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/10985/11936

To cite this version :

Aurélien LUX, Ismail EL MOUAYNI, Bruno DAILLE-LEFEVRE, Jonathan SAVIN, Ali SIADAT, Alain ETIENNE - Santé et sécurité au travail : quatre approches en conception pour spécifier et simuler des marges de manoeuvre pour les futurs opérateurs de production - 2017

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository Administrator : scienceouverte@ensam.eu

Santé et sécurité au travail : quatre approches en conception pour spécifier et simuler des marges de manœuvre pour les futurs opérateurs de production

AURELIEN LUX[1], ISMAIL EL MOUAYNI[2], Bruno DAILLE-LEFEVRE[1], JONATHAN SAVIN[1], ALAIN ETIENNE[2], ALI SIADAT[2]

[1] INRS, Institut national de recherche et de sécurité
1, rue du Morvan 54519 Vandœuvre-lès-Nancy, France
aurelien.lux@inrs.fr
bruno.daille-lefevre@inrs.fr
jonathan.savin@inrs.fr

[2] ENSAM, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers
4, rue Augustin Fresnel 57078 Metz Cedex 3, France
ismail.el-mouayni@ensam.eu
alain.etienne@ensam.eu
ali.siadat@ensam.eu

***Résumé* - La santé et la sécurité des opérateurs de production dépendent fortement de la manière dont sont conçus les futurs systèmes de travail. Ces derniers doivent laisser suffisamment de marges de manœuvre aux opérateurs pour leur permettre de faire face à la variabilité des situations prévisibles, qu'elles soient normales ou anormales. Cet article présente quatre approches complémentaires pour prendre en compte ces marges de manœuvre à différentes étapes d'un processus de conception. Des démarches comme l'analyse fonctionnelle ou l'analyse des modes de défaillance peuvent ainsi être utilisées par les concepteurs pour mieux envisager les usages potentiels des futurs moyens de production. Une réflexion autour des dispositifs de simulation est également présentée en proposant d'y ajouter la modélisation de la fatigue des opérateurs ou de leur accoutumance à la tâche. En cherchant à intégrer des marges de manœuvre en conception et à en évaluer l'effet sur le futur système, ces approches visent à aider les concepteurs à faire des choix qui optimisent la performance tout en garantissant des conditions de travail favorables pour les opérateurs.**

***Abstract* - In future work systems, the health and safety of production operators heavily depend on how the system is designed. For a better prevention, these systems must grant sufficient operators' margin of manoeuvre, to cope with the foreseeable variability in a work situation, both normal and abnormal. This article presents four approaches that can be followed for better margin's integration during the different stages of production system's design process: by using functional analysis or failure mode analysis to predict unusual production means uses, flow simulation or digital human models to consider variability due to human factors, the designer can better comprehend the variability in the future systems and thus define adequate temporal margins which optimize performance and workers' wellbeing.**

***Mots clés* - conception, marges de manœuvre, santé au travail, simulation.**
***Keywords* - design, margin of manoeuvre, occupational health, simulation.**

1 INTRODUCTION

Les opérateurs de production représentent encore aujourd'hui la catégorie socio-professionnelle la plus touchée par les maladies professionnelles (troubles musculo-squelettiques, surdité, etc.) [DARES, 2010] et les accidents du travail [DARES, 2014]. Afin d'améliorer leur sécurité et leur santé au travail, une place importante doit être accordée aux choix d'organisation et de conception du travail [Directive européenne n°89/391/CEE, 1989]. Cet article propose donc de s'intéresser à la manière dont sont conçues les situations de travail des opérateurs. Un des enjeux pour l'ingénierie de conception vis à vis de la prévention des risques professionnels est d'intégrer la notion de « marges de manœuvre » dans les méthodes, outils et pratiques des concepteurs d'équipements de travail. Principalement développée par l'ergonomie francophone, elle est identifiée comme un axe fort de prévention des risques physiques et psychosociaux. Après avoir précisé cette notion de marges de manœuvre, l'article illustre, à travers quatre approches différentes, comment elle peut être mise en œuvre en conception. Les deux premières approches consistent à utiliser des démarches de conception comme l'analyse fonctionnelle du besoin et l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et leur Criticité) pour prendre en compte les usages des futurs opérateurs dès la conception et pour tenter de spécifier leurs marges de manœuvre. Les deux autres approches tentent quant à elles de modéliser la variabilité individuelle des opérateurs à l'aide de logiciels de simulation de flux de production ou de mannequins virtuels. Il s'agit plutôt cette fois de simuler l'impact des marges de manœuvre sur les conditions de travail des opérateurs et sur la performance du système de production. Dans tout processus de conception, chacune de ces démarches

peut être utilisée indépendamment ou en parallèle des autres, mais toutes visent à sensibiliser et outiller les concepteurs pour une prise en compte des situations réelles de travail. En perspective, ces approches sont ensuite replacées dans un contexte plus large, en posant la question de la place de la prévention au cœur même de l'activité des concepteurs.

2 CONCEPTION ET MARGES DE MANŒUVRE

Avant tout, par conception, il faut entendre ici l'activité des concepteurs de systèmes de production industrielle (ingénieurs, techniciens, projeteurs, dessinateurs, etc.) qui travaillent dans des bureaux d'études, des bureaux des méthodes ou des services d'industrialisation des nouveaux postes de production ou lignes de fabrication.

Un axe fort de prévention est de pouvoir concevoir des systèmes qui soient les plus adaptables possibles à la dynamique de la future activité de travail des opérateurs [Rabardel et Pastré, 2001]. Pour cela, il convient de prendre en compte la variabilité des situations de travail et de laisser aux futurs opérateurs des marges de manœuvre pour pouvoir y faire face. Cette approche est largement défendue par l'ergonomie francophone [Daniellou, 1987 ; Coutarel, 2004 ; Sagot et al., 2003], et fédère même des disciplines différentes comme la psychologie du travail, la psychodynamique, la psychosomatique, voire la philosophie [Coutarel et al., 2003]. En ergonomie, la marge de manœuvre est une "possibilité ou liberté dont dispose un travailleur pour élaborer différentes façons de travailler afin de rencontrer les exigences de production et ce, sans effet défavorable sur sa santé" [Durand et al., 2011]. Autrement dit, les marges de manœuvre augmentent la capacité des opérateurs à faire face à la variabilité des situations de travail. Elles lui permettent d'absorber l'écart entre le travail prescrit et son travail réel [Coutarel, 2004]. Cet écart entre prescriptions du travail et conditions réelles d'activité est identifié depuis longtemps par les sciences humaines et sociales [Daniellou, 1996 ; Leplat, 2000], mais reste difficilement exploitable par les concepteurs. Deux lacunes fréquentes des projets de conception sont en effet pointées [Barcellini et al., 2013] : premièrement, le dispositif prescrit est inadapté car il ne prend pas en compte les variabilités du système ; il s'agit d'un manque de flexibilité synchronique [Beguin et Cerf, 2004]. Deuxièmement, le système conçu ne permet pas le développement de l'activité future des opérateurs, ce que Béguin appelle un manque de flexibilité diachronique. Finalement, à travers l'espace qui lui est alloué par la conception, l'opérateur ne dispose pas des marges de manœuvre nécessaires à la réalisation de sa tâche dans de bonnes conditions.

L'allocation de marges de manœuvre peut ainsi pallier ces lacunes, mais la nature même de ces dernières rend difficile leur prise en compte dès la conception. En effet, les marges sur les futures installations ne dépendent qu'en partie des marges de manœuvre qui sont données aux travailleurs durant la conception [Coutarel, 2005] : une distinction est faite entre marges de manœuvre internes et marges de manœuvre externes [Coutarel et Petit, 2013]. Les marges internes renvoient à la perception par le travailleur d'un déploiement possible de son activité, par exemple à travers sa formation, ses relations à la hiérarchie, son collectif de travail, etc. Elles touchent à la dimension personnelle du travailleur [Durand et al., 2011] et ne sont pas à la main du concepteur car elles dépendent de paramètres dont il ne dispose pas encore en cours de conception (opérateurs, organisation de production…). Elles relèvent en plus de considérations psychosociales qu'il n'est pas habitué à manipuler. Les marges externes, quant à elles, touchent à la conception des situations de travail. Elles concernent les paramètres externes à l'opérateur qui conditionnent son activité : dimensionnement des espaces, calcul des cadences, détermination des niveaux de stocks, des gestes imposés, etc. Ces données tangibles sont directement liées à l'activité de conception.

Au-delà de cette distinction interne/externe, est apparu plus récemment le concept de marges situationnelles [Coutarel et al., 2015] qui montre que les opérateurs élaborent dans tous les cas leurs propres marges, en opérant des régulations dans leur activité, dans le périmètre de leur situation de travail qui est toujours spécifique et singulière. Il est donc difficile voire impossible pour le concepteur d'appréhender ces marges situationnelles qui se développeront dans une activité future qu'il ne maîtrise pas, qu'il entrevoit à peine.

Au final, le concepteur, à défaut de pouvoir influencer les caractéristiques de la personne ou ce qui se jouera sans lui dans l'activité future, peut au moins influencer les caractéristiques de l'environnement de la situation de travail : en allouant des marges externes à l'opérateur, il lui permet non seulement de réaliser sa tâche dans de bonnes conditions, mais lui laisse également la place pour développer ses marges situationnelles. Par exemple, le fait d'allouer une marge temporelle dans le calcul de la cadence d'une ligne de production permettra aux opérateurs d'une part d'atteindre les objectifs malgré des aléas prévisibles, et d'autre part de développer de nouveaux modes opératoires, de nouvelles expertises ou stratégies d'actions collectives.

Cet article, dont l'objet est la conception d'équipements de travail, s'intéressera donc aux marges de manœuvre qui concernent le plus directement les concepteurs, à savoir les marges externes.

Dans la partie suivante sont exposées plusieurs approches issues de travaux de recherche du LC2S (Laboratoire mixte pour la Conception Sûre de Situations de travail), qui associe des chercheurs de l'INRS et de l'ENSAM. Ces travaux complémentaires visent à considérer les marges de manœuvre à différentes étapes de la démarche de conception d'un nouveau système de travail.

3 SPECIFICATION DES MARGES DE MANŒUVRE : PRISE EN COMPTE DES SITUATIONS REELLES DE TRAVAIL AVEC L'ANALYSE FONCTIONNELLE DU BESOIN ET L'AMDEC

Les enjeux en matière de prévention des risques professionnels sont en priorité de définir les usages et les contraintes des situations « futures probables » : le concepteur a l'obligation réglementaire d'identifier les mauvais usages raisonnablement prévisibles [Directive 2006-42CE, 2006]. Pour cela, il peut s'appuyer, dans la mesure du possible, sur les normes [NF EN614, 2009] ou sur l'analyse des situations existantes les plus proches [Sagot et al., 2003 ; Fadier et De la Garza, 2006]. S'il existe pour cela diverses techniques issues de l'ergonomie : interviews, observations, analyses d'activité, questionnaire, focus group, etc. [Coulin, 2007], elles sont peu appliquées faute de temps ou de ressources. Ainsi, afin d'éviter que ces données d'usages soient oubliées ou traitées par les concepteurs trop tardivement (ce qui se traduit souvent par des modifications coûteuses des nouveaux équipements ou des risques non maitrisés pour les opérateurs), deux moyens complémentaires sont proposés pour intégrer les usages en conception, en utilisant l'analyse fonctionnelle et l'AMDEC Process.

Le premier s'appuie sur la méthode d'analyse fonctionnelle du besoin [EN 1325-1, 1997] du futur équipement de travail. C'est une pratique courante dans l'industrie : le système est

décomposé en fonctions techniques élémentaires. Il est ici proposé de dépasser le simple point de vue technique en associant à cette démarche un questionnement systématique de type « QQOQCPC » : Qui ? Quoi ? Où ? Quand ? Comment ? Pourquoi ? Combien ? [Jang et Woo, 2005 ; Bose, 2010]. Cela incite le concepteur à s'interroger sur les conditions d'utilisation du futur moyen de production : Qui interviendra ? Dans quel mode de fonctionnement ? Qu'est-ce qui sera manipulé ? A quelle fréquence ? Par quel moyen ? etc. Le concepteur (ou le donneur d'ordres) pourra ainsi établir un cahier des charges qui dispose, pour chaque fonction, de l'ensemble des données qui permettront de définir des principes et des solutions techniques « sûrs », répondant aux fonctions demandées dans les conditions d'usages raisonnablement prévisibles [Daille-Lefèvre et al., 2014]. En se préoccupant des usages réels du futur équipement, cette approche permet d'identifier les marges de manœuvre nécessaires au travail dans de bonnes conditions, et de spécifier des caractéristiques de conception qui les prennent en compte.

Au-delà de cette phase de spécification des marges de manœuvre par questionnement systématique des usages lors de l'analyse fonctionnelle, il est également utile de capitaliser des retours d'expérience sur des situations réelles comparables. Pour cela, le second moyen proposé utilise une démarche issue de l'AMDEC Process, que l'on retrouve à nouveau fréquemment dans l'industrie. L'AMDEC Process est une méthode utilisée en conception pour identifier et corriger les problèmes de fiabilité du processus de fabrication d'un produit pouvant altérer la qualité de ce dernier [NF EN 60812, 2006]. Pour chaque étape élémentaire du processus, les défaillances potentielles sont recherchées puis hiérarchisées, donnant ensuite lieu à un plan d'actions correctives. La démarche AMDEC se révèle être un point d'ancrage intéressant pour la prévention, car elle est participative (plusieurs métiers sont représentés lors des réunions : études, méthodes, qualité, achats, production…), itérative (mise à jour à chaque évolution de la conception) et initialisée très tôt (dès les phases d'avant-projet), lorsque les degrés de liberté du projet sont encore nombreux [Midler, 1993]. Dans certains processus qualité instaurés entre clients et fournisseurs, elle est parfois même rendue obligatoire. Elle s'appuie surtout sur des éléments qui remontent des ateliers de production, et permet ainsi d'envisager une collecte de données sur les usages des opérateurs dans leurs situations réelles de travail. C'est ce que nous proposons avec la démarche que nous avons appelée AMDEC situations de travail [Lux et al., 2016] : la démarche initiale d'AMDEC Process est enrichie avec des éléments relatifs aux situations réelles de travail des opérateurs. En proposant aux concepteurs d'y introduire du retour d'expérience (en décrivant comment sont réellement utilisés les équipements similaires à ceux en cours de conception), les aspects "conditions de travail" des opérateurs peuvent alors être discutés et venir arbitrer certains choix de conception. Dans une AMDEC classique, les analyses restent essentiellement orientées vers la technique, dans l'objectif d'optimiser les aspects Qualité-Coûts-Délais des projets. Ici, un écart entre la prescription et la réalité du travail peut à présent être analysé et discuté selon les points de vue de performance, de qualité mais aussi de conditions de travail. En cas de mise en cause de la sécurité ou de la santé des opérateurs, la démarche incite les concepteurs à aménager (ou au moins à ne pas supprimer) les marges de manœuvre nécessaires à la réalisation de leur travail dans de bonnes conditions. Dans l'exemple ci-dessous (tableau 1), lors de la conception d'un nouveau rouleau laminoir, se pose la question du nettoyage. Celui-ci est initialement prévu lorsque la machine est consignée à l'arrêt. Or, par retour d'expérience sur les machines similaires de l'atelier, on sait qu'il est courant que les opérateurs nettoient les rouleaux lorsqu'ils tournent encore à leur vitesse nominale. Ce non-respect des prescriptions leur permet d'être plus efficaces dans leur tâche (nettoyage plus rapide et de meilleure qualité). C'est finalement une marge de manœuvre qu'ils s'octroient, mais qui les expose également à un risque important pour leur sécurité (écrasement). Discuter ce point en réunion d'AMDEC Process à l'aide de la grille proposée permettra par exemple de tolérer ce mode de fonctionnement, mais en l'encadrant pour qu'il soit fait en toute sécurité : la conception du nouveau laminoir pourra par exemple prévoir un mode de nettoyage en vitesse lente, associé à un système de détection d'avalement de la main de l'opérateur. D'autres exemples ainsi qu'une explication plus détaillée de cette approche sont disponibles dans [Lux et al., 2016] et [Marsot et al., 2014].

Les éléments d'usage servent donc dans un cas à caractériser les fonctions dans une démarche d'analyse fonctionnelle, ou dans l'autre à compléter une AMDEC grâce au retour d'expérience. L'AMDEC pouvant être utilisée pour des équipements déjà en service, l'enrichir avec des informations issues d'analyses de situations réelles de travail peut également fournir une base intéressante pour la spécification de futurs moyens similaires. Les deux approches sont complémentaires, et reviennent à identifier et mettre en débat les marges de manœuvre situationnelles. Si ces régulations que s'autorisent les opérateurs sont jugées pertinentes et n'engagent pas la sécurité de ces derniers, elles pourront orienter les choix techniques de conception des futurs systèmes.

Tableau 1. Exemple d'utilisation de l'AMDEC Situations de travail

ETAPE DU PROCESSUS	SITUATIONS REELLES DE TRAVAIL	CAUSES		EFFETS, RISQUES		GRAVITE (G)	PROBABILITE (P)	CRITICITE (C=PxG)	ACTIONS		GRAVITE (G')	PROBABILITE (P')	CRITICITE (C')
Poste 10 : Nettoyage d'un rouleau laminoir													
Arrêter et consigner la machine avant de nettoyer	L'opérateur nettoie le rouleau en marche.	☑ Performance	Gain de temps	☐ Performance					☐ Refuser	Mettre en place un mode de maintenance en vitesse lente + détection d'avalement			
		☑ Qualité	Meilleur nettoyage	☐ Qualité					☑ Encadrer				
		☐ Condit. de travail		☑ Condit. de travail	Risque d'écrasement	8	8	64	☐ Valider		8	3	24

4 SIMULER LES MARGES DE MANŒUVRE : SIMULATION DE FLUX ET MANNEQUINS VIRTUELS

Afin d'aborder les questions d'usages et les exigences de sécurité tout au long du processus de conception (et notamment lors des étapes de validation), il est intéressant de s'appuyer sur des mises en situation à l'aide de maquettes physiques (maquettes en carton à l'échelle 1, par exemple) ou numériques [Marc et al., 2007 ; Sagot et al., 2003]. Même si ces maquettes sont imparfaites, et à condition d'avoir conscience de leurs limites, elles modifient la réflexion des concepteurs sur l'activité des opérateurs. Cependant, à moins de multiplier les simulations en faisant varier les conditions initiales, ces outils ne permettent pas de prendre en compte la variabilité de l'activité des opérateurs. Pour y remédier, nous proposons une même approche appliquée à deux familles d'outils de simulation complémentaires et connus des industriels : d'une part les logiciels de simulation de flux avec un point de vue global sur la totalité du système de production, et d'autre part les logiciels de mannequins virtuels avec un point de vue plus local au niveau des postes de travail. L'approche retenue consiste à intégrer des lois de comportement inspirées du comportement humain (fatigue, apprentissage par exemple) dans les algorithmes de ces logiciels afin de simuler la variabilité de l'activité des opérateurs.

4.1. Logiciels de simulation de flux

Il s'agit dans ce cas d'étudier comment certaines marges de manœuvres (espace sur la ligne, stock tampons, possibilité d'anticipation des cycles, etc.) peuvent être prises en compte lors de l'agencement des systèmes de production (pour l'allocation des opérateurs, l'équilibrage des lignes, ou encore le dimensionnement des stocks). Pour cela, l'approche vise à intégrer des lois de comportement permettant de simuler, d'un point de vue temporel, la variabilité technique et humaine d'un système de production. Aujourd'hui, les aspects techniques (par exemple la simulation des rendements et des pannes des machines) et quelques éléments organisationnels (en faisant par exemple varier le dimensionnement et l'organisation des équipes de production) sont relativement bien pris en compte dans les simulations [Banks, 1998]. En revanche, les facteurs humains, qui entraînent une forme de variabilité du travail et donc de la performance, sont absents de ces modélisations [Baines et al., 2004]. Aussi, il est proposé d'enrichir les modèles utilisés pour simuler les flux de production en y intégrant des facteurs comme la fatigue de l'opérateur ou l'expérience acquise dans la réalisation de sa tâche. Ces facteurs ont une influence sur la performance finale du système de production, mais sont également importants pour la santé et la sécurité de l'opérateur. Tout d'abord, un modèle de tâche est proposé, incluant la notion de marge de manœuvre temporelle (figure 1). La marge de manœuvre prise en compte ici représente la flexibilité laissée à l'opérateur pour faire face aux aléas et aux variabilités de production mais également à sa propre variabilité. Cette flexibilité temporelle est modélisée par le paramètre TM, marge temporelle lui permettant d'anticiper ou de retarder son travail. Le paramètre RT représente le temps résiduel dont il dispose une fois sa tâche effectuée. Ce paramètre dépend d'une part de la charge de travail externe (temps entre deux tâches), et d'autre part du temps de réalisation de la tâche qui varie selon l'état de fatigue et d'accoutumance de l'opérateur. Ces derniers facteurs sont intégrés en utilisant des modèles issus de la littérature [Jaber et al., 2013 ; Jaber et Bonney, 1997].

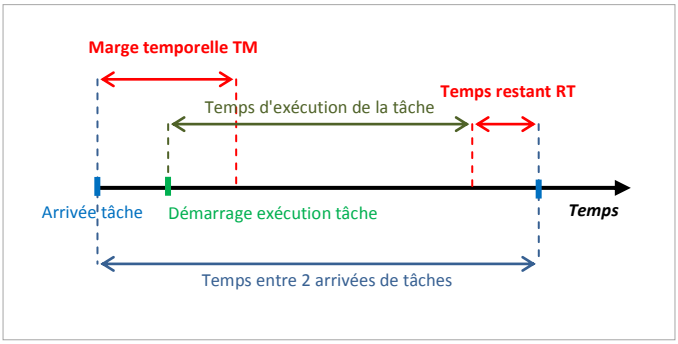

Figure 1. Modèle de tâche d'après [El Mouayni et al., à paraître]

Un facteur de fiabilité de l'opérateur a également été intégré : il dépend des deux modèles précédents [Givi et al, 2015], le risque pour l'opérateur de faire des erreurs étant en partie lié à son état de fatigue et à son accoutumance à la tâche, et il influence directement la qualité et la performance de la production. Une fois ces modèles adaptés et intégrés dans un logiciel de simulation basé sur une approche multi-agents [Ruiz et al., 2014], l'évolution des différents paramètres du système peut être analysée en fonction de plusieurs scenarii de simulation (évolution de la demande de production, modification des paramètres de fatigue, de récupération ou d'apprentissage des opérateurs, configuration des pauses, etc.). Ainsi, l'évolution du paramètre RT est un indicateur pertinent de l'adéquation, à tout moment, entre la capacité de l'opérateur (les ressources) et la tâche qu'il a à accomplir (les contraintes). En particulier, quand RT devient négatif (signifiant que la demande dépasse la capacité de l'opérateur), l'opérateur aura besoin d'une marge temporelle TM suffisante pour pouvoir retarder la tâche suivante. A l'inverse, quand RT est anormalement long (lié par exemple à un ralentissement du flux aval), l'opérateur devrait pouvoir disposer d'une TM pour anticiper les futures tâches et réguler ainsi son activité. Une conception optimisée consiste donc à allouer à l'opérateur une marge temporelle TM de telle façon que les paramètres TM et RT soient équilibrés.

En intégrant ces paramètres dans la simulation, il est possible d'identifier les différents modes de régulation de l'activité selon le degré d'équilibre du rapport entre ressources et contraintes [Coutarel et al, 2015]. En particulier, il permet de détecter des situations délétères où l'opérateur atteint ses objectifs au détriment de sa santé, et des situations dites de débordement, dans lesquelles les objectifs de performance ne sont tout simplement plus atteignables. Le simulateur donne au concepteur des indices et des axes d'améliorations possibles du système de production pour éviter ces configurations qui sont pénalisantes pour la performance et potentiellement dangereuses pour la santé des opérateurs. A titre d'illustration (l'exemple ne sera pas développé ici), la figure 2 présente le résultat d'une simulation mettant en jeu trois stations manuelles d'assemblage configurées en ligne. Les courbes présentées montrent l'évolution de la marge temporelle TM et du temps restant RT pour chacun des opérateurs au cours d'une journée de production.

Une étude de cas plus détaillée, le paramétrage du modèle et de la simulation, ainsi qu'une analyse des résultats associés sont explicités dans [El Mouayni et al., 2017].

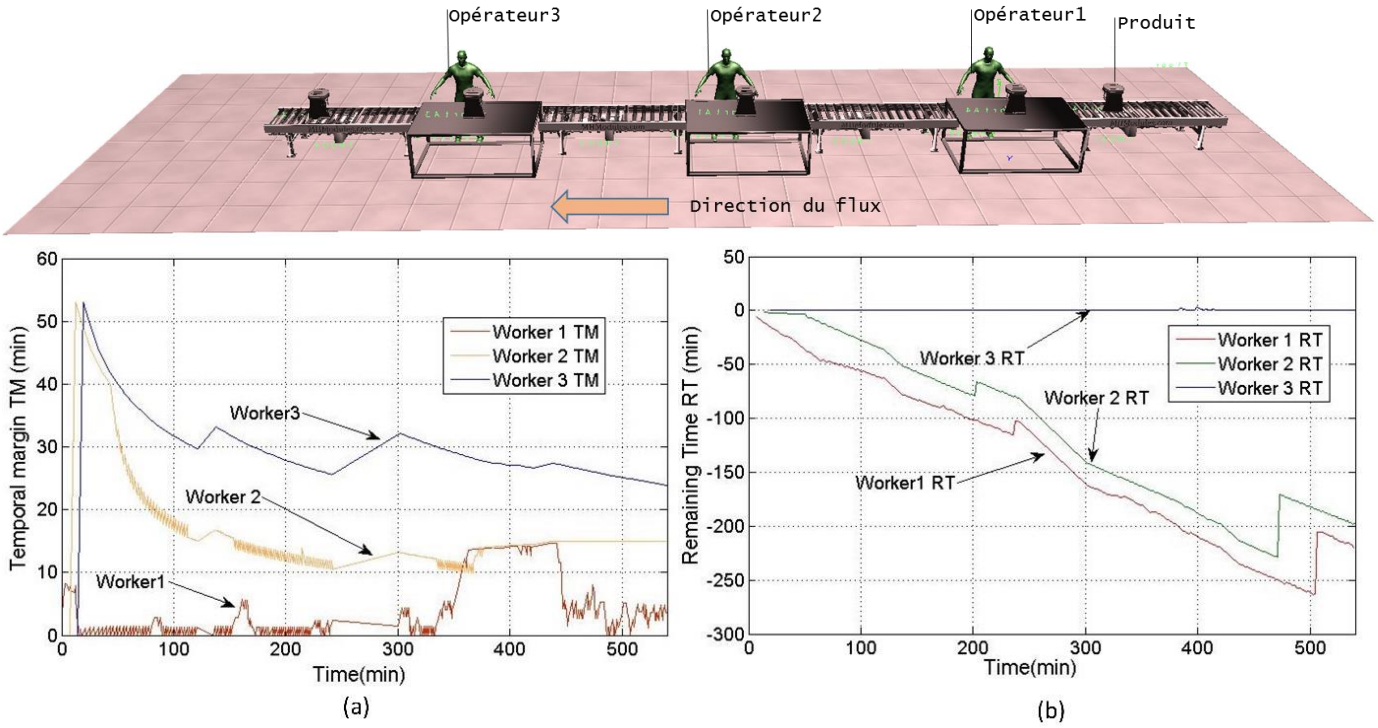

Figure 2. Exemple de résultats d'une simulation intégrant la fatigue et l'accoutumance de 3 opérateurs [El Mouayni et al., 2017]

4.2. Logiciels de mannequins virtuels

L'intérêt de ces logiciels est reconnu par la norme pour évaluer l'ergonomie physique lors de la conception de machines [NF EN1005-4, 2005]. Ils sont en effet utilisés afin d'évaluer les facteurs de risques biomécaniques des postes de travail, en simulant et analysant les mouvements et les efforts des futurs opérateurs. Un mouvement prescrit n'est toutefois jamais exécuté ni reproduit exactement de la même manière, que ce soit pour un même sujet à des moments différents, ou pour des sujets différents. Ces variations, que l'on choisit de désigner dans la suite de cet article sous le terme de « variabilité du mouvement », doivent donc être prises en compte par les concepteurs, pour que l'évaluation des risques de la situation de travail envisagée repose sur des données aussi représentatives que possible de l'activité future. Pourtant, en conception, cette variabilité est généralement négligée, voire ignorée [Gaudez et al., 2016].

Figure 3. Mannequin virtuel

Dans une même logique que précédemment, il est alors proposé d'enrichir les modèles utilisés pour simuler le mouvement du mannequin virtuel avec des lois de commande inspirées du comportement humain. La variabilité du mouvement peut être due à des facteurs nombreux et variés, difficilement maîtrisables en conception : âge de l'opérateur, genre, expérience, apprentissage, fatigue, douleurs, etc. Dans un premier temps, il a été décidé de se limiter à étudier l'influence de la fatigue musculaire. Pour cela, un modèle biophysique dit « à 3 compartiments », qui prend en compte les phénomènes de fatigue et de récupération, a été retenu [Xia et Frey-Law, 2008]. Il a été intégré dans les lois de commande des mouvements d'un mannequin numérique. Le démonstrateur ainsi réalisé est basé sur un environnement logiciel de simulation physique précédemment utilisé pour l'évaluation de l'ergonomie de postes de travail [De Magistris et al., 2015]. Les premières simulations réalisées avec ce démonstrateur confirment la faisabilité de la démarche. Elles montrent en effet qu'une réduction des capacités de production de force due à la fatigue entraîne une évolution des mouvements du mannequin [Savin et al., 2016]. Ces travaux se poursuivent actuellement afin d'évaluer la pertinence du modèle pour la prise en compte d'autres effets de la fatigue sur les mouvements, tels que les ajustements de posture, les variations de l'étendue des mouvements, des vitesses ou des accélérations, ou encore la réduction de la précision pour des tâches de pointage ou de suivi de trajectoire.

5 DISCUSSION

Dans une première partie, le concept de marges de manœuvre a été exposé en montrant notamment l'intérêt pour le concepteur de systèmes de production de les prendre en considération dès les premières phases d'un projet. Les concepteurs doivent donc pouvoir évaluer l'adaptabilité du futur système à la dynamique d'évolution des activités de travail [Falzon, 1996]. Cette notion de système adaptable doit prendre le pas sur la notion de système adapté à une situation nominale prescrite. Elle renvoie à la place laissée au pouvoir d'agir des opérateurs, qui permettra d'inventer de nouveaux usages dans la réalisation de

leur travail [Rabardel et Pastré, 1995]. Ce point de vue est également défendu dans la perspective de l'« ergonomie constructive », qui propose que la conception des situations de travail laisse aux opérateurs des possibilités de « développement de l'activité » ainsi qu'aux autres acteurs concernés et impliqués par la démarche de conception [Barcellini et al., 2013 ; Beguin, 2008].

Pour cela, il est nécessaire d'outiller les concepteurs sans venir alourdir un processus de conception déjà fortement affecté par des contraintes de qualité, de coûts et de délais. Quatre approches ont ainsi été proposées pour permettre d'appréhender les futures situations de travail des opérateurs. Chacune d'entre elles représente une brique permettant la construction de la prévention intégrée à différentes étapes du cycle de conception. Certes ces briques ne sont pas nativement compatibles et nécessitent des environnements de conception parfois différents : un tableur suffit pour faire une AMDEC ou une analyse fonctionnelle, mais des suites logicielles de conception assistée par ordinateur, encore spécifiques et coûteuses, sont nécessaires pour mettre en œuvre des mannequins numériques ou des simulations dynamiques de flux. Utilisables de façon isolée ou conjointe, elles se veulent avant tout être des aides pour le concepteur, mais peuvent également être des outils intermédiaires d'échange avec les experts en santé et sécurité au travail, les ergonomes, etc. Ainsi, grâce à des débats pluridisciplinaires, l'analyse fonctionnelle du besoin et l'AMDEC situations de travail permettent de collecter et d'intégrer les retours d'expérience dans les phases de conception préliminaire et détaillée. Lors du constat de dérives par rapport au fonctionnement nominal d'un système, concepteurs, producteurs et préventeurs ont un support pour aborder la question des conditions de travail. Le futur système devra être adaptable pour laisser aux opérateurs des marges de manœuvre nécessaires à la réalisation de leur activité dans un environnement variable. De la même manière, les dispositifs de simulation se doivent d'être représentatifs au mieux du fonctionnement de l'homme au travail. Qu'il s'agisse comme on l'a vu de développer des simulations de flux qui considèrent les facteurs humains comme la fatigue ou l'accoutumance à la tâche, ou encore d'introduire des mannequins numériques intégrant la possibilité de variation de mouvement, l'approche est la même : on ne simule plus simplement un "mode nominal" mais on tend à prendre en compte la diversité et la complexité des situations réelles de travail. La question est de savoir jusqu'où le concepteur peut/doit aller dans la prise en compte de cette variabilité. Cela renvoie au paradoxe de l'ergonomie de conception [Theureau et Pinsky, 1984] qui pointe le besoin de déterminer les conséquences d'une situation travail alors qu'elle n'existe pas encore. La distinction entre marges de manœuvre internes et externes prend ici tout son sens : le concepteur n'a à sa main que les marges externes, mais il devra en plus s'assurer que son futur système permette aux opérateurs de développer leurs marges internes et situationnelles : dans une perspective développementale, on ne conçoit plus un cadre figé mais un cadre qui pourra être remanié, adapté, par les futurs utilisateurs. Il n'existe actuellement aucune méthode ou outil de conception pour assister le concepteur dans ce challenge. C'est vraisemblablement l'un des enjeux des recherches à venir en ingénierie de conception, notamment dans un contexte où les industriels doivent concevoir des systèmes reconfigurables très rapidement, et toujours plus flexibles.

Par ailleurs, les quatre approches présentées reposent chacune sur un outil ou une démarche de conception qui aura été modifiée, adaptée ou enrichie avec une préoccupation de santé-sécurité au travail. Même si ces travaux veillent à ne pas alourdir le processus de conception en partant des pratiques actuelles des industriels, il est possible que les concepteurs n'aient pas le temps ni les ressources nécessaires pour les utiliser. Peut-être eux-mêmes ne disposent-ils pas, dans leur propre activité, des marges de manœuvre nécessaires à la prise en compte des conditions de travail des opérateurs ? Leur proposer des outils - aussi performants puissent-ils être - ne nous parait donc pas suffisant, et des travaux sont actuellement menés en parallèle afin d'étudier en détail le métier de concepteur. Avec un double point de vue en sciences de l'ingénieur et en sciences psychosociales, la recherche vise ainsi à étudier précisément le travail quotidien des concepteurs de systèmes de production, en interrogeant leurs possibilités d'intégrer dans les projets les dimensions du travail réel des opérateurs et les enjeux pour la santé [Lux et Quillerou-Grivot, 2014 ; Quillerou-Grivot et Lux, 2014, 2015]. Au-delà de leur fournir des préconisations ou des outils, il s'agit cette fois de tenter de comprendre les dilemmes auxquels ils sont confrontés (par exemple comment arbitrer un choix entre une solution économique et une solution ergonomique ?), d'identifier les freins et les leviers pour la prévention des risques professionnels (qu'ils se trouvent dans leur activité individuelle ou dans leurs interactions collectives, ou encore à l'interface entre conception et production). Par le biais d'une recherche-intervention en entreprise, l'objectif est d'expérimenter avec des concepteurs la construction d'un cadre de travail favorable au développement de la santé et de la sécurité des opérateurs.

6 CONCLUSION

Les opérateurs de production sont particulièrement touchés par les accidents du travail et les maladies professionnelles. Ces problèmes de santé au travail sont souvent liés à une conception des équipements de production, machines, postes, ou lignes, qui ne prend pas ou peu en considération leurs conditions de travail. Cet article donne donc des pistes de réflexion pour concevoir des systèmes de production plus sûrs. Il s'appuie notamment sur l'hypothèse qu'un système sûr doit laisser suffisamment de liberté à l'opérateur pour faire face aux variabilités individuelles (manque d'expérience, fatigue…) et à celles de l'environnement (aléas, pannes…). Ainsi, à travers quatre approches complémentaires, des moyens sont proposés pour intégrer la prise en compte des marges de manœuvre des opérateurs à plusieurs niveaux du processus de conception : tout d'abord en identifiant les usages réels des opérateurs et en les formalisant dans un cahier des charges (avec l'AMDEC et l'analyse fonctionnelle) ; ensuite en permettant d'enrichir les dispositifs de simulation de production avec la prise en compte des variabilités inhérentes au fonctionnement de l'homme au travail (avec la simulation de flux et les mannequins virtuels). Ces évolutions de démarches déjà connues des concepteurs vont dans le sens d'une prévention des risques professionnels sans alourdir outre mesure un processus de conception déjà très contraint. Toutefois, mettre à disposition de bons outils ne garantit pas qu'ils soient utilisés. Des analyses de l'activité réelle des concepteurs d'équipements de travail doivent ainsi être menées, afin de mesurer leurs propres marges de manœuvre pour intégrer la santé-sécurité dans les démarches de conception.

7 REFERENCES

Baines, T., Mason, S., Siebers, P.O., Ladbrook, J., (2004) Humans: the missing link in manufacturing simulation?

Simul. Model. Pract. Theory, 12, pp. 515–526. doi:10.1016/S1569-190X(03)00094-7.

Banks, J., (1998) Handbook of simulation principles methodology advances, application and practice, 1998th ed. Engineering and Management Press EMP.

Barcellini, F., Van Belleghem, L., Daniellou, F., (2013) Les projets de conception comme opportunité de développement des activités IN : Falzon, P. (Ed.), (2013), Ergonomie Constructive, pp. 191-206.

Beguin, P., Cerf, M., (2004) Formes et enjeux de l'analyse de l'activité pour la conception des systèmes de travail. Activités, 1(1), pp. 54-71.

Béguin, P., (2008) Conception et santé : quelques remarques sur le statut de l'activité de travail dans la conception des systèmes de production », Psychologie du Travail et des Organisations, 14(4), pp. 369-384.

Bose T.K., (2010) Total Quality of Management. Chapter 10. Basic Decision-making and Problem-solving Tools. Pearson Education India. ISBN: 978-8-131-70022-8.

Coulin, C.R., (2007) A situational approach and intelligent tool for collaborative requirements elicitation. Doctoral Thesis in Computing Sciences, University of Technology (Sydney, Australia) and University Paul Sabatier III (Toulouse, France), 337 p.

Coutarel, F., Daniellou, F., Dugué, B., (2003) Interroger l'organisation du travail au regard des marges de manœuvre en conception et en fonctionnement. La rotation est-elle une solution aux TMS? Pistes, 5(2).

Coutarel, F. (2004) La prévention des troubles musculo-squelettiques en conception : quelles marges de manœuvre pour le déploiement de l'activité ? Thèse de doctorat en ergonomie, Université Victor Segalen. Bordeaux 2, Editions du Laboratoire d'Ergonomie des Systèmes Complexes.

Coutarel, F., (2005) Développer les marges de manœuvre et évaluer nos interventions pour faire face aux TMS : Quelles conditions à une prévention durable ? 40e Congrès de la SELF, France, La Réunion.

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.

Coutarel, F., Petit, J., (2013) Prévention des TMS et développement du pouvoir d'agir. In : Falzon, P. (dir) Ergonomie constructive, pp. 99-119. Octarès, Toulouse.

Daille Lefèvre, B., Marsot, J., Fadier, E., Roignot, R., Falconnet, E., (2014) A specification methodology based on Use : Lambda-mu conference, Dijon, France, 21-23 October 2014, 8 p.

Daniellou, F., (1987) Les modalités d'une ergonomie de conception, son introduction dans la conduite des projets industriels. INRS, Paris, Note documentaire ND 1647, pp. 129-87.

Daniellou, F. (Ed.), (1996) L'ergonomie en quête de ses principes : débats épistémologiques. Octarès, Toulouse.

DARES, (2010) L'exposition des salariés aux maladies professionnelles en 2007. DARES Analyses, n°056.

DARES, (2014) Les accidents du travail entre 2005 et 2010. DARES Analyses, n°010.

De Magistris, G., Micaelli, A., Savin, J., Marsot, J., Gaudez, C., (2015) A dynamic digital human model based on robotics techniques and human behaviors. International Journal of the Digital Human, 1(1), pp. 81-115.

Directive 2006/42/EC, (2006). European Parliament and Council of 22 June 1998 on the approximation of the laws of the Member States relating to machinery. Official Journal L 157, 09/06/2006.

Directive 89/391/CEE, (1989) Conseil des Communautés Européennes du 12 juin 1989. JOCE n° L. 183 du 29 juin 1989.

Durand, M., Vézina, N., Baril, R., Loisel, P., Richard, M.C., Ngomo , S, (2011) Relationship between the margin of manoeuvre and the return to work after a long-term absence due to a musculoskeletal disorder: an exploratory study, 33(13–14), pp.1245–1252.

El Mouayni, I., Etienne, A., Siadat, A., Dantan, J.Y., Lux, A., (2017) A multi-agent based simulation tool for assessing the working conditions and production system performance using the concept of work margin. Computers & Industrial Engineering (article soumis).

EN 1325-1, (1997) Value management, value analysis, functional analysis vocabulary. Value analysis and functional analysis. CEN, Bruxelles, 12 p.

Fadier, E., De la Garza, C., (2006) Safety design: Towards a new philosophy. Safety Science, 44(1), pp. 55-73.

Falzon, P., (1996) Des objectifs de l'ergonomie. In : Daniellou, F. (Ed.) L'ergonomie en quête de ses principes. Débats épistémologiques, pp. 233-242. Octarès, Toulouse.

Gaudez, C., Gilles, M., Savin, J., (2016) Intrinsic movement variability at work. How long is the path from motor control to design engineering? Applied Ergonomics, 53, Part A, pp. 71-78.

Givi, Z.S., Jaber, M.Y., Neumann, W.P., (2015) Modelling worker reliability with learning and fatigue. Appl. Math. Model., 39, pp. 5186–5199. doi:10.1016/j.apm.2015.03.038

Jaber, M.Y., Bonney, M., (1997) A comparative study of learning curves with forgetting. Appl. Math. Model., 21, pp.523-531. doi:10.1016/S0307-904X(97)00055-3.

Jaber, M.Y., Givi, Z.S., Neumann, W.P., (2013) Incorporating human fatigue and recovery into the learning forgetting process. Appl. Math. Model., 37, pp. 7287–7299.

Jang, S., Woo, W., (2005) Unified context representing user-centric context: Who, where, when, what, how and why. In: International Workshop on ubiPCMM, CEUR Workshop Proceedings, pp. 26–34.

Leplat, J., (2000) L'analyse psychologique de l'activité en ergonomie : aperçu sur son évolution, ses modèles et ses méthodes. Octarès, Toulouse.

Lux, A., Mawo De Bikond, J., Etienne, A., Quillerou-Grivot, E., (2016) FMEA and consideration of real work situations for safer design of production systems. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 22(4), pp. 557-564. DOI:10.1080/10803548.2016.1180856.

Lux, A., Quillerou-Grivot, E., (2014) Un ingénieur et une psychologue pour une analyse d'activité de production : quels apports pour la prise en compte de la santé au travail lors de la conception des systèmes de production ? In : 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation. MOSIM'14, de l'économie linéaire à l'économie circulaire, Nancy, France, 5-7 novembre 2014.

Marc, J.., Belkacem, N., Marsot, J., (2007) Virtual reality: A design tool for enhanced consideration of usability validation elements. Safety Science, 45(5), pp. 589-601.

Marsot, J., Daille Lefèvre, B., Lux, A., Etienne, A., Siadat, A., (2014) Conception sûre des équipements de travail : proposition de deux approches pour la prise en compte des usages. In : 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation - MOSIM'14 « de l'économie linéaire à l'économie circulaire », Nancy,

France, 5-7 novembre 2014.
Midler, C., (2004) L'auto qui n'existait pas, Ed. Dunod, Paris.
NF EN 1005-4, (2005) Sécurité des machines, performance physique humaine, partie 4. AFNOR, Paris, 19 p.
NF EN 60812, (2006) Techniques d'analyses de la fiabilité du système, procédure d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE). AFNOR, Paris, 46p.
NF EN 614-1:2006+A, (2009) Sécurité des machines, principes ergonomiques de conception. AFNOR, Paris, 7p.
Quillerou-Grivot, E., Lux, A., (2014) Quand la psychologie rencontre l'ingénierie : quelles évolutions de la recherche-intervention en santé au travail sur la conception des systèmes de production ? XVIIIème congrès de l'Association Internationale de Psychologie de Langue Française, Florence, 26-29 août 2014.
Quillerou-Grivot, E., Lux, A., (2015) New perspectives in intervention for health at work: analyzing design work to transform design practices. Triennial Congress of the International Ergonomics Association, Melbourne.
Rabardel, P., Pastré, P., (2005) Modèles du sujet pour la conception. Dialectiques activités développement, Toulouse, Octarès.
Ruiz, N., Giret, A., Botti .V, Feria ,V., (2014) An intelligent simulation environment for manufacturing systems. Computers & Industrial Engineering ,76, pp. 148–168.
Sagot, J.C., Gouin V., Gomes, S., (2003) Ergonomics in product design: safety factor. Safety Science, 41, pp. 137-154.
Savin, J., Gilles, M., Gaudez, C., Padois, V., Bidaud, P., (2016) Movement variability and digital human models: development of a demonstrator taking the effects of muscular fatigue into account. 7th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2016), Orlando, USA.
Theureau, J., Pinsky, P., (1984) Paradoxe de l'ergonomie de conception et logiciel informatique. Revue des Conditions de Travail, 9, pp. 25-31.
Xia, T., Frey-Law, L.A., (2008) A theoretical approach for modeling peripheral muscle fatigue and recovery.