



Caractérisation en conception générale et détaillée du niveau de risque d'un équipement de travail

Nicholas de Galvez, Marwa Amara, Jacques Marsot, Patrick Martin, Cyrille Baudouin

► To cite this version:

Nicholas de Galvez, Marwa Amara, Jacques Marsot, Patrick Martin, Cyrille Baudouin. Caractérisation en conception générale et détaillée du niveau de risque d'un équipement de travail. 19ème Congrès de Maîtrise des Risques et Sécurité de Fonctionnement, Oct 2014, Dijon, France. 8p., 10.4267/2042/56189 . hal-02528939

HAL Id: hal-02528939

<https://hal.science/hal-02528939>

Submitted on 2 Apr 2020

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.

CARACTERISATION EN CONCEPTION GENERALE ET DETAILLEE DU NIVEAU DE RISQUE D'UN EQUIPEMENT DE TRAVAIL

WORKING EQUIPMENT RISK LEVEL CHARACTERIZATION DURING GENERAL AND DETAILED DESIGN STAGES

de Galvez N., Amara M. et Marsot J.
INRS
1 rue du Morvan
CS60027, 54519 Vandoeuvre-lès-Nancy
Tel : +33 3 83 50 20 00
Mail : nicholas.degalvez@inrs.fr
jacques.marsot@inrs.fr

Martin P., Baudouin C.
Laboratoire de Conception
Fabrication Commande
4, rue Augustin Fresnel
Metz Technopole
57078 Metz Cedex 3
Tel : + 33 3 87 37 54 30
Mail : patrick.martin@ensam.eu
cyrille.baudouin@ensam.eu

Résumé

Cette communication présente une nouvelle approche de caractérisation du niveau de risque d'un équipement de travail en phase de conception architecturale et détaillée pour les PME.

A partir du paradigme que les phénomènes dangereux peuvent être associés à la présence d'énergie, nous présentons les résultats d'une étude exploratoire qui met en œuvre le Modèle Fonctionnel Energétique (MFE). Après un rappel de ce dernier, nous présenterons son intérêt et ses limites vis-à-vis de notre problématique. Ces travaux s'intègrent dans le cadre d'une thèse réalisée au sein du laboratoire « mixte » INRS - ENSAM.

Summary

This paper describes a new approach aimed at small and medium sized companies to characterize a risk level for all types of working equipment during the architectural and detailed design stages.

Based on the hypothesis that dangerous phenomena can be linked to the presence of energy, the problem of hazard detection can be focused on the analysis of energy flows within a machine, and their potential links with the future user. Here we present the results of an exploratory study that uses the Energetic Functional Model (MFE). This study take part in a doctoral thesis currently in progress in the common laboratory INRS – ENSAM.

Contexte et problématique

La « conception » est un axe de prévention des risques professionnels dont l'intérêt n'est aujourd'hui plus à démontrer. Cette démarche dite de « prévention intégrée » est depuis le début des années 80 inscrit dans le code du travail. Elle a ensuite été reprise au niveau européen avec la directive dite « Machines » (Directive, 2006) à laquelle est associé un dispositif normatif qui ne cesse de se compléter.

La stratégie de prévention préconisée dans ces textes est centrée autour de l'estimation a priori des risques ; elle fixe comme objectif au concepteur d'équipements de travail d'obtenir le niveau de risque résiduel le plus faible possible compte tenu de l'état de la technique.

Cependant, en dehors de certaines machines¹ « standards » pour lesquelles il existe des normes spécifiques (normes de type C), les concepteurs ne peuvent, pour cette estimation a priori des risques, que s'appuyer sur la norme NF EN ISO 12100 (AFNOR, 2010) pour les principes généraux et des normes spécifiques à un type de risque (NF EN 1005-1 à 5 - AFNOR, 2008) pour l'évaluation de la charge physique par exemple). N'étant pas des spécialistes en prévention, les ingénieurs et techniciens de bureaux d'études ont alors tendance à réaliser cette estimation en fin de projet alors que les choix de conception sont déjà arrêtés. En effet, en plus des difficultés et inhérentes à tout projet de conception pour atteindre les objectifs attendus en matière de qualité, de coût, de délais, de performance, viennent s'ajouter celles liées à la prévention des risques avec de nombreuses incertitudes sur l'impact des choix techniques, réalisés tout au long du processus de conception, sur le niveau de risque final de l'équipement. Par exemple, le choix d'un type d'énergie, d'un matériau, d'une forme géométrique, la disposition relative de différents composants, etc. peuvent être sources de phénomènes dangereux. Du fait de ces difficultés, la prévention des risques est plutôt abordée comme une contrainte de correction et non de conception.

Afin de répondre à cette problématique, nos travaux ont comme objectif de proposer une nouvelle approche de prise en compte de la prévention afin d'assister le concepteur dans l'identification des phénomènes dangereux à partir des données de conception disponibles (cf. figure 1). Le domaine d'application visé est celui de la conception architecturale et détaillée d'une « machine ». C'est en effet essentiellement lors de ces phases que se décident, entre « technologues », les choix techniques.

¹ Ensemble équipé ou destiné à être équipé d'un système d'entraînement, composé de pièces ou d'organes liés. Au sens de la directive 2006/42/CE, le terme « machine » désigne un ensemble équipé ou destiné à être équipé d'un système d'entraînement, composé de pièces ou d'organes liés entre eux dont au moins un est mobile et qui sont réunis de façon solidaire en vue d'une application définie. Il désigne aussi un ensemble de machines qui, afin de concourir à un même résultat, sont disposées et commandées de manière à être solidaires dans leur fonctionnement

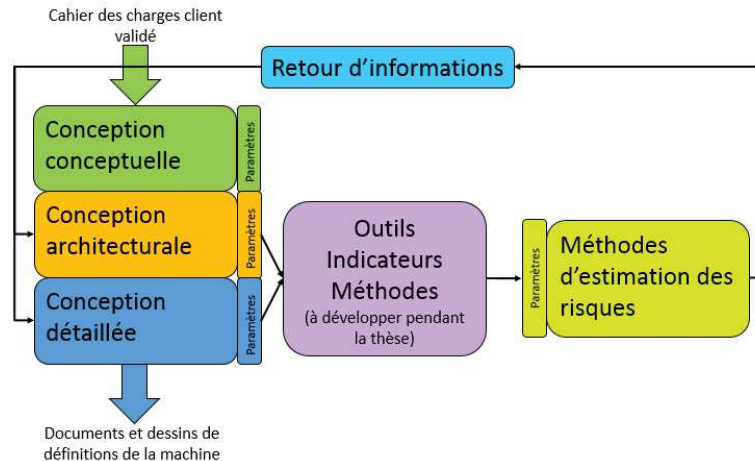


Figure 1. Positionnement et principe de l'approche

Pour cela, cette approche doit être :

- générique par rapport aux types de risques à identifier (mécanique, lié au non-respect des principes ergonomiques, chimique, biomécanique, etc.), aux domaines d'activité des entreprises concernées;
- inductive car on va se baser sur les paramètres de conception (causes) pour déduire les phénomènes dangereux (effets);
- dynamique et traçable pour garantir la prise en compte de l'évolution des caractéristiques et de la configuration des composants du système au cours de la conception;
- intégrée et/ou interconnectable avec les outils et méthodes de conception actuels pour s'assurer de son interopérabilité.

Synthèse de la littérature

Bien que l'intégration de la prévention des risques professionnels à la conception des équipements de travail ait été largement étudiée par la communauté scientifique, peu de travaux s'appliquent à notre problématique.

On recense en effet de nombreux articles (Cacciabue, 2004; Jouffroy, 1999; Kjellén, 2007) qui s'appuient sur une structuration particulière du processus de conception pour réduire les risques. L'identification des phénomènes dangereux repose alors essentiellement sur la coopération entre les différents acteurs de la conception lors de revues de projet. Ces travaux ne s'appliquent donc pas à notre problématique qui est d'assister et de guider le(s) concepteur(s) entre ces revues de projet.

D'autres publications portent plus spécifiquement sur l'évaluation des risques, c'est à dire la détermination d'un indice permettant d'ordonner les risques potentiels. Là encore ces travaux ne s'appliquent pas directement à notre problématique. En effet, les approches proposées sont d'une part, spécifiques à une famille de risque: mécanique (Hu *et al.*, 2012), chimique (Si *et al.*, 2012), principes ergonomiques pour les opérateurs (Asadzadeh *et al.*, 2013), etc.). D'autre part, elles sont essentiellement centrées sur la façon de combiner des paramètres pour l'évaluation et non pour l'identification. Nous citerons cependant les travaux de (Coulibaly *et al.*, 2008) qui associent aux facteurs classiques d'évaluation (gravité et fréquence) un facteur (FRis) indiquant la présence ou non d'un risque. Les auteurs proposent trois paramètres de type booléen qui ne sont pas des paramètres directs de conception. Il s'agit en effet de l'existence ou non d'un phénomène dangereux (Ph), l'existence ou non d'une zone dangereuse (Zo) et l'intervention ou non d'un opérateur dans la zone dangereuse (HIn). Nous proposons, dans le sens du facteur FRis et de son facteur Ph, de montrer la pertinence de l'utilisation des flux énergétiques pour l'estimation des risques.

Par ailleurs, de précédents travaux de recherche menés par l'INRS sur l'intégration de la prévention à la conception nous ont conduits à proposer un modèle générique de situation de travail (MOSTRA) (Hasan, 2002). Si ce modèle définit bien l'ensemble des interdépendances entre les différents « concepts » d'une situation de travail, notamment entre ceux de « Solution technique » et de « Phénomènes dangereux » (cf. figure 2), il ne définit pas les relations entre les paramètres de ces concepts, ce qui est l'objet de notre approche. Ce modèle pourra toutefois être utilisé de façon complémentaire afin de structurer et capitaliser ces paramètres.

Nous avons également identifié dans cette revue de la littérature deux approches qui se rattachent directement à notre problématique et qui répondent aux quatre critères attendus (générique, inductif, dynamique et intégré): le système multi agent « PAG » et la méthode « IRAD ».

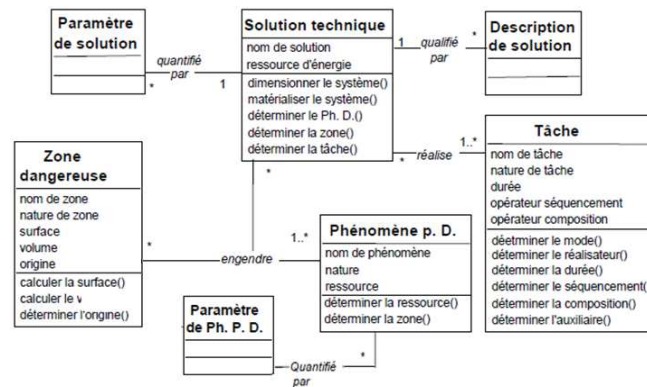


Figure 2. Illustration des liens entre les concepts de « solution technique » et de « phénomène dangereux » du modèle MOSTRA (Hasan, 2002)

Le PAG (Performance Analysis aGent) proposé par Shahrokhi et Bernard (Shahrokhi & Bernard, 2009) est un système expert d'analyse de performance d'une situation de travail. 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). De ce fait, si les paramètres d'entrée de ce système expert sont bien des paramètres de conception, ils concernent plus spécifiquement la tâche prescrite (mode opératoire, cadence, etc.) et moins les paramètres liés au système technique. De plus, le PAG 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 lors de la définition de l'architecture du futur équipement de travail.

De son côté, la méthode IRAD (Innovative Risk Assessment Design) proposée par Ghemraoui (Ghemraoui, 2009) repose sur les méthodes de conception systématique et axiomatique afin de faire évoluer simultanément le processus de conception et celui de réduction des risques. Cela implique d'intégrer dans le cahier des charges des fonctions de sécurité pour qu'elles soient traitées en parallèle des fonctions techniques. C'est en cela que cette approche diffère de la nôtre. En nous appuyant sur de récents travaux menés conjointement avec le CETIM² sur l'élaboration de cahier des charges, nous partons en effet du principe que, plutôt que d'ajouter des fonctions de sécurité, il est préférable de spécifier que chaque fonction doit être sûre en les caractérisant avec des paramètres d'usages et/ou de santé-sécurité. Le concepteur aura alors toutes les données nécessaires pour définir des principes et des solutions techniques sûres répondant aux fonctions demandées et aux usages prévisibles (Daille-Lefevre *et al.*, 2012).

Cette étude bibliographique centrée sur l'intégration de la prévention des risques professionnels à la conception des équipements de travail montre qu'aucune des approches proposées ne répond totalement à notre problématique. L'identification des phénomènes dangereux potentiels, à partir des paramètres de conception générés en phase de conception architecturale et détaillée, reste en effet peu étudiée.

Plusieurs de ces travaux s'accordent toutefois sur le fait que les phénomènes dangereux sont étroitement liés à la notion d'énergie (Ghemraoui, 2009; Haddon, 1973; Kjellén, 2000). Les phénomènes dangereux d'origine mécanique, électrique, thermique et ceux liés aux nuisances physiques (bruit, vibrations, rayonnements électromagnétiques) peuvent en effet être reliés à des paramètres énergétiques (énergie potentielle, énergie cinétique, puissance électrique, etc.). En ce qui concerne les risques engendrés par le non-respect des principes ergonomiques, ils peuvent être assimilés à l'écart entre les performances physiques (énergie) demandées aux opérateurs pour accomplir la tâche souhaitée, du fait des choix techniques, et celles qu'il peut fournir (donnée dans les normes). Enfin, pour les risques liés aux matériaux et aux produits, la notion d'énergie doit être étendue aux « classes de danger » qui les caractérisent (Vincent *et al.*, 2003).

Sur la base de cette hypothèse, notre problématique d'identification des phénomènes dangereux revient alors à identifier et à étudier la circulation des flux d'énergie. Pour la suite de nos travaux, nous nous sommes donc appuyés sur le modèle fonctionnel énergétique (MFE). Initialement développé pour l'analyse de système existant (Constant, 1996), ce modèle basé sur la notion de circulation du flux d'énergie a ensuite été complété pour guider les concepteurs lors de la conception d'un produit (Roucoules, 1999)(Roucoules *et al.*, 2006).

Ce modèle repose sur quatre éléments de représentation (cf. figure 3) :

- Frontière : elle délimite un système, sous système ou composant par rapport à son environnement externe,
- Surface fonctionnelle : elle est une partie de la frontière désignant les surfaces par lesquelles le système, sous système ou composant a des relations avec son environnement. Elle est traversée par une grandeur extensive (quantité de matière, de mouvement, énergie, ...),
- Liaison : une liaison est une association de deux surfaces fonctionnelles n'appartenant pas au même composant, caractérisant ainsi leur interface,
- Association interne : elle associe deux surfaces fonctionnelles appartenant à un même composant. Il existe des conducteurs (C), semi-conducteurs (SC) ou isolants (I).

La figure 3 ci-dessous résume ces quatre éléments en modélisant un sous-système composé d'une poulie encastrée avec un arbre sur lequel on a appliqué un couple moteur.

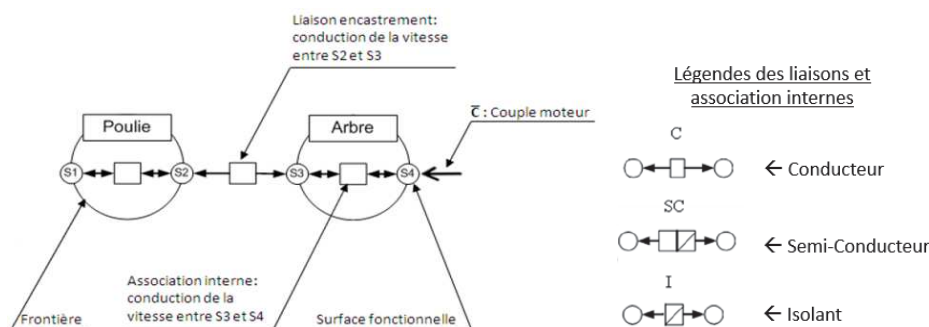


Figure 3. Illustration des éléments de modélisation du modèle fonctionnel énergétique pour un ensemble poulie-arbre

Ce modèle permet également de prendre en compte l'opérateur. Ce dernier est représenté de la même manière qu'un composant, avec une frontière et des surfaces fonctionnelles qui le relie au système étudié. Par ailleurs, le fait que ce modèle ait déjà fait l'objet d'une informatisation (Constant, 1996) répond également à l'un des critères vis-à-vis du caractère opérationnel de l'approche envisagée.

Cette synthèse de la littérature montre une grande diversité dans les outils et méthodes proposés aux concepteurs pour la prévention des risques en conception. Elle montre également les différences dans les manières d'aborder cette question de la prévention (revue de projet, « vision » concepteur) et du travail nécessaire pour les mettre en œuvre (intégré ou en fin de processus de conception). Dans le but de répondre à ces incertitudes, nous nous sommes intéressés à l'utilisation du MFE pour la prévention dans le cadre de notre étude.

MFE et identification des phénomènes dangereux

Afin d'évaluer l'intérêt du MFE, nous l'avons appliqué de façon exploratoire à notre problématique vis-à-vis de l'identification des phénomènes dangereux.

Après avoir défini les bases théoriques, nous avons ensuite réalisé a posteriori le MFE d'une scie à ruban agroalimentaire, puis nous avons analysé cette modélisation pour vérifier si elle permettait effectivement de retrouver les phénomènes dangereux qui sont présents sur cette gamme de machines et qui sont bien connus (AFNOR, Juin 2010).

1. Approche théorique

Comme rappelé précédemment, le MFE, nous permet d'obtenir une vue globale et uniforme de la circulation des différents flux d'énergie au sein d'un système sociotechnique puisque l'opérateur peut également être intégré dans la modélisation.

Sur la base de l'hypothèse retenue, l'identification des phénomènes dangereux d'un système revient à identifier les interactions possibles entre les opérateurs et les flux d'énergie présents.

Etant donné que nous partons d'un cahier des charges basé sur les usages qui ne fait pas apparaître de fonction de sécurité en tant que telle, le MFE initial n'intégrera aucun moyen de protection. Les opérateurs présents peuvent alors être potentiellement en interaction avec tous les flux d'énergie identifiés via les surfaces fonctionnelles du système.

L'identification des phénomènes dangereux devient alors systématique. Le concepteur peut alors être alerté afin de mettre en place des « liaisons » contrôlant le passage de ces énergies vers l'opérateur et inversement. L'énergie peut en effet être apportée par l'opérateur, (mouvement brusque sur une arête vive par exemple (cf. figure 4)).

Selon la nature des énergies (donc des phénomènes dangereux) et leur niveau, les liaisons devront soit interdire le passage du flux d'énergie (contact avec des éléments mobiles de transmission par exemple), soit le contrôler (limitation des efforts à fournir par l'opérateur par exemple). Ces liaisons représentent alors les moyens de protection.

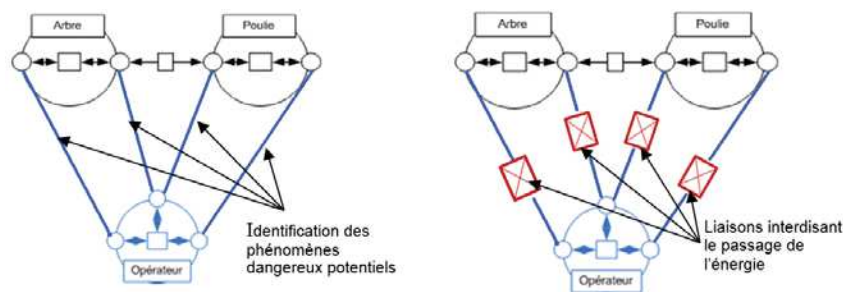


Figure 4. Identification et prévention des transferts d'énergie vers l'opérateur

Cette modélisation des flux d'énergie du futur équipement de travail peut être réitérée pour étudier les différentes phases de vie du produit à concevoir (maintenance, utilisation, réglage, installation, démontage, etc.). Elle peut alors être exploitée pour identifier les interactions potentiellement dangereuses entre les flux énergétiques (de différents types) et les opérateurs durant ces phases. Des alertes sont déclenchées pour indiquer aux concepteurs la nécessité de mettre en place des solutions de protection vis-à-vis de ces interactions afin d'assurer un niveau de sécurité maximal sur l'ensemble du cycle de vie de l'équipement.

2. Application au cas de la scie

Nous avons appliqué cette approche sur une scie à ruban alimentaire (cf. figure 5). A partir du schéma cinématique de cette machine nous avons établi son MFE lors de différentes phases de vie (utilisation, réglage, nettoyage,...).

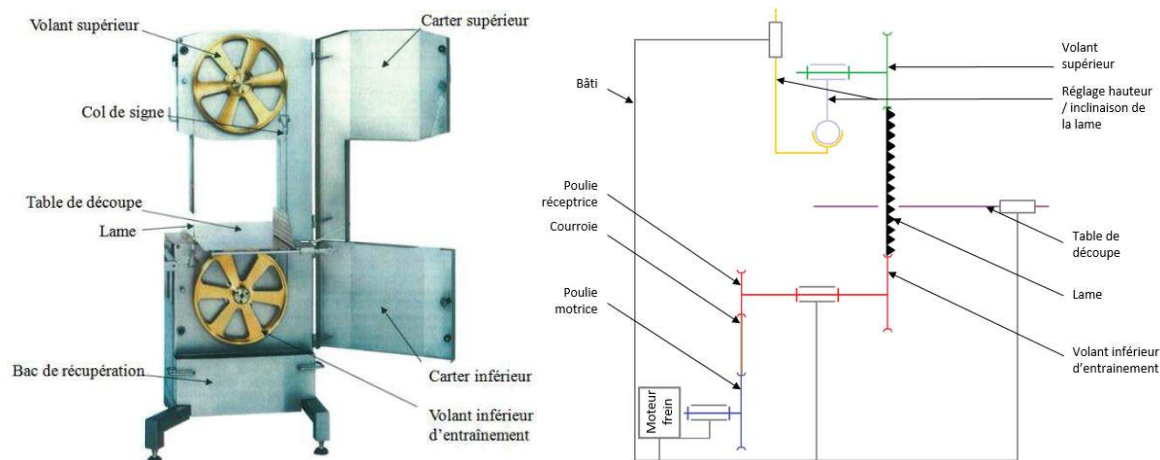


Figure 5. Scie à ruban alimentaire et son schéma cinématique en fonctionnement

Le MFE complet de la scie alimentaire en phase d'utilisation pour la découpe de viande est présenté en annexe. Prenons un extrait de ce MFE (cf. figure 6), par exemple la représentation de la zone de travail: ensemble volants supérieur et inférieur avec lame et morceau de viande. En appliquant la démarche décrite précédemment nous identifions de façon systématique :

- 3 transferts possibles d'énergie mécanique pour lesquelles il faut isoler l'opérateur (volant supérieur, inférieur et lame),
- 1 liaison de contact avec le produit manipulé (la viande). Dans le cas présent, la viande se présente sous forme congelée. Il faut donc isoler l'opérateur du froid.
- 1 liaison du fait de l'énergie que doit amener l'opérateur pour pousser la viande sur la lame : il faut donc s'assurer de l'adéquation de cet effort avec les règles de l'ergonomie.

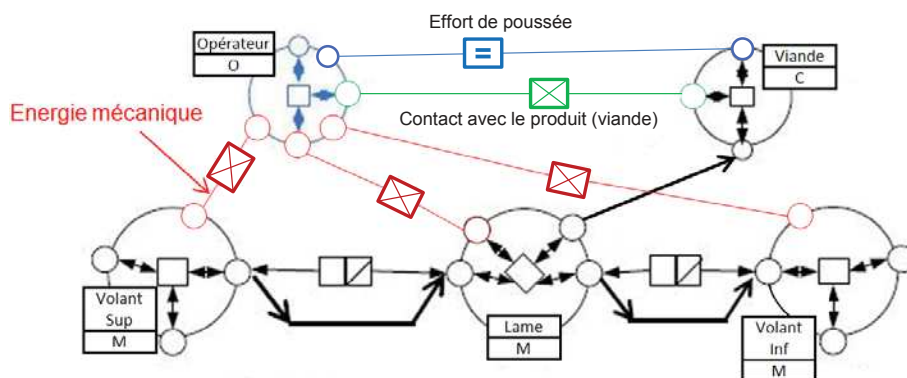


Figure 6. Application du MFE à notre problématique

La confrontation de ce modèle avec les règles de protection applicables à ces machines a permis de retrouver pour chacune de ces liaisons des solutions techniques de protection effectivement mises en place par les concepteurs de ces machines :

- bâti machine + carters mobiles pour les volants supérieur et inférieur,
- protecteur réglable pour la lame,
- table mobile avec ou sans préhenseur pour minimiser et séparer dans l'espace les efforts de poussée

Pour le contact avec la viande, la mesure prise ne s'applique pas à la machine mais à l'opérateur et plus généralement à l'organisation du travail. Il est en effet préconisé de porter des gants de protection.

Les alertes identifiées par le MFE sont donc validées.

Discussion

Ce premier résultat montre l'intérêt de cette approche basée sur la modélisation des flux énergétiques (mécanique, électrique, pneumatique, hydraulique, thermique) et intégrant le(s) opérateur(s) pour l'identification systématique des phénomènes dangereux. Ce modèle MFE peut donc être considéré comme un objet intermédiaire de conception et de communication (Jeantet, 1998) permettant d'analyser les interactions potentielles entre les flux d'énergies d'une machine et le(s) opérateur(s) et ce, et dès la phase de conception architecturale et pour les différentes phases du cycle de vie de l'équipement. Le concepteur, ainsi alerté des risques potentiels, peut envisager la mise en place de mesures de protection selon la hiérarchie préconisée par la directive « Machines » : prévention intrinsèque (changement de solution), protecteurs, dispositifs de protection et enfin informations pour l'utilisation de la machine.

Cette étude exploratoire a également permis de montrer qu'en élargissant la notion d'énergie, ce MFE peut également être exploité pour identifier les phénomènes dangereux liés aux contacts avec des produits/matériaux (risque chimique par exemple) ou encore les risques d'origine biomécanique (liaison d'effort entre l'opérateur et un élément de machine). Par ailleurs, dans l'hypothèse où l'on connaît également les règles de transformation ou de transfert d'énergie (bruit lié à des vibrations mécaniques, échauffement provoqué par des frottements mécaniques, etc.), ce modèle peut également être utilisé pour identifier les risques induits par ces transformations.

Un autre intérêt de ce modèle est qu'il a été développé dans l'optique d'être informatisé ce qui permet d'envisager son interconnexion avec d'autres outils logiciels utilisés par les concepteurs (CAO par exemple).

Conclusion

L'identification des phénomènes dangereux durant l'activité de conception reste un aspect peu abordé dans la littérature. Cette étape, qui constitue le point de départ de toutes les démarches d'évaluation des risques est en effet souvent laissée à la discrétion des concepteurs. Ils doivent pour cela se baser sur les retours d'expériences disponibles, leur propre expérience et/ou le partage de connaissances interdisciplinaires (revues de projet).

Afin que le concepteur puisse être assisté dans cette identification lorsqu'il travaille de façon autonome (entre les revues de projet), l'approche proposée doit selon nous présenter certaines caractéristiques. Elle doit être générique par rapport aux types de risque et inductive afin de les identifier à partir des paramètres de conception. Elle doit être indépendante vis-à-vis du type de produit conçu et de son processus de conception, et enfin elle doit être dynamique, traçable et applicable au bon moment pour suivre l'évolution des risques en fonction de l'avancement du projet de conception.

Après avoir montré qu'aucun des travaux présentés dans la littérature ne répond totalement à notre problématique, nous avons retenu une approche basée sur l'utilisation de la notion d'énergie. Nous avons utilisé pour cela le « Modèle Fonctionnel Energétique » proposé par Roucoules pour guider les concepteurs lors de la conception d'un produit. Comme le montre les résultats de l'étude exploratoire présentée ici, cette modélisation apporte des premiers éléments de réponse intéressants pour l'identification des phénomènes dangereux en phase de conception architecturale. Une fois le schéma cinématique du projet défini, les concepteurs sont donc guidés, en débutant par la modélisation des flux d'énergies jusqu'à l'identification des phénomènes dangereux, en passant par la prise en compte des interactions potentielles entre le futur utilisateur et les sous-systèmes.

Avant de poursuivre sur l'exploitation de ce MFE, nous avons engagé des travaux sur l'identification des paramètres de conception (nature et type) générés et exploités au cours du processus de conception. Nous nous appuyons pour cela sur les récents travaux de thèse de Godot (2013) qui visaient à définir un cadre méthodologique de conception pour les PME du secteur de la mécanique prenant en compte leurs besoins économique, financier et technique lors d'un projet.

Une fois ce travail réalisé, nous reprendrons le MFE afin de vérifier s'il peut être utilisé tout au long du processus de conception pour établir des liens (par exemple en caractérisant les surfaces fonctionnelles et les liaisons) entre les paramètres de conception et ceux utilisés pour l'identification et l'évaluation des risques.

Au final, cette approche recherchée vise à mieux maîtriser les risques liés à l'utilisation d'un équipement de travail en réduisant les incertitudes entre les paramètres générés tout au long du processus de conception et le niveau de risque final de cet équipement. Une fois alerté des risques potentiels, le concepteur reste maître du choix des mesures de prévention et de leur intégration.

Remerciements

Ces travaux sont réalisés dans le cadre du laboratoire commun LC2S entre l'ENSAM et l'INRS. Nous remercions les différentes parties qui ont contribué à la relecture de cette communication.

Références

- AFNOR, 2008, NF EN 1005-1 à 5 - Sécurité des machines - Performance physique humaine.
- AFNOR, 2010, NF EN ISO 12100 - Sécurité des machines - Principes généraux de conception.
- AFNOR, Juin 2010, NF EN 12268 Machines pour les produits alimentaires - Scies à ruban - Prescriptions relatives à la sécurité et à l'hygiène.
- Asadzadeh, S. M., Azadeh, A., Negahban, A., & Sotoudeh, A. (Cartographer), 2013, Assessment and improvement of integrated HSE and macro-ergonomics factors by fuzzy cognitive maps: The case of a large gas refinery.
- 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), 229-240.
- Constant, D., 1996, *Contribution à la spécification d'un modèle fonctionnel de produits pour la conception intégrée de systèmes mécaniques*. Université Joseph Fourier Grenoble I.
- Coulbaly, A., Houssin, R., & Mutel, B., 2008, Maintainability and safety indicators at design stage for mechanical products. *Computers in Industry*, 59(5), 438-449.
- Daille-Lefevre, B., Fadier, E., Marsot, J., Roignot, R., & Falconnet, E., 2012, Sécurité des machines : proposition d'une démarche de spécifications basée sur l'analyse fonctionnelle du besoin et la notion de situation de travail. *Lambda Mu* 18.
- 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), L 527 C.F.R. (2006).
- Ghemraoui, R., 2009, *Méthodologie de conception innovante intégrant la sécurité des utilisateurs : application aux liaisons tracteur-outils*. (Docteur de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan Mécanique - Génie Mécanique - Génie Civil), ENS Cachan. (ENSC-2009-190)

- Godot, X., 2013, *Interaction Projet/Données lors de la conception de produits multi-technologiques en contexte collaboratif*. Spécialité conception, Doctorat de l'Ecole Nationale d'Arts et Métiers. 3 juillet 2013
- Haddon, W., 1973, Energy damage and the 10 countermeasures strategies. *J Trauma*, 13(4), 321-331.
- Hasan, R., 2002, *Contribution à l'amélioration des performances des systèmes complexes par la prise en compte des aspects socio-techniques dès la conception : proposition d'un modèle original de situation de travail pour une nouvelle approche de conception*. Université Henri Poincaré, Nancy I.
- Hu, J., Zhang, L., & Liang, W., 2012, An adaptive online safety assessment method for mechanical system with pre-warning function. *Safety Science*, 50(3), 385-399. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2011.09.018>
- INRS, 2014, MECAPREV – Récit d'accidents, <https://machines-sures.inrs.fr/mecaprev/pages/index.seam?cid=408379>
- Jeanet, A., 1998, Les objets intermédiaires dans la conception - Eléments pour une sociologie des processus de conception. *Sociologie du Travail*, n°3/98.
- Jouffroy, D., 1999, *Vers une démarche d'intégration de la sécurité à la conception des machines à bois semi-automatisées. Application au développement d'un système de captage des poussières pour défonceuse à commande numérique.*, " Doctorat de l'Université Henri Poincaré Nancy 1, spécialité Sciences et Technologies Industrielles, 1er mars 1999.
- Kjellén, U., 2000, *Prevention of accidents through experience feedback*. London.
- Kjellén, U., 2007, Safety in the design of offshore platforms: Integrated safety versus safety as an add-on characteristic. *Safety Science*, 45(1-2), 107-127. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2006.08.012>
- Roucoules, L., 1999, *Méthodes et connaissances : contribution au développement d'un environnement de conception intégrée*. Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Roucoules, L., Eynard, B., Nowak, P. & Skander, 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.
- 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), 55-60.
- Si, H., Ji, H., & Zeng, X., 2012, Quantitative risk assessment model of hazardous chemicals leakage and application. *Safety Science*, 50(7), 1452-1461.
- Vincent, R., Bonhoux, F., Mallet, G., Iparraguirre, J.-F., & Rio, S., 2003, *Méthodologie d'évaluation simplifiée du risque chimique : un outil d'aide à la décision*.

Annexe

Modèle fonctionnel énergétique « mécanique » de la phase d'utilisation d'une scie à ruban lors de la découpe

