conception et sécurité des machines - In: 12^{ème} Congrès International de Génie Industriel, France, 2017-05 - 12^{ème} Congrès International de Génie Industriel - 2017

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu



Ingénierie de conception et sécurité des machines

PATRICK MARTIN², JACQUES MARSOT¹, BRUNO DAILLE-LEFEVRE¹, ALAIN ETIENNE²,
AURELIEN LUX¹, ALI SIDAT², NICHOLAS DE GALVEZ¹, ISMAIL EL MOUAYNI², XAVIER GODOT²,
JEAN-YVES DANTAN²

1- INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE ET DE SECURITE (INRS), 1 RUE DU MORVAN, 54519

VANDOEUVRE- LES-NANCY CEDEX PRENOM.NOM@INRS.FR

2 ARTS ET METIERS (ENSAM) CAMPUS DE METZ, LCFC, 4 RUE AUGUSTIN FRESNEL, 57078 METZ,
PRENOM.NOM@ENSAM.EU

Résumé –

Cette présentation se positionne dans le cadre de la démarche de « prévention intégrée » qui consiste à appliquer au plus tôt des principes de conception sûre à un futur équipement de travail et dans le paradigme de l'usine du futur de la prise en compte de l'Homme dans les systèmes de production. Malgré les avancées actuelles en termes de méthodologies de conception et de dispositif normatif, la mise en pratique de cette démarche de prévention est encore très imparfaite. Afin de répondre à ces objectifs l'INRS et l'ENSAM se sont associés dans le cadre d'une convention de laboratoire mixte afin d'aider le concepteur de l'équipement ou du système de production de disposer de méthodes, modèles et outils structurés. Cet article présente les études réalisées et résultats obtenus suivant les axes : spécifications et conception préliminaire des équipements de travail prenant en compte les objectifs de santé - sécurité au travail.

Abstract -

This paper is dedicated to “integrated safety” which is dealing to apply as soon as possible safe machine design principle. More human in the factory is one of the main themes of the Factory of the future paradigm. Despite of current researches on design methodologies and standards, practical uses of this approach are not yet perfect. In order to answer to these objectives INRS and ENSAM have signed a research agreement in order to gives to the machine or manufacturing systems designers structured methods, models, tools and so to help them during the design process. This paper present studies carrying out, results obtained following the axis: working equipment requirements, preliminary design of manufacturing equipment taking account of health and safety.

Mots clés - Cahier des charges, situation de travail, conception sûre, conception intégrée.

Keywords – Requirement specifications, work situation, safe design, integrated design

1. CONTEXTE

De nombreuses études [FoF 2010, CETIM 2015, FIM 2015, INRS, 2016] soulignent l'importance dans le paradigme de l'usine du futur de la prise en compte et de l'intégration de l'Homme dans les systèmes de production et ceci suivant plusieurs axes : physique, cognitif, compétences, organisation dans l'espace et dans le temps.

Dans ce cadre, les problèmes de santé – sécurité au travail restent indiqués d'une façon trop générale et les démarches scientifiques associées restent, à ce jour, encore peu développées et intégrées [Sadeghi et al., 2016]. Afin de combler ces lacunes l'INRS et l'ENSAM (campus de Metz) se sont associés dans le cadre d'une convention de laboratoire mixte intitulée « Conception sûre de situations de travail (LC2S) ». Les travaux de cette équipe, qui comprend neufs permanents des deux établissements et accueille en moyenne 2 doctorants et 3 étudiants de master par an, portent à la fois sur la spécification des systèmes et des équipements de travail, leur conception et l'exploitation dans ces différentes étapes du retour d'expérience de leur utilisation réelle. L'objectif est de

fournir aux concepteurs de ces équipements une démarche structurée et outillée pour passer de la conception de systèmes techniques à la conception des situations de travail afin de concilier performance et prévention des risques professionnels. Il s'agit ainsi de développer de nouvelles connaissances sur l'intégration de la prévention des risques professionnels. Ces travaux se positionnent dans le cadre de la démarche dite de « Prévention intégrée » qui consiste à appliquer au plus tôt des principes de conception sûre à un futur équipement de travail. Elle fixe comme objectif aux concepteurs d'obtenir le niveau de risque résiduel le plus faible possible compte tenu de l'état de la technique (Figure 1). Cette démarche s'articule autour de deux processus, celui de l'appréciation des risques et celui de la réduction des risques. Elle se veut multirisques et centrée sur les usages du futur équipement de travail [Directive, 2006]. En effet, le concepteur ne doit pas se limiter pour son application aux conditions normales d'utilisation, il doit aussi prendre en compte les usages, intentionnels ou non, prévisibles sur la base de l'expérience de l'utilisation antérieure de machines similaires et de la connaissance du comportement humain. C'est ce que la directive machines appelle les « conditions anormales prévisibles » [Fraser, 2010].

Malgré les avancées en termes d'intégration des connaissances dans le cycle de vie du produit, de méthodologies de conception et un dispositif normatif de plus en plus complet, la mise en pratique de cette démarche de prévention est encore très imparfaite. En effet, faute de moyens formels et d'outils, les projecteurs, dessinateurs, chefs de projets, qui ne sont pas des spécialistes de la prévention ne savent pas définir ce qui est applicable et à quel moment sans pour autant pénaliser les coûts et délais de leurs projets [Fadier & De La Garza, 2006].

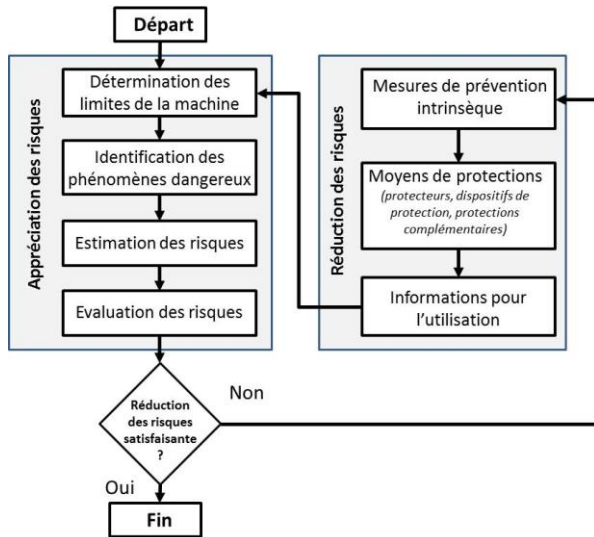


Figure 1 : Représentation simplifiée de la démarche de prévention intégrée

De ce fait, les aspects santé et sécurité sont majoritairement abordés de façon dissociée par rapport aux objectifs fonctionnels et généralement en fin de projet lorsque la totalité des choix de conception ont été réalisés. Les mesures prises sont alors principalement correctives et basées sur une approche standardisée, normalisée du travail (fonctionnement nominal, opérateur moyen, mode opératoire prescrit...). On ne peut pas considérer qu'il s'agisse là d'une réelle intégration de la prévention à la conception prenant en compte l'activité future des opérateurs et de leurs variabilités.

2. ETAT DE L'ART ET PROBLEMATIQUE

Les nombreux travaux en lien avec la démarche de prévention intégrée peuvent être classés en deux familles : ceux qui portent sur tout ou partie de cette démarche afin de la rendre plus opérationnelle et ceux qui vont plutôt s'attacher à son articulation avec le processus de conception d'un équipement de travail.

2.1 Travaux sur la démarche de prévention intégrée

Les deux étapes relatives à l'estimation et l'évaluation des risques consistent à déterminer un indice permettant de hiérarchiser les risques potentiels. Les méthodes proposées se distinguent à la fois par le nombre de paramètres utilisés pour définir la gravité et l'exposition, par le nombre de niveau pour chacun de ces paramètres et enfin par les façons de les combiner : matrice, graphe, formule numérique, abaque, logique floue [Lamy et al. 2006 ; Malm et al., 2015, Etherton, 2007 ; Chinniah et al., 2011 ; Chen, 2014 ; Moatari-Kazerouni et al., 2014].

En ce qui concerne spécifiquement le processus de réduction des risques, les travaux réalisés ont plutôt porté sur la formalisation des données normatives [Blaise et al., 2003] ou

sur le concept de « Barrières de sécurité » [Sklet, 2006]. On notera également l'existence de bases de données telles que MECAPREV¹ – Ergomach².

2.2 Travaux sur l'articulation entre la démarche de prévention intégrée et le processus de conception

Il s'agit dans ce cas de travaux qui ont comme objectifs de favoriser la prise en compte de la démarche de prévention intégrée au plus tôt du processus de conception et tout au long de celui-ci.

A l'instar de la conception de produits, concevoir un équipement de travail consiste à passer de l'expression d'un besoin à la réalisation de l'équipement qui y répondra. Du fait de la multiplicité des domaines (machines industrielles standards ou spéciales, produits de grande consommation, etc.), des objectifs (cout, délais, performance, qualité, etc.) de nombreuses méthodologies ont été développées. Ces méthodologies présentent toutefois certaines similarités [Scaravetti et al., 2005] : elles procèdent toutes par découpage du processus de conception en phases et mettent également en avant le caractère itératif du processus avec des étapes de validation et des boucles de retour entre ces phases.

Le concept du Design for Safety recommande l'amélioration du partage des connaissances entre les différents corps de métiers avec une implication forte de l'expert en santé-sécurité [Chinniah et al. 2015 ; Dowlatschahi, 2001; Fadier & De la Garza, 2006; Ghemraoui et al. 2009a, 2009b ; Hale et al. 2007; Houssin & Gardoni 2009; Houssin & Coulibali 2011 ; Jouffroy et al., 1999; Khan et al. 2015 ; Rausand & Bouwer Utne, 2009; Vink et al., 1997] et s'appuie sur des théories de la conception comme le Modèle de Conception Distribuée (MCD), le Knowledge Based Management System, axiomatic design et l'ingénierie concourante. De nombreuses méthodes sont proposées dans la littérature pour assister les concepteurs vis-à-vis de certains objectifs liés à la prévention intégrée tels que l'estimation des risques [Cacciabue, 2004]; l'analyse des risques globale [Hale et al., 2007; Mentis & Ozen, 2015] ou restreinte au non-respect des principes ergonomiques [Didelot, 2001] ou encore l'intégration d'éléments liés à la sécurité des opérateurs dès les premières phases de conception : méthode IRAD [Ghemraoui et al., 2009a; Sadeghi, 2014]. Celle-ci propose de traiter simultanément les fonctions techniques et les fonctions de sécurité tout au long du processus de conception. Cette méthode s'applique cependant plus au processus de réduction des risques (spécifications de fonctions de sécurité, recherche de principes et solutions techniques) et n'apporte donc pas d'éléments supplémentaires vis-à-vis de l'identification des phénomènes dangereux.

Parmi les outils qui assistent la conception en améliorant ou en complétant ceux déjà utilisés par les concepteurs on peut citer PAG (Performance Analysis aGent) proposé par [Shahrokhi & Bernard, 2009]. C'est un système expert d'analyse de performance de la sûreté des situations de travail d'un système de production. Il se base sur l'utilisation d'un mannequin numérique qui intègre cinq agents de modélisation (morphologique, biomécanique, cinématique, physiologique et psychologique) et quatre agents d'analyse (facteurs humains, risques, économique et performance industrielle). Ce système nécessite d'être suffisamment avancé dans le processus de conception car il repose sur une simulation numérique détaillée. Il est donc difficilement applicable en début de projet

¹ <https://www.machines-sures.inrs.fr>

² <https://ergomach.wordpress.com/>

lors de la définition de l'architecture du futur équipement de travail.

Au travers d'organisations des connaissances et des données générées, des modèles associent des éléments liant l'analyse de risque au processus de conception permettent de fixer les objectifs à atteindre aux différents acteurs participant à la conception [Hasan et al., 2003; Le Coze, 2013].

L'analyse de l'ensemble de ces méthodes, techniques et outils de conception nous permet de faire les constats suivants [Sadeghi et al., 2016 ; De Galvez et al. 2017] :

- Vis à vis de l'identification de l'ensemble des dangers, l'analyse bibliographique ne nous a pas permis d'identifier de méthodes et/ou de techniques particulières. Cette identification repose en effet principalement le dire-d'expert, notamment lors des étapes de validation qui jalonnent le processus de conception ;
- Aucun cadre de formalisation permettant d'assurer l'identification des éléments clés et les liens entre usage, conception et prévention n'est proposé ;
- La prise en compte de l'ensemble des usages repose principalement sur des mises en situation lors des étapes de validation : revues de projet collaboratives avec des ergonomes et des opérateurs autour de modélisations ou de prototypes. Ces mises en situations doivent également permettre d'évaluer l'adaptabilité du système afin de laisser aux opérateurs des marges de manœuvres indispensables à la réalisation de leur activité. Cette notion de marges de manœuvre est en effet mise en avant par la communauté des ergonomes pour limiter les contraintes physiques, psychologiques et comme condition du maintien des opérateurs vieillissants à leur postes [Brunet et Riff, 2009 ; Coutarel et al., 2015].

Bien que nécessaire, cette articulation de la démarche de prévention intégrée avec le processus de conception autour des seules étapes de validation n'est pas suffisante car elle ne permet pas de guider le concepteur lors de ses prises de décisions autonomes. La prévention des risques reste de ce fait abordée comme une contrainte de correction et non comme une spécification pour la conception.

2.3 Problématique et axes de recherche

L'analyse de cet état de l'art soulève les problématiques scientifiques suivantes:

- la sécurité ne constitue pas une des préoccupations principales du concepteur malgré les textes réglementaires et normatifs dans ce domaine ;
- la nécessité de proposer des méthodes, modèles et outils aux concepteurs afin de les aider à préciser les usages leur variabilité ;
- de mieux estimer les risques accidentels et chroniques au plus tôt dans le processus de conception et dans les différentes étapes du cycle de vie d'un équipement de travail.

Afin de répondre à cette problématique, les travaux engagés dans le cadre du LC2S ont été déclinés selon trois axes:

- la prise en compte de l'ensemble des usages raisonnablement prévisibles dans les différentes étapes du cycle de vie d'un équipement de travail ;
- l'identification de l'ensemble des phénomènes dangereux et de l'évaluation des risques associés tout au long du processus de conception;
- la conception de systèmes de travail qui laissent des marges de manœuvre aux opérateurs (ce point est présenté dans la communication Lux et al., 2017).

Dans ce cadre la présente communication porte sur deux points particulièrement importants : la spécification d'un équipement de travail en intégrant les données d'usage (cf. § 3) et la caractérisation du processus de création du niveau de risque (cf. § 4). Ainsi il s'agit d'identifier et de structurer les objets de connaissance qui seront exploités afin de spécifier et concevoir un équipement de production prenant en compte les objectifs de santé - sécurité au travail. Les travaux prévus ultérieurement portent sur l'enchaînement des méthodes proposées qui participent à la conception sûre de machine.

3. SPECIFICATION D'UN EQUIPEMENT DE TRAVAIL EN INTEGRANT LES DONNEES D'USAGES DES SITUATIONS DE TRAVAIL PREVISIBLES

Les travaux ont dans un premier temps porté la proposition d'une démarche basée sur l'analyse fonctionnelle du besoin permettant de décrire l'ensemble des données des situations de travail dans le cahier des charges d'un futur équipement de travail. Un modèle de données a été proposé afin de poursuivre cette association entre les exigences techniques et les données d'usage tout au long du processus de conception.

3.1 Analyse fonctionnelle des besoins (AFB)

L'objectif recherché est d'aider le dialogue entre le donneur d'ordre et le concepteur afin qu'ils puissent définir l'ensemble des données nécessaires pour mettre en application les principes de conception sûre, et ainsi les intégrer dans les spécifications fonctionnelles. Nous soutenons par ailleurs, qu'il n'est pas suffisant d'intégrer ces données d'usage dans un paragraphe spécifique du cahier des charges si l'on veut éviter qu'elles soient traitées par les concepteurs de façon séparée, et de ce fait de façon tardive et secondaire.

L'analyse fonctionnelle des besoins [NF EN 16271, 2013] peut répondre à cet objectif car c'est une démarche participative qui permet le recensement exhaustif des fonctions attendues du futur équipement de travail dans les différentes étapes de son cycle de vie.

Afin de guider le concepteur dans la caractérisation de chacune des fonctions par des données d'usage nous avons fait appel à une méthode de questionnement structurée bien connue dans le secteur industriel : le « QQQQCPC » [Tapan K. Bose, 2010]. Comme l'illustrent le tableau 1 et la figure 2, ce questionnement des fonctions vis-à-vis de leurs conditions d'exploitation, des modes de fonctionnement, des modes opératoires, des opérateurs et de leur activité probable permet de définir le diagramme de classe qui assure le lien entre l'analyse fonctionnelle et le modèle MOSTRA (modèle de situation de travail) issu de précédents travaux de recherche menés par l'INRS [Hasan et al. 2003].

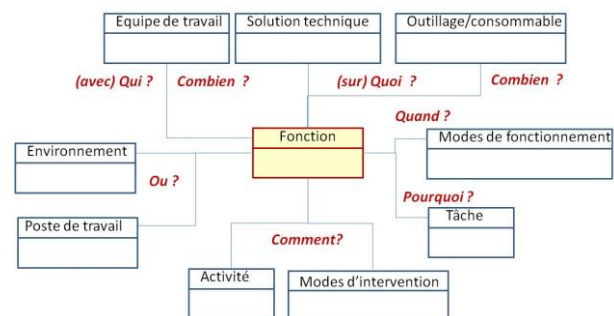


Figure 2 - Questionnement QQQQCPC et situation de Travail.

Tableau 1 : liens établis entre les entités du MOSTRA via le questionnaire QQQQCPC

QQQCPC	Questions « concepteur-client »	Objet 1 (réponse possible)	Relation	Objet 2 (en relation direct)
QUOI	De quoi s'agit-il ?	Tâche d'utilisation	Réalise	Fonction
	Avec quoi ? avec quel outillage ?	Fonction	Est réalisée par	Tâche d'utilisation
	Sur quel produit ? quelle pièce ?	Auxiliaire/outillage	Utilisé pour	Tâche d'utilisation
	Sur quelle partie de la machine ?	Auxiliaire/consommable	Utilisé dans	Tâche d'utilisation
	Quelles solutions ?	Système	Remplit	Fonction
QUI	Quel est l'état de la machine ?	Mode de fonctionnement		Tâche / système
	Quelles solutions ?	Solutions techniques	Satisfait à	Fonction
	Quel utilisateur / opérateur ?	Equipe de travail	Effectue	Tâche d'utilisation
OU	Avec quelles qualifications ?	Equipe de travail.qualification	Réalise	Tâche d'utilisation
	A quel endroit de la machine ?	Système	Remplit	Fonction
	A quel endroit de l'atelier ?	Système	Remplit	Fonction
QUAND	Dans quel environnement ?	Environnement	Influence	Situation de travail
	Dans quelle phase d'utilisation / fonctionnement ?	Tâche d'utilisation	Réalise	Fonction
	A quelle étape du cycle de vie / du processus ?	Tâche d'utilisation	Réalise	Fonction
	Dans quel mode de fonctionnement ?	Mode de fonctionnement		Tâche / système
COMMENT	A quelle fréquence d'utilisation ?	Tâche.fréquence d'utilisation	Réalise	Fonction
	Comment se fera l'intervention ?	Tâche.mode d'intervention	Réalise	Fonction
	Par quel moyen ?	Système	Remplit	Fonction
		Auxiliaire / Outillage	Est utilisé pour	Tâche
		Tâche	Réalise	Fonction
	Sous quelle forme apparaît le problème ?	Mesure de sécurité.visibilité	Est une	Tâche / système
POURQUOI	Dans quel état / configuration est la machine ?	Mesure de sécurité.accessibilité	Est une	Tâche / système
		Mode de fonctionnement		Tâche / système
	Pour quelle raison / Dans quel objectif ?	Fonction	Est réalisée	Tâche d'utilisation
COMBIEN	Combien de temps ?	Tâche d'utilisation.durée	Réalise	Fonction
	Combien de pièces ?	Auxiliaires / Consommables	Est utilisée pour	Tâche

Ce modèle de situation de travail permet d'identifier les liens entre les fonctions et les paramètres d'usages par l'intermédiaire des associations avec les autres concepts tels que système, tâche, équipe de travail etc. Ce couplage avec comme point de référence la classe « Fonction » (Figure 3) permet de structurer la collecte d'informations en vue de l'élaboration du cahier des charges et de son exploitation ultérieure par les concepteurs [Feno et al. 2016].

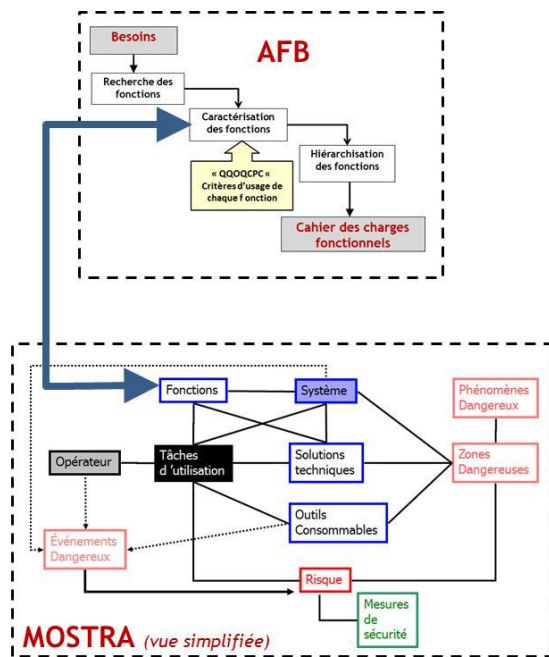


Figure 3 : Couplage entre AFB et MOSTRA

Avec cette démarche, la santé et la sécurité ne sont plus spécifiées indépendamment mais sont incluses dans la description de chaque fonction du futur équipement de travail. Cela revient à spécifier que chaque fonction doit être sûre. Le concepteur qui recevra un cahier des charges ainsi élaboré disposera alors pour chaque fonction de l'ensemble des données lui permettant de définir des principes et des solutions techniques « sûrs » répondant aux fonctions demandées dans les conditions d'usages de la future machine. Cette approche a

été validée sur plusieurs exemples industriels et elle a montré sa capacité à enrichir le cahier des charges initial des données sur la description des situations de travail [Daille-Lefèvre et al., 2014].

A partir des spécifications contenues dans un cahier des charges ainsi réalisé, le concepteur va ensuite procéder à une conception générale puis détaillée de la future machine.

S'il est préconisé de procéder à des simulations au plus tôt possible pour « mettre en situation » les principes et solutions techniques proposées afin de les discuter avec les futurs utilisateurs, il est nécessaire d'outiller les concepteurs pour l'aider à traiter de façon conjointe les données techniques et d'usages tout au long du processus de conception. C'est l'objectif du modèle d'usage présenté ci-après.

3.2 Modèle d'usage

Ce modèle se base sur le concept central de « tâches » de travail [Daille-Lefèvre et al. 2016]. Il regroupe l'entité « fonction », telle que définie dans l'analyse fonctionnelle du besoin [NF EN 16271, 2013], avec les entités « modes d'intervention » et « tâches », du modèle de situations de travail MOSTRA précédemment décrit. L'intérêt de ce regroupement est qu'il ne prédéfinit, a priori, pas de différence entre les actions qui seront réalisées manuellement et celles qui seront automatisées. Pour un besoin fonctionnel donné, cette distinction peut en effet n'apparaître qu'en cours de conception, au moment du choix des solutions en fonction de critères techniques ou économiques. Par ailleurs, certaines fonctions peuvent être assurées de façon combinée par la machine et les opérateurs. Le modèle conceptuel de données (MCD) (Figures 4, 5, 6, 7) proposé permet de décrire l'ensemble des données pouvant être contenues dans un cahier des charges élaboré selon la méthodologie présentée précédemment ainsi que celle générées lors des phases de conception suivantes.

Un démonstrateur informatique de ce modèle a été développé. La description des usages à l'aide de celui-ci commence par la définition d'une liste de tâches effectuées soit par la machine, soit par l'opérateur soit par les deux (Figure 4). Ces tâches doivent ensuite être situées temporellement les unes par rapport aux autres, par un lien de précédence ou de

simultanéité. Si nécessaire, elles peuvent également être hiérarchisées pour faciliter la compréhension du processus.

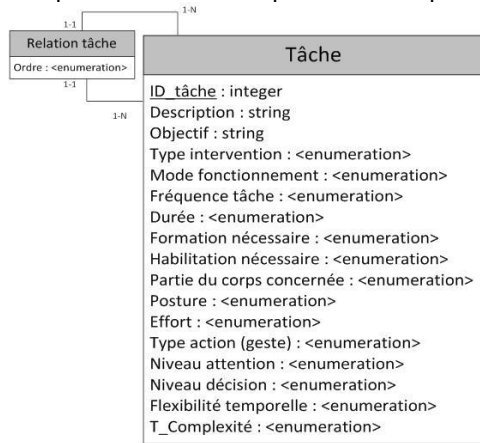


Figure 4: Concept de « Tâche » du modèle d'usage proposé

Les tâches qui nécessitent l'intervention de l'Homme sont reliées à des profils « Utilisateurs » qui doivent être alloués ensuite au personnel réel de l'entreprise (Figure 5). Comme illustré par la figure 6 les tâches automatiques ou semi-automatiques sont reliées à des modules de la machine et si besoin à des auxiliaires (produits ou équipements extérieurs à la machine). L'ensemble de ces données sont également à situer (concept « Zone ») par rapport du lieu d'implantation (Figure 7).

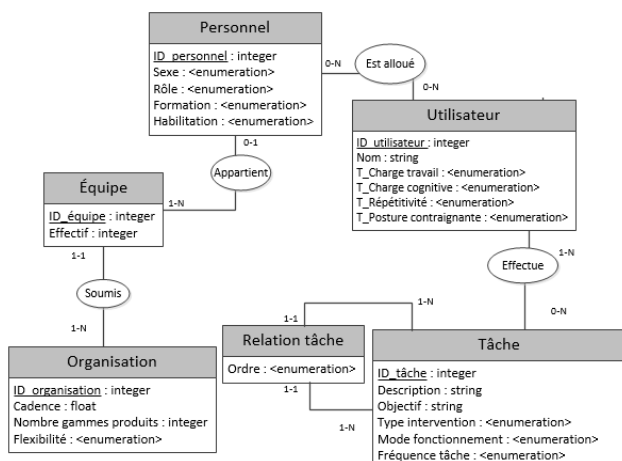


Figure 5 : Allocation des profils utilisateurs aux tâches manuelles

Ce modèle intègre également des traitements pour aider le concepteur à établir la description des différentes situations de travail. Ces traitements permettent de distinguer les différentes phases de conception en filtrant les informations accessibles selon l'avancement de la conception. Ils se déclinent de la façon suivante : aide à la saisie, tests de complétude et de cohérence des données, rendus visuels sous différents points de vue : schéma d'implantation, ordonnancement des tâches, rapports, etc...

Ce modèle d'usage a dans en premier temps a été appliqué sur le cas industriel ayant servi à valider la méthode de spécifications décrite dans le paragraphe précédent. La comparaison a montré que ces deux approches amènent à une description du besoin de l'industriel avec le même niveau de détail et de pertinence dans l'expression de l'usage de la future machine. Ce modèle d'usage a ensuite été appliqué sur une

ligne de formage de métaux, composée de deux presses, d'un four et d'un bac de trempe. Il a ainsi été mis en évidence des incohérences entre les choix d'implantation et les différentes gammes de fabrication souhaitées [Daille Lefèvre et al., 2016].

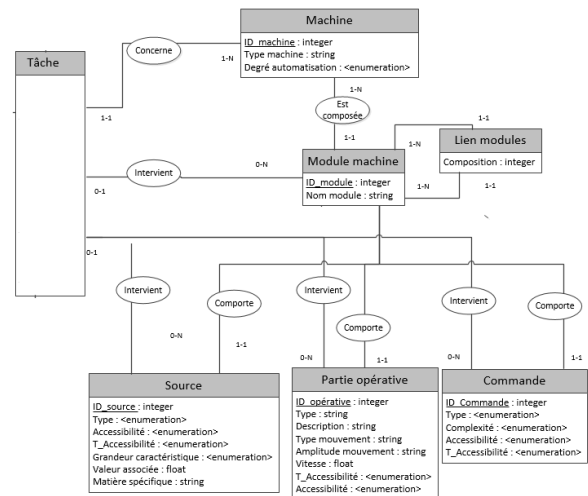


Figure 6 : Allocation des ressources techniques aux « Tâches (fonctions) » techniques

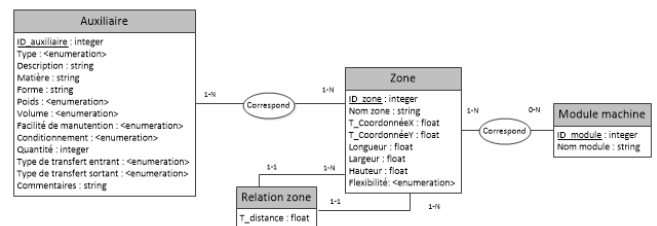


Figure 7 : Affectation des données d'implantation aux éléments matériels

Ces différentes expérimentations montrent l'intérêt de ce modèle d'usage lors des phases de conception générale et détaillée d'un équipement de travail. En tant que modèle de données, cet outil permet en effet de capitaliser et structurer autour de la notion de « tâches » les données extraites des différents objets intermédiaires (cahier des charges, schémas fonctionnels, plans CAO, maquettes, prototypes, etc.) générés tout au long du processus de conception. De plus, de par les traitements associés, c'est également un outil qui supporte les boucles de rétroaction entre les différentes phases de conception.

Cet outil permet donc aux concepteurs d'effectuer autant d'itérations qu'il le désire (à chaque fois qu'il lance les traitements de données), sans nécessairement attendre les revues de projet programmées. De plus, là où les maquettes, prototypes ou logiciels de simulation numérique nécessitent d'être à une étape avancée de conception générale (voire détaillée), l'outil proposé permet de premières itérations dès la saisie des spécifications initiales.

4. CARACTERISATION DU PROCESSUS DE CREATION DU NIVEAU DE RISQUE EN PHASE DE CONCEPTION GENERALE ET DETAILLEE

L'objectif est de caractériser le processus de création du « risque » en phase de conception générale et détaillée afin de

faciliter l'identification de l'ensemble des phénomènes dangereux générés par les solutions techniques envisagées. L'hypothèse forte de l'approche est que les phénomènes dangereux sont liés à la présence d'énergie. Ainsi la démarche EZID (pour Energy analysis for systematic haZard Identification during Design) (figure 8) [De Galvez et al. 2017] a été développée afin d'identifier de manière systématique les phénomènes dangereux au plus tôt durant le processus de conception. Il s'agit d'associer les paramètres de conception et les phénomènes dangereux afin de fournir au concepteur un retour d'information sur les phénomènes dangereux présents dans la machine à tout instant d'avancement du projet de conception. Elle est constituée d'une étape de modélisation basée sur le modèle fonctionno-structurel (MFS) [Roucoules et al., 2006] et de trois niveaux de traitement qui permettent de faire le lien entre les données liées aux énergies et les différentes caractéristiques des phénomènes dangereux. Les paramètres de conception identifiés lors du processus de conception sont répartis en deux familles: les paramètres principaux énergétiques qui caractérisent un flux d'énergie (description technologique de la manière dont ce flux circule dans la machine) et les paramètres complémentaires (forme, matériau, état de surface, trajectoire). La figure 9 illustre les liens entre ces paramètres de conception et ceux utilisés pour l'analyse des risques.

Chaque système, sous-systèmes ou composant est délimité par ses frontières et comporte des surfaces fonctionnelles : interfaces par lesquelles sont échangées les énergies. Les liaisons entre deux surfaces fonctionnelles (dont celles de l'opérateur dans le cadre d'une situation de travail) sont caractérisées par les types d'échanges (conducteur, semi-conducteur, isolant). Les liaisons conductrices ou semi-conductrices avec les opérateurs constituent des sources potentielles de phénomènes dangereux qui devront être éliminées par des solutions de prévention. L'identification des liaisons supports des flux énergétiques généralisés permet ainsi d'obtenir le modèle MFS du système intégrant l'opérateur. Une première exploitation des informations porte sur l'association des types de phénomènes dangereux avec les paramètres énergétiques contenus dans ces surfaces qui se déclinent en deux catégories : les efforts généralisés (Eg) et les courants généralisés (Cg). Cette association se fait par une simple table de correspondance entre les énergies des paramètres généralisés et celles liées aux types de phénomène dangereux (énergie mécanique <--> phénomène dangereux mécanique par exemple). Afin de couvrir l'ensemble des phénomènes dangereux (mécanique, électrique, non respect des principes ergonomique, thermique, chimique, acoustique, rayonnement, biologique...), il a été nécessaire d'étendre la notion de « variables généralisées » [Borutzky, 2009].

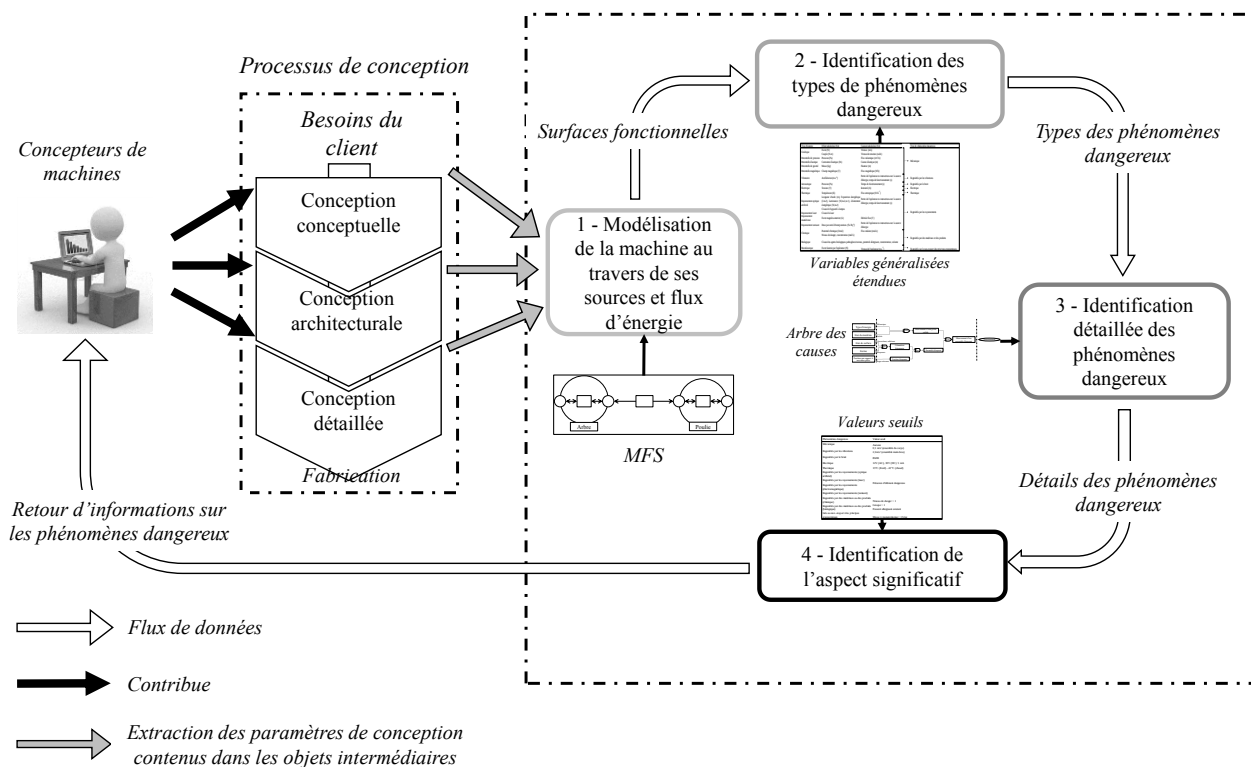


Figure 8 : Démarche EZID

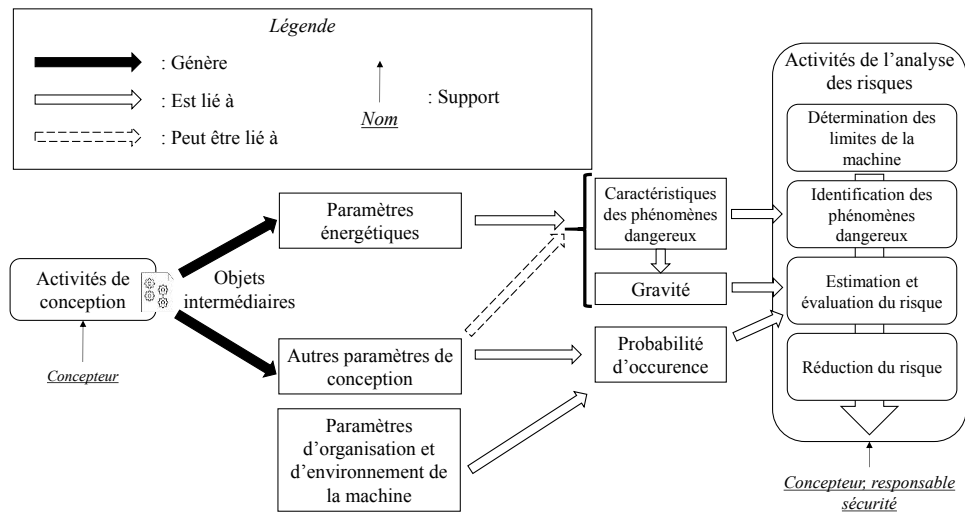


Figure 9. Liens entre les paramètres de conception et ceux utilisés pour l'estimation-évaluation des risques

Puis l'identification détaillée des conséquences par exploitation des paramètres clefs ainsi que des combinaisons associées permet d'identifier les dommages liés aux phénomènes dangereux. Ce traitement est basé sur l'analyse des combinaisons entre des paramètres énergétiques et un certain nombre d'autres paramètres de conception complémentaires en utilisant un arbre des causes. A partir de la conséquence (phénomène dangereux) la démarche consiste à identifier les suites d'événements intermédiaires qui la provoquent et ainsi de suite jusqu'à aboutir aux éléments primaires directement liés aux paramètres de conception.

Le troisième traitement consiste à distinguer parmi les phénomènes dangereux pertinents (présents dans le projet de conception de la machine) ceux qui sont réellement significatifs (qui nécessitent une action spécifique du concepteur pour éliminer ou réduire les risques associés). Cette distinction se fait par comparaison des niveaux d'énergie envisagés avec des valeurs seuils réglementaires ou normatives. Tant que le paramètre énergétique n'est pas défini par le concepteur, le phénomène dangereux est considéré comme « pertinent-inconnu » du fait que l'identification de son aspect significatif n'est pas encore possible.

A la fin de l'application le concepteur dispose des informations sur l'ensemble des phénomènes dangereux présents dans la machine en conception puis il (ou le spécialiste de la prévention des risques) peut continuer le processus d'appréciation des risques et procéder à la réduction des risques en ajoutant des mesures de prévention adéquates, modifiant en conséquence la modélisation. La démarche s'applique donc tout au long du processus de conception et pour différentes situations de vie (montage, réglage, maintenance, exploitation, démontage...) jusqu'à ce que l'ensemble des caractéristiques des phénomènes dangereux soient identifiées sur la base des objets intermédiaires générés et utilisés. Ces derniers garantissent la maturité des paramètres de conception traités par EZID.

Cette approche a été validée un cas industriel. Il s'agit d'un sous-ensemble modulaire (Figure 10) à intégrer dans une ligne d'approvisionnement qui doit recevoir différents types des pièces et les transférer vers un moyen de préhension.

Les 14 types de pièces à approvisionner sont conditionnés de deux manières différentes : soit en vrac, soit rangées

dans des boîtes. Dans le premier cas, les pièces sont versées manuellement par l'opérateur en entrée de la ligne.

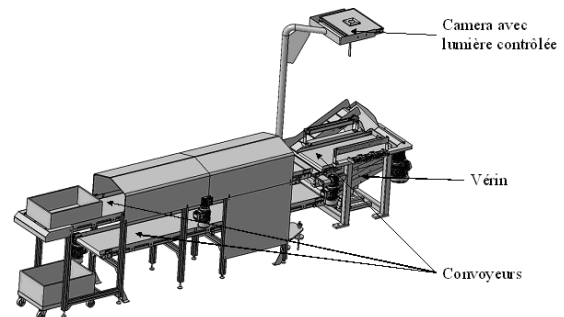


Figure 10: Projet CAO du module analysé avec EZID

Dans le second cas, la boîte doit être ouverte puis approvisionnée à la machine. En sortie, les pièces bonnes sont saisies par un bras robotisé pour ensuite être transférées vers la ligne d'assemblage.

Les pièces identifiées comme non-conformes ainsi que les boîtes doivent être automatiquement dirigées vers l'opérateur pour être évacuées manuellement.

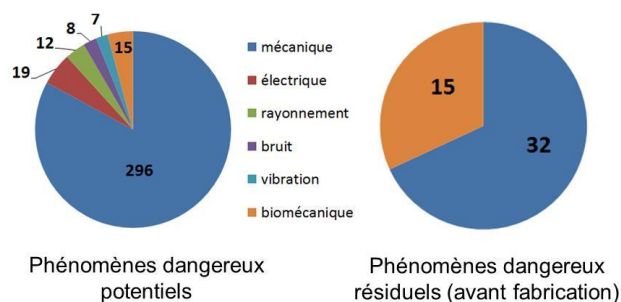
Cette étude a été réalisée en fin de cycle de conception, l'ensemble des objets intermédiaires étaient disponibles (cahier des charges client, modèles 3D, rapports d'observations, données des sous-systèmes). Afin de se replacer dans les conditions d'un projet de conception, la première étape a été d'ordonner chaque élément intermédiaire afin de les attribuer aux phases théoriques du processus de conception (conceptuelle, architecturale, détaillée). Cette affectation a été réalisée en fonction de la nature des données contenues de l'objet intermédiaire. Par exemple, le cahier des charges fourni par le client contenait non seulement des besoins fonctionnels mais également des propositions d'architecture, voire des solutions techniques comme l'utilisation de convoyeurs pour le déplacement des pièces. Ainsi, les spécifications des pièces à approvisionner ont été rattachées à la phase de conception conceptuelle, les propositions d'architecture à la conception architecturale, les informations techniques sur certains composants à la phase de conception détaillée.

Les données de conception ainsi réparties ont ensuite été exploitées à l'aide de la démarche EZID. La modélisation

[illegible]

Elle a également permis de valider l'aspect dynamique d'EZID avec :

- Ainsi, sur les 357 phénomènes dangereux potentiels identifiés à l'aide d'EZID, on constate qu'en fin de projet, 310 avaient bien été pris en compte par les concepteurs. Pour les 47 restants, essentiellement des phénomènes dangereux liés au bruit, à l'ergonomie, aux vibrations, aucune mesure de protection n'avait été envisagée avant le lancement de la réalisation (Figure 12).



Cette approche a également fait l'objet d'un démonstrateur informatique afin de montrer sa capacité à être informatisé et à terme, être intégré dans les outils numériques de conception.

Les activités du laboratoire mixte LC2S entre l'INRS et l'ENSAM ont permis d'approfondir différents axes liés à la conception sûre des équipements de travail ou du système de production. Elles ont notamment permis de proposer différentes approches (AFB + QOQCPC, Modèle d'usage, Méthode EZID) qui permettent de mobiliser l'attention des concepteurs tout au long du processus de conception sur cette double difficulté : l'identification de l'ensemble des dangers (approche multirisques) en envisageant l'ensemble des usages raisonnablement prévisibles d'un futur équipement de travail. Ainsi les acteurs concernés (concepteur, donneur d'ordre, préventeur, ingénieur méthodes et industrialisation...) peuvent disposer de méthodes, modèles et outils de formalisation des connaissances les aidant à prendre en compte les réalités d'usage et les risques associés tout au long du processus de conception d'un équipement de travail.

Les principaux freins à l'appropriation par le concepteur des approches et leur utilisation est le temps de mise en œuvre, la facilité d'utilisation, l'intégration dans ses outils habituels de conception (analyse fonctionnelle, CAO, AMDEC...). L'utilisation des outils de CAO géométriques actuels dans les bureaux d'études pousse le concepteur à porter toute son attention à la conception technique détaillée et à l'élaboration rapide de modèles CAO complets en négligeant les phases d'analyse préliminaire et d'usage (en particulier avec les aspects santé-sécurité) du produit.

6. RÉFÉRENCES

- Blaise, J.-C., Lhoste P., Ciccotelli J. (2003) Formalisation of normative knowledge for safe design, *Safety Science* 41(2-3), pp. 241-261.
- Borutsky, W. (2009). Bond graph methodology: development and analysis of multidisciplinary dynamic system models, Springer Science & Business Media.
- Brunet, M., Riff, J. (2009). L'analyse et l'exploitation de la variabilité gestuelle pour prévenir les TMS. *PISTES*, 11(1). <http://www.pistes.uqam.ca>.
- Cacciabue, P. C. (2004) Human error risk management for engineering systems: a methodology for design, safety assessment, accident investigation and training. *Reliability Engineering & System Safety*, 83(2), pp. 229-240.
- CETIM (2015) Technologies prioritaires 2020 en mécanique , ISBN 978-2-36894-079-2.
- Chen, W. (2014) A quantitative Fuzzy Causal Model for hazard analysis of man-machine-environment system. *Safety Science* 62, pp. 475-482.

- Chinniah, Y., Gauthier F., Lambert S., Moulet F. (2011). Experimental Analysis of Tools Used for Estimating Risk Associated with Industrial Machines, 77 pages. Report R-684. Montreal: IRSST (Research Institute Robert-Sauvé Health and Safety)
- Chinniah, Y. (2015) Analysis and Prevention of Serious and Fatal Accidents Related to Moving Parts of Machinery.” *Safety Science* 75, pp. 163–173.
- Coutarel, F., Caroly, S., Vézina, N., Daniellou, F. (2015). Marge de manœuvre situationnelle et pouvoir d’agir : des concepts à l’intervention ergonomique. *Le travail humain*, 1(78), pp. 9-29.
- Daille-Lefèvre B., R. Roignot, J. Marsot, E. Falconnet and E. Fadier E. (2014) Méthodologie d’aide à la rédaction d’un cahier des charges basé sur l’usage. *19e congrès λμ*, Dijon, France.
- Daille-Lefèvre B., Demarziani A., Etienne A., Marsot J. (2016). Le concept de tâche en conception sûre d’équipements de travail, *MOSIM*, Montréal, Québec, Canada.
- De Galvez N., Marsot J., Martin P., Siadat A., Etienne A (2017). EZID: A new approach to hazard identification during the design process by analysing energy transfers. *Safety Science* 95, pp. 1–14
- Didelot, A. (2001). Thèse - Contribution à l’identification et au contrôle des risques dans le processus de conception. INPL, INRS.
- Directive (2006). Directive 2006/42/CE du Parlement européen et du conseil du 17 mai 2006 relative aux machines et modifiant la directive 95/16/CE (refonte). *Journal officiel de l’Union européenne*, L 527, 24-86.
- Dowlatshahi, S. (2001). The role of product safety and liability in concurrent engineering. *Computers & Industrial Engineering*, 41(2), pp. 187-209.
- Etherton, J. R. (2007) Industrial Machine Systems Risk Assessment: A Critical Review of Concepts and Methods. *Risk Analysis* 27.
- Fadier, E., & De la Garza, C. (2006). Safety design: Towards a new philosophy. *Safety Science*, 44(1), pp. 55-73
- Feno R., Martin P., Daille-Lefevre B., Etienne A., Marsot J., Siadat A. (2016). Safety of Manufacturing Equipment: Methodology Based on a Work Situation Model and Need Functional Analysis”, *Joint Conference on Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced*, Catania (Italie).
- FIM (2015). Guide pratique de l’usine du futur, enjeux et panorama de solutions, Fédération des Industries Mécaniques.
- FoF (2010) Factories of the future. Strategic Multi-annual roadmap. Industrial advisory group, www.effra.eu
- Fraser, I. (2010), Guide pour l’application de la directive Machines 2006/42/CE, CEN Bruxelles, 441 p.
- Ghemraoui, R., L. Mathieu, and N. Tricot. (2009a). Design Method for Systematic Safety Integration. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 58:, pp.161–164.
- Ghemraoui, R., L. Mathieu, and N. Tricot. (2009b). Systematic Human-Safety Analysis Approach Based on Axiomatic Design Principles. *5th international conference on axiomatic design*, ICAD 2009,
- Hasan R., Bernard A., Ciccotelli J., Martin P. (2003) Integrating safety into the design process: Elements and concepts relative to working situation, *Safety Sciences*, Vol 41/2-3, pp. 155-179
- Hale, A., Kirwan, B., & Kjellén, U. (2007). Safe by design: where are we now? *Safety Science*, 45(1–2), pp. 305-327.
- Houssin, R., and Gardoni. M. (2009) “Software Framework for the Approach: Computer Aided Safety Integration in Design Process (CASID).” *Journal of Advanced Manufacturing Systems* 8 (1), pp. 27–45.
- Houssin, R., and Coulibaly A.,. (2011) An Approach to Solve Contradiction Problems for the Safety Integration in Innovative Design Process. *Computers in Industry* 62 (4): pp. 398–406
- INRS (2016) : Modes et méthodes de production en France en 2040. <http://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/prospective-2016/synthese-sante-travail2040.pdf>, 72 p.
- Jouffroy, D., S. Demor, J. Ciccotelli, and P. Martin. (1999) An Approach to Integrate Safety at the Design Stage of Numerically Controlled Woodworking Machines. *Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*. Edited by J. L. Batoz, P. Chedmail, G. Cognet, C. Fortin, Kluwer Academic Publishers,
- Khan, F., S. Rathnayaka, and S. Ahmed. (2015) Methods and Models in Process Safety and Risk Management: Past, Present and Future. *Process Safety and Environmental Protection* 98, pp.116–147.
- Lamy P., Levrat E., Pâques J. J. (2006). Méthodes d’estimation des risques machines : analyse bibliographique, *congrès λμ15*, Octobre, Lille.
- Le Coze, J.-C. (2013). Outlines of a sensitising model for industrial safety assessment. *Safety Science*, 51(1), pp. 187-201.
- Lux A., El-Mouayni I., Daille-Lefèvre B., Etienne A., Siadat A. (2017) Santé et sécurité au travail : quatre approches en conception pour spécifier et simuler des marges de manœuvre pour les futurs opérateurs de production, *Congrès Interntaional de Génie Industriel*, Compiègne 3-5 mai 2017
- Malm T., Venho-Ahonen O., Hietikko M., Stålhane T., de Bésche C., Hedberg J.(2015). From risks to requirements. Comparing the assignment of functional safety requirements, *VTT technology* 241, ISBN 978-951-38-8384-3(URL: <http://www.vttresearch.com/impact/publications>), 79 p.
- Mentes, A., & Ozen, E. (2015). A hybrid risk analysis method for a yacht fuel system safety. *Safety Science*, 79, pp. 94-104
- Moatari-Kazerouni A., Chinniah Y., Agard B. (2014). A proposed occupational health and safety risk estimation tool for manufacturing systems, *International Journal of Production Research*, pp. 4459-4475
- NF EN 16271, (2013). Management par la valeur - Expression fonctionnelle du besoin et cahier des charges fonctionnel - Exigences pour l’expression et la validation du besoin à satisfaire dans le processus d’acquisition ou d’obtention d’un produit. AFNOR.
- Rausand, M., & Bouwer Utne, I. (2009). Product safety – Principles and practices in a life cycle perspective. *Safety Science*, 47(7), pp.939-947.
- Roucoulès, L., Eynard B., Nowak P., Skande A. (2006), Une approche au juste nécessaire de l’intégration métier, en conception vers des solutions alternatives innovantes. *Ingénierie de la conception et cycle de vie des produits*. ed HERMES.
- Sadeghi, L. (2014). Thèse - Aide à la décision pour l’intégration de la sécurité au plus tôt en phase de conception - Approche innovante de reconception de machines Ecole normale supérieure de Cachan.

- Sadeghi L., Siadat A., Marsot J., Dantan J. Y., (2016) Design for Human Safety in Manufacturing System: A Review of Applications of Design Theories and Methodologies and Design Tools and Techniques. *Journal of engineering design* 27, (12), pp. 844–77. doi:10.1080/09544828.2016.1235262.
- Scaravetti D., Nadeau J. P., Pailhes J., Sebastian P. (2005). Structuring of embodiment design problem based on the product lifecycle. *International Journal of Product Development*, Volume 2, Issue 1-2, pp. 47-70.
- Shahrokhi, M., & Bernard, A. (2009). A framework to develop an analysis agent for evaluating human performance in manufacturing systems. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2(1), pp.55-60.
- Sklet, S. (2006). Safety barriers: Definition, classification, and performance. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 19(5), pp. 494-506
- Tapan K. Bose, (2010) - Total Quality of Management. Chapter 10. Basic Decision-making and Problem-solving Tools. Pearson Education India.
- Vink, P., Urlings, I. J. M., & van der Molen, H. F. (1997). A participatory ergonomics approach to redesign work of scaffolders. *Safety Science*, 26(1–2), pp. 75-85