



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/10985/19756>

To cite this version :

Bruno DAILLE-LEFEVRE, Jacques MARSOT, Patrick MARTIN - Industrie du futur : aide à l'identification des phénomènes dangereux lors de la conception de machines flexibles - In: MOSIM, Maroc, 2020 - 13ème Conférence internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation (MOSIM) - 2020

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu



INDUSTRIE DU FUTUR : AIDE A L'IDENTIFICATION DES PHENOMENES DANGEREUX LORS DE LA CONCEPTION DE MACHINES FLEXIBLES

B. DAILLE-LEFEVRE, J. MARSOT

P. MARTIN

Institut national de recherche et de sécurité (INRS), 1 rue du Morvan, 54519 Vandoeuvre- les-Nancy cedex, France
bruno.daille-lefevre@inrs.fr, jacques.marsot@inrs.fr

Arts et métiers (Ensam), campus de Metz, LCFC, 4 rue Augustin Fresnel, 57078 Metz, France
patrick.martin@ensam.eu

RESUME : Les concepteurs de machines industrielles doivent légalement évaluer les risques qu'elles présentent, ce qui passe obligatoirement par l'identification des phénomènes dangereux mis en jeu. Pour les aider dans cette tâche, le modèle EZID (Energy analysis for systematic haZard Identification during Design) a été imaginé. Celui-ci se base sur le postulat suivant : les phénomènes dangereux n'existent qu'en présence d'énergies. Dans ce cas, identifier les phénomènes dangereux revient à suivre les flux d'énergies entrants dans la machine, transmis d'un élément à l'autre, diffusés ou transformés. Si la pertinence de ce modèle a été montrée dans le cadre de la conception d'une machine spéciale mono tâche, qu'en est-il lorsqu'il est appliqué sur des machines flexibles répondant au paradigme de l'industrie du futur ? C'est à cette question que tente de répondre cet article. Pour ce faire, la méthode EZID a été appliquée à un cas réel de conception d'un îlot de fabrication flexible. Les résultats sont également comparés à ceux obtenus avec une méthode classique d'identification des phénomènes dangereux.

MOTS-CLES : Gestion des risques, Phénomène dangereux, Conception / Innovation, Industrie 4.0, Santé et sécurité.

1 INTRODUCTION

Dans de nombreux pays, la sécurité des machines mises sur le marché est inscrite dans la loi. En Europe, elle porte le nom de « directive machines » (European parliament and council, 2006) et elle est retranscrite dans les textes de loi des pays membres. Cette directive est applicable quel que soit le paradigme industriel. Le concept d'« industrie du futur » n'échappe donc pas à cette règle. Charge aux concepteurs de machines de répondre en tous points à ces exigences de santé et sécurité vis-à-vis des utilisateurs de ces machines. Pour aider ces concepteurs, la directive « machines » présente un synoptique pour identifier, évaluer puis réduire les risques potentiellement présents sur une machine.

Si plusieurs méthodes ont été proposées pour assister les concepteurs dans cette action (Lamy P. et Charpentier P, 2009 ; Gauthier *et al.*, 2018), elles portent pour la plupart sur l'étape finale d'évaluation. Inversement, l'étape initiale d'identification des phénomènes dangereux est peu outillée. Afin de pallier ce manque, la méthode, EZID (Energy analysis for systematic haZard Identification during Design) est proposée par Nicholas De Galvez (De Galvez N. *et al.*, 2017).

Cette méthode, mise au point dans un cadre industriel classique, offre-t-il la même aide au concepteur confronté aux attentes de l'industrie du futur (FOF, 2013), (Veltz P. et Weil T., 2015) ? C'est la question à laquelle va tenter de répondre cet article, confrontant l'utilisation d'EZID pour la conception d'un îlot de production flexible répondant aux critères de l'industrie du futur. Les résultats seront comparés avec ceux obtenus par une analyse classique basée sur l'utilisation d'une liste des phénomènes dangereux.

2 CONTEXTE

2.1 Démarche de prévention intégrée

Comme indiqué en introduction, ces travaux s'inscrivent dans le cadre de la mise en application de la démarche de prévention intégrée qui fixe comme objectifs aux concepteurs de machines d'obtenir le niveau de risque résiduel le plus faible possible compte tenu de l'état de la technique. Elle s'articule autour de 2 processus, celui de l'« appréciation des risques » et celui de la « réduction des risques » (cf. Figure 1).

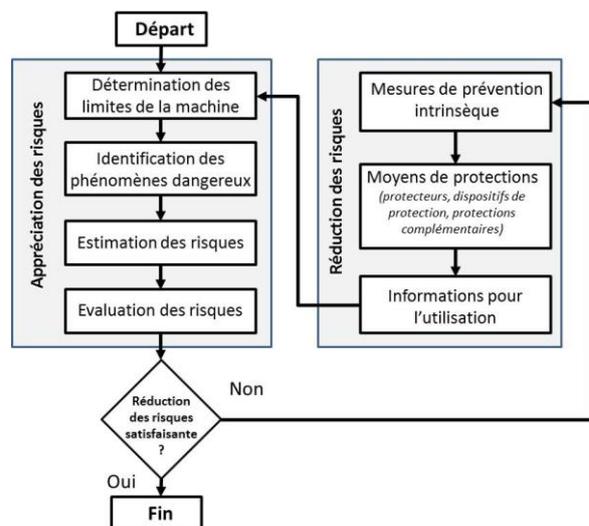


Figure 1 : représentation simplifiée de la démarche de prévention intégrée

Il est donc demandé aux concepteurs de machines, tout au long du processus de conception, de répertorier tous les phénomènes dangereux présents, en s'appuyant par exemple sur la liste des phénomènes dangereux donnée en annexe de la norme NF ISO EN 12100 (AFNOR, 2010), puis de les évaluer avant de les éliminer ou les réduire. De plus, il leur est demandé d'envisager pour cela tous les cas d'utilisation de la future machine, y compris ce que la directive « machines » appelle les « mauvais usages raisonnablement prévisibles ¹ ».

Les retours d'expérience de la part des entreprises qui conçoivent des machines spéciales, et qui pour la plupart appartiennent à des PME, montrent que l'identification des phénomènes dangereux s'appuie le plus souvent sur le savoir-faire et les connaissances des concepteurs eux-mêmes avec parfois le recours à un expert en sécurité des machines (Marsot J., 2015). En ce qui concerne l'établissement des scénarios d'usages, on constate également qu'il se limite le plus souvent aux modes de fonctionnement principaux (production) dans les conditions nominales usages.

2.2 Industrie du Futur

A ce cadre légal, évoqué dans le paragraphe précédent, s'ajoute désormais un nouveau paradigme industriel à prendre en compte par le concepteur : l'industrie du futur. Ce concept est vaste mais peut se synthétiser dans le domaine des équipements de travail à une plus grande flexibilité. L'objectif visé est une adaptation rapide des moyens et des ressources aux demandes de produits à réaliser, en termes de volumes, de variantes, de personnalisation. Cette flexibilité entraîne pour les concepteurs la nécessité de prendre en compte un nombre conséquent de scénarios d'usages.

A cette difficulté, s'ajoute l'identification des nouveaux risques pouvant être introduits par les technologies de production avancées qui supportent cette flexibilité (robots mobiles, collaboratifs, fabrication additive, etc.) (Martin P. *et al.*, 2019).

En conclusion de ce chapitre, l'exhaustivité demandée dans l'identification des scénarios d'usage et des phénomènes dangereux est de la responsabilité des concepteurs de machines et elle s'ajoute aux difficultés déjà nombreuses auxquelles ils sont confrontés (qualité, coûts, délais, etc.). Tout outil ou démarche pouvant le guider sera donc apprécié, tant pour définir les usages de la machine que pour identifier les phénomènes dangereux.

En ce qui concerne l'identification des usages, cette problématique ne sera pas abordée dans cet article. Il faut toutefois noter qu'il existe plusieurs méthodes et techniques issues de l'ergonomie déclinées sous la forme de modèle en vue d'être intégré au processus de conception (Sun *et al.*, 2019 ; Demarziani A. *et al.*, 2019). La suite

de cet article sera donc centrée sur la problématique d'identification des phénomènes dangereux.

3 EZID (Energy Analysis For Systematic Hazard Identification During Design)

Pour aider le concepteur de machines à répertorier de façon systématique les phénomènes dangereux, Nicholas De Galvez (De Galvez N. *et al.*, 2017), a proposé une démarche dénommée EZID (Energy analysis for systematic haZard Identification during Design). Elle repose sur le postulat que les phénomènes dangereux ne se manifestent qu'en présence d'énergie, mécanique, électrique, hydraulique, gravitationnelle... ou humaine. L'identification des phénomènes dangereux se résume alors à celle des énergies entrant dans la machine et au suivi de leur transmission et transformation entre les éléments la constituant.

Pour mettre en œuvre cette démarche, De Galvez s'est notamment appuyé sur le modèle fonctionno-structurel (Constant D., 1996). Initialement développé pour l'analyse de système complexe, ce modèle basé sur la notion de circulation des flux d'énergies a été complété pour la conception de produit (Roucoules L. *et al.*, 2006). Comme représenté par la figure 2 ci-après, ce modèle repose sur quatre éléments de représentation :

- une frontière qui délimite un composant,
- des surfaces fonctionnelles qui désignent les interfaces par lesquelles le composant a des relations avec son environnement,
- des liaisons qui associent deux surfaces fonctionnelles n'appartenant pas au même composant
- les associations internes qui associent deux surfaces fonctionnelles appartenant à un même composant.

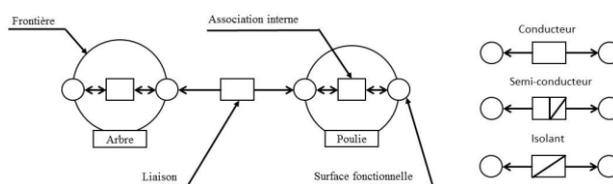


Figure 2 : Choix graphique du modèle fonctionno-structurel de Constant (Constant D., 1996)

4 CAS D'APPLICATION

Dans le but d'explorer les spécificités et les conséquences du contexte d'industrie du futur vis à vis de la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles, l'INRS a engagé un projet de recherche associant sciences de l'ingénierie et sciences humaines. Un des axes de ce projet mené en collaboration avec l'ENSAM² porte sur la conception d'un îlot flexible de production. Le but de cet axe est bien, de l'écriture du cahier des charges jusqu'à sa réalisation, de repérer et de palier aux difficultés précédemment évoquées à savoir l'identification de l'ensemble des phénomènes dange-

¹ 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

² LC2S : Laboratoire mixte pour la Conception Sûre de Situations de travail

reux en envisageant l'ensemble des usages raisonnablement prévisibles de la future machine. Pour ce faire, il a été imaginé une combinaison de deux postes de travail travaillant sur un même ensemble de pièces (cf. figure 3) mais pouvant s'adapter à des modes opératoires différents.

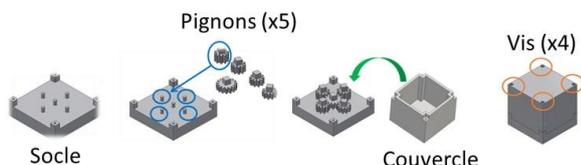


Figure 3 : illustration de la tâche d'assemblage envisagée

De même, pour illustrer la flexibilité en termes de ressources, l'un des postes peut être tenu par un opérateur ou par un robot collaboratif (cf. Figure 5).

Cela donne au final six scénarios d'usages différents, allant du simple partage d'espace de travail, à de la collaboration indirecte ou directe nécessitant la participation de l'ensemble des ressources, humaines ou robotisée, à la réalisation de la même tâche.

5 APPLICATION D'EZID

Pour rappel, la méthode EZID permet d'identifier les phénomènes dangereux présents sur une machine en suivant les flux d'énergies. Cette identification revient donc à celle des surfaces fonctionnelles. Elles représentent en effet les interfaces par lesquelles sont échangées les énergies dans le système. Des liaisons « isolantes » doivent donc être envisagées par le concepteur pour éviter ou réduire les échanges d'énergies entre ces surfaces fonctionnelles et les opérateurs.

Nous développons ci-après le résultat de l'application d'EZID lors des phases de spécifications et conception architecturale de cet îlot pour les six scénarios d'usage de la phase de production évoqués précédemment. L'analyse des autres phases de vie (montage, maintenance, réglage, démontage) n'est pas abordée dans cet article.

5.1 Phase de spécifications

Les différents éléments connus à ce stade sont les pièces à assembler : socle, couvercle, pignons, vis et l'ensemble monté. L'îlot peut également être ajouté en tant qu'objet à concevoir. Selon les principes définis par EZID, chacun de ces éléments présentent par défaut les risques potentiels suivants (cf. figure 4) :

- risques mécaniques (choc, coupure, piqure) dus à la forme (arêtes vives par exemple) des pièces en cas de contact (énergie mécanique apportée par l'opérateurs (SF 7 à 12)
- risques mécaniques (choc écrasement en cas de chute ou basculement) dus à l'énergie potentielle de la masse des pièces et de l'îlot (SF 1 à 6)

- risques « chimiques » liés aux matériaux utilisés pour ces produits (SF 13 à 18)

Par ailleurs, comme il est envisagé de réaliser manuellement l'approvisionnement, l'évacuation ainsi que tout ou partie de l'assemblage des pièces, les risques potentiels liés au non-respect des principes ergonomiques (SF 19 à 23) sont à envisager pour ces opérations.

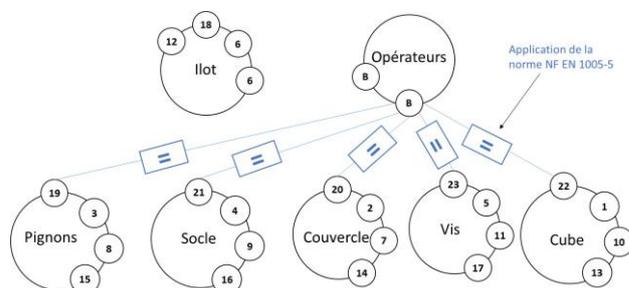


Figure 4 : Modèle énergétique à l'issue de la phase de spécification

Cette première analyse permet d'identifier 23 surfaces fonctionnelles, donc 23 phénomènes dangereux : 15 peuvent déjà être considérés comme traités. Les données disponibles sont à ce stade insuffisantes pour évaluer les 8 autres (cf. tableau I). A noter qu'à ce stade, les surfaces fonctionnelles identifiées sont indépendantes des scénarios d'usages.

| SF | Energie | Mesures de protection |
|----|--------------------|---|
| 1 | Masse Cube | La masse est suffisamment faible. Aucune mesure de protection requise |
| 2 | Masse Couvercle | |
| 3 | Masse Pignons | |
| 4 | Masse Socle | |
| 5 | Masse Vis | |
| 6 | Masse Ilot | Non connu à ce stade |
| 7 | Forme Couvercle | Mesure de protection : suppression des angles vifs |
| 8 | Forme Pignons | |
| 9 | Forme Socle | |
| 10 | Forme Cube | |
| 11 | Forme Vis | Utilisation de matériau inerte |
| 12 | Forme Ilot | |
| 13 | Matériau cube | |
| 14 | Matériau Couvercle | Données insuffisantes pour appliquer la norme NF EN 1005-5 |
| 15 | Matériau Pignons | |
| 16 | Matériau Socle | |
| 17 | Matériau Vis | |
| 18 | Matériau Ilot | Non connu à ce stade |
| 19 | Bioméca Pignons | Données insuffisantes pour appliquer la norme NF EN 1005-5 |
| 20 | Bioméca Couvercle | |
| 21 | Bioméca Socle | |
| 22 | Bioméca Cube | |
| 23 | Bioméca Vis | |

Tableau 1 : Liste des phénomènes dangereux identifiés en phase de spécifications

5.2 Phase de conception architecturale

La conception architecturale retenue pour l'îlot est la suivante (cf. figure 5) :

- 2 postes de travail distincts reliés mécaniquement. Un poste est toujours tenu par un opérateur, l'autre peut être tenu par un opérateur ou robotisé à l'aide

d'un robot monté sur une plateforme déplaçable (en lieu et place de l'opérateur)

- Déplacement des socles, couvercles et cubes le long des postes par gravité sur de goulottes inclinées pour une évacuation ou alimentation par un 3^e opérateur.

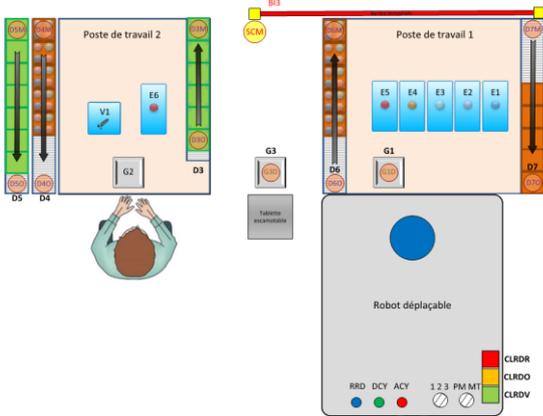


Figure 5 : Îlot flexible de production choisit pour illustrer le concept d'usine du futur

Avec ces nouvelles données de conception, des mesures de protection peuvent être envisagées pour certains des phénomènes dangereux identifiés précédemment, en particulier, les risques de TMS liés aux 3 modes opératoires manuels des postes 1 et 2 (SF 19 à 23) peuvent être évalués à l'aide de la norme NF EN 1005-5 (AFNOR, 2008) car on connaît les dimensions des postes, le positionnement approximatif des pièces, les modes opératoires et le temps de cycle. Les risques liés à la masse (SF 6), forme (SF 12) et matériaux (SF18) des postes peuvent également être évalués.

Par ailleurs, l'analyse des 6 scénarios envisagés se traduit avec ces nouvelles données par celle de 2 modèles énergétiques :

- un modèle avec les 2 postes de montage manuel (cf. figure 6). Par rapport au modèle précédent, les seules énergies supplémentaires sont celles de l'opérateur 3 pour l'alimentation/évacuation des pièces et l'énergie potentielle des cubes, couvercles et socle pour leur déplacement le long des postes. Cette configuration recouvre les 3 scénarios de montage totalement manuels d'utilisation.

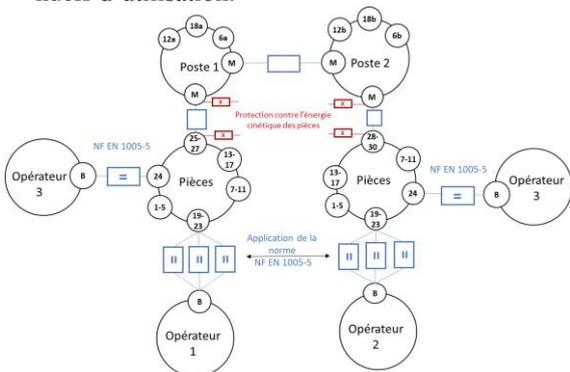


Figure 6 : Modèle énergétique simplifié pour la phase de production manuelle

- un second pour les 3 scénarios de montage avec un poste tenu par un robot (cf. figure 7). Par rapport à la configuration précédente s'ajoute les risques liés aux robots et à la pince (alimentation électrique, formes, masses, matériaux et mouvements).

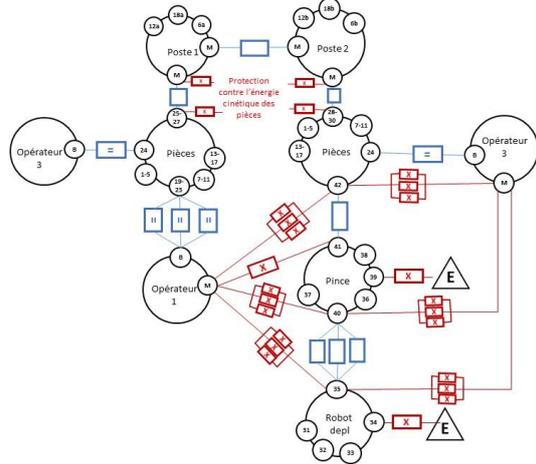


Figure 7 : Modèle énergétique simplifié pour la phase de production avec un robot

Par rapport à l'analyse précédente, 18 nouvelles surfaces fonctionnelles, ou phénomènes dangereux, sont à prendre en compte (cf. tableau II). A noter que 7 d'entre elles sont communes aux 2 configurations (lignes grisées).

| SF | Energie | Commentaires Mesures de protection |
|----------------|--|--|
| 24 | Bioméca opérateur 3 | Application de la norme NF EN 1005-5 |
| 25 26 27 | Dépl. Socle, Cube, Couvercle poste 1 | Pas de mesure de protection spécifique : Energie faible du fait de la masse des pièces, de la faible distance et de la pente envisagée pour ces déplacements par gravité |
| 28 29 30 | Dépl. Socle, Cube, Couvercle poste 2 | |
| 31 | Forme Robot déplaçable | |
| 32 | Masse Robot déplaçable | Equipement stable : socle lesté. Avec possibilité de verrouillage au sol |
| 33 | Matériau Robot déplaçable | Pas d'utilisation de matériau dangereux |
| 34 | Risque électrique Robot déplaçable | Voir mesure prise par le fabricant et l'intégrateur |
| 35 | Risque mécanique mouvement robot (x3 scénarios) | Prévoir un moyen de protection évitant les collisions avec l'opérateur 1 et l'opérateur 3 (pour les 3 scénarios) |
| 36 | Masse pince | Masse faible |
| 37 | Forme Pince | Forme sans angle vifs |
| 38 | Matériau Pince | Matériau inerte |
| 39 | Risque électrique Pince | Voir mesure prise par le fabricant et l'intégrateur |
| 40 | Risque mécanique fermeture pince | Fonction limitation de puissance lors de la fermeture |
| 41 | Risque mécanique mouvement pince (x3 scénarios) | Prévoir un moyen de protection évitant les collisions avec l'opérateur 1 et l'opérateur 3 (pour les 3 scénarios) |
| 42 | Risque mécanique mouvement pièces (x3 scénarios) | Prévoir un moyen de protection évitant les collisions avec l'opérateur 1 et l'opérateur 3 (pour les 3 scénarios) |

Tableau II : Liste des phénomènes dangereux supplémentaires identifiés en conception architecturale

On constate également sur ces modèles que pour prendre en compte les différences entre les scénarios, il est nécessaire, pour certaines surfaces fonctionnelles, de prévoir plusieurs liaisons en parallèle, chacune étant spécifique à un scénario. C'est par exemple le cas pour les mouvements du robot qui sont différents dans les 3 scénarios (liaison SF35-SF40). Cela implique de prévoir également des liaisons « isolantes » de protection différentes et compatibles entre elles, d'où leur représentation également en parallèle.

6 DISCUSSION

Comme l'avait montré N. De Galvez (De Galvez N. *et al.*, 2017), le modèle EZID, et plus particulièrement l'étape de modélisation énergétique, peut être appliqué aux différentes étapes du processus de conception d'une nouvelle machine pour l'identification des phénomènes dangereux.

En effet, parallèlement à l'utilisation du modèle EZID, une identification des phénomènes dangereux a été réalisée par des experts en sécurité machines. Cette analyse a été réalisée de façon classique en confrontant le projet de conception architecturale à la liste des phénomènes dangereux de la norme NF EN 12100 (AFNOR, 2010) (cf. tableau III).

| N° | Ph. dangereux / Dommage | Situation considérée |
|----|-----------------------------------|---|
| 1 | Mécanique / Choc Ecrasement | Renversement sur un opérateur ou une tierce personne de la plateforme déplaçable du fait des mouvements du robot. |
| 2 | Mécanique / Choc, coupure, piqure | Contacts entre une personne et les éléments mécaniques du robot déplaçable à l'arrêt |
| 3 | Mécanique / Choc | Risques pour un opérateur ou une tierce personne en cas de d'éjection de la pièce tenue dans la pince (serrage insuffisant) |
| 4 | Mécanique / Choc | Risques pour un opérateur ou une tierce personne en cas de d'éclatement de la pièce (serrage trop fort) |
| 5 | Mécanique / Choc, Ecrasement | Collision d'une partie du robot en mouvement avec un opérateur ou une tierce personne à proximité |
| 6 | Mécanique / Choc ou coincement | Coincement de l'opérateur ou d'une tierce personne entre les articulations du robot |
| 7 | Mécanique / Ecrasement | Fermeture de la pince sur les doigts d'un opérateur ou une tierce personne |
| 8 | Electrique | Intervention du personnel sur les équipements électrique |
| 9 | Non respects de principes ergo. | Risque TMS associés aux opérations manuelles (assemblage, alim/évac) |

Tableau III : Liste des phénomènes dangereux identifiés à partir de la liste des phénomènes dangereux

Lorsque l'on compare cette identification, à celle obtenue à partir des modèles énergétiques, on constate une bonne concordance entre les deux analyses (cf. tableau IV).

Les phénomènes dangereux mécaniques liés au lâché (n°3) ou à l'éclatement (n°4) de la pièce tenue dans la pince n'ont toutefois pas été identifiés par l'analyse avec EZID. Cette difficulté d'identifier des risques liés à une

libération d'une énergie suite à une défaillance ou un dysfonctionnement avait en effet déjà été identifiée par De Galvez.

Inversement, les surfaces fonctionnelles 1 à 5 (énergie potentielle liée à la masse des pièces à assembler), 13 à 18, 33, 38 (matériau des pièces et du banc) et 25 à 30 (énergie cinétique des cubes, socles et couvercles lors de leur déplacement par gravité), n'apparaissent pas dans ce tableau comparatif. Il s'agit en effet de phénomènes dangereux potentiels non significatifs, c'est à dire qui ne nécessitent pas de mesures de prévention spécifique. Ils apparaissent avec la méthode EZID du fait de son caractère systématique alors qu'ils ont été directement filtrés par les experts.

| N° selon tableau III | Surfaces fonctionnelles (Tableau I et II) |
|----------------------|---|
| 1 | SF 6 – SF 32 – SF 36 |
| 2 | SF 7 à 12 - SF 31 - SF 37 |
| 3 | |
| 4 | |
| 5 | SF 35 – SF 41 – SF 42 |
| 6 | SF 35 |
| 7 | SF 40 |
| 8 | SF 34 – SF 39 |
| 9 | SF 19 à 24 |

Tableau IV : comparaison des deux analyses (EZID et liste de phénomènes dangereux).

Par rapport à la problématique de flexibilité associée au paradigme de l'Industrie du futur, on constate, pour le cas d'application envisagé, que l'analyse des 6 scénarios d'usage se résume à celle de seulement 2 configurations énergétiques.

Le postulat retenu pour EZID qui est d'associer énergie et phénomènes dangereux semble en effet contribuer à une optimisation des analyses à réaliser en cas de multiples scénarios d'usage

Le modèle énergétique d'une situation de travail, qui sert de point de départ à EZID, est par définition représentatif des phénomènes dangereux présents quel que soit le scénario d'usage. Si les flux d'énergies, donc les phénomènes dangereux, sont les mêmes dans différents scénarios, il n'y aura logiquement qu'un seul modèle énergétique, donc une seule analyse pour l'identification des phénomènes dangereux.

Si les flux d'énergie, donc les phénomènes dangereux, sont différents entre deux scénarios, alors plusieurs modèles énergétiques seront nécessaires. La comparaison de ces modèles entre eux permet toutefois d'identifier rapidement les surfaces fonctionnelles communes, c'est-à-dire les phénomènes dangereux communs, aux scénarios concernés. Par exemple dans l'exemple présentés dans cet article, 30 surfaces fonctionnelles sont communes sur les 42 couvrant les 2 modèles énergétiques, eux-mêmes couvrant les 6 scénarios d'usage

7 PERSPECTIVES

Les travaux sur la problématique de la mise en application de la démarche de prévention intégrée dans le contexte de l'industrie du futur se poursuivent.

Ainsi la démarche EZID sera appliquée en phase de conception détaillée du cas exemple retenu en intégrant dans le(s) modèle(s) énergétique(s) les choix de conception finaux ainsi que les moyens de protection envisagés.

Parallèlement à ces travaux sur l'identification des phénomènes dangereux, une étude est menée sur l'identification de fonctions élémentaires, constitutives des machines industrielles. Le but serait de procéder à une analyse des risques appliquée à chacune de ces fonctions, seule, en interaction avec les parties prenantes de la machine ou en interaction avec les autres fonctions, pour balayer ainsi tous les usages possibles et se conformer au paradigme d'industrie du futur.

D'autre part ces flux d'énergie agissent dans un espace limité, ces volumes d'influence peuvent être identifiés et limités afin de prévenir les accidents. L'association flux d'énergie et volume d'influence peut ainsi être représenté au niveau des modèles CAO et aidé ainsi le concepteur d'équipements de production dans sa démarche de prévention intégrée (Gomez -Echeverri J.C. et al., 2019).

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient James Baudouin, Jean-Paul Bello, Adel Sghaier et David Tihay (INRS) pour leur avoir transmis leur analyse des risques de l'îlot flexible, pris ici en exemple.

REFERENCES

- AFNOR, 2008. NF EN 1005, *Safety of machinery - Human physical performance*.
- AFNOR, 2010. NF EN ISO 12100 - *Safety of machinery, General principles for design*.
- Constant D., 1996. *Contribution à la spécification d'un modèle fonctionnel de produits pour la conception intégrée de systèmes mécaniques*. Thèse, Université de Grenoble 1.
- De Galvez N., Marsot J., Martin P., Siadat A., Etienne A., 2017. *A new approach to hazard identification during the design process by analysing energy transfers*. Safety Science, 95, Elsevier, pp. 1–14.
- Demaziani A., Etienne A., Daille Lefèvre B., 2019, *Towards a data model to describe future usages of in-*

dustrial systems to integrate Health and Safety in early design phase. colloque S-mart 1/7, Les Karelis, 3 au 5 avril 2019, 7 p.

- European parliament and council, 2006. Directive of the European parliament and of the council of 17 May 2006 on machinery and amending Directive 95/16/EC (recast). OJ L157, pp. 24-86.
- FOF, Factories of the future, 2013. *Strategic Multi-annual roadmap for the contractual PPP under horizon 2020*, European commission, Directorate-General for Research and Innovation, Directorate G - Industrial Technologies, Unit G.2 - 'New forms of production'.
- Gauthier et al. 2018. *Risk assessment in safety of machinery: Impact of construction flaws in risk estimation parameters*, Safety Science, Volume 109, 2018, pp. 421-433.
- Gomez Echeverri J.C, Martin P, Daille-Lefevre B., Godot X., Marsot J., (2019), « Prise en compte dans la conception et l'exploitation des postes de travail de l'usine du futur des aspects sante – securite », 16 ème colloque nationale S.Mart, Les Karelis (73), 3-5 avril 2019, 7 pages.
- Lamy P. et Charpentier P., 2009. *Estimation des risques machines : recensement des méthodes et subjectivité des paramètres de l'estimation*, INRS, HST 214, pp. 37-44.
- Lux A. et Quillerou-Grivot E., 2014. *Production activity analyzed by an engineer and a psychologist: what contributions for taking health into account when designing production systems*. MOSIM; Nancy, France.
- Marsot J., 2015. *Prévention intégrée : quelles sont les pratiques des concepteurs de machines*, INRS, HST 235, pp. 52-58
- Martin P. et al., 2019. *New Issues for Workers Safety in the Factory of the Future*. Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing, pp 402-411.
- Roucoules L. et al., 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. Edition HERMES.
- Sun X. et al., 2019. *A review of methodologies for integrating human factors and ergonomics in engineering design*. International Journal of Production Research . vol 57, issue 15-16, pp. 4961-4976.
- Veltz P. et Weil T., 2015. *L'industrie, notre avenir*, La Fabrique de l'Industrie, Eyrolles 2015, ISBN : 978-2-212-56115-9.