



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/10985/20657>

To cite this version :

Sergio O. ARIAS CORZO, Bruno DAILLE-LEFEVRE, Xavier GODOT, Patrick MARTIN -
Conception sûre des systèmes de production : intégration de la santé/sécurité des opérateurs à
travers l'analyse des usages - In: Congrès CIGI-Qualita, France, 2021-05-31 - Conception sûre
des systèmes de production : intégration de la santé/sécurité des opérateurs à travers l'analyse
des usages - 2021

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu



Conception sûre des systèmes de production : intégration de la santé/sécurité des opérateurs à travers l'analyse des usages

SERGIO O. ARIAS C.*¹, BRUNO DAILLE-LEFEVRE¹, XAVIER GODOT², PATRICK MARTIN²

¹Institut national de recherche et de sécurité (INRS),
Département Ingénierie des Equipements de Travail,
1 rue du Morvan, 54519 Vandœuvre-Lès-Nancy cedex, France
arias_corzo@hotmail.com
bruno.daille-lefevre@inrs.fr

²Laboratoire de Conception Fabrication Commande,
Arts et Métiers, Université de Lorraine,
4 rue Augustin Fresnel, 57078 Metz, France
xavier.godot@ensam.eu
patrick.martin@ensam.eu

*Auteur correspondant

Résumé – Lors d'une démarche de conception de poste de travail, les leviers d'action du concepteur face à d'éventuels risques dépendront du moment où celui-ci sera en mesure d'identifier ces risques. En effet, s'ils sont découverts trop tard, les retours en arrière sont très difficiles, voire impossible dans certains cas. Quoiqu'il en soit, ils impacteront inmanquablement le projet en termes de coût et de délai.

En cas de poursuite du projet malgré les risques encourus, le poste de travail ne sera pas adapté aux opérateurs, ce qui provoquera une diminution de la productivité et une augmentation inéluctable de situations dangereuses.

Dans le cadre de ce projet, pour pouvoir assurer la santé et la sécurité des opérateurs, nous avons développé une méthodologie qui permettra aux concepteurs d'identifier le plus rapidement possible les usages de poste de travail et les risques associés. Cette méthodologie combine une démarche de conception générique qui s'appuie sur une approche systémique afin d'identifier les usages que les opérateurs feront du système pour assurer les impératifs de production, et une démarche reposant sur une approche énergétique, qui elle, vise à identifier les dangers potentiels.

Abstract – During a workstation design process, the capacity to deal with possible risks will be determined by the moment when the designer is able to identify these risks. Indeed, if they are discovered too late, it's very difficult, and in some cases impossible, to take a step backwards. Nevertheless, they will inevitably impact the project in terms of cost and deadlines.

If the project continues in spite of the risks involved, the workstation will not be suitable for the operators, which will lead to a decrease in productivity and an inevitable increase in dangerous situations.

Within the framework of this project, in order to be able to ensure the health and safety of the operators, we have developed a methodology that will allow the designers to identify as quickly as possible the uses of the workstation and the associated risks. This methodology combines a generic design approach based on a systems approach to identify the uses that operators will make of the system to ensure production requirements, and an approach based on an energy approach, which aims to identify potential dangers.

Mots clés - industrie du futur, analyse fonctionnelle, ingénierie système, volume d'influence, santé-sécurité des opérateurs.

Keywords - factory of the future, functional design, systems engineering, volume of influence, health and safety of operators.

1 INTRODUCTION

À l'ère des réseaux sociaux et d'un monde de plus en plus connecté, chaque individu désire un degré de personnalisation élevé dans ce qu'il achète et ce qu'il consomme, et ce, malgré des ressources qui se font de plus en plus rares. Cette tendance entraîne l'apparition de nouveaux défis sur le plan de « l'industrie du futur », puisqu'il est important de mettre en place des systèmes de production dits flexibles qui répondront plus facilement à cette demande personnalisée et permettront d'offrir une gamme de produits plus large tout en utilisant le moins de ressources possibles. [Bidet-Mayer, 2016], [Evers, 2018], [Østergaard, 2018].

Pour y parvenir tout en garantissant la santé et la sécurité des

opérateurs, il est nécessaire de connaître les caractéristiques du système de production, et plus particulièrement l'usage qu'en feront ces opérateurs pour identifier les risques associés.

Dans ce contexte, nous avons développé, au sein du laboratoire commun sur la « conception sûre de situation de travail », le projet intitulé « aide à la conception de poste de travail par la prise en compte des variabilités d'usages et des exigences de sécurité », afin d'introduire une méthodologie qui pourra aider les concepteurs à identifier dès les premières phases du projet les usages que les opérateurs feront du système pour assurer les impératifs de production et les risques avérés.

2 ETAT DE L'ART

La norme NF EN ISO 6385 (2016), définit un poste de travail comme étant une combinaison et aménagement spatial des équipements de travail, au sein de l'environnement de travail, selon les conditions imposées par les tâches.

Afin d'assurer la santé et sécurité des opérateurs, il faut parvenir à un équilibre entre les capacités de l'opérateur et les exigences du poste de travail.

À cet égard, l'état de l'art a été fait sur les démarches de conception de produits et de système, mais aussi sur la prise en compte de la santé et de la sécurité des opérateurs dans l'activité de conception.

Concernant le premier axe, les seuls objectifs sont d'identifier le moment précis durant lequel le concepteur sera amené à construire l'usage qu'un opérateur fera du système de production en cours de conception, mais aussi sous quelle forme ces usages sont représentés.

Concernant le second axe, le but est de trouver une méthode outillée permettant d'identifier, d'estimer et d'évaluer les phénomènes dangereux auxquels un opérateur est exposé à travers l'exploitation des seules informations liées à l'usage qu'il fera d'un système de production donné.

2.1 Identification d'usages

2.1.1 Les démarches de conception

Il existe de nombreuses démarches de conception qui ambitionnent toutes de formaliser et structurer cette activité. Cependant, elles diffèrent profondément notamment sur leur niveau de complétude, mais aussi sur leur niveau de généricité ou encore leur niveau de détail. [Paynter, 1961], [Cross et Roy, 1989], [Suh, 1990], [Das et Sengupta, 1996], [Pahl et Beitz, 1996], [Ullman, 2003], [Hatchuel et Weil, 2003], [Gero, 2003], [Scaravetti, 2004], [Godot, 2013].

Plusieurs synthèses permettent de les positionner par rapport à l'activité de conception dans son ensemble, c'est-à-dire en partant du besoin brut du client pour aller jusqu'à la définition complète du produit ou du système physique. Ainsi, ces travaux ont permis d'identifier un cadre générique constitué de cinq grandes phases (voir figure 1).



Figure 1. Démarche de conception générique.

2.1.2 Usages du système par l'opérateur

En termes de conception, les usages se traduisent sous forme de « fonctions » et de « contraintes ». Ainsi, nous pouvons définir un usage du point de vue de la conception comme étant un groupe de fonctions organisées de manière cohérente afin d'atteindre un objectif donné tout en respectant un ensemble de contraintes. Par conséquent, nous avons sélectionné les démarches de conception abordant de façon détaillée et structurée les fonctions et les contraintes. Ainsi, nous allons aborder plus en détails l'Analyse Fonctionnelle du Besoin (AFB) et l'Ingénierie Système (IS).

2.1.3 Analyse Fonctionnelle de Besoin (AFB)

L'AFB, [AFNOR, 1991], [AFNOR, 2009] est une méthode outillée qui permet de décrire une fonction ou un ensemble de fonctions et leurs relations, qui répondent au besoin d'un client, lui-même conditionné par différents facteurs « techniques, économiques, réglementaires, sociologiques, etc. » ; ces fonctions sont systématiquement caractérisées, classées et évaluées.

La démarche à suivre peut-être décrite comme suit :

1. *Identifier les besoins* : ces besoins sont des nécessités ou désirs éprouvés par un utilisateur, exprimés par le demandeur (le client) lesquels vont être adaptées à l'environnement fonctionnel.
2. *Traduire les besoins sous forme de fonctions à remplir par le produit* ; ces fonctions sont décrites à partir des besoins de l'utilisateur en exprimant leur relation avec l'environnement.
3. *Décrire et associer des fonctions services, technique et contrainte à chaque fonction* ; ces fonctions sont décrites à partir des phases du cycle de vie du produit.

Cette démarche peut être représentée comme indiquée en figure 2.



Figure 2. Représentation graphique de la démarche d'AFB

2.1.4 Ingénierie Système (IS)

L'IS [ISO/IEC, 2007], [ISO/IEC/IEEE 24765, 2009], [ISO/IEC/IEEE, 2011], [Faisandier, 2011], [Fiorèse et Meinadier, 2012], [ISO/IEC/IEEE, 2015], est un ensemble de concepts, méthodes et outils reposant sur une approche systémique de l'activité de conception. Ainsi, le produit à concevoir est considéré comme un ensemble d'éléments interagissant de manière coordonnée et cohérente appelé « système ». Sa finalité est de répondre au besoin du demandeur appelé « mission ». Mais l'approche systémique permet également d'aborder le caractère multi-technologique d'un système à travers l'intégration des différents champs disciplinaires requis pour le concevoir.

Du point de vue méthodologique, l'IS est portée par le « Cycle en V » qui décrit et organise chacune des étapes de conception (voir figure 3).

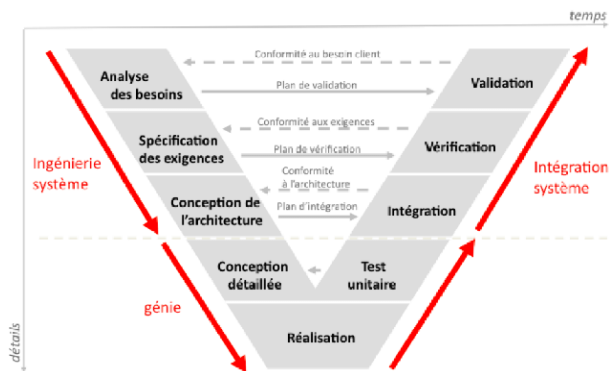


Figure 3. Cycle en V d'IS

De même qu'avec l'AFB, cette démarche peut être représentée comme indiquée en figure 4.

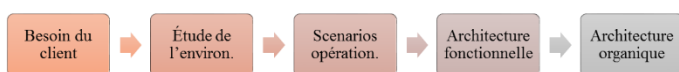


Figure 4. Représentation graphique de la démarche d'IS

Afin d'établir le périmètre et la portée du projet, les démarches représentées en figures 2 et 4 ont été positionnées par rapport au cadre général de conception présenté en figure 1. Il apparaît clairement que l'AFB et l'IS interviennent dans les deux premières phases du cadre général, à savoir « le besoin du client et le contexte » mais aussi « la conception architecturale ». De plus, l'élicitation d'usages tels que nous les avons précédemment définis intervient dans les étapes 2, 3, 4 et 5 que ce soit pour l'AFB ou pour l'IS (voir figure 5).

Les résultats de la comparaison sont présentés ci-dessous.

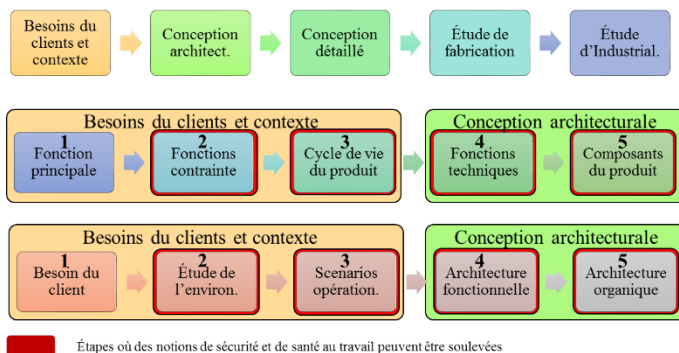


Figure 5. Comparaison entre l'AFB et l'IS sur la base d'une démarche de conception générique

2.1.5 Conclusion concernant les démarches de conception

Dans le cadre de ce projet, nous avons privilégié l'utilisation de l'IS, car elle répond mieux aux besoins de l'étude au niveau d'usages. En effet, l'AFB permet d'identifier les fonctions, les contraintes et les composants du système, mais la nature de leurs interactions n'est que partiellement traitée et l'exhaustivité des éléments collectés n'est pas garantie. Concernant l'IS, ces aspects sont gérés à travers les notions « d'architecture fonctionnelle » (ensemble de fonctions interagissant via des liens d'antériorités et des liens logiques) et « d'exigence » (estimation, évaluation, traçabilité des contraintes et des

niveaux de performance souhaités).

2.2 Prise en compte de la santé et de la sécurité des opérateurs dans l'activité de conception.

Concernant la prise en compte de la santé/sécurité des opérateurs, la méthodologie générale est donnée par la norme. Trois étapes essentielles y sont présentées : l'identification, l'estimation et l'évaluation (voir figure 6). [Marsot, 2001], [Fadier et De la Garza, 2006], [Ghemraoui, 2009], [LE PARLEMENT EUROPÉEN, E. L. C. & DE L'UNION, E. U. R. O., 2009], [ISO, N., 2010], [INRS, 2011].

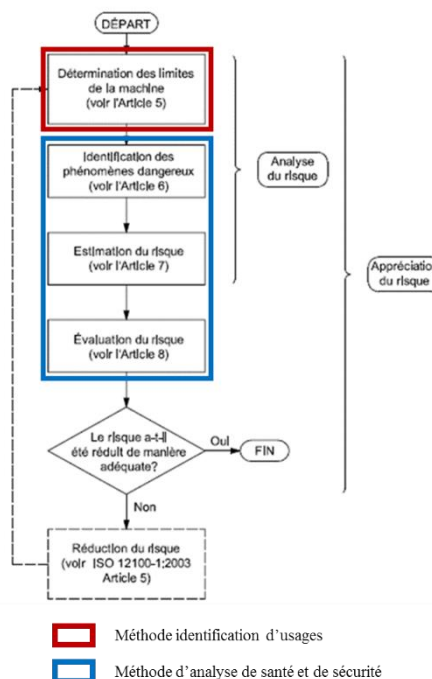


Figure 6. Démarche simplifiée d'identification des risques

Ces trois aspects ont été traités dans plusieurs études qui mettent en évidence le lien direct entre le danger et les flux d'énergies. Parmi celles-ci, se trouvent le modèle *MOSTRA*, la méthode *EZID* et la méthode des « *Volumes d'Influence* ».

2.2.1 Modèle de Situation de Travail (MOSTRA)

MOSTRA [Hasan, 2002], est un modèle permettant de représenter une « situation de travail ». Il suit la logique suivante : dans la « situation de travail », le système remplit une « fonction ». La « fonction » se base sur des « solutions techniques » et est satisfaite par la réalisation des « tâches ». Ces « tâches » nécessitent des « outils » et « consommables » appelés « auxiliaires » et une « équipe de travail ». Par ailleurs, les « solutions techniques » sont source de « phénomènes dangereux » qui engendrent des « risques » dans les « zones dangereuses ». L'existence de « risques » implique de prendre des mesures de sécurité. Enfin, un « événement dangereux » peut déclencher un accident et influencer directement l'indice de risque.

2.2.2 Méthode d'analyse énergétique pour l'identification systématique des dangers pendant la conception (EZID)

EZID [De Galvez, 2016] permet d'identifier, d'estimer et

d'évaluer les phénomènes dangereux auxquels un opérateur sera exposé lors de l'utilisation d'un système de production. Elle s'inscrit dans le cadre de la conception. Elle repose sur une modélisation du système et trois niveaux de traitement.

1. *Modélisation du système* : permet de capitaliser et d'identifier tous les flux et source d'énergies généralisées (potentielle, cinétique, électrique, thermique, chimique, rayonnement, structurelle) issus des pièces et composants du système de production.
2. *Premier niveau de traitement* : répertorier et identifier la nature des phénomènes dangereux à partir des paramètres caractérisant les sources et flux d'énergies (*variables généralisées étendues*).
3. *Second niveau de traitement* : identifier les causes des phénomènes dangereux précédemment identifiés.
4. *Troisième niveau de traitement* : identifier le caractère significatif des phénomènes dangereux (*soit leur capacité à générer un risque*) ; cette identification repose sur la comparaison des niveaux d'énergie de la machine avec des valeurs seuils réglementaires ou normalisés.

2.2.3 Méthode des Volumes d'Influences (VI)

La méthode des VI [Martin et al, 2019] a les mêmes objectifs que la méthode EZID et intervient également lors de la conception. Elle repose sur une analyse spatio-temporelle systématique et structurée du système de production à travers les flux d'énergie pouvant potentiellement exister entre les composants et les opérateurs de celui-ci.

L'identification et l'évaluation des phénomènes dangereux sont réalisées à partir d'éléments spatiaux, temporels et énergétiques issus du système de production comprenant, des opérateurs et des éléments à produire (séquencement des actions et implantation des constituants du système de production). Quant à la quantification des phénomènes dangereux, elle est faite en deux temps. Tout d'abord, elle est traitée via le gradient d'énergie défini par rapport au volume que peut potentiellement occuper cette énergie lorsqu'elle est mise en œuvre (voir figure 7). Enfin, elle est traitée à travers des tables d'équivalences entre le niveau d'énergie auquel est soumis un opérateur et le niveau de blessures que celui-ci peut engendrer.

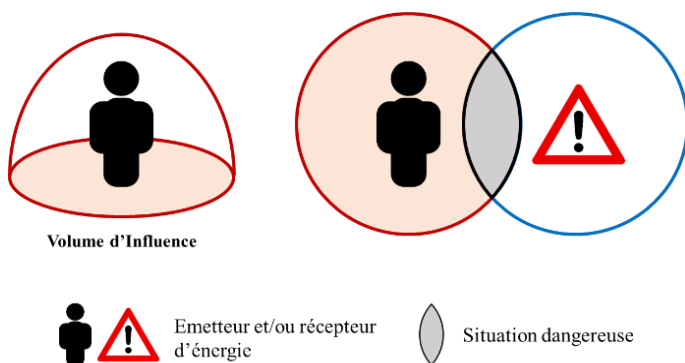


Figure 7. Volumes d'Influence

2.3 Conclusion concernant la prise en compte de la santé et de la sécurité des opérateurs dans l'activité de conception.

MOSTRA identifie l'ensemble des objets nécessaires à la réalisation d'une analyse de santé/sécurité des opérateurs lors de

la conception d'un système. Ces objets concernent le système proprement dit et les phénomènes dangereux. Cependant, il ne répond donc pas à notre besoin, car en dehors d'une logique assurant la cohérence de l'ensemble du modèle, il ne propose pas de méthode systématique permettant d'identifier, d'estimer et d'évaluer les phénomènes dangereux auxquels un opérateur est confronté lors de l'utilisation d'un système de production. Il ne permet donc pas de quantifier les risques associés.

EZID est un modèle de données associé à une méthode complète d'analyse des phénomènes dangereux que peut rencontrer un opérateur de système de production. De ce point de vue, il répond à notre besoin. Néanmoins, il s'appuie sur une description détaillée de ce dernier qui nécessite une mise en œuvre à un stade très tardif de la conception du système (exemple : géométrie des pièces élémentaires). Par conséquent, la méthode EZID ne répond pas à nos besoins sur ce plan précis.

La méthode des VI répond à nos besoins. En effet, elle est structurée et entièrement outillée. De plus, elle s'appuie sur l'exploitation d'informations spatiales et temporelles dont le niveau de détail semble parfaitement compatible avec les données disponibles au moment de l'élaboration des usages que les opérateurs feront du système de production. Cette approche constitue la base de la méthode proposée dans le cadre de cette étude.

3 PRESENTATION ET APPLICATION DE LA METHODOLOGIE

3.1 Présentation de la méthodologie d'aide à la décision

Compte-tenu de l'état de l'art, nous avons suivi une approche permettant de proposer un mécanisme d'intégration de la santé/sécurité au moment où sont élicités les usages lors de la conception du système de production et de le tester immédiatement sur un cas d'étude réel avant d'en tirer toutes les conclusions qui s'imposent. La figure 8 illustre cette progression.

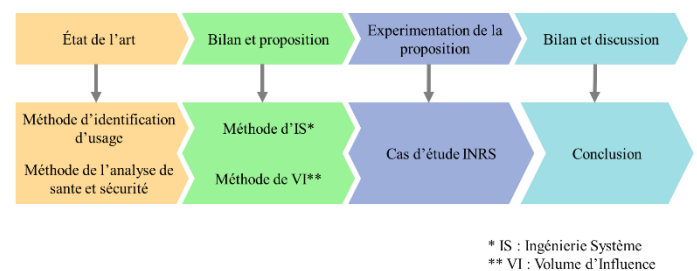


Figure 8. Approche scientifique pour réaliser l'étude

Même si nous nous appuyons sur les concepts et modèles de l'IS, nous devons impérativement détailler la méthode de mise en œuvre opérationnelle afin de nous assurer qu'elle permettra de faire apparaître des données de conception dont le niveau de détail sera compatible avec celles qui sont nécessaires à l'application de la méthode des VI.

Ainsi, cette intégration a nécessité l'identification de la nature et du niveau de granularité des données permettant leur exploitation pertinente tant du point de vue de la conception que de celui de la santé/sécurité. Ce travail a été formalisé à travers une méthode de conception détaillée suivant la démarche de l'IS. Cette méthode est constituée d'un ensemble ordonné

d'étapes, chacune étant caractérisée par ses données d'entrée, ses données de sortie et la manière de les créer. La *figure 9* présente le détail de chaque étape est traité dans la *section 3.1* de cet article.

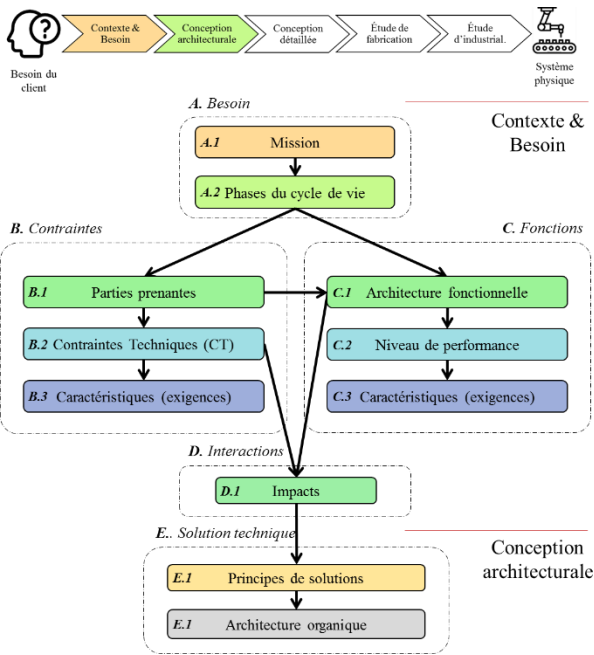


Figure 9. Méthode développée

Concernant la structuration et la formalisation des données de conception, nous avons dû définir de nouveaux outils que ceux préconisés par l'IS (en l'occurrence « SysML ») afin qu'ils soient adaptés à la nature et au niveau de granularité des données de conception issues de la mise en œuvre de la méthode que nous proposons en *figure 9*. Ainsi, la *figure 10* présente l'outil de représentation utilisé pour formaliser les données issues des blocs d'étapes A, B et C de la *figure 9*. Il s'agit d'une carte heuristique. Quant à la *figure 11*, elle présente la manière dont sont structurées les données émanant de l'étape D de la *figure 9*. Il s'agit d'une simple matrice. Enfin, la *figure 12* présente la structuration des données du bloc d'étapes D de la *figure 9*. Il s'agit ici d'une représentation de type « entité/relation ».

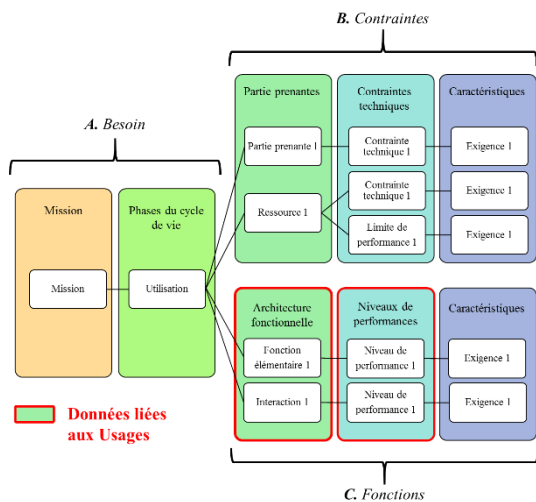


Figure 10. Formalisation et structuration des données de conception (contexte et besoin)
Voir figures 9A, B et C

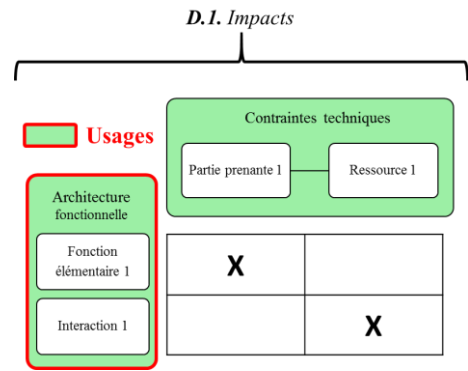


Figure 11. Liens entre les contraintes techniques et l'architecture fonctionnelle
Voir figure 9D

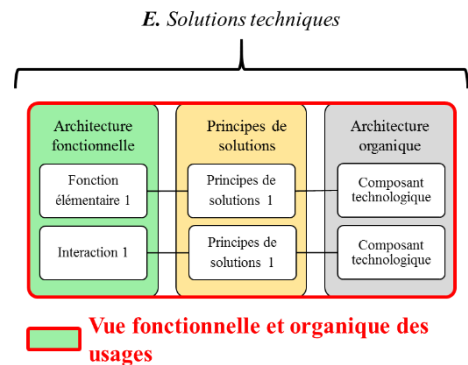


Figure 12. Formalisation et structuration des données de conception (conception architecturale)
Voir figure 9E

3.1 Mise en œuvre opérationnelle de la méthode à travers la réalisation d'une étude de cas

Pour mettre à l'épreuve notre méthode, nous avons réalisé les deux premières phases (*contexte et besoin, puis conception architecturale*) de la conception d'un nouveau poste de travail destiné à équiper l'atelier de l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS). Nous n'avons pas encore traité la mise en œuvre de la méthode des VI par manque de temps. Cependant, nous nous sommes assurés que les données de conception créées permettent bien l'application de celle-ci (voir *figure 18*).

Les principales caractéristiques de cet équipement et de son environnement sont illustrées en *figure 13*.

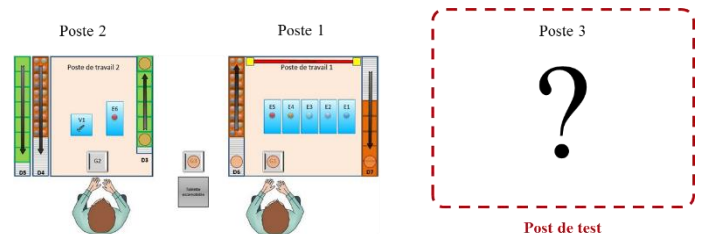


Figure 13. Poste de travail à concevoir

Ce poste de travail s'insère dans une ligne de production déjà constituée de deux autres postes d'assemblages. Il a pour objectif de tester les produits assemblés d'un point de vue

électrique. Dans la suite de cet article, ce poste sera désigné comme « système ».

La première étape de notre méthode consiste à définir la « mission » du système (voir figure 9 A.1). Elle a pour objectif de s'assurer que le client et le concepteur perçoivent le système de la même façon afin d'éviter les malentendus en fin de projet. Pour cela, nous rédigeons une unique phrase constituée d'un seul verbe d'action et de deux compléments : le premier précise le ou les objets sur lesquels cette action portera et le second précis le périmètre de cette action en termes du niveau de performance global. Voici la mission définie pour le système : *contrôler la conformité des produits* en faisant des tests électriques de basse et de haute tension pour *assurer que 100 % des produits vendus fonctionnent*.

La deuxième étape concerne le cycle de vie du système. L'objectif est de circonscrire le périmètre exact de l'étude afin de ne pas omettre certains usages. Pour cela, nous avons identifié les différents contextes (ou environnements) dans lesquels le système sera plongé. Ces derniers représentent une phase du cycle de vie du système (voir figure 9 A.2). Compte tenu de l'objectif du projet, nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux phases d'utilisation, de réglage et de maintenance, qui sont les phases où le système pourra interagir avec ses « utilisateurs » (l'opérateur, la maintenance et des tierces personnes).

La troisième étape a pour objectif de recenser tous les éléments matériels et immatériels, qui interagiront directement avec le système. En outre, les éléments potentiellement utilisables en tant que ressources sont également répertoriés (voir figure 9 B.1).

Les quatrième et cinquième étapes ont pour finalité de détailler la nature et interactions et les quantifier. Leur nature est notamment déterminée à travers les flux d'énergies. Quant à leur dimensionnement, il suit le formalisme des « exigences » telles qu'elles sont décrites en IS. Chacune d'entre elles est donc constituée d'un paramètre, d'une question de validation, d'une valeur, d'une tolérance et d'un moyen de contrôle (voir figure 14). Ces éléments forment alors les « contraintes techniques » du système (voir figure 9 B.2 et B.3).

CONTRAINTE TECHNIQUE					
Parties prenantes	Paramètre	Question de validation	Valeur	Tolérance	Moyen de contrôle
Magasinier	Charge physique de travail	La personne a-t-elle d'un handicap ?	oui/ non	N/A	Certificat RH, diplôme ou certificat d'études
Aire comprimé	Pression	N/A	7 bar	± 0,5 bar	Baromètre

N/A : Non Applicable

Figure 14. Contraintes techniques du système

La sixième étape est très importante puisque c'est à ce moment précis que nous élaborons les différents usages du système. Il s'agit d'imaginer une suite d'actions séquencée de manière logique permettant de répondre entièrement la mission décrite à l'étape. Cet ensemble forme « l'architecture fonctionnelle du système » (voir figure 9 C.1). Chaque action constitue alors une « fonction élémentaire » (voir figure 15). Pour une même mission, il existe généralement plusieurs solutions possibles. Dans ce cas, un choix doit être fait par le concepteur en utilisant par exemple des outils d'analyse de la valeur.

N°	Fonction	Fonc. élémentaire
F10	Positionner le produit sur le système dans la zone de stockage amont	Positionner
F20	Solidariser le produit et le système en vue de son déplacement vers la zone de test	Solidariser
F30	Déplacer le produit de la zone de stockage amont vers la zone de test	Déplacer

Figure 15. Fonctions et fonctions élémentaires du système

Les étapes sept et huit ont le même but et les mêmes modalités de réalisation que les étapes quatre et cinq, à savoir : détailler et quantifier, mais cette fois-ci le niveau de performance des fonctions élémentaires (voir figures 9 C.2 et C.3 et 16).

NIVEAU DE PERFORMANCE					
Fonc. élémentaire	Paramètre	Question de validation	Valeur	Tolérance	Moyen de contrôle
Positionner	Orientation	Le cube est-il centré par rapport à la zone de test ?	oui/ non	N/A	Poka-Yoke
Déplacer	Temps	N/A	tI	± t s	Cronomètre

N/A : Non Applicable

Figure 16. Niveau de performance des fonctions élémentaires du système

La neuvième étape permet de lier les actions et les fonctions élémentaires afin que le concepteur puisse aisément intégrer les contraintes dans les choix techniques et technologiques qu'il sera amené à faire pour répondre aux différentes fonctions du système (voir figure 10 D.1). Une simple matrice de liens permet d'indiquer quelles contraintes techniques s'appliquent sur quelles fonctions élémentaires (voir figure 11). Ici s'achève la première phase : « contexte et besoin ».

Par conséquent, la dixième étape inaugure la phase de « conception architecturale ». Il est important de noter que le concepteur considérera alors le système qu'il est en train de concevoir à travers ses éléments physiques. Cette transition s'opère tout d'abord en associant à chaque fonction élémentaire un principe de solution (voir figures 9 E.1 et 12). Celui-ci est décrit à partir d'une combinaison de transformations énergétiques assurant l'action, la commande et le contrôle de manière à garantir un fonctionnement en boucle fermée de l'ensemble (voir figure 17).

N°	Fonction	Fonc. élémentaire	Sous-fonct.	Solution technique
F10	Positionner le cube sur le système dans la zone de stockage amont	Positionner	Action	Distributeur pneumatique
			Contrôle	Contrôle visuel
			Commande	Commande électrique

Figure 17. Solutions choisies par sous-fonctions des fonctions du système

La onzième et dernière étape permettent dans un second temps d'associer à chaque principe de solution un ensemble de composant techniques standards ou spécifiques. L'assemblage des composants de l'ensemble des fonctions élémentaires forme « l'architecture organique » du système (voir figures 9 E.2 et 12). L'élaboration d'une de l'agencement géométrique des différents composants peut être réalisé à ce stade (mise en œuvre des logiciels de CAO).

Il est important de noter que ces deux dernières étapes peuvent faire apparaître plusieurs solutions. Le concepteur doit procéder à un choix en s'appuyant sur les mêmes outils qu'à l'étape 6.

standard.

- Bidet-Mayer, T. (2016). Industrie du futur : où en est la France ? *La Fabrique de l'Industrie*. 2-6.
- Cross, N., & Roy, R. (1989). *Engineering design methods* (Vol. 2): Wiley New York.
- Das, B., & Sengupta, A. K. (1996). Industrial workstation design: a systematic ergonomics approach. *Applied ergonomics*, 27(3), 157-163.
- De Galvez, N. (2016). *Sécurité des machines: méthodologie d'identification systématique des phénomènes dangereux en conception* (Thèse de doctorat, ENSAM)
- Evers, V. (2018). De robots y hommes. [Online] *El correo de la UNESCO*, UNESCO. Disponible sur : <https://n9.cl/jtsoi>
- Fadier, E., & De la Garza, C. (2006). Safety design: Towards a new philosophy. *Safety Science*, 44(1), 55-73.
- Faisandier, A. (2011). Formation à l'ingénierie des systèmes-ingénierie des besoins et des exigences. *MAP système*.
- Fiorèse, S. & Meinadier, J.P. (2012). Découvrir et comprendre l'ingénierie système, ed. c. AFIS : *CEPADUES Editions*.
- Gero, J. S. (2003). The situated Function-Behaviour-Structure framework, *Design Studies*, Editions Elsevier.
- Ghemraoui, R. (2009). *Méthodologie de conception innovante intégrant la sécurité des utilisateurs: application aux liaisons tracteur-outils* (Thèse de doctorat, Doctorat Sciences Pratiques Ecole Normale Supérieure de Cachan).
- Godot, X. (2013). *Interactions Projet/Données lors de la conception de produits multi-technologiques en contexte collaboratif* (Thèse de doctorat, Paris, ENSAM).
- 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* (Thèse doctoral, Université Henri Poincaré-Nancy 1).
- Hatchuel, A., & Weil, B. (2003). A new approach of innovative Design: an introduction to CK theory. In *DS 31: Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design*, Stockholm.
- INRS, (2011). Conception des lieux et des situations de travail. Brochure, ED 950.
- ISO 6385: (2016) Principes ergonomiques de la conception des systèmes de travail
- ISO, N. (2010). 12100–*Sécurité des machines–Principes généraux de conception–Appréciation du risque et réduction du risque*. AFNOR.
- ISO/IEC. (2007). Systems and Software Engineering - Recommended Practice for Architectural Description of Software-Intensive Systems. Geneva, Switzerland.
- ISO/IEC/IEEE 24765, (2009). Systems and Software Engineering - System and Software Engineering Vocabulary Geneva, Switzerland.
- ISO/IEC/IEEE. (2011). Systems and software engineering: Developing user documentation in an agile environment. Geneva, Switzerland.
- ISO/IEC/IEEE. (2015). Systems and Software Engineering - System Life Cycle Processes. Geneva, Switzerland.
- LE PARLEMENT EUROPÉEN, E. L. C., & DE L'UNION, E. U. R. O. (2009). *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)*.
- Marsot, J. (2001). Prévention et innovation. *Hygiène et sécurité du travail*, 69-75. (Brochure INRS).
- Martin, P., Daille-Lefèvre, B., Marsot, J., Godot, X., Abba, G., Siadat, A., & Gomez-Echeverri, M. (2019). *New issues for workers safety in the factory of the future*. In *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing II*, Springer Nature Switzerland AG, 402-411.
- Østergaard, E. (2018). L'industrie 5.0, une alliée de poids pour la compétitivité de la France. [Online] *Technos et innovations*, L'usine nouvelle. Disponible sur : <https://n9.cl/lwqd>.
- Pahl, G., & Beitz, W. (1996). *Engineering design: a systematic approach*, 2nd edition, Springer-Verlag, London, ENGLAND.
- Paynter, H. M. (1961). *Analysis and Design of Engineering Systems*. MIT Press.
- Scaravetti, D. (2004) *Formalisation préalable d'un problème de conception pour l'aide à la décision en conception préliminaire*, (Thèse de doctorat ENSAM).
- Suh, N. P. (1990). *The principles of design*, Oxford University Press, New-York, USA.
- Ullman, D. G. (2003) *The mechanical design process*, 3rd edition, Mc Graw-Hill Higher Education, New-York, USA.