



HAL
open science

Contribution à l'identification de situations dangereuses et à leurs détections par l'analyse des dérives de l'équipement de production. Application à une ligne d'assemblage automatisée

Romain Duponnois

► **To cite this version:**

Romain Duponnois. Contribution à l'identification de situations dangereuses et à leurs détections par l'analyse des dérives de l'équipement de production. Application à une ligne d'assemblage automatisée. Automatique / Robotique. Université de Lorraine, 2022. Français. NNT : 2022LORR0028 . tel-03666619

HAL Id: tel-03666619

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03666619>

Submitted on 12 May 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**UNIVERSITÉ
DE LORRAINE**

**BIBLIOTHÈQUES
UNIVERSITAIRES**

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact bibliothèque : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr
(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Thèse

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LORRAINE

Mention Génie Informatique, Automatique et Traitement du signal

Par Romain DUPONNOIS

Sous la direction de Éric LEVRAT et Ali SIADAT

**Contribution à l'identification de situations dangereuses et à leurs
détections par l'analyse des dérives de l'équipement de production.
Application à une ligne d'assemblage automatisée.**

31 janvier 2022

Membres du jury :

Directeurs de thèse :	Éric LEVRAT	Professeur, Université de Lorraine, Nancy
	Ali SIADAT	Professeur, Ecole Nationale Supérieure des Arts & Métiers de Metz
Président :	Antoine GRALL	Professeur, Université de Technologie de Troyes
Rapporteur :	Mohamed SALLAK	Maitre de conférences HdR, Université de Technologie de Compiègne
Examineurs :	Alain ETIENNE	Maître de conférences, Ecole Nationale Supérieure des Arts & Métiers de Metz
	François PÉRÈS	Professeur, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes
Membre invité :	Pascal LAMY	Responsable d'études, Institut National de Recherche et de Sécurité, Nancy

Remerciements

Par ces premiers mots, je vous remercie, vous, lecteurs. Le manuscrit que vous vous apprêtez à lire est le fruit de trois longues années de travail. Au cours de ces trois années, j'ai été soutenu par de nombreuses personnes que je souhaite mettre à l'honneur dans ces remerciements.

Je tiens à remercier en premier, Monsieur Antoine GRALL, Professeur à l'Université de Technologie de Troyes de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse et d'avoir également rapporté de mes travaux de thèse.

Je suis reconnaissant à Monsieur Mohammed SALLAK, Maître de Conférences, avec habilitation à diriger des recherches, à l'Université de Technologie de Compiègne pour son intérêt pour mes travaux de thèse et d'en être le rapporteur.

Je remercie également Monsieur François PÉRÈS, Professeur à l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, et Monsieur Alain ETIENNE, Maître de Conférences à l'École Nationale des Arts et Métiers de Metz, d'avoir examiné ces travaux.

Je tiens ensuite à remercier ceux avec qui j'ai eu l'occasion de travailler au cours de cette thèse. En commençant par mon encadrement académique :

Éric LEVRAT, professeur à l'Université de Lorraine et directeur de cette thèse. Merci Éric d'avoir trouvé le temps de m'aider, de structurer mes travaux par tes remarques constructives, malgré ton emploi du temps bien rempli.

Ali SIADAT, professeur à l'École Nationale des Arts et Métiers de Metz et co-directeur de cette thèse. Merci Ali pour tes remarques et tes conseils judicieux.

Du côté de l'Institut National de Recherche et de Sécurité, je tiens à remercier :

Jacques CHATILLON, chef du département Ingénierie des Équipements de Travail. Merci Jacques pour l'accueil chaleureux réservé dans ton département.

Jean-Christophe BLAISE, responsable du laboratoire Sécurité des Équipements de Travail et des Automatismes. Merci Jean-Christophe, pour l'accueil au sein de ton équipe.

Pascal LAMY, responsable d'études au laboratoire Sécurité des Équipements de Travail et des Automatismes. Merci Pascal de m'avoir fait découvrir le monde de la prévention des risques sur machines, ainsi que pour ton encadrement au cours de ces trois dernières années.

Je remercie également tous les autres collègues de l'INRS avec qui j'ai eu l'occasion de travailler et de grandir professionnellement : Adel, Aurélien, Bruno, Clémentine, Dorian, Jacques, James, Jean-Paul, Johan, Michael, Nicolas, Remiel et Wissal.

Je remercie également les doctorants avec qui j'ai pu discuter de mes travaux, que ce soit à l'Institut National de Recherche et de Sécurité, au Centre de Recherche en Automatique de

Nancy (UMR 7039) ou au Laboratoire de Conception Fabrication Commande (EA 4495) : Juan-Camillo, Quentin, Maha, Théo et Sara.

Ceux que je ne saurais oublier, car c'est grâce à eux que j'ai commencé mon chemin dans le domaine de la recherche scientifique : Thierry BASTOGNE, professeur à l'Université de Lorraine ; Paul RETIF, directeur de service au CHR Metz-Thionville ; Thierry LUBIN, professeur à l'Université de Lorraine, et également Alain RICHARD, professeur à l'Université de Lorraine.

Un grand merci à tous mes amis qui m'ont « sorti la tête du guidon » pour que je prenne un peu de recul de temps à autres : Alain, Axel, Brice², Guillaume, Kévin, Manon, Olivier, Paul, Philippe, Raphaël, Thibaut et Youri.

Merci à ma famille. Elle qui m'a toujours soutenu.

Et pour la fin, je remercie ma compagne qui a dû me supporter au cours de ces trois longues années, que de courage !

À Marcel et Roger,

Table des matières

Remerciements.....	2
Table des matières.....	4
Table des illustrations.....	8
Liste des tableaux.....	11
Liste des équations.....	11
Introduction générale.....	13
Chapitre 1 : Contexte et problématiques.....	16
1.1. Introduction.....	16
1.2. Prévention des accidents du travail.....	16
1.2.1. Accident du travail et situations dangereuses.....	16
1.2.2. Prévention des accidents du travail en France.....	16
1.2.3. Accident du travail sur machine dans l'industrie française.....	18
1.2.4. Prévention des accidents du travail sur machine.....	24
1.3. Situations dangereuses résiduelles.....	27
1.3.1. Le contournement des barrières de protection.....	27
1.3.2. Le cas des réponses de l'opérateur à une dérive technique.....	29
1.3.3. Situation de travail : définition.....	32
1.4. Impacts de l'industrie 4.0 sur les situations de travail.....	33
1.5. Problématique industrielle.....	34
1.6. Proposition de solution et problématiques scientifiques.....	35
1.7. Propositions d'axes de recherche.....	35
1.8. Conclusion.....	37
Chapitre 2 : Développement de l'approche Working Situation Health Monitoring (WSHM)...	39
2.1. Introduction.....	39
2.2. Modéliser une situation de travail.....	39
2.2.1. Modèle de situation de travail.....	39
2.2.2. Limites de ces modèles.....	41
2.2.3. Interactions au sein d'une situation de travail.....	42
2.2.4. Conclusion sur la modélisation de situation de travail.....	43
2.3. Identifier les situations dangereuses.....	44
2.3.1. Analyse du risque sur machine.....	44
2.3.2. Méthodes d'analyse du risque courantes dans l'industrie.....	45

2.3.3.	Limites de ces méthodes	49
2.3.4.	Conclusion sur l'identification des situations dangereuses générées par une réponse d'un opérateur à une dérive technique.....	50
2.4.	Surveiller pour anticiper l'apparition des situations dangereuses.....	50
2.4.1.	Health Monitoring et Health Management des systèmes industriels.....	50
2.4.2.	Limites du « Health Monitoring » et du « Health Management »	52
2.4.3.	Etat de santé de la situation de travail et indicateur.....	52
2.4.4.	Conclusion sur la définition d'un indicateur d'état de santé de la situation de travail	52
2.5.	Conclusion	53
Chapitre 3 :	Modélisation de la situation de travail.....	56
3.1.	Introduction.....	56
3.2.	Composition du groupe de travail et ressources externes nécessaires.....	56
3.3.	Ressource interne à la méthode WSHM - Modèle de situation de travail vu comme un système de travail.....	57
3.4.	Déroulement de la modélisation	73
3.4.1.	Modélisation de la structure et de la dynamique de la situation de travail étudiée par instanciation du modèle de référence (R1.1 à R1.7)	73
3.4.2.	Identification des phénomènes dangereux au sein de la situation de travail (R1.8)	80
3.4.3.	Conclusion sur l'application de l'étape.....	81
3.5.	Discussions.....	82
3.5.1.	Position de la première étape de la méthode WSHM par rapport aux processus d'analyse du risque	82
3.5.2.	Discussions et perspectives	82
3.6.	Conclusion	83
Chapitre 4 :	Analyse des risques générés par une réponse de l'opérateur à des dérives techniques	85
4.1.	Introduction.....	85
4.2.	Composition du groupe de travail et ressources externes nécessaires.....	85
4.3.	Relations de cause à effet entre situations potentiellement dangereuses et dérives techniques.....	86
4.3.1.	Situation potentiellement dangereuse (Mise en danger de l'opérateur)....	87
4.3.2.	Dérives et émergences d'interactions Homme-machine et Homme-produits suite à la réponse de l'opérateur	87

4.3.3.	Dérives et émergences d'interactions Homme-machine et Homme-produits (avant réponses opérateurs)	88
4.3.4.	Dérives techniques	89
4.4.	Ressource interne à la méthode WSHM – Tableau d'analyse	90
4.5.	Déroulement de l'analyse.....	93
4.5.1.	Identification des dérives techniques au sein de la situation de travail étudiée, leurs effets et leurs causes (R2.1 à R2.3).....	94
4.5.2.	Identification des réponses suite à des dérives techniques (R2.4 à R2.5).	101
4.5.3.	Estimer les risques pour chaque réponse potentielle de l'opérateur (R2.6)	103
4.6.	Discussions.....	104
4.6.1.	Position de la deuxième étape de la méthode WSHM par rapport aux processus d'analyse du risque	105
4.6.2.	Discussions et perspectives	105
4.7.	Conclusion	107
Chapitre 5 :	Définition d'un indicateur d'état de santé de la situation de travail.....	110
5.1.	Introduction.....	110
5.2.	Composition du groupe de travail et ressources externes nécessaires.....	110
5.3.	Ressources internes à la méthode WSHM.....	111
5.3.1.	Indicateur d'état de santé de la situation de travail.....	111
5.3.2.	Indicateurs de situation potentiellement dangereuse	111
5.3.3.	Indicateur de dérive	112
5.3.4.	Indicateur de déviation	112
5.3.5.	Construction des indicateurs.....	113
5.4.	Démarche de calcul de l'indicateur d'état de santé	114
5.4.1.	Calcul des indicateurs de déviation (R3.1 à R3.2).....	115
5.4.2.	Calcul des indicateurs de dérive (R3.3)	119
5.4.3.	Calcul des indicateurs de situation potentiellement dangereuse (R3.4)... ..	120
5.4.4.	Calcul de l'indicateur d'état de santé de la situation de travail (R3.5)	121
5.5.	Discussions.....	122
5.5.1.	Position de la troisième étape de la méthode WSHM par rapport à la surveillance des systèmes de production industriels et le Health Monitoring/Management	122
5.5.2.	Discussions et perspectives	122

5.6.	Conclusion	123
Chapitre 6 : Application de la méthode WSHM à un cas d'étude académique		126
6.1.	Introduction	126
6.2.	Description du cas d'étude académique : ilot de la plateforme Progress 4.0 ..	126
6.2.1.	Produits à assembler	127
6.2.2.	Présentation du poste 3 (« Machine »)	128
6.2.3.	Description d'un cycle de production de produits 0109 par le poste 3	131
6.2.4.	Informations complémentaires	135
6.3.	Application de la première étape de la méthode WSHM	136
6.3.1.	Composition du groupe de travail	136
6.3.2.	Déroulement	136
6.3.3.	Résultats de l'étape	148
6.4.	Application de la deuxième étape de la méthode WSHM	150
6.4.1.	Composition du groupe de travail	150
6.4.2.	Déroulement	150
6.4.3.	Résultats de l'étape	161
6.5.	Application de la troisième étape de la méthode WSHM.....	161
6.5.1.	Composition du groupe de travail	161
6.5.2.	Déroulement	161
6.5.3.	Résultats de l'étape	168
6.6.	Conclusion	168
6.6.1.	Retours d'expérience des membres des différents groupes de travail	168
6.6.2.	Discussions et perspectives	169
Conclusion générale		171
Références		175
Annexes.....		182
Résumé/Abstract.....		228

Table des illustrations

Figure 1 : Condition d'occurrence d'un dommage, d'après l'ISO/TR 14121-2 (ISO 2012).....	20
Figure 2 : Eléments de risque (ISO 2010).....	23
Figure 3 : Représentation schématique du processus de réduction du risque en conception (ISO 2010).....	25
Figure 4 : Exemple de contournement des barrières de protection en fonction du type de barrière (Lamy and Perrin 2020).....	28
Figure 5 : Représentation du déroulement possible d'une réponse de l'opérateur à une dérive technique (Lamy and Perrin 2020)	30
Figure 6 : Représentation de la Boucle OODA (Boyd 1995).....	31
Figure 7 : Représentation graphique du problème et de la solution proposée.....	35
Figure 8 : Application méthode WSHM	36
Figure 9 : Situation globale de travail et son environnement (ANACT and INRS 2001).....	39
Figure 10 : MODèle de Situation de TRAvail (Hasan et al. 2003)	40
Figure 11: Modèle d'Usages futurs d'un équipement industriel (Daille-lefèvre, Demarziani, and Etienne 2019)	41
Figure 12 : Types des interactions au sein d'une situation de travail sur machine automatisée.....	43
Figure 13 : Processus de réduction du risque (ISO 2010)	44
Figure 14 : Exemple de Health management de machine dans l'industrie (Lee et al. 2018)....	51
Figure 15 : Association, Agrégation et Composition.....	58
Figure 16 : Block « Situation de travail » et ses relations (BDD/SysML).....	60
Figure 17 : Block « Travailleur » et ses relations (BDD/SysML).....	60
Figure 18 : Block « Machine » et ses relations (BDD/SysML).....	61
Figure 19 : Block « Composant » et ses relations (BDD/SysML)	62
Figure 20 : Block « Outil » et ses relations (BDD/SysML)	63
Figure 21 : Block « Produit » et ses relations (BDD/SysML).....	64
Figure 22 : Block « Flux de produits » et ses relations (BDD/SysML)	64
Figure 23 : Block « Espace de travail » et ses relations (BDD/SysML).....	65
Figure 24 : Block « Environnement de travail » et ses relations (BDD/SysML)	66
Figure 25 : Block « Phénomène dangereux » et ses relations (BDD/SysML)	67
Figure 26 : Block « Zone dangereuse » et ses relations (BDD/SysML)	68
Figure 27 : Block « Activité » et ses relations (BDD/SysML).....	69
Figure 28 : Block « Interaction » et ses relations (BDD/SysML)	71
Figure 29 : Block « Zone d'interaction » et ses relations (BDD/SysML)	72
Figure 30 : Modèle de situation de travail (BDD/SysML)	72
Figure 31 : Diagramme d'activité du déroulement de l'application de la 1ère étape de la méthode WSHM (AD/SysML).....	74
Figure 32 : Situation de travail "boîte noire"	75
Figure 33 : Situation de travail "boîte blanche" et machine "boîte noire".....	75
Figure 34 : Situation de travail "boîte blanche" et machine "boîte blanche"	76
Figure 35 : Extraction d'informations du diagramme d'activité vers le BDD	77
Figure 36 : Extraction d'informations du diagramme de séquence vers le BDD.....	80

Figure 37 : Cause de l'apparition d'une situation potentiellement dangereuse suite à une dérive technique engendrant une action de l'opérateur	86
Figure 38: Diagramme d'activité du déroulement de l'application de la deuxième étape de la méthode WSHM (AD/SysML).....	93
Figure 39: Situation de travail "boîte noire"	94
Figure 40: Situation de travail "boîte blanche" et machine "boîte noire"	94
Figure 41: Situation de travail "boîte blanche" et machine "boîte blanche"	95
Figure 42: Diagramme d'activité des étapes R2.1, R2.2 et R2.3 (AD/SysML)	97
Figure 43: Causes, modes de défaillances et effets.....	97
Figure 44: Déroulement de la deuxième étape de la méthode WSHM en version déductive (AD/SysML)	106
Figure 45 : Causalité des dérives au sein d'une situation de travail avec prise en compte des dérives en cascade, des dérives non perçues et des prises de décision de l'opérateur	108
Figure 46 : Illustration de la logique de construction des indicateurs	113
Figure 47 : Diagramme d'activité du déroulement de l'application de la troisième étape de la méthode WSHM (AD/SysML).....	114
Figure 48 : indicateur de déviation $d_x(t)$ « plus de » d'une variable $X(t)$	118
Figure 49 : indicateur de déviation $d_x(t)$ « moins de » d'une variable $X(t)$	118
Figure 50 : indicateur de déviation $d_x(t)$ « autre » d'une variable $X(t)$	119
Figure 51 : Vue d'ensemble de la plateforme Progress 4.0 (AIPL 2021).....	126
Figure 52 : Synoptique de la plateforme Progress 4.0 (AIPL 2021).....	127
Figure 53 : Assemblage pièce 01 et 09 pour obtenir un produit 0109	127
Figure 54 : Pupitre opérateur du poste 3 (AIPL 2021)	128
Figure 55 : Vue d'ensemble du poste 3 (AIPL 2021)	128
Figure 56 : Synoptique du poste 3	129
Figure 57 : Schéma pneumatique du convoyeur	129
Figure 58 : Schéma cinématique du bras manipulateur	130
Figure 59 : Schéma cinématique d'une alimentation	130
Figure 60 : Schéma électrique et pneumatique des alimentations 1 et 2	130
Figure 61 : Schéma cinématique de l'orienteur	131
Figure 62 : Schéma pneumatique et électrique de l'orienteur	131
Figure 63 : Légende de présentation d'un cycle de production réalisé par le poste 3	131
Figure 64 : L'opérateur place une palette sur le convoyeur en entrée du poste.....	132
Figure 65 : L'opérateur ouvre la porte 12, place 4 pièces 01 dans le « Magasin_1 », 4 pièces 09 dans le « Magasin_2 » puis referme la porte 12.....	132
Figure 66 : L'opérateur appuie sur le bouton « DCy » du pupitre opérateur.	132
Figure 67 : Le convoyeur transporte la palette de l'entrée du poste à la zone de travail machine.	132
Figure 68 : « Alim_1 » déplace une pièce 01 du « Magasin_1 » vers « P1 ».	133
Figure 69 : « Alim_2 » déplace une pièce 09 du « Magasin_2 » vers « P2 ».	133
Figure 70 : « Manip » déplace la pièce 01 de « P1 » vers « P0 ».	133
Figure 71 : « Orient_0 » indexe la pièce 01 en « P0 ».....	133
Figure 72 : « Manip » déplace la pièce 01 de « P0 » vers « P4 ».	134

Figure 73 : « Manip » déplace la pièce 09 de « P2 » vers « P0 ».	134
Figure 74 : « Orient_0 » indexe la pièce 09 en « P0 ».	134
Figure 75 : « Manip » déplace la pièce 09 de « P0 » vers « P4 » réalisant alors l'assemblage d'un produit 0109.	134
Figure 76 : Assemblage produit 0109 en « P5 ».	135
Figure 77 : Assemblage produit 0109 en « P6 ».	135
Figure 78 : Assemblage produit 0109 en « P7 ».	135
Figure 79 : Le convoyeur déplace la palette de la zone de travail machine vers la sortie du poste.	135
Figure 80 : L'opérateur extrait la palette, vérifie les produits et les place dans le stock.	135
Figure 81: Contexte de la situation de travail étudiée (Diagramme de Contexte/SysML).	137
Figure 82: Modèle de la situation de travail étudiée à la fin de l'application de la sous-étape R1.1 (BDD/SysML).	138
Figure 83: Activité de la situation de travail étudiée (AD/SysML).	139
Figure 84 : Modèle de la situation de travail étudiée à la fin de l'application de la sous-étape R1.2 (BDD/SysML).	140
Figure 85 : Modèle de la situation de travail étudiée à la fin de l'application de la sous-étape R1.3 (BDD/SysML).	141
Figure 86 : Diagramme d'activité de la situation de travail en vue "boîte blanche" (AD/SysML).	142
Figure 87 : Modèle de la situation de travail étudiée à la fin de l'application de la sous-étape R1.4 (BDD/SysML).	143
Figure 88 : Ajouts au modèle de la situation de travail étudiée lors de la sous-étape R1.5 (BDD/SysML).	144
Figure 89 : Diagramme d'activité de la machine «poste_3 » en vue "boîte blanche" (AD/SysML).	145
Figure 90 : Ajouts au modèle de la situation de travail étudiée lors de la sous-étape R1.6 (BDD/SysML).	146
Figure 91 : Diagramme de séquence de l'activité "Extraire palette en sortie de poste" (SD/SysML).	147
Figure 92 : Interactions aux cours de l'activité « Extraire palette en sortie de poste » identifiées lors de la sous-étape R1.7 (BDD/SysML).	147
Figure 93 : Ajouts au modèle de situation de travail étudiée lors de la sous-étape R1.8.	149
Figure 94 : Exemple d'évolution de l'indicateur $D_{PA1}(t)$ lors d'une dérive de la pression en entrée d'Alim_1.	165
Figure 95 : Exemple d'évolution de l'indicateur $SD_{ElecM}(t)$ lors de la dérive de la situation de travail vers une situation de travail dangereuse.	166
Figure 96 : Exemple d'évolution de l'indicateur $SST_{SituationT}(t)$.	167
Figure 97 : Résumé des apports	173

Liste des tableaux

Tableau 1 : Motivations sociétales des entreprises à mettre en place de la prévention des risques professionnels (Amira and Desjonquères 2017)	18
Tableau 2: Liste de phénomènes dangereux (ISO 2010)	22
Tableau 3 : Comparaison des méthodes courantes d'analyse de risques	49
Tableau 4: Tableau utilisé au cours de l'identification des situations dangereuses	92
Tableau 5 : Signes à identifier à partir du tableau d'analyse complété au cours de la deuxième étape de la méthode WSHM	112
Tableau 6 : Mesure sur lesquelles baser les indicateurs de déviation en fonction des dérives qu'on souhaite surveiller	116
Tableau 7 : Tableau d'estimation des indices composants la criticité	150
Tableau 8 : Résultat de l'application de la sous-étape R2.1.....	151
Tableau 9: Résultat de l'application de la sous-étape R2.2.....	152
Tableau 10: Résultat de l'application de la sous-étape R2.3.....	154
Tableau 11 : Résultat de l'application de la sous-étape R2.4.....	156
Tableau 12 : Résultat de l'application de la sous-étape R2.5.....	158
Tableau 13 : Tableau final comprenant les situations potentiellement dangereuses et l'enchaînement y menant (causes).....	160
Tableau 14 : Dérives qu'on souhaite surveiller	162

Liste des équations

Équation 1: Calcul de la Criticité (AMDEC).....	46
Équation 2: Calcul de la Criticité (AMDEC).....	104
Équation 3 : Calcul de l'indicateur de déviation $dx(t)$ pour une déviation « plus de ».....	117
Équation 4 : Calcul de l'indicateur de déviation $dx(t)$ pour une déviation « moins de »	118
Équation 5 : Calcul de l'indicateur de déviation $dx(t)$ pour une déviation « autre »	118
Équation 6 : Calcul de l'indicateur de dérive $Dx(t)$	119
Équation 7: Calcul de $d_{PA1}(t)$, l'indicateur de déviation de $PA1(t)$	163
Équation 8 : Calcul de $d_{PA2}(t)$, l'indicateur de déviation de $PA2(t)$	163
Équation 9 : Calcul de $d_{PVM}(t)$, l'indicateur de déviation de $PVM(t)$	163
Équation 10 : Calcul de $d_{CEP}(t)$, l'indicateur de déviation de $CEP(t)$	164
Équation 11 : Calcul de $d_{OP12}(t)$, l'indicateur de déviation de $OP12(t)$	164
Équation 12: Calcul de $d_{OP03}(t)$, l'indicateur de déviation de $OP03(t)$	164
Équation 13: Calcul d'un indicateur de dérive $Dx(t)$ en se basant sur un indicateur de déviation $dx(t)$ de la variable $X(t)$	164
Équation 14: Calcul de l'indicateur $SD_{ElecA1}(t)$	165
Équation 15: Calcul de l'indicateur $SD_{ElecA2}(t)$	165
Équation 16: Calcul de l'indicateur $SD_{ElecM}(t)$	166
Équation 17: Calcul de l'indicateur $SD_{PostureP}(t)$	166
Équation 18: Calcul de l'indicateur d'état de santé de la situation de travail $SST(t)$	167

Introduction générale

L'industrie manufacturière est en constante évolution. En France, cette évolution est structurée depuis une vingtaine d'années autour du concept d'« Industrie du futur », terme auquel on associe souvent les objectifs suivants : modernisation de l'outil productif, digitalisation de l'industrie, révision des « business models », optimisation de la production, augmentation de la flexibilité des processus, réduction de l'impact écologique, transformation de l'organisation des entreprises, ...

Cette industrie du futur a des enjeux économiques, politiques, écologiques et humains. C'est sur ce dernier enjeu que ces travaux de thèse se sont concentrés et plus particulièrement sur l'amélioration de la prévention des risques, pour le travailleur, liés aux machines. L'étude de cet enjeu « humain » est partagée par les établissements ayant collaboré pour les travaux réalisés dans ce manuscrit : l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), le Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN ; UMR 7039, Université de Lorraine) et l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers de Metz (ENSAM Metz).

Ces travaux font suite à une précédente étude de l'INRS concernant l'impact des dérives techniques des machines sur la sécurité des employés travaillant sur ces dernières. Au cours de cette étude, il avait été montré que les dérives des machines d'assemblage (modification, usure, impact d'un changement de matière première, ...) pouvaient amener un opérateur à se mettre en danger. Les situations potentiellement dangereuses mises en évidence étaient générées par la réponse d'un opérateur à une dérive dite « technique » (dérives de machines, matières premières, produits, déchets, ...).

Classiquement, les méthodes d'analyses des risques ne prennent en compte que l'équipement lors de sa conception ou de son utilisation (CE 2006; ISO 2007; CE 2009; ISO 2010; CRAMIF 2014; ISO 2018). Les situations potentiellement dangereuses, suite à une réponse d'un opérateur à une dérive « technique » ne sont pas toutes identifiées lors de ces analyses, du fait de la complexité de ces dernières, induites par la complexité d'une situation de travail. Pour combler ce manque dans les méthodes d'analyses des risques professionnels sur machine, l'INRS a étudié la faisabilité d'une méthode d'identification de ces situations potentiellement dangereuses par observation de la situation de travail. Les situations de travail étant nombreuses et diverses, cette étude de l'INRS s'est limitée aux situations de travail sur lignes (machines) d'assemblage de produits solides. Cette méthode par observation a été validée sur un cas industriel.

Après cette étude, il a été proposé de tester la faisabilité d'une méthode capable de mettre en place une surveillance de la situation de travail. Cette surveillance permettant la détection, avant leur apparition, de ces situations potentiellement dangereuses dans le but de les prévenir.

Cette thèse défend l'idée qu'une telle approche est faisable et que la complexité grandissante des situations de travail dans l'industrie manufacturière rendra ce genre d'approche de plus en plus nécessaire pour assurer la sécurité des opérateurs de machines

dans ce secteur. La contribution majeure de ces travaux est une méthode permettant d'identifier et d'assurer la surveillance des signes précurseurs d'apparition des situations potentiellement dangereuses suite à une réponse d'un opérateur de machine à une dérive technique.

Le premier chapitre de ce manuscrit a pour objectif de présenter le contexte de ces travaux de thèse. Il décrit par la suite, en détail, le type de situations dangereuses qu'on étudiera au cours de ces travaux. Enfin, ce chapitre se conclut par l'expression de la problématique industrielle et des problématiques scientifiques auxquelles s'attaque cette thèse, ainsi que l'introduction de la méthode proposée.

Le second chapitre a pour but de présenter les différentes étapes de la méthode proposée et leurs positionnements scientifique et industriel dans leur domaine respectif. Ce positionnement de chaque étape a pour objectif de présenter les originalités de ces travaux et leurs apports pour la prévention des accidents du travail.

Les troisième, quatrième et cinquième chapitres ont pour but de présenter les trois étapes de la méthode proposée. Le troisième chapitre présente la première étape, le quatrième présente la deuxième étape et le cinquième chapitre présente la troisième étape. Chacun de ces chapitres débute par une présentation de la composition du groupe de travail, ainsi que des ressources nécessaires à la réalisation de cette étape, dont les différents outils méthodologiques développés au cours de ces travaux de thèse. Puis, il présente le déroulement de l'étape. Enfin, il se conclut par la synthèse des résultats obtenus en fin de l'étape présentée, ainsi que les perspectives de recherches.

Le sixième chapitre a pour but de présenter l'application de la méthode proposée sur un cas d'étude académique, ainsi que les résultats de celle-ci. Ces résultats sont ensuite discutés quant à la faisabilité d'une telle approche dans l'industrie manufacturière.

Ce manuscrit se conclut par le rappel des différentes problématiques et des réponses apportées par ces travaux de thèse. La conclusion présente, également, un résumé des différentes perspectives de recherches possibles, suite à ces travaux.

Chapitre 1 : Contexte et problématiques

1.1. Introduction

Ce chapitre commence par la présentation de la prévention des accidents du travail en France de manière générale, avant de se concentrer sur la prévention des accidents du travail sur les machines dans l'industrie. Il décrit, par la suite, le type de situations dangereuses, pouvant mener à ces accidents, qu'on étudiera dans ces travaux. Puis, ce chapitre présente l'expression de la problématique industrielle et des problématiques scientifiques auxquelles s'attaque cette thèse. Enfin, il se conclut par l'introduction de la solution proposée : la méthode Working Situation Health Monitoring.

1.2. Prévention des accidents du travail

1.2.1. Accident du travail et situations dangereuses

Un accident est défini comme étant un « Événement fortuit qui a des effets plus ou moins dommageables pour les personnes ou pour les choses » (Larousse 2017).

Selon le Code de la sécurité sociale, un accident du travail est un accident ayant lieu lors de l'activité professionnelle.

« Est considéré comme accident du travail, quelle qu'en soit la cause, l'accident survenu par le fait ou à l'occasion du travail à toute personne salariée ou travaillant, à quelque titre ou en quelque lieu que ce soit, pour un ou plusieurs employeurs ou chefs d'entreprise. » (Code de la sécurité sociale L411-1).

Les « effets dommageables » d'un accident du travail sur un travailleur peuvent générer des « dommages » sur ce dernier¹.

1.2.2. Prévention des accidents du travail en France

Pour prévenir les accidents du travail, en France, le Code du travail oblige les employeurs à prendre les mesures nécessaires pour assurer la sécurité des travailleurs sur le lieu de travail (Code du travail L4121-1). Les mesures qui doivent être prises par l'employeur comprennent :

- « Des actions de prévention des risques professionnels ;
- Des actions d'information et de formation des employés ;
- La mise en place d'une organisation et de moyens adaptés. »

Pour aider à la mise en place de ces mesures, l'employeur se fonde sur les neuf principes généraux de la prévention qu'on retrouve dans le Code du travail (Code du travail L4121-2) :

- « Eviter les risques : supprimer le danger ou l'exposition au danger ;
- Evaluer les risques qui ne peuvent pas être évités : évaluer pour prioriser les actions de préventions à mener ;

¹ Ces lésions peuvent engendrer un arrêt de travail (lésion temporaire), une incapacité permanente voire un décès. En 2019 en France, les accidents du travail ont été la cause de 655 715 arrêts de travail, 33 859 incapacités permanentes et 733 décès sur les 19 557 331 salariés du régime général de la sécurité sociale (CNAM 2020).

-
- Combattre les risques à la source : intégrer la prévention lors de la conception de l'activité de travail, des équipements de travail ou des lieux de travail ;
 - Adapter le travail à l'Homme : réduire les impacts du travail sur la santé du travailleur par l'adaptation de l'activité, de l'équipement, ou du lieu de travail ;
 - Tenir compte de l'évolution de la technique : adapter la prévention aux évolutions techniques, méthodologiques et organisationnelles ;
 - Remplacer ce qui est dangereux par ce qui n'est pas dangereux ou par ce qui est moins dangereux : éviter l'utilisation de produits ou de procédés dangereux lorsque le même résultat serait obtenu par des produits ou des procédés non ou peu dangereux ;
 - Planifier la prévention : intégrer dans un ensemble cohérent, la technique, l'organisation du travail, les conditions de travail, les relations sociales² et l'influence des facteurs ambiants à la prévention des accidents du travail ;
 - Prendre des mesures de préventions collectives en leur donnant la priorité sur les mesures de protection individuelle : n'utiliser les équipements de protection individuelle qu'en complément des mesures de protections collectives uniquement si ces dernières se révèlent insuffisantes ;
 - Donner les instructions appropriées aux travailleurs : former et informer les travailleurs aux risques et aux mesures de prévention. »

Ces obligations réglementaires font percevoir la prévention des accidents du travail comme une contrainte pour les employeurs³. Or, la prévention des accidents du travail a des avantages économiques et sociétaux, qu'il est important de mettre en avant pour que celle-ci soit acceptée et réalisée volontairement par les employeurs et les employés.

1.2.2.1. Gains économiques de la prévention des accidents du travail

Selon (EU-OSHA 2021), les avantages économiques de la prévention des accidents du travail pour les entreprises sont nombreux (par exemple, améliorer la productivité des travailleurs, réduire l'absentéisme, réduire les indemnisations, ...) ⁴.

Ces avantages économiques peuvent être classifiés en deux catégories : les gains créés et les coûts évités.

Les « gains créés » peuvent se traduire par une augmentation de la stabilité de la productivité de l'entreprise.

Les « coûts évités » peuvent être de deux types : directs et indirects. Les coûts directs sont liés aux taux de cotisation d'assurance, aux indemnités journalières des employés accidentés, aux frais d'hospitalisation mais également aux potentielles sanctions pénales ou civiles. Selon l'enquête « Condition de travail » réalisée par la DARES en 2013, 23,7% des entreprises

² Les risques liés aux relations sociales sont notamment les risques de harcèlement (moral et sexuel) et/ou de comportement sexiste.

³ En 2013, 68,7% des employeurs interrogés par la DARES considéraient le « respect des obligations légales » comme une motivation principale de développer la prévention des risques professionnels dans leur entreprise. Ce taux monte à 90% pour les entreprises de plus de 250 salariés (Amira and Desjonquères 2017).

⁴ Quelques chiffres : selon l'EU-OSHA, chaque euro investi dans la prévention par une entreprise lui rapporte 2,2 euros. Ce rapport coût-bénéfice est largement positif (EU-OSHA 2021).

considèrent qu'une de leurs motivations principales à mettre en place de la prévention des risques professionnels est d'éviter la majoration des cotisations sociales et donc d'éviter les coûts directs liés à un accident du travail (Amira and Desjonquères 2017). Les coûts indirects représentent les pertes liées à l'impact d'un accident du travail sur les performances de l'entreprise (par exemple, le coût de remplacement d'une machine cassée, coût de reformation de l'employé si celui-ci n'est plus à même d'assurer son poste, coût de formation d'un remplaçant, ...) (Canetto 2018).

1.2.2.2. Gains sociétaux de la prévention des accidents du travail

Une entreprise est un environnement social qui peut être perturbé par un accident du travail. Un accident du travail peut avoir un impact sociétal interne (par exemple, la perte de confiance des employés dans leur employeur, stress au travail menant à une perte de performance, ...) mais également externe (par exemple, la perte de l'image de marque de l'entreprise, perte de contrats, ...) (Canetto 2018; EU-OSHA 2021; Dembe 2001).

Selon l'enquête « Condition de travail » réalisée par la DARES en 2013, les gains sociétaux sont les motivations principales, à mettre en place de la prévention des risques professionnels, exprimées par les dirigeants d'entreprise (33,84% des entreprises interrogées par la DARES ; voir Tableau 1) (Amira and Desjonquères 2017).

% d'entreprise exprimant que leur motivation est de ...	Motivation principale	Motivation secondaire	Cela ne joue pas	Non-réponse
Maintenir la réputation de l'entreprise	39,9%	12,1%	39,6%	8,4%
Respecter les exigences clients	25,3%	11,7%	54,3%	8,7%
Limiter la désorganisation et l'absentéisme	32,0%	13,1%	46,3%	8,6%
Fidéliser le personnel	33,1%	14,1%	44,5%	8,3%
Respecter les demandes du personnel	38,9%	13,7%	38,7%	8,7%

Tableau 1 : Motivations sociétales des entreprises à mettre en place de la prévention des risques professionnels (Amira and Desjonquères 2017)

Les accidents du travail se retrouvent dans tous les secteurs d'activités et prennent de nombreuses formes. Dans le contexte de ces travaux, on se concentrera sur les accidents dans l'industrie manufacturière.

1.2.3. Accident du travail sur machine dans l'industrie française

En France, en 2016, 55 044 accidents du travail avec arrêt de travail de plus de quatre jours sont survenus sur machines. Ce chiffre représente près d'un dixième de la totalité des accidents du travail en France sur cette même année (574 478). La même année, les accidents sur machines ont été à l'origine de plus de 4 000 incapacités permanentes (12% de la totalité des

incapacités permanentes sur l'année) et de 3 millions de jours d'arrêt de travail (7,5% de la totalité des jours d'arrêt de travail sur l'année) (Brasseur, Ravallec, and Vaudoux 2019).

Les secteurs industriels (métallurgie, bois, papier, ...) sont les plus touchés, avec presque un quart des accidents de travail dans ces secteurs liés aux machines. Ces chiffres s'expliquent par l'utilisation importante de machines dans ces secteurs (Brasseur, Ravallec, and Vaudoux 2019).

1.2.3.1. *Machine : définition*

Avant de s'intéresser aux risques associés à une machine, on commencera par définir ce qu'est une machine.

Selon le dictionnaire (Robert 2017), une machine est « un objet fabriqué, généralement complexe, qui transforme l'énergie pour produire un travail ».

L'ISO 12100:2010 « Sécurité des machines — Principes généraux de conception — Appréciation du risque et réduction du risque » précise cette définition en définissant une machine comme étant un « ensemble équipé ou destiné à être équipé d'un système d'entraînement, composé de pièces ou d'organes liés entre eux dont au moins un est mobile et qui sont réunis de façon solidaire en vue d'une application définie » (ISO 2010). Cette définition englobe également les ensembles de machines dont le fonctionnement est solidaire et concourt au même but.

Cette définition est élargie dans le Code du travail à l'article R4311-4-1, qui précise qu'une machine peut également être « un ensemble de machines [...] ou un ensemble de quasi-machines [...], qui, afin de concourir à un même résultat, sont disposées et commandées de manière à être solidaires dans leur fonctionnement ».

Une quasi-machine est définie dans l'article R4311-6 comme étant un « Ensemble qui constitue presque une machine, mais qui ne peut assurer à lui seul une application définie. Une quasi-machine est uniquement destinée à être incorporée ou assemblée à d'autres machines ou à d'autres quasi-machines ou équipements en vue de constituer une machine [...]. Un système d'entraînement est une quasi-machine. ».

On peut en conclure qu'une machine est :

Définition Machine

Un ensemble de pièces, de quasi-machines ou de machines, dont au moins une est mobile, transformant une énergie dans le but de réaliser une application définie.

1.2.3.2. *Les risques associés aux machines*

Les énergies utilisées (Léger 1999) et/ou les éléments mobiles au sein d'une machine peuvent être la source de dommages (ISO 2010). Selon l'ISO12100 :2010, un dommage est une « blessure physique ou atteinte à la santé ». Selon la même norme, une source potentielle de dommage est nommée un phénomène dangereux (ISO 2010).

Le dommage est la conséquence d'un événement dangereux (qui mène à l'accident) et est défini selon l'ISO12100 :2010 comme étant un : « Événement susceptible de causer un dommage » (ISO 2010). Un événement dangereux peut avoir lieu si une personne est en

situation dangereuse. Une situation dangereuse est définie selon l'ISO12100 :2010 (ISO 2010) comme étant :

Définition Situation dangereuse

Une situation dans laquelle une personne est exposée à au moins un phénomène dangereux.

Selon l'ISO12100 :2010, un phénomène dangereux (ou danger) est une « source potentielle de dommage ». Un phénomène dangereux peut être qualifié, soit par la nature de son origine (exemple : un phénomène dangereux dont l'origine est de l'énergie mécanique est désigné comme un « phénomène dangereux mécanique »), soit par la nature des potentiels dommages qu'il peut engendrer (par exemple, un phénomène dangereux qui peut causer un incendie est désigné comme un « phénomène dangereux d'incendie »). Un phénomène dangereux peut être présent de manière permanente (par exemple, un bruit, une température élevée, ...) ou peut apparaître de manière spontanée (par exemple, une explosion, une projection de matière, ...) (ISO 2010).

Le Tableau 2 présente des exemples de phénomènes dangereux par groupe, leurs origines et leurs potentielles conséquences. Dans ce tableau, chaque origine de phénomènes dangereux peut avoir une ou plusieurs conséquences possibles. Chaque conséquence peut également avoir une ou plusieurs origines. Il est également à noter que la conséquence d'un phénomène dangereux peut être l'origine d'un autre phénomène dangereux.

L'enchaînement des situations et des événements menant à un accident est illustré dans la Figure 1.

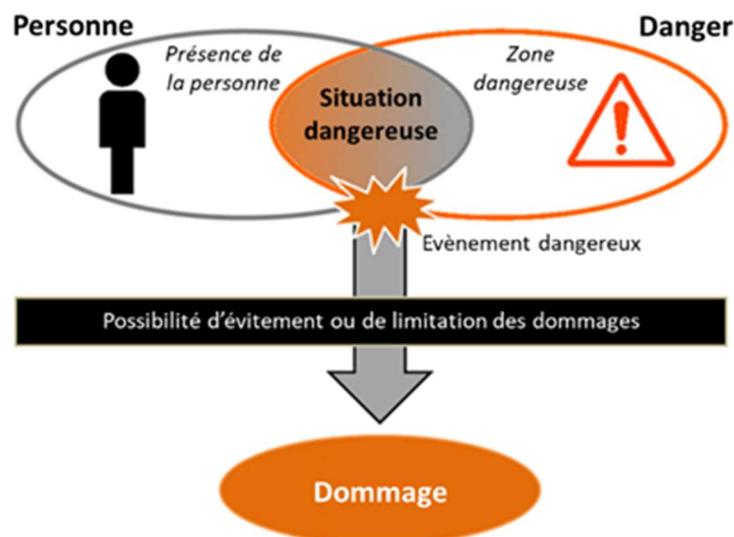


Figure 1 : Condition d'occurrence d'un dommage, d'après l'ISO/TR 14121-2 (ISO 2012)

Groupe	Origine	Conséquences possibles
Phénomènes dangereux mécaniques	<ul style="list-style-type: none"> – accélération, décélération; – pièces de forme aiguë; – rapprochement d'un élément en mouvement avec une pièce fixe; – éléments coupants; – éléments élastiques; – chute d'objets; – pesanteur; – hauteur par rapport au sol; – pression élevée; – instabilité; – énergie cinétique; – mobilité de la machine; – éléments en mouvement; – éléments en rotation; – surface rugueuse, glissante; – arêtes vives; – énergie accumulée; – vide. 	<ul style="list-style-type: none"> – renversement (par une machine mobile); – éjection; – écrasement; – coupure ou sectionnement; – entraînement ou emprisonnement; – happement, enroulement; – frottement ou abrasion; – choc; – injection; – cisaillement; – glissade, trébuchement et chute; – perforation ou piqûre; – suffocation.
Phénomènes dangereux électriques	<ul style="list-style-type: none"> – arc; – phénomènes électromagnétiques; – phénomènes électrostatiques; – parties actives; – distance insuffisante des parties actives sous haute tension; – surcharges; – parties devenues actives à la suite d'une défaillance; – court-circuit; – rayonnement thermique. 	<ul style="list-style-type: none"> – brûlure; – effets chimiques; – effets sur les implants médicaux; – électrocution; – chute, éjection; – incendie; – projection de particules en fusion; – choc.
Phénomènes dangereux thermiques	<ul style="list-style-type: none"> – explosion; – flamme; – objets ou matériaux à des températures élevées ou basses; – rayonnement de sources de chaleur. 	<ul style="list-style-type: none"> – brûlure; – déshydratation; – inconfort; – gelure; – lésions par le rayonnement de sources de chaleur; – brûlure par un liquide chaud.
Phénomènes dangereux engendrés par le bruit	<ul style="list-style-type: none"> – phénomènes de cavitation; – système d'échappement; – fuite de gaz à grande vitesse; – procédé de fabrication (estampage, coupage, etc.); – pièces en mouvement; – raclage de surface; – balourd de pièces en rotation; – sifflement d'air; – pièces usées. 	<ul style="list-style-type: none"> – inconfort; – baisse de la vigilance; – perte d'équilibre; – perte auditive permanente; – stress; – acouphène; – fatigue; – autres (par exemple : mécaniques ou électriques résultant de perturbations de la communication orale ou de la perception des signaux acoustiques).
Phénomènes dangereux engendrés par les vibrations	<ul style="list-style-type: none"> – phénomènes de cavitation; – défaut d'alignement des pièces en mouvement; – équipement mobile; – raclage de surface; 	<ul style="list-style-type: none"> – inconfort; – lombalgies; – troubles neurologiques; – troubles ostéoarticulaires;

	<ul style="list-style-type: none"> – balourd de pièces en rotation; – équipement vibrant; – pièces usées. 	<ul style="list-style-type: none"> – traumatisme vertébral; – troubles vasculaires.
Phénomènes dangereux engendrés par les rayonnements	<ul style="list-style-type: none"> – source de rayonnement ionisant; – rayonnement électromagnétique basse fréquence; – rayonnement optique (infrarouge, visible et ultraviolet), y compris laser; – rayonnement électromagnétique radiofréquence. 	<ul style="list-style-type: none"> – brûlure; – lésions oculaires et cutanées; – effets sur la capacité de reproduction; – mutation génétique; – maux de tête, insomnie, etc.
Phénomènes dangereux engendrés par des matériaux et des produits	<ul style="list-style-type: none"> – aérosol; – agents biologiques et microbiologiques (viraux ou bactériens); – combustible; – poussières; – explosif; – fibre; – produit inflammable; – fluide; – fumée; – gaz; – brouillard; – oxydant. 	<ul style="list-style-type: none"> – difficultés respiratoires, suffocation; – cancer; – corrosion; – effets sur la capacité de reproduction; – explosion; – incendie; – infection; – mutation génétique; – intoxication; – sensibilisation.
Phénomènes dangereux engendrés par le non-respect des principes ergonomiques	<ul style="list-style-type: none"> – accès; – conception ou emplacement des indicateurs et des dispositifs d'affichage; – conception, emplacement ou identification des organes de service; – effort; – papillotement, éblouissement, ombre, effet stroboscopique; – éclairage local; – surcharge/sous-charge mentale; – posture; – activité répétitive; – visibilité. 	<ul style="list-style-type: none"> – inconfort; – fatigue; – troubles musculosquelettiques; – stress; – autres (par exemple mécaniques ou électriques) résultant d'une erreur humaine.
Phénomènes dangereux associés à l'environnement dans lequel la machine est utilisée	<ul style="list-style-type: none"> – poussière et brouillard; – perturbation électromagnétique; – foudre; – humidité; – pollution; – neige; – température; – eau; – vent; – manque d'oxygène. 	<ul style="list-style-type: none"> – brûlure; – légère indisposition; – glissade, chute; – suffocation; – autres, résultant de l'effet des sources des phénomènes dangereux sur la machine ou des parties de la machine.
Combinaison de phénomènes dangereux	<ul style="list-style-type: none"> – par exemple activité répétitive + effort + température ambiante élevée 	<ul style="list-style-type: none"> – par exemple déshydratation, baisse de la vigilance, choc thermique.

Tableau 2: Liste de phénomènes dangereux (ISO 2010)

La notion de « danger » ne doit pas être confondue avec la notion de « risque ». Selon l'ISO 12100 :2010, le risque est la « combinaison de la probabilité [d'occurrence] d'un dommage et de la gravité de ce dommage » (ISO 2010). Les « éléments » composant le risque sont représentés dans la Figure 2.

La probabilité d'occurrence d'un dommage est composée de trois éléments :

- L'exposition (fréquence ou durée) d'une ou des personnes à un ou des phénomènes dangereux (par exemple, le temps passé dans la zone dangereuse, fréquence d'accès à la zone dangereuse, ...) ;
- Fréquence ou durée d'occurrence d'un événement dangereux ;
- Possibilité d'éviter ou de limiter le dommage.

La gravité d'un dommage peut, quant à elle, être estimée en prenant en compte la gravité des lésions (ou atteintes à la santé) ainsi que leurs étendues (nombre de victimes).

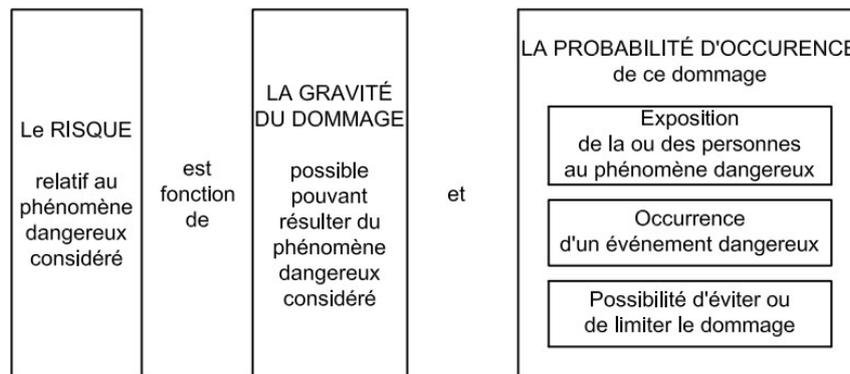


Figure 2 : Eléments de risque (ISO 2010)

Les risques associés à une machine évoluent au cours de sa « vie ». L'étude de ces risques en fonction de chaque phase de vie d'une machine est essentielle pour prévenir les risques associés à cette dernière.

1.2.3.3. Les phases de vie d'une machine dans l'industrie

Comme tout produit, une machine industrielle a plusieurs phases de « vie » (Flizikowski et al. 2019; Niemann and Pisl 2020; Borg and Farrugia 2014) : l'expression des besoins, la conception, la fabrication, le transport, l'installation, l'exploitation, le démontage et l'élimination.

Au cours de chacune de ces phases du cycle de vie de la machine, la machine peut être la source de phénomènes dangereux. Ces dangers, qui peuvent varier d'une phase de vie à une autre ou au cours d'une même phase de vie, sont à prendre en compte pour prévenir les accidents du travail dès la conception de la machine.

Dans le cadre de ces travaux, nous nous concentrons sur l'exploitation des machines au cours de leur phase de vie « Utilisation ».

1.2.4. Prévention des accidents du travail sur machine

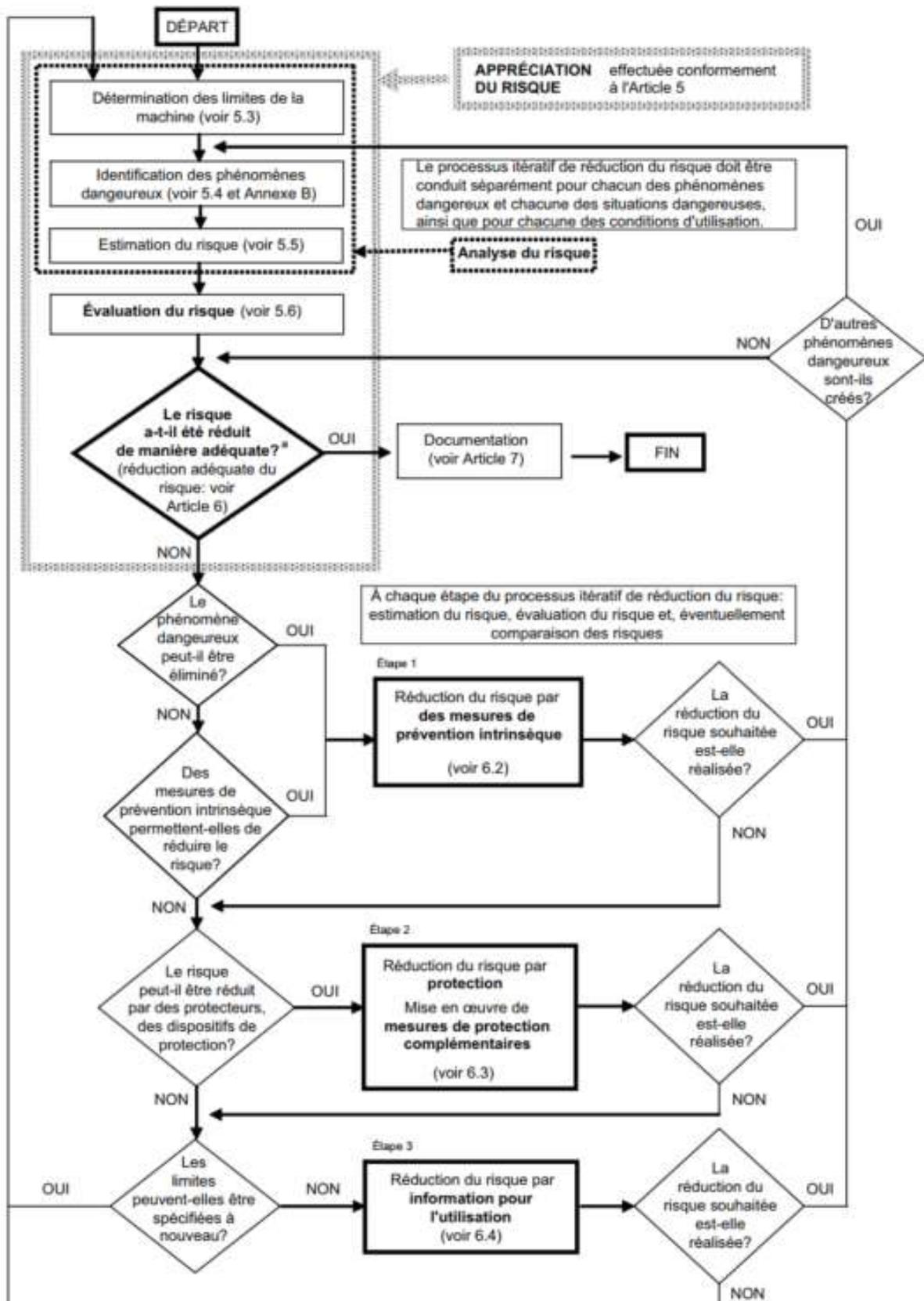
1.2.4.1. *A la conception de la machine*

Pour mettre une machine sur le marché de la Communauté Economique Européenne, tout concepteur ou fabricant de machines doit respecter les « exigences essentielles de santé et sécurité » présentes dans la Directive dites « Machine ». La directive « Machine » 2006/42/CE (CE 2006) est transposée dans le Code du travail par les articles R. 4311 et R.4312. Il peut pour cela s'appuyer sur les normes harmonisées donnant présomptions de conformité à cette directive (exemple : ISO12100 :2010 (ISO 2010)). La Figure 3 illustre le processus de réduction du risque à la conception, il est à noter que ce processus est itératif et que celui-ci est réalisé jusqu'à ce que les risques identifiés soient supprimés ou réduits à un niveau acceptable.

Pour prévenir les accidents sur machine, « les solutions à apporter visent en priorité la prévention intrinsèque, afin de supprimer ou réduire le risque dès la conception, en intégrant les caractéristiques de fonctionnement de la machine et sa maintenance. » (Brasseur, Ravallec, and Vaudoux 2019). La prévention intrinsèque a pour but de « supprimer ou réduire le danger à la source » en préférant les technologies et/ou les produits produisant le moins de danger possible (Atain-Kouadio et al. 2013; Blaise et al. 2018).

Lorsque les phénomènes dangereux ne peuvent pas être réduits ou supprimés, des protecteurs, des dispositifs de protections collectives et/ou mesures de prévention compensatoires⁵ doivent être mis en place. Ces solutions ont pour but de limiter ou de supprimer l'apparition de situations de travail dangereuses pour l'opérateur, en réduisant ou en supprimant l'exposition de l'opérateur à une source de phénomènes dangereux (dangers) (Atain-Kouadio et al. 2013; Blaise et al. 2018).

⁵ ED6122, INRS (ex. Vitesse lente, ...)



^a La première fois que la question est posée, c'est le résultat de l'appréciation initiale du risque qui y répond.

Figure 3 : Représentation schématique du processus de réduction du risque en conception (ISO 2010)

Si des risques existent encore après la mise en place des mesures citées précédemment, des équipements de protections individuelles (EPI) ou des informations pour l'utilisation adaptés doivent être prescrits pour limiter ou éviter ces risques (Atain-Kouadio et al. 2013; Blaise et al. 2018).

La conception d'une machine doit prendre en compte ses futurs usages (utilisation, maintenance, ...). Cela dans le but de prévoir les situations dangereuses accidentelles, mais également, les possibles maladies professionnelles liées à ces usages. Ces futurs usages sont à définir dès la phase de définition des besoins de la machine (Lux et al. 2017; Atain-Kouadio et al. 2013; Martin et al. 2017; Daille-lefèvre, Demarziani, and Etienne 2019).

1.2.4.2. A l'utilisation de la machine

Cependant, même si des mesures de réduction des risques sont prises à la conception et que les machines sont certifiées lors de leur mise sur le marché, il faut également prendre en compte les spécificités liées à l'utilisation de la machine. Ceci se fait dans le cadre de la Directive Utilisation 2009/104/CE transposée, elle aussi, dans le Code du travail par les articles R4321-1 à R4321-5. Cette directive, transposée dans le droit français, impose aux employeurs que toute machine doit être utilisée de manière appropriée au travail réalisé. La machine ne doit également pas présenter de danger pour la santé et la sécurité des employés lorsque cette dernière est installée, utilisée, réglée et maintenue. Cette vérification doit se faire dès la réception de la machine (CE 2009).

La directive « Utilisation », ainsi que ses transpositions dans la loi française, obligent chaque employeur à maintenir en état de conformité toutes les machines qu'il met à disposition de ses employés (R. 4312-1 et 2 du Code du travail).

L'employeur est également dans l'obligation de former ses employés à l'utilisation des machines qu'ils utilisent et de les informer sur les risques les concernant (R. 4323-1 à 5 du Code du travail).

Hypothèse de travail n°1 (H1)

Dans la suite de ce manuscrit, on étudiera les machines lors de leur exploitation en phase de vie « Utilisation » (fonctionnement nominal de la machine, approvisionnement de la machine en matière première, extraction de produits et maintenance de premier niveau réalisé par le ou les opérateurs). On considère également que l'opérateur de la machine est formé à l'utilisation de cette dernière et que celle-ci est conforme aux directives en conception et utilisation de machine.

Malgré l'existence de réglementations, en conception (« Machine », (CE 2006)) ou en utilisation (« Utilisation », (CE 2009)) et l'application d'actions de prévention, il y a encore des accidents du travail sur des machines dans l'industrie, notamment dans les industries automobile et métallurgique (Brasseur, Ravallec, and Vaudoux 2019; Demasy et al. 2020).

Ces accidents dit « résiduels » sont dus à des situations dangereuses « résiduelles ». Ce sont ces situations dangereuses qui nous intéressent dans cette thèse.

1.3. Situations dangereuses résiduelles

Ces situations dangereuses « résiduelles » sont dues :

- Soit à des phénomènes dangereux dont les risques n'ont pas pu être réduits ou supprimés totalement (ISO 2010).
- Soit à des contournements des barrières de protection, volontaires ou non, permettant de réduire ou supprimer les risques (Costella et al. 2015; Lamy and Tissot 2016).

Dans le cadre de ces travaux, on se concentrera sur les situations dangereuses résiduelles liées à des contournements des barrières de protection.

1.3.1. Le contournement des barrières de protection

Selon (Polet, Vanderhaegen, and Millot 2009), « une barrière est un moyen technique ou procédural conçu pour éviter l'apparition d'événements indésirables (par exemple, la défaillance d'un composant) ou pour protéger un système donné des conséquences de tels événements. Les opérateurs humains sont des composants du système et, en tant que tels, ils peuvent "échouer" si leur comportement s'écarte de celui stipulé dans les spécifications du système. Il est clair que les opérateurs humains sont capables d'éviter et/ou de corriger des incidents ou des accidents, mais ils peuvent aussi être à l'origine de ces événements. De nombreuses méthodes peuvent être utilisées afin d'analyser la déviation potentielle des règles, mais, indépendamment de la méthode choisie, le concepteur doit choisir le moyen optimal de prévention ou de protection, compte tenu de la nature de l'erreur humaine. Ainsi, pour protéger un système d'un comportement humain potentiellement dangereux, des barrières sont nécessaires. »

Polet identifie également quatre types de barrières de protection (Polet, Vanderhaegen, and Millot 2009) :

- « les barrières matérielles qui empêchent physiquement une action ou limitent les conséquences négatives d'une situation (ex. protecteurs fixes, ...) ;
- les barrières fonctionnelles qui relient logiquement ou temporellement les actions et les situations (ex. capteurs de présence, portes d'accès avec détection d'ouverture, ...) ;
- les barrières symboliques qui nécessitent une interprétation (ex. gyrophare, alarme sonore, ...) ;
- les barrières immatérielles qui ne sont pas physiquement présentes dans la situation de travail (ex. procédure à respecter, formations sécurité, ...). »

Malgré tout, ces barrières peuvent être contournées (Daniellou, Boissières, and Simard 2010; Vanderhaegen et al. 2011; Pariès 2015). La Figure 4 représente des exemples de contournements pour chaque type de barrières :

- Désactivation ou shuntage de capteurs de contrôle processus ou de sécurité ;
- Démontage de protecteur fixe ;
- Réalisation partielle de la procédure ou action non-prescrite de l'opérateur ;
- Ignorer les alarmes ;

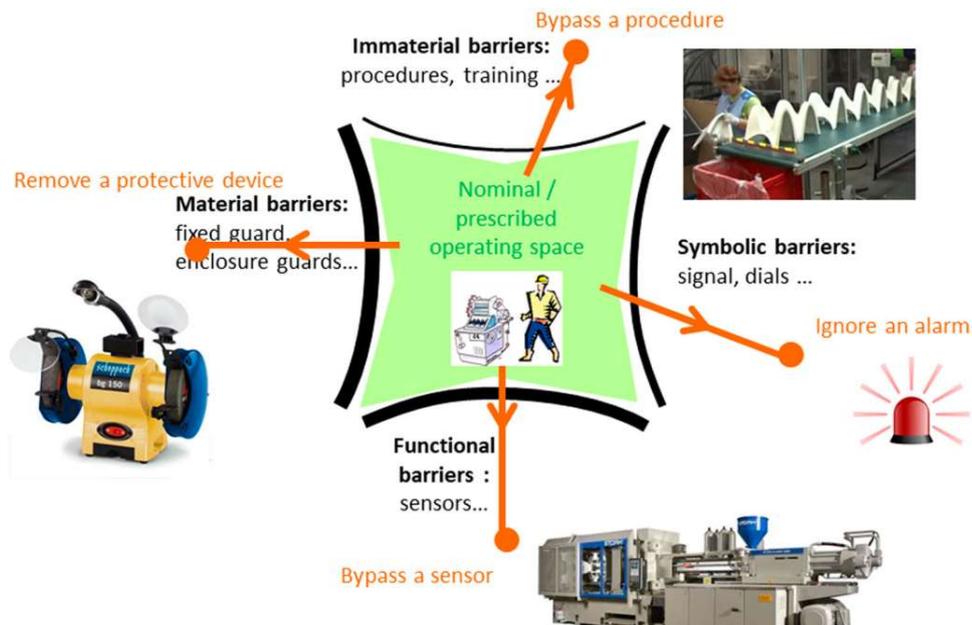


Figure 4 : Exemple de contournement des barrières de protection en fonction du type de barrière (Lamy and Perrin 2020)

Un contournement d'une barrière de protection peut donc être :

- Une modification matérielle comme une « désactivation de barrières de protection ». Celle-ci peut être définie comme étant « une action qui rend les dispositifs de verrouillage inopérants ou les contourne, avec pour résultat qu'une machine est utilisée d'une manière non prévue par le concepteur ou sans les mesures de sécurité nécessaires. La neutralisation peut être effectuée manuellement ou à l'aide d'outils. » (Haghighi, Chinniah, and Jocelyn 2019). Le dispositif de protection étant désactivé celui-ci ne peut alors plus protéger l'opérateur de la machine, cela peut alors le mettre en situation dangereuse. En 2005, il a été estimé que sur les 457 accidents sur machine enregistrés sur la base de donnée EPICEA⁶, environ 30% étaient dus à un contournement d'un ou plusieurs dispositifs de protection (barrières matérielles, capteurs, ...) (Charpentier 2005).
- Une modification de l'activité de travail (comportement de l'opérateur, procédures). Celle-ci se traduit par une différence entre la réalisation des tâches de travail prescrites et l'activité réelle de travail. Avec le temps, la pression de production (exemple : demandes d'augmentation des cadences ou lutte contre le ralentissement de celles-ci), la prise en compte de la sécurité lors du travail devient de plus en plus faible pour se concentrer sur la productivité (Rasmussen 1997; Léger 2009). Cette différence entre la réalisation de la tâche prescrite et l'activité réelle réalisée par l'opérateur est désignée comme étant une « erreur humaine ». Selon Reason, « l'erreur est inséparable de l'intelligence humaine » et plus le système dans lequel se trouve l'humain est complexe, plus les probabilités d'erreurs sont grandes (Reason 1990a, 1990b).

⁶ EPICEA (Etudes de Prévention par l'Informatisation des Comptes rendus d'Accidents) est une base de données nationale et anonyme rassemblant plus de 19 000 cas d'accidents du travail survenus, depuis 1990, à des salariés du régime général de la Sécurité sociale.

Van Elslande (Van Elslande 2000) rappelle qu'« il ne faut pas analyser cette erreur [humaine] comme la cause première des accidents, mais plutôt comme la conséquence de dysfonctionnements qui se situent en amont. Si l'homme se trompe, c'est rarement parce qu'il l'a cherché ; c'est le plus souvent parce que les conditions tant externes (environnementales) qu'internes (humaines) de son activité ne lui ont pas permis à un moment donné de faire face aux exigences de la tâche [prescrite] à laquelle il était confronté ». L'« erreur humaine » n'est donc pas la cause d'un accident mais en est plutôt la conséquence. Les causes pouvant être d'origine :

- Organisationnelle : absentéisme, formations insuffisantes, pressions de production, (Léger 2009 ; Daniellou, Boissières, and Simard 2010 ; Costella et al. 2015)
- Humaine (psychologique et physique) : fatigue, stress, difficultés d'attention, problèmes médicaux (Van Elslande 2000 ; Daniellou, Boissières, and Simard 2010 ; Costella et al. 2015)
- Techniques : dégradations et défaillances des machines, matières premières et/ou consommables non conformes, environnements sonores, trop chaud ou trop froid, trop sec ou trop humide, poussiéreux (Van Elslande 2000)

1.3.2. Le cas des réponses de l'opérateur à une dérive technique

Parmi ces « erreurs humaines », on s'intéressera aux cas particuliers des erreurs humaines dont la cause première est technique, et plus particulièrement aux dérives des éléments techniques au sein de la situation de travail.

Hypothèse de travail n°2 (H2)

Dans la suite de ce manuscrit, on se limitera aux « erreurs humaines » / réponse dont la cause est d'origine technique (machine et/ou produits) et non pas humaine ou organisationnelle.

Ici la notion de dérive est définie de la manière suivante :

Définition Dérive

La dérive est la déviation, dans le temps, d'une caractéristique d'une structure (machine, produits, zone de travail) ou d'une dynamique (activités, fonctions, interactions) par rapport à ses caractéristiques nominales.

Dans le cas d'une dérive technique, c'est donc un produit ou une machine qui dérive. Ces dérives techniques peuvent engendrer des réponses d'un opérateur (dérives de la situation de travail). Ces réponses sont définies de la manière suivante par Lamy et Perrin (Lamy and Perrin 2020) : « Lors de l'utilisation d'une machine [...], des dysfonctionnements tels que le blocage d'une pièce peuvent survenir et perturber le fonctionnement normal de la machine [...]. Pour résoudre ce dysfonctionnement, l'opérateur peut se placer dans une situation dangereuse. » Le déroulement d'une réponse de l'opérateur dans le cas d'une dérive technique est représenté dans la Figure 5.

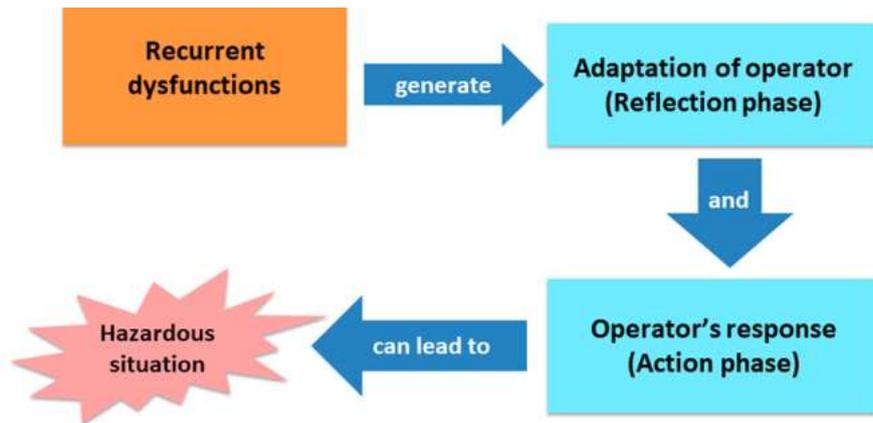


Figure 5 : Représentation du déroulement possible d'une réponse de l'opérateur à une dérive technique (Lamy and Perrin 2020)

La réponse d'un opérateur a donc deux aspects qu'on étudiera, dans la suite de ce manuscrit : ses causes et ses conséquences.

1.3.2.1. Causes de ce type de réponse

Selon (Lamy and Perrin 2020), les causes les plus fréquentes de réponse de l'opérateur à une dérive technique sont les suivantes :

- « - Un besoin, non prévu à l'origine, de contrôler le travail effectué par la machine ;
- Un besoin de compenser une réduction de la visibilité du processus de production, par exemple si l'écran de sécurité d'une unité d'usinage à commande numérique devient flou, l'opérateur sera tenté de travailler avec la barrière de sécurité ouverte et de la contourner ;
- Un besoin, non prévu à l'origine, de dépanner ou de corriger la non-conformité d'une pièce ou d'un produit, rendant nécessaire une intervention sur l'équipement, par exemple, la réponse de l'opérateur peut consister à contourner la barrière de sécurité pour prélever un échantillon pendant la production ;
- Le colmatage ou le blocage récurrent de pièces entraînant des interventions dans un mode non sécurisé (contournement du dispositif de protection) ou un mode non adapté ;
- L'utilisation du mode réglage, inhibant les barrières de sécurité pendant les phases de production standard - un opérateur qui n'est pas qualifié pour utiliser ce mode peut l'utiliser intentionnellement (s'il le peut, par exemple, au lieu de faire appel au personnel d'entretien compétent) ou non, par exemple à la suite d'une intervention du personnel d'entretien qui ne parvient pas à rétablir la production normale. »

Ces dérives techniques relèvent d'un dysfonctionnement de la machine dû, soit à une défaillance interne, soit à un défaut du flux de produits. Ces dysfonctionnements peuvent également être dus à une mauvaise conception du processus.

Ces causes de réponses de l'opérateur rejoignent les causes les plus courantes de contournement de barrières de protection : le besoin d'assurer une activité nécessaire au

fonctionnement de la machine (ajustement, maintenance, ...) et le besoin de superviser une zone normalement cachée (Haghighi, Chinniah, and Jocelyn 2019).

1.3.2.2. Conséquences de ce type de réponse

La conséquence souhaitée lors de ce type de réponse est la résilience de la situation de travail. Selon (Hollnagel 2013), la notion de résilience est « la capacité intrinsèque d'un système [situation de travail] à ajuster son fonctionnement avant, pendant ou après des changements et des perturbations, de sorte qu'il puisse maintenir les opérations requises dans des conditions prévues et imprévues ». Dans le cadre d'une situation de travail, l'humain est le seul acteur capable de s'adapter aux dérives des autres acteurs (machine, produits, ...). Cette capacité de résilience de l'humain est intrinsèque à son intelligence, et dans le cas de la réponse à une dérive technique, au besoin de l'opérateur de maintenir la production de sa machine, car il essaie « de faire ce qu'il pense être juste dans une situation donnée. » (Hollnagel 2006).

Selon (Ruault et al. 2011), il faut voir que « la résilience se différencie de la notion de robustesse en ce sens que la robustesse caractérise l'aptitude du système à résister à un ensemble prévisible (au sens où on peut le caractériser qualitativement voire quantitativement, même s'il reste une part évidente de non-déterminisme) de perturbations d'ampleur a priori modestes, alors que la résilience considère plutôt un cas où la perturbation est importante et imprévisible. Par ailleurs, les performances attendues dans les deux cas ne sont pas les mêmes: faire preuve de robustesse, c'est pouvoir maintenir le niveau de performances alors que les conditions exogènes ont un peu changées ; être résilient, c'est rebondir pour retrouver son équilibre, c'est la poursuite de la viabilité, au mépris éventuel des performances. »

1.3.2.3. Comparaison de ces réponses avec le cycle de Boyd

Pour comprendre les différentes étapes menant à une réponse d'un opérateur ainsi que les différentes relations de cause à effet depuis les dérives techniques, nous proposons de comparer le processus de réponse de l'opérateur à celui présenté dans la boucle OODA « Observe – Orient – Decide – Act » (Boyd 1995). Cette boucle, aussi appelée « cycle de Boyd », décrit la réponse à une perturbation de la situation en 4 étapes et est représentée dans la Figure 6.

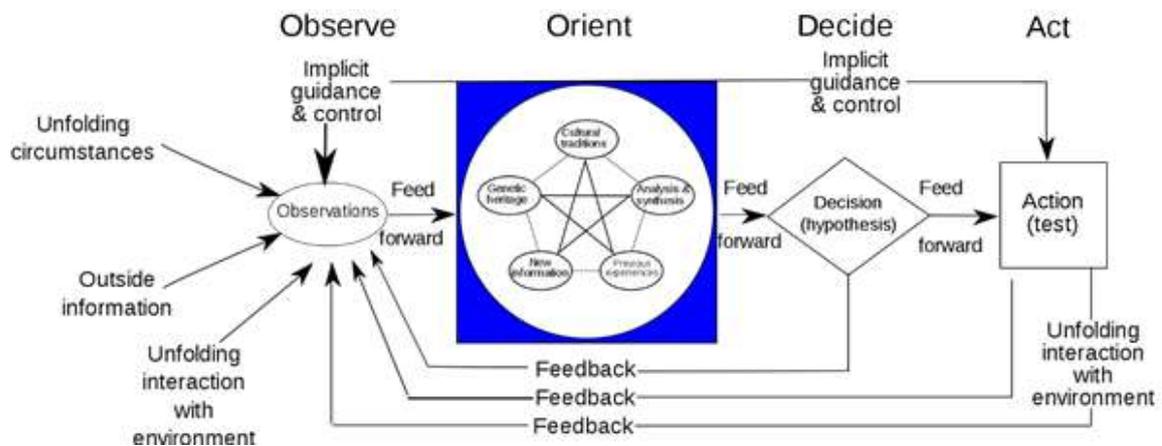


Figure 6 : Représentation de la Boucle OODA (Boyd 1995)

Appliquer à notre contexte de situation de travail sur une ligne d'assemblage automatisée et de réponse en cas de dérive de cette situation, les quatre étapes peuvent être décrites de la manière suivante, lors de la réponse d'un opérateur à une dérive technique :

- Au cours de la première étape, Observer, l'opérateur prend note de certaines caractéristiques de la situation de travail. C'est au cours de cette étape que celui-ci peut percevoir un stimulus indiquant une dérive technique ;
- Au cours de la deuxième étape, S'orienter, l'opérateur prend en compte ses expériences antérieures, sa formation ainsi que les procédures prévues pour analyser la situation et ainsi se construire un « modèle mental » de la situation de travail. C'est au cours de cette étape que l'opérateur identifie la dérive technique par rapport à ses connaissances des éléments techniques de la situation de travail ;
- Au cours de la troisième étape, Décider, l'opérateur décide de ce qu'il faut faire ensuite. C'est au cours de cette étape qu'il prend ou non la décision d'agir ;
- Au cours de la quatrième étape, Agir, l'opérateur met en œuvre ce qu'il a décidé, ce qui se concrétise par l'interaction de l'opérateur avec un ou des éléments techniques de la situation de travail (machine ou produits).

Dans le cadre de ces travaux, les étapes que nous cherchons à identifier sont l'étape de perception « Observer » (causes) et l'étape d'action « Agir » (conséquences). Les étapes de réflexions « S'orienter » et « Décider » variant d'un opérateur à un autre (formation, expérience, ...), nous considérons que l'opérateur prend sa décision et l'applique selon le prescrit ou si aucun prescrit n'est prévu, selon un usage raisonnablement prévisible.

1.3.3. Situation de travail : définition

Les réponses d'un opérateur à une dérive technique « observée » engendrent une « action » de la part de ce dernier. Ces réponses induisent donc des dérives de la situation de travail pouvant mener à une situation dangereuse. Avant d'étudier ce qu'est une dérive d'une situation de travail, il faut définir ce qu'est une situation de travail.

Dans la littérature, le concept de « situation de travail » est étudié sous ses nombreux aspects et dans de nombreux domaines : sociologique, économique, écologique, ... (ANACT and INRS 2001). Dans ces travaux, on se concentrera sur l'aspect « santé-sécurité » de l'étude de la situation de travail. Dans le domaine de l'ergonomie pour la santé-sécurité au travail, la norme ISO 6385: 2016 « Principes ergonomiques dans la conception des systèmes de travail » désigne la situation de travail par un « système de travail ». Dans cette norme, le terme « système de travail » « fait référence à une grande variété de situations de travail, incluant les lieux de travail permanents et flexibles. [...] Les systèmes de travail impliquent des combinaisons de travailleurs et d'équipements, au sein d'un espace et d'un environnement donnés, ainsi que les interactions entre ces composantes au sein d'une organisation de travail. La complexité et les caractéristiques des systèmes de travail sont variables, par exemple, l'utilisation de systèmes de travail temporaires. » (ISO 2016).

Dans le contexte de ces travaux, une situation de travail est donc composée d'un ou plusieurs opérateurs travaillant sur une ligne d'assemblage automatisée (composée de machines). La situation de travail a pour but de transformer un ou des flux de produits. Les éléments au sein d'une situation de travail sont :

- Un ou des opérateurs ;
- Une ou des machines ;
- Un ou des flux de produits ;

Ces acteurs interagissent entre eux au cours de l'activité de travail réalisée au sein de la situation de travail. Dans la suite de ces travaux, nous utiliserons la définition suivante pour décrire la situation de travail :

Définition Situation de travail

Une situation de travail est une situation dont les acteurs sont un ou plusieurs opérateurs (travailleurs), un ou plusieurs équipements de travail (machines ou outils) et un ou plusieurs flux de produits. Ces acteurs interagissent entre eux au cours de l'activité de travail.

Ces situations de travail sont vouées à changer fortement au cours des années futures du fait de l'évolution de plus en plus rapide de l'industrie.

1.4. Impacts de l'industrie 4.0 sur les situations de travail

Depuis deux décennies, l'industrie mondiale a entamé sa quatrième révolution. Cette industrie 4.0 est basée sur "une numérisation avancée au sein des usines, la combinaison des technologies de l'Internet et des technologies d'avenir dans le domaine des objets intelligents (machines et produits), [qui] semble aboutir à un nouveau changement de paradigme fondamental dans la production industrielle. La vision de la production future contient des systèmes de fabrication modulaires et efficaces et caractérise des scénarios dans lesquels les produits contrôlent leur propre processus de fabrication. Cela est censé permettre la fabrication de produits individuels dans un lot de taille unique tout en maintenant les conditions économiques de la production de masse." (Lasi et al. 2014). Cette transformation a des impacts sociaux et économiques au sein de l'industrie (Djuricin and Herceg 2020; Lasi et al. 2014; Pereira and Romero 2017).

Les changements techniques et organisationnels, engendrés par l'évolution de l'industrie, ont pris de nombreuses formes :

- Un des premiers aspects de cette évolution est l'utilisation de plus en plus généralisée de systèmes automatisés. Cette automatisation de l'industrie, débutée au cours de la troisième révolution industrielle, se poursuit de plus belle au cours de la quatrième (Bahrin et al. 2016).
- Les besoins des consommateurs changent et l'industrie également. Le paradigme de production de l'industrie s'éloignant de la production de masse pour laisser place à des productions de petites séries, la flexibilité des systèmes de production doit s'y adapter. Ce besoin de flexibilité a donné naissance aux systèmes de production reconfigurables (Eloundou 2016; Eynaud 2020).
- L'évolution des technologies de l'information (Internet of Things plus particulièrement) a permis la digitalisation des situations de travail. Cette digitalisation a augmenté les

données générées par les équipements de production et a permis de mettre en place de nouvelles stratégies d'organisation se basant sur ces données. Cette digitalisation a également élargi les types de données à disposition permettant la mise en place de nouvelles solutions de production (smart product and system) (Hirsch-Kreinsen 2016).

- Cela a également rendu les situations de travail plus variables : lors de la reconfiguration d'un système de production, l'activité de travail doit également changer. Cette variabilité a rendu le travail des opérateurs de machines automatisées moins monotone (Berthoz and Petit 2014; Neumann et al. 2021).

Ces changements technologiques et organisationnels dans l'industrie ont un impact bénéfique sur les performances des entreprises, mais ont également un impact sur la santé et la sécurité au travail (Badri, Boudreau-Trudel, and Souissi 2018; Adem, Çakit, and Dağdeviren 2020). Certains des aspects de l'industrie 4.0 comme la « flexibilité » ou la « variabilité » des équipements de travail et des activités de travail rendent la structure et la dynamique de la situation de travail plus variables (postes flexibles, customisation des produits, processus flexibles, ...). Cette variabilité rend la résilience de l'opérateur plus difficile et également plus dangereuse (moins d'expérience sur la machine, peu de connaissances, ... (Ruault et al. 2011)). D'autres aspects comme l'« évolution des technologie de l'information » (IoT) augmentent les données de fonctionnement à disposition permettant de mettre en place des surveillances de la situation de travail. Ces surveillances permettent, entre autre, la mise en place de stratégies de maintenance préventive.

1.5. Problématique industrielle

Les situations dangereuses générées par une réponse de l'opérateur à une dérive technique sont des situations dangereuses qui existent à l'heure actuelle et qui risquent de prendre de l'ampleur dans le futur, cela dû au fait que les situations de travail seront moins stables. Les prévoir est donc nécessaire pour améliorer la sécurité des opérateurs de machines automatisées dans l'industrie manufacturière d'aujourd'hui et de demain. Il se pose alors la question suivante : Comment prévenir ce genre de situation dangereuse ?

Problématique industrielle

Comment prévenir les situations dangereuses suite à une réponse d'un opérateur à une dérive technique ?

La méthode proposée par Lamy et Perrin (Lamy and Perrin 2020) permet « l'identification des situations potentiellement dangereuses d'une installation en fonctionnement, en combinant une approche d'observation ergonomique de la situation de travail et une analyse du risque pour la sécurité de l'opérateur. Cette combinaison a permis d'établir une relation de cause à effet entre les dérives de l'équipement et les situations dangereuses en tenant compte des réponses de l'opérateur à ces dérives techniques. ». Deux limites sont identifiées à cette méthode par ses auteurs :

- Le besoin d'observation systématique de la situation de travail en activité à chaque modification de celle-ci : la méthode « nécessite de prévoir des phases d'observation régulières et systématiques en cas de modifications (techniques, organisationnelles, etc.) apportées à l'équipement de travail. » (Lamy and Perrin 2020).

- Le manque d'exhaustivité de la méthode du fait de sa dépendance à des avis d'experts : « l'élaboration de scénarios de situations dangereuses nécessite une certaine expertise, l'approche ne sera pas nécessairement exhaustive pour identifier les situations potentiellement dangereuses » (Lamy and Perrin 2020).

1.6. Proposition de solution et problématiques scientifiques

Pour répondre à la problématique industrielle, il est proposé de mettre en place une surveillance de la situation de travail en utilisant les données générées au sein de la situation de travail (Figure 7).

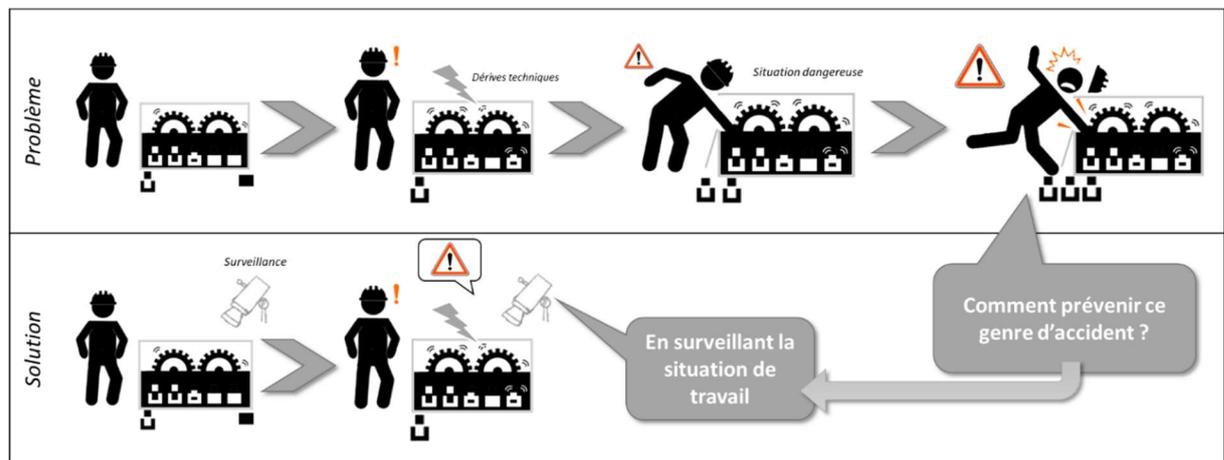


Figure 7 : Représentation graphique du problème et de la solution proposée

Pour mettre en place cette solution de surveillance, il faut répondre aux 2 questions scientifiques suivantes :

Problématiques scientifiques

- (S1) Peut-on identifier, à priori, les situations dangereuses engendrées par une réponse de l'opérateur à une dérive technique (sur une ligne d'assemblage automatisée) ?
- (S2) Peut-on surveiller les préambules de l'apparition de ces situations dangereuses en utilisant les données générées au sein de la situation de travail (sur une ligne d'assemblage automatisée) ?

1.7. Propositions d'axes de recherche

Pour répondre à ces problématiques scientifiques plusieurs propositions sont faites :

- Proposition n°1 (P1) : Pour répondre à la problématique scientifique n°1 (S1), nous proposons d'identifier les situations dangereuses générées par une réponse de l'opérateur à une dérive technique en se basant sur une analyse dysfonctionnelle de la situation de travail nominale, considérée comme un système.
- Proposition n°2 (P2) : Pour supporter l'analyse dysfonctionnelle réalisée lors de la proposition n°1 (P1), nous proposons de modéliser la situation de travail nominale pour permettre une meilleure compréhension de celle-ci en la « simplifiant » (Berthoz and Petit 2014).

- Proposition n° 3 (P3) : Pour répondre à la problématique scientifique n°2 (S2), nous proposons de surveiller la situation de travail par le biais d'un indicateur d'état de santé de la situation de travail à partir des relations entre les dérives techniques et les réponses de l'opérateur pouvant être sources de situations dangereuses.

Ces propositions sont regroupées dans une méthode originale nommée « Working Situation Health Monitoring » (WSHM). Cette méthode est composée de 3 étapes, chacune se basant sur une des propositions précédemment présentées :

- Etape n°1 : Modéliser la situation de travail pour en identifier les composants, les comportements des composants et les interactions entre eux ;
- Etape n°2 : Identifier les situations dangereuses générées par une réponse d'un opérateur à une ou plusieurs dérives techniques et leurs causes ;
- Etape n°3 : Définir un indicateur d'état de santé de la situation de travail étudiée.

L'application de la méthode WSHM vise à définir les prérequis pour une solution de surveillance permettant de détecter les potentielles apparitions des situations dangereuses générées par une réponse d'un opérateur à une dérive technique (Figure 8).

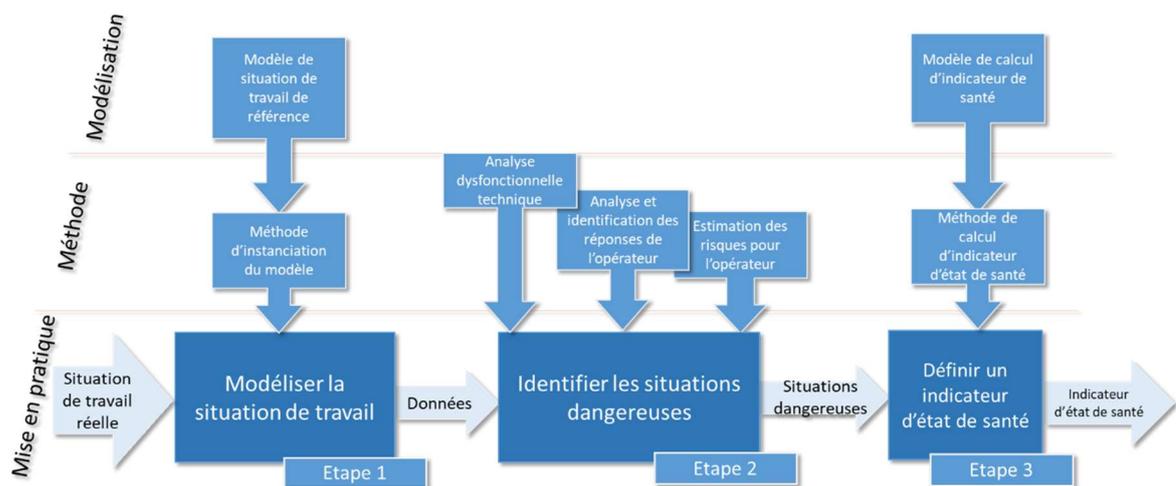


Figure 8 : Application méthode WSHM

1.8. Conclusion

La thèse présentée dans ce manuscrit s'intéresse à la prévention des accidents du travail en se basant sur les hypothèses de travail suivantes :

- (H1) La situation de travail étudiée se déroule sur une ou des machines en exploitation (fonctionnement nominal de la machine, approvisionnement de la machine en matière première, extraction de produits et maintenance de premier niveau réalisé par le ou les opérateurs). L'opérateur de la machine est formé à l'utilisation de cette dernière et la machine est conforme aux directives en conception (« Directive Machine ») et en utilisation de machines (« Directive Utilisation ») ;
- (H2) Les situations potentiellement dangereuses qu'on cherche à prévenir sont celles générées par une réponse d'un opérateur à une dérive technique. Les causes premières sont donc techniques, et non pas humaines ou organisationnelles.

Les travaux ainsi présentés ont pour but de :

- Identifier, à priori, les situations potentiellement dangereuses engendrées par une réponse de l'opérateur à une dérive technique ;
- Spécifier la solution de surveillance des préambules de l'apparition de ces situations dangereuses en utilisant les données générées au sein de la situation de travail.

La contribution de ces travaux de thèse est de nature méthodologique : une méthode d'analyse dysfonctionnelle de la situation de travail, vue comme un système, permettant d'établir une surveillance et une évaluation de l'état de santé de la situation de travail, nommée Working Situation Health Monitoring (WSHM). Le prochain chapitre de ce manuscrit (2) positionne la méthode WSHM dans la littérature scientifique actuelle. Les chapitres suivants (3, 4 et 5) présentent en détails les étapes de la méthode WSHM. Des applications de la méthode WSHM sont présentées dans le dernier chapitre de ce manuscrit (6).

Chapitre 2 : Développement de l'approche Working Situation Health Monitoring (WSHM)

2.1. Introduction

La méthode Working Situation Health Monitoring que nous proposons a pour but de permettre la mise en place d'une surveillance d'une situation de travail particulière, sur ligne d'assemblage automatisée. Cette surveillance a pour objectif d'assurer le diagnostic de l'état de santé de la situation dans le but de détecter les signes précurseurs d'une situation dangereuse suite à une réponse d'un opérateur à une dérive technique au sein de la situation. Dans ce chapitre, les trois étapes de la méthode WSHM sont positionnées par rapport à leur littérature respective.

2.2. Modéliser une situation de travail

Modéliser la situation de travail étudiée permet d'aider à l'analyse de ce système complexe qu'est la situation de travail en la « simplifiant » (Berthoz and Petit 2014). Cela permet de générer un modèle de données. Ce modèle contient les informations nécessaires à l'identification des situations dangereuses dans la situation de travail étudiée.

2.2.1. Modèle de situation de travail

Le concept de « situation de travail » a été modélisé dans de nombreux domaines, dans le contexte de ces travaux on s'intéressera aux modèles prenant en compte la santé-sécurité de l'opérateur :

2.2.1.1. Situation globale de travail

Pomian (Pomian, Pradère, and Gaillard 1997) propose un modèle générique de situation de travail : la situation globale de travail (Figure 9).

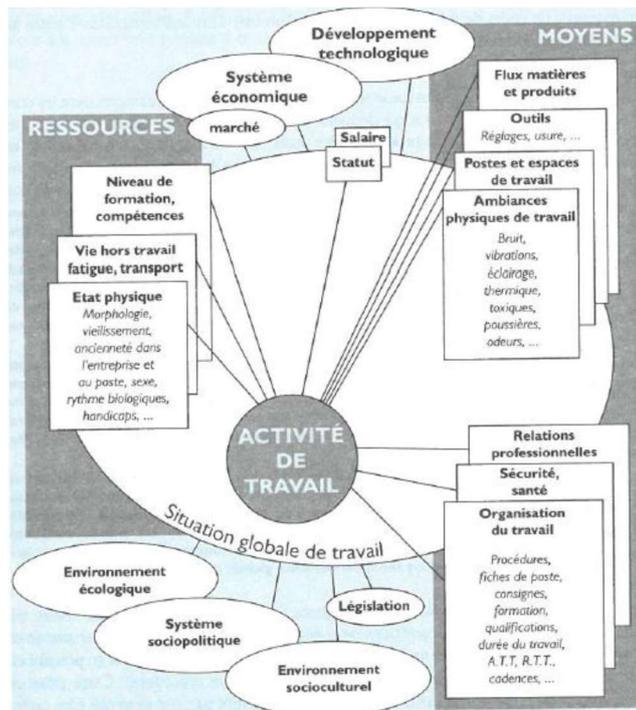


Figure 9 : Situation globale de travail et son environnement (ANACT and INRS 2001)

Ce modèle a pour but d'aider à la compréhension du concept de situation de travail et des aspects à prendre en compte lors de la conception de celle-ci.

Le modèle de situation globale de travail prend en compte tous les aspects de la situation de travail : économiques, législatifs, sociaux, psychologiques, de santé-sécurité, l'activité de travail, les équipements et les flux (de matière première, produits, ...). Les éléments du modèle de Pomian sont centrés autour de l'activité de travail :

- L'activité de travail se déroule au sein d'une situation de travail, elle-même dans un environnement de travail.
- L'activité de travail est réalisée par un ou plusieurs travailleurs (« ressources ») qui ont chacun leurs propres compétences, état physique et état mental ;
- L'activité de travail est soutenue par des « moyens » : équipements de travail, outils, flux de matières premières et de produits et l'organisation du travail.

Ce modèle est trop générique par rapport au contexte de nos travaux (facteurs humains et leurs causes, environnement social, économique et organisation du travail, ...). Nous ne le retiendrons pas pour ces travaux.

2.2.1.2. MOSTRA (MODèle de Situation de TRAvail)

Le MOSTRA proposé par Hasan (Hasan et al. 2003) est plus centré sur les aspects qui nous intéressent : la santé-sécurité des opérateurs au sein d'une situation de travail (Figure 10).

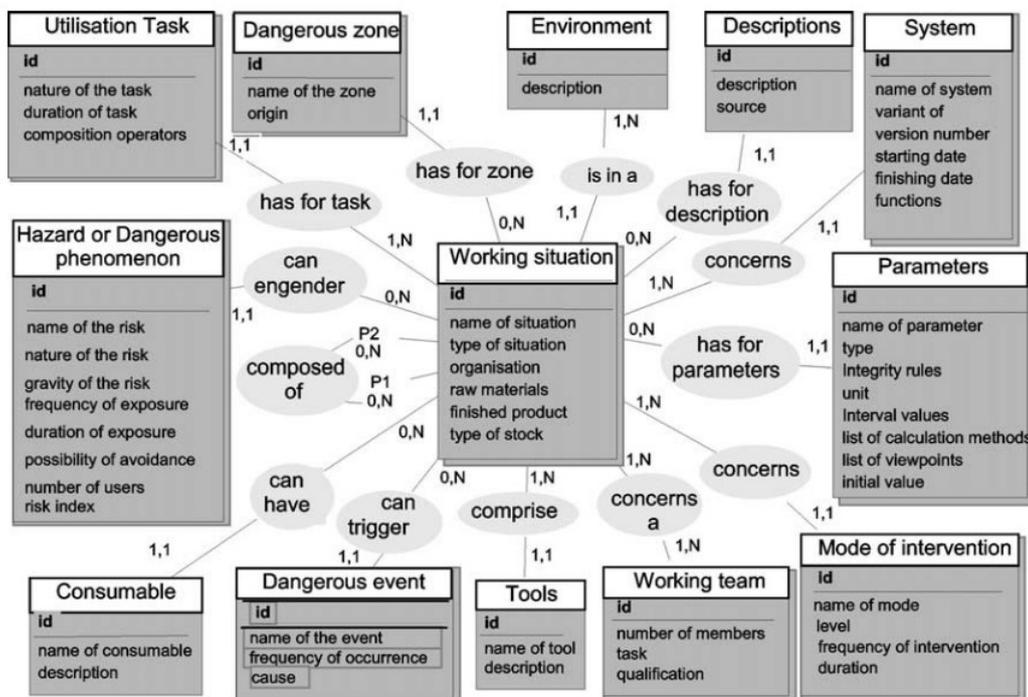


Figure 10 : MODèle de Situation de TRAvail (Hasan et al. 2003)

Ce modèle est décrit par son auteur comme un outil d'aide au concepteur de situations de travail. Le MOSTRA reprend les concepts présents dans la norme EN614-1:1995 « Sécurité des machines - Principes ergonomiques de conception - Partie 1 : terminologie et principes généraux. » (EN 1995). Le MOSTRA ne possède pas de moyen de capitaliser tous les

comportements ni les interactions au sein de la situation de travail or ces éléments sont indispensables à l'étude des dérives de la situation de travail dans son ensemble.

2.2.1.3. Modèle d'Usages

Plus récemment, Daille-lefèvre et Demarziani (Daille-lefèvre, Demarziani, and Etienne 2019) proposent un modèle d'Usages pour intégrer les aspects santé-sécurité à la conception d'un équipement de travail en prenant en compte les futurs usages de celui-ci (Figure 11).

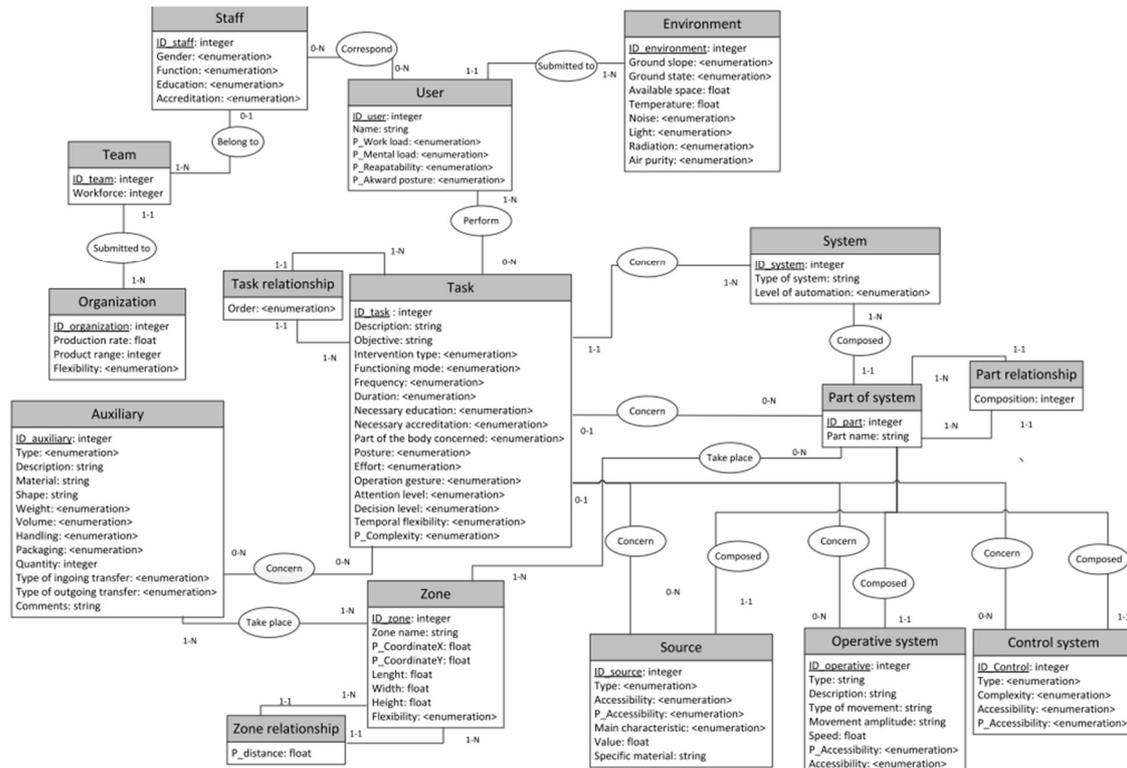


Figure 11: Modèle d'Usages futurs d'un équipement industriel (Daille-lefèvre, Demarziani, and Etienne 2019)

Selon ses auteurs, le modèle d'Usages « vise à proposer un moyen de décrire l'utilisation future des machines afin de réduire les risques dus aux situations imprévues. » (Daille-lefèvre, Demarziani, and Etienne 2019). Même si dans ce modèle, des moyens de capitalisation des comportements des machines et des opérateurs humains existent, les interactions n'y sont ni décrites ni capitalisées.

2.2.2. Limites de ces modèles

Le « MOSTRA » et le « Modèle d'Usages futurs » sont les 2 modèles existants dans la littérature décrivant une situation de travail proche d'un point de vue système.

Ces modèles prennent en compte l'aspect structurel de la situation de travail et/ou aide à la conception des futures tâches pour prendre en compte les aspects-sécurité. Ces modèles prennent en compte les différents composants (structure et/ou comportement) de la situation de travail mais ne prennent pas en compte les interactions entre ces composants. Or, l'étude des interactions est indispensable à la compréhension et l'étude de la situation de travail dans son ensemble.

2.2.3. Interactions au sein d'une situation de travail

L'activité de travail génère des interactions entre les éléments d'une situation de travail. Une interaction est composée d'un ou plusieurs actions et réactions. Ces interactions peuvent être représentées au travers de relations « source-puits » (Lieber et al. 2013; Bouffaron et al. 2014) : la source est l'élément qui initie l'interaction, le puits est l'élément qui est cible de l'interaction.

Guiochet (Guiochet 2016) catégorisent les interactions en trois types, qu'il qualifie de « message » :

- Physique : le puits reçoit de l'énergie mécanique, thermique, électrique (action physique) venant de la source.
- Sensoriel : le puits reçoit une information venant de la source par le biais d'un organe des sens (un des organes permettant la perception des 5 sens).
- Informationnel : le puits reçoit une information venant de la source par le biais d'une interface technique (IHM, voyant, ...).

La catégorisation de Guiochet est intéressante en plusieurs points par rapport aux contextes de ces travaux :

- Au sein d'une situation de travail, les interactions physiques entre la machine et les produits est ce qui permet les transformations des produits.
- Les interactions sensorielles et informationnelles permettent de transporter des informations d'un élément de la situation de travail à un autre. La partie commande ne pouvant pas être le puits d'une interaction sensorielle, les informations que l'interaction transmet sont donc non disponibles pour celle-ci.
 - o *Exemple* : un bruit généré par une vibration de la machine ne sera pas perceptible par la partie commande de la machine si aucun capteur de bruit n'est installé.
- La sensibilité d'un opérateur (expertise, connaissance, état physique et mental) et l'environnement dans lequel celui-ci travaille influent fortement sur les interactions sensorielles dont il est le puits.
 - o *Exemple* : un opérateur expérimenté sera capable de distinguer un bruit de la machine parmi d'autre, ce qui ne sera pas le cas d'un opérateur novice.
- Les interactions physiques entre l'opérateur et une machine (ou un produit) peuvent être dangereuses car celui-ci peut entrer en contact avec un phénomène dangereux générés par la machine ou le produit (mécanique, électrique, thermique, ...).
 - o *Exemple* : application de force mécanique sur l'opérateur provoquant des lésions physiques.
- Les interactions sensorielles et informationnelles, dont l'opérateur est le puits, peuvent être également dangereuses (par exemple, les risques psychosociaux suite à une surinformation, ...) mais dans le cadre de ces travaux, on se limitera aux risques associés aux interactions physiques.

En appliquant ces différents types sur les interactions au sein d'une situation de travail (situation composée d'un travailleur, de flux de produits et d'une machine composée d'une partie commande et d'une partie opérative), on obtient la représentation suivante des potentielles interactions et des différentes actions/réactions les composant (Figure 12):

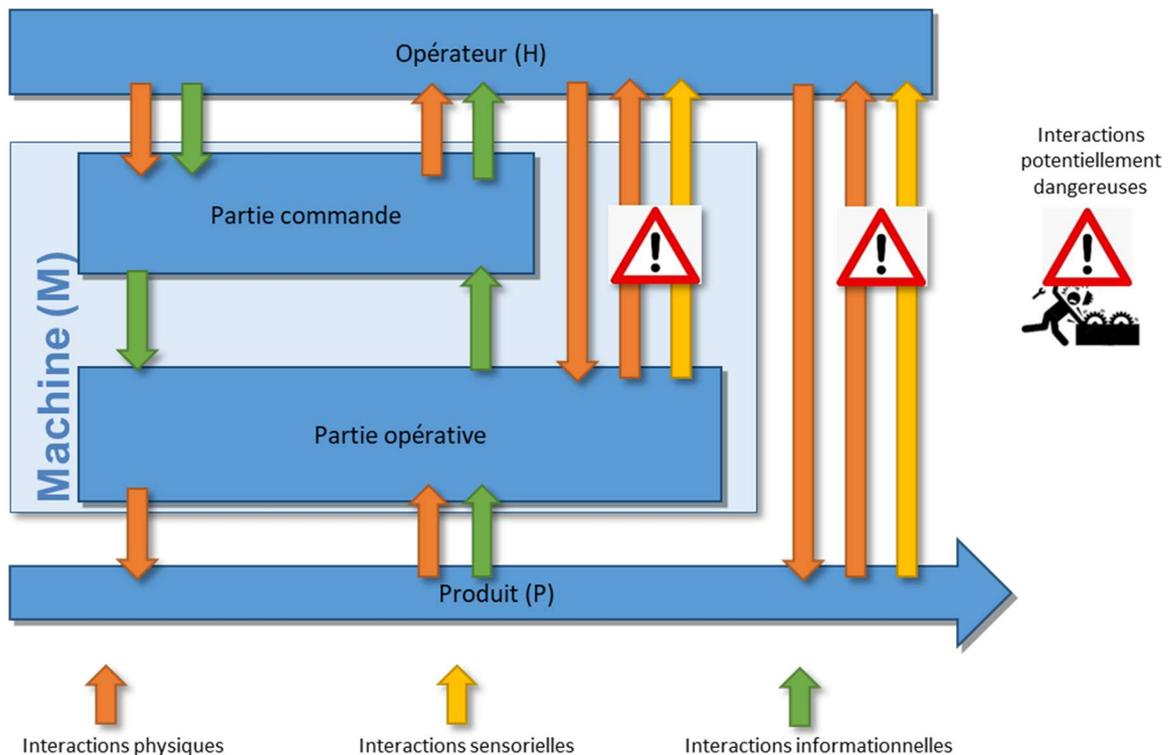


Figure 12 : Types des interactions au sein d'une situation de travail sur machine automatisée

Ces différentes interactions sont à modéliser si on veut modéliser la situation de travail dans son ensemble.

2.2.4. Conclusion sur la modélisation de situation de travail

Au sein de la méthode WSHM, nous proposons une modélisation de la situation de travail dont le but est de supporter l'identification des situations dangereuses générées par des réponses d'un opérateur à une dérive technique. Cette modélisation répond à deux besoins d'une analyse du risque machine :

- La détermination des limites de la machine : description de l'activité réalisée sur la machine et caractérisation de sa structure (article 5.3 de ISO12100:2010 (ISO 2010)) ;
- L'identification des phénomènes dangereux (article 5.4 de l'ISO12100:2010 (ISO 2010)) ;

Au sein de la première étape de la méthode WSHM, la modélisation de la situation de travail, comme un système, permet donc de :

- Représenter la structure et le comportement de la situation de travail pour capitaliser les informations nécessaires à sa compréhension (puis son analyse) ;

-
- Identifier les phénomènes dangereux présents au sein de la situation de travail (ceux liés aux énergies présentes dans la situation de travail et/ou les caractéristiques d'éléments) ;
 - Identifier les interactions entre les éléments de la situation de travail ;

Cette modélisation de la situation de travail, comme un système, en prenant en compte les interactions au sein de la situation de travail est une originalité de ces travaux. Les données ainsi capitalisées au cours de la modélisation sont par la suite utilisées pour identifier les situations dangereuses générées par une réponse d'un opérateur à une dérive technique.

2.3. Identifier les situations dangereuses

Il s'agit d'identifier les liens de causes à effets entre les dérives techniques (dérives de machine ou de produits) et des potentielles situations dangereuses (suite à des réponses de l'opérateur) en étant les conséquences. Identifier les situations potentiellement dangereuses au sein d'une situation de travail est la base de l'analyse du risque pour les travailleurs sur machine.

2.3.1. Analyse du risque sur machine

L'ISO 12100 :2010 propose une stratégie d'analyse du risque pour les situations de travail sur machine. Cette analyse du risque fait partie du processus de réduction du risque présenté dans la même norme (ISO 2010) (Figure 13).

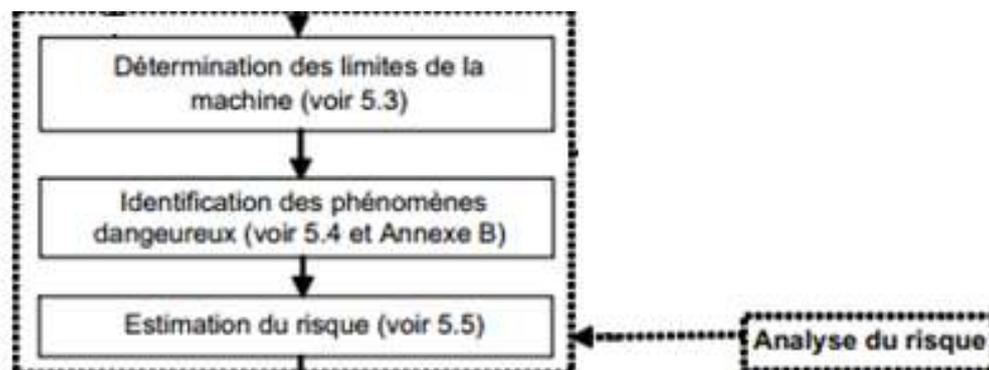


Figure 13 : Processus de réduction du risque (ISO 2010)

Une analyse du risque est composée de 3 étapes (ISO 2010):

- Déterminer les limites de la machine, son utilisation normale ainsi que les mauvais usages raisonnablement prévisibles.
- Identifier les phénomènes dangereux présents au sein de la situation de travail ainsi que les situations dangereuses pouvant être générées par ceux-ci ; que ce soit lors de son utilisation normale ou lors de mauvais usages raisonnablement prévisibles et/ou comportements involontaires de l'opérateur. Dans le cadre de ces travaux, on se concentrera sur les mauvais usages raisonnablement prévisibles : les réponses de l'opérateur.
- Estimer les risques pour chaque situation dangereuse identifiée ;

Selon l'ISO 12100 :2010 (ISO 2010), au cours de cette analyse, les mauvais usages prévisibles de l'opérateur à prendre en compte peuvent être :

- Les comportements réflexes de l'opérateur en cas de dysfonctionnement de la machine en cours d'utilisation (réponse de l'opérateur) (Costella et al. 2015);
- Les comportements résultants d'un défaut d'attention, de concentration ou d'une négligence de l'opérateur (Costella et al. 2015) ;
- Le comportement résultant d'un besoin de faciliter la tâche de l'opérateur de sa propre volonté (Vanderhaegen et al. 2011; Sedki, Polet, and Vanderhaegen 2013 ; Le Bot 2011) ;
- Le comportement résultant d'une incitation à maintenir la machine en marche à tout prix (pression de production) (Léger 2009) ;

Dans le cadre de ces travaux, les comportements raisonnablement prévisibles pris en compte sont ceux dus à un dysfonctionnement du système de production : ce sont les réponses de l'opérateur à une dérive technique (Lamy and Perrin 2020), qui peuvent englober les « comportements réflexes de l'opérateur » ainsi que « les comportements résultant d'un besoin de faciliter la tâche de l'opérateur », motivées par des dysfonctionnements récurrents de la machine.

2.3.2. Méthodes d'analyse du risque courantes dans l'industrie

Dans le domaine industriel, de nombreuses méthodes d'analyse du risque sont utilisées dans le but d'analyser les différents risques autour des systèmes de production. Dans ces travaux, on se concentrera sur les méthodes prenant en compte les défaillances d'une machine ou d'un processus comme causes principales (ou initiateurs principaux).

2.3.2.1. Analyse Globale des Risques (AGR)

L'AGR est une méthode d'analyse du risque, inductive, pour évaluer et hiérarchiser les expositions aux dangers d'un système, tout au long du cycle de vie de ce dernier. Une AGR peut se dérouler en étudiant, soit un scénario, soit un système. Elle permet notamment de formaliser la structure du système ou du scénario, la cartographie des dangers, la mise en place préliminaire de sécurité ainsi que l'étude des risques résiduels (Desroches 2017; Godard 2017). Cette méthode prenant en compte le système dans sa globalité, elle est très longue à mettre en place (récolte d'informations, réalisation, ...) et les paramètres liés aux risques estimés par les experts sont qualitatifs.

Il existe également une version quantitative de l'AGR : l'AGRq (Delmotte and Desroches 2014). Celle-ci permet de réaliser une AGR de manière quantitative en quantifiant les paramètres composant le risque (Probabilité et Gravité).

2.3.2.2. Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE)

La méthode AMDE est une méthode d'analyse du risque inductive et qualitative permettant d'identifier les différents modes de défaillance possibles sur un processus/équipement et d'en identifier les causes puis les effets jusqu'au système global.

2.3.2.3. Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticité (AMDEC)

L'AMDEC est une méthode quantitative basée sur l'AMDE mais qui se distingue de cette dernière par le calcul de la valeur de Criticité (Équation 1) de chaque Mode de défaillance. Cette criticité se distingue par la prise en compte de la fréquence d'occurrence du mode de défaillance (F), des capacités de détection du mode de défaillance (ND ou D) et de la gravité des effets (G) (Mortureux 2005; Military 1949; Landy 2007; IEC 2018).

$$\text{Criticité} = (\text{indice Fréquence d'occurrence}) * (\text{indice NonDétection}) * (\text{indice Gravité})$$

Équation 1: Calcul de la Criticité (AMDEC)

2.3.2.4. HAZard and OPerability Study (HAZOP)

La méthode HAZOP (ou « analyse des perturbations ») est majoritairement utilisée sur les procédés de transformation continus et notamment dans le domaine de la chimie, bio-chimie, L'analyse HAZOP se concentre sur l'analyse des déviations des flux entrants et sortants d'un procédé / machine. Au cours de l'analyse, les potentielles conséquences de chaque déviation de flux d'entrée sont étudiées. Les déviations de flux sont décrites par le biais de ses propriétés et l'utilisation de « mots-clés » caractérisant les déviations. Ces mots clés caractérisant les déviations de propriété d'un flux sont les suivants :

- Non ou pas de (no ou not) ;
- Plus de (more) ;
- Moins de (less) ;
- En plus de (as well as) ;
- En partie (part of) ;
- Autre que (other than) ;
- Inverse (reverse) ;

D'autres mots clés sont utilisés pour les déviations en terme de temps et de séquence :

- Plus tôt que (earlier than) ;
- Plus tard que (later than) ;
- Avant (before) ;
- Après (later) ;

(Royer 2009b, 2009a).

La méthode HAZOP est adaptée au processus et permet d'obtenir des résultats qualitatifs concernant les risques sur le processus étudié. La méthode HAZOP est inductive et très largement utilisée lors de la conception de machine / procédé continu. L'avantage de la méthode HAZOP est la structuration très précise de ses résultats.

2.3.2.5. Méthode couplée AMDEC-HazOp

La méthode couplée AMDEC-HazOp est une application conjointe de deux méthodes d'analyse dysfonctionnelle : la méthode quantitative AMDEC et la méthode qualitative HazOp. Cette méthode couplée permet d'« identifier précisément les niveaux à risque de défaillance mais surtout de comprendre l'enchaînement logique entre événements précurseurs et incidents. » (Reitz et al. 2012).

L'utilisation de ces deux méthodes conjointement se base sur les travaux de Léger (Léger 1999) dans lesquels la dégradation d'un flux sortant d'un processus est le résultat soit d'une dégradation de l'état du support de ce processus, soit d'une déviation des flux d'entrée, soit les deux en même temps.

La méthode AMDEC (IEC 2018) permet d'identifier les modes de défaillances des fonctions/éléments d'un système, leurs causes et leurs effets puis d'en estimer leurs criticités. Cette méthode ne prend pas en compte les déviations de flux entre les différentes fonctions/éléments d'un système, pour combler cette lacune, la méthode HazOp (IEC 2016) est utilisée pour permettre d'identifier les déviations de flux en entrée et en sortie de chacune de ces fonctions/éléments. Lors de l'étude d'un processus par AMDEC-HazOp, l'HazOp s'intéresse aux flux (énergie, matière et information) échangés entre les différentes fonctions réalisées au sein d'un processus et l'AMDEC s'intéresse aux dysfonctionnement de ces fonctions ou de leurs supports : l'AMDEC-HazOp permet de relier les modes de défaillance aux déviations de flux entrants et/ou sortants. Cette analyse est réalisée sur plusieurs niveaux de décomposition du système étudié (usine, ligne, poste, machine, composant) (Reitz et al. 2012).

2.3.2.6. Analyse énergétique pour l'identification systématique des dangers (EZID)

La méthode EZID est inductive et a pour but d'identifier les phénomènes dangereux le plus tôt possible lors de la conception d'un équipement, en se basant sur les flux d'énergies entrants et sortants de celui-ci. Cette méthode permet d'obtenir les liens entre les différentes sources d'énergie au sein de l'équipement, les phénomènes dangereux ainsi que la fréquence d'occurrence et la gravité de ceux-ci (de Galvez 2016; de Galvez et al. 2017).

2.3.2.7. Analyse Préliminaire des Risques (APR)

L'APR est une méthode inductive permettant d'identifier et d'analyser les risques au début de la conception d'un système. L'APR permet l'identification : des défaillances potentielles du système, des dangers en résultants, les effets de ces dangers sur le système et sur l'environnement (Mortureux 2002a; Hadj-Mabrouk and Harguem 2014). L'APR est rapide à mettre en place mais peu exhaustive, elle est la base de la méthode AGR.

2.3.2.8. Arbre des causes

« La démarche de réalisation d'un arbre des causes consiste à répondre à la question : quels faits ont joué un rôle dans la survenue de cet accident et en se combinant de quelle façon ? » (Mortureux 2002b)

La méthode par arbre des causes est déductive : elle est utilisée pour analyser des retours d'expériences d'événements dangereux. Au cours de cette méthode, on part d'un événement qui s'est produit par le passé et on examine les événements pouvant être la cause d'un tel événement. La méthode par arbre des causes utilise des graphiques par lesquels on examine les différents événements ayant mené à un accident / événement dangereux par le biais d'équations booléennes (Mortureux 2002b).

La méthode par arbre des causes est la plupart du temps utilisée pour des risques qui ont déjà été détectés par une autre méthode d'analyse du risque.

2.3.2.9. *Arbre de défaillances*

« La construction de l'arbre [de défaillances] consiste à se demander à chaque étape : qu'est ce qui pourrait faire que... ? » (Mortureux 2002b)

La méthode par arbre de défaillances est une méthode inductive dont le but est d'identifier les causes et les conditions dont la combinaison peut mener à l'événement redouté étudié. Cet arbre prend alors la forme d'un schéma à portes logiques où les différentes associations d'événements sont représentées et ainsi permettre d'illustrer les « causes » de chaque événement menant à l'événement redouté. Cette méthode permet une représentation graphique formelle qui peut être utilisée pour calculer les probabilités de l'événement redouté (Mortureux 2002b)

La méthode par arbre de défaillances permet d'obtenir des résultats graphiques rapides mais devient vite difficile à mettre en place face à des systèmes complexes.

2.3.2.10. *Arbre d'événements*

La méthode par arbre d'événements est une méthode inductive dont le but est d'identifier les conséquences probables d'un événement (inverse de la méthode par arbre de défaillances). Le résultat graphique de la méthode peut également être utilisé pour calculer les probabilités pour chaque conséquence possible (Mortureux 2002b).

La méthode par arbre d'événements permet d'obtenir des résultats graphiques rapides mais devient vite difficile à mettre en place face à des systèmes complexes.

2.3.2.11. *Volumes d'Influence*

La méthode des volumes d'influence a pour but d'identifier les différents espaces physiques où un ou des phénomènes dangereux peuvent être présents (similaire à la notion de « zone dangereuse » présente dans l'ISO12100 :2010 (ISO 2010)). Chaque élément physique est caractérisé selon : son matériau, sa géométrie nominale, sa position dans l'espace de travail, son milieu ambiant (pression atmosphérique, taux d'humidité, ...), et les énergies mises en œuvre en cours de son fonctionnement. La méthode distingue 6 types d'énergies : potentielle, cinétique, thermique, chimique, rayonnement et électrique (Echeverri et al. 2019). L'avantage de cette méthode est sa prise en compte du positionnement spatial des zones dangereuses au sein d'un espace de travail.

2.3.2.12. *What if ?*

La méthode « What if ? » est une méthode où les membres d'un groupe d'experts multidisciplinaires s'interrogent sur les différents événements non prévus ainsi que leurs possibles conséquences. Cette méthode se concentre sur le processus ou un équipement particulier. Les résultats sont obtenus par induction et sont qualitatifs, aucune évaluation des risques n'est réalisée (Thompson and Kieffer 2000).

2.3.3. Limites de ces méthodes

Aucune des méthodes couramment utilisées dans l'industrie ne prend en compte la situation de travail au complet. Or c'est un aspect majeur de l'approche proposée : prendre en compte la situation de travail dans son ensemble pour étudier, non pas seulement les éléments, mais surtout leurs interactions entre eux (Tableau 3).

L'approche la plus appropriée dans le contexte de ces travaux est la méthode AMDEC-HazOp car celle-ci prend en compte les déviations de flux de produit (déviations caractéristiques du flux et des produits) ainsi que les dysfonctionnements d'équipement/processus : les deux dérives techniques qui sont les causes initiatrices des situations dangereuses qu'on souhaite identifier au sein de la méthode WSHM.

Nom de la méthode	Focus	Quantitative / Qualitative ?	Déductive (D) / Inductive (I) ?
AGR	Equipement/Processus	Qualitative	I
AGRq	Equipement/Processus	Quantitative	I
AMDE	Equipement/Processus	Qualitative	I
AMDEC	Equipement/Processus	Quantitative	I
AMDEC-HazOp	Equipement/Processus	Qualitative / Quantitative	I
APR	Equipement	Qualitative	I
HAZOP	Processus	Qualitative	I
EZID	Equipement	Quantitative	I
Arbre de défaillance	Equipement/Processus	Quantitative	I
Arbre des causes	Equipement/Processus	Quantitative	D
Arbre d'événement	Equipement/Processus	Quantitative	I
Volume d'influence	Equipement (reconfigurable)	Quantitative	I
What if ?	Equipement/Processus	Qualitative	I

Tableau 3 : Comparaison des méthodes courantes d'analyse de risques

2.3.4. Conclusion sur l'identification des situations dangereuses générées par une réponse d'un opérateur à une dérive technique

Au sein de la méthode WSHM, nous proposons une identification des situations dangereuses générées par des réponses d'un opérateur à une dérive technique sur machine automatisée d'assemblage en exploitation. Cette identification permet l'analyse du risque liée à ces mauvais usages raisonnablement prévisibles.

Pour identifier les situations dangereuses générées par une réponse d'un opérateur à une dérive technique, nous proposons dans un premier temps d'utiliser une méthode existante pour identifier les causes initiatrices (les dérives techniques). Suite à l'étude des limitations des méthodes actuelles, il a été choisi d'utiliser la méthode AMDEC-HazOp.

A partir des résultats de cette analyse dysfonctionnelle, nous proposons d'identifier les réponses potentielles d'un opérateur ainsi que les risques qui y sont associés. Cette identification, a priori, des réponses d'un opérateur à une dérive technique, en se basant sur les dérives de la situation de travail (structure et comportement) est une originalité de cette thèse.

Les situations potentiellement dangereuses ainsi identifiées sont ensuite utilisées, comme connaissances a priori, pour construire un indicateur d'état de santé de la situation. Cet indicateur a pour but de permettre la mise en place d'une surveillance de l'apparition de ces situations potentiellement dangereuses.

2.4. Surveiller pour anticiper l'apparition des situations dangereuses

Pour anticiper l'apparition d'une situation potentiellement dangereuse, résultant de la réponse d'un opérateur à une dérive technique, nous proposons de surveiller les dérives techniques en étant la cause. Pour surveiller les dérives techniques, nous proposons de surveiller la situation de travail pour y détecter des dérives (soit par le biais des données existantes soit des données générées par des capteurs ajoutés suite à l'identification des causes techniques des situations dangereuses).

Utiliser des données produites par les systèmes de production pour en mesurer les performances ou l'état de santé est une pratique courante dans l'industrie manufacturière.

2.4.1. Health Monitoring et Health Management des systèmes industriels

La surveillance de l'état de santé d'un système de production industriel (« Health Monitoring ») a deux objectifs : l'aide à la conduite et l'aide à la maintenance de ce système (Abichou 2013; Lindberg et al. 2015; Laloix 2018; Weinechter et al. 2018). Les systèmes de production industriels étant de plus en plus complexes, aider à leur conduite est essentiel pour assurer les performances de ces systèmes / gérer leurs exploitations (Lesaffre, Thirion, and Baudouin 2000) et la sécurité de leurs utilisateurs (Wybo 2010) (Figure 14).

L'état de santé d'un système industriel est fonction de l'état de santé des machines le composant mais également l'état de santé de chaque composant de ces machines. Les systèmes industriels étant de plus en plus interconnectés, les interactions entre chaque machine / composant au sein du système de production sont également à prendre en compte. Certains composants de machine sont équipés de capteurs dont les données sont agrégées

dans le but d'estimer un indicateur d'état de santé. Ces indicateurs de santé sont par la suite également agrégés pour obtenir un état de santé de la machine puis du système de production entier (Abichou 2013; Laloix 2018; Valsalan, Baomar, and Baabood 2020; Atamuradov et al. 2020) (Figure 14 « Monitoring of (Critical) Components » et « Machine condition monitoring via sensors »)

L'analyse de l'état de santé d'un composant permet le diagnostic et/ou le pronostic de défaillances au sein du système de production. Ces analyses jouent un rôle important dans la mise en place de stratégies de gestion (« Health Management ») du système de production et notamment des stratégies de maintenance préventive conditionnelle (Muller 2005; Zhao 2009) et prévisionnelle (Lee et al. 2018 ; Leger et al. 1999; Gouriveau, Medjaher, and Zerhouni 2017; Cocheteux 2010; Atamuradov et al. 2017). (Figure 14 « Health Management tool »).

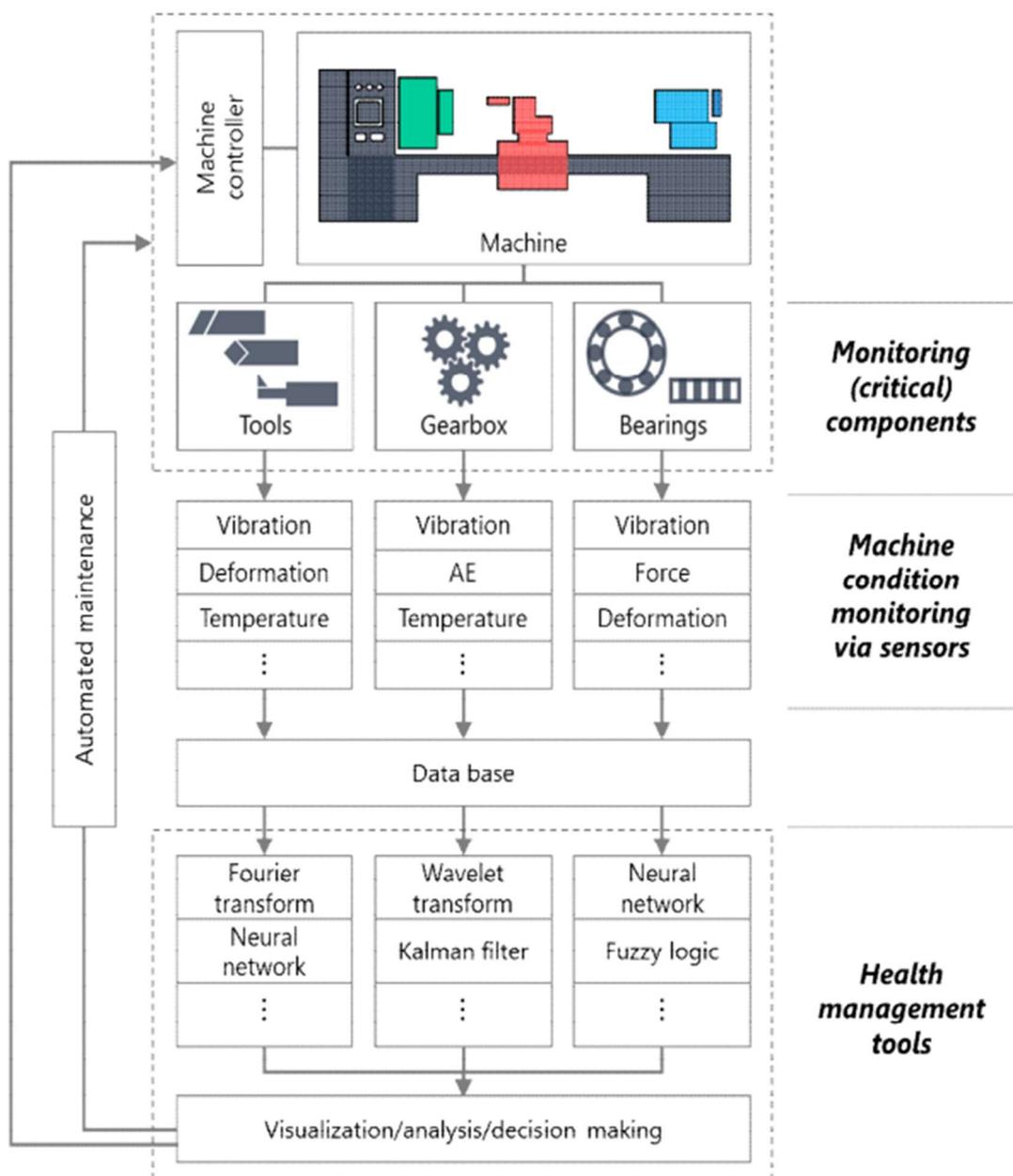


Figure 14 : Exemple de Health management de machine dans l'industrie (Lee et al. 2018)

Le « Health Monitoring » et le « Health Management » des systèmes industriels peuvent avoir un impact sur la sécurité des machines :

- Impact indirect : une machine en meilleur état est plus sûre qu'une machine défectueuse (Zio 2013; Wang et al. 2019)
- Impact direct : une barrière de protection en meilleur état et dont l'état de santé est surveillé protégera mieux l'opérateur qu'une barrière de protection défectueuse (Han et al. 2019).

2.4.2. Limites du « Health Monitoring » et du « Health Management »

Les « Health Monitoring / Management » ne sont appliqués que sur les machines ou des ensembles de machines. Ces approches ne prennent pas en compte la situation de travail dans son ensemble (machines, opérateurs et flux de produits). L'étude de l'état de santé des machines n'est pas suffisante pour obtenir un état de santé de la situation de travail.

2.4.3. Etat de santé de la situation de travail et indicateur

Dans le contexte de ces travaux, nous proposons d'étendre les approches de « Health Monitoring », habituellement réservées aux machines, à la situation de travail dans son ensemble.

Dans la suite de ces travaux, la notion d'état de santé de la situation de travail sera définie de la manière suivante :

Définition Santé de la situation de travail

La santé d'une situation de travail est la représentation de sa capacité à réaliser sa mission sans que l'opérateur (travailleur) n'ait à réaliser une réponse à une dérive technique pouvant placer celui-ci en situation dangereuse.

En reprenant la définition d'indicateur d'état de santé présentée dans (Abichou 2013), on utilisera la définition suivante pour la notion d'indicateur d'état de santé de la situation de travail :

Définition Indicateur d'état de santé de la situation de travail

Un indicateur d'état de santé de la situation de travail est une grandeur reflétant une caractéristique de la santé de la situation de travail (c'est-à-dire, la sécurité de l'opérateur au sein de la situation de travail). Il permet de quantifier l'écart par rapport à la situation de travail nominale. Un indicateur porte une information unique sur une partie limitée et particulière de la santé de la situation de travail.

2.4.4. Conclusion sur la définition d'un indicateur d'état de santé de la situation de travail

Au sein de la méthode WSHM, nous proposons de surveiller l'état de santé de la situation de travail pour détecter les signes précurseurs d'une situation potentiellement dangereuse générée par une réponse d'un opérateur à une dérive technique.

Pour surveiller la situation de travail, nous proposons de définir un indicateur de l'état de santé de la situation de travail. L'étude de cet état de santé et l'utilisation d'un indicateur pour le surveiller sont des originalités de ces travaux de thèse.

L'indicateur de l'état de santé de la situation de travail ainsi défini au cours de l'application de la méthode WSHM permettra de mettre en place une surveillance en ligne de la situation de travail.

2.5. Conclusion

La méthode proposée de Working Situation Health Monitoring (WSHM) proposée est composée de trois étapes. Chacune de ces étapes se base sur une des propositions d'axes de recherche présentées dans le premier chapitre et apporte une partie de l'originalité de ces travaux de thèse.

La première étape de la méthode WSHM « Modéliser la situation de travail comme un système » est basée sur la Proposition n°2 (P2) : « Pour supporter l'analyse dysfonctionnelle réalisée lors de la proposition n°1 (P1), nous proposons de modéliser la situation de travail nominale pour permettre une meilleure compréhension de celle-ci en la simplifiant ». Les approches de modélisation de situation de travail présentes dans la littérature (MOSTRA, Modèle d'Usages, ...) ne permettent pas de modéliser l'ensemble d'une situation de travail comme un système. Pour répondre à ce manque, cette étape apporte les originalités suivantes :

- La modélisation de la situation de travail comme un système dans le but de capitaliser les informations sur la structure de la situation de travail (machines, opérateurs, flux de produits, environnement, ...), son comportement (activité de travail) et notamment : les interactions en son sein ;
- Ces informations sont capitalisées dans un modèle dans le but d'être utilisées au cours de la prochaine étape de la méthode WSHM et peuvent également être conservées pour de futures analyses.

La deuxième étape de la méthode WSHM « Identifier les situations dangereuses, générées par une réponse d'un opérateur à une dérive technique, et leurs causes » est basée sur la Proposition n°1 (P1) : « Pour répondre à la problématique scientifique n°1 (S1), nous proposons d'identifier les situations dangereuses générées par une réponse de l'opérateur à une dérive technique en se basant sur une analyse dysfonctionnelle de la situation de travail nominale, considérée comme un système. ». Les approches d'analyse du risque, dont un état de l'art a été présenté, ne prennent pas en compte la situation de travail dans son ensemble (analyses des machines seules, analyses des processus seuls, ...). Pour répondre à ce manque, cette étape apporte les originalités suivantes :

- L'identification par une analyse dysfonctionnelle des éléments techniques (machines et flux de produits), les dérives techniques (défaillances machines et déviations des caractéristiques du produit et/ou du flux de produits) au sein d'une situation de travail vue comme un système ;
- L'identification des dérives d'interactions Homme-Machine et Homme-Produits permettant d'identifier les réponses potentielles d'un opérateur aux dérives techniques (et ainsi estimer les risques associés à ces réponses).

La troisième étape de la méthode WSHM « Définir un indicateur d'état de santé de la situation de travail » est basée sur la Proposition n° 3 (P3) : « Pour répondre à la problématique scientifique n°2 (S2), nous proposons de surveiller la situation de travail par le biais d'un indicateur d'état de santé de la situation de travail à partir des relations entre les dérives techniques et les réponses de l'opérateur pouvant être source de situations dangereuses. ». Les approches de surveillance d'équipement de travail actuelles, ne permettent pas une surveillance de la situation de travail dans son ensemble. Pour répondre à ce manque, cette étape apporte les originalités suivantes :

- Surveillance de la situation de travail dans son ensemble dans le but de détecter les signes précurseurs d'une situation potentiellement dangereuse générée par une réponse de l'opérateur à une dérive technique.
- Définition d'un indicateur d'état de santé de la situation de travail.

Ces trois étapes de la méthode WSHM sont présentées en détails au cours des trois prochains chapitres de ce manuscrit. La première étape est présentée dans le chapitre n°3, la deuxième dans le chapitre n°4 et la troisième étape dans le chapitre n°5. Chacun de ces chapitres est structuré de la manière suivante :

- Présentation de la composition du groupe de travail ;
- Liste des ressources documentaires externes à la méthode WSHM nécessaires à son application;
- Présentation des ressources documentaires internes à la méthode WSHM ;
- Description du déroulement de l'étape;
- Présentation des résultats attendus à la fin de l'étape ainsi que la synthèse de l'intérêt de l'étape au sein de la méthode WSHM ;
- Perspectives d'amélioration de l'étape ou d'utilisation hors de la méthode WSHM ;

Chapitre 3 : Modélisation de la situation de travail

3.1. Introduction

Ici, on présente la première étape de la méthode WSHM : « Modéliser la situation de travail comme un système ». Cette étape permet de capitaliser les informations suivantes :

- La structure de la situation de travail : travailleurs, machines, composants machines, produits et flux de produits étudiés ;
- Les activités réalisées au sein de la situation de travail ;
- Les interactions générées par les activités au sein de la situation de travail ;
- Les phénomènes dangereux présent au sein de la situation de travail ;

Ces informations capitalisées conditionnent le reste de l'analyse du risque réalisée au sein de la méthode WSHM ainsi que la définition de l'indicateur d'état de santé de la situation de travail.

Ce chapitre débute par une présentation de la composition du groupe de travail ainsi que des ressources externes nécessaires à la réalisation de cette étape de la méthode. Puis nous présentons les ressources internes à la méthode qui ont été développées aux cours de ces travaux de thèse (modèle de référence de situation de travail). Ce chapitre présente ensuite les différentes sous étapes composant la première étape de la méthode WSHM. Enfin, ce chapitre se conclut par la synthèse des résultats obtenus, leur utilité dans la suite de la méthode, mais également de potentielles perspectives d'utilisation des ressources / concepts développés ou des résultats obtenus au cours de cette étape.

3.2. Composition du groupe de travail et ressources externes nécessaires

Le groupe de travail nécessaire à la réalisation de la première étape de la méthode est composé d'un expert en modélisation système. Cet expert aura pour mission de modéliser la situation de travail étudiée. D'autres experts peuvent faire partie de ce groupe de travail pour aider à la collecte de données sur la situation de travail (expert risque-machine, ergonomiste du travail, ...).

Pour mener à bien sa mission, le groupe de travail doit regrouper les documents concernant la structure de la situation de travail ainsi que les transformations s'y déroulant. On trouve par exemple :

- Une présentation du processus de transformations de produits ;
- Une description de l'espace de travail ainsi que de l'environnement physique de travail ;
- Les caractéristiques techniques des machines présentes ainsi que les plans d'implantation de celles-ci ;
- Les caractéristiques techniques des matières premières, produits semi-finis et produits finis, et ce à chaque étape du processus de transformation ;
- L'identification des phénomènes dangereux, présents sur la machine (disponible dans les documents d'analyse de risques).

Ces documents seront, par la suite, nommés « documents techniques ». Pour compléter les documents techniques, il faut également regrouper les fiches de poste de chaque travailleur

pour identifier les activités réalisées par chacun. En plus de ces documents, il est également recommandé de procéder à une observation de la situation de travail étudiée, car celle-ci peut différer de sa description documentée puis de mettre à jour la documentation, si besoin.⁷

Pour guider le groupe de travail au cours de cette étape, nous proposons un « modèle de situation de travail » de référence pour servir de cadre de travail à la modélisation de la situation de travail étudiée.

3.3. Ressource interne à la méthode WSHM - Modèle de situation de travail vu comme un système de travail

La construction du modèle de situation de travail proposé s'inspire du MOSTRA (voir chapitre 2). Le MOSTRA était un modèle basé sur les concepts présents dans la norme EN614-1 :1995 (EN 1995). Le modèle de situation de travail proposé dans ces travaux se base plutôt sur les concepts présents dans la norme ISO12100 :2010 et la norme ISO 6385 :2016 (ISO 2016) et notamment la notion de « système de travail ». Un « système de travail » est défini dans cette norme par :

« Un système composé d'un ou plusieurs travailleurs et d'équipements de travail, agissant ensemble pour accomplir la fonction du système, à l'intérieur de l'espace de travail de l'environnement de travail, selon les conditions d'exécution des tâches à réaliser. » (ISO 2016)

Cette définition peut être enrichie par les définitions du concept de système :

- « Un ensemble d'éléments en interaction. » (Bertalanffy 1969) ;
- « Une combinaison d'éléments en interaction organisés pour atteindre un ou plusieurs objectifs déclarés. » ISO 15288 :2015 (ISO/IEC/IEEE 2015) ;
- « Un arrangement de parties ou d'éléments qui, ensemble, présentent un comportement ou une signification que les constituants individuels ne présentent pas. » (INCOSE 2020).

La notion d'interaction est centrale dans un système or ce concept n'est pas évoqué explicitement dans la définition de système de travail présente dans l'ISO 6385 :2016. Nous proposons donc de définir la situation de travail comme :

Définition de la situation de travail vue comme un système

Un système composé d'un ou plusieurs travailleurs et d'équipements de travail, agissant ensemble pour accomplir la mission du système, à l'intérieur de l'espace de travail de l'environnement de travail. La mission est atteinte par l'activité de travail, elle-même définie selon les conditions d'exécution des tâches à réaliser. La réalisation de ces tâches sous la forme d'activités, engendre des interactions entre les travailleurs, l'équipement de travail et les produits.

⁷ Les tâches décrites dans la fiche de poste et l'activité de travail peuvent différer de manière légère (tâche réalisée de manière différente par rapport au prescrit) ou plus brutale (tâches prescrites non-réalisées)

Modéliser une situation de travail comme un système permet de rendre visible les interactions entre les éléments de la situation de travail (travailleurs, équipements de travail et flux de produits), dans l'objectif de ne pas faire porter l'analyse sur les travailleurs mais uniquement sur ces interactions avec les machines et les flux de produits. En effet dans ce travail, nous nous limitons à l'analyse des dangers dont l'origine sont les machines et/ou les produits. Les travailleurs sont considérés comme des « boîtes noires » et ne seront pas vus comme une cause initiatrice de situations dangereuses. On s'intéressera uniquement aux réactions des travailleurs aux dérives techniques.

Dans cette modélisation, on cherche également à identifier les phénomènes dangereux au sein d'une situation de travail en étudiant les éléments pouvant les générer (machines et produits), puis d'identifier les risques associés à chaque phénomène dangereux et ainsi prévenir les situations potentiellement dangereuses pour un travailleur au sein de la situation de travail modélisée. Le modèle de situation de travail proposé doit :

- Contextualiser la situation de travail dans son environnement ;
- Représenter la structure de la situation de travail ;
- Contextualiser les phénomènes dangereux au sein de la situation de travail ;
- Décrire l'activité de travail nominale ;
- Décrire les interactions entre les éléments de la situation de travail au cours de cette activité de travail.

Nous proposons de réaliser ce modèle de référence (méta modèle) dans le formalisme SysML parfaitement adapté à la modélisation de système. Ce formalisme de modélisation propose des diagrammes pour représenter semi-formellement et graphiquement un système sous différents aspects (OMG 2019). Ces diagrammes peuvent être utilisés pour représenter l'aspect statique (structure) ou dynamique (comportement) d'un système. Dans ces travaux, on choisit d'utiliser le diagramme de définition des blocks (Block Definition Diagram ; BDD) pour modéliser les concepts qui caractérisent une situation de travail ainsi que les relations entre ces concepts (modèle de référence). Cette modélisation aurait pu être réalisée en diagramme de classe UML

Les différents concepts modélisés sont représentés par des « blocks ». Chaque « block » est caractérisé par le nom du concept qu'il représente ainsi que par les attributs qui le définissent. Chaque block de la situation de travail possède un attribut « identifiant » (Id) permettant d'identifier par un numéro chaque block lorsqu'ils sont instanciés.

Chaque « block » possède une ou des relations avec d'autre « blocks ». Ces relations établissent une connexion traçable décrivant comment un élément est dépendant d'un autre. Ces relations peuvent être des associations, des compositions et des agrégations (Figure 15) (OMG 2019).



Figure 15 : Association, Agrégation et Composition

Les différents concepts présents dans le modèle de situation de travail, dont l'étude est nécessaire pour représenter la structure et le comportement de la situation de travail nominale, sont les suivants :

- Situation de travail (vue comme un système) ;
- Travailleur(s) ;
- Machine(s) ;
- Composant(s) de machine ;
- Outil(s) ;
- Produit(s) ;
- Flux de produits ;
- Environnement de travail ;
- Espace de travail ;
- Activité(s) ;
- Interaction(s) ;
- Zone(s) d'interaction ;
- Phénomène(s) dangereux ;
- Zone(s) dangereuse(s).

La description des blocks de chacun de ces concepts, leurs attributs ainsi que les relations de ces blocks avec les autres blocks sont donnés dans les sous-sections suivantes :

3.3.1. Block de concept « Situation de travail »

Élément central du modèle de situation de travail, celui-ci est vu comme un système de travail qui est défini par une finalité (« Pourquoi la situation existe ? ») et une mission (« Que fait la situation ? »).

Les attributs de la situation de travail (vue comme un système) sont les suivants :

Finalité : texte (string), description textuelle de la finalité de la situation de travail ;

Mission : texte (string), description textuelle de la mission de la situation de travail ;

Chaque situation de travail est localisée au sein d'un espace de travail. La situation de travail vue comme un système de travail est composée d'un ou plusieurs travailleurs et une ou plusieurs machines, selon l'ISO 6385 :2016 (ISO 2016). La situation de travail réalise l'activité de travail et a pour but de générer des flux de produits (Figure 16).

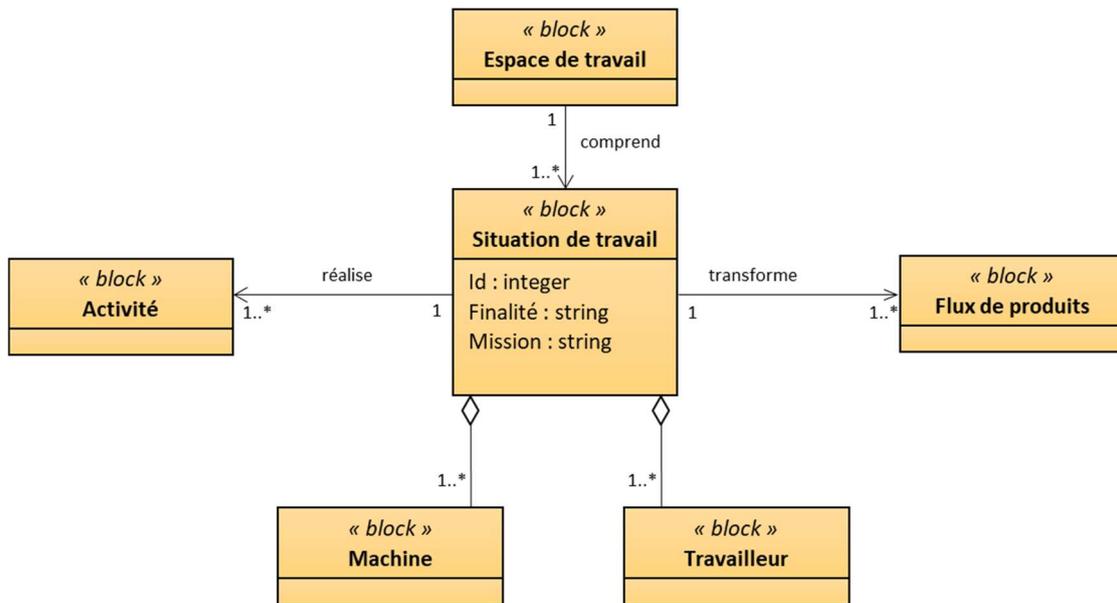


Figure 16 : Block « Situation de travail » et ses relations (BDD/SysML)

3.3.2. Block de concept « Travailleur »

Dans le contexte de nos travaux, l'opérateur de machine est un travailleur. Le concept de « travailleur » est présent dans le modèle de situation de travail en tant que « boîte noire ». Modéliser le « travailleur » en tant que « boîte noire » rappelle que dans nos travaux, nous ne nous intéressons pas aux causes des situations dangereuses d'origine humaine.

Les travailleurs étant considérés comme des « boîtes noires », ils ne possèdent pas d'attributs spécifiques (sauf Id).

Un travailleur peut interagir avec une ou plusieurs machines (ou composants de celles-ci) et avec un ou plusieurs produits. Un travailleur peut également interagir avec d'autres travailleurs. Il peut avoir des outils à disposition pour réaliser ses activités (Figure 17).

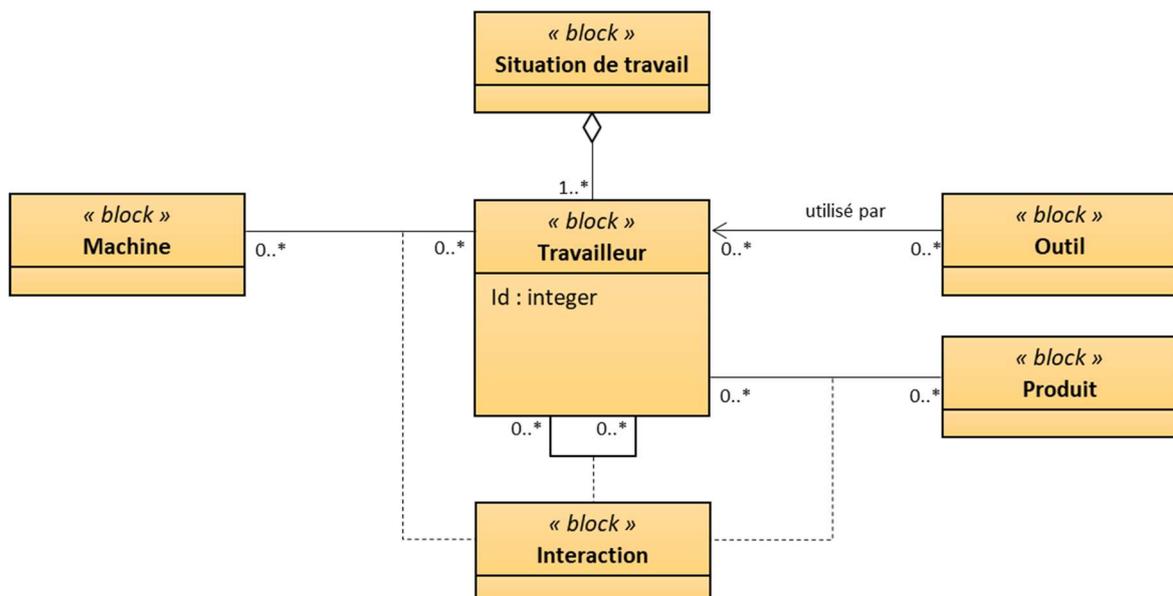


Figure 17 : Block « Travailleur » et ses relations (BDD/SysML)

3.3.3. Block de concept « Machine »

La modélisation des machines au sein de la situation de travail permet de les représenter spatialement dans l'espace de travail.

Les attributs d'une machine au sein de la situation de travail sont les suivants :

Fonction : liste de texte (list), noms des fonctions réalisées par la machine. Cet attribut permet de lister les fonctions dont la réalisation se traduit par une activité supportée par la machine ;

Position : coordonnées 3D (coord)⁸, coordonnées du centre de masse de la machine (en mm). Cet attribut permet de localiser la machine dans l'espace de travail ;

Dimensions : volume 3D (volume)⁹, forme de la machine (en mm). Cet attribut permet de représenter le volume occupé par la machine dans l'espace de travail ;

Une machine est composée de composants (ISO 2010). Elle peut interagir avec un ou plusieurs travailleurs et avec un ou plusieurs produits. Elle peut également interagir avec d'autres machines. Une machine peut être la source d'un ou plusieurs phénomènes dangereux (phénomènes dangereux dus à la structure de la machine, les phénomènes dangereux liés aux énergies seront étudiés au niveau « composant ») (Figure 18).

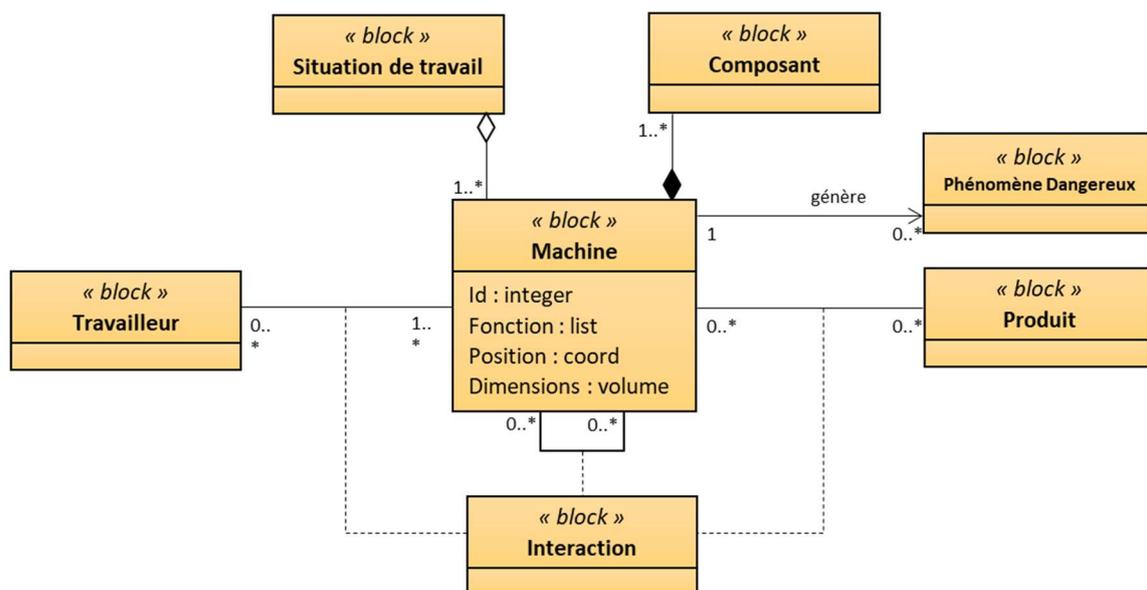


Figure 18 : Block « Machine » et ses relations (BDD/SysML)

⁸ Ce type de données est un tableau composé de 3 valeurs réelles représentant les coordonnées en X, Y et Z d'un point.

⁹ Ce type de données est un tableau composé de X coordonnées représentant les différentes arêtes de la machine.

3.3.4. Block de concept « Composant »

Après avoir modélisé la machine, nous modélisons ses composants. La modélisation de ces composants permet de localiser et représenter spatialement chacun de ceux-ci au sein de la machine mais également d'identifier les énergies entrantes et sortantes de chacun d'eux. Ces dernières peuvent être la source de phénomènes dangereux.

Les attributs d'un composant de machine sont les suivants :

Fonction : liste de texte (list), noms des fonctions réalisées par le composant. Cet attribut permet de lister les fonctions dont la réalisation se traduit par une activité supportée par le composant ;

Position : coordonnées 3D (coord), coordonnée du centre de masse du composant (en mm). Cet attribut permet de localiser le composant dans l'espace de travail ;

Dimensions : volume 3D (volume), forme du composant (en mm). Cet attribut permet de représenter le volume occupé par le composant ;

EnergieIn : liste de texte (list), liste des flux d'énergie entrants (par type d'énergie). Cet attribut permet de lister les énergies pouvant être la source de phénomènes dangereux liés à des énergies (mécaniques, électriques, ...) ;

EnergieOut : liste de texte (list), liste des flux d'énergie sortants (par type d'énergie). Cet attribut permet de lister les énergies pouvant être la source de phénomènes dangereux liés à des énergies (mécaniques, électriques, ...) ;

Un composant peut lui-même être constitué de composants (ISO 2010). Un composant de la machine peut interagir avec un ou plusieurs travailleurs, avec un ou plusieurs produits ou avec un ou des autres composants (de la même ou d'une autre machine). Il peut être la source d'un ou plusieurs phénomènes dangereux dont la source est un flux d'énergie entrant ou sortant (Figure 19).

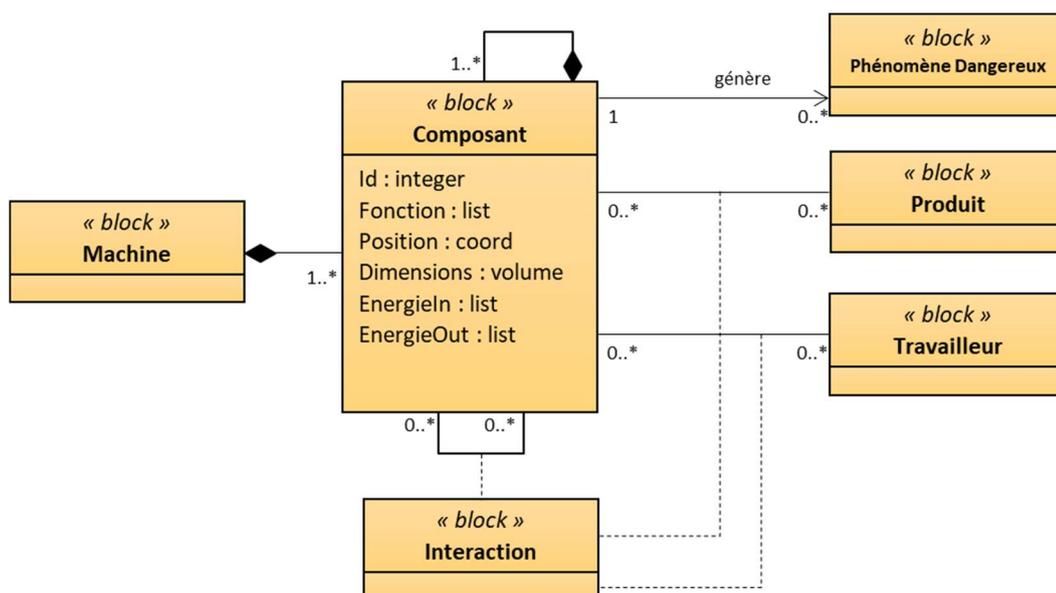


Figure 19 : Block « Composant » et ses relations (BDD/SysML)

3.3.5. Block de concept « Outil »

Au sein de la situation de travail, un outil est défini par sa possible fonction (sur une ligne d'assemblage automatisée, l'utilisation d'outils est peu commune) et sa masse.

Les attributs d'un outil sont les suivants :

Fonction : texte (string), noms des fonctions pouvant être réalisées à l'aide de l'outil. Cet attribut permet de lister les possibles utilisations de l'outil par un travailleur ;

Masse : nombre réel (float), masse de l'outil en gramme. Cet attribut permet d'identifier les phénomènes dangereux liés à la chute de l'objet ou à son déplacement ;

Un travailleur (opérateur) peut avoir à disposition un ou plusieurs outils pour l'aider dans les activités qu'il réalise au sein de l'activité de travail (ISO 2016). Un outil peut également être la source d'un phénomène dangereux (Figure 20).

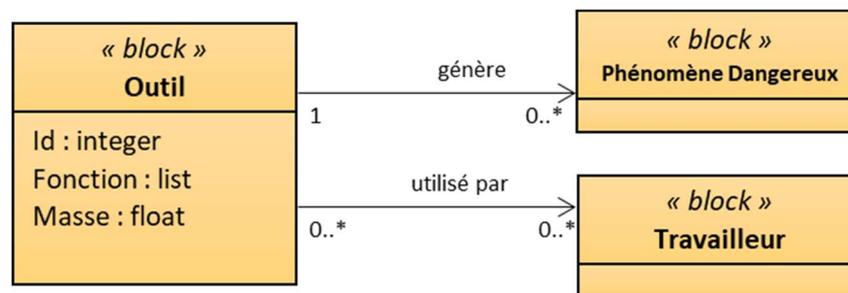


Figure 20 : Block « Outil » et ses relations (BDD/SysML)

3.3.6. Block de concept « Produit »

La modélisation des produits permet d'étudier une des dérives techniques : les dérives des caractéristiques des produits. La description de la position et de la forme de ces produits ainsi que leurs évolutions au cours du processus nominal de transformation sont nécessaires pour l'étude de ces dérives.

Les attributs d'un produit sont les suivants :

Position : coordonnées 3D (coord), coordonnées du centre de masse du produit (en mm). Cet attribut permet de localiser le produit dans l'espace de travail. Cette position est modifiée après chaque déplacement de produit par la machine ou le travailleur ;

Dimensions : volume 3D (volume), forme du produit en mm. Cet attribut permet de représenter la forme du produit ;

Masse : nombre réel (float), masse du produit en gramme. Cet attribut permet d'identifier les phénomènes dangereux liés à la chute de l'objet ou à son déplacement ;

Un produit peut interagir avec un ou plusieurs travailleurs et avec une ou plusieurs machines (et les composants de celles-ci). Il peut également interagir avec d'autres produits. Nominale, dans le cadre d'un assemblage, ces interactions sont réduites aux assemblages de produits prévus. Un produit peut être la source d'un ou plusieurs phénomènes dangereux fonction de ses dimensions ou de son état de surface (Figure 21).

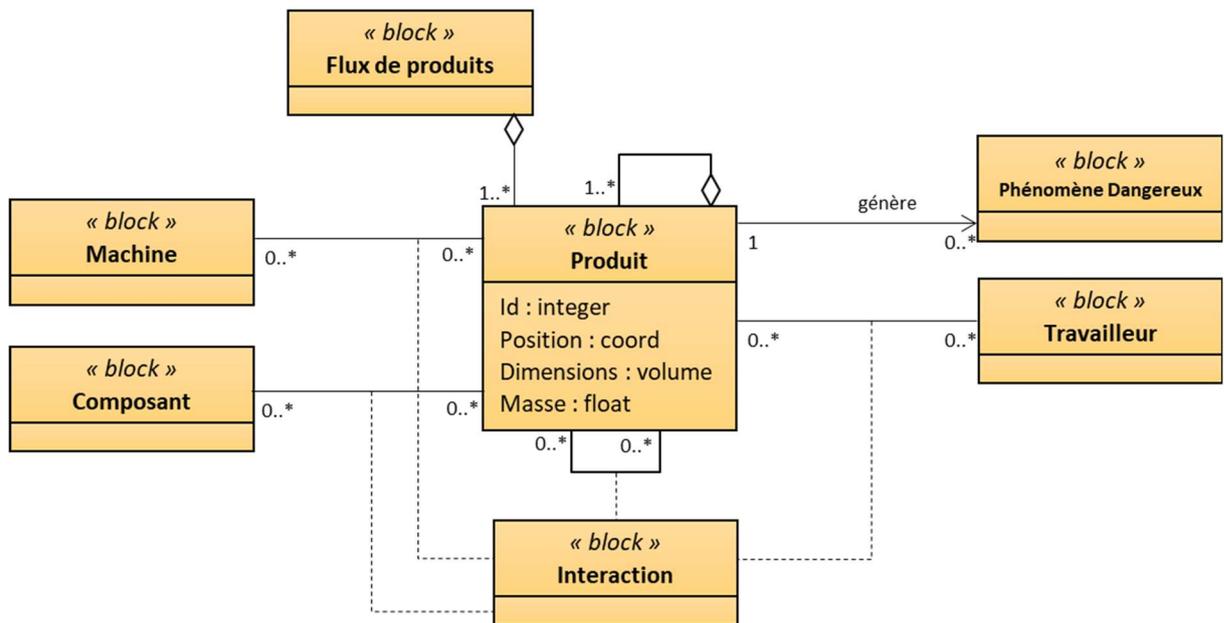


Figure 21 : Block « Produit » et ses relations (BDD/SysML)

3.3.7. Block de concept « Flux de produits »

La modélisation des flux de produits permet d'étudier le dernier type de dérives techniques qui nous intéressent : les dérives de flux de produits. Les dérives de flux de produits peuvent se caractériser par une dérive du débit de transformation.

L'attribut d'un flux de produits est le suivant :

Débit : nombre réel (float), débit du flux de produits en produits/seconde. Cet attribut permet de quantifier le débit de produits au sein du flux ;

Il est composé d'un ou plusieurs produits et est généré par une activité de travail. Un flux de produits peut également être un support d'un autre flux de produits (Figure 22).

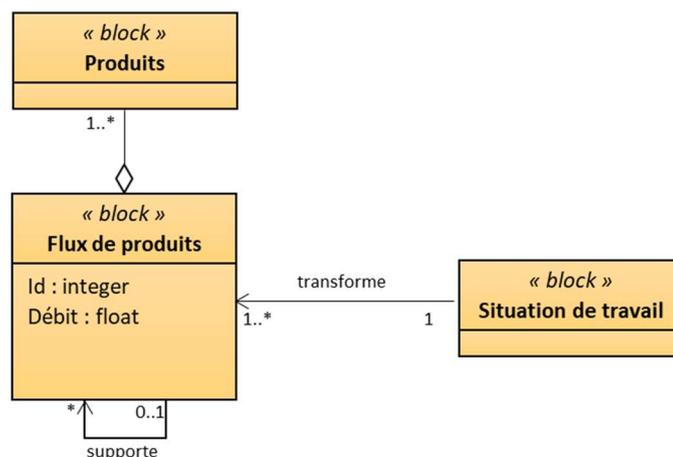


Figure 22 : Block « Flux de produits » et ses relations (BDD/SysML)

3.3.8. Block de concept « Espace de travail »

L'espace de travail est le volume dans lequel se déroule la situation de travail. Le centre de celle-ci sert de référence de position des éléments au sein de la situation de travail. L'espace de travail, quant à lui, représente les limites spatiales de la situation de travail (ce qui est à l'intérieur est dans la situation de travail, ce qui n'y est pas dans la situation de travail).

Les attributs de l'espace de travail sont les suivants :

Centre : coordonnées 3D (coord), coordonnées du centre de l'espace de travail (en mm). Cet attribut permet de donner le point de référence de position pour la localisation et la représentation spatiale des objets au sein de la situation de travail;

Limites : volume 3D (volume), forme de l'espace de travail (en mm). Cet attribut permet de représenter les limites spatiales de la situation de travail ;

L'espace de travail est l'espace dans lequel se situe la situation de travail. Celui-ci est compris dans l'environnement de travail (ISO 2016). On y retrouve également les différentes zones dangereuses et d'interactions (Figure 23).

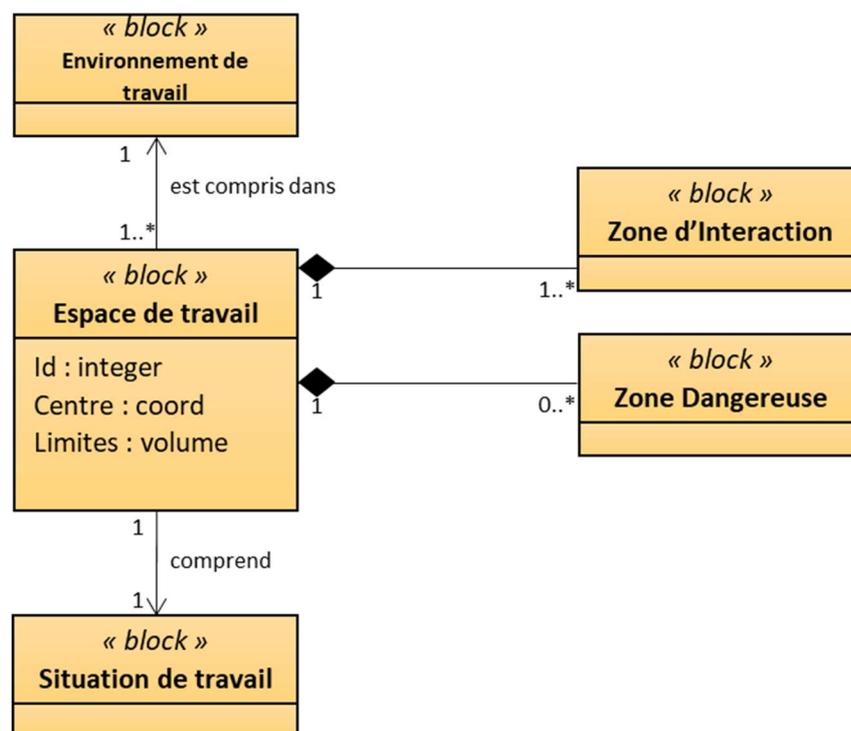


Figure 23 : Block « Espace de travail » et ses relations (BDD/SysML)

3.3.9. Block de concept « Environnement de travail »

L'environnement de travail est défini selon les caractéristiques physiques de son atmosphère (température, pression et hygrométrie). Dans ces travaux, nous limitons l'environnement de travail à son aspect physique et ne prenons donc pas en compte l'aspect organisationnel, sociétal ou psychologique de l'environnement de travail.

Les attributs de l'environnement (physique) de travail sont les suivants :

Température : nombre réel (float), température en °C ;

Pression : nombre réel (float), pression en Bar ;

Humidité : nombre réel (float), pourcentage d'humidité dans l'air (de 0 à 1) ;

La température, la pression et l'humidité peuvent impacter le comportement et la structure des machines (et composants de machine) ainsi que celles des produits et travailleurs au sein de la situation de travail, nous proposons de les prendre en compte dans la représentation de la situation de travail.

L'espace de travail est compris dans l'environnement de travail (ISO 2016) (Figure 24).

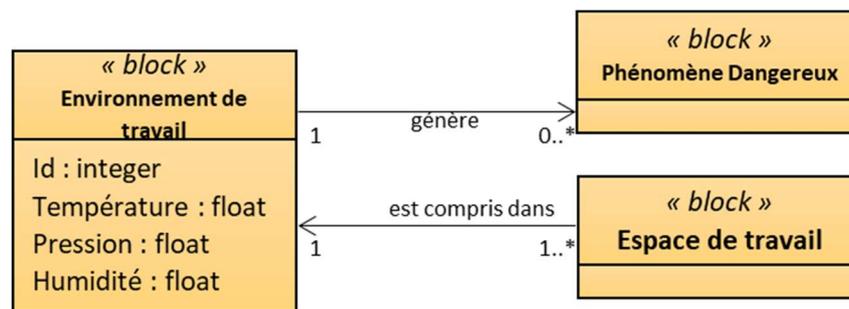


Figure 24 : Block « Environnement de travail » et ses relations (BDD/SysML)

3.3.10. Block de concept « Phénomène dangereux »

Le but de la méthode WSHM est d'identifier des situations dangereuses. Pour cela, il faut identifier les phénomènes dangereux au sein de la situation de travail. Nous proposons de lister les phénomènes dangereux au sein de la situation de travail, ainsi que le type de phénomènes dangereux.

L'attribut d'un phénomène dangereux est le suivant :

Type : texte (string), type du phénomène dangereux. Cet attribut peut être l'énergie étant à l'origine du phénomène dangereux ou un autre type (due à la structure machine, combinaison, ...)

Un phénomène dangereux génère une zone dangereuse. Il peut être généré par un produit, une machine (ou un composant), par l'environnement de travail ou par un outil (ISO 2010) (Figure 25).

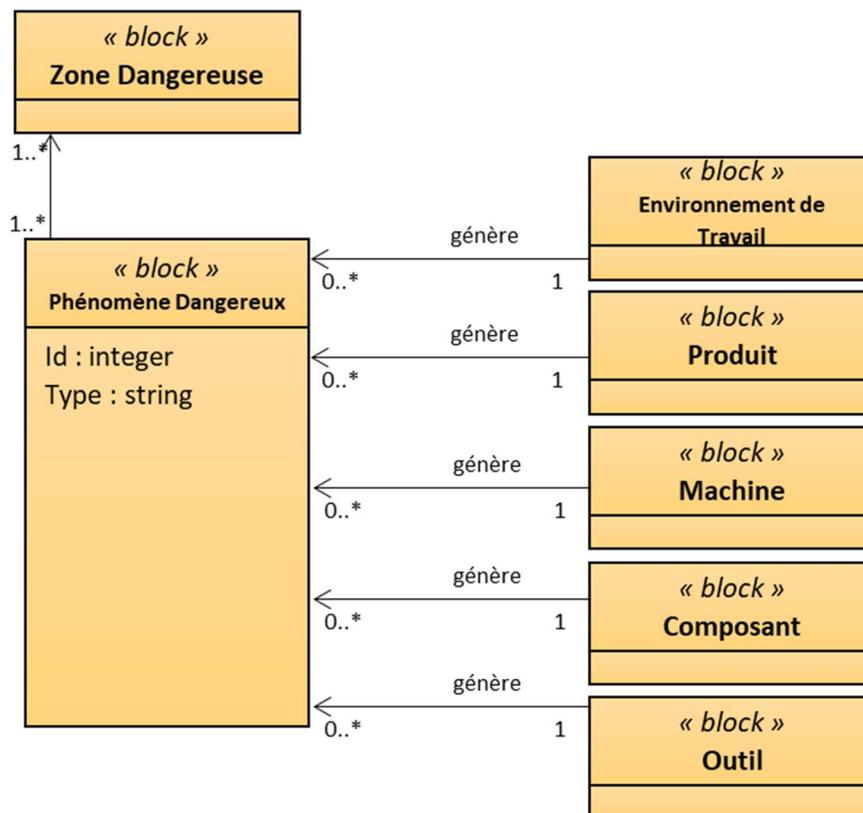


Figure 25 : Block « Phénomène dangereux » et ses relations (BDD/SysML)

3.3.11. Block de concept « Zone dangereuse »

Pour permettre l'identification des situations dangereuses, nous proposons de représenter les zones dangereuses. Ces zones présentent un danger pour le travailleur car au moins un phénomène dangereux y est présent. Si le travailleur venait à entrer dans une zone dangereuse, il se retrouverait en situation dangereuse.

Les attributs d'une zone dangereuse sont les suivants :

Centre : coordonnées 3D (coord), coordonnées du centre de la zone dangereuse (en mm). Cet attribut permet de localiser la zone dangereuse dans l'espace de travail ;

VolumInfluence : volume 3D (volume), forme de la zone dangereuse / volume d'influence du phénomène dangereux (en mm). Cet attribut permet de représenter les caractéristiques spatiales de la zone dangereuse dans l'espace de travail;

Une zone dangereuse est générée par un phénomène dangereux et se situe spatialement dans l'espace de travail (ISO 2010) (figure 13).

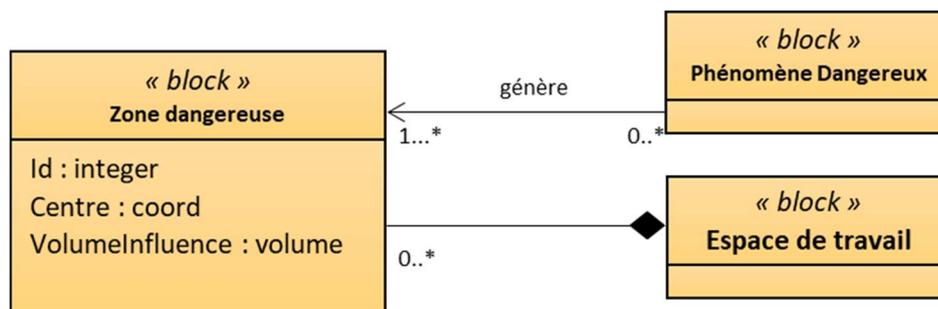


Figure 26 : Block « Zone dangereuse » et ses relations (BDD/SysML)

3.3.12. Block de concept « Activité »

Une activité (application d'une tâche ou action supplémentaire) est définie par la liste des « acteurs » (travailleurs et/ou machines) qui prennent part à sa réalisation, le type de l'activité (voir ISO 12100 :2010 (ISO 2010), section 5.4.a), les flux entrants et sortants (flux de produits et/ou d'énergies). Elle est également définie par les conditions pour que l'activité se réalise (préconditions), les conditions de sortie de l'activité (post-conditions) ainsi que les conditions qui restent vraies au cours de sa réalisation (invariants). Une activité est également définie temporellement par le temps de sa première occurrence, sa durée ainsi que sa fréquence d'occurrence.

Les attributs d'une activité sont les suivants :

Acteur : texte (string), nom du travailleur et/ou de la machine impliqué dans l'activité. Cet attribut permet de noter l'acteur réalisant l'activité ;

Type : texte (string), nom du type d'activité. Cet attribut permet de catégoriser les différents types d'activité pouvant se dérouler au cours de l'activité de travail ;

FluxIn : liste de texte (list), liste des différents flux entrants de l'activité (énergies, informations et/ou matières). Cet attribut permet de lister les flux d'énergie et

d'information nécessaires à la réalisation de l'activité ainsi que les flux de matières (produits, ...) entrants ;

FluxOut : liste de texte (list), liste des différents flux sortants de l'activité (énergies, informations et/ou matières). Cet attribut permet de lister les flux d'énergie et d'information générés par l'activité ainsi que les flux de matières (produits, ...) transformés lors de l'activité ;

Préconditions : liste de texte (list), liste des différentes préconditions de l'activité. Cet attribut permet de lister les conditions qui doivent être respectées pour que l'activité soit réalisée ;

Postconditions : liste de texte (list), liste des différentes post-conditions de l'activité. Cet attribut permet de lister les conditions qui doivent être respectées pour que l'activité se termine ;

Invariants : liste de texte (list), liste des différents invariants de l'activité. Cet attribut permet de lister les conditions qui doivent rester vraies tout au cours de la réalisation de l'activité ;

Tdébut : nombre entier (integer), temps de début de l'activité en seconde. Cet attribut permet de noter le temps nominal de la première réalisation de cette activité, en considérant que l'activité de travail démarre à t = 0 seconde ;

Durée : nombre entier (integer), durée de l'activité en seconde. Cet attribut permet de noter la durée nominale de réalisation de l'activité ;

Fréquence : nombre réel (float), fréquence de l'activité en Hz. Cet attribut permet de noter la fréquence nominale de réalisation de l'activité ;

Chaque activité peut être composée d'une ou plusieurs « sous »-activités. Elle est réalisée au sein d'une situation de travail et engendre une ou plusieurs interactions (Figure 27)

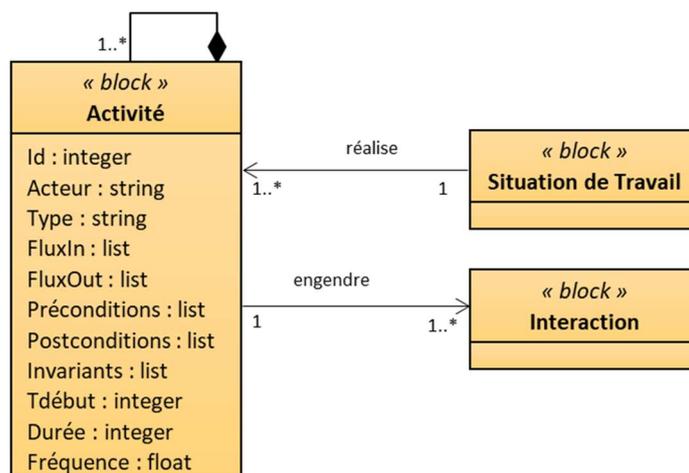


Figure 27 : Block « Activité » et ses relations (BDD/SysML)

3.3.13. Block de concept « Interaction »

Au sein du modèle de situation de travail, les interactions entre les travailleurs, machines (et composants de celles-ci) et/ou les produits sont représentés par des associations dont la propriété est un block « Interaction ».

Une interaction est définie par la liste des « acteurs » qui interagissent ensemble (travailleurs, machines et/ou produits), par les conditions pour que l'interaction se réalise (préconditions), les états (forme, position, ...) à la fin de sa réalisation (post-conditions) ainsi que les états qui ne doivent pas changer au cours de sa réalisation (invariants). Une interaction est de un ou plusieurs types : physique, sensoriel, et/ou informationnel (voir section 2.2.3). Le type d'interactions conditionne le fait que ce soit une énergie et/ou une information qui sont transmises. Elle est également définie temporellement par un temps de début, une durée ainsi qu'une fréquence d'occurrence (Figure 28).

Acteurs : liste de texte (list), liste des deux acteurs impliqués dans l'interaction. Le premier acteur noté est la source (initiateur de l'interaction), le second est le puits (cible de l'interaction). Cet attribut permet de lister les deux acteurs qui interagissent (source et puits de l'interaction) ;

Types : liste de texte (liste), types de l'interaction (physique, informationnelle et/ou sensorielle). Cet attribut permet de lister les types de l'interaction pour différencier les interactions physiques, informationnelles et/ou sensorielles ;

Préconditions : liste de texte (list), liste des différentes préconditions de l'interaction. Cet attribut permet de lister les conditions (états des acteurs impliqués : formes, positions, ...) qui doivent être respectées pour que l'activité soit réalisée ;

Postconditions : liste de texte (list), liste des différentes post-conditions de l'interaction. Cet attribut permet de lister les conditions (états des acteurs impliqués : formes, positions, ...) qui doivent être respectées pour que l'interaction se termine ;

Invariants : liste de texte (list), liste des différents invariants de l'interaction. Cet attribut permet de lister les conditions (états des acteurs impliqués : formes, positions, ...) qui doivent rester vraies tout au long de la réalisation de l'interaction ;

Variables : liste de texte (list), liste des énergies et/ou informations transmises au cours de l'interaction. Cet attribut permet de lister les différents échanges d'énergies/informations réalisés au cours de l'interaction dans leur ordre chronologique (« variables »).

Tdébut : nombre entier (integer), temps de début de l'interaction en seconde. Cet attribut permet de noter le temps nominal de la première réalisation de cette interaction, en considérant que l'activité de travail démarre à $t = 0$ seconde ;

Durée : nombre entier (integer), durée de l'interaction en seconde. Cet attribut permet de noter la durée nominale de réalisation de l'interaction ;

Les attributs d'une zone d'interaction sont les suivants :

Centre : coordonnées 3D (coord), coordonnées du centre de la zone d'interaction. Cet attribut permet de localiser la zone d'interaction dans l'espace de travail ;

Zone : volume 3D (volume), forme de la zone d'interaction. Cet attribut permet de représenter les caractéristiques spatiales de la zone d'interaction dans l'espace de travail;

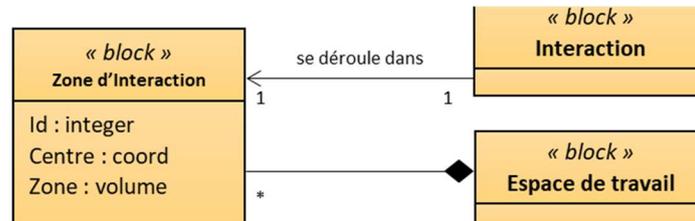


Figure 29 : Block « Zone d'interaction » et ses relations (BDD/SysML)

3.3.15. Modèle de situation de travail

Lorsque tous ces concepts sont rattachés entre eux, on obtient le diagramme de définition des blocs (BDD) suivant (Figure 30) :

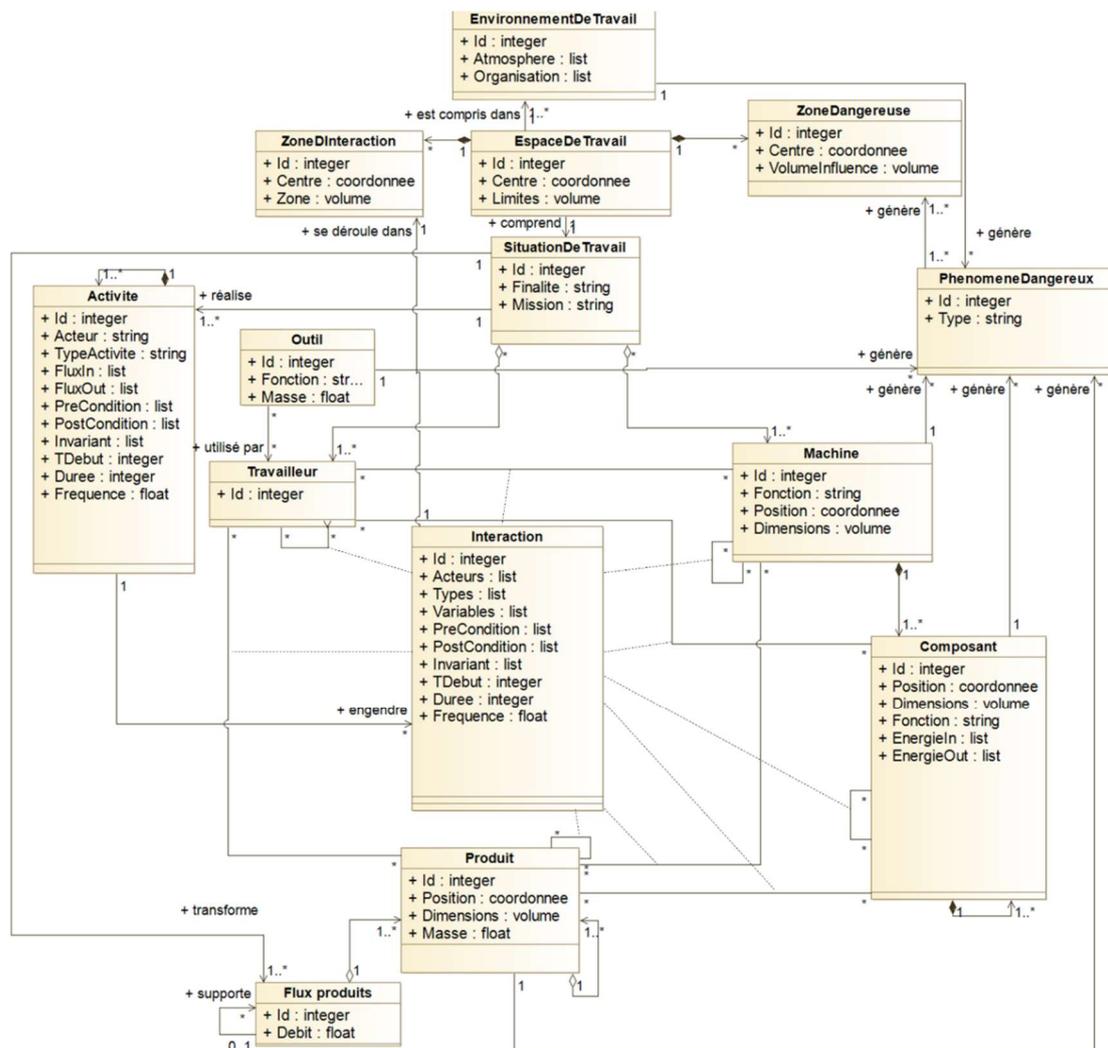


Figure 30 : Modèle de situation de travail (BDD/SysML)

3.3.16. Conclusion sur le modèle de référence et son utilisation

Le modèle de référence proposé est un méta-modèle dont le but est de servir de patron à la modélisation de situations de travail sur machine d'assemblage.

Pour utiliser ce modèle de référence et l'instancier, nous proposons une démarche d'instanciation. Cette démarche est présentée dans la section suivante.

3.4. Déroulement de la modélisation

La première étape de la méthode WSHM a pour but de modéliser la situation de travail étudiée. Ce modèle de données est par la suite utilisé pour identifier les situations dangereuses générées par une réponse de l'opérateur à des dérives techniques.

Cette étape se déroule en plusieurs phases : la première phase a pour but de modéliser la structure et la dynamique (activité et interaction) de la situation de travail (sous-étapes R1.1 à R1.7) et la deuxième phase a pour but d'identifier les phénomènes dangereux puis de les intégrer au modèle (sous-étape R1.8). Chaque sous-étape ajoute des informations au modèle de situation de travail instancié à la situation de travail étudiée.

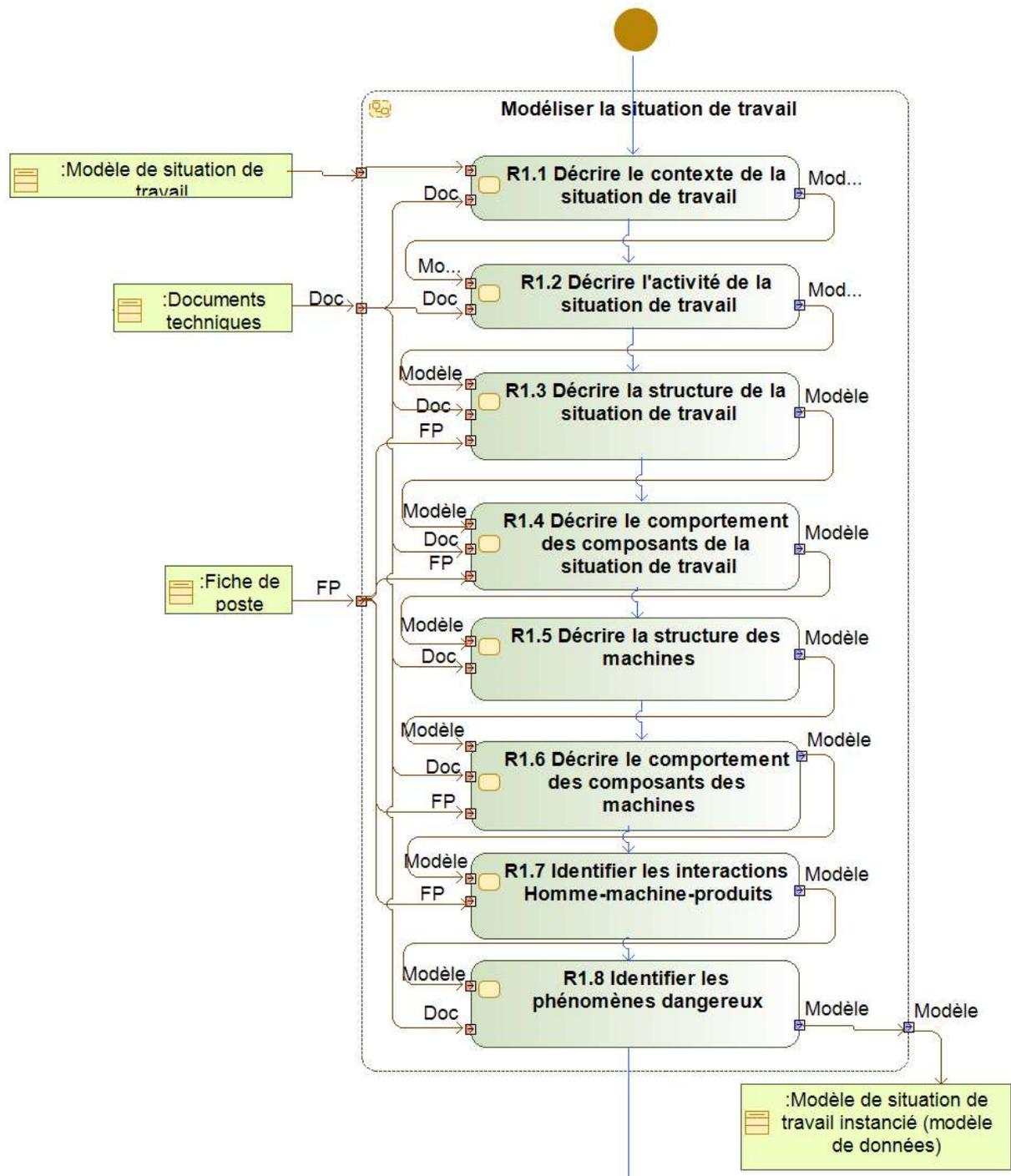
Si on compare le processus de cette étape au processus d'analyse du risque proposé dans l'ISO12100 :2010 (ISO 2010), celui-ci équivaut à la « Détermination des limites de la machine » (5.3) ainsi qu'à l'« Identification des phénomènes dangereux » (lorsque le fonctionnement des machines est nominal ; 5.4.a et 5.4.b.1). Cette étape se différencie de l'analyse du risque présentée dans l'ISO 12100 :2010 par la prise en compte de la situation de travail dans son ensemble et non pas uniquement les machines.

Le déroulement de cette première étape de la méthode WSHM, les sous-étapes la composant, les ressources nécessaires à la réalisation de chacune de ces sous-étapes ainsi que les produits de chaque sous-étape sont présentés dans le diagramme d'activité présenté dans la Figure 31.

3.4.1. Modélisation de la structure et de la dynamique de la situation de travail étudiée par instanciation du modèle de référence (R1.1 à R1.7)

La modélisation de la structure et de la dynamique de la situation de travail étudiée est réalisée en instanciant le modèle de situation de travail sur la situation de travail étudiée, sous-étape par sous-étape (processus incrémental). Au cours de cette instanciation, trois types de diagramme SysML peuvent être utilisés pour supporter l'analyse, selon la spécification 1.6 de ce formalisme (OMG 2019), sont utilisés :

- Des diagrammes de définition des blocks (Block Definition Diagram ; BDD) représentant la situation de travail selon différents points de vue (situation en vue « boîte noire », situation en vue « boîte blanche » avec machine en vue « boîte noire » et situation en vue « boîte blanche » avec machine en vue « boîte blanche »);
- Des diagrammes d'activités (Activity Diagram ; AD) sont utilisés pour décrire les différentes activités réalisées par les différents composants de la situation de travail ainsi que les flux de produits impliqués dans ces activités ;
- Des diagrammes de séquences (Sequence Diagram ; SD) sont utilisés pour décrire les séquences d'interactions entre chaque acteur au sein d'une activité.



R2

Figure 31 : Diagramme d'activité du déroulement de l'application de la 1ère étape de la méthode WSHM (AD/SysML)

La modélisation d'un système se fait selon deux points de vue complémentaires : les points de vue « boîte noire » et « boîte blanche » (Meinadier and Fiorèse 2012) :

- Un système étudié de l'extérieur est vu comme une « boîte noire ». Celui-ci est observé dans l'environnement avec lequel il interagit. Ces interactions se traduisent par des échanges de flux d'énergies, de matières ou d'informations.
- Un système étudié de l'intérieur est vu comme une « boîte blanche ». Celui-ci est composé d'éléments en interaction.

A chaque point de vue, la structure du système étudié ainsi que le comportement de la situation de travail, vu comme un système, sont étudiés. Nous réalisons donc les modélisations de structure et de dynamique selon les points de vue suivants :

- Modélisation de la situation de travail en vue « boîte noire » : vu de l'extérieur. Les limites du système modélisé sont illustrées dans la Figure 32. Cette modélisation permet de représenter les relations entre la situation de travail et son environnement.

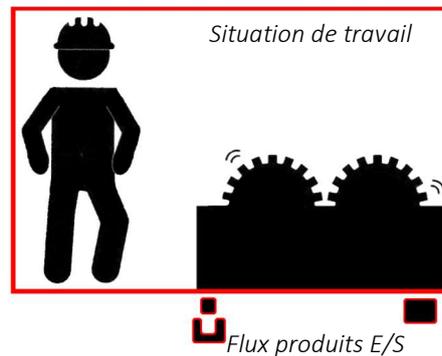


Figure 32 : Situation de travail "boîte noire"

- Modélisation de la situation de travail en vue « boîte blanche » : vu de l'intérieur en gardant les « sous-systèmes » la composant (machines et travailleurs) en vue « boîte noire ». Les limites du système modélisé sont illustrées dans la Figure 33. Cette modélisation permet de différencier les activités réalisées par les opérateurs et celles réalisées par les machines (ainsi que les flux entrants et sortants de celles-ci).

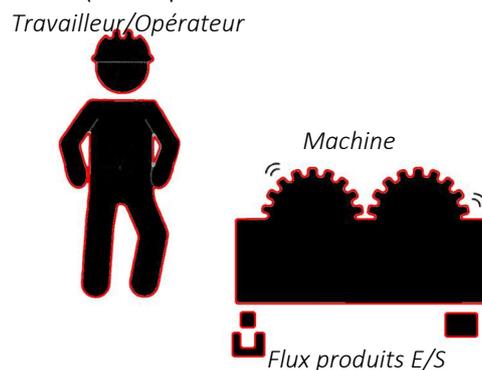


Figure 33 : Situation de travail "boîte blanche" et machine "boîte noire"

- Modélisation de la situation de travail en vue « boîte blanche » : détails de chaque machine également en vue « boîte blanche » et les travailleurs en vue « boîtes noires ». Les limites du système modélisé sont illustrées dans la Figure 34. Cette modélisation permet de différencier les activités réalisées par chaque composant des machines ainsi que les interactions entre les différents éléments de la situation de travail.

Travailleur/Opérateur

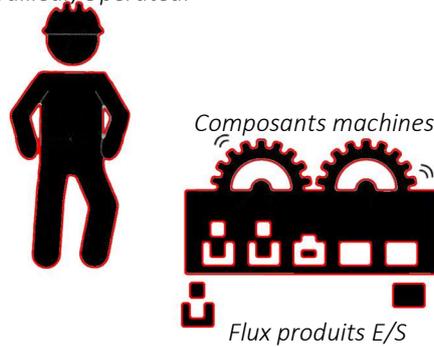


Figure 34 : Situation de travail "boîte blanche" et machine "boîte blanche"

Ce processus de modélisation est décrit dans les sous-sections suivantes :

3.4.1.1. Contexte de la situation de travail (R1.1)

Le but de la sous-étape « Décrire le contexte de la situation de travail » est de caractériser la structure du contexte de la situation de travail étudiée, en vue « boîte noire ».

Cette description du contexte de la situation de travail est nécessaire pour décrire les caractéristiques nominales ainsi que les flux de produits entrants et sortants de la situation de travail. Ces informations serviront, par la suite, à l'étude des dérives des flux de produits / caractéristiques produits. La caractérisation de l'espace de travail permet de poser les limites spatiales de la situation de travail étudiée. La caractérisation de l'environnement physique de travail permet de lister les conditions atmosphériques de la situation de travail étudiée, la dérive de celles-ci pouvant générer des dérives techniques (produits ou machines).

Au cours de cette sous-étape, le groupe de travail doit identifier et décrire la finalité et la mission de la situation de travail, les flux de produits entrants et sortants de cette situation ainsi que les caractéristiques des produits composant ces flux. Le groupe doit également décrire l'environnement physique de travail (température, pression et humidité nominale) et l'espace de travail (centre et dimensions) dans lequel se situe la situation de travail.

Pour se faire, le groupe de travail a besoin des documents suivants :

- Une présentation du processus de transformations de produits ;
- Une description de l'espace de travail ainsi que de l'environnement physique de travail ;
- Les caractéristiques techniques des matières premières, produits semi-finis et produits finis, et ce à chaque étape du processus de transformation.

3.4.1.2. Activité de la situation de travail (R1.2)

Le but de la sous-étape « Décrire l'activité de la situation de travail » est de caractériser l'activité réalisée par la situation de travail en vue « boîte noire » : l'activité de travail.

La caractérisation de l'activité de travail nominale est nécessaire pour étudier l'aspect dynamique de la situation de travail nominale.

Au cours de cette sous-étape, le groupe de travail doit identifier et décrire les caractéristiques temporelles de l'activité de travail (fréquence et durée) ainsi que les flux entrants et sortants (produits mais également énergies). Le groupe doit également décrire les préconditions, post-conditions et invariants de réalisation de cette activité de travail.

Pour s'aider dans la réalisation de cette étape, le groupe de travail réalise un diagramme d'activité de la situation de travail en vue « boîte noire ». Ce diagramme d'activité permet de représenter l'activité de travail, ainsi que les flux entrants et sortants (matières et/ou énergie) de celle-ci (Figure 35).

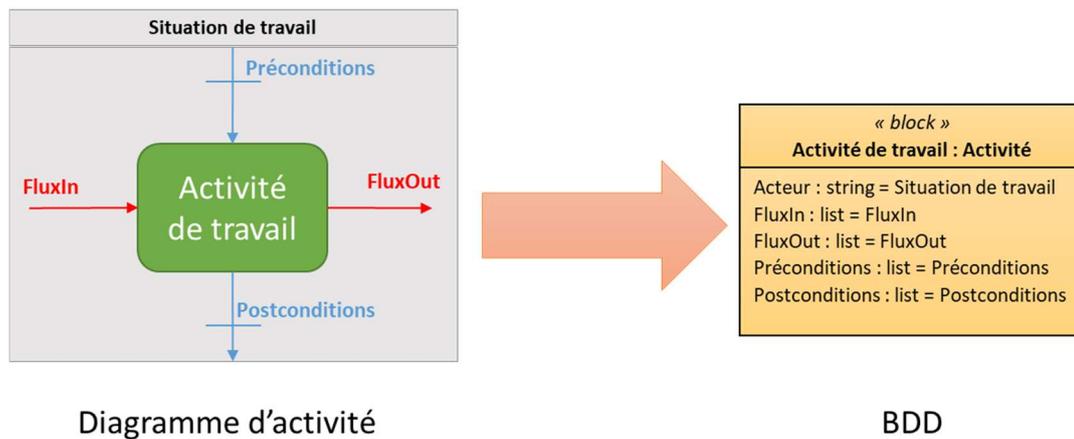


Figure 35 : Extraction d'informations du diagramme d'activité vers le BDD

Lors de cette sous-étape, le groupe de travail a besoin des documents suivants :

- Une présentation du processus de transformations de produits ;
- Les fiches de poste.

3.4.1.3. Structure de la situation de travail en vue « boîte blanche » (R1.3)

Le but de la sous-étape « Décrire la structure de la situation de travail » est de caractériser la structure de la situation de travail étudiée en vue « boîte blanche » et ainsi décrire les éléments qui la compose (travailleurs et machines).

Cette caractérisation des machines est nécessaire pour l'étude des zones dangereuses liées aux phénomènes dangereux dont ces premières sont la source.

Au cours de cette sous-étape, le groupe de travail doit identifier et décrire les différents éléments composants la situation de travail étudiée : les travailleurs (opérateurs de machine) et les machines. La fonction de chaque machine ainsi que ses caractéristiques spatiales (forme et position) sont à décrire pour chaque machine au sein de la situation de travail. Cette caractérisation des machines permettra par la suite la description des zones dangereuses associées à ces dernières. Le groupe de travail doit également identifier et décrire les différents outils à disposition des travailleurs.

Pour se faire, le groupe de travail a besoin des documents suivants :

- Les caractéristiques techniques des machines présentes ainsi que les plans d'implantation de celles-ci ;
- Les fiches de poste.

3.4.1.4. *Comportement des composants de la situation de travail (R1.4)*

Le but de la sous-étape « Décrire le comportement de la situation de travail » est de caractériser le comportement (activités) des éléments qui composent la situation de travail en vue « boîte blanche ». Ces activités sont des composants de l'activité réalisée par la situation de travail (activité de travail).

La caractérisation des activités réalisées par les machines et les opérateurs est nécessaire à lister les interactions au sein de la situation de travail. Elle est également nécessaire à l'analyse des dérives des machines en vue « boîte noire ».

Au cours de cette sous-étape, le groupe de travail doit identifier et décrire les caractéristiques temporelles (fréquence et durée) des activités réalisées par les éléments composant la situation de travail (travailleurs ou machines) ainsi que les flux entrants et sortants (produits, énergies et/ou informations). Le groupe doit également décrire les préconditions, post-conditions et invariants de réalisation de ces activités.

Pour s'aider dans la réalisation de cette étape, le groupe de travail réalise un diagramme d'activité de la situation de travail en vue « boîte blanche » (avec les activités réalisées par chaque élément composant la situation de travail). Ce diagramme d'activité permet de déterminer et de représenter les différentes activités réalisées par les travailleurs et les machines ainsi que les flux entrants et sortants de chacune. Cela permet d'identifier les flux de produits supports (exemple : palette, luge, ...) et de produits intermédiaires.

Lors de cette sous-étape, le groupe de travail a besoin des documents suivants :

- Une présentation du processus de transformations de produits ;
- Les caractéristiques techniques des machines présentes ;
- Les caractéristiques techniques des matières premières, produits semi-finis et produits finis, et ce à chaque étape du processus de transformation ;
- Les fiches de poste.

3.4.1.5. *Structure des machines en vue « boîte blanche » (R1.5)*

Le but de la sous-étape « Décrire la structure des machines » est de caractériser la structure des machines en vue « boîte blanche » et ainsi décrire leurs composants.

Cette caractérisation des composants de machine est nécessaire pour identifier les phénomènes dangereux dont ils sont la source (énergies). La caractérisation spatiale des composants de machine permettant de caractériser les zones dangereuses liées aux énergies de ceux-ci.

Au cours de cette sous-étape, le groupe de travail doit identifier et décrire les différents composants des machines. La fonction de chacun ainsi que leurs caractéristiques spatiales (forme et position) sont à décrire. Le groupe de travail doit également identifier et décrire les différents flux d'énergies entrants et sortants de chaque composant des machines.

Dans le cas où ces composants sont composés de « sous-composants », ils sont à décrire lors de cette sous-étape de la même manière que des « composants ». Cette décomposition

est à réaliser jusqu'à arriver aux composants dont la fonction est élémentaire (par exemple, un vérin dont la fonction est de réaliser le déplacement linéaire d'un produit).

3.4.1.6. Comportement des composants des machines (R1.6)

Le but de la sous-étape « Décrire le comportement des composants des machines » est de caractériser le comportement (activités) des composants des machines en vue « boîte blanche ». Ces activités sont des sous-activités de celles réalisées par la machine.

Cette caractérisation des activités réalisés par les composants de la machine est nécessaire pour lister les interactions machine-produits, et les interactions machine-homme. Elle est également nécessaire à l'analyse des dérives techniques des composants de la machine (machine en vue « boîte blanche »).

Au cours de cette sous-étape, le groupe de travail doit identifier et décrire les caractéristiques temporelles (fréquence et durée) des activités des composants de machine ainsi que les flux entrants et sortants (produits mais également énergies). Le groupe doit également décrire les préconditions, post-conditions et invariants de réalisation de ces activités.

Pour s'aider dans la réalisation de cette étape, le groupe de travail réalise des diagrammes d'activité des machines en vue « boîte blanche » (avec les activités réalisées par chaque composant de chaque machine). Ces diagrammes permettent de déterminer et de représenter chacune des activités réalisées par chaque composant de machine ainsi que leurs flux entrants et sortants.

Lors de cette sous-étape, le groupe de travail a besoin des documents suivants :

- Une présentation du processus de transformations de produits ;
- Les caractéristiques techniques des machines présentes ainsi que les plans d'implantation de celles-ci ;
- Les caractéristiques techniques des matières premières, produits semi-finis et produits finis, et ce à chaque étape du processus de transformation ;
- Les fiches de poste.

3.4.1.7. Interactions Homme-machine-produits (R1.7)

Le but de la sous-étape « Identifier les interactions Homme-machine-produits » est d'identifier et de caractériser les interactions entre les différents éléments de la situation de travail.

La caractérisation des interactions au sein de la situation de travail est nécessaire pour lister les capacités de perception des travailleurs mais également pour identifier des interactions qui pourraient dériver en cas de réponse d'un opérateur à une dérive technique.

Au cours de cette sous-étape, le groupe de travail doit identifier les acteurs (source et puits) ainsi que le type de l'interaction : physique (exemple : un vérin applique une force de poussée sur un produit), informationnelle (exemple : l'opérateur voit un voyant clignotant sur l'IHM de la machine) ou sensorielle (exemple : l'opérateur entend un bruit de vibration venant d'un moteur électrique). Il doit également identifier les « variables » transmises (énergies si

physiques ; informations si informationnelles ou sensorielles). Le groupe de travail doit par la suite identifier et décrire les caractéristiques temporelles (fréquence et durée) de chaque interaction, ainsi que les préconditions, post-conditions et invariants de réalisation de ces interactions. Finalement, il doit identifier et décrire la « zone d'interaction » (caractéristiques spatiales de l'interaction : position et espace) dans laquelle se déroule chacune des interactions identifiées¹⁰.

Pour s'aider dans la réalisation de cette étape, le groupe de travail réalise des diagrammes de séquences de chaque activité réalisée par les travailleurs, machines et composants de machine. Ces diagrammes de séquence permettent de déterminer les sources et puits de chaque interaction, les actions/réactions (transmissions d'énergies et/ou d'informations) la composant ainsi que leur ordre d'enchaînement (Figure 36). Les « préconditions » sont définies par les états amonts des acteurs (conditions pour que l'interaction se réalise) et les « post-conditions » par les états avals des acteurs (condition de fin de l'interaction).

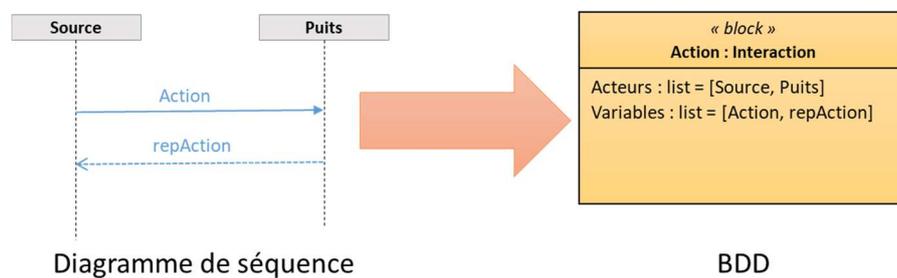


Figure 36 : Extraction d'informations du diagramme de séquence vers le BDD

Lors de cette sous-étape, le groupe de travail a besoin des fiches de poste.

3.4.2. Identification des phénomènes dangereux au sein de la situation de travail (R1.8)

Le but de la sous-étape « Identifier les phénomènes dangereux au sein de la situation de travail » est d'identifier et de caractériser les différents phénomènes dangereux au sein de la situation de travail.

Cette identification est nécessaire pour, par la suite, estimer les risques liés aux différentes situations potentiellement dangereuses liées à une ou des dérives techniques menant à une réponse d'un opérateur.

Au cours de cette sous-étape, le groupe de travail doit identifier les différents phénomènes dangereux générés par l'environnement physique de travail, les machines et leurs composants, les produits et les outils à disposition du travailleur. Ces phénomènes dangereux sont à caractériser selon l'énergie qui est la source du phénomène dangereux. Le groupe de travail doit identifier et caractériser la « zone dangereuse » générée par chacun de ces phénomènes dangereux (volume d'influence du phénomène dangereux¹¹). Cette identification se réalise en se basant sur les énergies en entrée et en sortie de ces éléments de la situation de travail (ISO

¹⁰ La caractérisation spatiale d'une zone d'interaction pouvant être difficile, il est conseillé de considérer la zone d'interaction la plus large possible pour chaque interaction.

¹¹ Comme pour la caractérisation des zones d'interactions, la caractérisation spatiale des zones dangereuses doit se faire en considérant le volume d'influence le plus large possible, en restant raisonnable (Echeverri et al. 2019)

2010, 2012; Léger 1999) (par exemple, un composant alimenté en énergie électrique peut être la source d'un phénomène dangereux de type électrique et sa zone dangereuse est située à la surface de ce composant).

Lors de cette sous-étape, le groupe de travail a besoin des documents suivants :

- Une description de l'espace de travail ainsi que de l'environnement physique de travail ;
- Les caractéristiques techniques des machines présentes ainsi que les plans d'implantation de celles-ci ;
- Les caractéristiques techniques des matières premières, produits semi-finis et produits finis, et ce à chaque étape du processus de transformation ;
- L'identification des phénomènes dangereux, présents sur la machine (disponible dans les documents d'analyse du risque).

3.4.3. Conclusion sur l'application de l'étape

A la fin de l'application de la première étape de la méthode WSHM, le groupe de travail obtient un modèle de situation de travail instancié qui contient toutes les informations concernant la situation de travail qu'on considère nominale (sans dérive).

Cette représentation de la situation de travail sous la forme d'un système donne une visibilité des interactions en son sein. La modélisation permet également de s'affranchir des modèles métiers (un seul modèle à la place de nombreuses représentations avec points de vue différents) pour garder une vision d'ensemble de la situation de travail (une vision autant technique qu'humaine). Le modèle instancié permet d'assurer la traçabilité du contexte de l'analyse du risque (« quelle était la situation étudiée au moment de son analyse ? »).

Ces informations seront essentielles dans les deux prochaines étapes de la méthode WSHM : « Identifier les situations dangereuses générées par une réponse d'un opérateur à une dérive technique et leurs causes » (étape décrite dans le chapitre 4 de ce manuscrit) et « Définir un indicateur d'état de santé de la situation de travail » (étape décrite dans le chapitre 5 de ce manuscrit) :

- Les attributs des machines/ composants, des flux d'énergies et de produits ainsi que les caractéristiques des activités seront utilisés au cours de l'analyse dysfonctionnelle, réalisée au cours de la deuxième étape de la méthode, pour identifier les différentes dérives techniques (« dérives machine » et/ou « dérives produits ») ;
- Les caractéristiques des interactions seront également utilisées au cours de la deuxième étape pour identifier et caractériser les dérives d'interactions suite aux dérives techniques. Les caractéristiques des phénomènes dangereux et de l'espace de travail sont elles aussi utilisées au cours de la deuxième étape de la méthode WSHM pour identifier et caractériser les situations potentiellement dangereuses suite aux réponses de l'opérateur ;
- Les valeurs nominales des caractéristiques de flux d'énergies et de produits, des caractéristiques temporelles des activités et des interactions seront utilisées au cours de la troisième étape de la méthode WSHM dans le but de construire des indicateurs de déviation.

3.5. Discussions

3.5.1. Position de la première étape de la méthode WSHM par rapport aux processus d'analyse du risque

Le modèle instancié ainsi obtenu permet également de réunir les résultats de ces étapes de l'analyse du risque sur un seul document. La modélisation permet de s'affranchir des représentations métiers qui demandent des connaissances dans de nombreux domaines (électronique, électrotechnique, pneumatique, mécanique, ...).

Pour identifier les situations potentiellement dangereuses suite à des réponses d'un opérateur à une dérive technique, il faut compléter l'analyse du risque (ISO 12100 :2010 (ISO 2010)) par les étapes suivantes :

- « Identification des phénomènes dangereux » lorsque le fonctionnement des machines est dégradé (5.4.b.2) ;
- « Usages raisonnablement prévisibles » en cas de dérive de la machine (5.4.3) ;
- « Estimation du risque » pour l'opérateur.

Celles-ci seront traitées au cours de la deuxième étape de la méthode WSHM, « Identifier les situations potentiellement dangereuses, générées par une réponse de l'opérateur suite à des dérives techniques, et leurs causes », qui est présentée dans le prochain chapitre de ce manuscrit (chapitre 4).

3.5.2. Discussions et perspectives

3.5.2.1. *Accessibilité aux documents / données permettant la modélisation*

Un des problèmes pouvant freiner la réalisation de cette étape est l'accessibilité aux documents techniques ou à l'actualisation de ceux-ci. Les spécifications d'une machine pouvant ne pas être disponibles et/ou peu précises (par exemple, une machine modifiée par rapport à ces caractéristiques nominales et ses descriptions n'ont pas été mises à jour). C'est également le cas pour les documents d'analyse du risque : ceux-ci peuvent ne pas avoir été communiqués par le constructeur. Il arrive également qu'aucune analyse du risque n'ait été réalisée dans l'entreprise dans laquelle la machine est exploitée ou que celle-ci ne soit plus adaptée à l'utilisation actuelle de la machine en question.

Si des documents (plans, fiches de poste, analyses du risque, ...) sont manquants, il faut alors augmenter le nombre d'observations sur la situation de travail réelle. Ces observations peuvent être contraignantes pour l'utilisateur de la machine (l'industriel) et donc être limitées en nombre et en durée. De cette limitation des observations de la situation de travail peut induire des observations non-objectives de celle-ci (par exemple, une fluctuation en fonction de l'opérateur).

3.5.2.2. *Utilisation du modèle de situation de travail*

Le modèle de situation de travail ainsi que sa méthode d'instanciation ont été conçus dans le but de modéliser une situation de travail existante sur des machines d'assemblage automatisées actuellement en utilisation.

Ce modèle pourrait servir en conception : la modélisation de la situation de travail dans son ensemble permet de prendre en compte, dès la conception ou lors de reconfiguration, les interactions Homme-machine-produits ainsi que les usages raisonnablement prévisibles pour ainsi prévoir les risques associés à ces derniers (Atain-Kouadio et al. 2013; Martin et al. 2017).

Ce modèle pourrait également être adapté à d'autres types de situation de travail, notamment sur machines.

3.5.2.3. *Instanciation du modèle*

Actuellement, l'instanciation du modèle est réalisée sur un logiciel de modélisation dans lequel le modèle est instancié manuellement par l'utilisateur de la méthode.

Pour faciliter la réalisation de la première étape de la méthode WSHM et la rendre plus accessible, il peut être proposé de développer un outil informatique ayant pour but de réaliser l'instanciation du modèle par le biais d'une interface « questionnaire ». L'utilisateur final de la méthode n'aura donc besoin que de répondre à des questions pour remplir le modèle, plutôt que de réaliser soit même l'instanciation du modèle sous la forme d'un diagramme de définition des blocks (BDD). L'utilisation de modélisations 3D de l'espace de travail pourrait également être envisagé pour une meilleure compréhension et représentation des zones d'interaction et de danger.

3.6. Conclusion

La première étape de la méthode WSHM propose de « Modéliser la situation de travail, vue comme un système ». Cette étape possède deux propositions originales :

- La proposition d'un modèle de référence (méta-modèle) servant de patron à la modélisation de situation de travail. Ce patron permet de modéliser chaque situation de travail suivant les mêmes concepts dont la caractérisation est nécessaire pour la suite de l'application de la méthode WSHM ;
- La proposition d'une méthode d'instanciation du modèle de situation de travail à l'aide de diagramme d'activité et de séquence. La méthode proposée permet de guider les utilisateurs dans la modélisation du système complexe qu'est une situation de travail et ainsi capitaliser correctement les informations nécessaires à la suite de la méthode WSHM.

Les informations capitalisées au cours de cette étape (structure et dynamique nominales de la situation de travail avec prise en compte des phénomènes dangereux) seront utilisées pour « Identifier les situations potentiellement dangereuses, générées par une réponse de l'opérateur suite à des dérives techniques, et leurs causes ». Cette identification des situations potentiellement dangereuses, dont on cherche à détecter les signes précurseurs de leur apparition, est présentée dans le prochain chapitre de ce manuscrit (chapitre 4). Les informations capitalisées seront également utilisées pour « Définir un indicateur d'état de santé de la situation de travail ». Cette définition d'indicateur, dont l'utilisation permettra la surveillance de l'apparition de situations potentiellement dangereuses, est présentée dans le chapitre 5 de ce manuscrit.

Chapitre 4 : Analyse des risques générés par une réponse de l'opérateur à des dérives techniques

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente la deuxième étape de la méthode WSHM « Identifier les situations potentiellement dangereuses, générées par une réponse de l'opérateur suite à des dérives techniques, et leurs causes ». Cette étape permet de capitaliser les informations concernant :

- Les dérives techniques (causes initiatrices) ;
- Les réponses potentielles d'un opérateur à ces dérives techniques ;
- Les situations potentiellement dangereuses associées à chaque réponse.

Ces informations capitalisées (situations potentiellement dangereuses et leurs causes) conditionnent la définition de l'indicateur d'état de santé de la situation de travail.

Ce chapitre débute par une présentation de la composition du groupe de travail ainsi que des ressources externes nécessaires à la réalisation de cette étape de la méthode. Ensuite, il présente les ressources internes à la méthode qui ont été développées au cours de ces travaux de thèse (relations de cause à effet entre les dérives techniques et les réponses potentielles de l'opérateur et tableau support). Enfin, ce chapitre se conclut par la synthèse des résultats obtenus en fin de cette étape, leur utilité dans la suite de la méthode WSHM mais également de potentielles perspectives d'utilisation des ressources / concepts développés ou des résultats obtenus au cours de cette étape.

4.2. Composition du groupe de travail et ressources externes nécessaires

Le groupe de travail est composé de plusieurs personnes apportant chacune, au moins, une des expertises suivantes :

- Machine : pour identifier les potentiels dysfonctionnements / dégradations des machines au sein de la situation de travail étudiée ;
- Risques machine : pour identifier les situations potentiellement dangereuses en cas de réponse de l'opérateur ;
- Ergonomie : pour identifier les situations potentiellement dangereuses liées à un problème ergonomique lors de la réponse.

Pour mener à bien sa mission, le groupe de travail utilise les informations présentes dans le modèle de situation de travail instancié à la situation de travail étudiée, et issu de la première étape de la méthode WSHM.

Pour l'analyse des dérives techniques (dérives produits ou machine), nous proposons une étude préalable des dérives techniques à l'aide de la méthode AMDEC-HazOp. Les méthodes AMDEC et HazOp étant courantes dans l'industrie, on considère que le groupe de travail est familier de ces méthodes. Pour identifier les situations potentiellement dangereuses suite à une réponse d'un opérateur à ces dérives techniques, nous proposons d'étudier les relations de cause à effet au sein de ce genre de scénario.

4.3. Relations de cause à effet entre situations potentiellement dangereuses et dérives techniques

Les travaux de Lamy & Perrin (Lamy and Perrin 2020) décrivent un scénario de dérive de situation de travail menant à une situation potentiellement dangereuse pour un opérateur de machine automatisée, suite à une dérive technique.

L'approche proposée dans la méthode WSHM consiste à étudier les dérives au sein de la situation de travail et leurs liens de cause à effet entre elles. Les dérives d'éléments peuvent faire dériver et/ou émerger des interactions physiques ou informationnelles entre les éléments techniques. Les dérives techniques peuvent être perçues par la dérive et/ou l'émergence d'interactions (physiques, informationnelles ou sensorielles) de ces éléments techniques (machines ou produits) vers un opérateur. Dans le cas où un opérateur répond à cette dérive technique perçue, cela peut engendrer une dérive et/ou une émergence d'interactions (physiques ou sensorielles) de l'opérateur vers l'élément technique. Enfin ces dérives et émergences d'interactions lors d'une réponse peuvent mener à une situation potentiellement dangereuse. La Figure 37 : synthétise ces liens de causalités entre les dérives et les situations dangereuses pouvant en résulter.

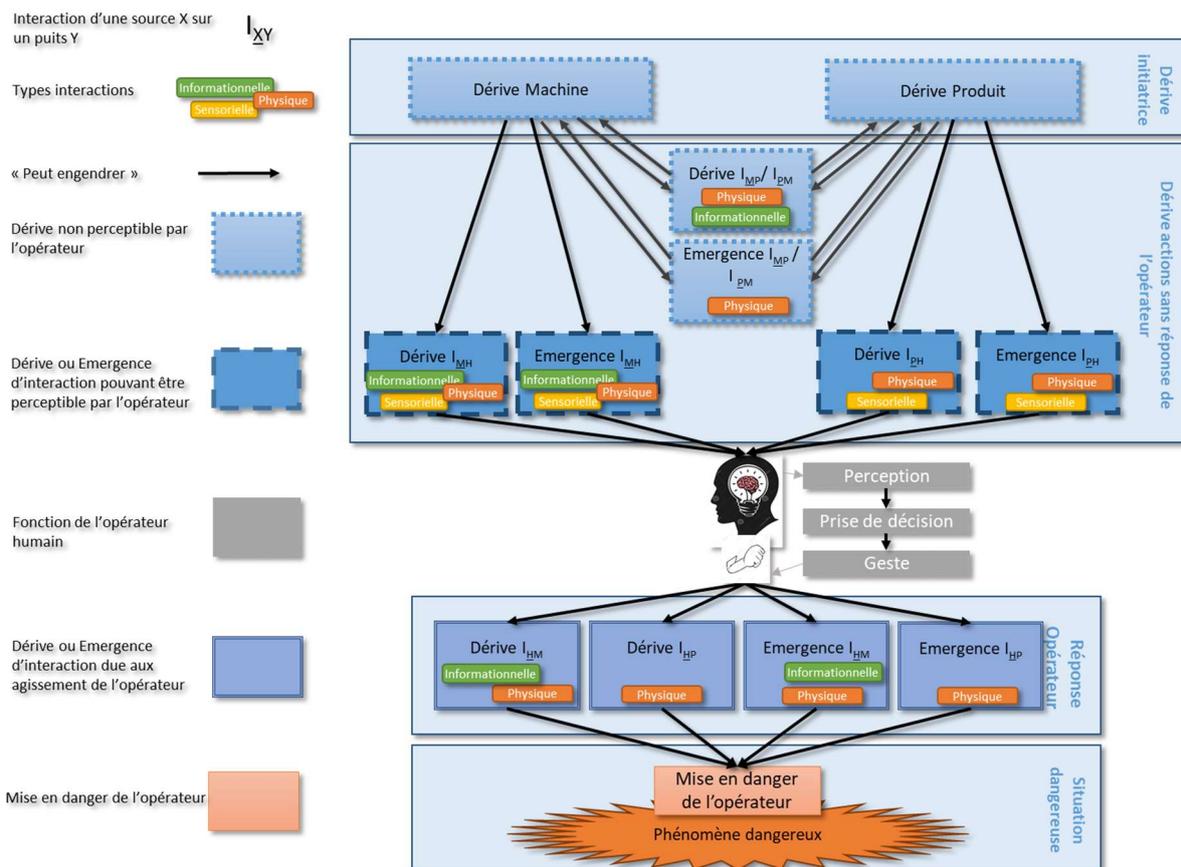


Figure 37 : Cause de l'apparition d'une situation potentiellement dangereuse suite à une dérive technique engendrant une action de l'opérateur

L'étude commence donc par l'analyse des causes premières : les dérives techniques, puis l'analyse des réponses potentielles d'un opérateur à ces dérives techniques et enfin

l'estimation des risques liés à chacune de ces réponses potentielles pour identifier les situations potentiellement dangereuses en résultant. Les mécanismes de prise de décision ne seront pas étudiés dans ces travaux car hors de leurs contextes (voir Hypothèse de travail n°2).

Dans la suite de cette section, nous exploitons la Figure 37 en partant des situations redoutées (les situations potentiellement dangereuses).

4.3.1. Situation potentiellement dangereuse (Mise en danger de l'opérateur)

Les situations potentiellement dangereuses sont déterminées en se basant sur les phénomènes dangereux (identifiés au cours de la première étape de la méthode WSHM, chapitre 3) avec lesquels l'opérateur pourrait entrer en contact dans une zone dangereuse. Ces contacts potentiels avec des phénomènes dangereux peuvent avoir lieu lors de la dérive ou l'émergence d'interactions Homme-machine et/ou Homme-produits (les interactions nominales/prévues étant sûres selon l'hypothèse de travail n°1).

Pour identifier ces situations dangereuses, il faut identifier les interactions Homme-machine et/ou Homme-produits qui apparaissent lors de la réponse d'un opérateur.

4.3.2. Dérives et émergences d'interactions Homme-machine et Homme-produits suite à la réponse de l'opérateur

Les dérives d'interactions suite à une réponse d'un opérateur à une dérive technique peuvent être de natures suivantes :

- Dérive d'interaction Homme vers machine (I_{HM}) : dérive des caractéristiques temporelles, spatiales et/ou de forme de l'interaction physique et/ou informationnelle d'un opérateur sur une machine.
 - o Exemples :
 - Dérive d'interaction physique : l'opérateur ouvre un protecteur mobile plus souvent que prévu. La fréquence de l'interaction I_{HM} augmente ;
 - Dérive d'interaction informationnelle : l'opérateur réalise un appui bouton poussoir plus tôt que prévu. La fréquence de l'interaction I_{HM} augmente.
- Dérive d'interaction Homme vers produit (I_{HP}) : dérive des caractéristiques temporelles, spatiales et/ou de forme de l'interaction physique d'un opérateur sur un produit.
 - o Exemples :
 - Dérive temporelle : l'opérateur extrait un produit plus tôt que prévu de la machine. La séquence de l'interaction I_{HP} dévie de la séquence nominale (attendue) ;
 - Dérive spatiale : l'opérateur prend des pièces en dehors de la zone prévue à cet effet. La zone d'interaction de l' I_{HP} dévie de ses dimensions nominales.

Les émergences d'interactions suite à une réponse d'un opérateur peuvent être de natures suivantes :

-
- Emergence d'interaction Homme vers machine (I_{HM}) : nouvelle interaction Homme-Machine dont la source est un opérateur. Celle-ci peut être physique et/ou informationnelle.
 - o *Exemples :*
 - *Emergence d'interaction physique : un opérateur applique une force pour aider l'ouverture d'un vérin de la machine car celui-ci bloque ;*
 - *Emergence d'interaction informationnelle : l'opérateur réalise un appui bouton arrêt d'urgence (la nature physique de l'interaction est secondaire).*
 - Emergence d'interaction Homme vers produit (I_{HP}) : nouvelle interaction Homme-Produit dont la source est un opérateur. Celle-ci peut uniquement être une interaction physique.
 - o *Exemple : l'opérateur extrait (pendant le processus) une pièce jugée défectueuse comme décrit dans (Lamy and Perrin 2018).*

Ces dérives et émergences d'interactions (I_{HM} ou I_{HP}) sont générées par l'opérateur dans sa ou ses réponses à des dérives techniques (machine et produits) perçues par le ou les opérateurs au cours de leur activité.

4.3.3. Dérives et émergences d'interactions Homme-machine et Homme-produits (avant réponses opérateurs)

Les dérives d'interactions Homme-machine et Homme-produits permettant à l'opérateur de percevoir une ou des dérives techniques (machine ou produits) peuvent être de natures suivantes :

- Dérive d'interaction machine vers Homme (I_{MH}) : déviation des caractéristiques temporelles, spatiales ou de forme de l'interaction physique, informationnelle et/ou sensorielle d'une machine vers un opérateur.
 - o *Exemple : un opérateur surveille le processus par le biais d'indicateurs affichés sur le panel de la machine (IHM), une dérive du flux de produits cause une modification de l'indicateur. La forme de l'interaction informationnelle I_{MH} dévie de sa forme nominale (attendue).*
- Dérive d'interaction produit vers Homme (I_{PH}) : déviation des caractéristiques temporelles, spatiales et/ou de forme de l'interaction physique ou sensorielle d'un produit vers un opérateur.
 - o *Exemple : un opérateur vérifie la qualité des produits en fin de ligne, une dérive de la machine induit une déformation de certains produits. La forme de l'interaction sensorielle I_{PH} dévie de sa forme nominale (attendue).*

Les émergences d'interactions Homme-machine et Homme-produits permettant à l'opérateur de percevoir une dérive technique peuvent être de natures suivantes :

- Emergence d'interaction machine vers Homme (I_{MH}) : nouvelle interaction Homme-machine dont la source est une machine. Celle-ci peut être physique, informationnelle et/ou sensorielle.

-
- *Exemple : un frottement au sein de la machine génère du bruit qui est perceptible par l'opérateur. Cette nouvelle interaction I_{MH} est sensorielle.*
 - Emergence d'interaction produit vers Homme (I_{PH}) : nouvelle interaction Homme-produit dont la source est un produit. Celle-ci peut être physique et/ou sensorielle.
 - *Exemple : un produit qui sort du circuit dans lequel il est censé se trouver peut être détecté par l'opérateur. Cette nouvelle interaction I_{PH} est sensorielle avec un échange d'information entre un produit et un opérateur. Ici seul l'opérateur peut percevoir la position du produit hors circuit.*

Il faut ensuite relier ces dérives et/ou émergences d'interactions aux dérives techniques potentielles au sein de la situation de travail.

4.3.4. Dérives techniques

Selon l'hypothèse de travail n°2, les causes initiales de la dérive d'une situation de travail vers une situation potentiellement dangereuse sont les dérives dites techniques :

- Dérives « machine » : dérive de l'« état de santé » d'une machine ou d'un de ces composants affectant ses capacités à remplir correctement sa fonction / mission.
- Dérives « produits » : dérive des caractéristiques du flux de produits ou des caractéristiques temps, espace, forme d'un produit.

Dans le contexte de ces travaux, on étudie des machines au sein de lignes d'assemblage automatisées. Cela signifie que la majorité des transformations « Temps, Espace et Forme » des produits sont réalisées par les machines au sein de la situation de travail étudiée. Lors de la dérive d'un de ces deux éléments (machine ou produits), cela peut affecter les interactions Machine-Produits :

- Dérive d'interaction machine vers produit (I_{MP}) : dérive des caractéristiques temporelles, spatiales et/ou de forme de l'interaction physique d'une machine sur un produit.
 - *Exemple : la tête d'usinage d'une machine est usée, cela peut provoquer un mauvais usinage des produits.*
- Dérive d'interaction produit vers machine (I_{PM}) : dérive des caractéristiques temporelles, spatiales et/ou de forme de l'interaction physique et/ou informationnelle d'un produit sur une machine.
 - *Exemple : une variation de la qualité d'un produit peut provoquer une usure prématurée des outils de la machine.*

Les dérives d'un de ces éléments peuvent également générer de nouvelles interactions Machine-Produits :

- Emergence d'interaction machine vers produit (I_{MP}) : nouvelle interaction machine-produit dont la source est une machine. Celle-ci peut uniquement être physique.
 - *Exemple : un échauffement de l'outil de la machine peut générer un échange thermique avec le produit.*
- Emergence d'interaction produit vers machine (I_{PM}) : nouvelle interaction machine-produit dont la source est un produit. Celle-ci peut être physique et/ou informationnelle.

-
- *Exemple : une pièce plus chaude que la normale peut générer un échange thermique avec la machine.*

Ces dérives et émergences d'interactions entre la machine et les produits peuvent générer de nouvelles dérives machine et/ou produits, mais également amplifier des dérives machine et/ou produits existantes (Kang and Ju 2019; Abichou 2013; Leger et al. 1999).

Ces dérives seront les premières étudiées au cours de cette étape (causes initiales selon l'hypothèse de travail n°2).

4.4. Ressource interne à la méthode WSHM – Tableau d'analyse

Pour supporter l'analyse de ces différentes dérives et l'estimation des risques associés, nous proposons de regrouper les résultats dans un tableau. Nous proposons également un modèle de tableau pour structurer l'analyse : le Tableau 4.

Chaque colonne de ce tableau a pour but de recueillir les informations qui résultent de l'analyse des dérives et permettent de regrouper les informations sur les causes de chaque situation potentiellement dangereuse identifiée au cours de cette étape de la méthode.

Le tableau débute par une colonne qui liste les différents acteurs. Cette colonne contient le nom des acteurs qui sont à analyser au cours de cette étape. Un acteur est, en fonction du point de vue actuel de l'analyse (« niveau » de l'analyse) :

- La situation de travail lorsque l'analyse est au niveau « Situation de travail en vue boîte noire » ;
- Une machine lorsque l'analyse est au niveau « Situation de travail en vue boîte blanche et machines en vue boîte noire » ;
- Un composant d'une machine lorsque l'analyse est au niveau « Situation de travail en vue boîte blanche et machines en vue boîte blanche ».

Chaque acteur réalisant une ou plusieurs activités, la colonne suivante liste ces activités. Les dérives de ces activités sont ensuite analysées au cours de la section suivante du tableau : « Analyse dérives techniques ».

Cette section est composée de sept colonnes :

- Modes de défaillance : cette colonne liste les modes de défaillance associés à chaque « Activité ». Ces modes de défaillance sont des « dérives machine » pour les acteurs « machines » et « composants ».
- Causes externes : cette colonne liste les causes externes de chaque mode de défaillance. Ces causes sont des dérives de flux de produits, d'informations et/ou d'énergies.
- Causes internes : cette colonne liste les causes internes de chaque mode de défaillance. Ces causes sont les modes de défaillance du composant de l'acteur étudié.
- Fréquence (F) : cette colonne liste l'indice de fréquence / occurrence de l'apparition de chaque mode de défaillance (voir chapitre 2 – section 2.3.2.3).

-
- Effets locaux sur produits : cette colonne liste les effets de chaque mode de défaillance d'activité sur les caractéristiques des produits et des flux de produits. Ces effets peuvent être des causes externes d'un mode de défaillance au même niveau / point de vue.
 - Effets au niveau supérieur sur acteur : cette colonne liste les effets de chaque mode de défaillance sur l'acteur de niveau supérieur. Cette colonne permet d'identifier les causes internes pour les acteurs au niveau supérieur (par exemple, un mode de défaillance « composant » étant une cause interne de mode de défaillance « machine »).
 - Effets au niveau supérieur sur produits : cette colonne liste les effets sur les caractéristiques des produits ou des flux de produits au niveau supérieur.

Après avoir listé les dérives techniques, la section suivante s'intéresse aux capacités de perception de l'opérateur (« Perception »). Cette section est composée de deux colonnes :

- Interactions dérivées ou émergentes M sur H ou P sur H : cette colonne liste les dérives de caractéristiques d'interactions existantes, et/ou les nouvelles interactions, permettant à l'opérateur de percevoir chaque dérive technique (mode de défaillance d'activité machine et/ou effets sur les caractéristiques de produits ou de flux de produits).
- Non-détection (ND) : cette colonne liste l'indice de non-détection pour chaque dérive technique en fonction de la dérive ou l'émergence d'interaction.

Après la section « Perception » vient la section « Réponse » où les réponses d'opérateur à une dérive technique perçue sont listées. Cette section est composée de trois colonnes :

- Interactions dérivées ou émergentes H sur M ou H sur P : cette colonne liste les dérives de caractéristiques d'interactions existantes, et/ou les nouvelles interactions, générées par une action d'un opérateur sur un produit ou sur une machine. Les interactions physiques dont la zone d'interaction se trouve dans une zone dangereuse peut indiquer le contact entre l'opérateur et un phénomène dangereux ;
- Phénomènes dangereux : cette colonne liste les phénomènes dangereux avec lesquels l'opérateur peut potentiellement entrer en contact ;
- Gravité du dommage (G) : dans le cas où il y a contact possible entre un opérateur et un phénomène dangereux, cette colonne liste les indices de gravité du dommage potentiel que l'opérateur pourrait subir.

Enfin le tableau se conclut par une colonne « Estimation des risques » (en cas de réponse dangereuse d'un opérateur à une dérive technique). Cette colonne liste la criticité de chaque réponse potentiellement dangereuse :

- Criticité (C) : pour chaque réponse ayant été désignée comme « dangereuse » (avec une estimation de sa gravité des dommages par un indice G), l'indice de criticité (C) est à calculer de la même manière que celle présentée dans l'AMDEC (voir chapitre 2 – section 2.3.2.3). Cette valeur de criticité est ensuite utilisée par le groupe de travail pour hiérarchiser les situations, avec réponse d'un opérateur suite à une dérive technique, en fonction de leurs potentielles dangers.

Acteurs	Activités	Dérives techniques							Perceptions			Réponses			
		Modes de défaillance	Causes internes	Causes externes	F	Effets locaux (/Produits)	Effets au niveau supérieur		Interactions dérivées ou émergentes M sur H ou P sur H	ND	Interactions dérivées ou émergentes H sur M ou H sur P	Phénomènes dangereux	G	C	
Situation de travail															
Machine															
...															
Composant															
...															

Tableau 4: Tableau utilisé au cours de l'identification des situations dangereuses

Ce tableau est à compléter au cours des différentes étapes d'analyse décrites dans la section suivante.

4.5. Déroulement de l'analyse

La deuxième étape de la méthode WSHM a pour but d'identifier les situations dangereuses générées par une réponse de l'opérateur à une dérive technique.

Cette étape se déroule en plusieurs phases : la première a pour but de déterminer les modes de défaillance des activités au sein de la situation de travail dans le but d'identifier les dérives techniques, leurs effets et leurs causes (sous-étapes R2.1 à R2.3). La deuxième phase a pour but de déterminer les dérives et/ou émergences d'interactions pouvant permettre à un opérateur de percevoir les dérives techniques (sous-étape R2.4). La troisième phase a pour but de déterminer les réponses de l'opérateur et les dérives et/ou émergences d'interactions suite à ces réponses. Enfin, il s'agit d'estimer les risques engendrés par chaque réponse potentielle de l'opérateur (sous-étapes R2.5 et R2.6).

Le déroulement de cette deuxième étape de la méthode WSHM, les sous-étapes la composant, les ressources nécessaires à la réalisation de chacune de ces sous-étapes, ainsi que les produits de chaque sous-étape sont présentés dans le diagramme d'activité de la Figure 38. Les résultats étant notés au fur et à mesure dans un tableau dont un modèle est présenté dans le Tableau 4.

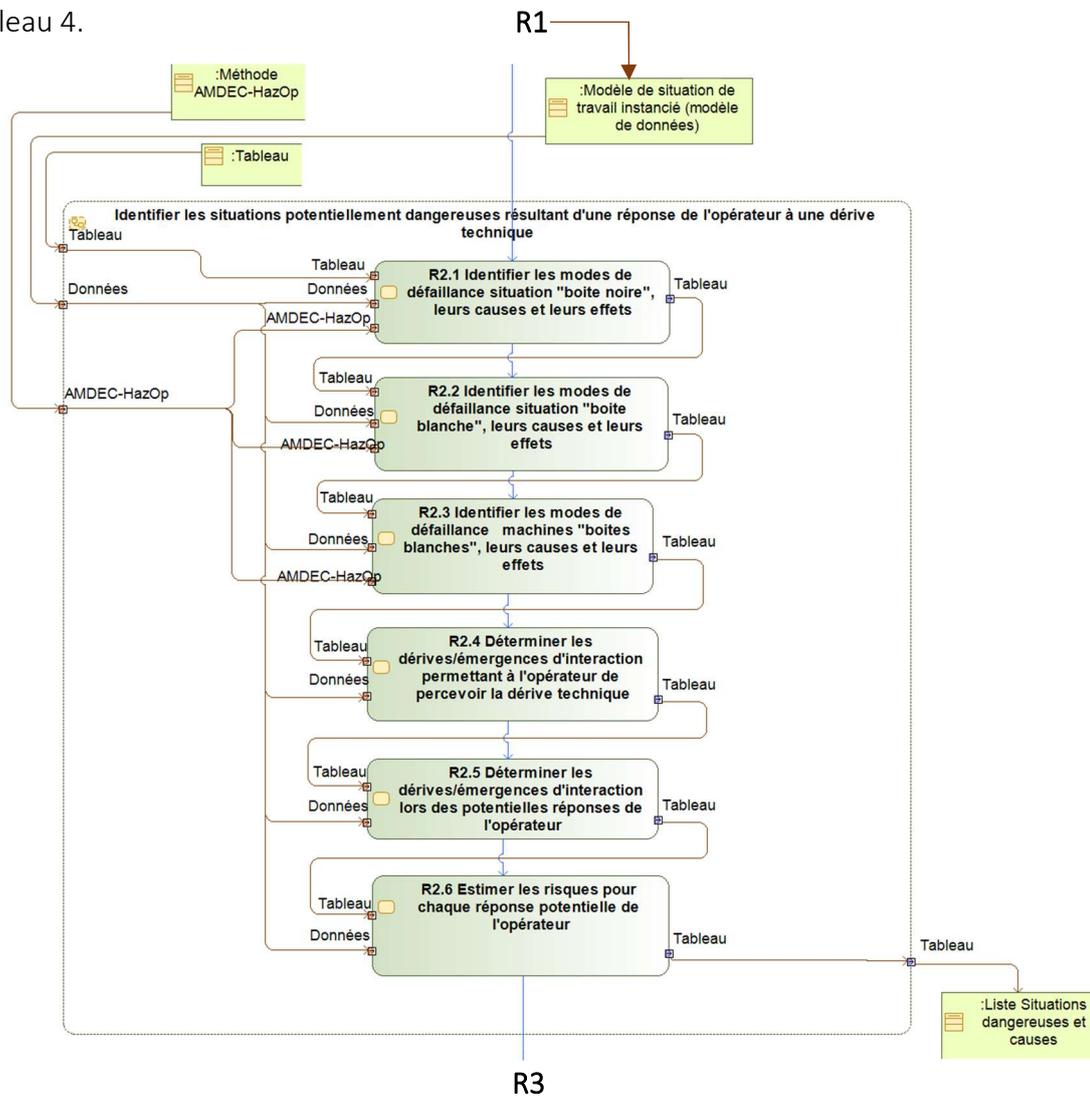


Figure 38: Diagramme d'activité du déroulement de l'application de la deuxième étape de la méthode WSHM (AD/SysML)

4.5.1. Identification des dérives techniques au sein de la situation de travail étudiée, leurs effets et leurs causes (R2.1 à R2.3)

Pour identifier les dérives techniques, nous proposons de réaliser une analyse AMDEC-HazOp sur les différentes activités réalisées au sein de la situation de travail. Nous proposons de réaliser cette analyse selon trois points de vue, en accord avec les points de vue développés dans la première étape de la méthode WSHM (chapitre 3) :

- Analyse AMDEC-HazOp des activités de la situation de travail en vue « boîte noire » réalisée au cours de la sous-étape R2.1. Les limites du système étudié sont illustrées dans la Figure 39. Cette analyse permet d'étudier les relations entre la situation de travail étudiée et son environnement.

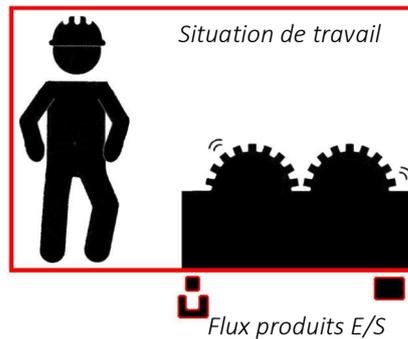


Figure 39: Situation de travail "boîte noire"

- Analyse AMDEC-HazOp des activités de la situation de travail en vue « boîte blanche », en gardant ses éléments (machines et travailleurs) en vue « boîte noire » réalisée au cours de la sous-étape R2.2. Les limites du système étudié sont illustrées dans la Figure 40. Cette analyse permet d'étudier les dérives des activités réalisées par les machines, ainsi que les causes et effets de celles-ci.

Travailleur/Opérateur

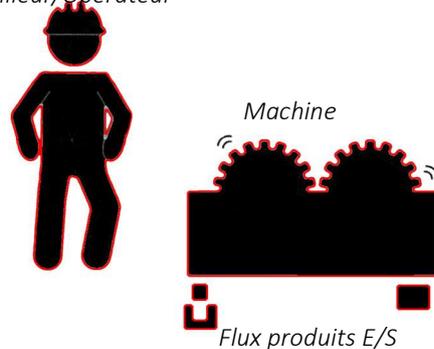


Figure 40: Situation de travail "boîte blanche" et machine "boîte noire"

- Analyse AMDEC-HazOp des activités de la situation de travail en vue « boîte blanche » avec chaque machine également en vue « boîte blanche » et les travailleurs en vue « boîtes noires » réalisée au cours de la sous-étape R2.3. Les limites du système étudié sont illustrées dans la Figure 41. Cette analyse permet d'étudier les dérives des activités réalisées par les composants de machine, ainsi que les causes et effets de celles-ci.

Travailleur/Opérateur

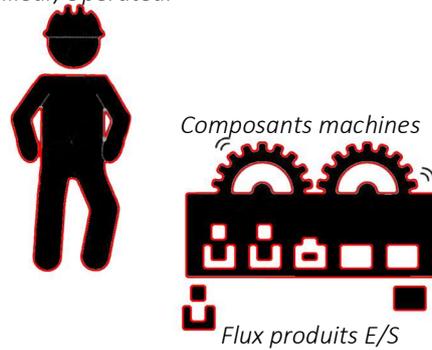


Figure 41: Situation de travail "boîte blanche" et machine "boîte blanche"

Le processus d'analyse AMDEC-HazOp des activités au cours de ces trois sous-étapes (R2.1, R2.2 et R2.3) est réalisé de la même manière à chaque point de vue étudié et selon les cinq sous-sous-étapes suivantes :

- **Recenser les activités réalisées par le ou les acteurs (R2.X.1)** : pour chaque acteur dans le point de vue étudié (situation de travail, machines au sein de la situation de travail ou composants de machine), le groupe de travail recense leurs activités associées.
- **Identifier les modes de défaillance de chacune de ces activités (R2.X.2)** : pour chaque activité recensée, le groupe de travail identifie les modes de défaillance de ces activités. Les modes de défaillance génériques sont à utiliser en se basant sur les types de mode de défaillance usuels présentés dans la méthode AMDEC adapté aux activités:
 - Défaillance en fonctionnement : l'activité s'arrête avant sa fin prévue ;
 - Démarrage impossible : l'activité ne démarre pas ;
 - Fonctionnement intempestif : l'activité démarre avant son début prévu ;
 - Arrêt impossible : l'activité ne se termine pas à sa fin prévue ;
 - Fonctionnement dégradé : l'activité se réalise de manière non-nominale.Les modes de défaillance identifiés sont à reporter dans la colonne « Modes de défaillance » du tableau d'analyse (Tableau 4).
- **Déterminer les causes externes de chaque mode de défaillance (R2.X.3)** : pour chaque mode de défaillance, le groupe de travail doit identifier les causes externes de celui-ci par analyse des dérives des flux entrants de l'activité. Cette analyse de dérive des flux entrants est réalisée à l'aide de la méthode HazOp. Les mots-clés utilisés couramment pour indiquer la dérive d'une caractéristique/propriété d'un flux sont les suivants :
 - Non ou pas de (no ou not) ;
 - Plus de (more) ;
 - Moins de (less) ;
 - En plus de (as well as) ;
 - En partie (part of) ;
 - Autre que (other than) ;
 - Inverse (reverse).

D'autres mots clés sont utilisés pour les déviations en termes de temps et de séquence :

-
- Plus tôt que (earlier than) ;
 - Plus tard que (later than) ;
 - Avant (before) ;
 - Après (later) ;
- (Royer 2009b, 2009a).

Les causes externes identifiées sont à reporter dans la colonne « Causes externes » du tableau d'analyse. Le groupe de travail doit également estimer l'indice d'occurrence du mode de défaillance (F) et reporter la valeur estimée dans le tableau d'analyse. Nous considérons que le groupe de travail utilise la grille d'estimation d'indice F avec laquelle il est familier.

- **Déterminer les effets locaux de ces modes de défaillance (R2.X.4)** : pour chaque mode de défaillance, le groupe de travail doit identifier les flux externes de l'activité qui dérivent suite à ces modes de défaillance. Cette analyse de dérive des flux sortants et des caractéristiques de produits est réalisée à l'aide de la méthode HazOp. Les effets locaux sur les flux de produits et les caractéristiques de produits sont à reporter dans le tableau dans la colonne « Effets locaux (/Produits) ».
- **Déterminer les effets de ces modes de défaillance au niveau hiérarchique supérieur (R2.X.5)** : pour chaque mode de défaillance, le groupe de travail doit identifier les effets sur les flux sortants de l'activité d'un point de vue hiérarchiquement supérieur ainsi que sur les acteurs de point de vue hiérarchique supérieur. Les effets sur les flux de produits et les caractéristiques de produits au niveau hiérarchique supérieur sont à reporter dans le tableau d'analyse dans la colonne « Effets au niveau supérieur (/Produits) » et les effets sur l'acteur de niveau hiérarchique supérieur sont à reporter dans la colonne « Effets au niveau supérieur (/Acteur) ». Cette étude de l'impact des défaillances d'un composant sur un composé permet d'identifier les causes internes de dérives de celui-ci. Ces causes internes de défaillance sont à reporter dans le tableau d'analyse, au niveau hiérarchique supérieur, dans la colonne « Causes internes ».

L'ensemble des sous-sous-étapes composants les sous-étapes R2.1, R2.2 et R2.3 sont présentées dans la Figure 42 et permettent d'identifier les différentes dérives techniques qui peuvent être perceptibles par un opérateur :

- Dérives « machine » : un mode de défaillance d'une activité réalisée par une machine / composant ou une cause interne de ce mode de défaillance ;
- Dérives « produits » : une dérive de caractéristiques temps ou forme d'un produit ou une dérive des caractéristiques d'un flux de produits.

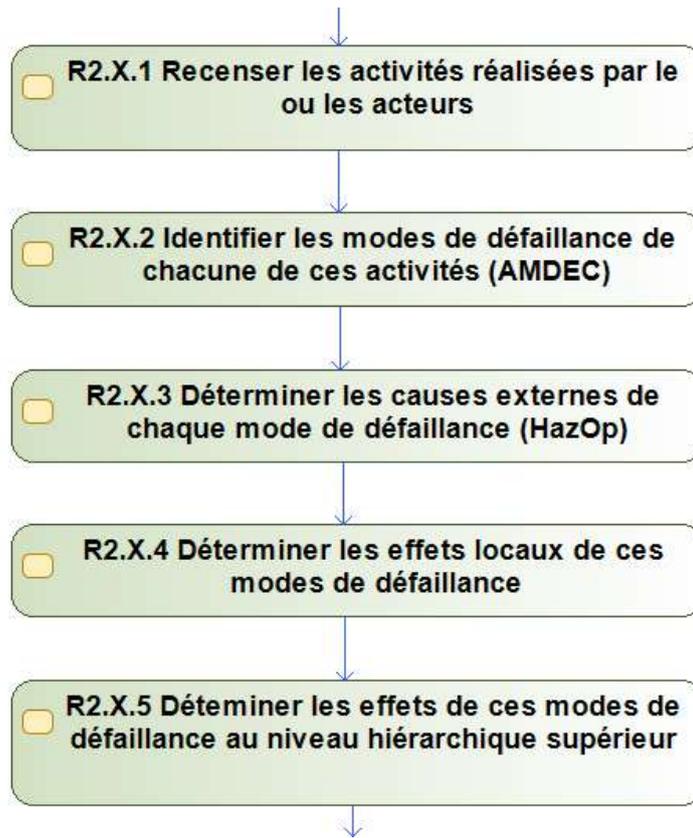


Figure 42: Diagramme d'activité des étapes R2.1, R2.2 et R2.3 (AD/SysML)

L'analyse de ces différents niveaux hiérarchiques, ainsi que des liens de cause à effet entre les modes de défaillances, leurs effets et leurs causes, sont illustrés dans la Figure 43.

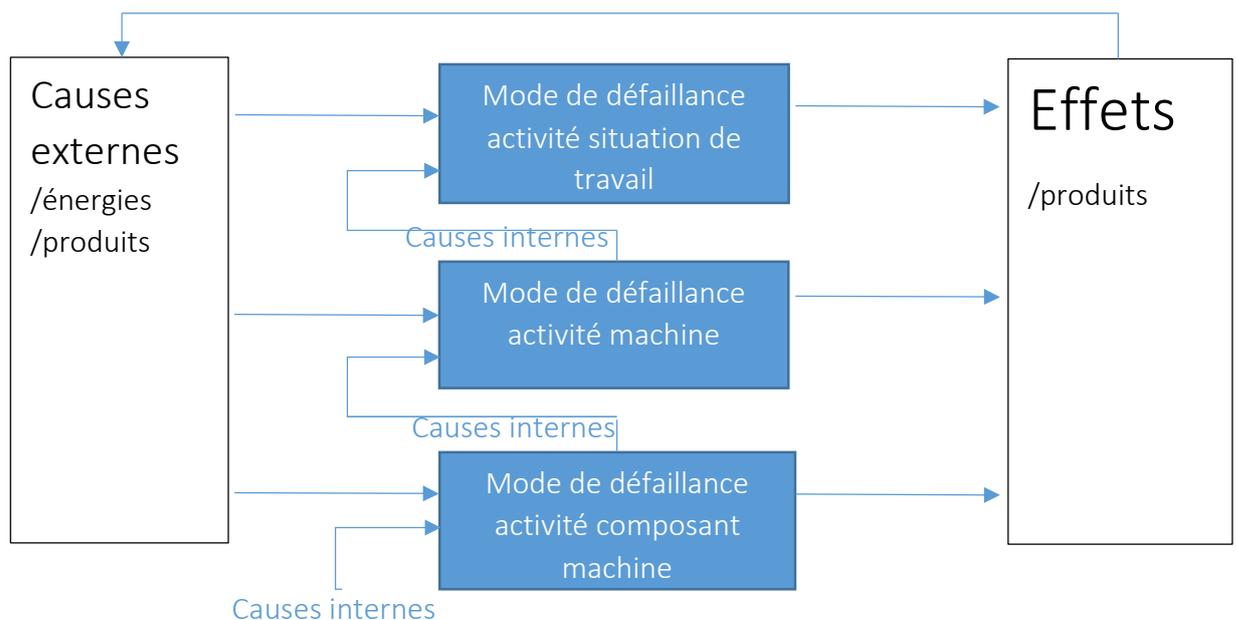


Figure 43: Causes, modes de défaillances et effets

Les différentes sous-étapes de la deuxième étape de la méthode WSHM, qui permettent la détermination des modes de défaillance d'activité au sein de la situation de travail, sont décrites dans les sous-sections suivantes :

4.5.1.1. *Identification des modes de défaillance situation « boîte noire », leurs causes et leurs effets (R2.1)*

Le groupe de travail réalise ces sous-sous-étapes en utilisant les informations extraites du modèle de situation de travail instanciée à la situation de travail étudiée :

- **Recenser les activités réalisées par le ou les acteurs (R2.1.1)** : ici l'activité à étudier est celle dont l'acteur est la situation de travail (voir block « Activité » dont l'attribut « Acteur » est la situation de travail). L'activité étudiée est l'activité de travail ;
- **Identifier les modes de défaillance de chacune de ces activités (R2.1.2)** : ici les potentiels modes de défaillance à identifier sont ceux associés à l'activité de travail ;
- **Déterminer les causes externes de chaque mode de défaillance (R2.1.3)** : ici les flux dont les dérives peuvent être les causes externes des modes de défaillance sont les flux entrants de l'activité de travail (voir l'attribut « FluxIn » du block « Activité » dont l'attribut « Acteur » est la situation de travail). Ces dérives peuvent être de trois natures :
 - Dérive des caractéristiques d'un produit (forme et position) ;
 - Exemple dérive forme produit : « moins de largeur produit » ;
 - Exemple dérive position produit : « autre que position produit » ;
 - Dérive d'un flux de produits (débit) ;
 - Exemple dérive de débit produits : « moins de débit produits » ;
 - Dérive d'un flux d'énergie en fonction de l'énergie (électrique : tension, intensité ; mécanique : force, ...) ;
 - Exemple dérive de flux d'énergie : « plus d'énergie électrique » ;
 - Dérive de l'environnement.
 - Exemple dérive de l'environnement physique : « plus d'humidité » ;
- **Déterminer les effets locaux de ces modes de défaillance (R2.1.4)** : ici les flux dont les dérives peuvent être les effets locaux des modes de défaillance sont les flux sortants de l'activité de travail (voir l'attribut « FluxOut » du block « Activité » dont l'attribut « Acteur » est la situation de travail). Ces dérives peuvent être de trois natures :
 - Dérive des caractéristiques d'un produit (forme et position) ;
 - Dérive d'un flux de produits (débit) ;
 - Dérive d'un flux d'énergie en fonction de l'énergie (électrique : tension, intensité ; mécanique : force, ...) ;
- **Déterminer les effets de ces modes de défaillance au niveau hiérarchique supérieur (R2.1.5)** : la situation de travail étant le point de vue avec le niveau hiérarchique le plus élevé, il n'y a pas d'effet au niveau supérieur mais le groupe de travail peut retranscrire les effets locaux sur les produits (flux et caractéristiques) dans la colonne « Effets au niveau supérieur /Produits ».

Exemple : la situation de travail a pour but de réaliser l'activité de travail « Assembler une pièce ». Un des modes de défaillance possible est que l'activité se réalise plus

lentement que prévu (fonctionnement dégradé). Cela peut être causé par une dérive du flux d'énergie en entrée (externe). Ce mode de défaillance ralenti le flux de produits qui est assemblé au cours de l'activité (moins de débit de produits). Les causes internes seront déterminées lors de l'étude des modes de défaillance des machines au sein de la situation de travail.

A la fin de cette étape, les modes de défaillance de l'activité réalisée par la situation de travail étudiée (l'activité de travail) sont identifiés ainsi que leurs causes externes et leurs effets. La sous-étape suivante (R2.2) étudie le niveau hiérarchique inférieur à celui qui vient d'être étudié : les « machines » au sein de la situation de travail étudiée et leurs activités.

4.5.1.2. *Identification des modes de défaillance de situation « boîte blanche », leurs causes et leurs effets (R2.2)*

Le groupe de travail réalise ces sous-sous-étapes en utilisant les informations extraites du modèle de situation de travail instanciée à la situation de travail étudiée :

- **Recenser les activités réalisées par le ou les acteurs (R2.2.1)** : ici les activités à étudier sont celles dont l'acteur est une machine (voir block « Activité » dont l'acteur est une machine) ;
- **Identifier les modes de défaillance de chacune de ces activités (R2.2.2)** : ici les potentiels modes de défaillance à identifier sont ceux associés aux machines ;
- **Déterminer les causes externes de chaque mode de défaillance (R2.2.3)** : ici les flux dont les dérives peuvent être les causes externes des modes de défaillance sont les flux entrants de l'activité réalisée par la machine (voir l'attribut « FluxIn » du block « Activité » dont l'acteur est une machine). Ces dérives peuvent être de trois natures :
 - Dérive des caractéristiques d'un produit en entrée (forme et position) ;
 - Dérive d'un flux de produits en entrée (débit) ;
 - Dérive d'un flux d'énergie en entrée (fonction de l'énergie).
 - *Exemple : électrique - tension, intensité ; mécanique - force, ... ;*
 - Dérive de l'environnement.
- **Déterminer les effets locaux de ces modes de défaillance (R2.2.4)** : ici les flux dont les dérives peuvent être les effets locaux des modes de défaillance sont les flux sortants de l'activité réalisée par la machine (voir l'attribut « FluxOut » du block « Activité » dont l'acteur est une machine). Ces dérives peuvent être de trois natures :
 - Dérive des caractéristiques d'un produit en sortie (forme et position) ;
 - Dérive d'un flux de produits en sortie (débit) ;
 - Dérive d'un flux d'énergie en sortie (fonction de l'énergie).
 - *Exemple : électrique - tension, intensité ; mécanique - force,*
- **Déterminer les effets de ces modes de défaillance au niveau hiérarchique supérieur (R2.2.5)** : ici les effets « /Acteurs » peuvent être des modes de défaillance de l'activité réalisée par la situation de travail. Si c'est le cas, il faut reporter le mode de défaillance « machine » en tant que cause interne du mode de défaillance « situation de travail ». Les effets globaux « /Produits » sont les effets locaux des modes de défaillance de niveau hiérarchique supérieur dont les effets locaux « /Produits » sont la cause.

A la fin de cette étape, les modes de défaillance des activités réalisées par les machines au sein de la situation de travail étudiée sont identifiés ainsi que leurs causes externes et effets. Les causes internes des modes de défaillance de l'activité de travail ont également été identifiés. La sous-étape suivante (R2.3) étudie le niveau hiérarchique inférieur à celui qui vient d'être étudié : les « composants » des machines au sein de la situation de travail étudiée et leurs activités.

4.5.1.3. *Identification des modes de défaillance machines « boîtes blanches », leurs causes et leurs effets (R2.3)*

Le but de cette sous-étape est de déterminer les modes de défaillance des activités réalisées par les composants de machine au sein de la situation de travail étudiée en vue « boîte blanche », ainsi que leurs effets et leurs causes. Les acteurs étudiés au cours de cette sous-étape sont les machines en vue « boîte blanche ».

Le groupe de travail doit réaliser ces sous-sous-étapes en utilisant les informations extraites du modèle de situation de travail instanciée à la situation de travail étudiée :

- **Recenser les activités réalisées par le ou les acteurs (R2.3.1)** : ici les activités à étudier sont celles dont l'acteur est un composant de machine (voir block « Activité » dont l'attribut « Acteur » est un composant de machine) ;
- **Identifier les modes de défaillance de chacune de ces activités (R2.3.2)** : ici les potentiels modes de défaillance à identifier sont ceux associés aux composants de machine ;
- **Déterminer les causes de chaque mode de défaillance (R2.3.3)** : ici les flux dont les dérives peuvent être les causes externes des modes de défaillance sont les flux entrants de l'activité réalisée par le composant de machine (voir l'attribut « FluxIn » du block « Activité » dont l'attribut « Acteur » est un composant de machine). Ces dérives peuvent être de trois natures :
 - o Dérive des caractéristiques d'un produit en entrée (forme et position) ;
 - o Dérive d'un flux de produits en entrée (débit) ;
 - o Dérive d'un flux d'énergie en entrée (fonction de l'énergie).
 - *Exemple : électrique - tension, intensité ; mécanique - force, ... ;*
 - o Dérive de l'environnement.

Les composants étant des éléments techniques simples, leurs causes internes de mode de défaillance doivent également être étudiées (par exemple, l'usure du composant) ;

- **Déterminer les effets locaux de ces modes de défaillance (R2.3.4)** : ici les flux dont les dérives peuvent être les effets locaux des modes de défaillance sont les flux sortants de l'activité réalisée par le composant de machine (voir l'attribut « FluxOut » du block « Activité » dont l'attribut « Acteur » est un composant de machine). Ces dérives peuvent être de trois natures :
 - o Dérive des caractéristiques d'un produit en sortie (forme et position) ;
 - o Dérive d'un flux de produits en sortie (débit) ;
 - o Dérive d'un flux d'énergie en sortie (fonction de l'énergie).
 - *Exemple : électrique - tension, intensité ; mécanique - force, ... ;*

-
- **Déterminer les effets de ces modes de défaillance au niveau hiérarchique supérieur (R2.3.5)** : ici les effets « /Acteurs » peuvent être des modes de défaillance de l'activité réalisée par une machine. Si c'est le cas, il faut reporter le mode de défaillance « composant » en tant que cause interne du mode de défaillance « machine ». Les effets globaux « /Produits » sont les effets locaux des modes de défaillance de niveau hiérarchique supérieur dont les effets locaux « /Produits » sont la cause.

A la fin de cette sous-étape, les modes de défaillance des activités réalisées par les composants de machines au sein de la situation de travail étudiée sont identifiés ainsi que leurs causes externes et effets. Les causes internes des modes de défaillance des activités réalisées par les machines (et leurs composants) ont également été identifiées.

Après avoir identifié les dérives techniques par AMDEC-HazOp et avoir estimé leur indice de fréquence d'occurrence (F), nous proposons d'étudier les réponses des opérateurs en prenant en compte la perception des dérives techniques identifiées au cours de cette phase (sous-étapes R2.1, R2.2 et R2.3).

4.5.2. Identification des réponses suite à des dérives techniques (R2.4 à R2.5)

Pour identifier les réponses d'un opérateur suite à une dérive technique, nous proposons au sein de la méthode WSHM de nous intéresser aux dérives et émergences d'interactions au sein de la situation de travail suite à ces dérives techniques. Ces dérives et émergences d'interactions peuvent, soit permettre à l'opérateur de percevoir une de ces dérives techniques, soit être la résultante d'une réponse d'un opérateur à une de ces dérives techniques.

Dans un premier temps, nous étudierons les dérives et émergences d'interaction qui permettent la perception d'une dérive technique.

4.5.2.1. Déterminer les dérives/émergences d'interaction permettant à l'opérateur de percevoir la dérive technique (R2.4)

Pour identifier les dérives d'interaction, le groupe de travail doit étudier l'impact des dérives techniques (effets locaux ou globaux) sur les interactions dont un des acteurs est un opérateur. Pour cela, les questions suivantes sont posées :

- Chaque dérive machine (mode de défaillance de l'activité supportée par une machine ou un composant) influence-t-elle les caractéristiques d'une ou plusieurs interactions de machine sur l'opérateur (interactions M vers H) ?
- Chaque dérive produits (effet d'une dérive machine sur un flux de produit) influence-t-elle les caractéristiques d'une ou plusieurs interactions de ce flux de produits sur l'opérateur ?

Les dérives de caractéristiques d'interaction sont à décrire en utilisant les mots clés HazOp pour décrire la nature de la déviation :

- Dérive de la position / forme d'une zone d'interaction ;
 - o *Exemple dérive forme de la zone d'interaction : « plus de largeur zone d'interaction », une interaction se déroule dans un volume plus grand que prévu.*

-
- *Exemple dérive position de la zone d'interaction : « autre position zone d'interaction », l'interaction se déroule à un endroit différent de ce qui est prévu.*
 - Dérive de la fréquence, durée, temps de début de l'interaction ;
 - *Exemple dérive fréquence d'interaction : « moins de fréquence d'interaction », l'interaction se déroule moins souvent que prévue.*
 - Dérive de la « forme » de l'interaction (dérive « variables »);
 - *Exemple dérive de forme d'une interaction informationnelle : « autre forme », la forme de l'interaction de la machine vers un opérateur n'est pas celle attendue.*

Exemple : une machine n'assemble pas correctement les pièces de la manière voulue. Un opérateur qui vérifie l'état des produits en sortie d'une machine peut percevoir la dérive de la forme des produits par le biais d'une dérive de l'information sensorielle Produit vers Homme générée lors d'une interaction Homme-Produit.

Pour identifier les émergences d'interaction, le groupe de travail doit se reposer sur son expertise. Pour chaque dérive technique, ils doivent rechercher si celle-ci peut générer de nouvelles interactions Produits-Homme ou Machine-Homme au sein de la situation de travail.

Exemple : une machine, nominale silencieuse, se met à faire du bruit suite à la vibration d'un de ces composants. Cela génère une nouvelle interaction dont l'information sensorielle « bruit » peut être perçue par un opérateur.

Ces dérives et émergences d'interactions sont à retranscrire dans le tableau dans la colonne « Interactions dérivées ou émergentes M sur H ou P sur H ».

En fonction des dérives et/ou des émergences d'interaction déterminées par le groupe de travail, ils doivent alors estimer l'indice de Non-Détection (ND) de la dérive technique ainsi perçue (ou non) par le biais de cette dérive / émergence (par exemple, plus la dérive d'interaction est importante, plus un opérateur la percevra facilement).

4.5.2.2. Déterminer les dérives/émergences d'interaction lors des potentielles réponses de l'opérateur (R2.5)

Pour chaque dérive d'interaction perceptible (dont le ND est jugé assez bas), le groupe de travail doit répondre par expertise à la question suivante : « comment l'opérateur répondrait-il à cette dérive technique en suivant au mieux le prescrit ou le prévu ? ». La réponse à cette question peut être une action de l'opérateur sur la machine ou un produit. Dans ce cas, le groupe de travail doit déterminer les dérives d'interactions, dont la source est un opérateur, ou les potentielles émergences d'interactions Homme-machine ou Homme-produits résultant de cette action. Les dérives et émergences d'interactions ainsi identifiées permettront par la suite d'estimer si la réponse est dangereuse ou non en comparant la zone d'interaction avec les zones dangereuses présentes dans l'espace de travail.

Exemple : un opérateur perçoit qu'un capteur ne détecte pas, ou mal, l'arrivée de palettes portant des produits. Cela génère une dégradation de l'activité de travail. Pour remédier à cela, à chaque fois qu'une palette se bloque devant le capteur, l'opérateur vient forcer sur le support du capteur pour le déplacer et que ce dernier détecte la palette. Ainsi l'activité reprend son cours.

Pour chaque réponse de l'opérateur, les caractéristiques d'une ou plusieurs interactions Homme-Machine ou Homme-Produits peuvent dériver :

- Dérive de la position / forme d'une zone d'interaction ;
- Dérive de la fréquence, durée, temps de début de l'interaction ;
 - o *Exemple dérive fréquence d'interaction : « moins de fréquence d'interaction », l'interaction se déroule moins souvent que prévu.*
- Dérive de la « forme » de l'interaction (dérive « variables ») ;
 - o *Exemple dérive interaction informationnelle : « autre message transmis lors de l'interaction informationnelle », le message transmis par la machine à un opérateur, par le biais d'un IHM, n'est pas celui attendu.*

Ces dérives et émergences d'interactions sont à retranscrire dans le tableau dans la colonne « Interactions dérivées ou émergentes H sur M ou H sur P ». Après avoir identifié ces réponses et les dérives / émergences d'interactions en résultant, il faut estimer la « dangerosité » de celles-ci.

4.5.3. Estimer les risques pour chaque réponse potentielle de l'opérateur (R2.6)

Pour chaque dérive et/ou émergence d'interaction Homme-machine ou Homme-produits induite par une réponse de l'opérateur à une dérive technique, le groupe de travail doit identifier si celle-ci peut être dangereuse pour l'opérateur et si oui, la gravité du dommage que l'opérateur pourrait subir en cas d'accident suite à l'apparition de cette situation dangereuse.

Cette sous-étape permet d'identifier les situations potentiellement dangereuses en cas de réponse de l'opérateur et d'estimer la gravité du dommage en cas d'accident au cours de cette situation dangereuse.

Cette identification est réalisée en se basant sur l'expérience des membres du groupe de travail ainsi que sur les dérives des caractéristiques d'interactions :

- Dérive de la position / forme d'une zone d'interaction : le déplacement d'une zone d'interaction peut placer l'opérateur dans une zone dangereuse ou alors placer ce dernier dans une posture dangereuse.
 - o *Exemple situation potentiellement dangereuse suite à une dérive de position de la zone d'interaction : un opérateur est obligé d'extraire des pièces bloquées dans la machine au lieu de les récupérer en sortie (dérive interaction Homme-Produits). En faisant cela, il peut entrer en contact avec des phénomènes dangereux (émergence d'une interaction Homme-machine dangereuse).*
- Dérive de la fréquence, durée, temps de début de l'interaction ;
 - o *Exemple situation potentiellement dangereuse suite à une dérive de la durée d'interaction : un opérateur déplace plus longtemps que prévu une pièce (dérive interaction physique Homme-produits). Ces efforts supplémentaires peuvent mener à l'apparition de troubles musculo-squelettiques.*

-
- Dérive de la « forme » de l'interaction (dérive « variables »);
 - o *Exemple situation potentiellement dangereuse suite à une dérive de forme d'interaction : l'opérateur doit appliquer une force supérieure à la normale pour déplacer une pièce plus lourde que prévue (dérive d'une interaction Homme-produits suite à une dérive de caractéristiques d'un produit).*

Les phénomènes dangereux avec lesquels l'opérateur peut entrer en contact en cas de dérives / émergences d'interaction sont à retranscrire dans le tableau dans la colonne « Phénomènes dangereux ».

Pour chaque situation potentiellement dangereuse ainsi identifiée, le groupe de travail doit estimer l'indice de Gravité (G) des dommages subit par l'opérateur en cas d'accident suite à sa réponse dangereuse. Après avoir estimé l'indice de Gravité, le groupe de travail peut alors calculer l'indice de Criticité (C) de chaque situation potentiellement dangereuse ainsi identifiée (Équation 2).

$$\text{Criticité} = F * ND * G$$

Équation 2: Calcul de la Criticité (AMDEC)

Le calcul de la criticité permet alors au groupe de sélectionner les situations potentiellement dangereuses les plus critiques, pour mettre en place des moyens de surveillance dans le but de prévenir leurs apparitions.

4.6. Discussions

A la fin de l'identification des situations potentiellement dangereuses et de leurs causes (dérives techniques et réponses de l'opérateur), le groupe de travail a généré les informations suivantes au sein d'un tableau sur le modèle du Tableau 4 :

- Les dérives techniques pouvant apparaître dans la situation de travail étudiée ;
- Pour chaque dérive technique : les dérives d'interactions ayant permis à l'opérateur de la percevoir ;
- Pour chaque dérive technique perçue : les réponses de l'opérateur ainsi que les dérives d'interactions induites;
- Pour chaque réponse de l'opérateur : les situations dangereuses identifiées suite à ces réponses de l'opérateur.

Les informations contenues dans ce tableau permettent de mettre en avant les liens de cause à effet entre les dérives techniques, leurs perceptions par un opérateur au sein de la situation, les potentielles réponses de celui-ci et les potentielles situations dangereuses qui peuvent résulter de ces réponses.

Cette deuxième étape de la méthode WSHM est la deuxième partie de l'analyse du risque réalisée au cours de la méthode WSHM. Les informations sur les situations potentiellement dangereuses et leurs causes sont par la suite utilisées dans le but de générer un indicateur d'état de santé de la situation de travail. Cet indicateur permettra de surveiller la dérive d'une situation de travail vers une situation potentiellement dangereuse pour l'opérateur.

4.6.1. Position de la deuxième étape de la méthode WSHM par rapport aux processus d'analyse du risque

La deuxième étape de la méthode WSHM est comparable à l' « Identification des phénomènes dangereux », lorsque le fonctionnement des machines est dégradé (5.4.b.2) ou lors des « usages raisonnablement prévisibles » en cas de dérive de la machine (5.4.3), et à l'« Estimation du risque » présenté dans la norme ISO12100 :2010 (ISO 2010). Cette « Identification des phénomènes dangereux », lors d'une réponse d'un opérateur à une dérive technique, est réalisée en utilisant les informations extraites du modèle de situation de travail instancié réalisé au cours de la première étape de la méthode WSHM.

L'analyse réalisée permet d'apporter de l'objectivité à l'analyse des « usages raisonnablement prévisibles » par la description des interactions au sein de la situation de travail. Cette description des dérives et des émergences d'interaction permet ainsi de préciser les moyens de perceptions et d'actions de l'opérateur sur les machines et/ou les produits, en cas de dérives techniques.

4.6.2. Discussions et perspectives

4.6.2.1. *Bilan coût / bénéfice : analyse des réponses d'un opérateur à une dérive technique*

La deuxième étape de la méthode WSHM permet d'identifier des situations potentiellement dangereuses spécifiques (réponses dangereuses d'un opérateur à une dérive technique). L'identification de ces situations étant complexe, l'analyse requiert beaucoup d'expertise sur les comportements de machine et d'opérateur en cas de dérive d'une situation de travail. Cela résulte en une application longue de cette étape.

Cette étape est réalisée en suivant un processus rigoureux (identification des dérives et/ou émergences d'interactions de perception / actions), la rendant plus objective que les méthodes actuelles de prise en compte de « facteur humain » (identification des usages raisonnablement prévisibles, ...), tout en conservant une part de subjectivité car ce sont des experts qui apportent leurs connaissances sur les comportements potentiellement prévisibles de l'opérateur.

L'application couplée de méthodes connues (AMDEC, HazOp, ...), et dont l'utilisation est courante dans l'industrie manufacturière, permet à un utilisateur familier des analyses du risque d'appliquer des connaissances et des compétences déjà maîtrisées.

4.6.2.2. *Proposition d'approche déductive / Approche inductive contre Approche déductive*

La méthode actuelle se base sur une approche inductive : identifier les dérives techniques pour identifier les réponses potentielles de l'opérateur.

En utilisant les retours d'expérience sur la situation de travail existante et les situations dangereuses connues, il est possible de réaliser une analyse, déductive cette fois, dans le but d'étudier les causes de ces situations potentiellement dangereuses connues.

Dans ce cas, la deuxième étape de la méthode WSHM se déroulerait de la manière suivante :

- Déterminer les réponses d'opérateur pouvant mener à chaque situation dangereuse connue ;
- Déterminer les dérives / émergences d'interactions pouvant mener à ses réponses (actions lors d'une réponse, perception de déviation, ...) ;
- Déterminer les causes techniques de ces dérives / émergences d'interactions pour ainsi identifier les causes techniques de chaque situation dangereuse connue ;

L'enchaînement de ces étapes est présenté dans la Figure 44.

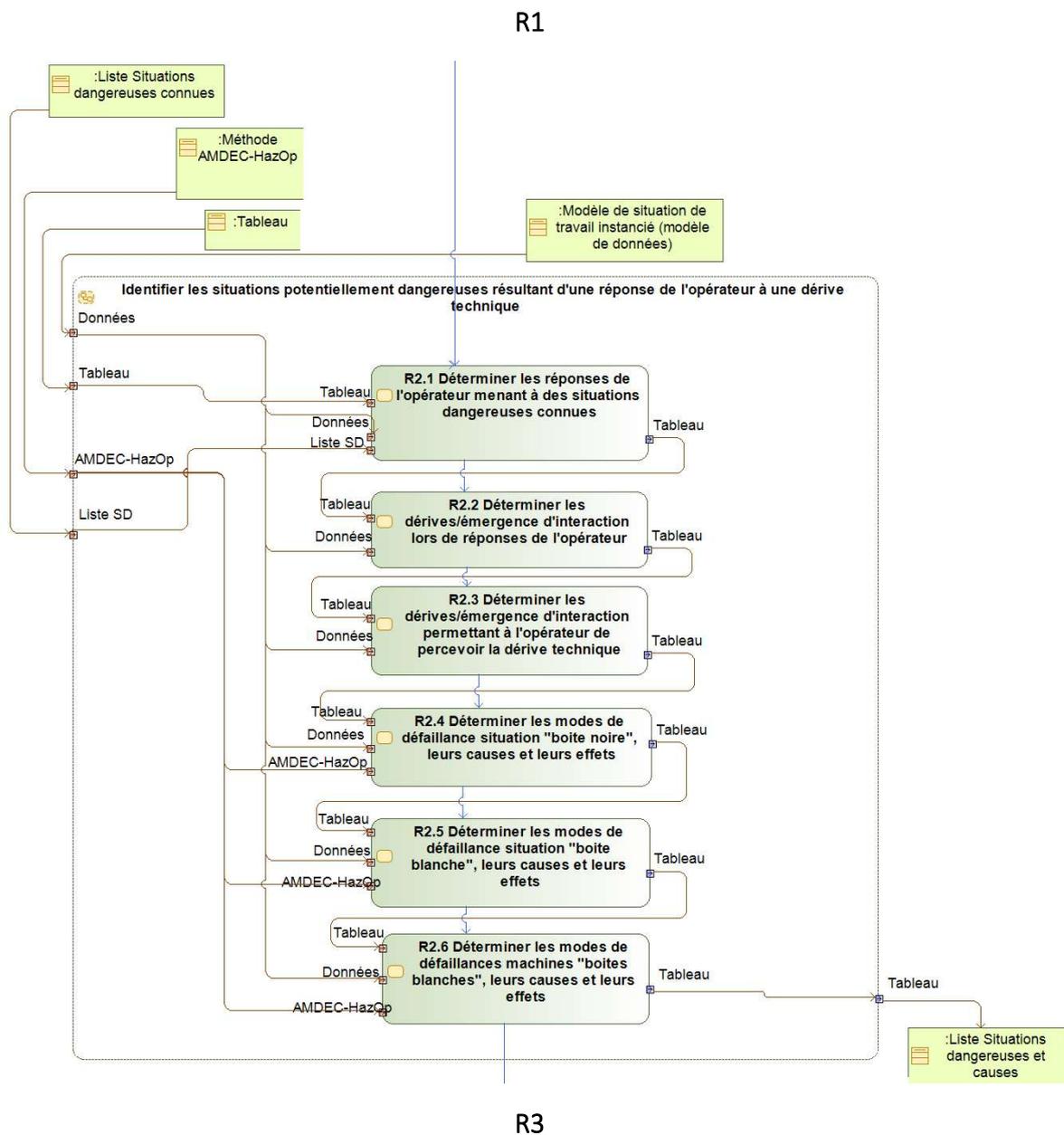


Figure 44: Déroulement de la deuxième étape de la méthode WSHM en version déductive (AD/SysML)

4.6.2.3. *Cas des non-réponses de l'opérateur à une dérive technique et des dérives en cascade*

Ces travaux se basent sur l'hypothèse que l'opérateur répond à une dérive technique et que c'est une réponse qui génère des situations potentiellement dangereuses. Dans un contexte plus proche de la réalité, il faudrait également prendre en compte :

- Les situations où l'opérateur ne perçoit pas la dérive technique et où la situation devient dangereuse pour l'opérateur sans réponse de sa part (exemple : évolution d'une zone dangereuse liée à une machine qui vient empiéter sur une zone d'interaction Homme-Machine nominale). Ces « comportements nominaux », pouvant mener à une situation potentiellement dangereuse, sont représentés dans la Figure 45 ;
- Les dérives techniques, qui s'aggravent après une réponse d'un opérateur, provoquant une aggravation croissante de l'état d'un élément requièrent de plus en plus de réponses de l'opérateur. Ces phénomènes de « réponses en cascade » sont représentés par les flèches remontant des « réponses opérateur » vers les « dérives techniques » dans la Figure 45.

4.7. Conclusion

La seconde étape de la méthode WSHM propose d' « Identifier les situations potentiellement dangereuses, générées par une réponse de l'opérateur suite à des dérives techniques, et leurs causes ». Cette étape possède deux propositions originales :

- Une méthode d'analyse des causes et des effets des réponses d'un opérateur suite à une dérive technique, par l'étude des dérives et des émergences d'interactions Homme-machine-produits ;
- Un tableau supportant cette analyse des interactions. Il permet également de supporter l'analyse des dérives techniques et l'estimation des risques des réponses.

Après avoir identifié les situations potentiellement dangereuses générées par un opérateur suite à une dérive technique, les informations capitalisées au cours de cette identification (situations potentiellement dangereuses et leurs causes) seront utilisées pour « Définir un indicateur d'état de santé de la situation de travail ». La construction de cet indicateur d'état de santé de la situation de travail est présentée dans le prochain chapitre de ce manuscrit (chapitre 5).

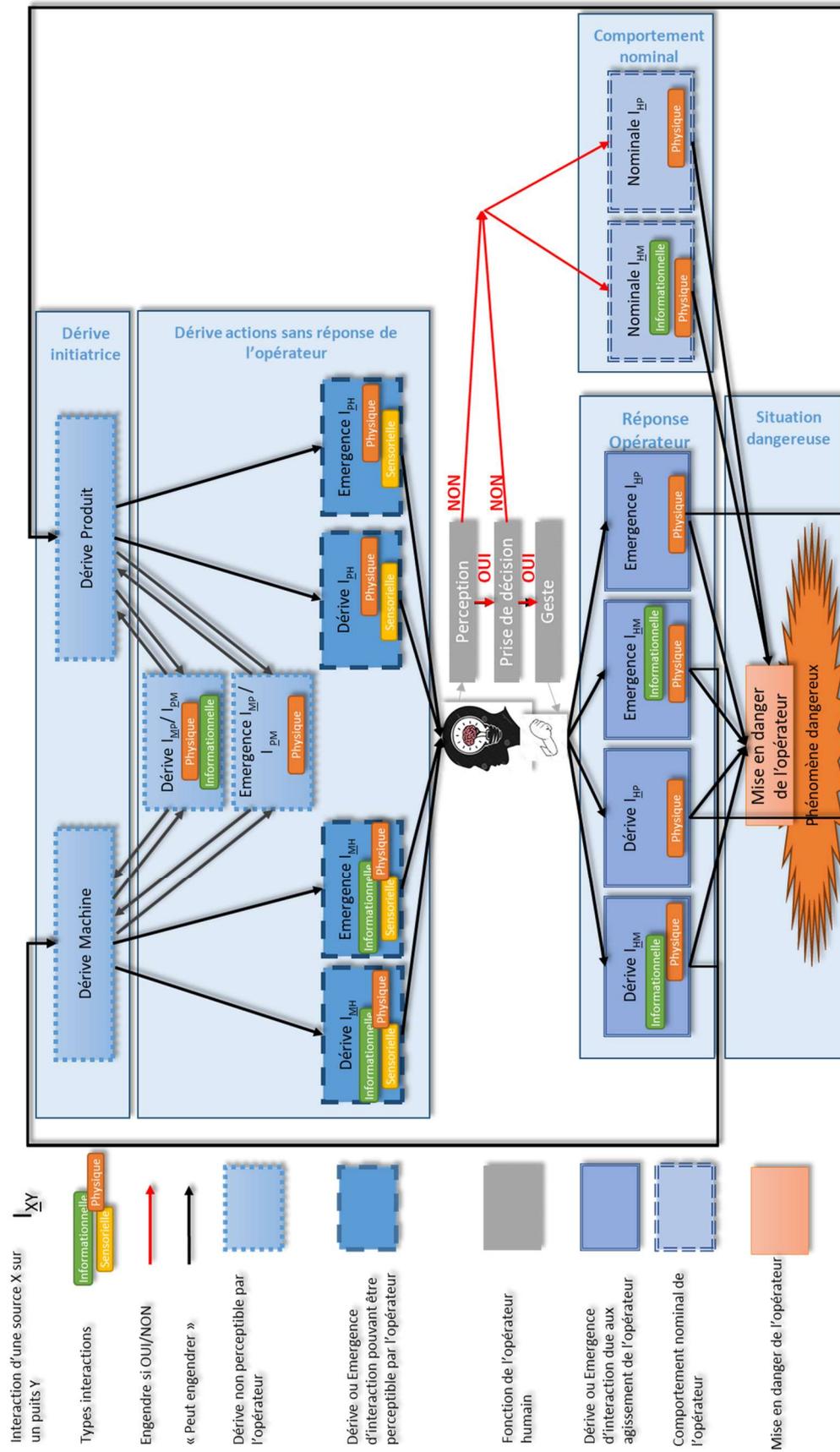


Figure 45 : Causalité des dérives au sein d'une situation de travail avec prise en compte des dérives en cascade, des dérives non perçues et des prises de décision de l'opérateur

Chapitre 5 : Définition d'un indicateur d'état de santé de la situation de travail

5.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la troisième étape de la méthode WSHM « Définir un indicateur d'état de santé de la situation de travail ». Cette étape permet de:

- Choisir les variables à surveiller ;
- Définir les indicateurs de déviation de ces variables ;
- Définir les indicateurs de dérive de ces variables ;
- Définir les indicateurs de situation potentiellement dangereuse à partir des indicateurs de dérives et les informations capitalisées au cours de l'étape précédente de la méthode WSHM ;
- Définir l'indicateur d'état de santé de la situation de travail à partir des indicateurs de situation potentiellement dangereuse qui permettra la surveillance de l'état de santé de la situation de travail.

Ce chapitre débute par une présentation de la composition du groupe de travail, ainsi que des ressources externes nécessaires à la réalisation de cette étape de la méthode WSHM. Il présente ensuite les ressources internes à la méthode WSHM qui ont été développées au cours de ces travaux de thèse (logique de construction des indicateurs et méthode de calcul). Puis, y sont présentées les différentes sous étapes de la troisième étape composant la méthode WSHM. Enfin, ce chapitre se conclut par la synthèse des résultats obtenus en fin d'application de la méthode WSHM, ainsi que de potentielles perspectives d'utilisation des ressources / concepts développés ou des résultats obtenus au cours de cette étape.

5.2. Composition du groupe de travail et ressources externes nécessaires

Le groupe de travail nécessaire à la réalisation de la troisième étape de la méthode WSHM est composé de plusieurs personnes qui auront pour but de définir un indicateur d'état de santé de la situation de travail, dans le but de prévenir les situations potentiellement dangereuses générées par des réponses d'un opérateur aux dérives techniques au sein de la situation de travail étudiée.

Le groupe de travail est composé d'un ou plusieurs experts « Machine » qui auront pour but de définir les indicateurs nécessaires à l'estimation de l'état de santé de la situation de travail à partir des données fournies par l'équipement de production.

Pour mener à bien sa mission, le groupe de travail utilise les informations présentes dans le tableau d'analyse complété, obtenues en sortie de la deuxième étape de la méthode WSHM, les informations contenues dans les documents techniques à disposition ainsi que d'une méthode de calcul d'indicateur basée sur la logique de calcul présentée dans la troisième étape de la méthode WSHM.

5.3. Ressources internes à la méthode WSHM

5.3.1. Indicateur d'état de santé de la situation de travail

Pour construire l'indicateur d'état de santé de la situation de travail, nous proposons dans la méthode WSHM de le baser sur la définition présentée dans le chapitre 2 de ce manuscrit :

Définition Indicateur d'état de santé de la situation de travail

Un indicateur d'état de santé de la situation de travail est une grandeur reflétant une caractéristique de la santé de la situation de travail (c'est-à-dire, la sécurité de l'opérateur au sein de la situation de travail). Il permet de quantifier l'écart par rapport à la situation de travail nominale. Un indicateur porte une information unique sur une partie limitée et particulière de la santé de la situation de travail.

Dans le cadre de ces travaux, l'indicateur d'état de santé de la situation sera dégradé par l'apparition de situations potentiellement dangereuses générées par une réponse de l'opérateur à une dérive technique au sein de la situation de travail. L'indicateur est nominal lorsqu'il n'y a aucun signe d'apparition de situations potentiellement dangereuses. L'apparition des signes précurseurs de situations potentiellement dangereuses est indiquée par les indicateurs de situation potentiellement dangereuse.

5.3.2. Indicateurs de situation potentiellement dangereuse

Les indicateurs de situation potentiellement dangereuse quantifient l'apparition des signes précurseurs menant à une situation dangereuse suite à une réponse de l'opérateur à une dérive technique. Plus il y a de signes précurseurs, plus l'indicateur proposé indique une situation potentiellement dangereuse possible.

Les signes d'apparition de chacune de ces situations potentiellement dangereuses ont été identifiés au cours de la deuxième étape de la méthode et sont décrits dans le tableau d'analyse complété (voir Tableau 5). Ces signes peuvent être :

- Une dérive d'activité : dérive des caractéristiques d'une activité ;
- Les causes internes d'une dérive d'activité : dérives de l'état de santé d'un composant de machine ;
- Les causes externes d'une dérive d'activité : dérives des caractéristiques de flux d'entrée d'un composant/machine (énergie et/ou produits) et des caractéristiques de produits en entrée d'un composant/machine ;
- Les effets d'une dérive d'activité sur les produits en sortie de cette activité : dérives locales de caractéristiques de flux de sortie (énergie et/ou produits) et des caractéristiques de produits en sortie d'un composant/machine (cet effet est perceptible par l'opérateur). Ces dérives locales peuvent avoir des effets indirects sur un composant/machine à un niveau d'analyse supérieur et/ou sur le flux de produits consommé par un composant aval.
- Les interactions dérivées et/ou émergentes suite à une réponse d'un opérateur : dérives de caractéristiques d'interactions Homme-Machine et Homme-Produits ainsi que les émergences d'interactions Homme-Machine et Homme-Produits résultant d'une réponse d'un opérateur à une dérive technique perçue ;

Acteurs	Activités	Dérives techniques						Perceptions		Réponses			C	
		Modes de défaillance	Causes internes	Causes externes	F	Effets locaux (Produits)	Effets au niveau supérieur		Interactions dérivées ou émergentes M sur H ou P sur H	ND	Interactions dérivées ou émergentes H sur M ou H sur P	Phénomènes dangereux		G
							(/Acteur)	(/Produits)						
Situation de travail														
Machine														
...														
Composant														
...														

Modes de défaillance des activités **Causes internes** **Causes externes** **Effets sur produits** **Réponses opérateur**

Tableau 5 : Signes à identifier à partir du tableau d'analyse complété au cours de la deuxième étape de la méthode WSHM

Pour obtenir les indicateurs de situation potentiellement dangereuse, nous proposons de surveiller chacune des dérives pouvant en être un signe précurseur d'apparition potentielle. Chacune de ces dérives sera surveillée par le biais d'un indicateur de dérive. On peut simplifier cette étape en se focalisant, si besoin, sur les dérives menant vers les situations potentiellement dangereuses les plus critiques identifiées par le groupe de travail. Il faut alors définir un seuil de criticité adapté.

5.3.3. Indicateur de dérive

Les indicateurs de dérive quantifient la déviation dans le temps d'une caractéristique d'un flux, d'un produit (entrant ou sortant), d'une activité ou d'une interaction par rapport à une valeur attendue. Pour quantifier la déviation dans le temps, nous proposons de construire l'indicateur de dérive en s'inspirant du principe des cartes de contrôle (par exemple, CUSUM (Williams, Parry, and Schlup 1992)). Cet indicateur de dérive permet de prendre en compte la tendance d'évolution d'une caractéristique, pour détecter aussi bien les signes faibles d'apparition de dérive que les signes d'apparition imminente (par exemple, les signes indiquant une réponse d'un opérateur).

La déviation d'une caractéristique, prise en compte dans le calcul de l'indicateur de dérive, est obtenue par le biais d'un indicateur de déviation. Chaque indicateur de dérive est basé sur un indicateur de déviation.

5.3.4. Indicateur de déviation

Les indicateurs de déviation quantifient la déviation d'une caractéristique d'un flux, d'un objet, d'une activité ou d'une interaction à un instant t (« plus de », « moins de » ou autre déviation quantitative). Pour traiter les déviations n'étant pas de nature quantitative, il faut les convertir en quantitative.

Exemple : une déviation de séquence « plutôt que » d'une activité engendre une déviation « plus de » quantitative de la fréquence de l'activité. Pour prendre en compte la déviation de séquence, il faudra surveiller la déviation quantitative de fréquence.

Pour rendre comparable les indicateurs de déviation les uns avec les autres, nous proposons de normaliser la déviation de la caractéristique par rapport à :

- Son intervalle de travail nominal : plage de valeurs nominales de la caractéristique ;
- Son intervalle de travail accepté : plage de valeurs de travail acceptées dans laquelle la caractéristique peut dériver sans dépasser un seuil d'utilisation (minimum ou maximum);

Exemple : un vérin pneumatique a une pression de travail nominale comprise entre 4,5 Bar et 5,5 Bar. La pression d'utilisation acceptée du vérin est comprise entre 1 et 10 Bar.

L'utilisation d'intervalles à la place d'un calcul utilisant la variance permet de s'affranchir de l'impact du nombre d'enregistrements avant la dérive et ainsi permettre de détecter les déviations aussi bien en début de processus qu'après une longue période de surveillance.

La normalisation du résultat permet, quant à elle, de s'affranchir de la plage d'amplitude de la variable et d'obtenir des résultats comparables, compris entre -1 et 1 et centrés sur 0.

5.3.5. Construction des indicateurs

La logique d'agrégation des différents indicateurs proposés au sein de la méthode WSHM pour obtenir un indicateur d'état de santé de la situation de travail est la suivante (Figure 46) :

- L'indicateur de santé de la situation de travail est construit à partir des indicateurs de situations potentiellement dangereuses ;
- Un indicateur de situation potentiellement dangereuse est construit à partir d'un ou plusieurs indicateurs de dérive ;
- Un indicateur de dérive est construit à partir d'un indicateur de déviation.

La méthode de définition de chacun de ces indicateurs, basée sur cette logique, est présentée dans la section suivante.

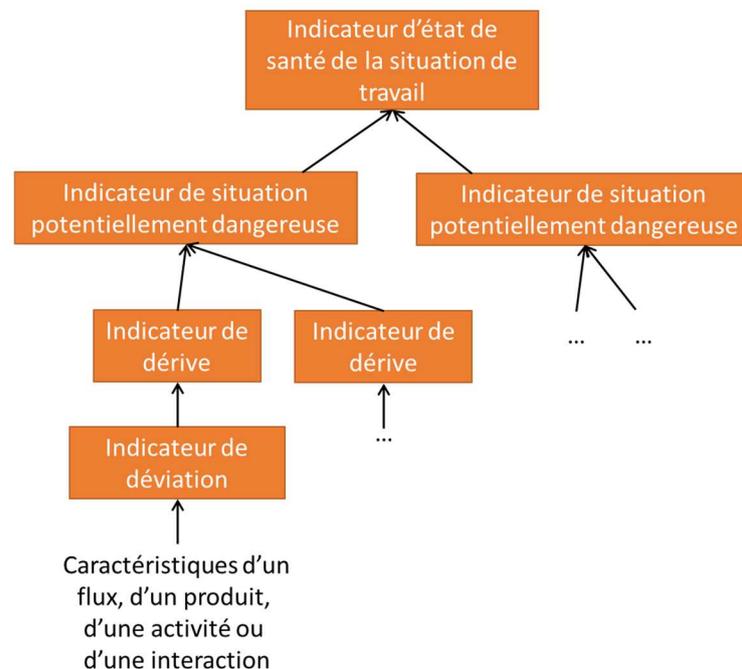


Figure 46 : Illustration de la logique de construction des indicateurs

5.4. Démarche de calcul de l'indicateur d'état de santé

Cette étape se déroule en deux phases : la première phase (R3.1) a pour but de déterminer les variables à surveiller par le biais d'indicateurs de déviation. Nous nous basons sur les résultats de l'identification des situations potentiellement dangereuses au sein de la situation de travail étudiée, réalisée lors de la deuxième étape. La seconde phase (R3.2 à R3.5) a pour but de définir les différents indicateurs permettant la construction de l'indicateur de santé de la situation de travail.

Le déroulement de cette troisième étape de la méthode WSHM, les sous-étapes la composant, les ressources nécessaires à la réalisation de chacune de ces sous-étapes, ainsi que les produits de chaque sous-étape sont présentés dans le diagramme d'activité Figure 47.

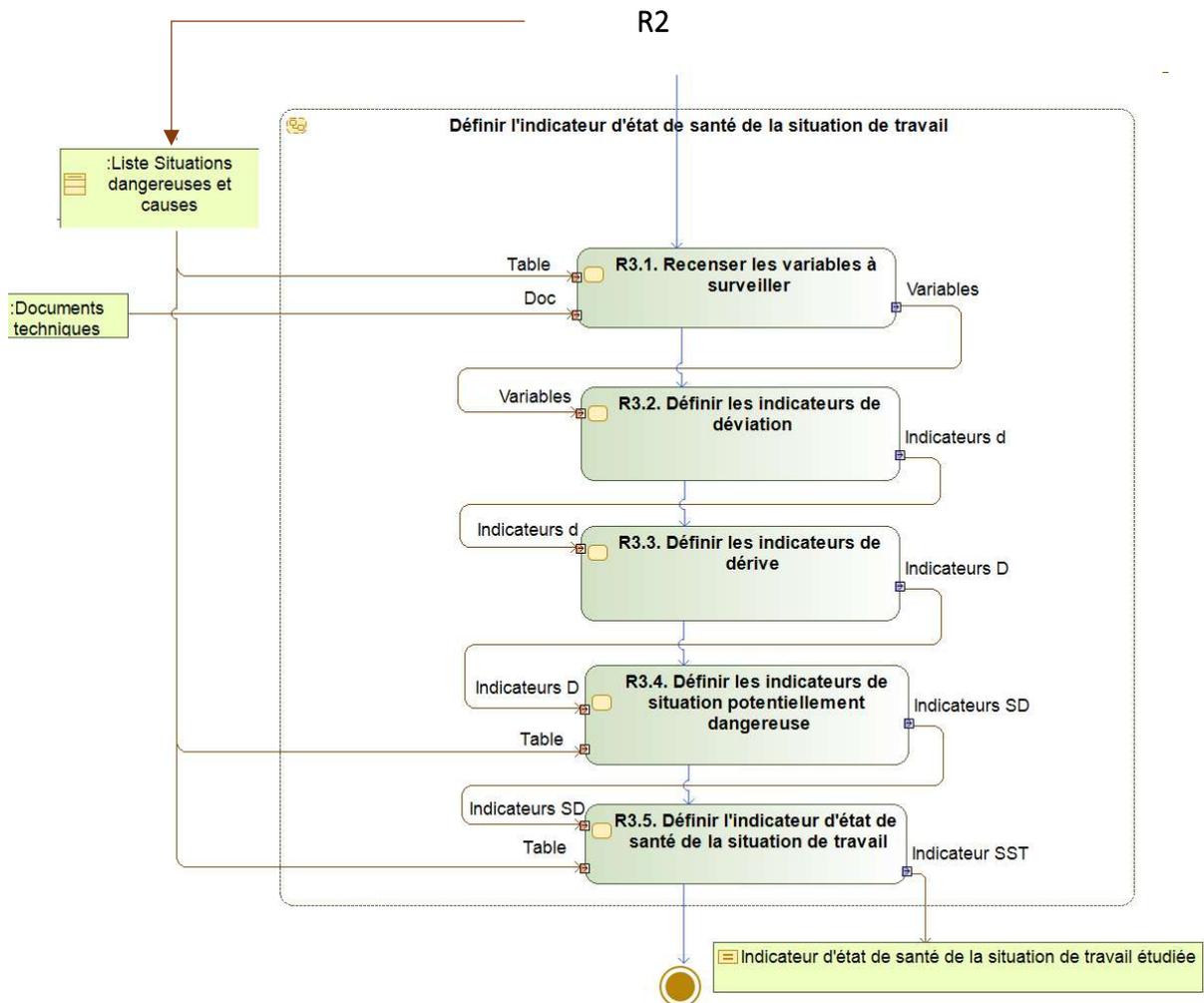


Figure 47 : Diagramme d'activité du déroulement de l'application de la troisième étape de la méthode WSHM (AD/SysML)

5.4.1. Calcul des indicateurs de déviation (R3.1 à R3.2)

5.4.1.1. Recensement des variables à surveiller (R3.1)

Pour chaque caractéristique identifiée comme étant la cause d'une situation potentiellement dangereuse au cours de la deuxième étape (« Modes de défaillance des activités », « Causes internes », « Causes externes », « Effets sur produits », « Réponses opérateurs » ; voir Tableau 5), il faut identifier la variable à surveiller, ainsi que les modalités de cette surveillance (mesure directe ou indirecte, fréquence d'acquisition, ...).

Cette variable est obtenue à partir des données fournies par l'équipement de production (données venant des capteurs, données de production, ...). Cette variable peut être une mesure directe ou indirecte de la caractéristique dont on souhaite surveiller la dérive.

Dans le cas où une mesure directe n'est pas possible, pas réalisable ou pas envisagée, il est possible de déduire la mesure de la caractéristique à partir d'une autre mesure qu'on sait liée à celle qu'on souhaite surveiller (« observateur »).

Exemple de variable indirecte : si le temps de sortie d'un vérin est proportionnel à l'état de santé de ce dernier, la variable obtenue, suite à la mesure de ce temps d'ouverture, est une mesure indirecte de l'état de santé de ce vérin.

Le Tableau 6 propose différents exemples de variables de mesures directes et indirectes qui peuvent être utilisées pour construire l'indicateur de déviation en fonction de la dérive qu'on cherche à surveiller.

Dans le cas où aucune variable ne permet de définir un indicateur de déviation direct ou indirect, il faut alors se poser la question de la mise en place d'un capteur pour mesurer une variable, si nécessaire.

La logique de choix des variables à utiliser pour surveiller une caractéristique peut être résumée par les questions suivantes :

- La caractéristique est-elle directement mesurable ? Si oui, utiliser une mesure directe. Si non, se poser la question suivante :
- La caractéristique est-elle mesurable indirectement ? Si oui, utiliser cette mesure indirecte. Si non, se poser la question suivante :
- La pose d'un capteur de mesure est-elle possible ? Si oui, poser un capteur pour mesurer directement ou indirectement la caractéristique. Si non, la mesure n'est pas réalisable et aucun indicateur de déviation ne peut être défini sur cette caractéristique.

Dans le cadre de la méthode WSHM, nous considérons qu'il est souhaitable d'avoir au moins un indicateur de déviation (direct ou indirect) sur au moins les dérives de flux de produits (ou de caractéristiques de produits ou au moins un indicateur de déviation sur les dérives d'interactions Homme-Machine et Homme-Produits au cours d'une réponse d'un opérateur. Sans ces indicateurs, anticiper et détecter l'apparition d'une réponse d'un opérateur à une dérive technique n'est pas faisable.

Dérive quantitative qu'on cherche à surveiller		Variables de mesure directe	Variable de mesure indirecte
Activité	Dérive des caractéristiques temporelles	Mesure de la durée, de la fréquence	Mesure du débit des produits en sortie de l'activité
Cause interne	Dérive de l'état de santé composant / machine	Etat de santé des composants au niveau d'analyse inférieur	Mesure de la durée ou de la fréquence d'une activité supportée par cette machine / composant
Cause externe	Dérive de caractéristique d'un flux d'énergie en entrée de l'activité	Mesure d'intensité du flux d'énergie en entrée de l'activité (ex. pression d'un flux d'énergie pneumatique en entrée de vérin)	Mesure de la durée ou de la fréquence de l'activité
	Dérive de caractéristique d'un flux de produit en entrée de l'activité	Mesure du débit de produit en entrée de l'activité	Mesure de la durée ou de la fréquence de l'activité
	Dérive de caractéristique d'un produit en entrée de l'activité	Mesure des caractéristiques de forme d'un produit en entrée de l'activité	Mesure de la durée ou de la fréquence de l'activité Mesure des caractéristiques de forme d'un produit en sortie de l'activité
Effet sur produits	Dérive de caractéristique d'un flux de produit en sortie de l'activité	Mesure du débit de produit en sortie de l'activité	Mesure du débit de produit en sortie de l'activité de niveau supérieur Etat de santé du composant supportant l'activité
	Dérive de caractéristique d'un produit en en sortie de l'activité	Mesure des caractéristiques de position et de forme d'un produit en sortie de l'activité	Mesure des caractéristiques de position et de forme d'un produit en sortie de l'activité de niveau supérieur Etat de santé du composant supportant l'activité
Dérive et/ou émergence d'interaction H sur M ou H sur P suite à une réponse d'un opérateur		/	Mesure de la position, de la forme et/ou du débit de produits ; Mesure de la durée, de la fréquence et période de l'activité au cours de laquelle cette interaction est réalisée ; Mesure de la durée, de la fréquence et de la période de réalisation de cette interaction. ¹²

Tableau 6 : Mesure sur lesquelles baser les indicateurs de déviation en fonction des dérives qu'on souhaite surveiller

¹² Contrairement aux interactions Machine-Produits dont les durées, périodes et fréquences peuvent être mesurées à l'aide des données des capteurs utilisés pour contrôler le processus, les interactions Homme-Machine et Homme-Produits sont mesurables en utilisant les données des capteurs utilisés pour la sécurité des opérateurs (exemple, capteur d'ouverture de porte d'accès) ou les données des interfaces Homme-Machine

5.4.1.2. Calcul des indicateurs de déviation (R3.2)

Pour chaque variable dont on souhaite étudier la déviation dans le temps, nous proposons, dans la méthode WSHM, de définir l'indicateur de déviation en utilisant la valeur courante de la variable, l'intervalle nominal de la variable, l'intervalle accepté de la variable ainsi que le mot clé de déviation quantitative associé à la dérive (mot clé HazOp « plus que », « moins de » ou autre indication de déviation quantitative). Il est à noter que si une mesure « indirecte » est utilisée pour définir l'indicateur de déviation, il faut adapter le mot clé de déviation pris en compte.

Exemple : si la déviation qu'on cherche à étudier est la diminution de la pression en entrée d'un vérin « Moins de pression en entrée de vérin » et que celle-ci résulte en une augmentation de la durée d'ouverture, l'observation indirecte de la diminution de la pression en entrée du vérin peut se faire par l'observation de l'augmentation de durée d'ouverture du même vérin. La déviation qu'on cherche donc à étudier devient « Plus de durée d'ouverture du vérin ».

La définition d'un indicateur de déviation a les propriétés suivantes :

- $X(t)$: valeur de la variable X à un instant t ;
- $d_x(t)$: indicateur de déviation de la variable X à un instant t ;
- $[X_- ; X_+]$: intervalle de travail nominal de la caractéristique mesurée par la variable X ;
- $[X_{m-} ; X_{m+}]$: intervalle de travail accepté de la caractéristique mesurée par la variable X . Si la variable X est hors de cet intervalle, celle-ci dépasse les seuils d'acceptabilité de la caractéristique.

Les intervalles (nominal et accepté) sont à définir en utilisant les informations à disposition dans les documents techniques.

Exemple : un vérin pneumatique a une pression de travail nominale comprise entre 4,5 Bar et 5,5 Bar. La pression d'utilisation acceptée du vérin est comprise entre 1 et 10 Bar.

Cet indicateur est défini de manière différente selon le mot clé de déviation quantitative associé à la déviation qu'on cherche à surveiller. Si le mot clé de déviation associé à la caractéristique surveillée par le biais de la variable X est « plus de » (exemple : Plus de pression en entrée du vérin), il faut s'intéresser uniquement aux déviations positives de la variable X . La définition de l'indicateur $d_x(t)$ est présentée dans le système d'Équation 3 :

- Si $X(t) \geq X_{m+}$ alors

$$d_x(t) = 1$$

- Si $X(t) \in]X_+ ; X_{m+}[$ alors

$$d_x(t) = \frac{X(t) - X_+}{X_{m+} - X_+}$$

Équation 3 : Calcul de l'indicateur de déviation $d_x(t)$ pour une déviation « plus de »

- Si $X(t) \leq X_+$ alors

$$d_x(t) = 0$$

La tendance de l'indicateur ainsi obtenu est illustrée en Figure 48.

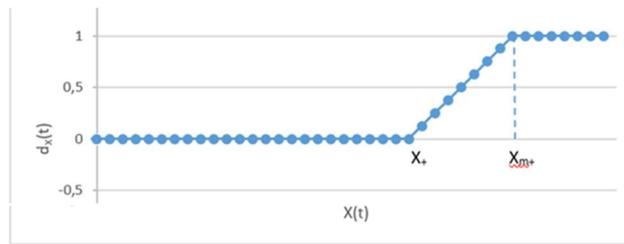


Figure 48 : indicateur de déviation $d_x(t)$ « plus de » d'une variable $X(t)$

Si le mot clé de déviation associé à la caractéristique surveillée par le biais de la variable X est « moins de » (exemple : Moins de pression en entrée du vérin), il faut s'intéresser uniquement aux déviations négatives de la variable X . La définition de l'indicateur $d_x(t)$ est présentée dans le système d'Équation 4.

- Si $X(t) \geq X_-$ alors

$$d_x(t) = 0$$

- Si $X(t) \in]X_{m-}; X_-[$ alors

$$d_x(t) = - \left| \frac{X_- - X(t)}{X_- - X_{m-}} \right|$$

Équation 4 : Calcul de l'indicateur de déviation $dx(t)$ pour une déviation « moins de »

- Si $X(t) \leq X_{m-}$ alors

$$d_x(t) = -1$$

La tendance de l'indicateur ainsi obtenu est illustrée en Figure 49.

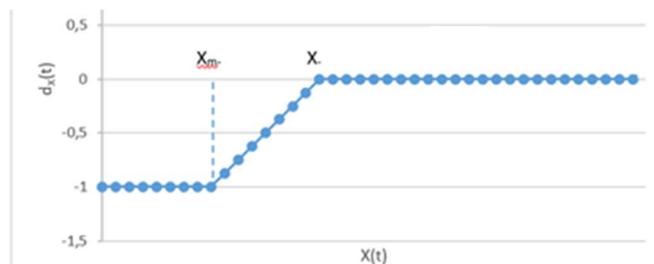


Figure 49 : indicateur de déviation $d_x(t)$ « moins de » d'une variable $X(t)$

Si le mot clé de déviation associé à la caractéristique surveillée par le biais de la variable X est un autre mot clé de déviation quantitative (exemple : Autre pression que celle attendue en entrée du vérin), il faut s'intéresser à toutes les déviations quantitatives possibles de la variable X (« plus de » et « moins de »). La définition de l'indicateur $d_x(t)$ est présentée dans le système d'Équation 5.

- Si $X(t) \geq X_{m+}$ alors $d_x(t) = 1$

- Si $X(t) \in]X_+; X_{m+}[$ alors: $d_x(t) = \frac{X(t) - X_+}{X_{m+} - X_+}$

- Si $X(t) \in [X_-; X_+]$ alors $d_x(t) = 0$

- Si $X(t) \in]X_{m-}; X_-[$ alors: $d_x(t) = - \left| \frac{X_- - X(t)}{X_- - X_{m-}} \right|$

- Si $X(t) \leq X_{m-}$ alors $d_x(t) = -1$

Équation 5 : Calcul de l'indicateur de déviation $dx(t)$ pour une déviation « autre »

La tendance de l'indicateur ainsi obtenu est illustrée en Figure 50.

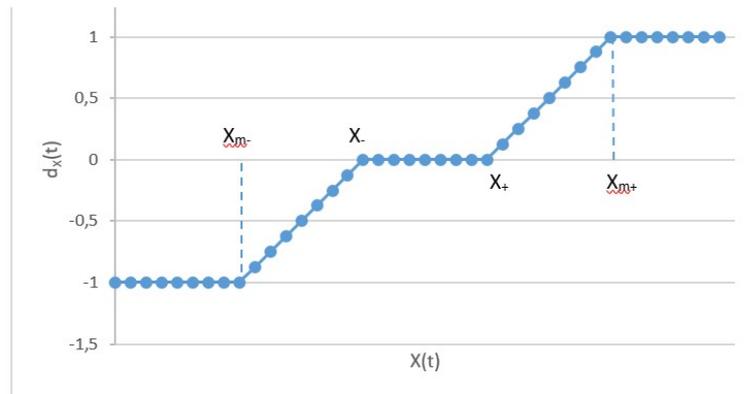


Figure 50 : indicateur de déviation $d_x(t)$ « autre » d'une variable $X(t)$

L'étude de l'évolution des indicateurs de dérives dans le temps permet d'étudier la dérive de la caractéristique associée à la variable surveillée.

5.4.2. Calcul des indicateurs de dérive (R3.3)

Chaque indicateur de dérive est construit comme une somme des valeurs de l'indicateur de déviation associé. Elle est nulle lors de l'initialisation de la surveillance. La définition d'un indicateur de dérive a donc les propriétés suivantes :

- $X(t)$: la variable à un instant t ;
- $d_x(t)$: indicateur de déviation de la variable X à un instant t ;
- $D_X(t)$: indicateur de dérive de la variable X à un instant t ;
- $D_X(t=0) = 0$: initialisation de la somme cumulée à $t = 0$.

Pour définir les valeurs de cet indicateur après son initialisation, celles-ci sont calculées en fonction de l'évolution de l'indicateur de déviation associé. Nous proposons la définition présentée dans le système d'Équation 6.

- Si $d_x(t) > d_x(t-1)$ alors

$$D_X(t) = D_X(t-1) + d_x(t)$$

- Si $d_x(t) = d_x(t-1)$ alors

$$D_X(t) = D_X(t-1)$$

- Si $d_x(t) < d_x(t-1)$ alors

$$D_X(t) = D_X(t-1) - d_x(t)$$

Équation 6 : Calcul de l'indicateur de dérive $D_X(t)$

Chaque indicateur de dérive $D_X(t)$ varie entre 0 et $+\infty$. Dans le cadre de la méthode WSHM, nous considérons qu'une dérive est avérée dès que $D_X(t) \geq 1$. La dérive d'une variable $X(t)$ est donc avérée lorsque :

- La variable $X(t)$ est hors de son intervalle accepté ($d_x(t) = 1$ ou -1) ;
- La variable $X(t)$ est hors de son intervalle de travail et évolue vers la limite supérieure de l'intervalle accepté ($d_x(t) > 0$ et évolue vers 1) au cours d'une durée suffisante pour que $D_X(t) \geq 1$;

-
- La variable $X(t)$ est hors de son intervalle de travail et évolue vers la limite inférieure de l'intervalle accepté ($dx(t) < 0$ et évolue vers -1) au cours d'une durée suffisante pour que $D_X(t) \geq 1$.

Les indicateurs de dérives ainsi obtenus permettent de quantifier l'apparition potentielle des dérives surveillées pouvant mener à une situation dangereuse suite à une réponse de l'opérateur à une dérive technique.

5.4.3. Calcul des indicateurs de situation potentiellement dangereuse (R3.4)

Chaque situation potentiellement dangereuse identifiée au cours de la deuxième étape de la méthode WSHM se voit attribuer un indicateur de situation potentiellement dangereuse qui est construit à l'aide d'un ou plusieurs indicateurs de dérives pouvant mener à cette situation potentiellement dangereuse :

- $SD_{\text{Danger}}(t)$: indicateur d'apparition potentielle de la situation potentiellement dangereuse *Danger* à un instant t .
- $D_{\text{Cause interne}}(t)$: indicateur de dérive d'une variable indiquant une cause interne de dérive d'activité à un instant t ;
 - Exemple : $D_{\text{Fréquence de sortie du vérin}}(t)$
- $D_{\text{Cause externe}}(t)$: indicateur de dérive d'une variable indiquant une cause externe de dérive d'activité à un instant t ;
 - Exemple : $D_{\text{Moins de pression en entrée du vérin}}(t)$
- $D_{\text{Effet sur produit}}(t)$: indicateur de dérive d'une variable indiquant un effet d'une dérive d'activité perceptible par un opérateur à un instant t ;
 - Exemple : $D_{\text{Moins de produit déplacé par l'ouverture du vérin}}(t)$
- $D_{\text{Réponse opérateur}}(t)$: indicateur de dérive d'une variable indiquant une réponse d'un opérateur à un instant t ;
 - Exemple : $D_{\text{Plus de fréquence d'ouverture de la porte menant au vérin}}(t)$

Les différents indicateurs de dérive utilisés pour construire l'indicateur de situation potentiellement dangereuse sont des signes précurseurs de l'apparition de cette situation. Plus il y a de signes précurseurs, plus la potentialité d'apparition est considérée comme « forte ». Pour créer une échelle des « potentialités d'apparition d'une situation potentiellement dangereuse », nous proposons de diviser ces dernières en 5 niveaux. Chaque niveau de « potentialité de danger » peut être décrit en fonction des signes précurseurs détectés (plus les signes précurseurs indiquent l'apparition d'une situation potentiellement dangereuse plus le niveau de potentialité est fort) :

- La situation présente une potentialité de danger « Très Faible » si aucun signe précurseur de dérive d'activité n'est détecté ;
- La situation présente une potentialité de danger « Faible » si au moins un signe d'apparition de cause de dérive d'activité est détecté (signal faible) ;
- La situation présente une potentialité de danger « Moyenne » si au moins une dérive d'activité est avérée ;
- La situation présente une potentialité de danger « Forte » si au moins une dérive d'activité est avérée et que ces effets commencent à être perceptibles (voire que

l'opérateur y répond). L'étude combinée des « causes » et des « effets » de la dérive d'activité permet de bien différencier chaque dérive d'activité et ainsi éviter les faux positifs ;

- La situation présente une potentialité de danger « Très Forte » si au moins une dérive d'activité est avérée et que la perception de ses effets est également avérée (voire que l'opérateur y répond).

En se basant sur les indicateurs de dérives, cela donne alors la définition suivante :

- Si tous les $D_{\text{Cause interne}}(t) = 0$ et tous les $D_{\text{Cause externe}}(t) = 0$ alors $SD_{\text{Danger}}(t)$ est « Très Faible ».
- Si [au moins un $D_{\text{Cause interne}}(t) > 0$ ET/OU au moins un $D_{\text{Cause externe}}(t) > 0$] alors $SD_{\text{Danger}}(t)$ est « Faible ».
- Si [au moins un $D_{\text{Cause interne}}(t) \geq 1$ ET/OU au moins un $D_{\text{Cause externe}}(t) \geq 1$] alors $SD_{\text{Danger}}(t)$ est « Moyenne ».
- Si [au moins un $D_{\text{Cause interne}}(t) \geq 1$ ET/OU au moins un $D_{\text{Cause externe}}(t) \geq 1$] ET [au moins un $D_{\text{Effet sur produit}}(t) > 0$ ET/OU $D_{\text{Réponse opérateur}}(t) > 0$] alors $SD_{\text{Danger}}(t)$ est « Forte ».
- Si [au moins un $D_{\text{Cause interne}}(t) \geq 1$ ET/OU au moins un $D_{\text{Cause externe}}(t) \geq 1$] ET [au moins un $D_{\text{Effet sur produit}}(t) \geq 1$ ET/OU au moins un $D_{\text{Réponse opérateur}}(t) \geq 1$] alors $SD_{\text{Danger}}(t)$ est « Très Forte ».

Comme indiqué dans la section 5.4.1.1 : dans certains cas, des indicateurs de dérives peuvent ne pas être disponibles, dans ce cas il faut adapter le calcul en ne calculant que les lignes concernées.

Ces indicateurs de situation potentiellement dangereuse servent par la suite au calcul de l'indicateur d'état de santé de la situation de travail étudiée.

5.4.4. Calcul de l'indicateur d'état de santé de la situation de travail (R3.5)

L'indicateur d'état de santé de la situation de travail proposé au sein de la méthode WSHM est défini de la manière suivante :

Définition Indicateur d'état de santé de la situation de travail

Un indicateur d'état de santé de la situation de travail est une grandeur reflétant une caractéristique de la santé de la situation de travail (c'est-à-dire, la sécurité de l'opérateur au sein de la situation de travail). Il permet de quantifier l'écart par rapport à la situation de travail nominale. Un indicateur porte une information unique sur une partie limitée et particulière de la santé de la situation de travail.

Nous proposons de baser cet indicateur sur l'indicateur de situation potentiellement dangereuse (SD) dont la valeur de « potentialité » est la plus élevée :

- $SST(t)$: indicateur d'état de santé de la situation de travail étudiée à un moment t ;
- $SD_{\text{MAX}}(t)$: indicateur de situation dangereuse dont la valeur de « potentialité » est la plus élevée ;

L'indicateur d'état de santé de la situation de travail est donc défini de la manière suivante :

- Si $SD_{\text{MAX}}(t)$ est « Très Faible », $SST(t)$ est « Nominal » ;

-
- Si $SD_{MAX}(t)$ est « Faible », $SST(t)$ est « Bon » ;
 - Si $SD_{MAX}(t)$ est « Moyenne », $SST(t)$ est « Assez Bon » ;
 - Si $SD_{MAX}(t)$ est « Forte », $SST(t)$ est « Mauvais » ;
 - Si $SD_{MAX}(t)$ est « Très Forte », $SST(t)$ est « Très Mauvais » ;

5.5. Discussions

A la conclusion de cette étape, un indicateur d'état de santé de la situation de travail est défini et peut être calculé en continu et automatiquement par un système de surveillance en utilisant les variables identifiées au cours de cette étape. Les décisions prises à l'aide de cet indicateur sont, à l'heure actuelle, laissées à la liberté de l'utilisateur (voir la section « Discussions et perspectives » de ce chapitre).

5.5.1. Position de la troisième étape de la méthode WSHM par rapport à la surveillance des systèmes de production industriels et le Health Monitoring/Management

En Health Monitoring et en Health Management, les indicateurs de santé sont le plus souvent des indicateurs dont le but est de représenter l'état de santé d'un système technique, d'une machine ou d'un composant de machine. Ces indicateurs d'état de santé permettent la mise en place de stratégies de maintenance et d'aide à la conduite qui ont un effet indirect¹³ sur la sécurité des opérateurs.

Dans la méthode WSHM, nous proposons de surveiller la situation de travail dans son ensemble et ainsi obtenir un indicateur d'état de santé de la situation de travail. Cet état de santé se dégradant au fur et à mesure que la situation de travail étudiée dérive vers une situation dangereuse générée par une réponse de l'opérateur à une dérive technique. Cet indicateur peut donc être utilisé directement pour prévenir les accidents du travail liés à ces situations dangereuses.

5.5.2. Discussions et perspectives

5.5.2.1. *Bilan coût bénéfice : Utilisation de l'indicateur d'état de santé en Health Monitoring et Health Management*

L'utilisation d'un indicateur prenant en compte la situation de travail dans son ensemble peut permettre de surveiller les différents éléments au sein de la situation de travail, mais également les interactions entre ces éléments. Ces interactions sont, à l'heure actuelle, peu surveillées or celles-ci sont essentielles pour prendre en compte l'humain au sein des situations de travail et notamment sa sécurité.

5.5.2.2. *Paramètres de calcul de l'indicateur d'état de santé de la situation de travail*

Le calcul de l'indicateur de l'état de santé de la situation de travail prend actuellement uniquement en compte la potentialité d'apparition de situations potentiellement dangereuses.

Ce calcul pourrait être approfondi en prenant en compte d'autres variables telles que la durée de la dérive ou la criticité de la situation potentiellement dangereuse pour ainsi limiter les faux négatifs et les faux positifs.

¹³ Une machine en bon état de fonctionnement étant moins dangereuse qu'une machine en mauvais état (Wybo 2010).

5.5.2.3. *Prise en compte des autres situations potentiellement dangereuses*

Le calcul de l'indicateur de l'état de santé de la situation de travail prend, actuellement, en compte uniquement les situations potentiellement dangereuses suite à une réponse d'un opérateur.

Le calcul de cet indicateur pourrait également prendre en compte d'autres situations potentiellement dangereuses (cf Chapitre 4 section 4.6.2.3 « Cas des non-réponses de l'opérateur à une dérive technique et des dérives en cascade ») car, actuellement, le calcul ne prend en compte qu'un nombre limité de situations potentiellement dangereuses (réponse d'un opérateur à une dérive technique).

5.5.2.4. *Utilisation en ligne potentielle de l'indicateur d'état de santé de la situation de travail pour la sécurité des opérateurs*

Cet indicateur peut aider à mettre en place des moyens de prévention pour améliorer la sécurité des opérateurs de machines. Ces moyens pourraient être :

- Mise en place de stratégies de maintenance conditionnelle et/ou prévisionnelle des machines en fonction de l'état de santé de la situation de travail ;
- En cas de dérive de la situation de travail, alerte prévenant l'opérateur de future complication sur sa machine pour que celui-ci puisse s'adapter ;
- Alarme prévenant l'opérateur d'une situation dangereuse à forte potentialité d'apparition.

5.5.2.5. *Utilisation en ligne potentielle de l'indicateur d'état de santé de la situation de travail pour la résilience des situations de travail*

La détection des dérives techniques pouvant mener à des réponses de l'opérateur peut également permettre d'améliorer la résilience des systèmes industriels.

Suite à une alerte, le système de surveillance pourrait informer l'opérateur que sa ligne d'assemblage dérive de son comportement nominal et l'aider en lui procurant la bonne marche à suivre pour répondre à cette dérive. Cette augmentation de la perception de l'opérateur (« opérateur augmenté ») permet d'améliorer la continuité de production des lignes d'assemblage automatisées. Cela permet également de rendre les actions de l'opérateur, ayant pour objectif la résilience de la situation de travail, moins dangereuses.

5.6. Conclusion

La troisième étape de la méthode WSHM propose de « Définir un indicateur d'état de santé de la situation de travail ». Cette étape possède deux propositions originales :

- Une méthode de sélection de variables, pour surveiller les dérives de caractéristiques, parmi les données à disposition. Ces variables pouvant permettre la surveillance de causes ou d'effets des dérives techniques ou des dérives/émergences d'interactions ;
- Un modèle de définition d'indicateurs de déviation, dérive, situation potentiellement dangereuse et de l'état de santé de la situation de travail. L'indicateur d'état de santé, ainsi établi, permettra alors la mise en place d'une surveillance de l'apparition des situations potentiellement dangereuses générées par la réponse d'un opérateur à une dérive technique.

Ce chapitre conclut la présentation des trois étapes de la méthode WSHM proposées au sein de ce manuscrit. Le prochain chapitre de ce manuscrit (chapitre 6) a pour but de présenter les résultats de l'application de cette méthode sur une plateforme académique. Cette application ayant pour but de vérifier l'applicabilité de la méthode sur un cas réel.

Chapitre 6 : Application de la méthode WSHM à un cas d'étude académique

6.1. Introduction

Ce chapitre a pour but de présenter l'application de la méthode WSHM sur un cas d'étude académique. Le chapitre commence par une présentation du groupe de travail impliqué dans l'application de la méthode WSHM sur le cas d'étude ainsi que le planning de cette application. Puis les conditions de l'application de la méthode WSHM, ainsi que le cas d'étude sont présentés. Ce chapitre présente ensuite les résultats de l'application des trois étapes de la méthode WSHM sur le cas d'étude. Enfin, ce chapitre se conclut par la synthèse des résultats obtenus, par la validation de la réponse à la problématique industrielle, et également par de potentielles perspectives d'améliorations et d'applications futures de la méthode WSHM.

Cette application de la méthode sur un cas académique a eu pour but de valider celle-ci dans un cadre contrôlé et connu.

6.2. Description du cas d'étude académique : ilot de la plateforme Progress 4.0

L'étude de cas a été réalisée sur la plateforme Progress 4.0 du pôle Lorraine de l'AIP-PRIMECA présent sur le site de la faculté des sciences et technologie de Nancy (Figure 51).



Figure 51 : Vue d'ensemble de la plateforme Progress 4.0 (AIPL 2021)

La plateforme Progress 4.0 est une ligne d'assemblage automatisée utilisée comme support expérimental avec des étudiants de niveau Bac+2 à Bac+5 (DUT, Licence, Master, école d'ingénieurs), mais celle-ci est également utilisée pour la recherche. Cette plateforme a été certifiée sûre et ne présente aucun danger au cours de son fonctionnement nominal.

La ligne d'assemblage de la plateforme est composée de 6 postes (4 postes d'assemblage, 1 poste de chargement et 1 poste de déchargement), ainsi que d'un convoyeur qui relie les îlots entre eux (Figure 52).

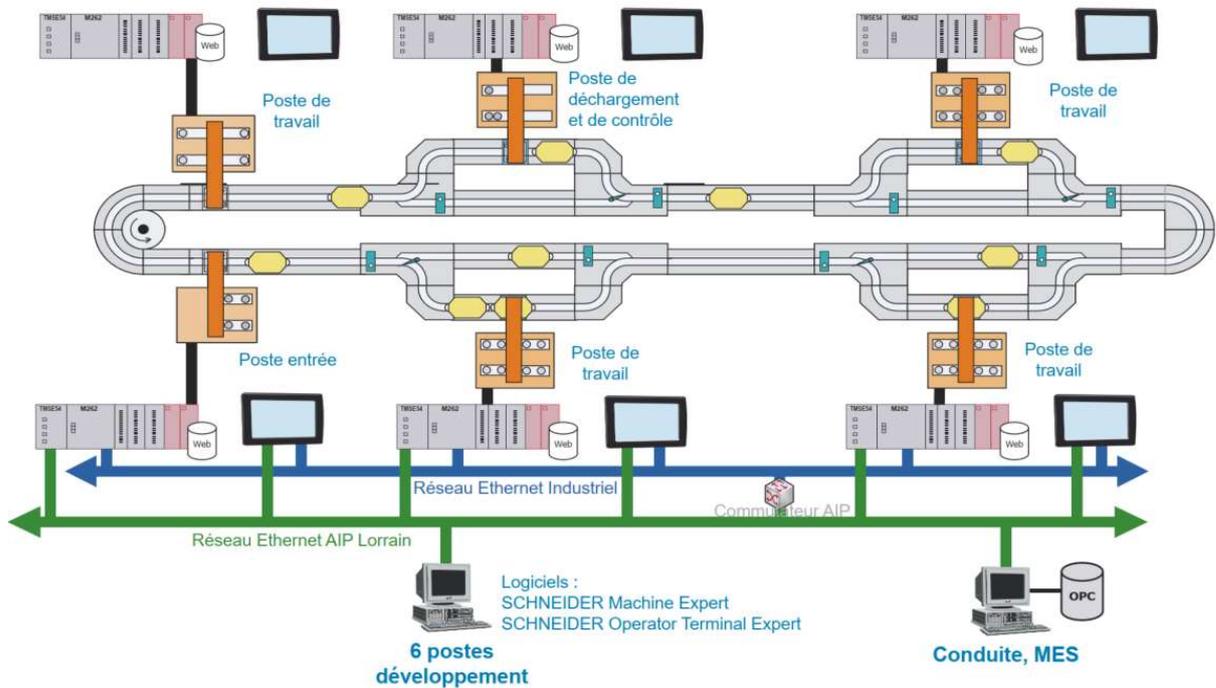


Figure 52 : Synoptique de la plateforme Progress 4.0 (AIP L 2021)

Dans le cadre de l'application de la méthode WSHM sur le cas d'étude « Plateforme Progress 4.0 », nous nous sommes concentrés sur l'étude d'un des postes d'assemblage. Les sous-sections suivantes présentent les ressources qui sont utilisées dans l'assemblage des produits ainsi que la machine qui réalise l'assemblage (« Poste 3 ») :

6.2.1. Produits à assembler

La plateforme Progress 4.0 peut servir à assembler différents types de pièces en produits comme décrit dans les documents présents en Annexe A. Dans ce cas d'étude, on considère que le poste 3 doit produire des produits « 0109 ». Chacun de ces produits est composé d'une pièce « 01 » et d'une pièce « 09 » (Figure 53). Chaque cycle d'assemblage a pour objectif d'assembler quatre produits « 0109 » sur une palette. Les pièces possèdent une encoche qui sert d'indicateur qualité une fois celles-ci assemblées en un produit (les encoches devant être alignées).

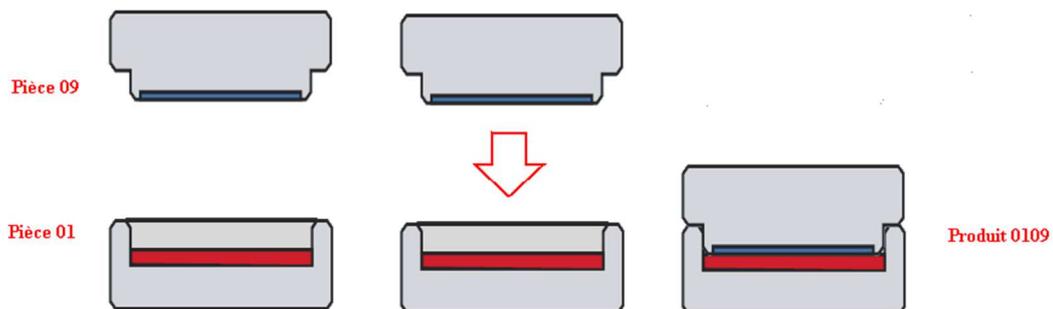


Figure 53 : Assemblage pièce 01 et 09 pour obtenir un produit 0109

6.2.2. Présentation du poste 3 (« Machine »)

Le poste 3 de la plateforme Progress 4.0 décrit dans les documents techniques présents dans l'Annexe A. Ce poste est composé d'un support en aluminium et des plaques de plexiglass servant à isoler la zone de travail de la machine et la zone de travail de l'opérateur supervisant le poste (protecteurs fixes). L'opérateur peut accéder à la zone de travail machine par deux portes en plexiglass qui se situent de chaque côté du poste (Figure 55). Un pupitre opérateur est présent sur l'extérieur des protecteurs en plexiglass (Figure 54).



Figure 55 : Vue d'ensemble du poste 3 (AIPL 2021)



Figure 54 : Pupitre opérateur du poste 3 (AIPL 2021)

A l'intérieur du poste 3 (« zone de travail machine ») se trouve :

- 1 automate programmable industriel (API) avec coupleurs réseaux;
- 1 bras manipulateur avec ventouse « Manip ». Ce bras manipulateur permet de déplacer les pièces d'une position à une autre ;
- 3 magasins de pièces « Magasin », dont seulement 2 sont utilisés (« Magasin_1 » et « Magasin_2 »);
- 3 pousseurs d'alimentation « Alim », dont seulement 2 sont utilisés (« Alim_1 » et « Alim_2 »);
- 1 indexeur pour orienter correctement les pièces avant leur assemblage « Orient_0 ».

Le « poste 3 » étudié peut être schématisé de la manière présentée dans la Figure 56.

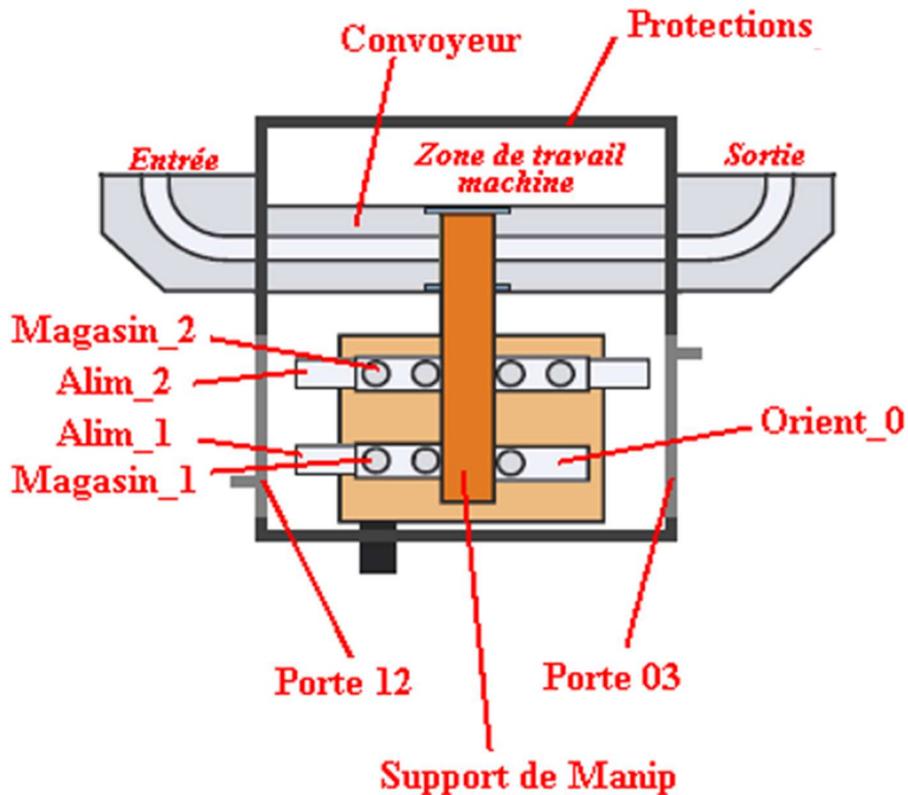


Figure 56 : Synoptique du poste 3

Les sous-sections suivantes présentent les différents composants de la machine « Poste 3 » :

6.2.2.1. Convoyeur

Le convoyeur est motorisé par un moteur électrique assurant le déplacement des palettes, de l'entrée vers la zone de travail machine, puis de la zone de travail machine vers la sortie. Un capteur permet la détection de la palette en zone de travail et un vérin indexeur permet de l'indexer dans la bonne position (Figure 57).

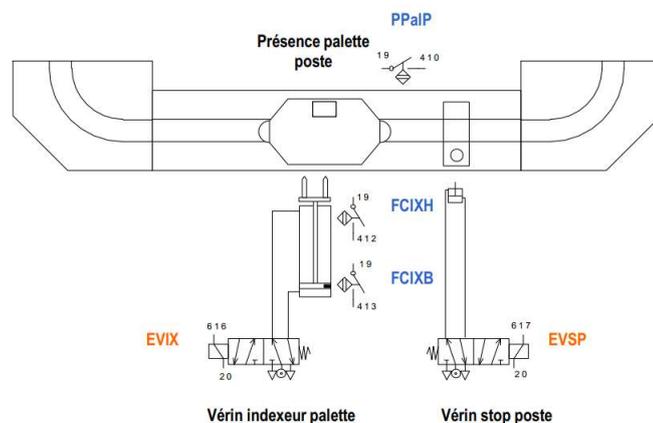


Figure 57 : Schéma pneumatique du convoyeur

6.2.2.2. Bras manipulateur avec ventouse

Un bras manipulateur avec ventouse permet le déplacement des pièces entre 8 positions. Celui-ci est composé de 4 vérins et d'une ventouse (Figure 58).

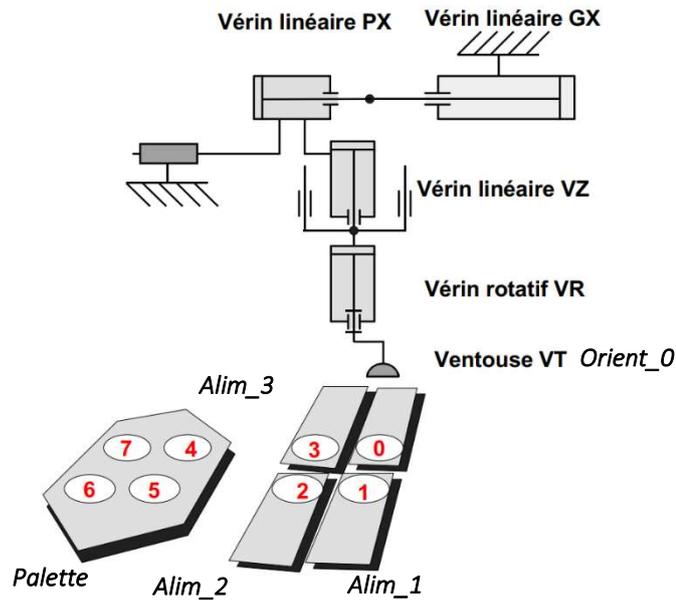


Figure 58 : Schéma cinématique du bras manipulateur

Le vérin rotatif VR ne peut fonctionner que si le vérin linéaire VZ est en position haute (tige rentrée).

6.2.2.3. Alimentations et Magasins

Chaque alimentation « Alim_X » est composée d'un vérin qui avance un poussoir. La pièce stockée la plus en bas du magasin vertical « Magasin_X » est poussée par le poussoir vers un V de positionnement. Un capteur de présence pièce détecte la présence de pièces au niveau du V de positionnement (Figure 59 et Figure 60).

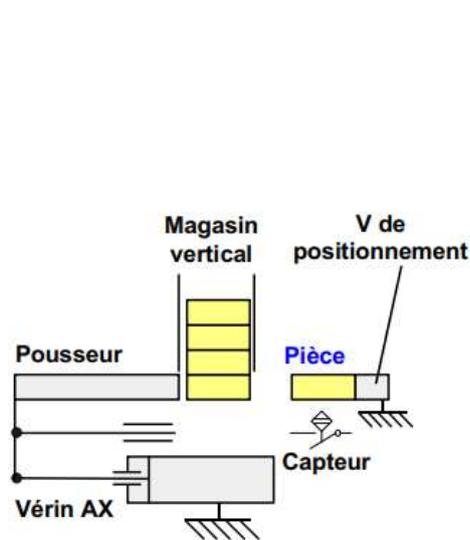


Figure 59 : Schéma cinématique d'une alimentation

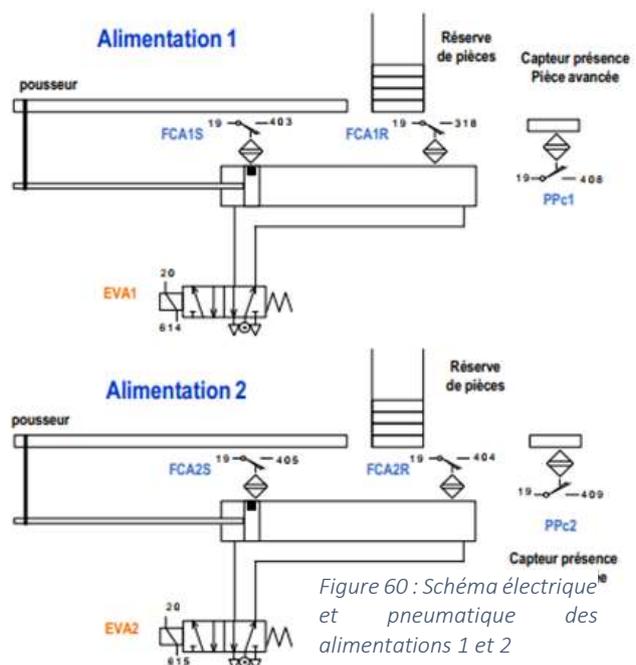


Figure 60 : Schéma électrique et pneumatique des alimentations 1 et 2

6.2.2.4. Orienteur

L'orienteur « Orient_0 » est composé d'un vérin qui fait avancer un système de rotation contre la pièce en position 0 (« P0 »). Le mouvement de rotation, produit par un moteur électrique, permet de faire tourner la pièce et d'amener l'encoche (indicateur de qualité du produit) devant un capteur qui la détecte. Celui-ci indique alors que la pièce est dans la bonne position et le moteur s'arrête (Figure 61 et Figure 62).

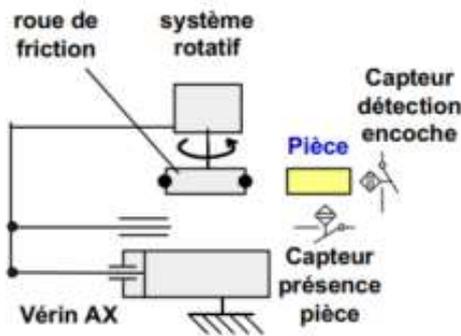


Figure 61 : Schéma cinématique de l'orienteur

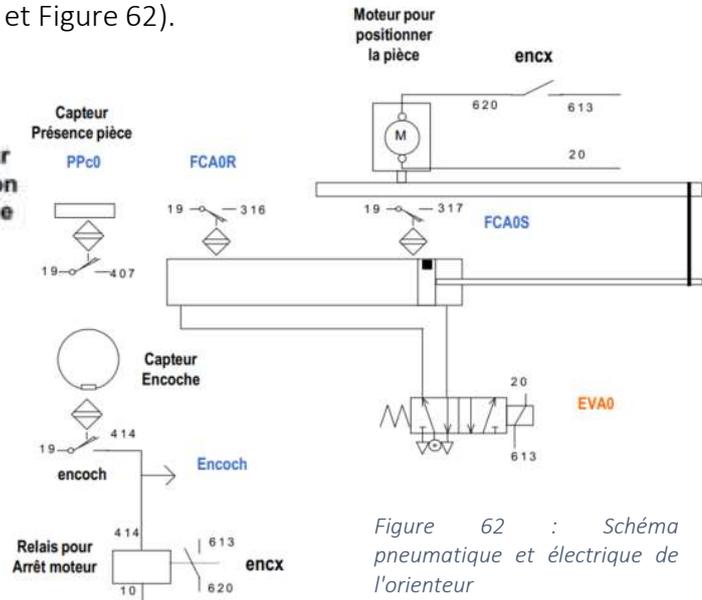


Figure 62 : Schéma pneumatique et électrique de l'orienteur

6.2.3. Description d'un cycle de production de produits 0109 par le poste 3

La situation de travail est composée d'une machine (poste 3 de la plateforme Progress 4.0) et d'un opérateur. Les documents techniques décrivent les activités réalisées par la machine et la fiche de poste décrit, quant à elle, les activités réalisées par l'opérateur au cours d'un cycle de production nominal. Le poste 3 étant étudié séparément du reste de la plateforme, le cycle de production a été adapté (approvisionnement en palette par l'opérateur au lieu du convoyeur central, ...).

Le cycle de production, ainsi réalisé, est composé d'activités (transformations de position) réalisées par l'opérateur et d'autres réalisées par la machine. Les pièces 01 et 09 sont assemblées en produits 0109 (Figure 63).

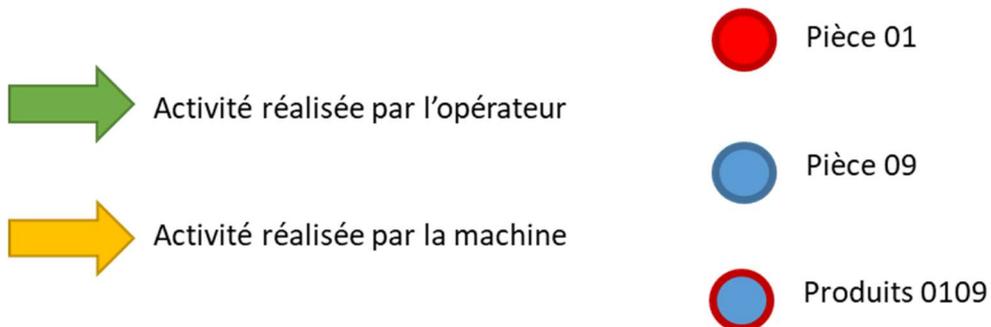


Figure 63 : Légende de présentation d'un cycle de production réalisé par le poste 3

Le cycle de production commence par l'approvisionnement en palettes sur le convoyeur en entrée du poste par l'opérateur (Figure 64). Puis l'opérateur approvisionne le poste en pièces 01 et 09. Pour cela, il ouvre la porte 12 du poste et place ensuite quatre pièces 01 dans le magasin « Magasin_1 » et quatre pièces 09 dans le magasin « Magasin_2 » avant de refermer la porte 12 (Figure 65).

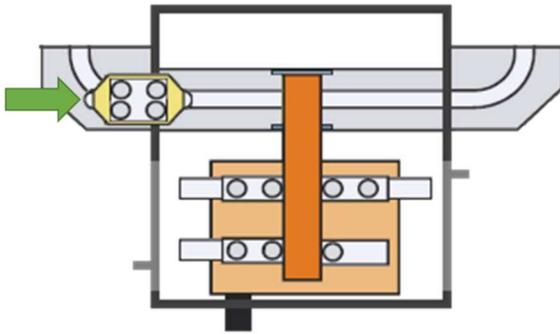


Figure 64 : L'opérateur place une palette sur le convoyeur en entrée du poste.

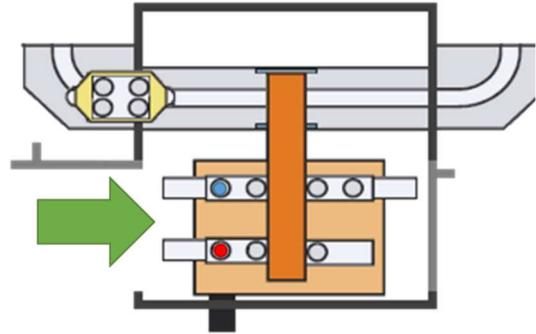


Figure 65 : L'opérateur ouvre la porte 12, place 4 pièces 01 dans le « Magasin_1 », 4 pièces 09 dans le « Magasin_2 » puis referme la porte 12.

L'opérateur lance ensuite le cycle d'assemblage automatisé en appuyant sur le bouton poussoir « DCy » se trouvant sur le pupitre du poste (Figure 66).

Rappel : au cours de l'application de la méthode WSHM, nous ne nous intéressons pas aux dérives humaines, donc ces activités sont considérées comme réalisées de manière prescrite par l'opérateur.

La première activité réalisée par la machine est de déplacer la palette en entrée de poste vers la zone de travail machine. Cette activité est réalisée par le convoyeur (motorisé par un moteur électrique) qui déplace la palette jusqu'à ce qu'elle soit détectée à la position souhaitée. Une fois en position, celle-ci est indexée par un vérin pour la bloquer en position, tout au long de l'assemblage des produits 0109 (Figure 67).

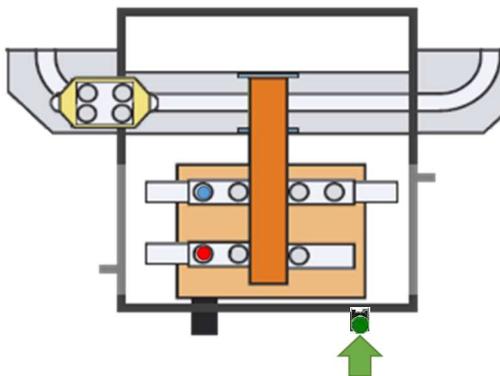


Figure 66 : L'opérateur appuie sur le bouton « DCy » du pupitre opérateur.

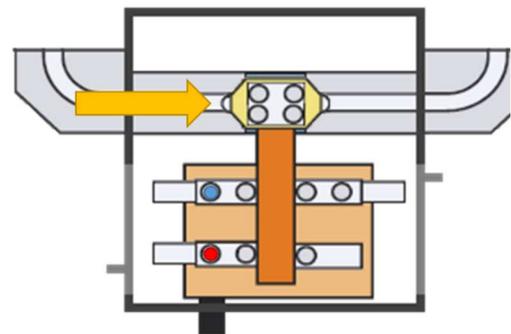


Figure 67 : Le convoyeur transporte la palette de l'entrée du poste à la zone de travail machine.

Une fois que la palette est correctement positionnée, l'assemblage des produits 0109 peut commencer. La première étape consiste à déplacer une pièce 01 du magasin « Magasin_1 » par l'action du pousseur de l'« Alim_1 » le long de la piste pour la placer en position « P1 » (Figure 68). La deuxième étape consiste à déplacer une pièce 09 du magasin « Magasin_2 » par l'action du pousseur de l'« Alim_2 » le long de la piste pour la placer en position « P2 » (Figure 69).

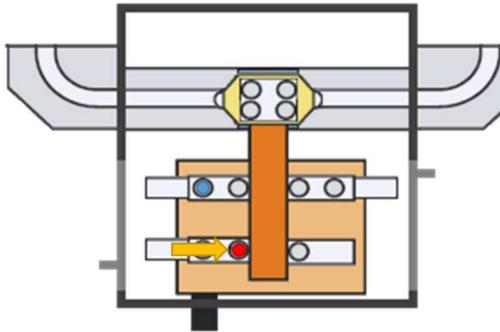


Figure 68 : « Alim_1 » déplace une pièce 01 du « Magasin_1 » vers « P1 ».

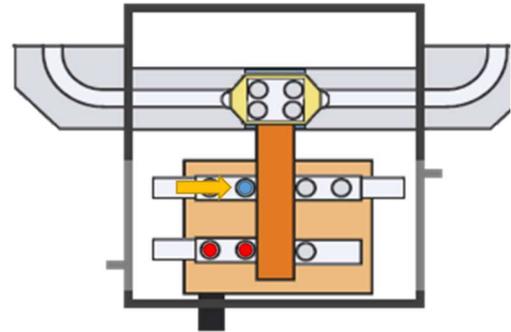


Figure 69 : « Alim_2 » déplace une pièce 09 du « Magasin_2 » vers « P2 ».

Une fois les 2 pièces positionnées pour être déplacées, le bras manipulateur avec ventouse « Manip » vient déplacer la pièce 01 de la position « P1 » à la position « P0 » (Figure 70). Une fois en position « P0 » la pièce 01 est orientée pour que l'encoche de celle-ci soit dans la bonne position avant assemblage (Figure 71).

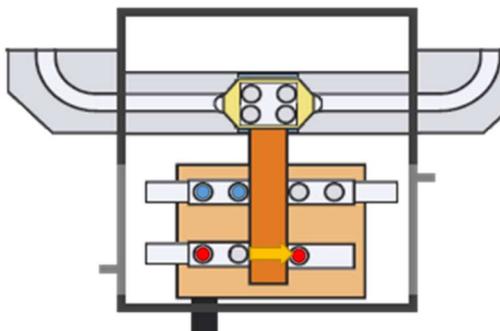


Figure 70 : « Manip » déplace la pièce 01 de « P1 » vers « P0 ».

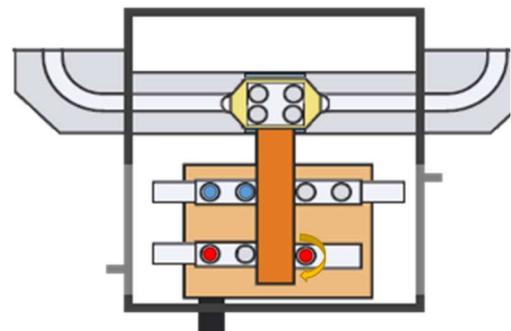


Figure 71 : « Orient_0 » indexe la pièce 01 en « P0 ».

Après que la pièce 01 soit indexée, le bras manipulateur avec ventouse « Manip » déplace cette pièce de la position « P0 » à la position « P4 » qui se trouve sur la palette (Figure 72). Puis « Manip » vient déplacer la pièce 09 de la position « P2 » à la position « P0 » (Figure 73).

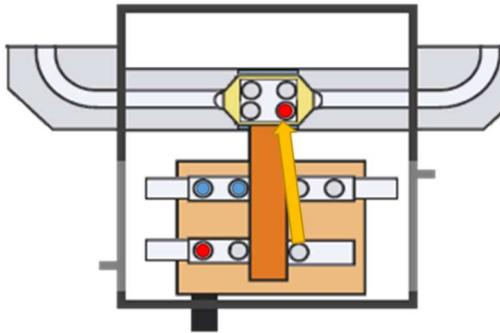


Figure 72 : « Manip » déplace la pièce 01 de « P0 » vers « P4 ».

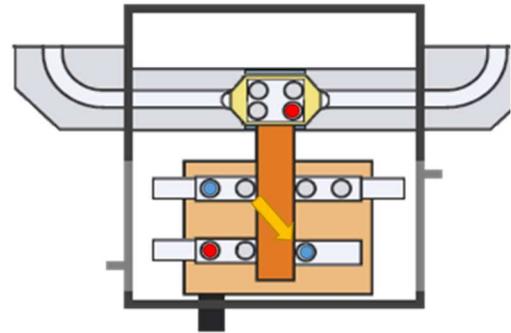


Figure 73 : « Manip » déplace la pièce 09 de « P2 » vers « P0 ».

Une fois en position « P0 » la pièce 09 est orientée pour que l'encoche de celle-ci soit dans la bonne position avant assemblage avec la pièce 01 (Figure 74). Ensuite, le bras manipulateur avec ventouse « Manip » déplace la pièce 09 de la position « P0 » à la position « P4 » qui se trouve sur la palette réalisant alors l'assemblage des 2 pièces (01 et 09) en un produit 0109 (Figure 75).

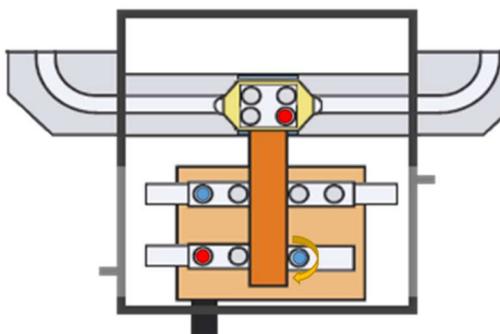


Figure 74 : « Orient_0 » indexe la pièce 09 en « P0 ».

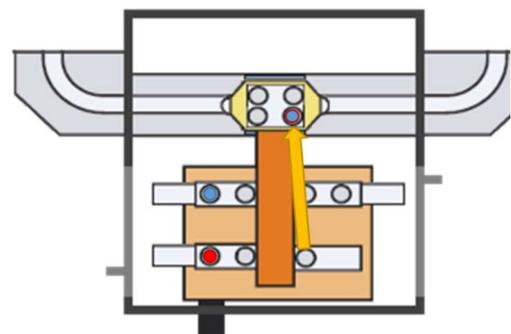


Figure 75 : « Manip » déplace la pièce 09 de « P0 » vers « P4 » réalisant alors l'assemblage d'un produit 0109.

L'assemblage de produits 0109 (de la Figure 68 à la Figure 75) est ainsi réalisée 3 autres fois, cette fois sur les positions « P5 » (Figure 76), « P6 » (Figure 77) et « P7 » (Figure 78) de la palette.

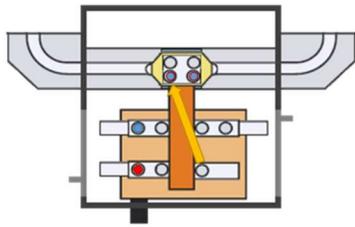


Figure 76 : Assemblage produit 0109 en « P5 ».

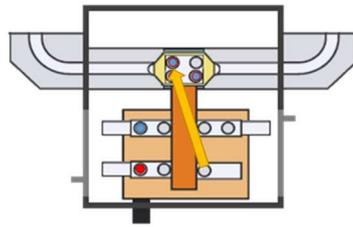


Figure 77 : Assemblage produit 0109 en « P6 ».

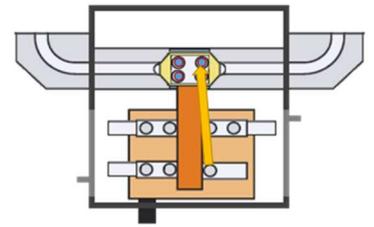


Figure 78 : Assemblage produit 0109 en « P7 ».

Une fois les 4 produits 0109 assemblés sur la palette, le vérin d'indexage de la palette se retire et la palette est déplacée par le convoyeur de la zone de travail machine à la sortie du poste (Figure 79). L'opérateur extrait ensuite la palette du poste, vérifie les produits s'y trouvant et la vide en plaçant les produits fraîchement assemblés au stock de produits finis (Figure 80).

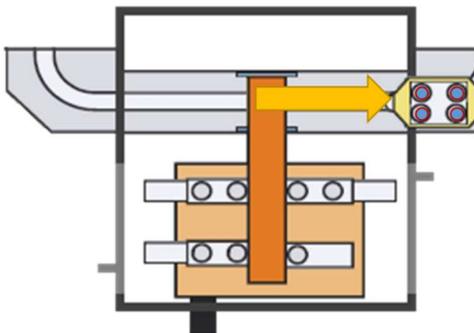


Figure 79 : Le convoyeur déplace la palette de la zone de travail machine vers la sortie du poste.

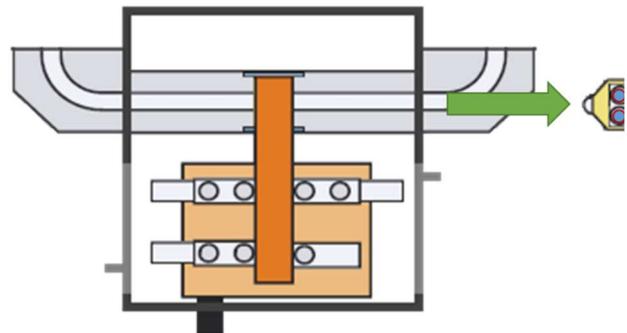


Figure 80 : L'opérateur extrait la palette, vérifie les produits et les place dans le stock.

6.2.4. Informations complémentaires

Certaines informations ont été obtenues par l'observation de la situation de travail étudiée :

6.2.4.1. Positions et formes des composants de la machine

La position et la forme des composants de la machine ont été mesurées manuellement.

La position et la forme des composants de la machine non-présentés dans les documents techniques (exemple, nappes de câbles) ont également été mesurées et cataloguées.

6.2.4.2. Environnement physique de travail

Les caractéristiques de l'environnement sont considérées comme la moyenne d'hygrométrie, de température et de pression atmosphérique dans le bâtiment de l'AIPL (20°C, 50%, 1,013 bar).

6.2.4.3. *Caractéristiques temporelles des activités et des interactions*

Les durées des activités et interactions ont été mesurées au chronomètre par le groupe de travail, ainsi que leur temps de départ par rapport au début de l'activité de travail (en réalisation/s).

Les périodes de chaque activité et interaction ont également été mesurées. Ces périodes ont servi à calculer les fréquences de réalisation des activités / interactions.

6.2.4.4. *Débits des flux*

Les débits de chaque flux de produits (matières premières, supports et produits finis) ont également été mesurés en pièce/s.

6.3. *Application de la première étape de la méthode WSHM*

6.3.1. *Composition du groupe de travail*

Le groupe de travail ayant appliqué la première étape de la méthode WSHM sur le cas d'étude « Poste 3 » était composé de moi-même, aidé par des personnels de l'AIP Lorrain et des enseignants-chercheurs du CRAN travaillant sur la plateforme Progress 4.0.

Le contenu des documents techniques, de la fiche de poste, ainsi que les informations complémentaires d'observations, ont été utilisés par le groupe de travail pour réaliser cette étape et ainsi « Modéliser la situation de travail ».

6.3.2. *Déroulement*

Tous les diagrammes réalisés au cours de cette étape ont été réalisés sur le logiciel Modelio (version 4.1) (Modelio 2021). L'utilisation de ce logiciel a été motivée par le fait qu'il est open source. Ainsi, toute personne voulant appliquer la méthode WSHM dans son état actuel peut utiliser le même logiciel que celui qui a été utilisé lors de l'application de la méthode WSHM présentée dans ce manuscrit.

Remarque : dans les diagrammes présentés, les valeurs des attributs « Coordonnées » et « Volumes » seront notées « [...] » du fait de la complexité des données qu'ils contiennent et les valeurs nulles d'attributs seront notées « - ».

6.3.2.1. *Décrire le contexte de la situation de travail (R1.1)*

Au cours de cette première sous-étape, le contexte de la situation de travail vu de l'extérieur (vue « boîte noire ») est étudié. Pour se faire, le groupe de travail réalise le diagramme de contexte présenté en Figure 81 à partir des informations présentes dans les documents techniques :

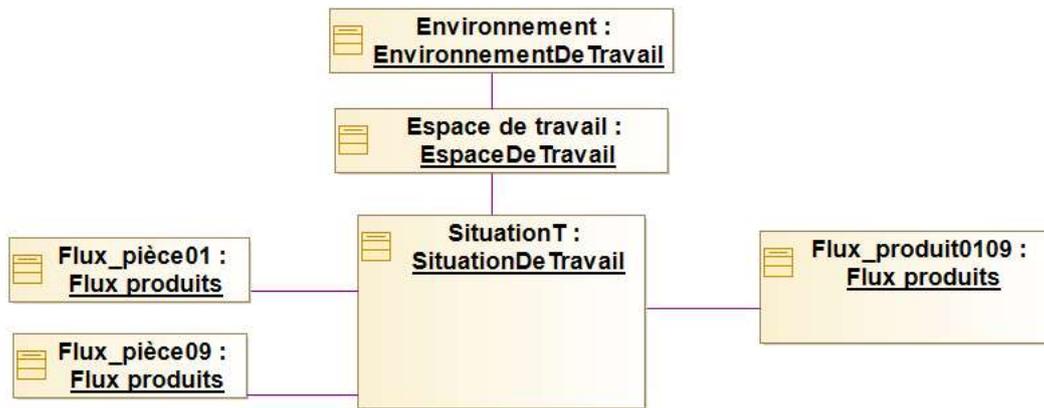


Figure 81: Contexte de la situation de travail étudiée (Diagramme de Contexte/SysML)

Ce diagramme de contexte met en avant les flux de produits entrants et sortants de la situation de travail étudiée « SituationT », ainsi que son environnement de travail :

- Les flux entrants sont les flux de pièces 01 et 09 :
 - o Le débit de ces flux est estimé à une pièce par 0,013 secondes ;
 - o Les caractéristiques de forme de chaque pièce sont identifiées et la masse de chaque pièce est estimée à 100g ;
- Les flux sortants sont les flux de produits 0109 :
 - o Le débit de ces flux est estimé à un produit109 par 0,013 secondes ;
 - o Les caractéristiques de forme de chaque produit sont identifiées et la masse de chaque produit est estimée à 200g ;
- La situation de travail étudiée se trouve dans un espace de travail qui lui-même se trouve dans l'environnement de travail ;
 - o La température de l'atmosphère de l'environnement de travail est estimée à 20°C, l'hygrométrie à 50% et la pression a 1,013 bar.

Ces informations permettent au groupe de travail de réaliser la base du modèle de situation de travail appliqué à la situation de travail étudiée (Figure 82).

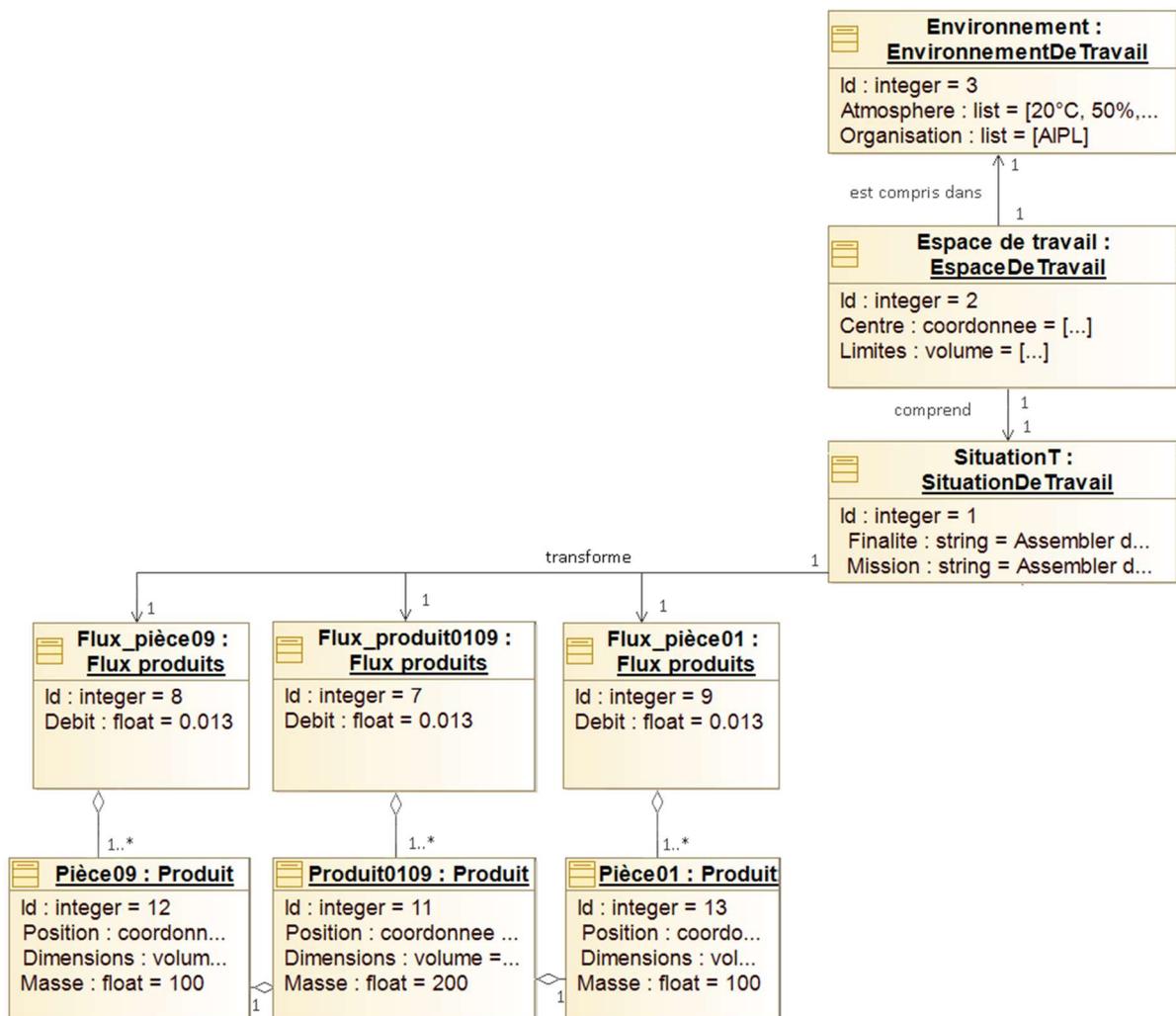


Figure 82: Modèle de la situation de travail étudiée à la fin de l'application de la sous-étape R1.1 (BDD/SysML)

6.3.2.2. Décrire l'activité de la situation de travail (R1.2)

Après avoir décrit le contexte de la situation de travail, il faut décrire l'activité de la situation de travail en vue « boîte noire » : l'activité de travail. Pour se faire, le groupe de travail a réalisé le diagramme d'activité de la situation de travail en vue « boîte noire ». Il est présenté en Figure 83 à partir des informations obtenues dans les documents techniques.

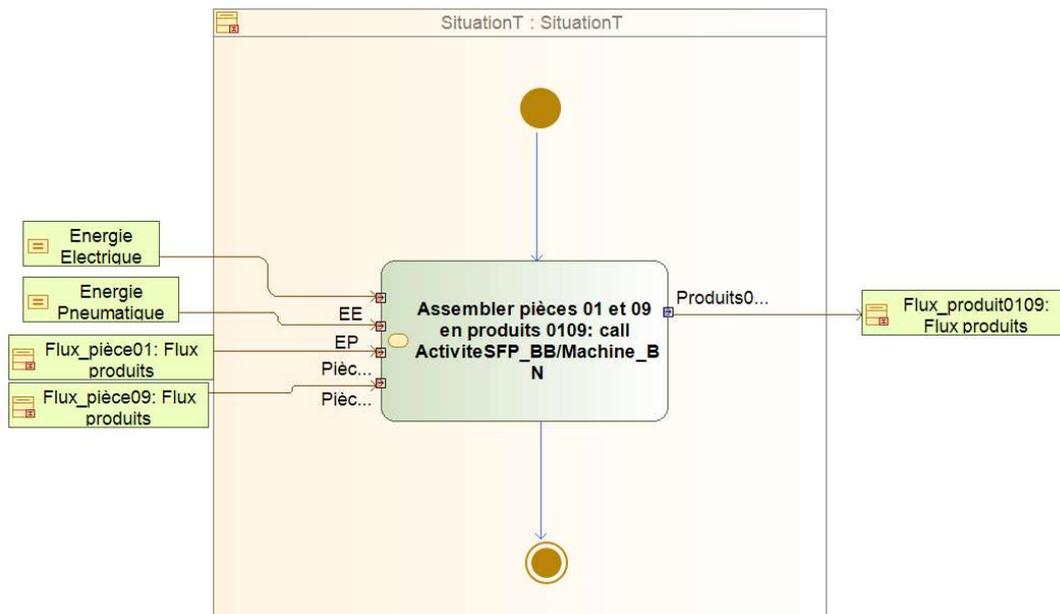


Figure 83: Activité de la situation de travail étudiée (AD/SysML)

Ce diagramme d'activité met en avant les flux d'énergies et de produits entrants et sortants de l'activité de travail réalisée au sein de la situation de travail. Le groupe de travail réalise le chronométrage de la durée d'un cycle de production et l'identification des préconditions, post-conditions et invariants de fonctionnement :

- Les flux d'énergies entrants sont les flux d'énergies électrique (EE) et pneumatique (EP);
- La durée de l'activité (d'un cycle de production) est de 310 secondes ;
- Les préconditions de l'activité sont la présence d'au moins quatre pièces 01 et 4 pièces 09 en stock ;
- La post condition de l'activité est l'ajout en stock de quatre produits 0109 ;
- L'invariant de réalisation de cette activité de travail est que l'opérateur doit rester en sécurité tout à long de la réalisation de celle-ci : les portes permettant d'accéder à la zone de travail machine doivent rester fermées ;

Finalement, le groupe de travail complète le modèle de situation de travail commencé au cours de la première sous-étape (Figure 84).

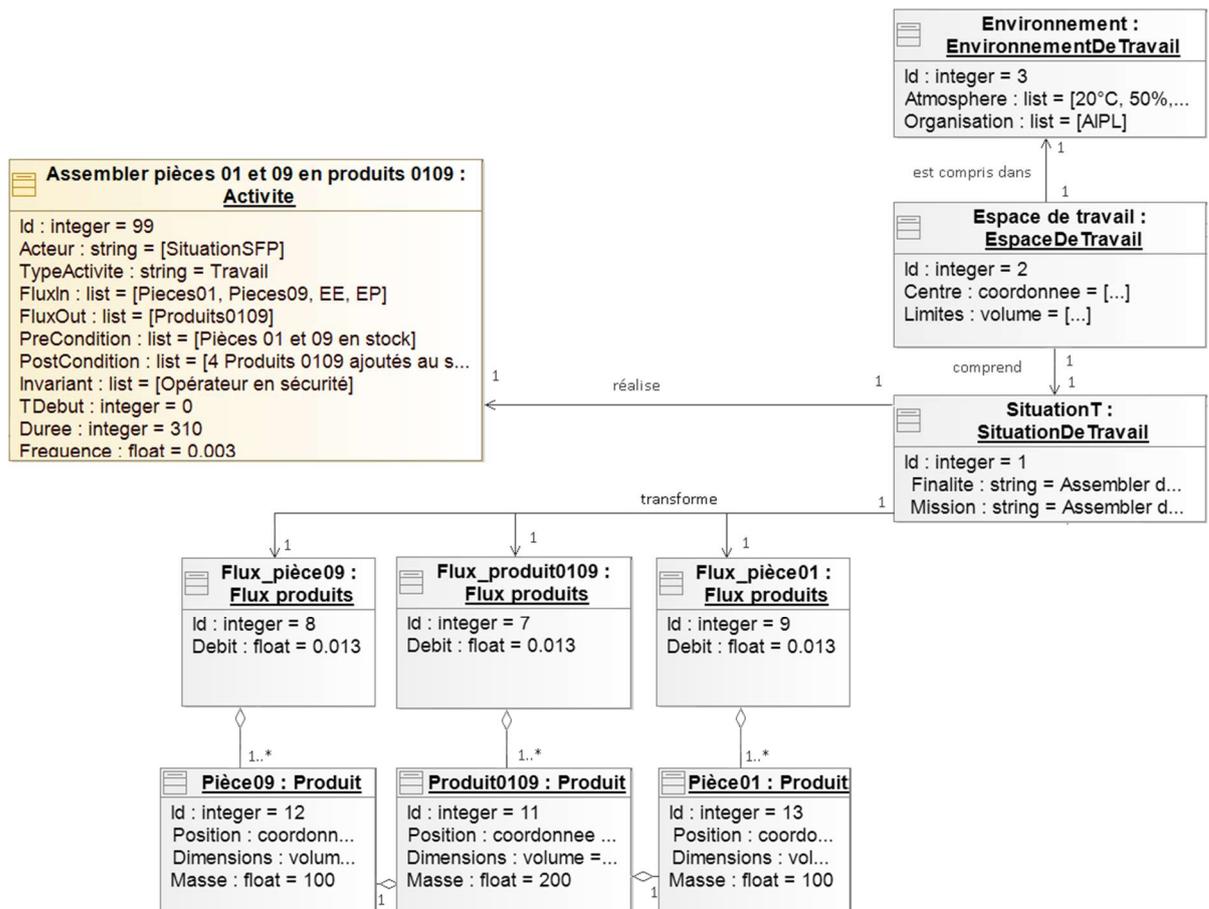


Figure 84 : Modèle de la situation de travail étudiée à la fin de l'application de la sous-étape R1.2 (BDD/SysML)

6.3.2.3. Décrire la structure de la situation de travail (R1.3)

Après avoir étudié la situation de travail en vue « boîte noire », le groupe de travail a étudié la situation de travail en vue « boîte blanche ».

D'après les documents techniques et la fiche de poste, la situation de travail étudiée «SituationT » est composée de :

- Un opérateur de machine :
 - o Celui-ci n'a pas d'outil à disposition ;
- Une machine (« poste_3 ») :
 - o Les caractéristiques de la machine (dimensions et position) sont identifiées ;
 - o La fonction de la machine est nommée « assembler produits 0109 » ;

Le groupe de travail complète le modèle de situation de travail instancié avec ces informations (Figure 85).

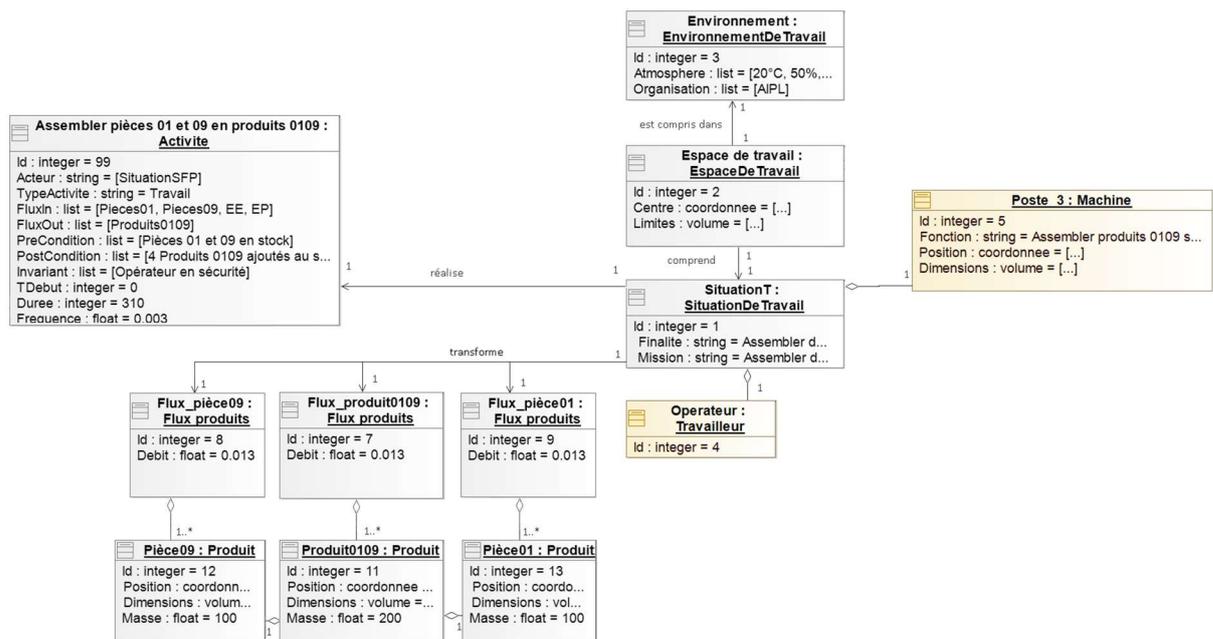


Figure 85 : Modèle de la situation de travail étudiée à la fin de l'application de la sous-étape R1.3 (BDD/SysML)

6.3.2.4. Décrire le comportement des composants de la situation de travail (R1.4)

Après avoir identifié les composants de la situation de travail, le groupe de travail a étudié le comportement de chacun d'eux. Pour se faire, il réalise un diagramme d'activité de la situation de travail en vue « boîte blanche ». Ce diagramme d'activité, présenté en Figure 86, est réalisé à partir de la fiche de poste et des documents techniques.

Ce diagramme permet d'identifier :

- 4 activités réalisées par l'opérateur : « Insérer palette en entrée de poste », « Approvisionner en pièces 01 et 09 », « Lancer cycle », « Extraire palette en sortie de poste » ;
- Une activité réalisée par la machine « poste_3 » : « Assembler produits 0109 sur palette » ;
- Un flux de support: le flux de produits « palettes », celui-ci représente les palettes sur lesquelles sont assemblés et déplacés les « produits 0109 ».
 - o Les dimensions et la masse de chaque palette composant ce flux sont caractérisées.

Ces informations ainsi que les caractéristiques de flux entrants, flux sortants, préconditions, post-conditions, invariants et les caractéristiques temporelles de chaque activité permettent de compléter le modèle de situation de travail instancié (Figure 87).

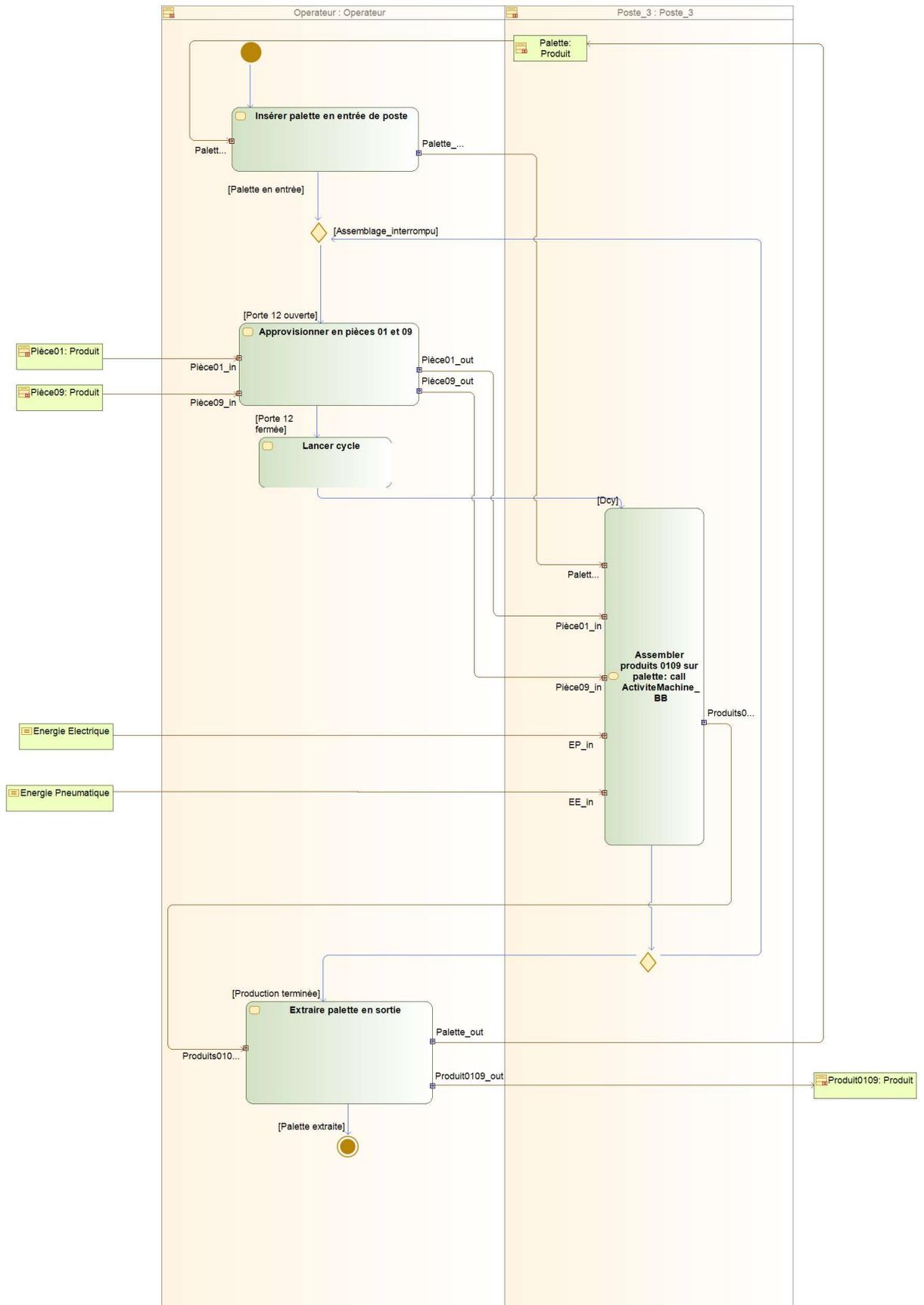


Figure 86 : Diagramme d'activité de la situation de travail en vue "boîte blanche" (AD/SysML)

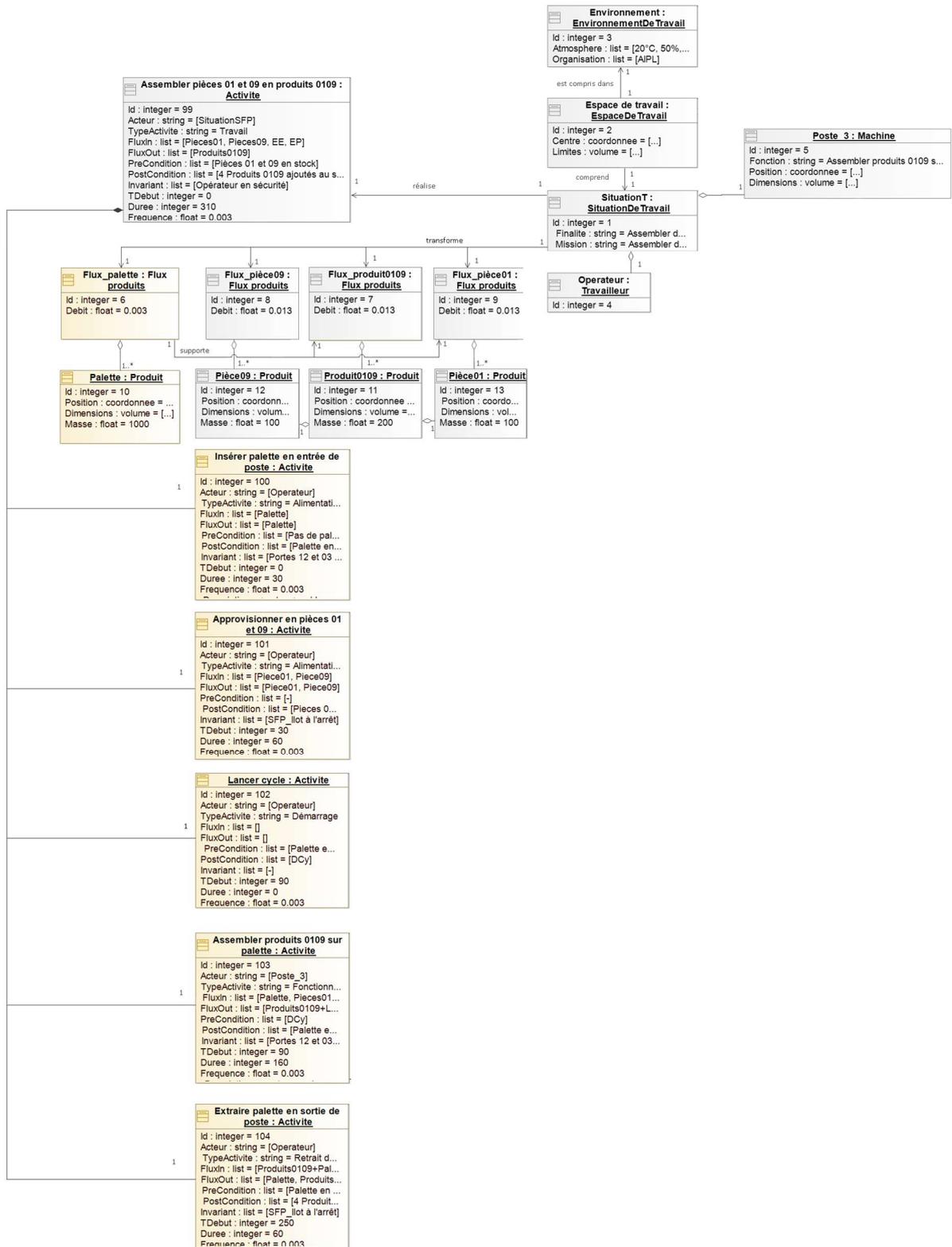


Figure 87 : Modèle de la situation de travail étudiée à la fin de l'application de la sous-étape R1.4 (BDD/SysML)

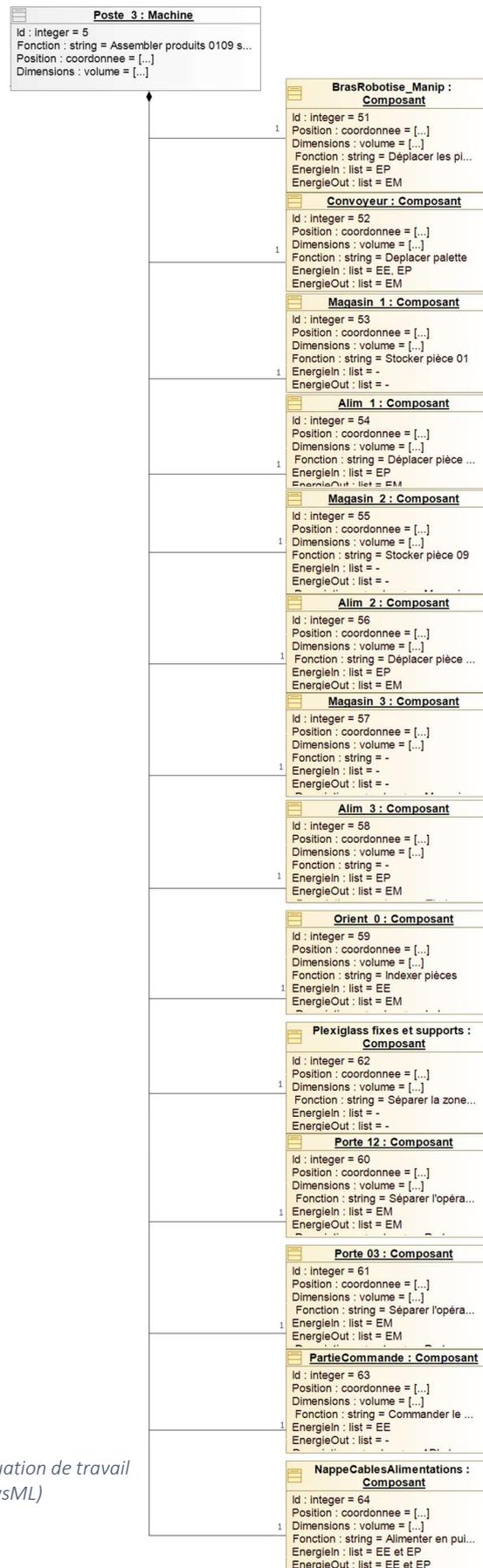
6.3.2.5. Décrire la structure des machines (R1.5)

Après avoir étudié la structure et le comportement de la situation de travail, le groupe de travail s'est intéressé à la machine « poste_3 ». En se basant sur la décomposition fonctionnelle de la machine « poste_3 », présente dans les documents techniques (Section 6.2.2 et Annexe A), le groupe de travail identifie les composants suivants :

- Le bras robotisé avec ventouse « Manip » permettant de manipuler et de déplacer des pièces d'une position à une autre (P0 à P7) ;
- Le convoyeur déplaçant la palette ;
- Les trois magasins à pièces : « Magasin_1 », « Magasin_2 » et « Magasin_3 » (ces éléments comprennent : le magasin tubulaire vertical ainsi que la piste vers les positions de travail) ;
- Les trois alimentations de pièces par poussoir motorisé par un vérin pneumatique : « Alim_1 », « Alim_2 » et « Alim_3 » ;
- Un orienteur de pièce « Orient_0 » dont l'action est réalisée par un moteur électrique déplacé par un vérin pneumatique ;
- Le support du poste en aluminium et les plexiglass de protection ;
- Les portes en plexiglass « Porte 12 » et « Porte 03 » ;
- La partie commande composée des cartes d'entrées/sorties et de l'API ;
- La nappe de câble électrique se trouvant sous les pistes de magasins de pièces.

Chaque composant est décrit par sa position, ses dimensions, sa fonction, ainsi que par les flux d'énergies entrants et sortants dans ce composant.

Figure 88 : Ajouts au modèle de la situation de travail étudiée lors de la sous-étape R1.5 (BDD/SysML)



Les informations sur ces composants permettent de compléter le modèle de situation de travail instancié (Figure 88).

6.3.2.6. Décrire le comportement des composants des machines (R1.6)

Après avoir identifié les composants de la machine « poste_3 », le groupe de travail a étudié le comportement de chacun d'eux. Pour se faire, il réalise un diagramme d'activité des activités allouées à la machine « poste_3 » en vue « boîte blanche ». Ce diagramme d'activité, présenté en Figure 89, est réalisé à partir des documents techniques et de l'expertise des membres du groupe de travail.

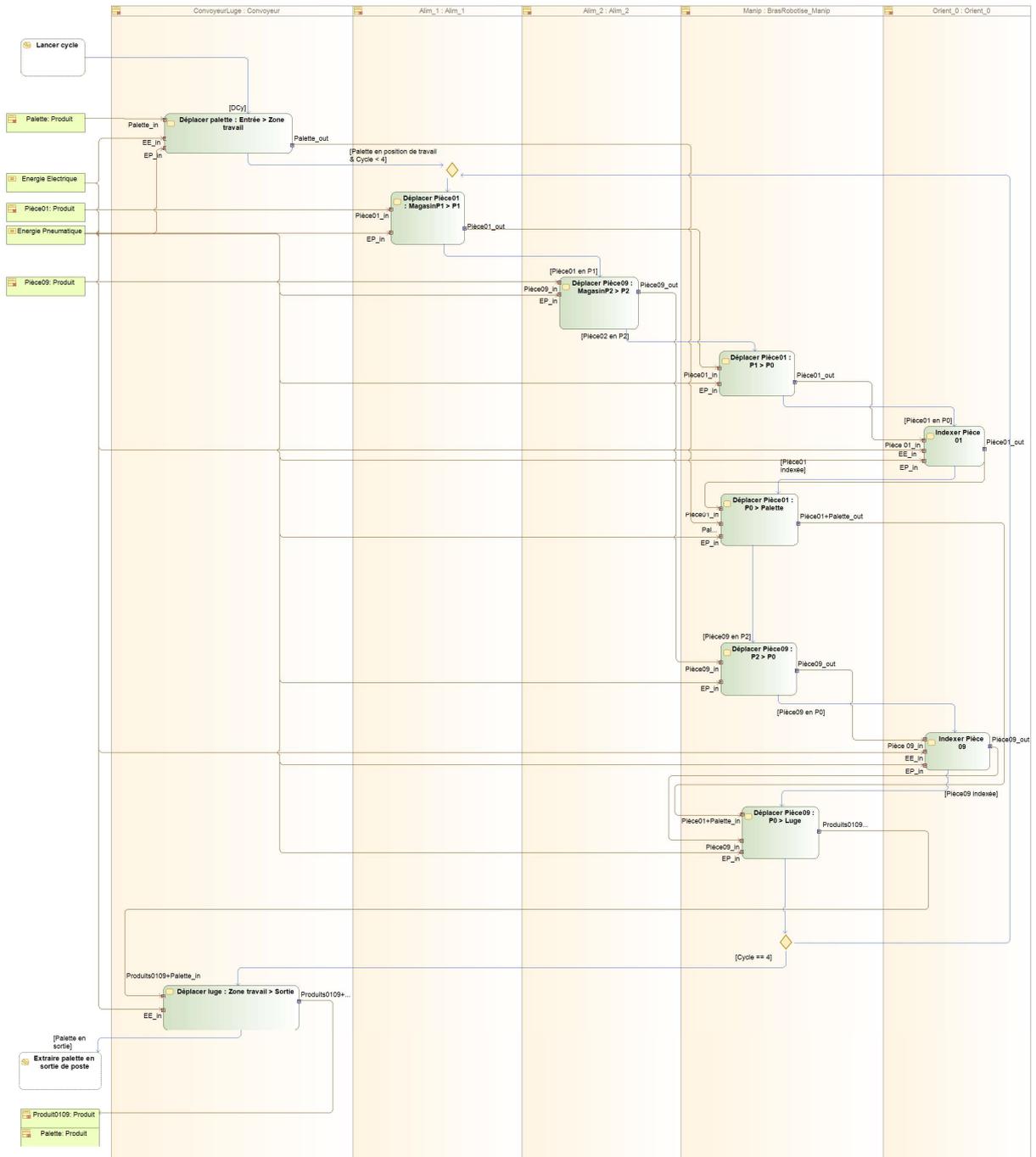


Figure 89 : Diagramme d'activité de la machine «poste_3 » en vue "boîte blanche" (AD/SysML)

Ce diagramme permet d'identifier :

- 9 activités réalisées par les composants de la machine:
 - o Convoyeur : « Déplacer palette : Entrée > Zone de travail » et « Déplacer palette : Zone de travail > Sortie »
 - o Alim_1 : « Déplacer pièce 01 : Magasin_1 > P1 » (réalisée quatre fois par cycle de production) ;
 - o Alim_2 : « Déplacer pièce 09 : Magasin_2 > P2 » (réalisée quatre fois par cycle de production) ;
 - o Bras robotisé Manip : « Déplacer pièce 01 : P1 > P0 », « Déplacer pièce 09 : P2 > P0 », « Déplacer pièce 01 : P0 > Palette » et « Déplacer pièce 09 : P0 > Palette » (réalisées quatre fois par cycle de production) ;
 - o Orient_0 : « Indexer pièce 01 » et « Indexer pièce 09 » (réalisées quatre fois par cycle de production) ;

Ces informations, ainsi que les caractéristiques de flux entrants, flux sortants, préconditions, post-conditions, invariants et les caractéristiques temporelles de chaque activité permettent de compléter le modèle de situation de travail instancié (Figure 90).

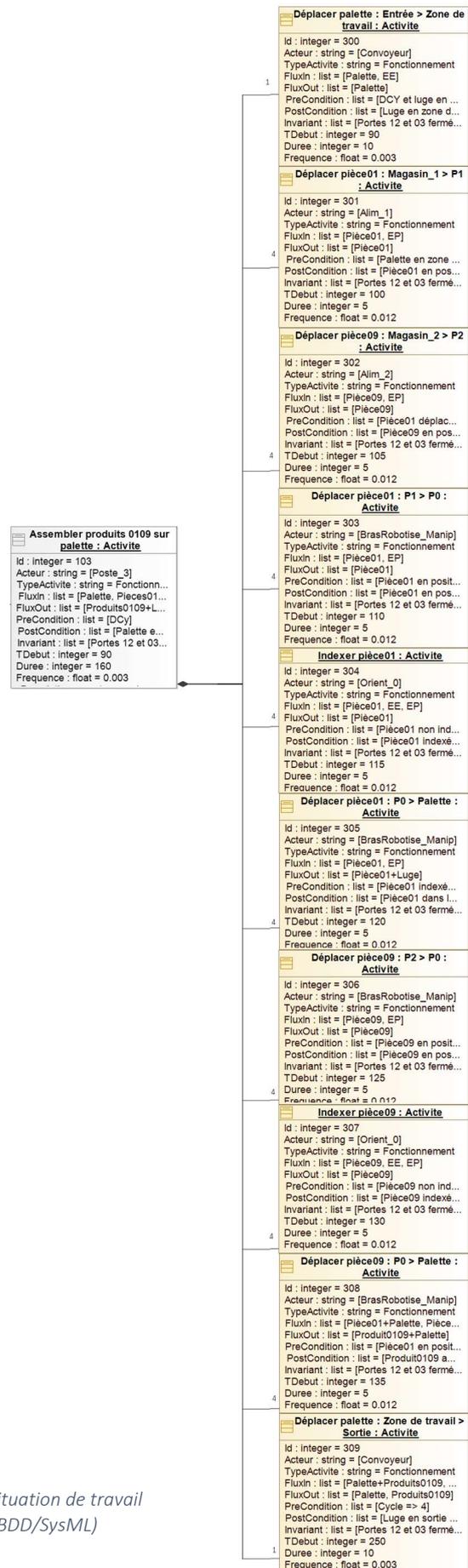


Figure 90 : Ajouts au modèle de la situation de travail étudiée lors de la sous-étape R1.6 (BDD/SysML)

6.3.2.7. Identifier les interactions Homme-Machine-Produits (R1.7)

Après avoir décrit les activités au sein de la situation de travail étudiée, le groupe de travail a identifié les différentes interactions ayant lieu au cours de chacune de ces activités. Pour identifier ces interactions, le groupe de travail a réalisé un diagramme de séquence pour chaque activité.

Dans cette section, seules les 5 interactions de l'activité « Extraire palette en sortie de poste » sont présentées. Le diagramme de séquence en Figure 91 a été réalisé pour permettre l'identification de ces dernières.

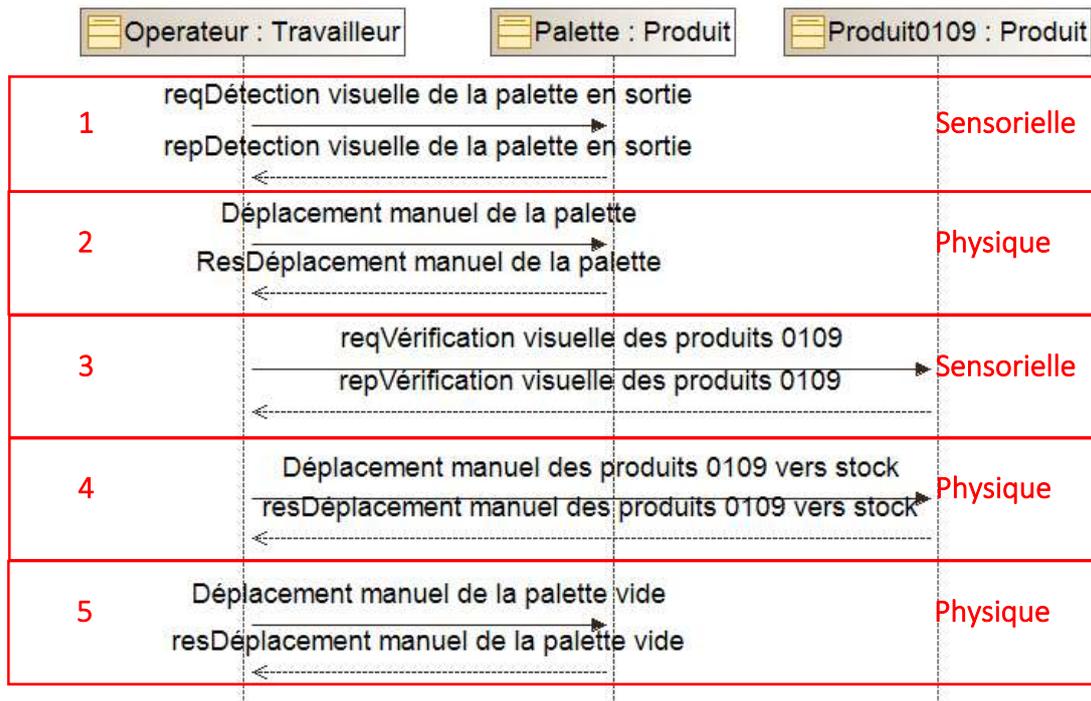


Figure 91 : Diagramme de séquence de l'activité "Extraire palette en sortie de poste" (SD/SysML)

A partir de ce diagramme de séquence et des mesures de caractéristiques temporelles, le groupe de travail identifie les interactions présentées en Figure 92.

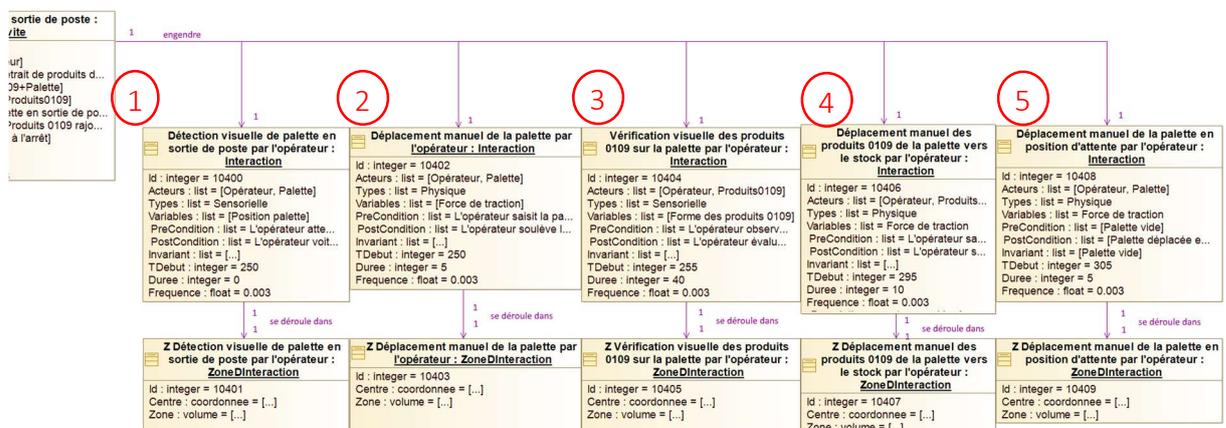


Figure 92 : Interactions aux cours de l'activité « Extraire palette en sortie de poste » identifiées lors de la sous-étape R1.7 (BDD/SysML)

La totalité des diagrammes de séquence réalisés est présentée en Annexe B.1. Les interactions ainsi identifiées, de même que les zones d'interaction de ces dernières, sont également présentées dans l'Annexe B.1.

6.3.2.8. *Identifier les phénomènes dangereux au sein de la situation de travail (R1.8)*

Après avoir décrit les interactions au sein de la situation de travail, le groupe de travail a conclu la première étape de la méthode WSHM en identifiant les différents phénomènes dangereux et leurs sources.

Pour se faire, le groupe de travail s'est appuyé sur les énergies (reçues ou générées) par chaque élément de la situation de travail. Les phénomènes dangereux ont été regroupés en 3 grandes catégories « Mécanique », « Explosion » (projection d'air comprimé ou d'objet par air comprimé) et « Electrique ». Ces grandes catégories ont chacune une zone d'influence : les zones dangereuses.

- Les zones dangereuses des phénomènes dangereux « électriques » et « mécaniques » se situent au contact des éléments pouvant les générer, quel que soit la position de l'élément ;
- Les zones dangereuses des phénomènes dangereux « explosion » ont été considérées comme étant des cônes (15°) en face des orifices par lesquels une décharge involontaire pourrait se produire (Paris 2012).

Le groupe de travail a alors complété le modèle de situation de travail avec les informations extraites sur les phénomènes dangereux (Figure 93).

6.3.3. Résultats de l'étape

A la fin de cette étape, le groupe de travail a modélisé la situation de travail étudiée (Annexe B.2) et les informations contenues dans le modèle instancié seront utilisées au cours de l'analyse réalisée lors de la prochaine étape de la méthode WSHM : « Identifier les situations dangereuses générées par une réponse d'un opérateur à une dérive technique ».

Les diagrammes générés (Diagrammes de définition des blocks « BDD », diagrammes d'activité « AD » et diagrammes de séquence « SD ») sont, quant à eux, à conserver pour de futures analyses de la situation de travail (par exemple, après une modification de celle-ci : changement de machine, changement de matière première, ...) pour ainsi réappliquer la méthode WSHM sans avoir besoin de re-modéliser toute la situation de travail étudiée.

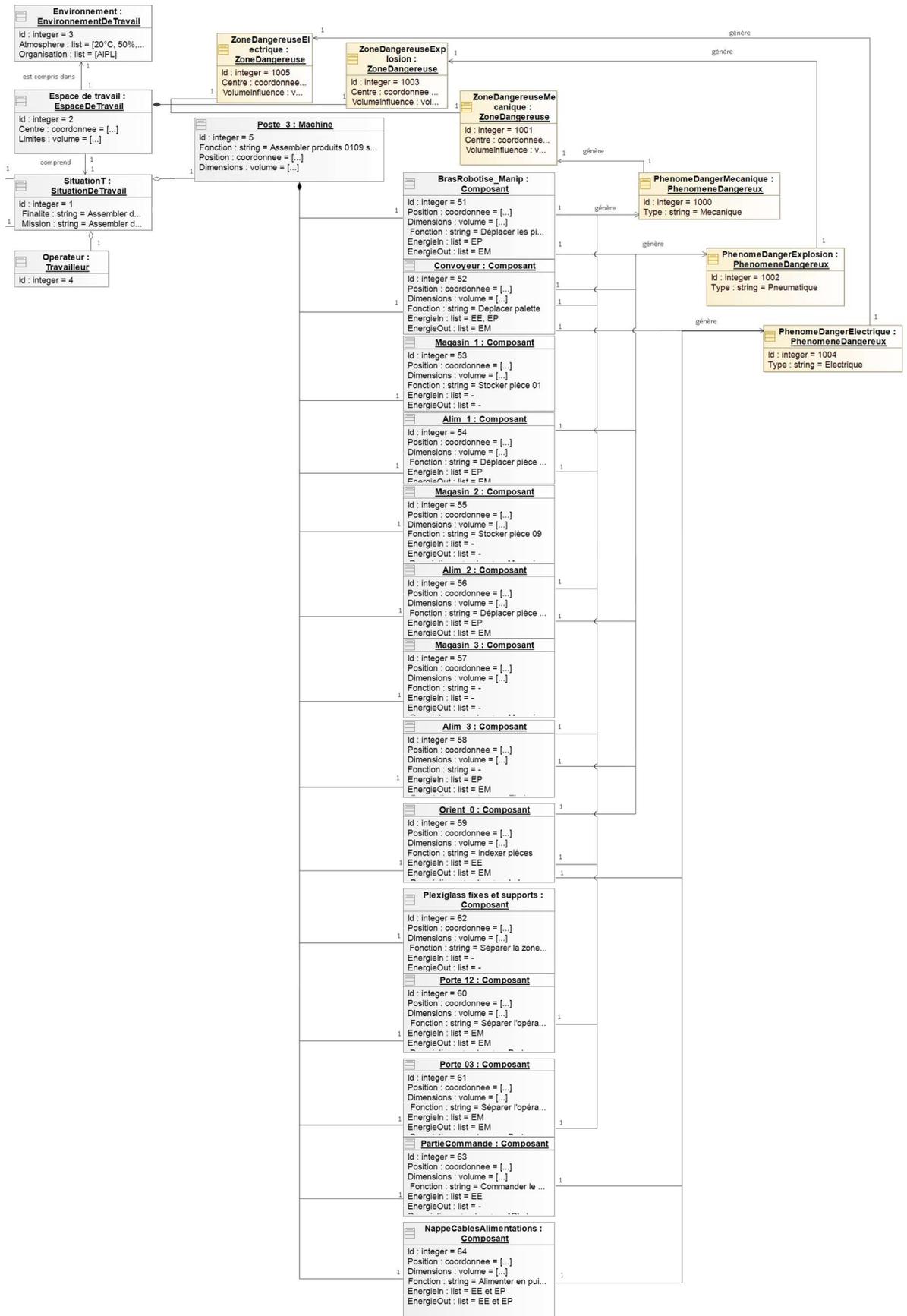


Figure 93 : Ajouts au modèle de situation de travail étudiée lors de la sous-étape R1.8

6.4. Application de la deuxième étape de la méthode WSHM

6.4.1. Composition du groupe de travail

Le groupe de travail, ayant appliqué la deuxième étape de la méthode WSHM sur le cas d'étude « Poste 3 », était composé de deux experts en risques machines du laboratoire « Sécurité des Equipements de Travail et des Automatismes » (SETA) de l'INRS et de moi-même.

Le groupe de travail a également utilisés le Tableau 7 pour les valeurs d'indices de Fréquence (F), Non-Déteçtabilité (ND) et de Gravité des dommages (G).

	F	ND	G
1	Très rare (< 1 fois par an)	Déteçtable sans connaissance de la situation	Aucun dommage
2	Rare (< 1 fois par mois)	Déteçtable avec connaissance de la situation	Dommage léger (sans arrêt de travail)
3	Courante (< 1 fois par semaine)	Déteçtable en cours de procédure de vérification uniquement	Dommage avéré (avec arrêt de travail)
4	Très courante (< 1 fois par jour)	Impossible à déteçter	Dommage grave / Mort

Tableau 7 : Tableau d'estimation des indices composants la criticité

Les informations contenues dans le modèle de situation de travail instancié, réalisé au cours de la première étape de la méthode WSHM, ont été utilisées pour réaliser cette étape et ainsi « Identifier les situations dangereuses générées par une réponse d'un opérateur à une dérive technique ».

6.4.2. Déroulement

Le tableau à compléter au sein de cette étape de la méthode WSHM est celui proposé dans le chapitre 4 (Tableau 4).

Lors du remplissage du tableau, les modes de défaillance sont notés par le groupe de travail en utilisant les modes de défaillance usuels, adaptés aux activités (au lieu de fonction).

Exemple : Défaillance en fonctionnement, activité dégradée

Les déviations de caractéristiques définissant une dérive d'un objet, d'un flux ou d'une interaction ont, quant à elles, été notées :

- « Mot clé HazOp » « caractéristique » « Nom de l'objet/flux/interaction »

Exemples :

- o Flux : Moins de débit (flux de) Pièce01 ;
- o Objet : Autre que forme Pièce09 ;
- o Interaction : Plus de fréquence Ouverture porte12.

Les sections suivantes présentent la démarche pour compléter ce tableau sous-étape par sous-étape :

6.4.2.1. Déterminer les modes de défaillance situation « boîte noire », leurs causes et leurs effets (R2.1)

Au cours de cette première sous-étape, le groupe de travail a étudié la situation de travail vue de l'extérieur (vue « boîte noire ») et a étudié l'activité de celle-ci par la méthode AMDEC-HazOp (voir Chapitre 4 ; (Reitz et al. 2012)).

Le groupe de travail a identifié deux modes de défaillance pouvant conduire à des réponses de l'opérateur : le fonctionnement dégradé et la défaillance en fonctionnement.

Le résultat de l'analyse dysfonctionnelle de l'activité liée à « SituationT » est présenté dans le Tableau 8.

Acteurs	Activités	Dérives techniques						
		Modes de défaillance	Causes internes	Causes externes	F	Effets locaux (/Produits)	Effets au niveau supérieur	
							/Ac teu r)	/P ro d ui ts)
Situation T (ST)	Assembl er pièces 01 et 09 en produits 0109	Activité dégradée (AD)	-	Autre ¹⁴ pression EP Autre tension EE Moins de débit pièce01 Moins de débit pièce09	2	Moins de débit produits 0109	-	-
		Défaillance en fonctionnement (DF)	-	Pas d'EP Pas d'EE Pas de débit pièce01 Pas de débit pièce09	2	Pas de débit produits 0109	-	-

Tableau 8 : Résultat de l'application de la sous-étape R2.1

6.4.2.2. Déterminer les modes de défaillance situation « boîte blanche », leurs causes et leurs effets (R2.2)

Après avoir identifié les modes de défaillance (et leurs causes/effets) de l'activité réalisée par la situation de travail étudiée, le groupe de travail a étudié les activités réalisées par les machines au sein de la situation de travail. Dans le cas de la situation de travail étudiée, la situation de travail « SituationT » n'est composée que d'une machine : « poste_3 ».

Le groupe de travail a identifié cinq modes de défaillance de l'activité du « poste_3 ». Deux seront présentés ici. Ce sont ceux qui, en déroulant l'analyse, génèrent au moins une réponse de l'opérateur : le fonctionnement dégradé et la défaillance en fonctionnement.

Le résultat de l'analyse dysfonctionnelle AMDEC_HazOp de l'activité liée à « poste_3 » est présenté dans le Tableau 9 (les éléments complétés lors d'étapes précédentes sont présentés en grisé).

¹⁴ Pour les intensités de flux « autre » est utilisé pour regrouper les mots clé « plus de » et « moins de ».

Acteurs	Activités	Dérives techniques						
		Modes de défaillance	Causes internes	Causes externes	F	Effets locaux (/Produits)	Effets au niveau supérieur	
							(/Acteur)	(/Produits)
Situation T (ST)	Assembler pièces 01 et 09 en produits 0109	Activité dégradée (AD)	AD Poste_3	Autre pression EP Autre tension EE Moins de débit pièce01 Moins de débit pièce09	2	Moins de débit produits 0109	-	-
		Défaillance en fonctionnement (DF)	DF Poste_3	Pas d'EP Pas d'EE Pas de débit pièce01 Pas de débit pièce09	2	Pas de débit produits 0109	-	-
Poste_3 (P3)	Assembler produits 0109 sur palette	AD	-	Autre pression EP Autre tension EE Moins de débit pièce01 Moins de débit pièce09 Moins de débit palette	2	Moins de débit produits 0109	AD ST	Moins de débit produits 0109
		DF	-	Pas d'EP Pas d'EE Pas de débit pièce01 Pas de débit pièce09 Pas de palette	2	Pas de débit produits 0109	DF ST	Pas de débit produits 0109

Tableau 9: Résultat de l'application de la sous-étape R2.2

6.4.2.3. Déterminer les modes de défaillance machine « boîte blanche », leurs causes et leurs effets (R2.3)

Après avoir identifié les modes de défaillance (et leurs causes/effets) de l'activité réalisée par la machine au sein de la situation de travail étudiée, le groupe de travail a étudié les activités réalisées par les composants de cette machine.

Dans le cadre de ce cas d'étude, les composants suivants ont été étudiés : « Alim_1 », « Alim_2 », « Bras robotisé Manip », « Orient_0 » et « Convoyeur ».

Le groupe de travail a identifié plusieurs modes de défaillance de l'activité pour chaque activité réalisée par un de ces composants.

Le résultat de l'analyse dysfonctionnelle AMDEC-HazOp des activités liées aux composants du « poste_3 » est présenté dans le Tableau 10 (les éléments complétés lors d'étapes précédentes sont présentés en gris).

Acteurs	Activités	Dérives techniques						
		Modes de défaillance	Causes internes	Causes externes		Effets locaux (/Produits)	Effets au niveau supérieur	
							(/Acteur)	(/Produits)
Poste_3 (P3)	Assembler produits0109 sur palette	AD	AD A1 AD A2 AD C	Autre pression EP Autre tension EE Moins de débit pièce01 Moins de débit pièce09 Moins de débit palette	2	Moins de débit produits 0109	AD ST	Moins de débit produits 0109
		DF	DF A1 DF A2 DF O DF M	Pas d'EP Pas d'EE Pas de débit pièce01 Pas de débit pièce09 Pas de palette	1	Pas de débit produits 0109	DF ST	Pas de Débit produits 0109
Alim_1 (A1)	Déplacer Pièce01 : Magasin_1 > P1	AD « Déplacement ralenti »	-	Moins de pression EP	2	Moins de débit pièce01	AD P3	Moins de débit palette Moins de débit produits 0109
		DF « EjectionPièce01 »	-	Plus de pression EP	2	Pas de débit pièce 01 Autre ¹⁵ position pièce01	DF P3	Pas de débit palette Pas de débit produits 0109
		DF	-	Pas d'EP Pas de débit pièce01	1	Pas de débit pièce 01	DF P3	Pas de débit Palette Pas de débit produits 0109
Alim_2 (A2)	Déplacer Pièce09 : Magasin_2 > P2	AD « Déplacement ralenti »	-	Moins de pression EP	2	Moins de débit pièce09	AD P3	Moins de débit palette Moins de débit produits 0109
		DF « Ejection Pièce09 »	-	Plus de pression EP	2	Pas de débit pièce 09 Autre position pièce 09	DF P3	Pas de débit Palette Pas de débit produits 0109
		DF	-	Pas d'EP Pas de débit pièce09	1	Pas de débit pièce 09	DF P3	Pas de débit palette Pas de débit produits 0109
Bras robot manip (MA)	Déplacer Pièce01 : P1>P0	DF « Laisse tomber la pièce »	-	Moins de pression EP	2	Pas de débit pièce 01 Autre position pièce01	DF P3	Pas de débit palette Pas de débit produits 0109
	Déplacer Pièce01 : P0>Palette							

¹⁵ Pour les positions de produits « autre » indique une déviation de la position par rapport à ce qui est attendu.

Acteurs	Activités	Dérives techniques						
		Modes de défaillance	Causes internes	Causes externes		Effets locaux (Produits)	Effets au niveau supérieur	
							(/Acteur)	(/Produits)
	Déplacer Pièce09 : P2>P0	DF « Laisse tomber la pièce »	-	Moins de pression EP	2	Pas de débit pièce 09 Autre position pièce09	DFP ₃	Pas de débit palette Pas de débit produits 0109
	Déplacer Pièce09 : P0>Palette							
Orient_0 (O)	Indexer Pièce01	DF « Indexage bloqué »	-	Pas de pression EP Pas de tension EE	2	Pas de débit pièce 01	DF _{P3}	Pas de débit palette Pas de débit produits 0109
	Indexer Pièce09	DF « Indexage bloqué »	-	Pas de pression EP Pas de tension EE	2	Pas de débit pièce 09	DF _{P3}	Pas de débit Palette Pas de débit produits 0109
Convoyeur (C)	Déplacée palette : Entrée > ZdT	AD « Déplacement ralenti »	-	Moins de tension EE	2	Moins de débit palette	AD _{P3}	Moins de débit palette Moins de débit produits 0109
	Déplacée palette : ZdT > Sortie	AD « Déplacement ralenti »	-	Moins de tension EE	2	Moins de débit palette Moins de débit produits 0109	AD _{P3}	Moins de débit palette Moins de débit produits 0109
		AD « Déplacement partiel »	-	Moins de tension EE	2	Autre position palette	AD _{P3}	Autre position palette

Tableau 10: Résultat de l'application de la sous-étape R2.3

A la fin de cette sous-étape, les dérives techniques potentielles, ainsi que leurs causes et leurs effets, ont été identifiés par le groupe de travail. Certaines de ces dérives techniques peuvent être perçues par l'opérateur par la dérive ou l'émergence d'interactions.

6.4.2.4. Déterminer les dérives/émergences d'interaction permettant à l'opérateur de percevoir la dérive technique (R2.4)

Pour chaque dérive technique (modes de défaillance d'activité supportée par une machine ou composant de celle-ci et/ou les effets de celle-ci sur un flux sortant), le groupe de travail a identifié les dérives d'interactions Machine sur Homme et Produits sur Homme, conséquences de ces dérives techniques.

Les dérives d'interactions identifiées sont :

- Diminution de la fréquence de l'interaction « Détection visuelle de la palette en sortie de poste » (lors de l'activité « Extraire palette en sortie de poste ») ;
- Modification du contenu (attribut « variables ») de l'interaction « Détection visuelle de la palette en sortie de poste » : avant son extraction, la palette est détectée à une

position plus éloignée de l'opérateur que prévue, l'opérateur perçoit la dérive de position de la palette ;

Les émergences d'interactions identifiées sont :

- L'émergence d'une interaction sensorielle du « poste_3 » vers l'opérateur : « Détection visuelle d'un arrêt de la machine » ;
- L'émergence d'une interaction sensorielle d'une pièce (01 ou 09) vers l'opérateur si celle-ci se trouve sur le sol (dans l'espace de travail) : « Détection visuelle pièce sur le sol » ;
- L'émergence d'une interaction sensorielle d'une pièce (01 ou 09) vers l'opérateur si celle-ci se trouve dans le composant « NappeCablesAlimentations » de la machine : « Détection visuelle pièce dans la nappe de câbles » ;

Le groupe de travail identifie ensuite la difficulté de détection de chacune de ces dérives / émergences d'interaction :

- La dérive de fréquence l'interaction « Détection visuelle de la palette en sortie de poste » est détectable si l'opérateur connaît / est habitué à la situation de travail (ND de 2) ;
- La dérive de forme de l'interaction « Détection visuelle de la palette en sortie de poste » est détectable si l'opérateur connaît / est habitué à la situation de travail (ND de 2) ;
- L'interaction émergente « Détection visuelle d'un arrêt de la machine » est détectable sans connaissance à priori de la machine (ND de 1) ;
- L'interaction émergente « Détection visuelle pièce sur le sol » est détectable sans connaissance à priori de la machine (ND de 1) ;
- L'interaction émergente « Détection visuelle pièce dans la nappe de câbles » est détectable sans connaissance à priori de la machine (ND de 1).

Le résultat de l'identification des dérives et émergences d'interactions Machine-Homme et Produits-Homme est présenté dans le Tableau 11 (les éléments complétés lors d'étapes précédentes sont présentés en grisé). Le groupe de travail considère que chacune des dérives / émergences ainsi identifiées est considérée comme perceptible par un opérateur. Il faut donc identifier comment l'opérateur réagit face à chacune des dérives techniques.

Act	Activités	Dérives techniques					Perceptions	
		MD	C a u s e s / F	EL (/Produits)	ENS		Interactions dérivées ou émergentes M sur H ou P sur H	N D
					(/Act)	(/Produits)		
P3	Assembler produits 0109 sur palette	AD		Moins de débit produits 0109	AD ST	Moins de débit produits 0109 ...	Moins de fréquence Détection visuelle de palette en sortie de poste ...	2
		DF		Pas de Débit produits 0109	DF ST	Pas de Débit produits 0109...	(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine	1
A1	Déplacer Pièce01 : Magasin_1 > P1	AD « Dépl. ralenti »		Moins de débit pièce01	AD P3	Moins de débit produits 0109 ...	Moins de fréquence Détection visuelle de palette en sortie de poste ...	2
		DF « Eject. Pièce01 »		Pas de débit pièce 01 Autre position pièce01	DF P3	Pas de débit produits 0109 ...	(Emergence) Détection visuelle pièce sur le sol...	1
							(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine...	1
							(Emergence) Détection visuelle pièce dans la nappe de cables...	2
DF		Pas de débit pièce 01	DF P3	Pas de Débit produits 0109 ...	(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine...	1		
A2	Déplacer Pièce09 : Magasin_2 > P2	AD « Dépl. ralenti »		Moins de débit pièce09	AD P3	Moins de débit produits 0109...	Moins de fréquence Détection visuelle de palette en sortie de poste ...	2
		DF « Eject. Pièce09 »		Pas de débit pièce 09 Autre position pièce 09	DF P3	Pas de débit produits 0109 ...	(Emergence) Détection visuelle pièce sur le sol...	1
							(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine...	1
							(Emergence) Détection visuelle pièce dans la nappe de cables...	2
DF		Pas de débit pièce 09	DF P3	Pas de Débit produits 0109 ...	(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine...	1		
MA	Déplacer Pièce01 : P1>P0	DF « Laisse tomber la pièce »		Pas de débit pièce 01 Autre position pièce01	DF P3	Pas de débit produits 0109 ...	(Emergence) Détection visuelle pièce sur le sol...	1
							(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine...	1
	Déplacer Pièce09 : P0>Palet.	DF « Laisse tomber la pièce »		Pas de débit pièce 09 Autre position pièce09	DF P3	Pas de débit produits 0109 ...	(Emergence) Détection visuelle pièce dans la nappe de cables...	2
							(Emergence) Détection visuelle pièce sur le sol...	1
O	Indexer Pièce01	DF « Index. bloqué »		Pas de débit pièce 01	DF P3	Pas de débit produits 0109 ...	(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine	1
	Indexer Pièce09	DF « Index. bloqué »		Pas de débit pièce 09	DF P3	Pas de débit produits 0109 ...	(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine	1
C	Déplacer palette : Entrée > ZdT	AD « Dépl. ralenti »		Moins de débit palette	AD P3	Moins de débit produits 0109 ...	Moins de fréquence Détection visuelle de palette en sortie de poste ...	2
	Déplacer palette : ZdT > Sortie	AD « Dépl. ralenti »		Moins de débit palette Moins de débit produits 0109	AD P3	Moins de débit produits 0109 ...	Moins de fréquence Détection visuelle de palette en sortie de poste ...	2
		AD « Dépl. partiel »		Autre position palette	AD P3	Autre position palette	Autre message Détection visuelle de palette en sortie de poste ...	2

Tableau 11 : Résultat de l'application de la sous-étape R2.4

6.4.2.5. Déterminer les dérives/émergences d'interaction lors des potentielles réponses de l'opérateur (R2.5)

Le groupe de travail a discuté des différentes réponses potentielles **raisonnablement prévisibles** aux dérives techniques perçues identifiées (Tableau 12). Lors de l'émergence de l'interaction sensorielle « Détection visuelle d'un arrêt machine par l'opérateur » :

- Dans le cas où la pièce se situe à une position en attente de déplacement : l'opérateur ouvre la porte 12 ou 03 et réalise manuellement le déplacement de la pièce d'une position à une autre. Ces deux actions donnent lieu à l'émergence d'une interaction physique Homme sur produits au cours du déplacement de la pièce, ainsi qu'à une augmentation de la fréquence d'ouverture des portes 12 ou 03 ;
- Dans le cas où une pièce se situe dans la position P0 (indexage) : l'opérateur ouvre la porte 03 et indexe manuellement la pièce. Ces actions donnent lieu à l'émergence d'une interaction physique Homme sur produits au cours du déplacement de la pièce, ainsi qu'à l'émergence d'une interaction physique Homme sur machine avec le composant de la machine « Orient_0 » et à une augmentation de la fréquence d'ouverture des portes 03 ;
- Dans le cas où l'opérateur perçoit la pièce manquante sur le sol (« Détection visuelle pièce sur le sol »), celle-ci n'étant pas accessible, l'opérateur ouvre la porte 12 ou 03 et place une pièce de même type que la pièce manquante, prise dans le stock de pièces en entrée, à la position attendue. Ces actions donnent lieu à l'émergence d'une interaction physique Homme sur produits au cours du déplacement de la pièce, ainsi qu'à une augmentation de la fréquence d'ouverture des portes 12 ou 03 ;
- Dans le cas où l'opérateur perçoit la pièce manquante dans la nappe (« Détection visuelle pièce dans la nappe de câbles »), l'opérateur ouvre la porte 12 ou 03, récupère la pièce dans la nappe et place la pièce récupérée à la position attendue. Ces actions donnent lieu à l'émergence d'une interaction physique Homme sur produits au cours du déplacement de la pièce. Elles donnent également lieu à l'émergence d'une interaction physique Homme sur machine avec le composant de la machine « NappeCablesAlimentations » et à une augmentation de la fréquence d'ouverture des portes 12 ou 03 ;

Remarque : il est à noter que les réponses identifiées requièrent de l'opérateur une certaine connaissance du processus d'assemblage, pour identifier le composant n'ayant pas réalisé la transformation en position ou en forme de pièce, et ainsi réaliser cette transformation à la place de la machine.

Lors de la dérive de la variable « position palette » transmise par l'interaction sensorielle « Détection visuelle palette en sortie de poste par l'opérateur », l'opérateur perçoit que la palette n'est pas entièrement sortie du poste et celui-ci doit donc se pencher pour la récupérer. Il y a alors dérive de l'interaction physique « Déplacement manuel de la palette par l'opérateur » et plus particulièrement de la zone d'interaction de cette dernière. Lors de la dérive de fréquence de l'interaction « Détection visuelle palette en sortie de poste par l'opérateur », l'opérateur perçoit la dérive, mais n'a pas de réponse appropriée : le groupe a considéré que l'opérateur ne répond pas aux ralentissements d'activités.

Act	Activités	Dérives techniques		Perceptions		Réponses	
		MD	...	Interactions dérivées ou émergentes M sur H ou P sur H	N D	Interactions dérivées ou émergentes H sur M ou H sur P	
P3	Assembler produits 0109 sur palette	AD		Moins de fréquence Détection visuelle de palette en sortie de poste ...	2	-	
		DF		(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine	1	Plus de fréq. Ouverture porte 12... Plus de fréq. Ouverture porte 03...	
A1	Déplacer Pièce01 : Magasin 1 > P1	AD « Dépl. ralenti »		Moins de fréquence Détection visuelle de palette en sortie de poste ..	2	-	
		DF « Eject. Pièce01 »		(Emergence) Détection visuelle pièce sur le sol...	1	Plus de fréq. Ouverture porte 12... (Emergence)Dépl.Manuel.Pièce01 : stock > P1...	
				(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine...	1	Plus de fréq. Ouverture porte 12... (Emergence)Dépl.Manuel.Pièce01 : nappe > P1...	
				(Emergence) Détection visuelle pièce dans la nappe de cables...	2	Plus de fréq. Ouverture porte 12... (Emergence)Dépl.Manuel.Pièce01 : ..> P1...	
		DF		(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine...	1	Plus de fréq. Ouverture porte 12... (Emergence)Dépl.Manuel.Pièce01 : ..> P1...	
A2	Déplacer Pièce09 : Magasin 2 > P2	AD « Dépl. ralenti »		Moins de fréquence Détection visuelle de palette en sortie de poste ...	2	-	
		DF « Eject. Pièce09 »		(Emergence) Détection visuelle pièce sur le sol...	1	Plus de fréq. Ouverture porte 12... (Emergence)Dépl.Manuel.Pièce09 : stock > P2...	
				(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine...	1	Plus de fréq. Ouverture porte 12... (Emergence)Dépl.Manuel.Pièce09 : nappe > P2...	
				(Emergence) Détection visuelle pièce dans la nappe de cables...	2	Plus de fréq. Ouverture porte 12... (Emergence)Dépl.Manuel.Pièce09 : ... > P2...	
		DF		(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine...	1	Plus de fréq. Ouverture porte 12... (Emergence)Dépl.Manuel.Pièce09 : ... > P2...	
MA	Déplacer Pièce01 : P1>P0	DF « Laisse tomber la pièce »		(Emergence) Détection visuelle pièce sur le sol...	1	Plus de fréq. Ouverture porte 03... (Emergence)Dépl.Manuel.Pièce01 : stock > P0...	
				(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine...	1	Plus de fréq. Ouverture porte 03... (Emergence)Dépl.Manuel.Pièce01 : nappe > P0...	
	Déplacer Pièce09 : P2>P0	DF « Laisse tomber la pièce »		(Emergence) Détection visuelle pièce sur le sol...	1	Plus de fréq. Ouverture porte 03... (Emergence)Dépl.Manuel.Pièce09 : stock > P0...	
				(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine...	1	Plus de fréq. Ouverture porte 03... (Emergence)Dépl.Manuel.Pièce09 : nappe > P0...	
	Déplacer Pièce09 : P0>Palet.	DF « Laisse tomber la pièce »		(Emergence) Détection visuelle pièce dans la nappe de cables...	2	Plus de fréq. Ouverture porte 03... (Emergence)Dépl.Manuel.Pièce09 : ...	
				(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine	1	Plus de fréq. Ouverture porte 03... (Emergence)Index.Manuel.Pièce01 ...	
O	Indexer Pièce01	DF « Index. bloqué »		(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine	1	Plus de fréq. Ouverture porte 03... (Emergence)Indexl.Manuel.Pièce09 ...	
	Indexer Pièce09	DF « Index. bloqué »		(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine	1	Plus de fréq. Ouverture porte 03... (Emergence)Indexl.Manuel.Pièce09 ...	
C	Déplacer palette : Entrée > ZdT	AD « Dépl. ralenti »		Moins de fréquence Détection visuelle de palette en sortie de poste ...	2	-	
	Déplacer palette : ZdT > Sortie	AD « Dépl. ralenti »		Moins de fréquence Détection visuelle de palette en sortie de poste ...	2	-	
		AD « Dépl. partiel »		Autre message Détection visuelle de palette en sortie de poste ...	2	Autre zone d'interaction Déplacement manuel palette ...	

Tableau 12 : Résultat de l'application de la sous-étape R2.5

6.4.2.6. Estimer les risques pour chaque réponse potentielle de l'opérateur (R2.6)

Après avoir identifié les réponses potentielles de l'opérateur aux dérives techniques, le groupe de travail a estimé la gravité, puis le risque de chacune de ces réponses.

Les réponses faisant émerger les interactions :

- « Déplacement manuel de pièce01 : stock > P1 par l'opérateur » ;
- « Déplacement manuel de pièce09 : stock > P2 par l'opérateur » ;
- « Déplacement manuel de pièce01 : ... > P1 par l'opérateur » ;
- « Déplacement manuel de pièce09 : ... > P2 par l'opérateur » ;
- « Déplacement manuel de pièce01 : stock > P0 par l'opérateur » ;
- « Déplacement manuel de pièce09 : stock > P0 par l'opérateur » ;
- « Déplacement manuel de pièce01 : ... > P0 par l'opérateur » ;
- « Déplacement manuel de pièce09 : ... > P0 par l'opérateur » .

ont été considérées comme non-dangereuses car l'opérateur ne rentre dans aucune zone dangereuse.

Les réponses augmentant la fréquence des interactions « Ouverture de porte 12 par opérateur » et « Ouverture de porte 03 par opérateur » sans action sur un autre composant ont été considérées non-dangereuses, même si celles-ci pourraient engendrer des Troubles-Musculo-Squelettiques si la situation se prolongeait.

Les réponses faisant émerger les interactions « Indexage manuel de pièce01 par l'opérateur » et « Indexage manuel de pièce09 par l'opérateur » ont été considérées comme dangereuses du fait de la zone d'interaction se trouvant dans une zone de danger mécanique (risque de pincement avec la roue de l'indexeur « Orient_0 » composant de la machine « poste_3 »). Ces situations potentiellement dangereuses se sont vues attribuer un indice de gravité (G) de 2.

Les réponses faisant émerger les interactions « Déplacement manuel de pièce01 : nappe > P1 par l'opérateur », « Déplacement manuel de pièce09 : nappe > P2 par l'opérateur », « Déplacement manuel de pièce01 : nappe > P0 par l'opérateur » et « Déplacement manuel de pièce09 : nappe > P0 par l'opérateur » ont été considérées comme dangereuses du fait de la zone d'interaction se trouvant dans une zone de danger électrique (phénomène dangereux électrique généré par le composant « NappeCablesAlimentations » du « poste_3 », certains des câbles se trouvant dans cette nappe étant peu fixés à leurs cosses). Ces situations potentiellement dangereuses se sont vues attribuer un indice de gravité (G) de 3.

La réponse modifiant la zone d'interaction de l'interaction « Déplacement manuel palette par l'opérateur » a été considérée comme dangereuse car elle engendre une posture contraignante de l'opérateur si la zone d'interaction se rapproche du poste. Cette situation dangereuse s'est vue attribuer un indice de gravité (G) de 3.

Après avoir identifié les différentes situations potentiellement dangereuses en cas de réponse de l'opérateur à une dérive technique, le groupe de travail a conclu cette partie par le calcul de la Criticité (C) de ces dernières (Tableau 13).

Acteurs	Activités	Modes de défaillance	Causes internes	Dérives techniques			Perceptions		Réponses		C	
				Causes externes	F	Effets locaux (Produits)	Effets au niveau supérieur (Produits)	Interactions dérivées ou émergentes M sur H ou P sur H	ND	Interactions dérivées ou émergentes H sur M ou H sur P		Phénomènes dangereux
Alim_1 (A1)	Déplacer Pièce01 : Magasin 1 > P1	DF « Ejection Pièce01 »	-	Plus de pression EP	2	Pas de débit pièce 01 Autre position pièce01	DF P3	Pas de débit palette Pas de débit produits 0109	1	-	3	12
Alim_2 (A2)	Déplacer Pièce09 : Magasin 2 > P2	DF « Ejection Pièce09 »	-	Plus de pression EP	2	Pas de débit pièce 09 Autre position pièce 09	DF P3	Pas de débit palette Pas de débit produits 0109	1	-	3	12
Bras robot manip (MA)	Déplacer Pièce01 : P1 > P0 Déplacer Pièce01 : P0 > Palett e	DF « Laisse tomber la pièce »	-	Moins de pression EP	2	Pas de débit pièce 01 Autre position pièce01	DF P3	Pas de débit palette Pas de débit produits 0109	1	-	3	12
Convoyeur (O)	Indexer Pièce01 Indexer Pièce09	DF « Indexage bloqué »	-	Moins de pression EP	2	Pas de débit pièce 09 Autre position pièce09	DF P3	Pas de débit palette Pas de débit produits 0109	1	-	3	12
Convoyeur (C)	Déplacer palette : ZcT > Sortie	AD « Déplacement partiel »	-	Moins de tension FF Pas de pression EP	2	Pas de débit pièce 01 Autre position palette	DF P3	Pas de débit palette Pas de débit produits 0109	1	-	2	8

Tableau 13 : Tableau final comprenant les situations potentiellement dangereuses et l'enchaînement y menant (causes)

6.4.3. Résultats de l'étape

A la fin de cette étape, le groupe de travail a identifié les différentes situations potentiellement dangereuses suite à des réponses d'un opérateur à une dérive technique, ainsi que les différentes causes de celles-ci. Ils ont choisi parmi ces dernières celles qui étaient significatives et dont l'apparition devait être surveillée.

Pour permettre la détection automatique et continue de l'apparition de ces situations potentiellement dangereuses, des indicateurs vont être générés à partir de ces informations au cours de la prochaine étape de la méthode WSHM : « Définir un indicateur d'état de santé de la situation de travail ».

Le tableau d'analyse complet réalisé par le groupe de travail est présenté dans l'Annexe C.

6.5. Application de la troisième étape de la méthode WSHM

6.5.1. Composition du groupe de travail

Le groupe de travail ayant appliqué la troisième étape de la méthode WSHM était composé de l'auteur de ce manuscrit, aidé par des personnels de l'AIP Lorrain et d'un enseignant-chercheur du CRAN, travaillant sur la plateforme Progress 4.0 dont fait partie le poste étudié.

Le contenu des documents techniques, ainsi que les informations issues de la deuxième étape de la méthode WSHM, ont été utilisés par le groupe de travail pour réaliser cette étape et ainsi « Définir un indicateur d'état de santé de la situation de travail ».

6.5.2. Déroulement

6.5.2.1. Choisir les variables à surveiller (R3.1)

Dans un premier temps, le groupe de travail s'est penché sur le choix des variables à surveiller pour chaque situation de travail potentiellement dangereuse identifiée. Pour chaque informations contenues dans les résultats de l'application de la deuxième étape de la méthode WSHM

Acteurs	Activités	Dérives techniques						Perceptions		Réponses	
		Modes de défaillance	Causes internes	Causes externes	F	Effets locaux (/Produits)	Effets au niveau supérieur		Interactions dérivées ou émergentes M sur H ou P sur H		ND
							((Acteur))	(/Produits)			
Alim_1 (A1)	Déplacer Pièce01 : Magasin_1 > P1	DF « EjectionPièce01 »	-	Plus de pression EP	2	Pas de débit pièce 01 Autre position pièce01	DF P3	Pas de débit palette Pas de débit produits 0109	(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine...	1	-
									(Emergence) Détection visuelle pièce dans la nappe de câble...	2	(Emergence)Dépl.Manuel.Pièce01 : nappe > P1...
Alim_2 (A2)	Déplacer Pièce09 : Magasin_2 > P2	DF « Ejection Pièce09 »	-	Plus de pression EP	2	Pas de débit pièce 09 Autre position pièce 09	DF P3	Pas de débit palette Pas de débit produits 0109	(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine...	1	-
									(Emergence) Détection visuelle pièce dans la nappe de câble...	2	(Emergence)Dépl.Manuel.Pièce09 : nappe > P2...
Bras robot manip (MA)	Déplacer Pièce01 : P1>P0	DF « Laisse tomber la pièce »	-	Moins de pression EP	2	Pas de débit pièce 01 Autre position pièce01	DF P3	Pas de débit palette Pas de débit produits 0109	(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine...	1	-
	Déplacer Pièce01 : P0>Palett e								(Emergence) Détection visuelle pièce dans la nappe de câble...	2	(Emergence)Dépl.Manuel.Pièce01 : nappe > P0...
	Déplacer Pièce09 : P2>P0	DF « Laisse tomber la pièce »	-	Moins de pression EP	2	Pas de débit pièce 09 Autre position pièce09	DF P3	Pas de débit palette Pas de débit produits 0109	(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine...	1	-
	Déplacer Pièce09 : P0>Palett e								(Emergence) Détection visuelle pièce dans la nappe de câble...	2	(Emergence)Dépl.Manuel.Pièce09 : nappe > P0...
Convoyeur (C)	Déplacée palette : ZdT > Sortie	AD « Déplaceme partiel »	-	Moins de tension EE	2	Autre position palette	AD P3	Autre position palette	Autre message Détection visuelle de palette en sortie de poste ...	2	Autre zone d'interaction Déplacement manuel palette ...

Tableau 14), le groupe de travail a donc identifié des variables pouvant être utilisées (directement ou indirectement) pour détecter ces dérives à l'aide des documents techniques à disposition (Annexe A).

Dans le cas des situations potentiellement dangereuses lors de l'interaction entre la nappe de câbles électriques, le groupe de travail a identifié les variables pouvant être utilisées pour surveiller les dérives techniques menant à cette situation dangereuse :

- « Plus de pression EP » (Alim_) : un vérin alimenté avec une pression supérieure à ce qui est attendu sortira ou rentrera plus vite que prévu. Pour mesurer cette dérive, le groupe de travail propose d'utiliser une variable mesurant la durée de fermeture de chaque vérin en utilisant les capteurs de sortie/rentree tiges du vérin ;
Exemple : pour la durée de fermeture du vérin de l'Alim_1, la durée entre la désactivation du capteur « FCA1S » et l'activation du « FCA1R » est mesurée ;
- « Moins de pression EP » (Bras robotisé Manip) : si la pression diminue dans la ventouse, la durée d'activation du pressostat diminuera. Pour mesurer cette dérive, le groupe de travail propose d'utiliser la durée d'activation du pressostat « CPVENT » ;
- « Plus de fréquence ouverture porte 12 » : fréquence d'activation du capteur « OP12 » ;
- « Plus de fréquence ouverture porte 03 » : fréquence d'activation du capteur « OP03 ».

Acteurs	Activités	Dérives techniques						Perceptions		Réponses	
		Modes de défaillance	Causes internes	Causes externes	F	Effets locaux (Produits)	Effets au niveau supérieur		Interactions dérivées ou émergentes M sur H ou P sur H	ND	Interactions dérivées ou émergentes H sur M ou H sur P
							(Acteur)	(Produits)			
Alim_1 (A1)	Déplacer Pièce01 : Magasin_1 > P1	DF « Ejection Pièce01 »	-	Plus de pression EP	2	Pas de débit pièce 01 Autre position pièce01	DF P3	Pas de débit palette Pas de débit produits 0109	(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine...	1	-
									(Emergence) Détection visuelle pièce dans la nappe de câble...	2	Plus de fréq. Ouverture porte 12... (Emergence)Dépl.Manuel.Pièce01 : nappe > P1...
Alim_2 (A2)	Déplacer Pièce09 : Magasin_2 > P2	DF « Ejection Pièce09 »	-	Plus de pression EP	2	Pas de débit pièce 09 Autre position pièce 09	DF P3	Pas de débit palette Pas de débit produits 0109	(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine...	1	-
									(Emergence) Détection visuelle pièce dans la nappe de câble...	2	Plus de fréq. Ouverture porte 12... (Emergence)Dépl.Manuel.Pièce09 : nappe > P2...
Bras robot manip (MA)	Déplacer Pièce01 : P1>P0 Déplacer Pièce01 : P0>PaLETTE	DF « Laisse tomber la pièce »	-	Moins de pression EP	2	Pas de débit pièce 01 Autre position pièce01	DF P3	Pas de débit palette Pas de débit produits 0109	(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine...	1	-
									(Emergence) Détection visuelle pièce dans la nappe de câble...	2	Plus de fréq. Ouverture porte 03... (Emergence)Dépl.Manuel.Pièce01 : nappe > P0...
Convoyeur (C)	Déplace palette : ZdT > Sortie	AD « Déplaceme partiel »	-	Moins de tension EE	2	Autre position palette	AD P3	Autre position palette	Autre message Détection visuelle de palette en sortie de poste ...	2	Autre zone d'interaction Déplacement manuel palette ...

Tableau 14 : Dérives qu'on souhaite surveiller

Dans le cas des situations potentiellement dangereuses suite à une mauvaise posture de l'opérateur lors d'une dérive de l'interaction « Déplacement manuel palette par opérateur », le groupe de travail a identifié la variable pouvant être utilisée pour surveiller la dérive technique menant à cette situation dangereuse :

- « Moins de tension EE » (Convoyeur) : si le moteur électrique d'un convoyeur est sous-alimenté celui-ci déplacera plus lentement les palettes. Pour mesurer cette dérive, le groupe de travail propose d'étudier la durée entre la détection en entrée du poste par le capteur « DPaiP » et la détection en zone de travail par le capteur « PPaiP ».

6.5.2.2. Définir les indicateurs de déviation (R3.2.)

A partir des variables identifiées et des déviations à observer, le groupe de travail a construit les indicateurs de déviation suivant :

- L'indicateur de la déviation « plus de pression en entrée d'Alim_1 », équivalent à « moins de durée déplacement vérin Alim_1 », a été noté « $d_{PA1}(t)$ ». $PA1(t)$ est la mesure de la durée, en secondes, entre la désactivation du capteur FCA1S et l'activation du capteur FCA1R. La valeur attendue de $PA1(t)$ est de 5 s. $PA1_{-}$ est estimée à 4 s et $PA1_{m-}$ est estimée 3 s. L'indicateur de déviation $d_{PA1}(t)$ est donc calculé de la manière présentée dans le système d'Équation 7 :

$$\text{Si } PA1(t) \in]3 ; 4[\text{ alors } d_{PA1}(t) = - \left| \frac{4 - PA1(t)}{1} \right|$$

$$\text{Si } PA1(t) \geq 4 \text{ alors } d_{PA1}(t) = 0$$

$$\text{Si } PA1(t) \leq 3 \text{ alors } d_{PA1}(t) = -1$$

Équation 7: Calcul de $d_{PA1}(t)$, l'indicateur de déviation de $PA1(t)$

- L'indicateur de la déviation « plus de pression en entrée d'Alim_2 », équivalent à « moins de durée déplacement vérin Alim_2 », a été noté « $d_{PA2}(t)$ ». $PA2(t)$ est la mesure de la durée, en secondes, entre la désactivation du capteur FCA2S et l'activation du capteur FCA2R. La valeur attendue de $PA2(t)$ est de 5 s. $PA2_{-}$ est estimée à 4 s et $PA2_{m-}$ est estimée 3 s. L'indicateur de déviation $d_{PA2}(t)$ est donc calculé de la manière présentée dans le système d'Équation 8 :

$$\text{Si } PA2(t) \in]3 ; 4[\text{ alors } d_{PA2}(t) = - \left| \frac{4 - PA2(t)}{1} \right|$$

$$\text{Si } PA2(t) \geq 4 \text{ alors } d_{PA2}(t) = 0$$

$$\text{Si } PA2(t) \leq 3 \text{ alors } d_{PA2}(t) = -1$$

Équation 8: Calcul de $d_{PA2}(t)$, l'indicateur de déviation de $PA2(t)$

- L'indicateur de la déviation « moins de pression en entrée de la ventouse de manip », équivalent à « moins de durée d'activation de pressostat » a été noté « $d_{PVM}(t)$ ». $PVM(t)$ est la mesure de la durée, en secondes, d'activation du capteur CPVENT. La valeur attendue de $PVM(t)$ est de 5 s. PVM_{-} est estimée à 4 s et PVM_{m-} est estimée 3 s. L'indicateur de déviation $d_{PVM}(t)$ est donc calculé de la manière présentée dans le système d'Équation 9 :

$$\text{Si } PVM(t) \in]3 ; 4[\text{ alors } d_{PVM}(t) = - \left| \frac{4 - PVM(t)}{1} \right|$$

$$\text{Si } PVM(t) \geq 4 \text{ alors } d_{PVM}(t) = 0$$

$$\text{Si } PVM(t) \leq 3 \text{ alors } d_{PVM}(t) = -1$$

Équation 9: Calcul de $d_{PVM}(t)$, l'indicateur de déviation de $PVM(t)$

- L'indicateur de la déviation « moins de tension en entrée du convoyeur », équivalent à « plus de durée de déplacement entre entrée du poste et zone de travail », a été noté « $d_{CEP}(t)$ ». $CEP(t)$ est la mesure de la durée, en secondes, entre la désactivation du capteur DPaIP et l'activation du capteur PPaIP. La valeur attendue de $CEP(t)$ est de 10 s. CEP_{+} est estimée à 12 s et CEP_{m+} est estimée 15 s. L'indicateur de déviation $d_{CEP}(t)$ est donc calculé de la manière présentée dans le système d'Équation 10 :

$$\text{Si } CEP(t) \in]12 ; 15[\text{ alors } d_{CEP}(t) = \left| \frac{CEP(t) - 12}{3} \right|$$

$$\text{Si } CEP(t) \leq 12 \text{ alors } d_{CEP}(t) = 0$$

$$\text{Si } CEP(t) \geq 15 \text{ alors } d_{CEP}(t) = 1$$

Équation 10 : Calcul de $d_{CEP}(t)$, l'indicateur de déviation de $CEP(t)$

- L'indicateur de la déviation « plus de fréquence ouverture porte 12 par opérateur » a été noté « $d_{OP12}(t)$ ». $OP12(t)$ est la mesure de la fréquence d'activation du capteur $OP12$. La valeur attendue de $OP12(t)$ est de $0,003 \text{ s}^{-1}$. $OP12_+$ est estimée à $0,004 \text{ s}^{-1}$ et $OP12_{m+}$ est estimée $0,005 \text{ s}^{-1}$. L'indicateur de déviation $d_{OP12}(t)$ est donc calculé de la manière présentée dans le système d'Équation 11 :

$$\text{Si } OP12(t) \in]0.004 ; 0.005[\text{ alors } d_{OP12}(t) = \left| \frac{OP12(t) - 0.004}{0.001} \right|$$

$$\text{Si } OP12(t) \leq 0.004 \text{ alors } d_{OP12}(t) = 0$$

$$\text{Si } OP12(t) \geq 0.005 \text{ alors } d_{OP12}(t) = 1$$

Équation 11 : Calcul de $d_{OP12}(t)$, l'indicateur de déviation de $OP12(t)$

- L'indicateur de la déviation « plus de fréquence ouverture porte 03 par opérateur » : a été noté « $d_{OP03}(t)$ ». $OP03(t)$ est la mesure de la fréquence, en s^{-1} , d'activation du capteur $OP03$. La valeur attendue de $OP03$ est de 0 s^{-1} . $OP03_+$ est estimée à $0,0005 \text{ s}^{-1}$ et $OP03_{m+}$ est estimée $0,001 \text{ s}^{-1}$. L'indicateur de déviation $d_{OP03}(t)$ est donc calculé de la manière présentée dans le système d'Équation 12;

$$\text{Si } OP03(t) \in]0.0005 ; 0.001[\text{ alors } d_{OP03}(t) = \left| \frac{OP03(t) - 0.0005}{0.0005} \right|$$

$$\text{Si } OP03(t) \leq 0.0005 \text{ alors } d_{OP03}(t) = 0$$

$$\text{Si } OP03(t) \geq 0.001 \text{ alors } d_{OP03}(t) = 1$$

Équation 12: Calcul de $d_{OP03}(t)$, l'indicateur de déviation de $OP03(t)$

6.5.2.3. Définir le calcul des indicateurs de dérive (R3.3.)

Chaque indicateur de dérive utilisé a été calculé de la manière présentée dans le système d'Équation 13 en se basant sur les indicateurs de déviation :

$$\text{Si } d_x(t) > d_x(t - 1) \text{ alors } D_X(t) = D_X(t - 1) + d_x(t)$$

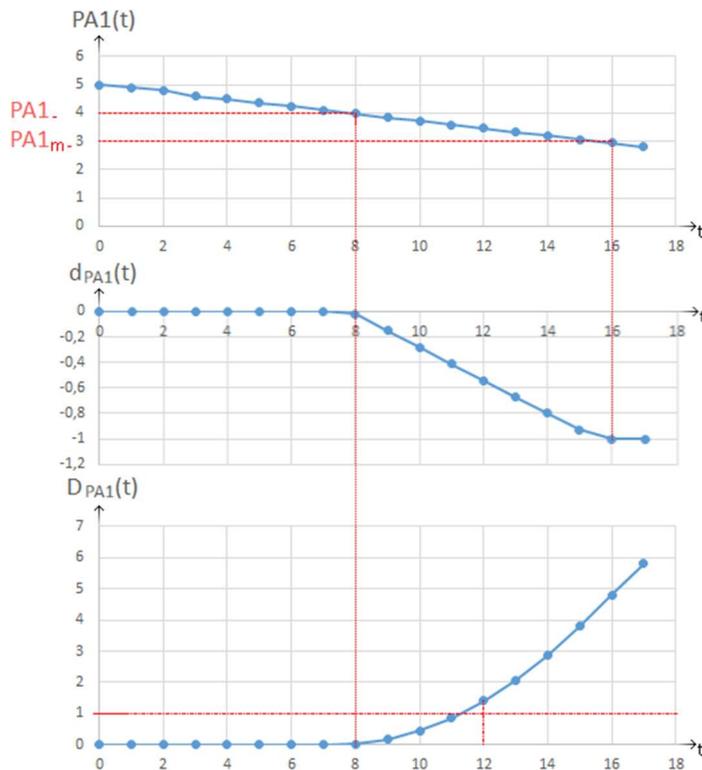
$$\text{Si } d_x = d_x(t - 1) \text{ alors } D_X(t) = D_X(t - 1)$$

$$\text{Si } d_x < d_x(t - 1) \text{ alors } D_X(t) = D_X(t - 1) - d_x(t)$$

Équation 13: Calcul d'un indicateur de dérive $D_X(t)$ en se basant sur un indicateur de déviation $d_x(t)$ de la variable $X(t)$

Chaque indicateur de dérive est par la suite initialisé à 0.

Exemple d'évolution de l'indicateur $D_{PAI}(t)$ au cours d'une dérive « plus de pression en entrée d'Alim_1 » illustré par la Figure 94, avec t mesuré en heure :



A $t=8$, la durée de sortie de la tige $PA1(t)$ sort de son intervalle nominal ce qui indique que la pression est également sortie de son intervalle nominal.

Dès cet instant, l'indicateur de déviation $d_{PA1}(t)$ devient inférieur à 0 et évolue vers -1.

Enfin $D_{PA1}(t)$ devient supérieur à 0 indiquant une dérive potentielle du vérin Alim_1. A $t=12$, $D_{PA1}(t)$ devient, cette fois, supérieur à 1 indiquant une dérive avérée du vérin Alim_1.

Figure 94 : Exemple d'évolution de l'indicateur $D_{PA1}(t)$ lors d'une dérive de la pression en entrée d'Alim_1

6.5.2.4. Définir le calcul des indicateurs de situation potentiellement dangereuse (R3.4.)

Le groupe de travail a construit les indicateurs de situation potentiellement dangereuse en se basant sur les indicateurs de dérives. L'indicateur ainsi obtenu donne une « image » de l'imminence de chacune de ces situations potentiellement dangereuses :

- L'indicateur de situation dangereuse d'origine électrique suite à une éjection de pièce01 par Alim_1 dans la nappe de câbles est noté « $SD_{ElecA1}(t)$ ». Le calcul de cet indicateur est présenté dans l'Équation 14.

Si $D_{PAI}(t) = 0$ alors $SD_{Elec}(t)$ est "Très Faible"
 Si $D_{PAI}(t) > 0$ alors $SD_{Elec}(t)$ est "Faible"
 Si $D_{PAI}(t) \geq 1$ alors $SD_{ElecA}(t)$ est "Moyenne"
 Si $D_{PAI}(t) \geq 1$ ET $D_{OP12}(t) > 0$ alors $SD_{Elec}(t)$ est "Forte"
 Si $D_{PAI}(t) \geq 1$ ET $D_{OP12}(t) \geq 1$ alors $SD_{ElecA}(t)$ est "Très Forte"

Équation 14: Calcul de l'indicateur $SD_{ElecA1}(t)$

- L'indicateur de situation dangereuse d'origine électrique suite à une éjection de pièce09 par Alim_2 dans la nappe de câbles est noté « $SD_{ElecA2}(t)$ ». Le calcul de cet indicateur est présenté dans l'Équation 15.

Si $D_{PA2}(t) = 0$ alors $SD_{ElecA}(t)$ est "Très Faible"
 Si $D_{PA2}(t) > 0$ alors $SD_{Elec}(t)$ est "Faible"
 Si $D_{PA2}(t) \geq 1$ alors $SD_{ElecA}(t)$ est "Moyenne"
 Si $D_{PA}(t) \geq 1$ ET $D_{OP12}(t) > 0$ alors $SD_{ElecA}(t)$ est "Forte"
 Si $D_{PA2}(t) \geq 1$ ET $D_{OP12}(t) \geq 1$ alors $SD_{Elec}(t)$ est "Très Forte"

Équation 15: Calcul de l'indicateur $SD_{ElecA2}(t)$

- L'indicateur de situation dangereuse d'origine électrique suite à une perte de pièce de pièce par le bras robotisé Manip_, dans la nappe de câbles est noté « $SD_{ElecM}(t)$ ». le calcul de cet indicateur est présenté dans l'Équation 16.

Si $D_{PVM}(t) = 0$ alors $SD_{ElecM}(t)$ est "Très Faible"

Si $D_{PVM}(t) > 0$ alors $SD_{ElecM}(t)$ est "Faible"

Si $D_{PVM}(t) \geq 1$ alors $SD_{ElecM}(t)$ est "Moyenne"

Si $D_{PVM}(t) \geq 1$ ET $D_{OP03}(t) > 0$ alors $SD_{ElecM}(t)$ est "Forte"

Si $D_{PVM}(t) \geq 1$ ET $D_{OP03}(t) \geq 1$ alors $SD_{ElecM}(t)$ est "Très Forte"

Équation 16: Calcul de l'indicateur $SD_{ElecM}(t)$

- L'indicateur de situation dangereuse due à une mauvaise posture de l'opérateur est noté « $SD_{PostureP}(t)$ ». Il est à noter qu'ici, seul un indicateur de dérive de flux de produits sortants (effet local) est disponible, on ne peut donc calculer que trois lignes sur cinq. Le calcul de cet indicateur est présenté dans l'Équation 17.

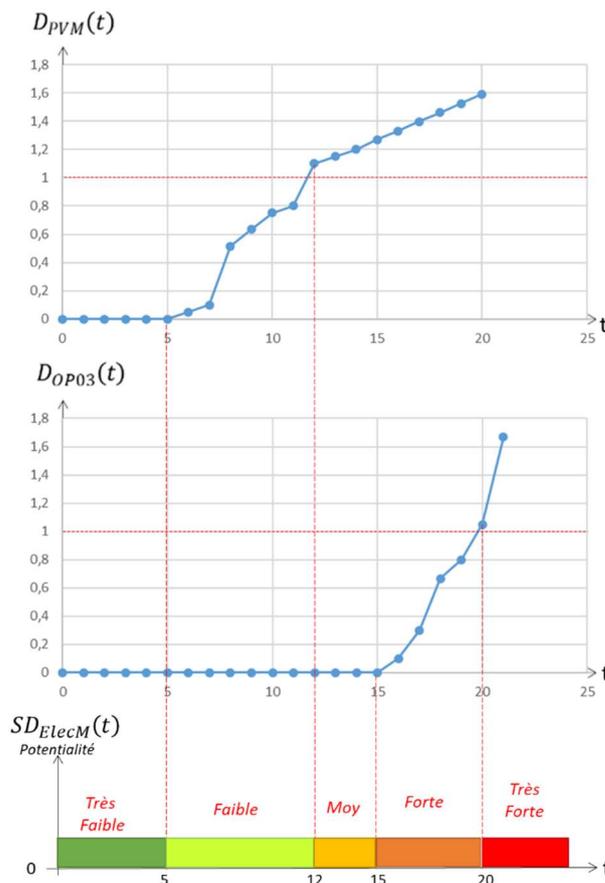
Si $D_{CEP}(t) = 0$ alors $SD_{PostureP}(t)$ est "Très Faible"

Si $D_{CEP}(t) > 0$ alors $SD_{PostureP}(t)$ est "Forte"

Si $D_{CEP}(t) \geq 1$ alors $SD_{PostureP}(t)$ est "Très Forte"

Équation 17: Calcul de l'indicateur $SD_{PostureP}(t)$

Exemple d'évolution de l'indicateur $SD_{ElecM}(t)$, lorsque la situation dérive vers une situation dangereuse liée à une perte de pièce dans la nappe de câbles électriques, illustré dans la Figure 95, avec t mesuré en heure :



Au départ, la potentialité indiquée par $SD_{ElecM}(t)$ est « Très Faible »;

Elle devient « Faible » lorsque $D_{PVM}(t)$ (cause de dérive d'activité) devient supérieur à 0 ;

Lorsque la dérive devient avérée ($D_{PVM}(t) \geq 1$), $SD_{ElecM}(t)$ devient « Moyenne ».

Lorsque l'opérateur commence à s'adapter en ouvrant plus souvent la porte 03 ($D_{OP03}(t) > 0$), $SD_{ElecM}(t)$ devient « Forte ».

Lorsqu'il est avéré que l'opérateur répond à la dérive technique ($D_{OP03}(t) \geq 1$), $SD_{ElecM}(t)$ devient « Très Forte ».

Figure 95 : Exemple d'évolution de l'indicateur $SD_{ElecM}(t)$ lors de la dérive de la situation de travail vers une situation de travail dangereuse

6.5.2.5. Définir le calcul de l'indicateur d'état de santé de la situation de travail (R3.5.)

L'indicateur d'état de santé de la situation de travail étudiée est ensuite défini en se basant sur l'indicateur de situation dangereuse ayant la potentialité la plus élevée (ici $SD(t)$; Équation 18).

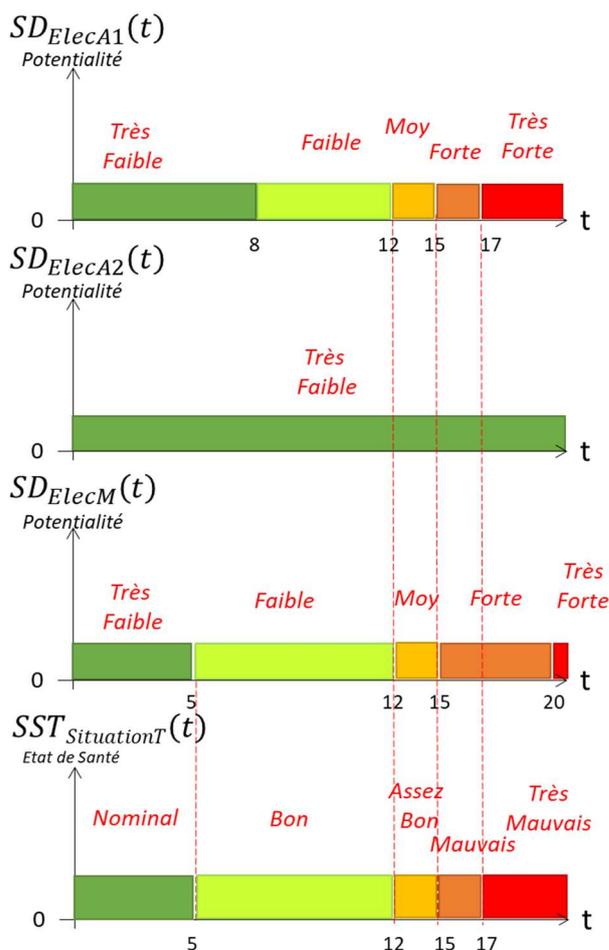
- Si $SD(t)$ est "Très Faible" alors $SST(t)$ est "Nominal"
- Si $SD(t)$ est "Faible" alors $SST(t)$ est "Bon"
- Si $SD(t)$ est "Moyenne" alors $SST(t)$ est "Assez Bon"
- Si $SD(t)$ est "Forte" alors $SST(t)$ est "Mauvais"
- Si $SD(t)$ est "Très Forte" alors $SST(t)$ est "Très Mauvais"

Équation 18: Calcul de l'indicateur d'état de santé de la situation de travail $SST(t)$

Cet indicateur se dégradera donc automatiquement au fur et à mesure que les signes d'apparition de situation potentiellement dangereuse seront détectés.

Dans le cas de la situation de travail sur le « poste_3 », « SituationT », l'indicateur d'état de santé $SST_{SituationT}(t)$ se dégradera au fur et à mesure de l'évolution des indicateurs de situation potentiellement dangereuse $SD_{ElecA1}(t)$, $SD_{ElecA2}(t)$, $SD_{ElecM}(t)$ et $SD_{PostureP}(t)$

Exemple d'évolution de l'indicateur d'état de santé $SST_{SituationT}(t)$ illustré dans la Figure 96, avec t mesuré en heure :



Dans cet exemple, l'état de santé de la situation « SituationT » est « Nominal » au départ car tous indicateurs de situation potentiellement dangereuse sont « Très Faibles ».

A $t=5$, $SD_{ElecM}(t)$ devient « Faible », cela fait passer l'état de santé à « Bon ».

A $t=12$, $SD_{ElecA1}(t)$ et $SD_{ElecM}(t)$ indiquent une potentialité d'apparition « Moyenne », cela fait passer l'état de santé à « Assez Bon ».

A $t=15$, ils indiquent une potentialité d'apparition « Forte », cela fait passer l'état de santé à « Mauvais ».

A $t=17$, $SD_{ElecA1}(t)$ devient l'indicateur avec la potentialité la plus haute (potentialité d'apparition « Très Forte »), cela fait passer l'état de santé à « Très Mauvais ».

Figure 96 : Exemple d'évolution de l'indicateur $SST_{SituationT}(t)$

6.5.3. Résultats de l'étape

A la fin de cette étape, l'indicateur d'état de santé de la situation de travail étudiée, ainsi que les indicateurs permettant sa construction, ont été définis par le groupe de travail. Les variables servant à la construction des indicateurs de déviation ont également été identifiés par le groupe.

L'indicateur d'état de santé de la situation de travail peut être utilisé pour surveiller l'évolution de la situation de travail sur le « poste_3 » de la plateforme Progress afin de détecter l'apparition potentielle de situations dangereuses suite à la réponse d'un opérateur à une dérive technique.

La mise en place d'un système de surveillance utilisant cet indicateur d'état de santé n'a pas pu être réalisée suite aux perturbations dues à la pandémie liée à la COVID-19 mi-2020 à début-2021.

6.6. Conclusion

6.6.1. Retours d'expérience des membres des différents groupes de travail

La première étape de la méthode WSHM a été bien accueillie en ce qui concerne l'utilisation d'un modèle de données. Ce dernier est généré pour capitaliser, en un seul document, les informations venant de différents documents techniques, des fiches de poste et des observations. Le modèle de données généré a également été apprécié du fait de ses capacités à pouvoir être utilisé pour d'autres applications que la méthode WSHM. La réutilisation facile, au cours de futures applications de la méthode WSHM sur le même cas d'étude, a également été un point positif. L'instanciation du modèle a par contre été noté comme « longue et laborieuse sans les outils et les connaissances adaptés ».

Lors de l'application de la deuxième étape de la méthode WSHM par les experts en risques machines du laboratoire SETA de l'INRS, ceux-ci ont décrit cette étape comme : « une méthode plus objective mais requérant plus de temps » que les méthodes personnelles utilisés par ces experts pour identifier les situations potentiellement dangereuses, suite à des réponses raisonnablement prévisibles générées par des défaillances du matériel. L'utilisation conjointe de différentes méthodes d'analyse dysfonctionnelle (AMDEC-HazOp) et l'étude des dérives et émergences d'interactions étant considérées comme l'ajout majeur de cette étape, par rapport à leurs méthodes d'usages personnelles.

La mise en place des indicateurs au cours de la troisième étape a été bien accueillie grâce à sa facilité de mise en place. L'identification des variables pour le calcul des indicateurs, a quant à elle été trouvée laborieuse.

En général, la méthode WSHM a été notée par son panel de testeur comme « objective mais requérant des outils pour être utilisée à son plein potentiel » (la version actuelle étant réalisée manuellement alors que certaines tâches pourraient être automatisées).

6.6.2. Discussions et perspectives

Cette application de la méthode WSHM, sur un cas académique, a montré que celle-ci était applicable dans sa version actuelle.

La méthode a montré ses points forts en terme d'objectivité de ses résultats au cours de l'identification des situations potentiellement dangereuses générées par une réponse d'un opérateur à une dérive technique, par rapport aux méthodes actuelles d'observation de la situation de travail.

La faisabilité de la construction d'un indicateur d'état de santé de la situation de travail a été démontré.

L'application de la méthode sur un cas d'étude a également montré quelques points nécessitant améliorations :

- L'application de la méthode est longue dans sa forme actuelle ;
- Elle permet uniquement d'identifier les situations potentiellement dangereuses engendrées par une réponse d'un opérateur à une dérive technique.

Après avoir validé la méthode WSHM sur un cas académique (contrôlé et connu), il faudra valider cette dernière sur plusieurs cas industriels, afin de l'optimiser aux besoins des professionnels de la santé & sécurité au travail dans l'industrie manufacturière.

Cette optimisation de la méthode WSHM pourra se baser sur les perspectives d'améliorations proposées dans les chapitres 3, 4 et 5.

Enfin, la méthode proposée dans ces travaux de thèse a été développée pour répondre aux besoins en sécurité des machines d'assemblage de produits solides dans l'industrie manufacturière. Des déclinaisons de celle-ci à d'autres applications sont à envisager en prenant en compte les spécificités de ces applications.

Conclusion générale

Les travaux de thèse présentés dans ce manuscrit s'intéressent à la problématique industrielle de la prévention des situations dangereuses suite à une réponse d'un opérateur à une dérive technique. Pour répondre à cette problématique industrielle, deux problématiques scientifiques ont été étudiées :

- Peut-on identifier, à priori, les situations dangereuses engendrées par une réponse de l'opérateur à une dérive technique (sur une ligne d'assemblage automatisée) ?
- Peut-on surveiller les préambules de l'apparition de ces situations dangereuses en utilisant les données générées au sein de la situation de travail (sur une ligne d'assemblage automatisée) ?

Ces deux problématiques scientifiques ont donné naissance à trois axes de recherche :

- Surveiller la situation de travail par le biais d'un indicateur d'état de santé de la situation de travail à partir des relations entre les dérives techniques et les réponses de l'opérateur pouvant être sources de situations potentiellement dangereuses (soit à partir des données générées actuellement par l'équipement, soit après rajout de capteurs jugés nécessaires).
- Identifier les situations dangereuses générées par une réponse de l'opérateur à une dérive technique en se basant sur une analyse dysfonctionnelle de la situation de travail nominale.
- Modéliser la situation de travail nominale pour permettre une meilleure compréhension.

Chacun de ces axes de recherche a mené au développement d'une des étapes de la méthode proposée dans ces travaux : la méthode Working Situation Health Monitoring. Cette méthode est la contribution méthodologique majeure de ces travaux de thèse. L'originalité de cette méthode est double :

- L'étude de la situation de travail dans son ensemble pour y étudier les interactions en son sein, en plus de l'état des éléments et de leurs comportements individuels ;
- La définition d'un indicateur d'état de santé de la situation de travail permettant la surveillance en continu de la situation de travail.

Le contexte d'utilisation de la méthode WSHM a été présenté dans le premier chapitre de ce manuscrit.

Le second chapitre a présenté les différentes étapes de la méthode proposée et leurs positionnements scientifique et industriel dans leur domaine respectif. Ce positionnement de chaque étape a montré les originalités de ces travaux et les apports de chaque étape de la méthode pour la prévention des accidents du travail sur machine.

Le troisième chapitre a décrit la première étape de la méthode WSHM ainsi que le modèle de situation de travail proposé et la méthode d'instanciation de celui-ci. La modélisation de la

situation de travail dans son ensemble, et notamment des interactions en son sein, est une originalité majeure de ces travaux et permet de capitaliser les informations nécessaires à la suite de la réalisation de la méthode WSHM en un seul document. Ce chapitre a également présenté des perspectives de recherches concernant :

- De potentielles applications sur d'autres situations de travail ;
- L'utilisation du modèle à d'autres buts que la santé-sécurité au travail (aide à la conception de situation de travail / machine) ;
- Le potentiel outillage de la méthode d'instanciation du modèle de situation de travail pour permettre une utilisation plus facile de celle-ci.

Le quatrième chapitre a décrit la deuxième étape de la méthode WSHM, ainsi que la méthode d'identification des situations potentiellement dangereuses suite à une réponse d'un opérateur à une dérive technique par l'utilisation d'une méthode couplant l'AMDEC-HazOp et l'étude des interactions Homme-machine / Homme-produits en cas de dérives techniques (perception de ces dérives et réponse à celles-ci). Ce chapitre a également présenté des perspectives de recherches concernant :

- La prise en compte de toutes les situations potentiellement dangereuses en cas de dérive technique sans réponse de l'opérateur ;
- La prise en compte des connaissances à priori sur les situations potentiellement dangereuses déjà connues pour en identifier les causes (approche déductive au lieu d'inductive).

Le cinquième chapitre a décrit la troisième étape de la méthode WSHM, ainsi que les modèles de calcul d'indicateurs permettant la surveillance de l'état de santé de la situation de travail. Pour cela, ils sont basés sur les données générées par l'équipement de production. Ce chapitre a également présenté des perspectives de recherches concernant :

- L'utilisation potentielle en ligne de l'indicateur d'état de santé de la situation de travail pour la sécurité des opérateurs ;
- L'utilisation potentielle de tels indicateurs dans l'optique d'optimiser les capacités de résilience de l'opérateur ;
- L'élargissement du domaine d'utilisation des indicateurs (pour la maintenance, le contrôle qualité des produits, ...).

Le sixième chapitre a présenté l'application de la méthode proposée sur un cas d'étude académique : la plateforme « Progress 4.0 ». Cette application a permis de démontrer que la méthode nécessitait moins de périodes d'observation que la méthode par observation seule et qu'il était possible de :

- Modéliser une situation de travail dans son ensemble (les éléments de la situation de travail et leurs interactions entre eux) ;
- A partir des informations récoltées dans le modèle de situation de travail instanciée : identifier les situations potentiellement dangereuses suite à des réponses d'un opérateur à une dérive technique en se basant sur une analyse dysfonctionnelle et une analyse des dérives / émergences d'interaction pour soutenir une analyse de risques.

- A partir des informations sur les situations potentiellement dangereuses identifiées : construire un indicateur d'état de santé de la situation de travail basé sur les données générées par l'équipement de travail permettant de surveiller les préambules de l'apparition de ces situations dangereuses.

L'application de la méthode WSHM sur un cas d'application académique a démontré la faisabilité d'une approche répondant aux deux problématiques scientifiques. L'utilisation d'un tel outil en industrie permettrait de prévenir les risques qui pourraient être pris par les opérateurs de machine, au quotidien, dans l'industrie manufacturière lorsqu'ils répondent à une dérive technique.

En perspective, cette méthode n'en est actuellement qu'à ses premières versions. Des tests sur des cas d'études industriels seront à réaliser pour améliorer son déroulement et les ressources à mettre à disposition. Les différentes perspectives de recherches énoncées dans cette conclusion permettraient de rendre la méthode plus accessible pour les professionnels de la santé-sécurité au travail, mais également pour les industriels.

La Figure 97 résume les apports majeurs de la contribution (méthode WSHM) réalisée au cours de ces travaux de thèse :

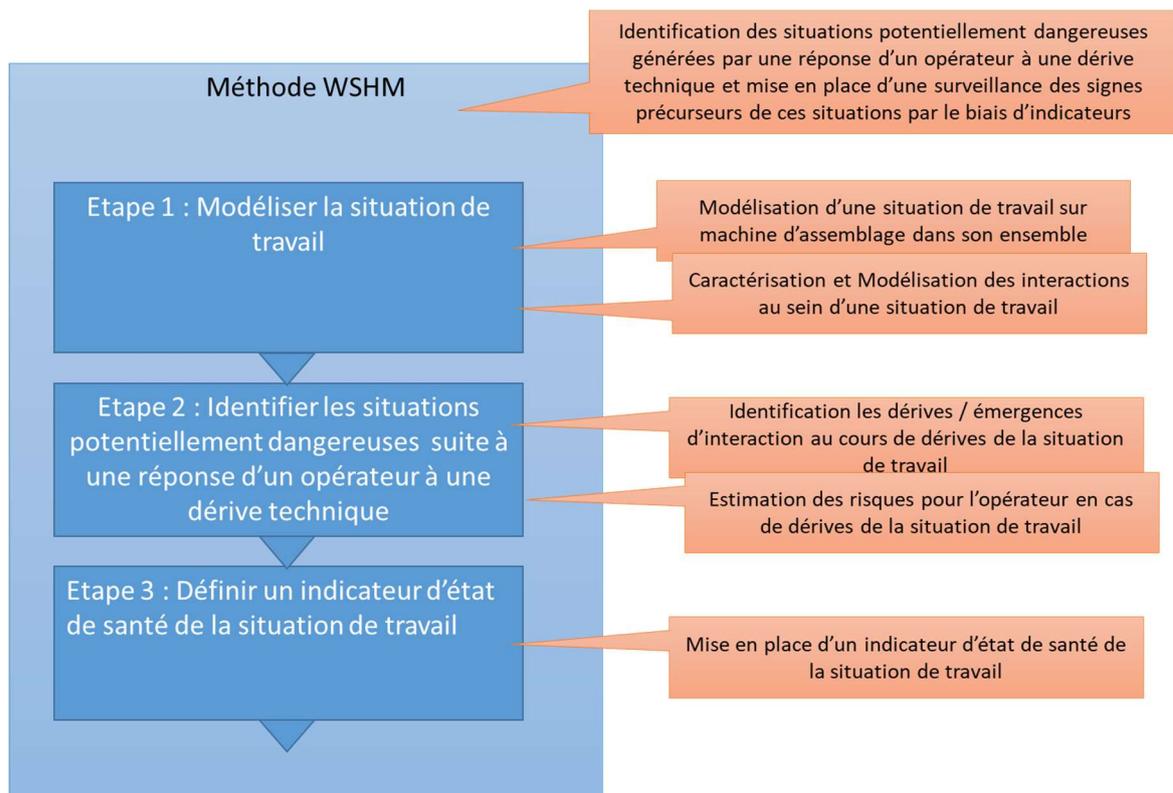


Figure 97 : Résumé des apports

Références

- Abichou, Bouthaina. 2013. 'Contribution à la formalisation de bilans/états de santé multi-niveaux d'un système pour aider à la prise de décision en maintenance: agrégation d'indicateurs par l'intégrale de Choquet'.
- Adem, Aylin, Erman Çakit, and Metin Dağdeviren. 2020. 'Occupational health and safety risk assessment in the domain of Industry 4.0', *SN Applied Sciences*, 2: 1-6.
- AIPL. 2021. '<https://aip-primeca.univ-lorraine.fr/espace-academique/>', Accessed march, 1st 2021.
- Amira, Selma., and Aurore. Desjonquères. 2017. "L'enquête « Conditions de travail » auprès des employeurs : résultats détaillés." In.
- ANACT, and INRS. 2001. *Repères sur le travail: à l'usage des ingénieurs, élèves et débutants* (ANACT).
- Atain-Kouadio, Jean-Jacques., Bruno. Daille-Lefevre, Séverine. Demasy, Elie. Fadier, Henri. Lupin, Jacques. Marsot, and Guy. Welitz. 2013. "ED6154: conception des machines et ergonomie." In, edited by INRS.
- Atamuradov, Vepa, Kamal Medjaher, Fatih Camci, Noureddine Zerhouni, Pierre Dersin, and Benjamin Lamoureux. 2020. 'Machine health indicator construction framework for failure diagnostics and prognostics', *Journal of Signal Processing Systems*, 92: 591-609.
- Atamuradov, Vepa, Kamal Medjaher, Pierre Dersin, Benjamin Lamoureux, and Noureddine Zerhouni. 2017. 'Prognostics and health management for maintenance practitioners-review, implementation and tools evaluation', *International Journal of Prognostics and Health Management*, 8: 1-31.
- Badri, Adel, Bryan Boudreau-Trudel, and Ahmed Saâdeddine Souissi. 2018. 'Occupational health and safety in the industry 4.0 era: A cause for major concern?', *Safety science*, 109: 403-11.
- Bahrin, Mohd Aiman Kamarul, Mohd Fauzi Othman, Nor Hayati Nor Azli, and Muhamad Farihin Talib. 2016. 'Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic', *Jurnal Teknologi*, 78.
- Bertalanffy, Ludwig von. 1969. 'General system theory: Foundations, development, applications'.
- Berthoz, Alain, and Jean-Luc Petit. 2014. *Complexité-simplicité* (Collège de France).
- Blaise, Jean-Christophe., Bruno. Daille-Lefevre, Séverine. Demasy, Henri. Lupin, Jacques. Marsot, and Guy. Wélitz. 2018. "ED6122: Sécurité des machines - Prévention des risques mécaniques." In, edited by INRS.
- Borg, Jonathan C, and Lawrence Farrugia. 2014. 'Life-Cycle Interactions for Modelling Human Emotions', *Design and Emotion-D&E 2014*: 184-93.
- Bouffaron, Fabien, Jean-Marc Dupont, Frédérique Mayer, and Gérard Morel. 2014. "Integrative construct for model-based human-system integration: a case study." In *19th IFAC World Congress, IFAC'14*.
- Boyd, John. 1995. 'OODA loop', *Center for Defense Information, Tech. Rep.*
- Brasseur, Grégory, Céline Ravallec, and Delphine Vaudoux. 2019. 'Le risque machines', *Travail & Sécurité*: 12-25.
- Canetto, Pierre 2018. 'La prévention des risques : un atout pour la performance des entreprises', *Hygiène et Sécurité du travail*: 22-50.
- CE. 2006. "DIRECTIVE 2006/42/CE " In.

-
- — —. 2009. "DIRECTIVE 2009/104/CE " In.
- Charpentier, P. 2005. "Safety of machinery: experience feedback on automated accidents from the EPICEA database." In *Proceedings of the 4th International Conference on Safety of Industrial Automated Systems, Chicago, IL, USA*, 26-28.
- CNAM. 2020. "Statistiques de sinistralité 2019 tous CTN et par CTN." In.: CNAM.
- Cocheteux, Pierre. 2010. 'Contribution à la maintenance proactive par la formalisation du processus de pronostic des performances de systèmes industriels', Université Henri Poincaré-Nancy I.
- Code de la sécurité sociale -
L411-1, 1985
- Code du travail -
L4121-1, 2017
L4121-2, 2016
R4311, 2008
R4312, 2008
R4321-1 à R4321-5, 2008
- Costella, Marcelo Fabiano, Tarcisio Abreu Saurin, Fabricio Borges Cambraia, and Heleia Bortolosso. 2015. "Violation or resilience? A comparison between two frameworks for making sense of work-as-done." In *6th Symposium on Resilience Engineering Association, Lisbon, Portugal*.
- CRAMIF. 2014. *DTE 127 - Sécurité des équipements de travail* (Réalisation chaine graphique Caisse Régionale d'Assurance Maladie d'Île-de-France).
- Daille-lefèvre, Bruno., Amandine. Demarziani, and Alain. Etienne. 2019. "Towards a data model to describe future usages of industrial systems to integrate Health and Safety in early design phase." In *S.mart colloque*. Les Karellis, France.
- Daniellou, François, Ivan Boissières, and Marcel Simard. 2010. *Les facteurs humains et organisationnels de la sécurité industrielle: un état de l'art* (FonCSI).
- de Galvez, Nicholas. 2016. 'Sécurité des machines: méthodologie d'identification systématique des phénomènes dangereux en conception', Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM.
- de Galvez, Nicholas, Jacques Marsot, Patrick Martin, Ali Siadat, and Alain Etienne. 2017. 'EZID: A new approach to hazard identification during the design process by analysing energy transfers', *Safety science*, 95: 1-14.
- Delmotte, Sébastien, and Alain Desroches. 2014. 'L'Analyse Globale des Risques Quantitative (AGRq)', *Article présenté au*, 19.
- Demasy, Séverine, Hugues Fièvre, Pascal Jacquetin, and Stéphanie De Flaugergues. 2020. 'Le risque machine, encore une réalité ?', *Hygiène et Sécurité du travail*: 78-82.
- Dembe, Allard E. 2001. 'The social consequences of occupational injuries and illnesses', *American journal of industrial medicine*, 40: 403-17.
- Desroches, Alain. 2017. 'Analyse globale des risques (AGR)'
- Djuricin, Dragan, and Iva Vuksanovic Herceg. 2020. 'Chapter in the Book: Industry 4.0 Principles and Approaches, NovaScience, New York, June 2020'
- Echeverri, Juan Camilo Gomez, Patrick Martin, Xavier Godot, Bruno Daille-Lefèvre, and Jacques Marsot. 2019. "Prise en compte dans la conception et l'exploitation des postes de travail de l'usine du futur des aspects sante-securite." In *16e Colloque National S-mart* Les Karellis, France.
-

-
- Eloundou, José. 2016. 'Modélisation multi-contraintes d'un système de production flexible', Rouen, INSA.
- EN, NF. 1995. "614-1.1995." In *Sécurité des machines - Principes ergonomiques de conception - Partie 1 : terminologie et principes généraux*.
- EU-OSHA. 2021. 'La sécurité et la santé au travail, un atout pour l'entreprise.', Accessed march 5, 2021. <https://osha.europa.eu/fr/themes/good-osh-is-good-for-business>.
- Eynaud, Amélie Beauville Dit. 2020. 'Démarche de conception d'un système de production industriel reconfigurable, dans un contexte de fortes variations de marché en volume et en diversité', Paris, HESAM.
- Flizikowski, Józef, Andrzej Tomporowski, Robert Kasner, Adam Mroziński, and Weronika Kruszelnicka. 2019. 'Machinery life cycle efficiency models for their sustainable development', *System Safety: Human-Technical Facility-Environment*, 1: 363-70.
- Godard, Juliette. 2017. 'Analyse globale des risques de la prise en charge médicamenteuse dans les essais cliniques'.
- Gouriveau, Rafael, Kamal Medjaher, and Noureddine Zerhouni. 2017. *Du concept de PHM à la maintenance prédictive 1: Surveillance et pronostic* (ISTE Group).
- Guiochet, Jérémie. 2016. 'Hazard analysis of human–robot interactions with HAZOP–UML', *Safety science*, 84: 225-37.
- Hadj-Mabrouk, Habib, and Besma Harguem. 2014. "Méthode originale d'Analyse Préliminaire des Risques." In.: Cépaduès.
- Haghighi, Aida, Yuvin Chinniah, and Sabrina Jocelyn. 2019. 'Literature review on the incentives and solutions for the bypassing of guards and protective devices on machinery', *Safety science*, 111: 188-204.
- Han, Yue, Xingwei Zhen, Yi Huang, and Jan Erik Vinnem. 2019. 'Integrated methodology for determination of preventive maintenance interval of safety barriers on offshore installations', *Process Safety and Environmental Protection*, 132: 313-24.
- Hasan, Raïd, Alain Bernard, Joseph Ciccotelli, and Patrick Martin. 2003. 'Integrating safety into the design process: elements and concepts relative to the working situation', *Safety science*, 41: 155-79.
- Hirsch-Kreinsen, Hartmut. 2016. 'Digitization of industrial work: development paths and prospects', *Journal for Labour Market Research*, 49: 1-14.
- Hollnagel, Erik. 2006. 'Achieving system safety by resilience engineering'.
- . 2013. *Resilience engineering in practice: A guidebook* (Ashgate Publishing, Ltd.).
- IEC, NF EN. 2016. "NF EN IEC 61882: 2016 Hazard and operability studies (HAZOP studies) - Application guide." In.: AFNOR.
- . 2018. "NF EN IEC 60812 : 2018–Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA)." In.: AFNOR.
- INCOSE. 2020. 'Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK)', San Diego, CA: International Council on Systems Engineering (INCOSE). Accessed 17 December 2019. [https://sebokwiki.org/wiki/Guide_to_the_Systems_Engineering_Body_of_Knowledge_\(SEBoK\)](https://sebokwiki.org/wiki/Guide_to_the_Systems_Engineering_Body_of_Knowledge_(SEBoK)).
- ISO. 2010. "ISO 12100 : Safety of machinery -- General principles for design -- Risk assessment and risk reduction." In *BS EN ISO, 12100-2*.
- . 2012. "ISO/TR 14121–2: Safety of Machinery-risk Assessment–Part 2: Practical Guidance and Examples of Methods." In.: ISO Geneva.
- . 2018. "ISO 31000 - Risk management -- Guidelines." In.: ISO.
-

-
- ISO, EN. 2016. "ISO 6385:2016 - Principes ergonomiques de la conception des systèmes de travail." In *Ergonomic principles in the design of work systems (ISO 6385: 2016)*.
- ISO, TR. 2007. 'ISO 14121 2 : Safety of machinery Risk assessment Part 2', *Practical guidance and examples of methods*.
- ISO/IEC/IEEE. 2015. "ISO 15288 : Ingénierie des systèmes et du logiciel — Processus du cycle de vie du système." In.
- Kang, Yunyi, and Feng Ju. 2019. 'Integrated analysis of productivity and machine condition degradation: Performance evaluation and bottleneck identification', *IISE transactions*, 51: 501-16.
- Laloix, Thomas. 2018. 'Méthodologie d'élaboration d'un bilan de santé de machines de production pour aider à la prise de décision en exploitation: application à un centre d'usinage à partir de la surveillance des composants de sa cinématique: Machine health check methodology to help maintenance in operational condition: application to machine tool from its kinematic monitoring', Université de Lorraine.
- Lamy, Pascal and Tissot, Claire. 2016. 'Analyse de récits d'accidents du travail pour identifier des dérives d'usage et apport des TAL', *Congrès Lambda Mu 20 de Maîtrise des Risques et de Sécurité de Fonctionnement, 11-13 Octobre 2016, Saint Malo, France*.
- Lamy, Pascal, and Perrin, Nellie. 2018. "Impact of changes in machinery during use: toward a forecast of dangerous situations ?" In *Safety of Industrial Automated Systems*.
- . 2020. 'Approach to analyse hazardous situations tied to recurrent production dysfunctions, by observing the work situation', *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*: 1-9.
- Landy, G. 2007. 'AMDEC guide pratique 2 éd', *Saint Denis la Plaine (FRA): AFNOR (Saint Denis la Plaine-FRA)*.
- Larousse, Éditions. 2017. "Définitions -Dictionnaire de français Larousse." In *Larousse*.
- Lasi, Heiner, Peter Fettke, Hans-Georg Kemper, Thomas Feld, and Michael Hoffmann. 2014. 'Industry 4.0', *Business & information systems engineering*, 6: 239-42.
- Le Bot, Pierre. 2011. 'Suivre la prescription et prendre l'initiative pour être sûr: la résilience en situation', *29 et 30 novembre 2011*: 95.
- Lee, Gil-Yong, Mincheol Kim, Ying-Jun Quan, Min-Sik Kim, Thomas Joon Young Kim, Hae-Sung Yoon, Sangkee Min, Dong-Hyeon Kim, Jeong-Wook Mun, and Jin Woo Oh. 2018. 'Machine health management in smart factory: A review', *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32: 987-1009.
- Léger, Aurélie. 2009. 'Contribution à la formalisation unifiée des connaissances fonctionnelles et organisationnelles d'un système industriel en vue d'une évaluation quantitative des risques et de l'impact des barrières envisagées', Université Henri Poincaré-Nancy 1.
- Leger, Jean-Baptiste, Eric Neunreuther, Benoît lung, and Gérard Morel. 1999. 'Integration of the predictive maintenance in manufacturing system.' in, *Advances in Manufacturing* (Springer).
- Léger, Jean-Baptiste. 1999. 'Contribution méthodologique à la maintenance prévisionnelle des systèmes industriels de production: proposition d'un cadre formel de modélisation', Nancy 1.
- Lesaffre, François-Marie, Claude Thirion, and Laurent Baudouin. 2000. 'Systèmes d'aide à la conduite des procédés industriels', *Mécanique & industries*, 1: 447-55.
- Lieber, Romain, Jean-Marc Dupont, Fabien Bouffaron, and Gérard Morel. 2013. "Improving physical-physiological interaction requirements for maintenance enabling systems

-
- specification." In *12th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems*, CDROM.
- Lindberg, Carl-Fredrik, SieTing Tan, JinYue Yan, and Fredrik Starfelt. 2015. 'Key performance indicators improve industrial performance', *Energy procedia*, 75: 1785-90.
- Lux, Aurélien, Ismail El Mouayni, Bruno Daille Lefevre, Jonathan Savin, Alain Etienne, and Ali Siadat. 2017. "Santé et sécurité au travail: quatre approches en conception pour spécifier et simuler des marges de manoeuvre pour les futurs opérateurs de production." In *CIGI2017 12ème edition du Congrès International de Génie Industriel*, 8p.
- Martin, Patrick, Jacques Marsot, Bruno Daille-Lefevre, Alain Etienne, Aurélien Lux, Ali Siadat, Nicholas De Galvez, Ismail El Mouayni, Xavier Godot, and Jean-Yves Dantan. 2017. "Ingénierie de conception et sécurité des machines." In *12 éme Congrès International de Génie Industriel*, 10p.
- Meinadier, Jean-Pierre, and Serge Fiorèse. 2012. *Découvrir et comprendre l'ingénierie système* (Cépaduès Éditions).
- Military, US. 1949. 'Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, United States Military Procedure MIL-P-1629', 1949.
- Modelio. 2021. <https://www.modelio.org/>, Accessed march, 1st 2021.
- Mortureux, Yves. 2002a. 'Analyse préliminaire de risques'.
- . 2002b. 'Arbres de défaillance, des causes et d'événement'.
- . 2005. 'AMDE (C)'.
- Muller, Alexandre. 2005. 'Contribution à la maintenance prévisionnelle des systèmes de production par la formalisation d'un processus de pronostic', Nancy 1.
- Neumann, W Patrick, Sven Winkelhaus, Eric H Grosse, and Christoph H Glock. 2021. 'Industry 4.0 and the human factor—A systems framework and analysis methodology for successful development', *International Journal of Production Economics*, 233: 107992.
- Niemann, Jörg, and Adrian Pisla. 2020. *Life-Cycle Management of Machines and Mechanisms* (Springer).
- OMG. 2019. 'SysML v. 1.6'.
- Pariès, Jean. 2015. "Rule-based vs managed safety : from compliance to resilience." In *8th International Conference Safety of Industrial Automated Systems*. Königswinter, Germany.
- Paris, Laurent. 2012. 'Évaluation du risque projections'.
- Pereira, Ana C, and Fernando Romero. 2017. 'A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept', *Procedia Manufacturing*, 13: 1206-14.
- Polet, Philippe, Frédéric Vanderhaegen, and Patrick Millot. 2009. 'Human behaviour analysis of barrier deviations using a benefit-cost-deficit model', *Advances in Human-Computer Interaction*, 2009: 4.
- Pomian, Jean-Louis, Thierry Pradère, and Irène Gaillard. 1997. 'Ingénierie et ergonomie', *Cépaduès, Toulouse*.
- Rasmussen, Jens. 1997. 'Risk management in a dynamic society: a modelling problem', *Safety science*, 27: 183-213.
- Reason, James. 1990a. 'The contribution of latent human failures to the breakdown of complex systems', *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 327: 475-84.
- . 1990b. *Human error* (Cambridge university press).
-

-
- Reitz, A, E Levrat, JF Petin, A Noël, D Aigle, D Peiffert, and P Graff. 2012. 'Systematic approach for dysfunctional analysis in radiotherapy', *Cancer radiotherapie: journal de la Societe francaise de radiotherapie oncologique*, 16: 667-73.
- Robert, Paul. 2017. "Le Petit Robert de la langue française." In *Le petit Robert*. Dictionnaires Le Robert-SEJER.
- Royer, Michel. 2009a. 'HAZOP: une méthode d'analyse des risques-Présentation et contexte'. ———. 2009b. 'HAZOP: une méthode d'analyse des risques-Principe'.
- Ruault, Jean-René, Dominique Luzeaux, Christian Colas, and Jean-Claude Sarron. 2011. 'Résilience des systèmes sociotechniques Application à l'ingénierie système', *Génie logiciel*, 96: 40-52.
- Sedki, Karima, Philippe Polet, and Frédéric Vanderhaegen. 2013. 'Using the BCD model for risk analysis: An influence diagram based approach', *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26: 2172-83.
- Thompson, Bruce, and Kevin M Kieffer. 2000. 'Interpreting statistical significance test results: A proposed new "what if" method', *Research in the Schools*.
- Valsalan, Prajoona, Tariq Ahmed Barham Baomar, and Ali Hussain Omar Baabood. 2020. 'IoT based health monitoring system', *Journal of Critical Reviews*, 7: 739-43.
- Van Elslande, Pierre. 2000. 'L'erreur humaine dans les scénarios d'accident cause ou conséquence?', *Recherche-Transports-Sécurité*, 66: 7-31.
- Vanderhaegen, Frédéric, Stéphane Zieba, Simon Enjalbert, and Philippe Polet. 2011. 'A Benefit/Cost/Deficit (BCD) model for learning from human errors', *Reliability Engineering & System Safety*, 96: 757-66.
- Wang, Heng, Jinhai Chen, Jiangming Qu, and Guangxian Ni. 2019. 'A new approach for safety life prediction of industrial rolling bearing based on state recognition and similarity analysis', *Safety science*, 122: 104530.
- Weinechter, Michel, Rémi Parouty, André Cabarbaye, François Farago, Emmanuel Remy, Vianney Bordeau, Naoëlle Matahri, Leila Marle, Joffrey Cardon, and Ahmed Adjadj. 2018. "HUMS-Health & Usage Monitoring System-état de l'art et opportunités HUMS-Health & Usage Monitoring System-state of art and opportunities." In *Congrès Lambda Mu 21 «Maîtrise des risques et transformation numérique: opportunités et menaces»*.
- Williams, Sheila M, Bryan R Parry, and MM Schlup. 1992. 'Quality control: an application of the cusum', *BMJ: British medical journal*, 304: 1359.
- Wybo, Sébastien. 2010. 'Aide à la conduite des systèmes à risques par la prise en compte du risque: exemple de l'application à la conduite automobile', Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.
- Zhao, Xuejing. 2009. 'Analyse de survie et modélisation de la maintenance conditionnelle des systèmes à détérioration graduelle: prise en compte des censures et des variables explicatives', Troyes.
- Zio, Enrico. 2013. 'Prognostics and health management of industrial equipment.' in *Diagnostics and prognostics of engineering systems: methods and techniques* (IGI Global).
-



Version 2021



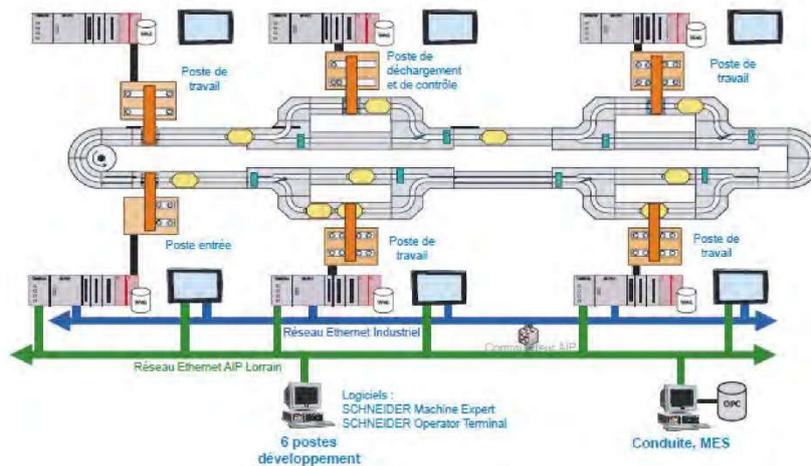
Systeme Flexible de Production
(S.F.P.)

Systeme de Commande

Page 1



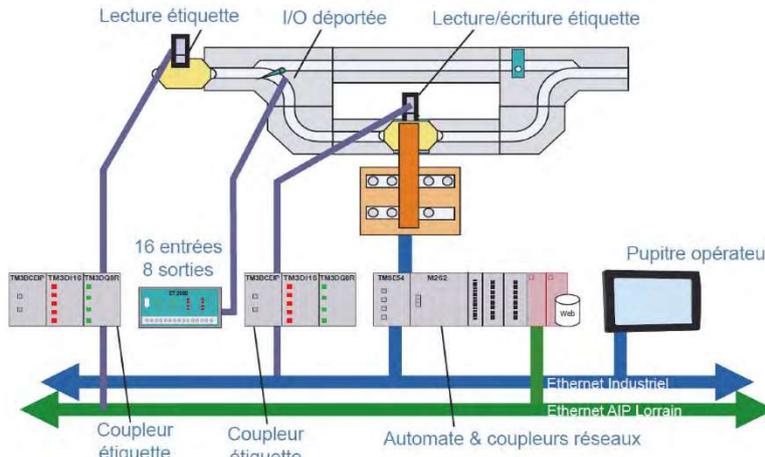
Synoptique cellule



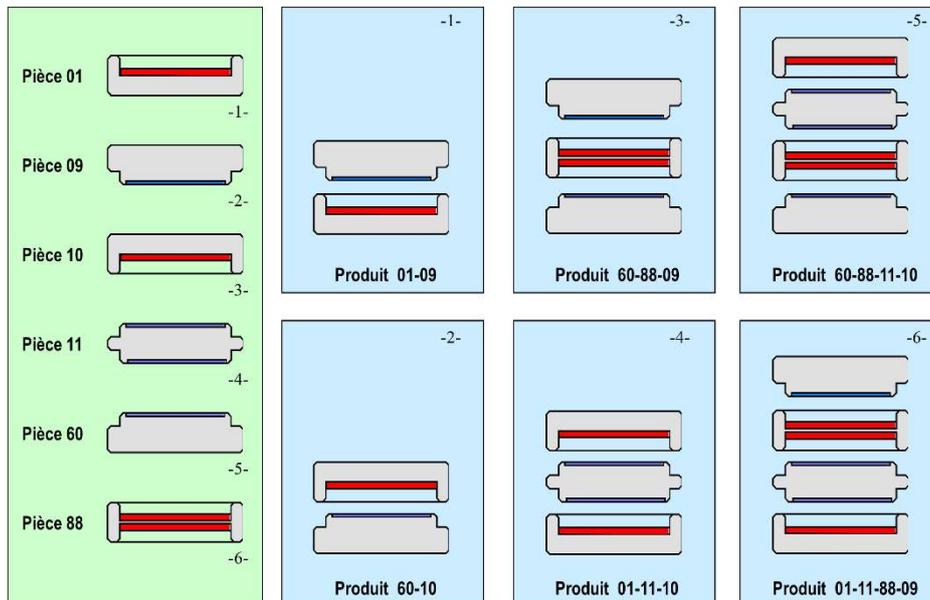
Page 2



Détail poste de travail

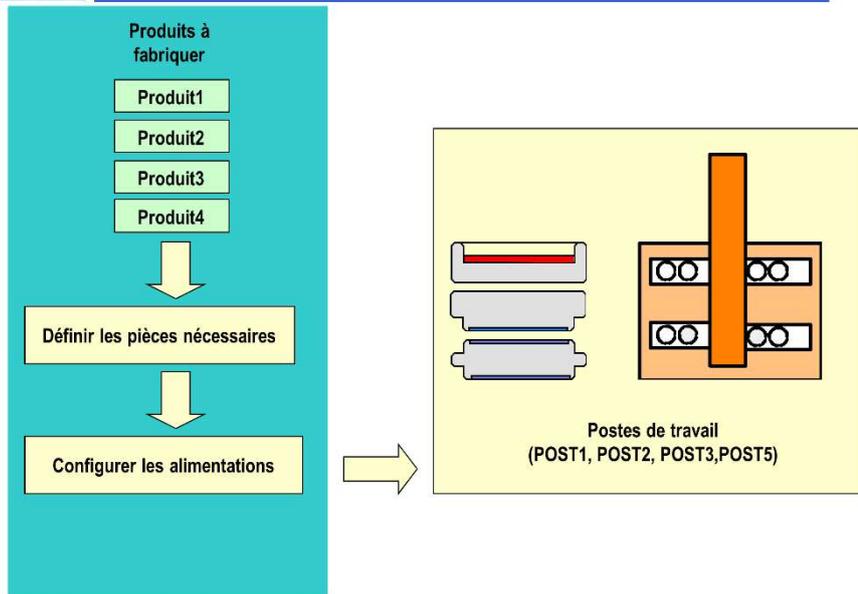


Pièces et Produits

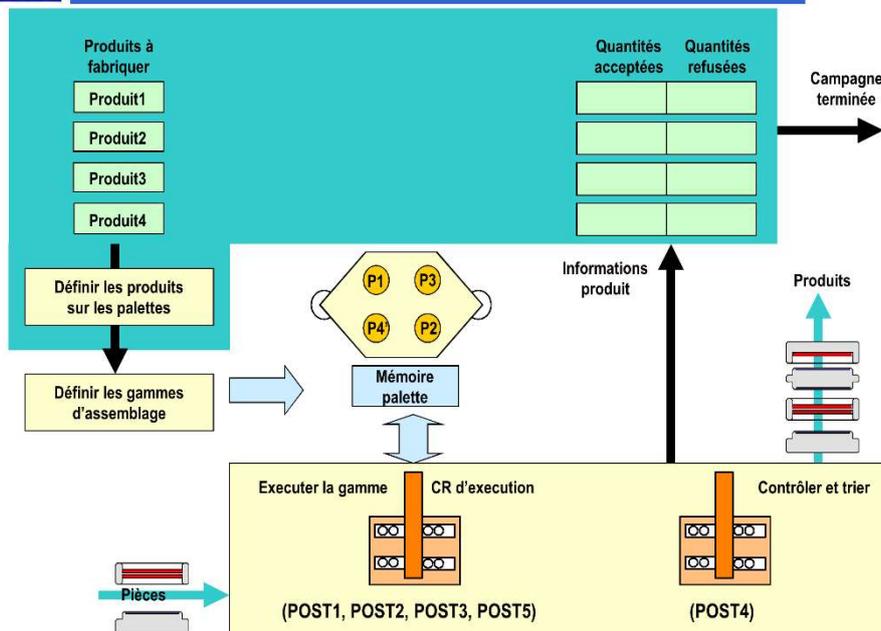




Préparation Campagne de Fabrication

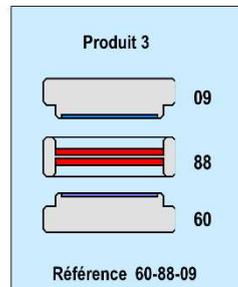


La Campagne de Fabrication





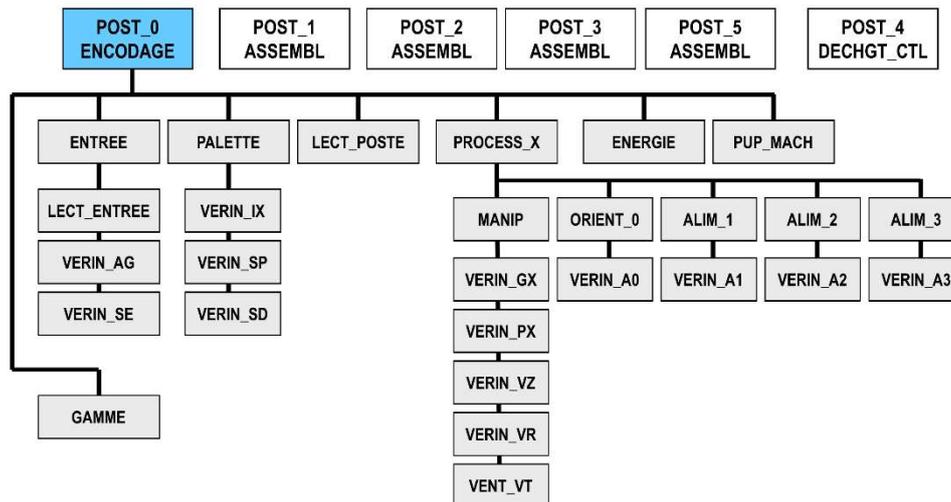
Codage référence du produit



Page 7



PTC: LE POSTE DE CHARGEMENT

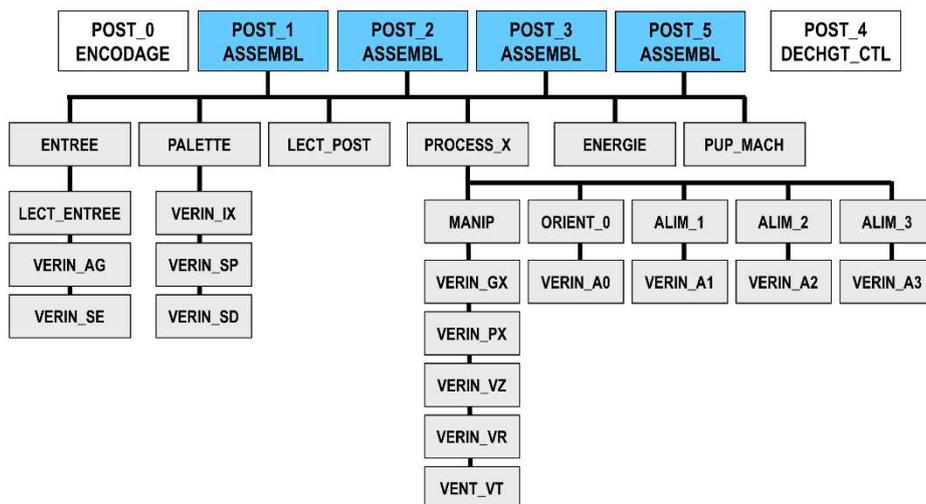


Page 8



Poste 0 encodage

- Le poste accepte une palette vide
- Le poste signale l'arrivée d'une nouvelle palette,
- L'utilisateur choisit les produits à fabriquer sur l'écran tactile
- Le poste génère la gamme d'assemblage, la stocke dans la mémoire de la palette,
- Le poste libère la palette





PTX: Fonctionnalités « PosTeX »



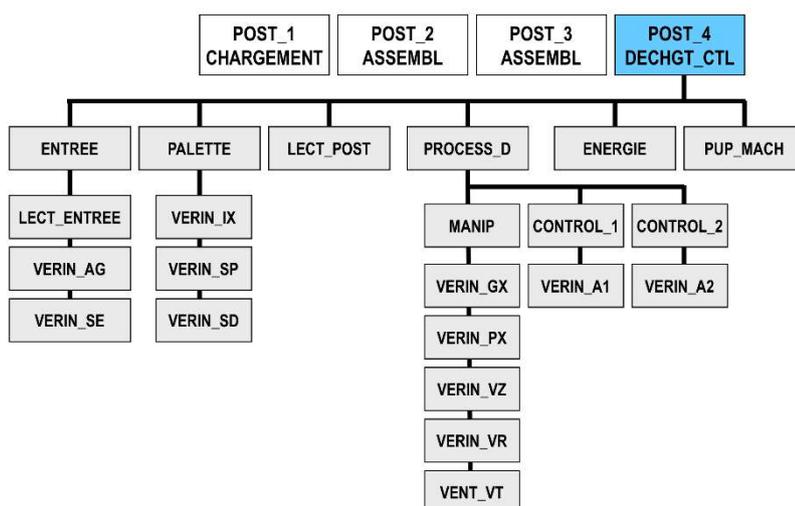
POST1, POST2, POST3 et POST5: Postes d'assemblage

- Accepte une palette si une pièce peut être ajoutée à un produit,
- Réalise des opérations définies dans une gamme d'assemblage.

Page 11



PTD: LE POSTE DE DECHARGT-CONTRÔLE »

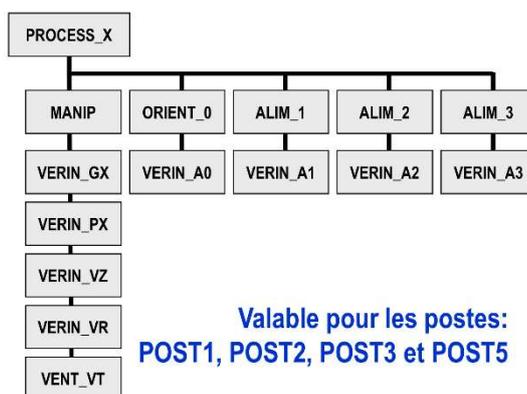


Page 12



POST4: Poste de Déchargement

- Accepte une palette où tous les produits sont terminés,
- Décharge, contrôle et trie les produits,
- Signale à l'utilisateur le produit qu'il vient de contrôler,



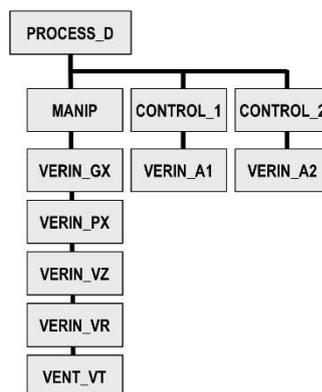


Process d'assemblage
(valable pour POST1, POST2, POST3 et POST5)

- Réalise une opération d'assemblage pointé dans la gamme,
- Le modèle est le même pour les 4 postes (POST1, POST2, POST3 et POST5)



Process de Déchargement
Valable pour POST4





PCD: Fonctionnalités



- Exécute les demandes de contrôle demandées par le poste (Décharge, contrôle et trie les produits terminés),
- Exécute les demandes de vérification de non-produit,
- Identifie chaque produit terminé et accepté.

Page 17



GAM: Fonctionnalités

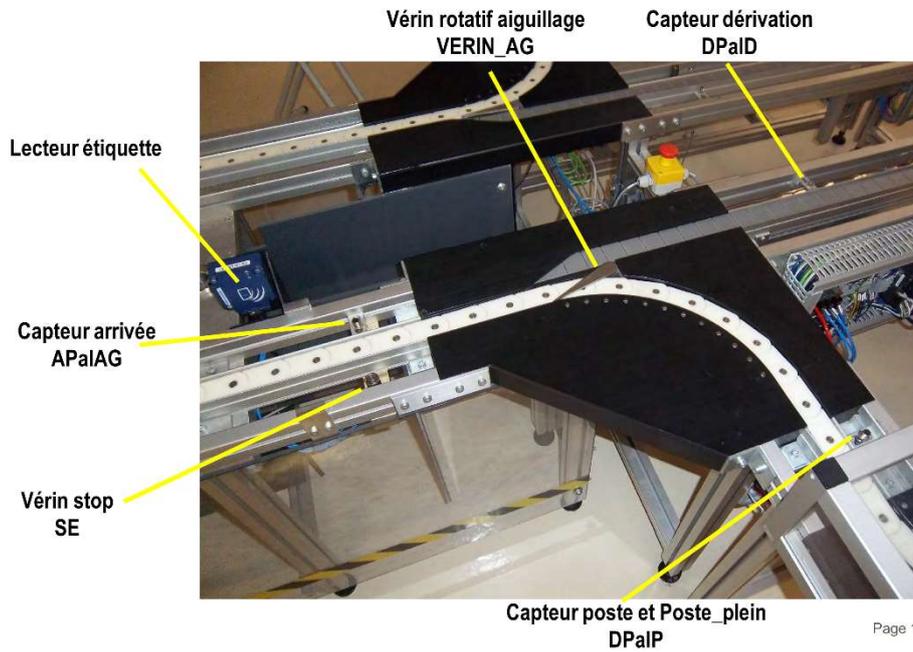


- Génère les gammes d'assemblage de 6 produits différents définis par l'opérateur.
- Cette gamme est chargée dans la mémoire embarquée sur la palette.

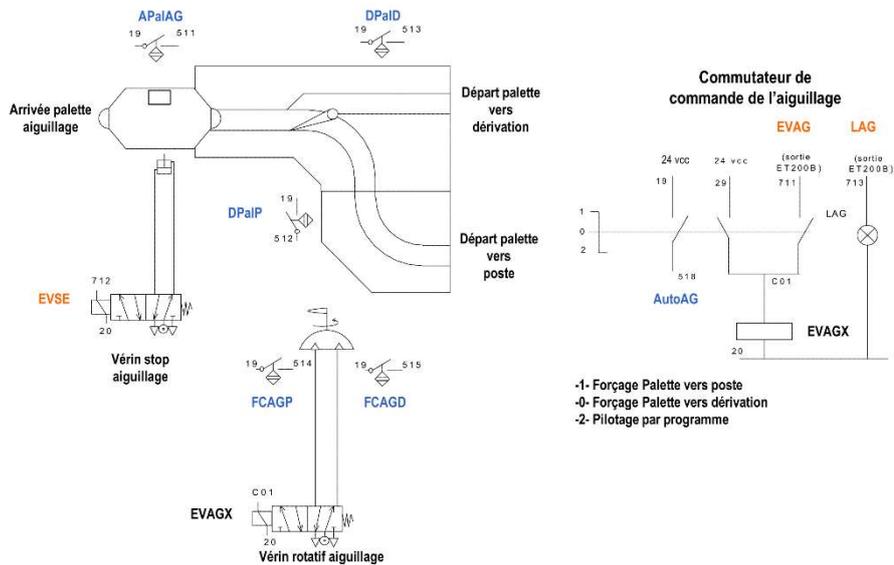
Page 18



ENT: L'ENTREE DU POSTE



ENT: Schéma élec+pneu





ENTX: FB11: Fonctionnalités



ENTREE DES POSTES D'ASSEMBLAGE POST1, POST2, POST3 et POST5

- Aiguille la palette vers le poste si une pièce peut être ajoutée et si celui-ci n'est pas encombré,

Page 21



ENTCD: Fonctionnalités



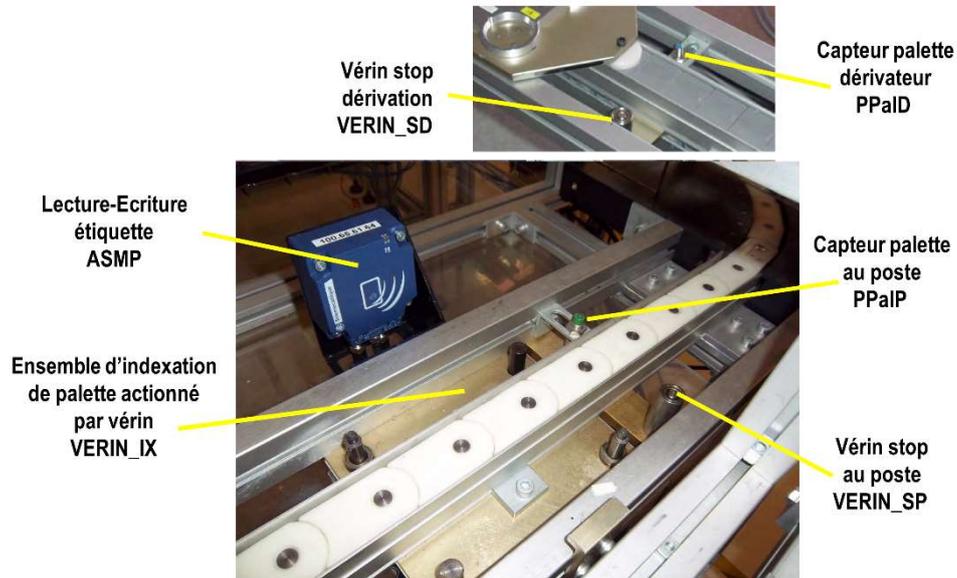
ENTREE DU POSTE DECHARGEMENT POST4

- Aiguille la palette vers le **poste de déchargement** si tous les produits sont terminés.

Page 22



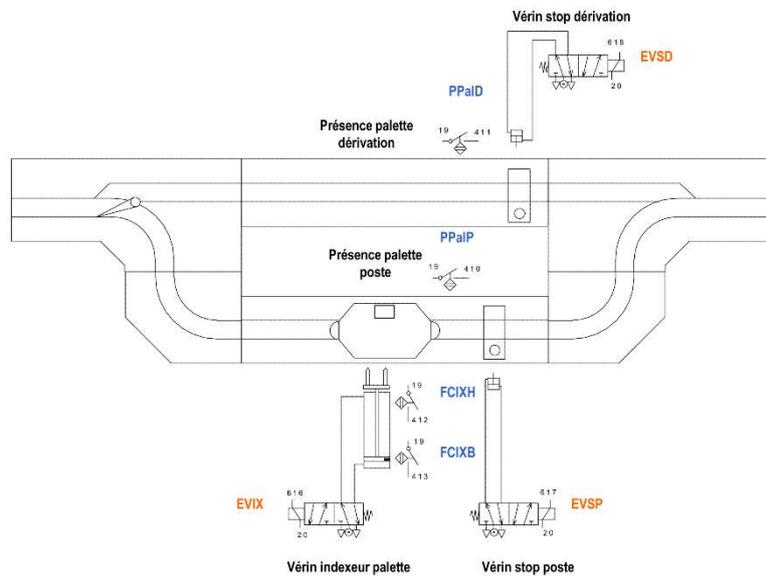
PL: L' INDEXATION DE LA PALETTE



Page 23



PL: Schéma pneumatique



Page 24



PL: Fonctionnalités

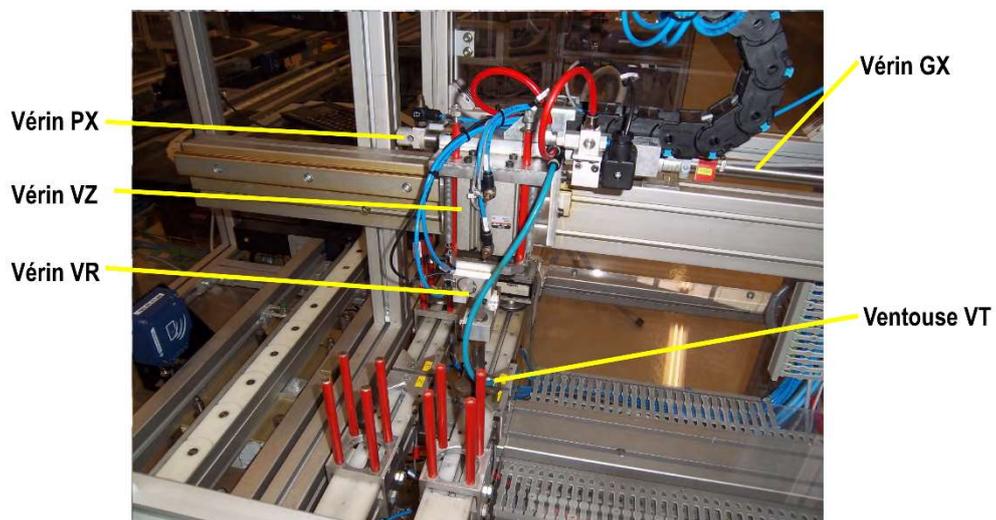


- Attend une palette et la met en position indexée
- Gère la sortie d'une palette du poste et la remet sur le convoyeur

Page 25



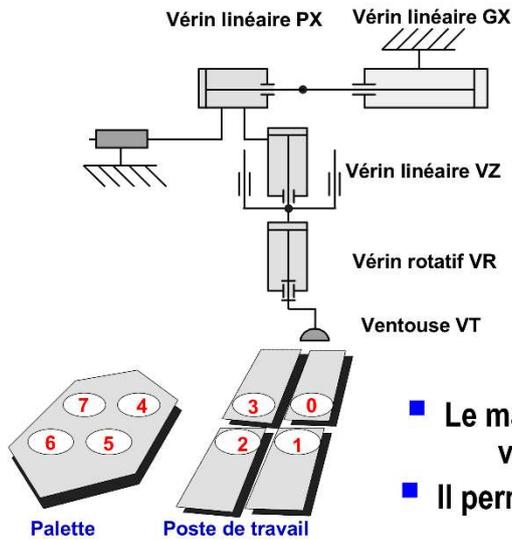
MP: LE MANIPULATEUR



Page 26



MP: Cinématique

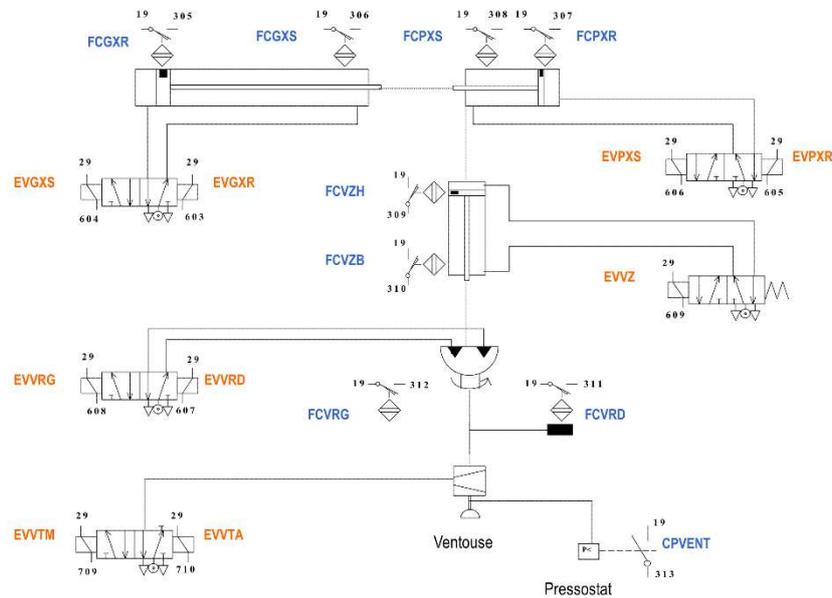


- Le manipulateur se compose de 4 vérins et d'une ventouse.
- Il permet de déplacer une pièce à 8 positions fixes.

Page 27



MP: Schéma pneumatique



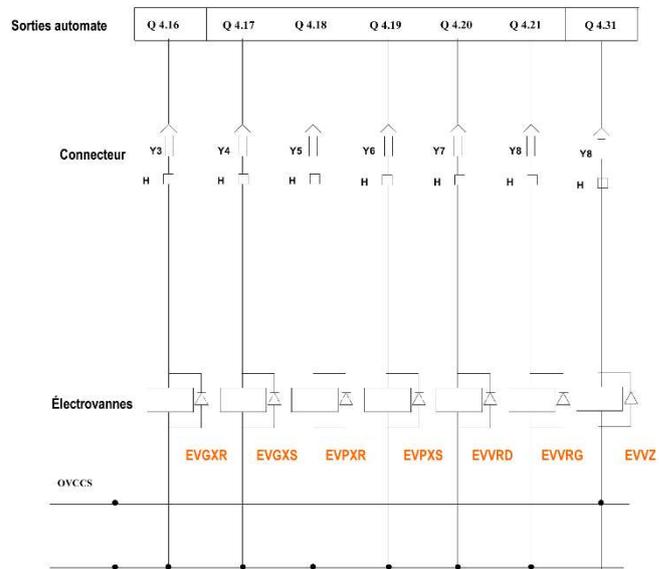
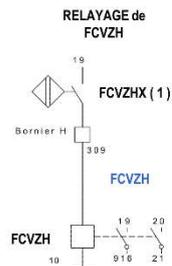
Page 28



MP: Schéma électrique



Le fin de course FCVZH n'autorise les mouvements des vérins que si le vérin VZ est en position haute



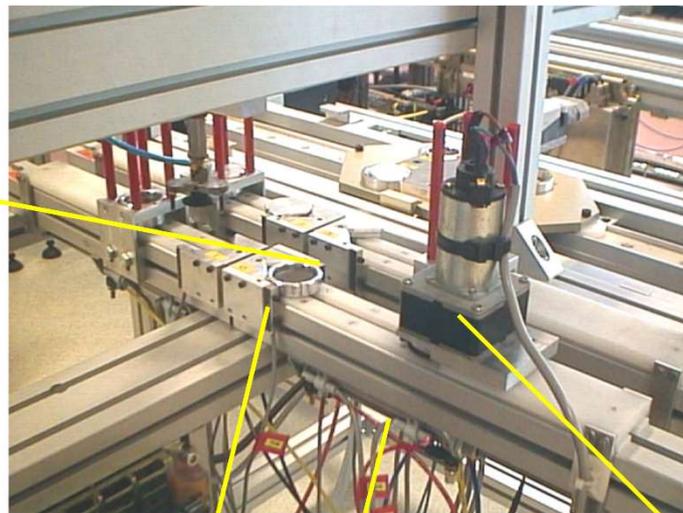
Page 29



ORX: L'ORIENTEUR



Capteur
Détection
encoche



Capteur
Présence
pièce

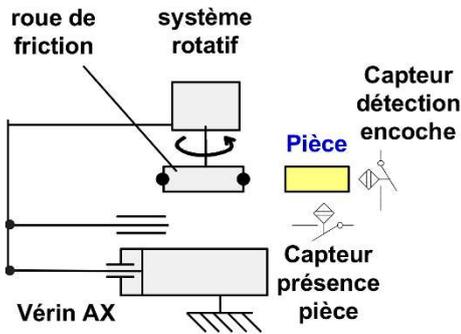
Vérin AX

Moteur-réducteur
Système de friction

Page 30



ORX: Cinématique



- L'orienteur se compose d'un vérin qui avance un système en rotation contre la pièce,
- Le mouvement de rotation, produit par un moteur électrique, permet par friction de faire tourner la pièce et d'amener l'encoche devant un capteur magnétique,
- Lorsque l'encoche est détectée, la rotation du moteur est coupée automatiquement.

Page 31



ORX: Schéma

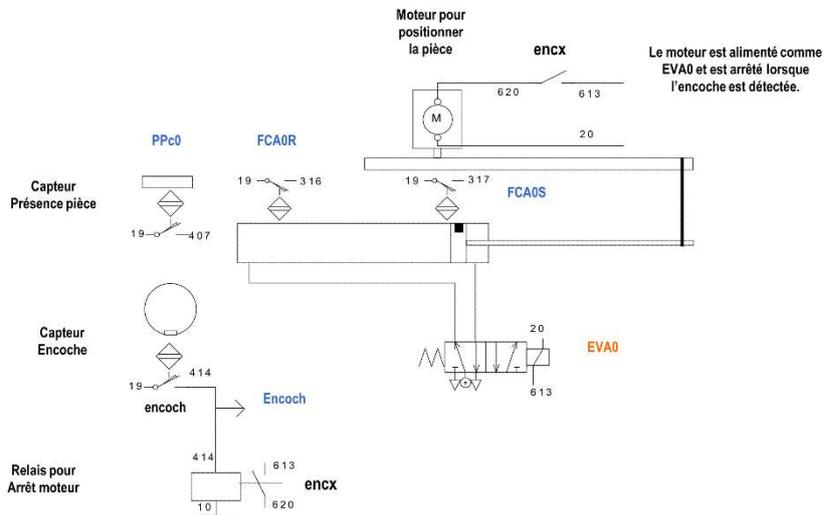


Schéma pour orienteur position 0

Page 32



ORX Fonctionnalités



- Oriente la pièce (encoche dans une position déterminée)
- Contrôle l'alignement des encoches par passage d'un rayon lumineux
- Un **ordre d'initialisation** permet de contrôler qu'il est en position repos et qu'aucune pièce n'est sur l'orienteur,
- L'orienteur peut pousser la pièce contre le V de positionnement et faire tourner la pièce par friction pour **amener l'encoche en face du capteur**,
- Si l'encoche n'est pas détectée au bout d'un certain temps, **la pièce est déclarée mauvaise**.

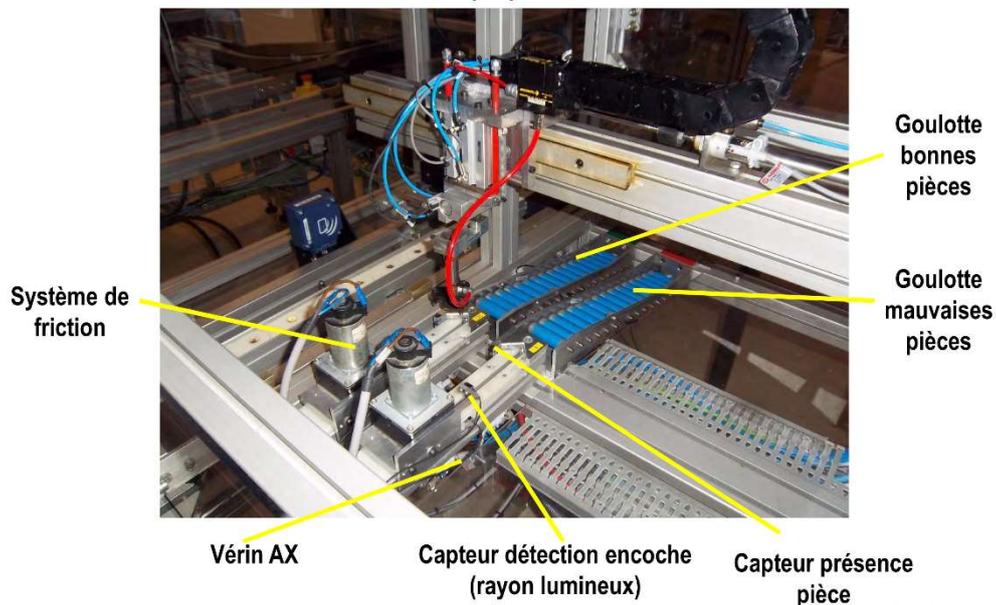
Page 33



CTLX: LES CONTRÔLEURS



Même modèle que pour l'orienteur



Page 34



CTL1: Schéma élec+pneu

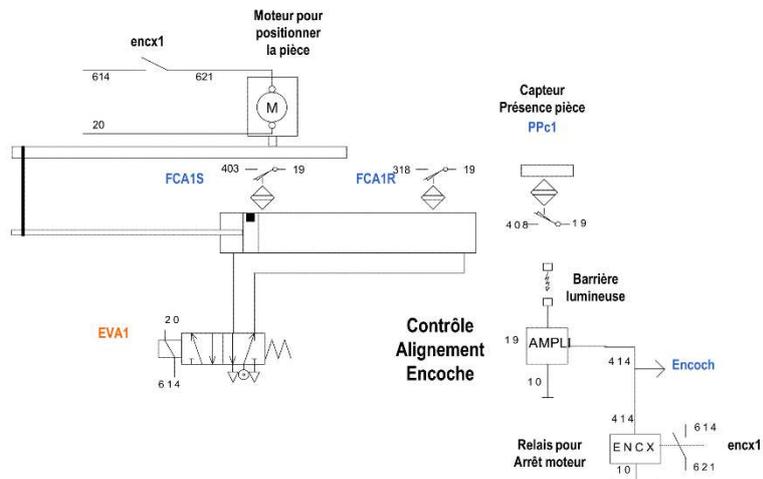


Schéma pour contrôleur position 1

Page 35



CTL2: Schéma élec+pneu

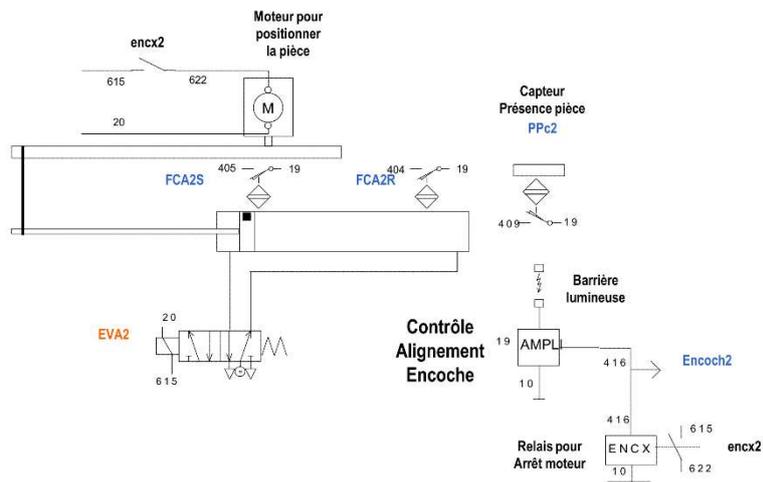
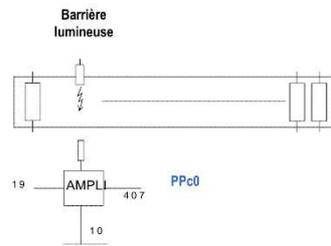


Schéma pour contrôleur position 2

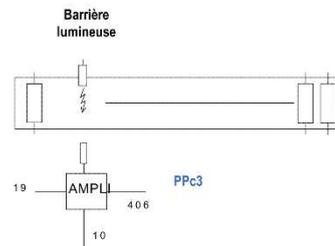
Page 36



CTLX: Schéma toboggans



Toboggan position 0

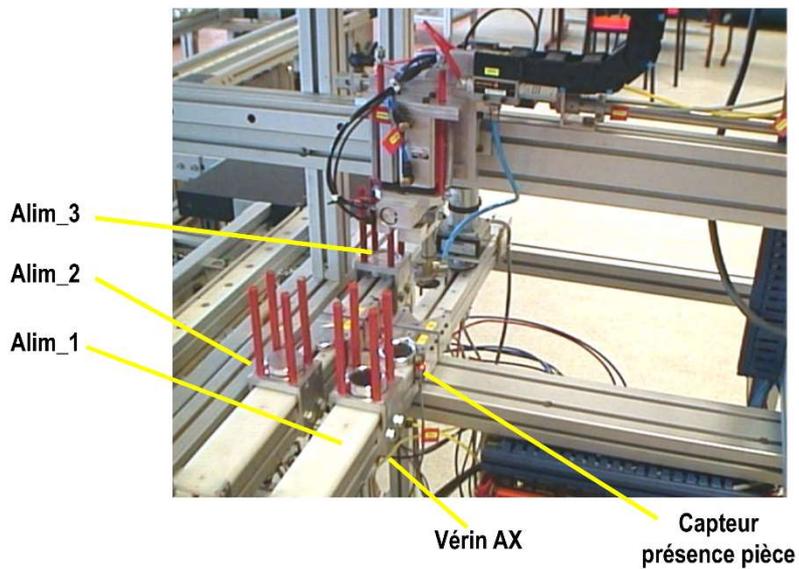


Toboggan position 3

Page 37



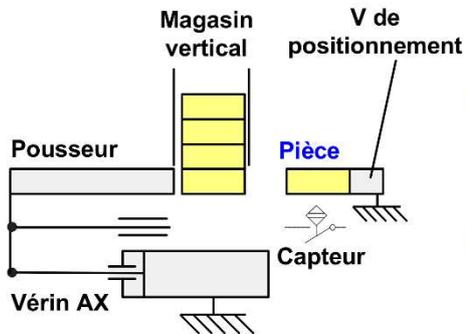
ALX: LES ALIMENTATIONS



Page 38



ALX: Cinématique

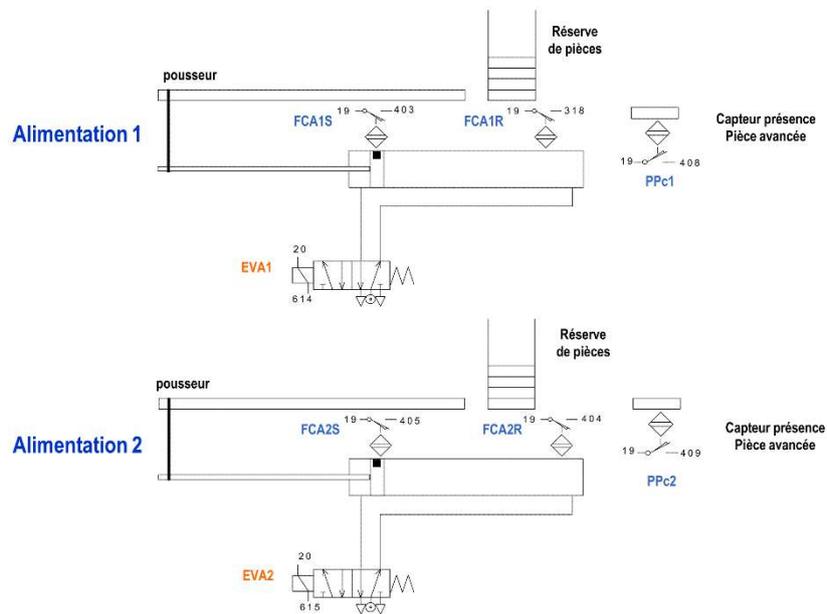


- L'alimentation se compose d'un vérin qui avance un pousseur de pièce,
- La pièce, stockée dans un magasin de type tour, est poussée par le pousseur vers un V de positionnement,
- Un capteur, monté sur le V de positionnement, détecte la présence de la pièce.

Page 39



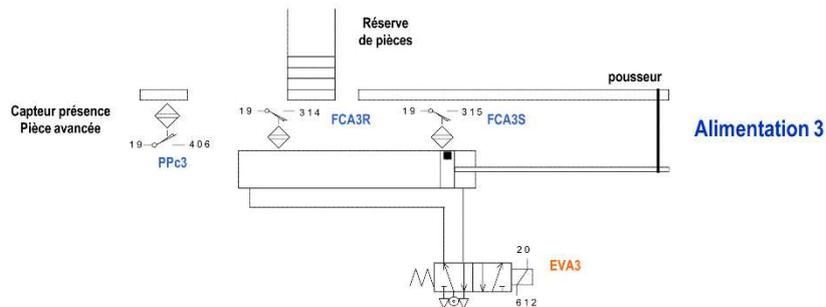
ALX: Schéma élec+pneu (1/2)



Page 40



ALX: Schéma élec+pneu (2/2)



Page 41



ALX: Fonctionnalités

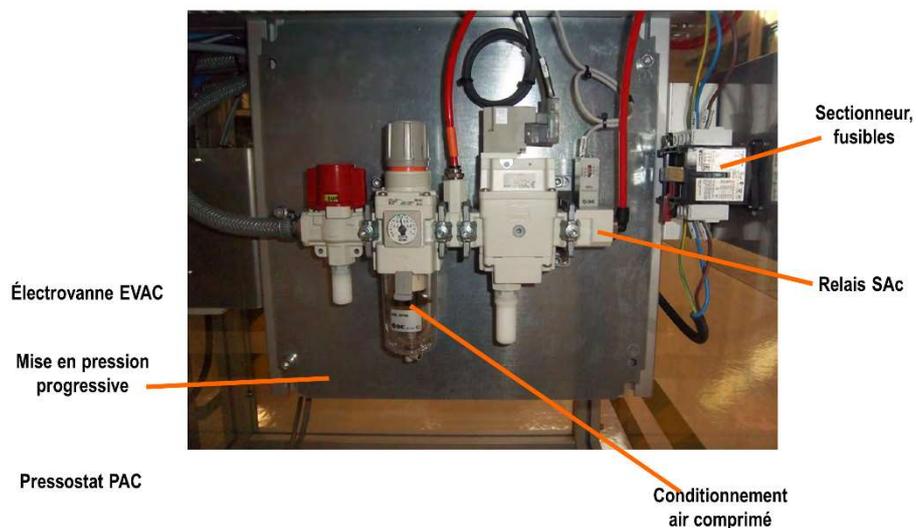


- Avance une nouvelle pièce lorsque la pièce en place a disparu,
- L'alimentation peut:
 - se vider lors d'un changement de fabrication
 - pousser une pièce et contrôler sa présence sur le V de positionnement,
 - pousser automatiquement une nouvelle pièce lorsqu'une pièce est prise,

Page 42



NRJ : L'ENERGIE



Page 43



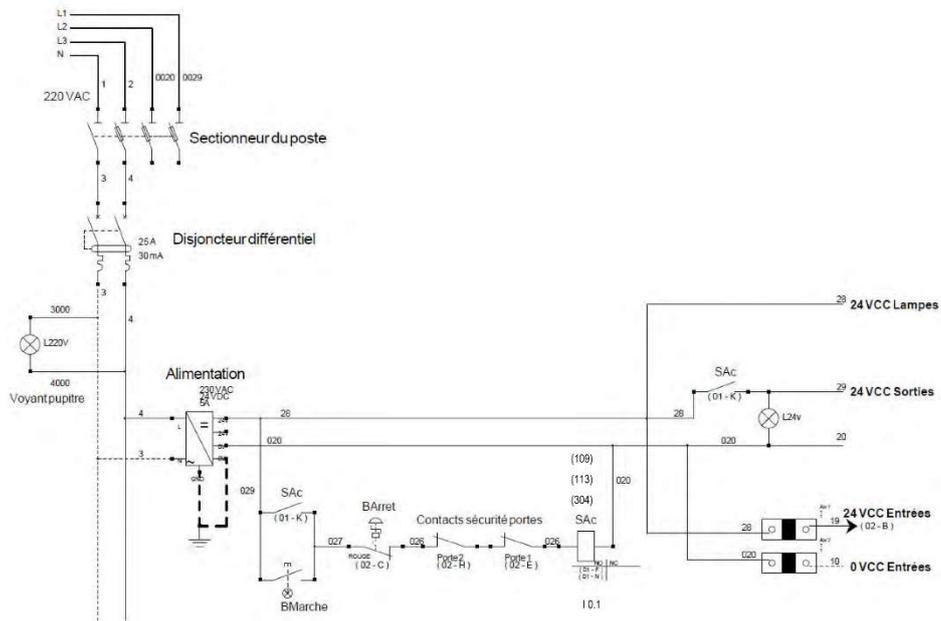
NRJ : L'ENERGIE



Page 44



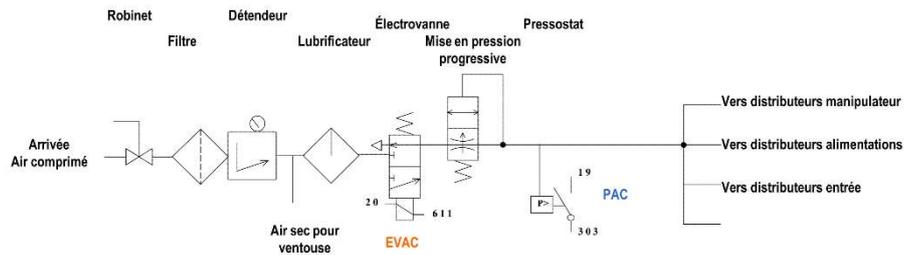
NRJ : Schéma électrique



Page 45



NRJ : Schéma pneumatique



Page 46



NRJ : Fonctionnalités

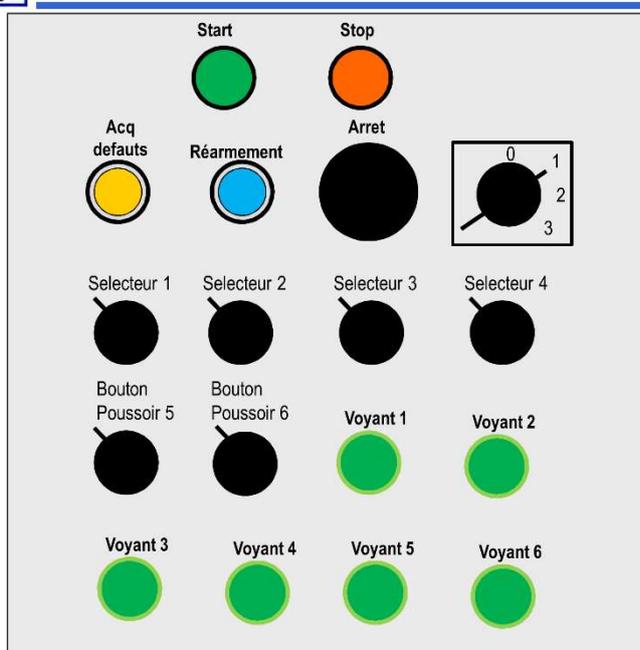


- Gère la mise en énergies du poste
- Surveillance que ces énergies ne disparaissent pas,

Page 47



PUP: LE PUPITRE MACHINE



0 : arrêt
1 : manu
2 : init
3 : auto

Dialogue
Opérateur

Page 48



LES ETIQUETTES RFID



Tête de lecture / écriture
Station RFID
XGCS850C201
(Ethernet)



Etiquette RFID 112 octets
XGHB320345

Page 49



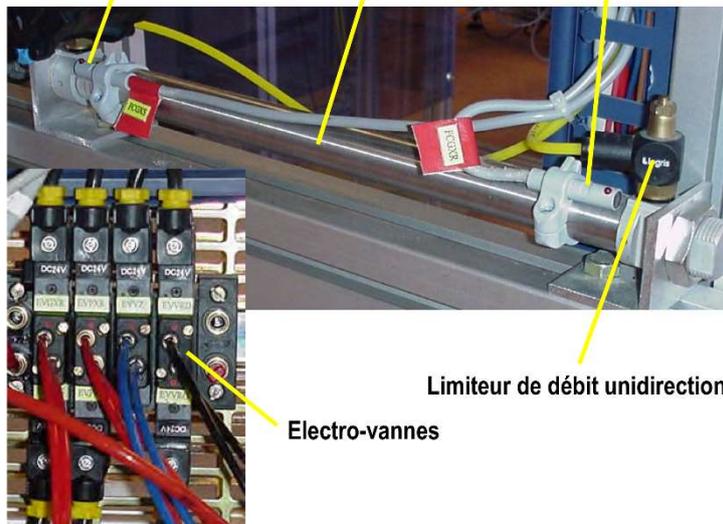
VRX: LES VERINS



Fin de Course magnétique

Vérin

Fin de Course magnétique



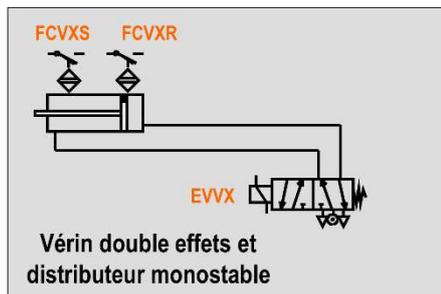
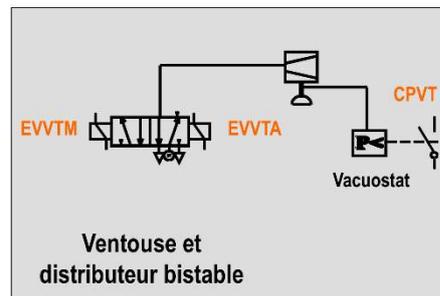
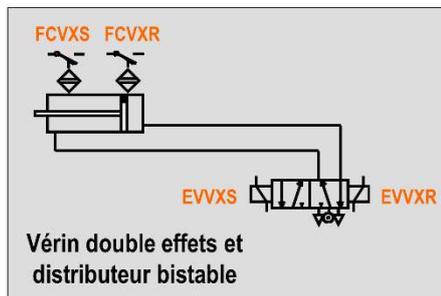
Limiteur de débit unidirectionnel

Electro-vannes

Page 50



VRX: La famille des vérins



Page 51



VRX: Fonctionnalités vérins



Vérins de type monostable ou de type bistable

- Des ordres de travail et de repos l'amène en position de travail ou en position de repos,
- Une auto-surveillance permet de détecter des dysfonctionnements statiques et dynamiques (en utilisant une temporisation).

Page 52



Ventouse de type bistable

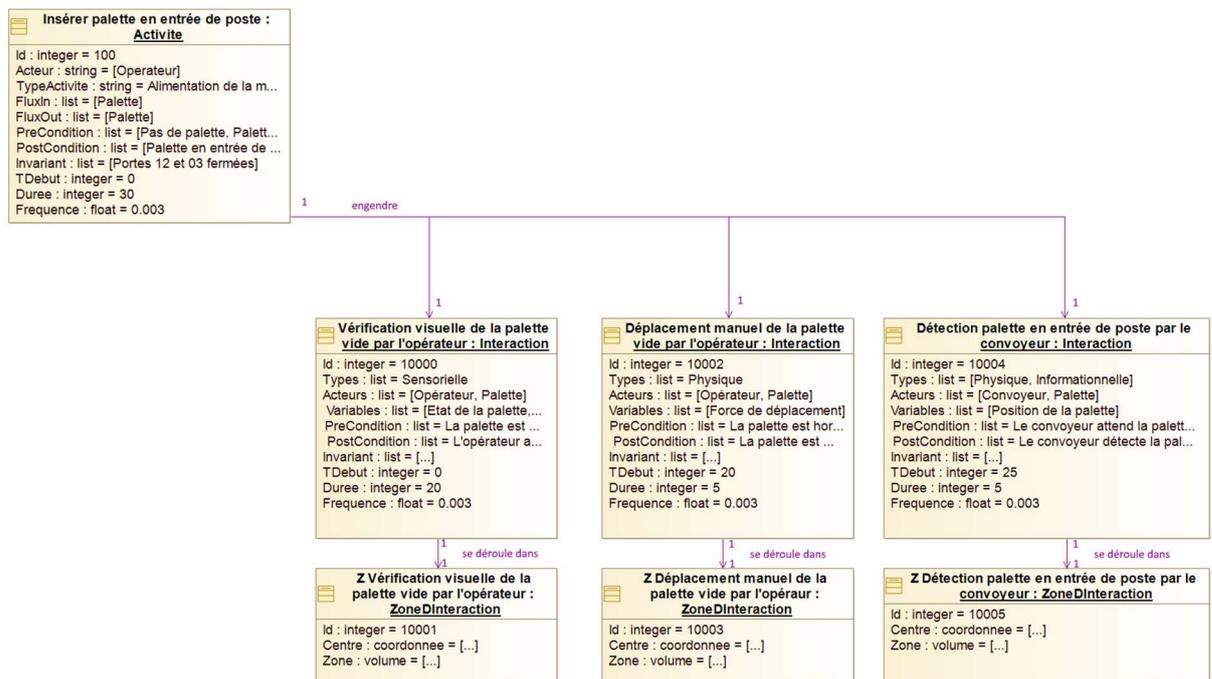
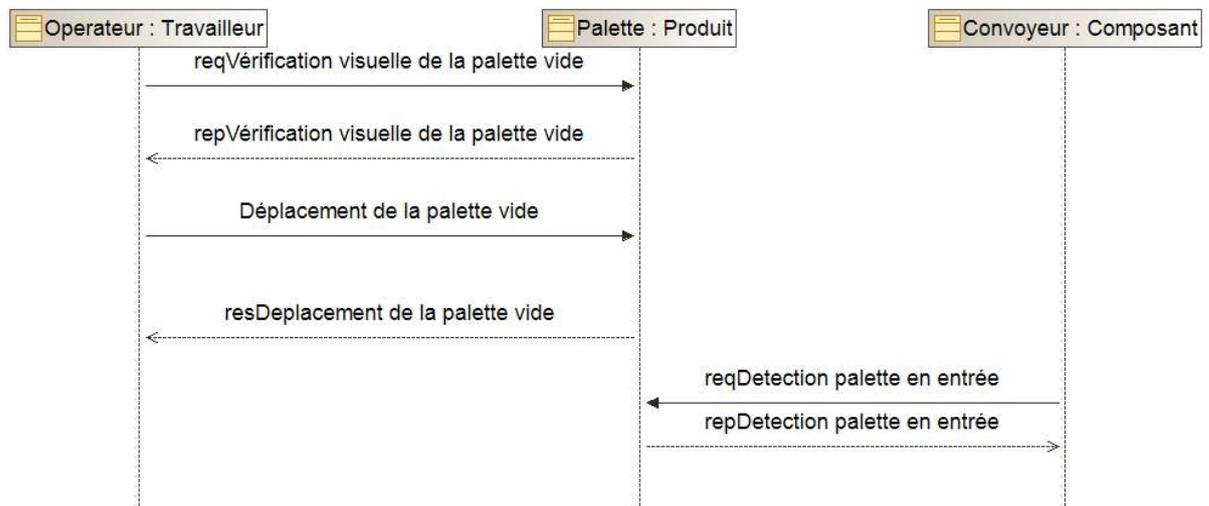
- Des ordres de travail et de repos l'amène en position de travail (prise de la pièce) ou en position de repos (pose de la pièce),
- Une auto-surveillance permet de détecter des dysfonctionnements statiques et dynamiques (en utilisant une temporisation).

<p>palette : Activite</p> <p>Id : integer = 103 Acteur : string = [poste_3] TypeActive : string = Fonction... FluxIn : list = [Pileo01+Pilete...] FluxOut : list = [Pileo01+Pilete...] PreCondition : list = [Pileo01+Pilete...] PostCondition : list = [Pileo01+Pilete...] Invariant : list = [Portes 12 et 03...] TDebut : integer = 90 TFin : integer = 90 Frequence : float = 0.003</p>	<p>Extraitre palette en sortie de poste : Activite</p> <p>Id : integer = 104 Acteur : string = [Operateur] TypeActive : string = Fonction... FluxIn : list = [Pileo01+Pilete...] FluxOut : list = [Pileo01+Pilete...] PreCondition : list = [Pileo01+Pilete...] PostCondition : list = [Pileo01+Pilete...] Invariant : list = [SFP lot a l'arrêl] TDebut : integer = 250 TFin : integer = 250 Frequence : float = 0.003</p>	<p>palette : Activite</p> <p>TypeActive : string = Fonctionnement FluxIn : list = [Pileo01+EP] FluxOut : list = [Pileo01+EP] PreCondition : list = [Pileo01 non ind...] PostCondition : list = [Pileo01 non ind...] Invariant : list = [Portes 12 et 03 fermè...] TDebut : integer = 5 TFin : integer = 5 Frequence : float = 0.012</p>	<p>Indexer pièce01 : Activite</p> <p>Id : integer = 304 Acteur : string = [Orient_0] TypeActive : string = Fonctionnement FluxIn : list = [Pileo01+EE,EP] FluxOut : list = [Pileo01+EE,EP] PreCondition : list = [Pileo01 non ind...] PostCondition : list = [Pileo01 non ind...] Invariant : list = [Portes 12 et 03 fermè...] TDebut : integer = 5 TFin : integer = 5 Frequence : float = 0.012</p>	<p>Indexer pièce01 : Activite</p> <p>Id : integer = 305 Acteur : string = [BrasRobotise_Manip] TypeActive : string = Fonctionnement FluxIn : list = [Pileo01+EP] FluxOut : list = [Pileo01+Ligne] PreCondition : list = [Pileo01 indexè...] PostCondition : list = [Pileo01 indexè...] Invariant : list = [Portes 12 et 03 fermè...] TDebut : integer = 120 TFin : integer = 120 Frequence : float = 0.012</p>	<p>Indexer pièce09 : P2 > P0 : Activite</p> <p>Id : integer = 306 Acteur : string = [BrasRobotise_Manip] TypeActive : string = Fonctionnement FluxIn : list = [Pileo01+EP] FluxOut : list = [Pileo09] PreCondition : list = [Pileo09 non ind...] PostCondition : list = [Pileo09 non ind...] Invariant : list = [Portes 12 et 03 fermè...] TDebut : integer = 5 TFin : integer = 5 Frequence : float = 0.012</p>	<p>Indexer pièce09 : Activite</p> <p>Id : integer = 307 Acteur : string = [Orient_0] TypeActive : string = Fonctionnement FluxIn : list = [Pileo01+EE,EP] FluxOut : list = [Pileo09] PreCondition : list = [Pileo09 non ind...] PostCondition : list = [Pileo09 non ind...] Invariant : list = [Portes 12 et 03 fermè...] TDebut : integer = 130 TFin : integer = 130 Frequence : float = 0.012</p>	<p>Indexer pièce09 : P0 > Palette : Activite</p> <p>Id : integer = 308 Acteur : string = [BrasRobotise_Manip] TypeActive : string = Fonctionnement FluxIn : list = [Pileo01+Palette, Pileo...] FluxOut : list = [Produit09+Palette] PreCondition : list = [Produit09 non ind...] PostCondition : list = [Produit09 non ind...] Invariant : list = [Portes 12 et 03 fermè...] TDebut : integer = 135 TFin : integer = 135 Frequence : float = 0.012</p>	<p>Indexer pièce09 : P0 > Palette : Activite</p> <p>Id : integer = 309 Acteur : string = [Convoyeur] TypeActive : string = Fonctionnement FluxIn : list = [Palette+Produit09...] FluxOut : list = [Palette, Produit0109] PreCondition : list = [Cycle => 4] PostCondition : list = [Luge en septe...] Invariant : list = [Portes 12 et 03 fermè...] TDebut : integer = 250 TFin : integer = 250 Frequence : float = 0.003</p>
--	--	--	--	---	--	--	--	--

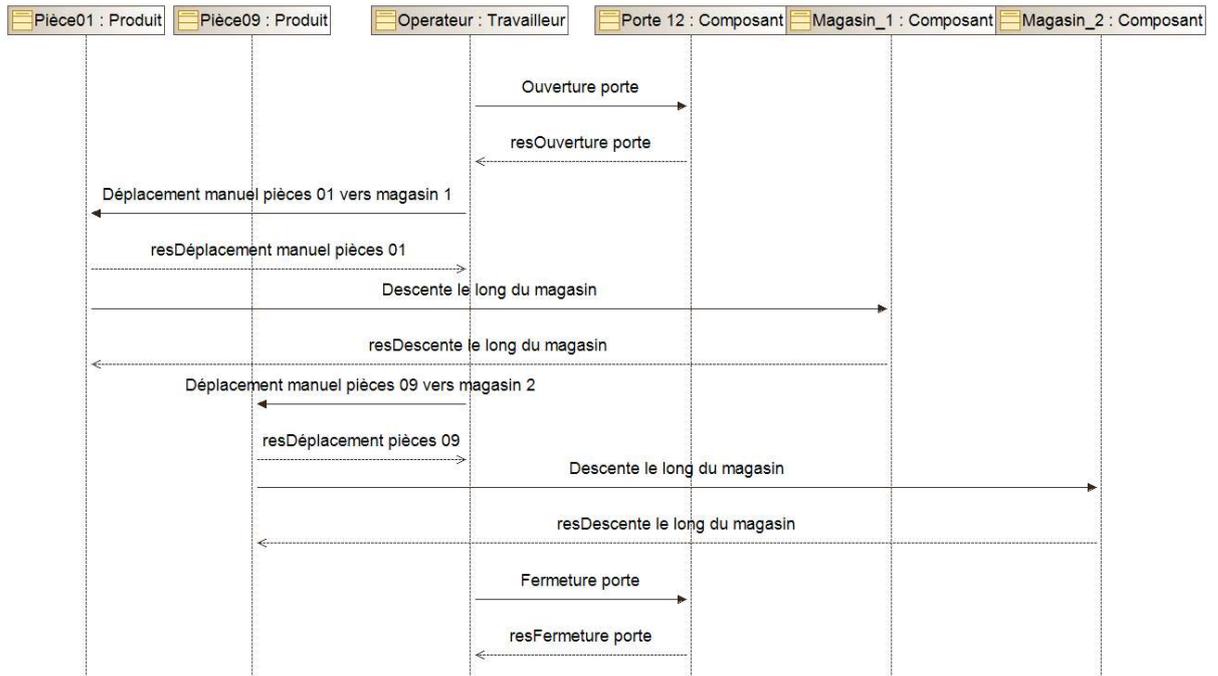
<p>Indexer pièce01 : Activite</p> <p>Id : integer = 62 Position : coordonnee = [...] Dimensions : volume = [...] Fonction : string = Separer la zone... EnergieIn : list = EM EnergieOut : list = -</p>	<p>Porte 12 : Composant</p> <p>Id : integer = 60 Position : coordonnee = [...] Dimensions : volume = [...] Fonction : string = Separer l'opera... EnergieIn : list = EM EnergieOut : list = EM</p>	<p>Porte 03 : Composant</p> <p>Id : integer = 61 Position : coordonnee = [...] Dimensions : volume = [...] Fonction : string = Separer l'opera... EnergieIn : list = EM EnergieOut : list = EM</p>	<p>PartieCommande : Composant</p> <p>Id : integer = 63 Dimensions : volume = [...] Fonction : string = Commander le ... EnergieIn : list = EE EnergieOut : list = -</p>	<p>NappeCableAlimentation : Composant</p> <p>Id : integer = 62 Position : coordonnee = [...] Dimensions : volume = [...] Fonction : string = Alimenter en pul... EnergieIn : list = EE et EP EnergieOut : list = EE et EP</p>	<p>Composant</p> <p>Id : integer = 62 Position : coordonnee = [...] Dimensions : volume = [...] Fonction : string = Separer la zone... EnergieIn : list = EM EnergieOut : list = -</p>
---	--	--	--	---	--

Annexe B.2 : Diagrammes de séquence et caractérisations des interactions de chaque activité réalisée par l'opérateur ou un composant de la machine « poste_3 »

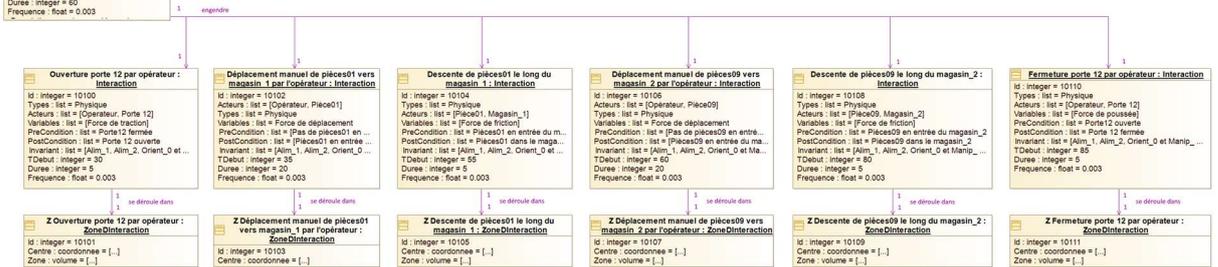
Insérer palette en entrée de poste



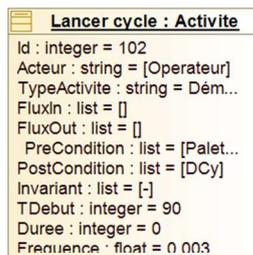
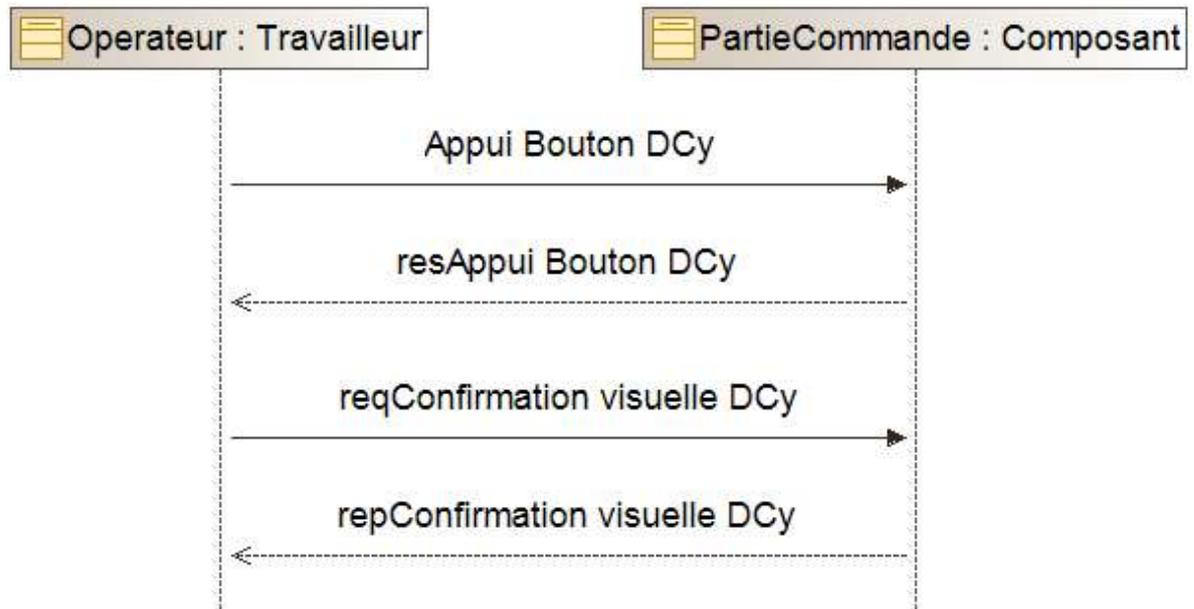
Approvisionner en pièces 01 et 09



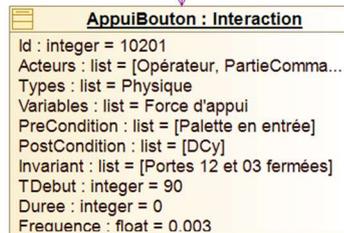
Approvisionner en pièces 01 et 09 : Activité
 Id : Integer = 101
 Acteur : string = [Operateur]
 TypeActivite : string = Alimentation de la m...
 FluxIn : list = [Pièce01, Pièce09]
 FluxOut : list = [Pièce01, Pièce09]
 PreCondition : list = []
 PostCondition : list = [Pièces 01 et Pièces ...]
 Invariant : list = [SPP, lot à venir]
 TDebut : Integer = 30
 Duree : Integer = 60
 Frequence : float = 0.003



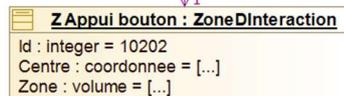
Lancer cycle



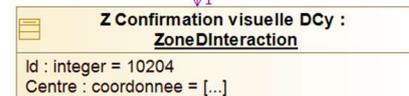
1 engendre



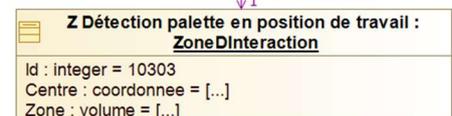
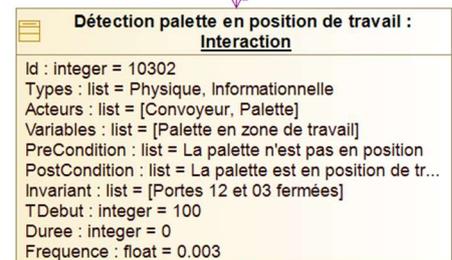
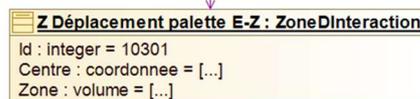
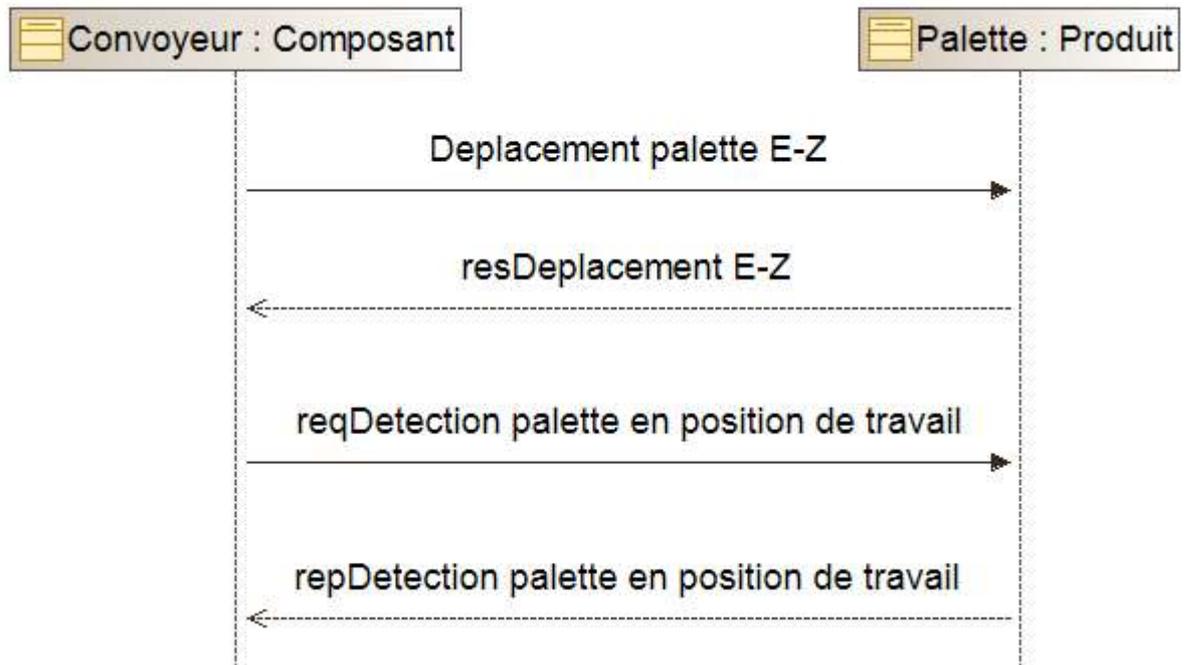
se déroule dans



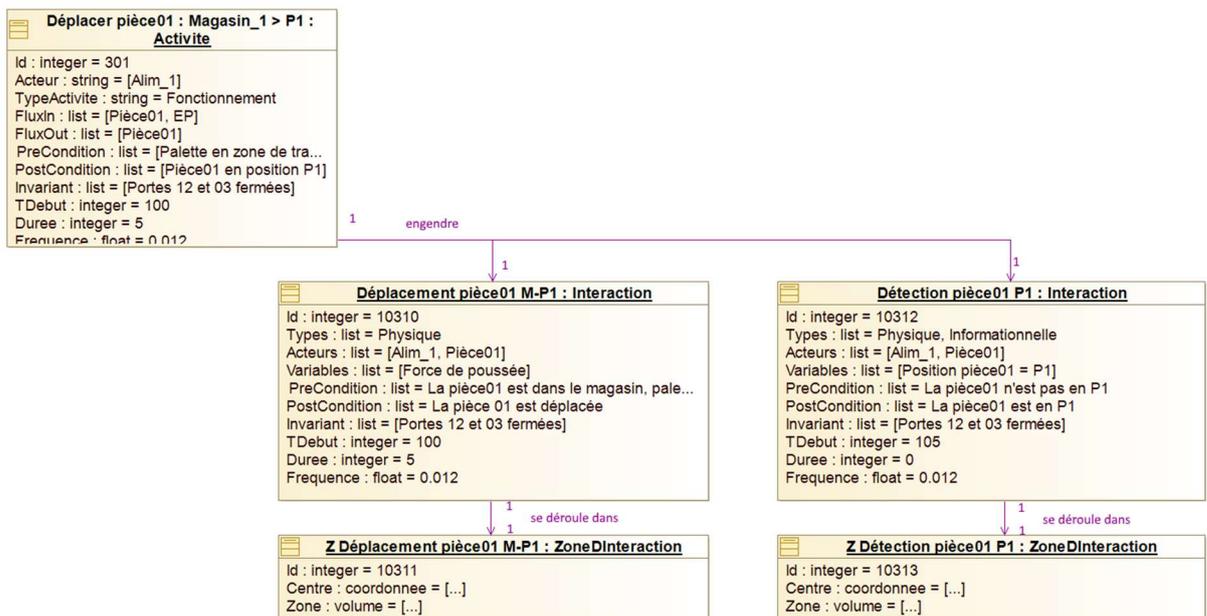
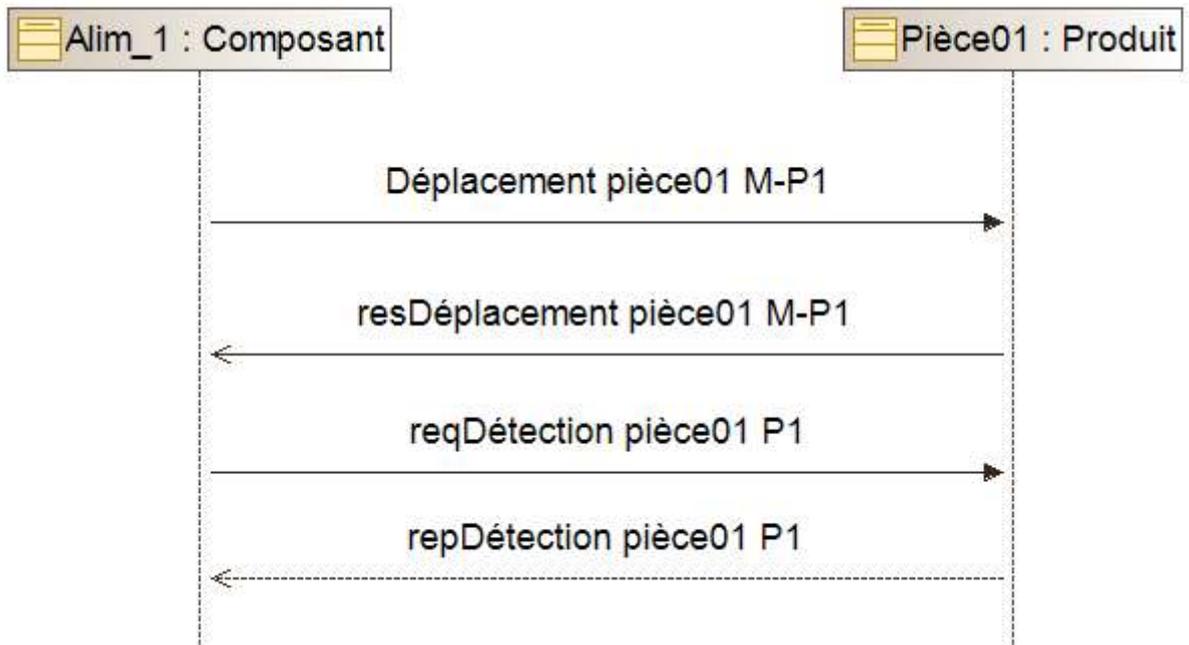
se déroule dans



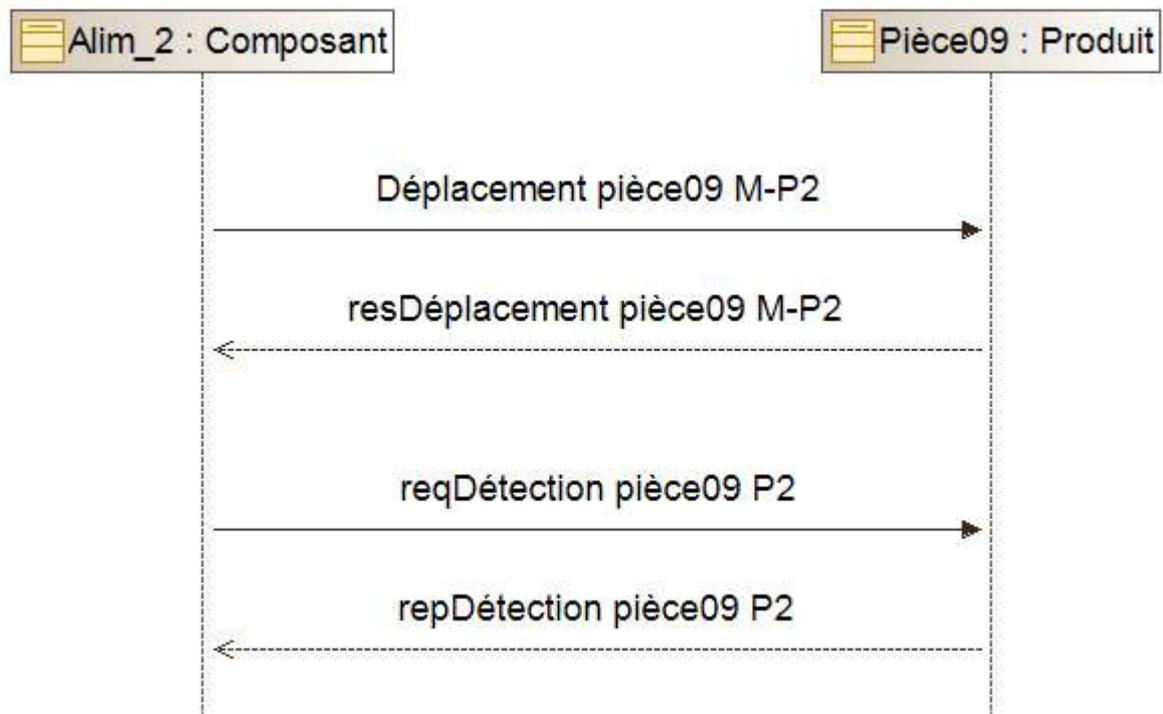
Déplacer palette : Entrée > Zone de travail



Déplacer pièce01 : Magasin_1 > P1



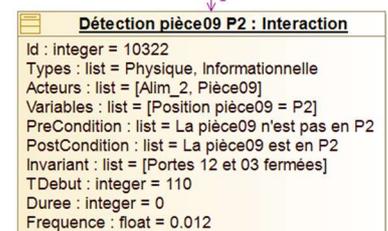
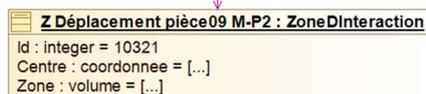
Déplacer pièce09 : Magasin_2 > P2



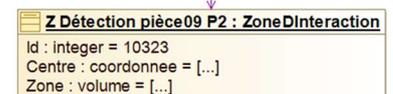
1 engendre



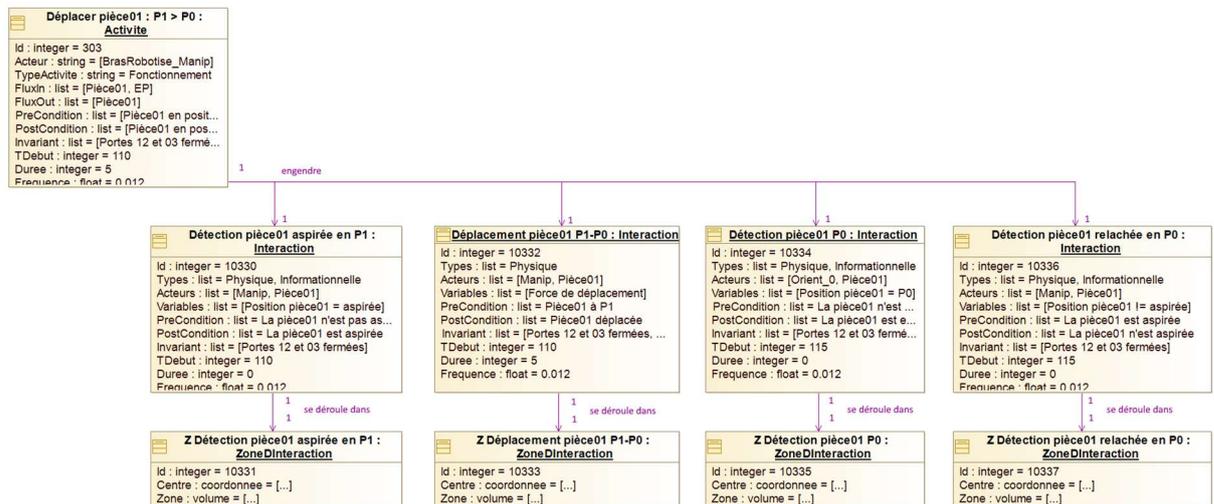
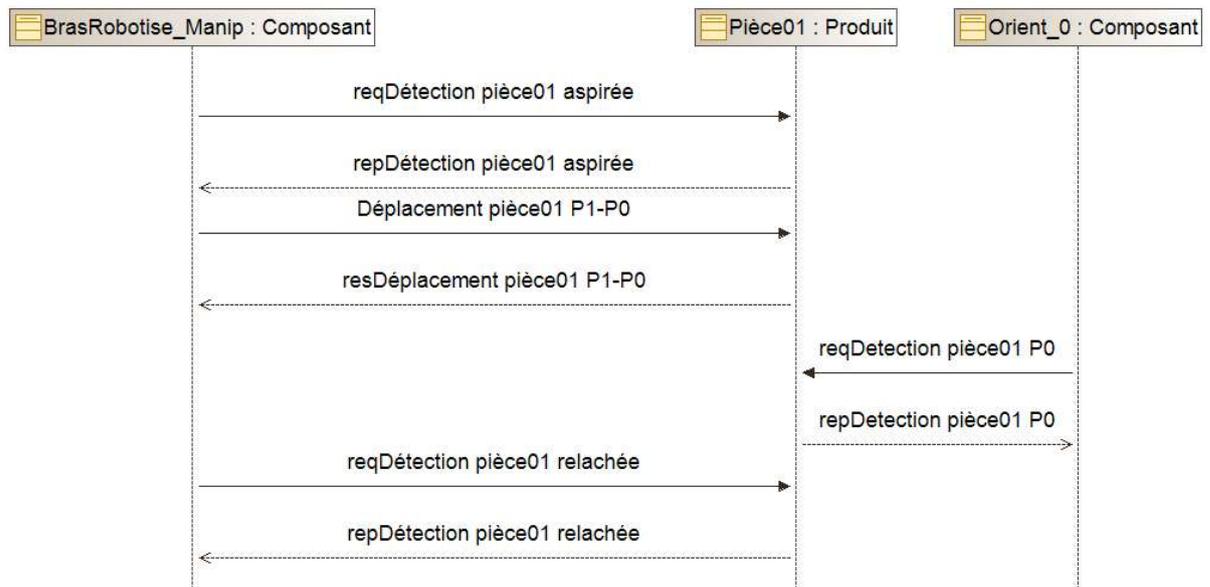
1 se déroule dans



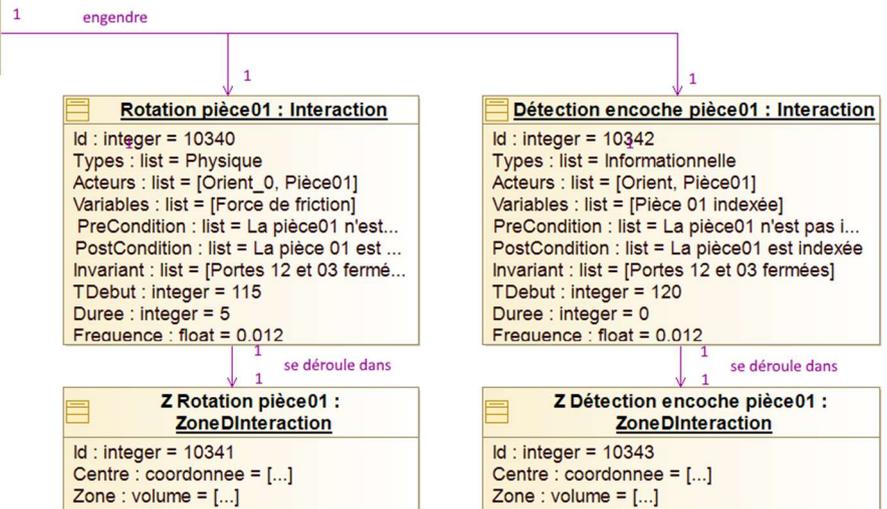
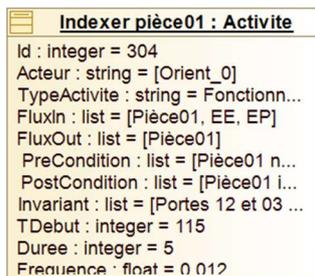
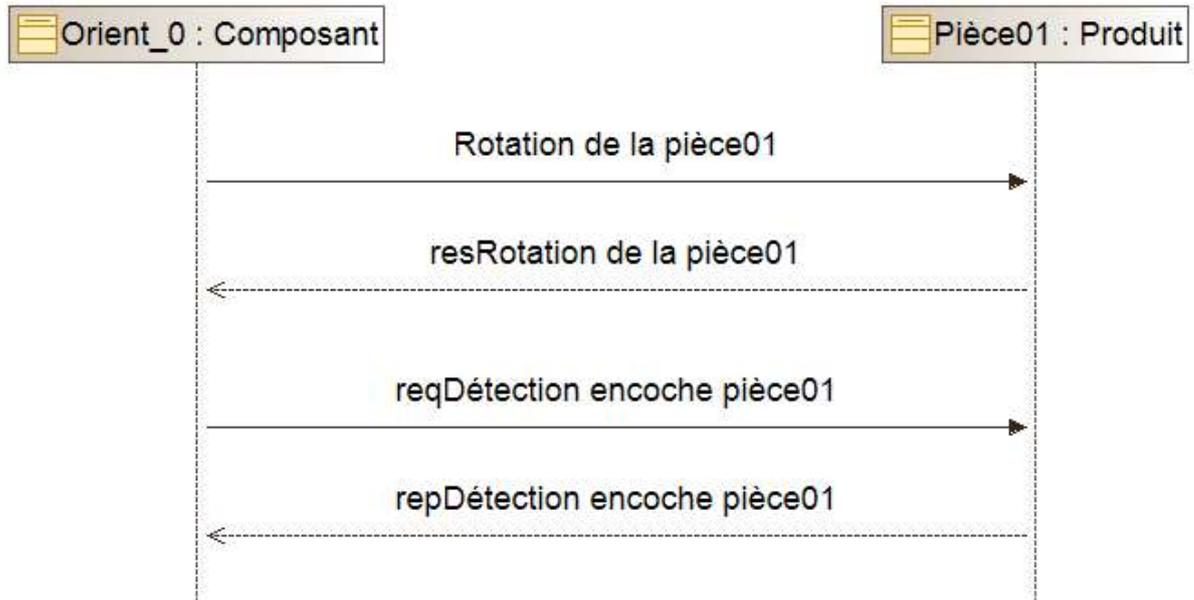
1 se déroule dans



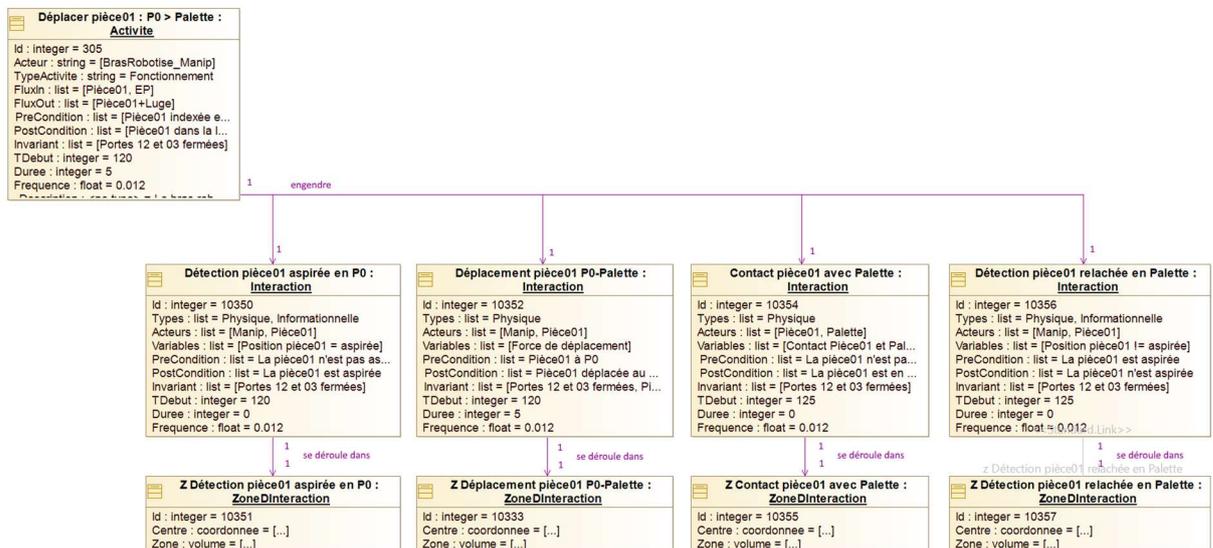
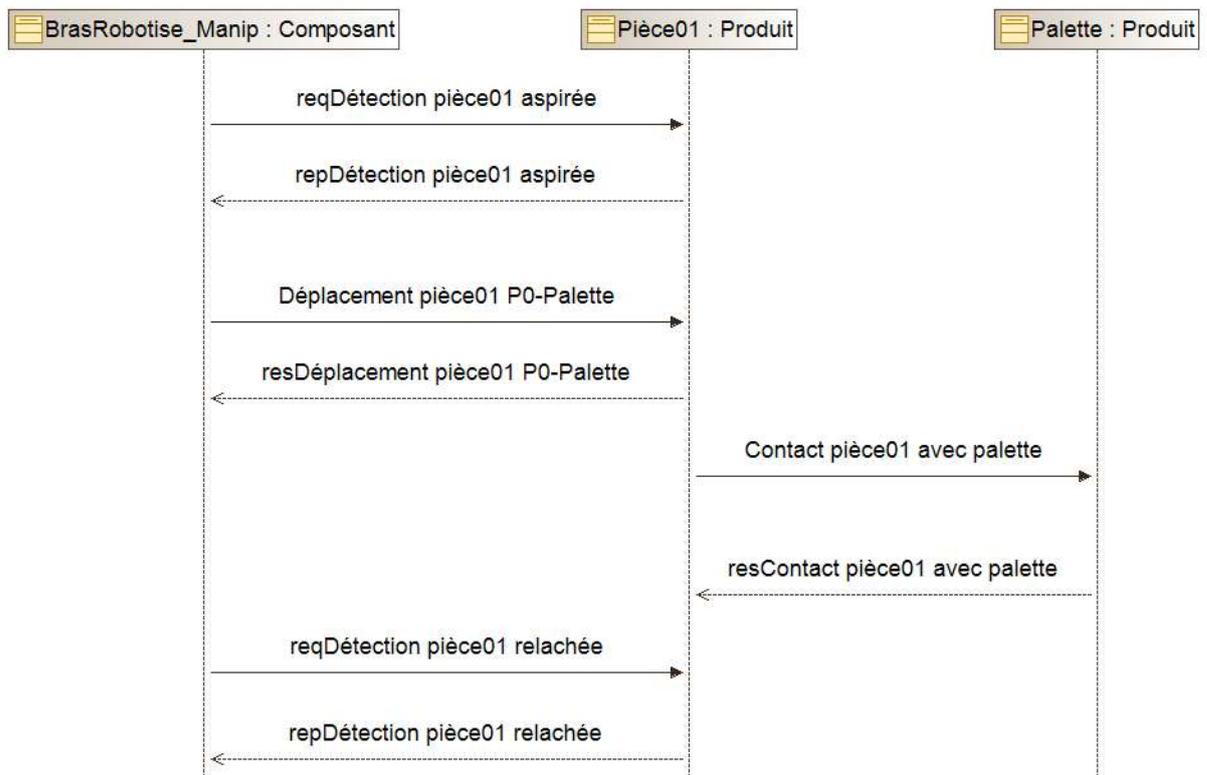
Déplacer pièce01 : P1 > P0



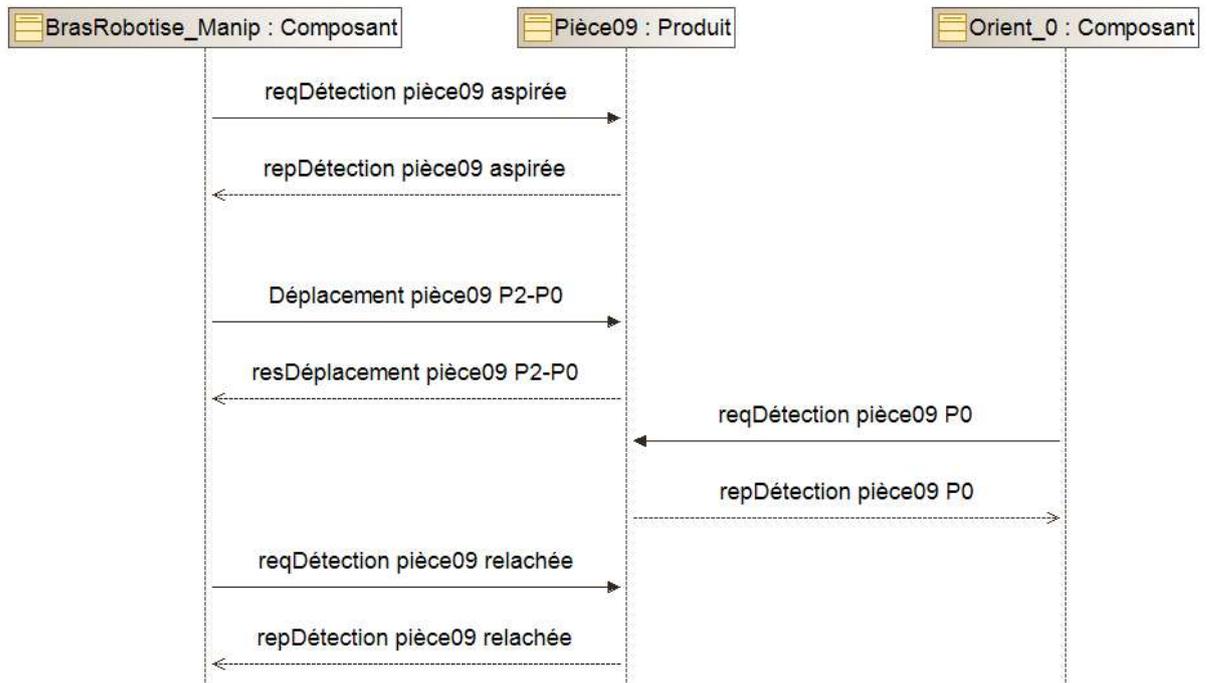
Indexer pièce01



Déplacer pièce01 : P0 > Palette

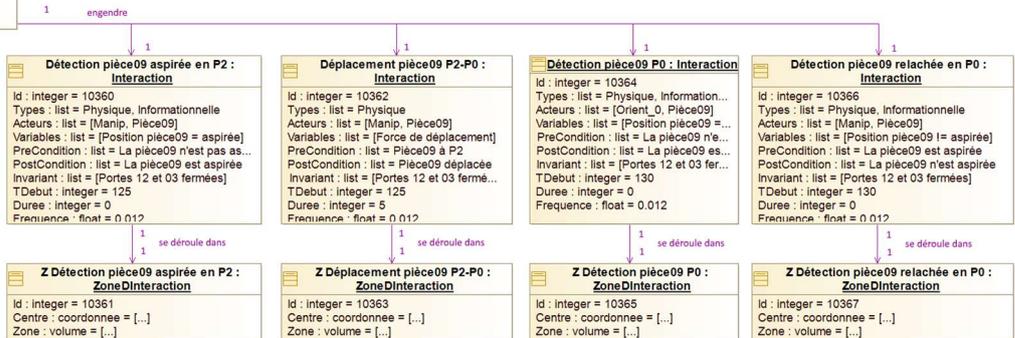


Déplacer pièce09 : P2 > P0

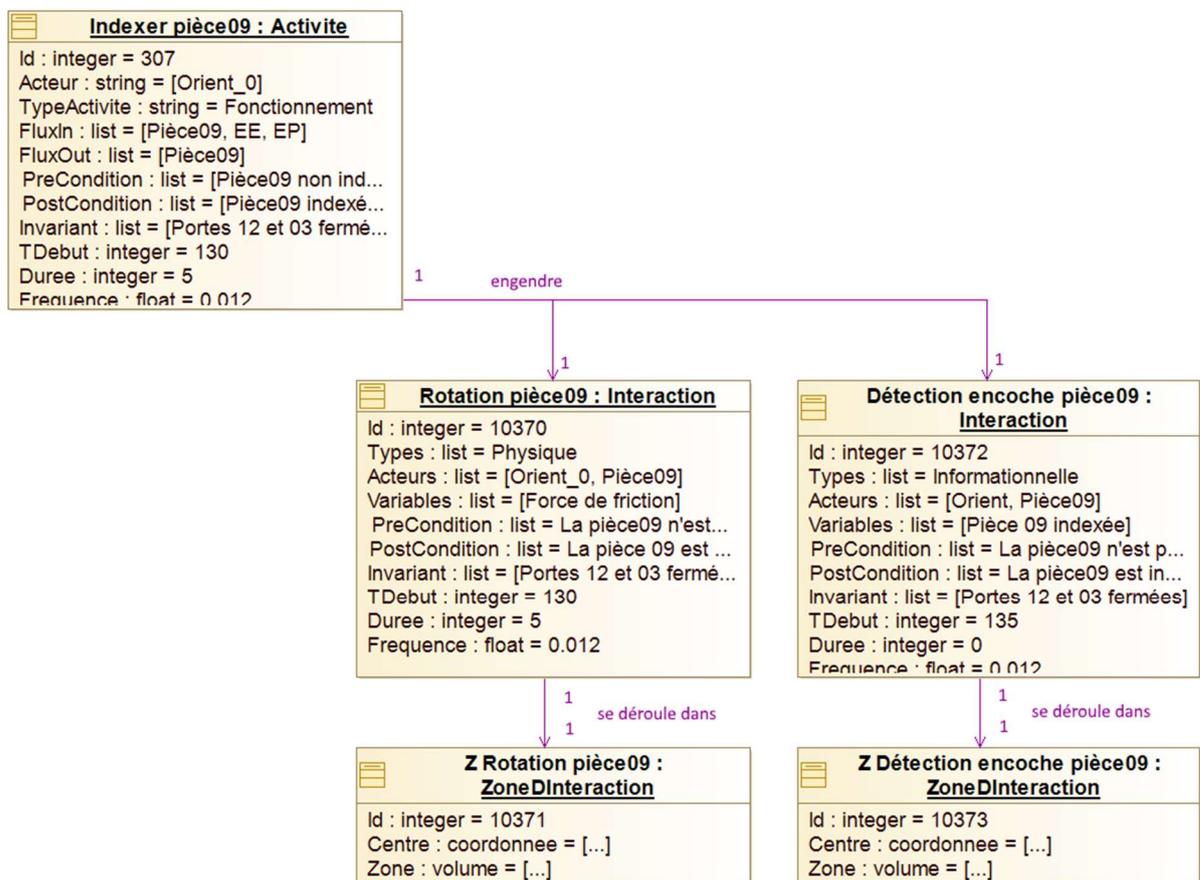
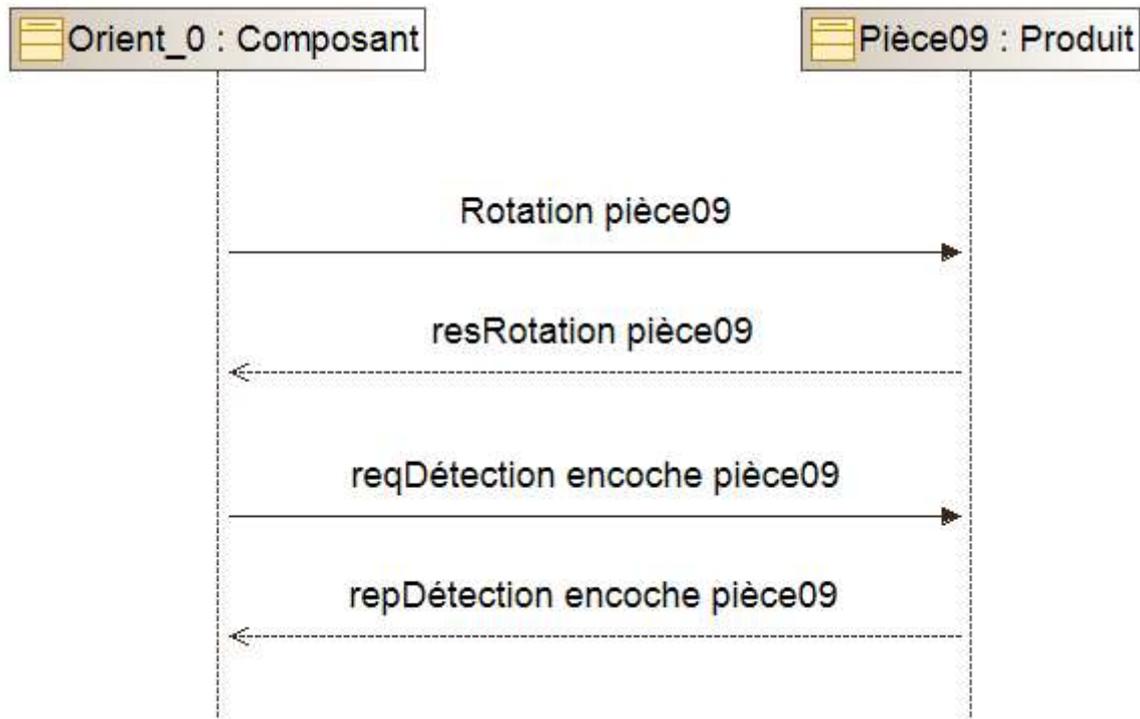


Déplacer pièce09 : P2 > P0 : Activité

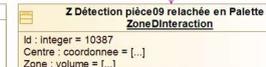
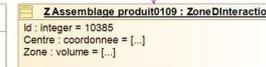
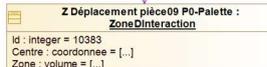
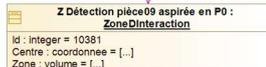
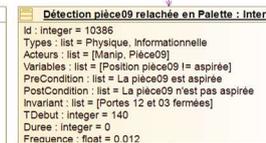
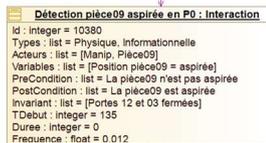
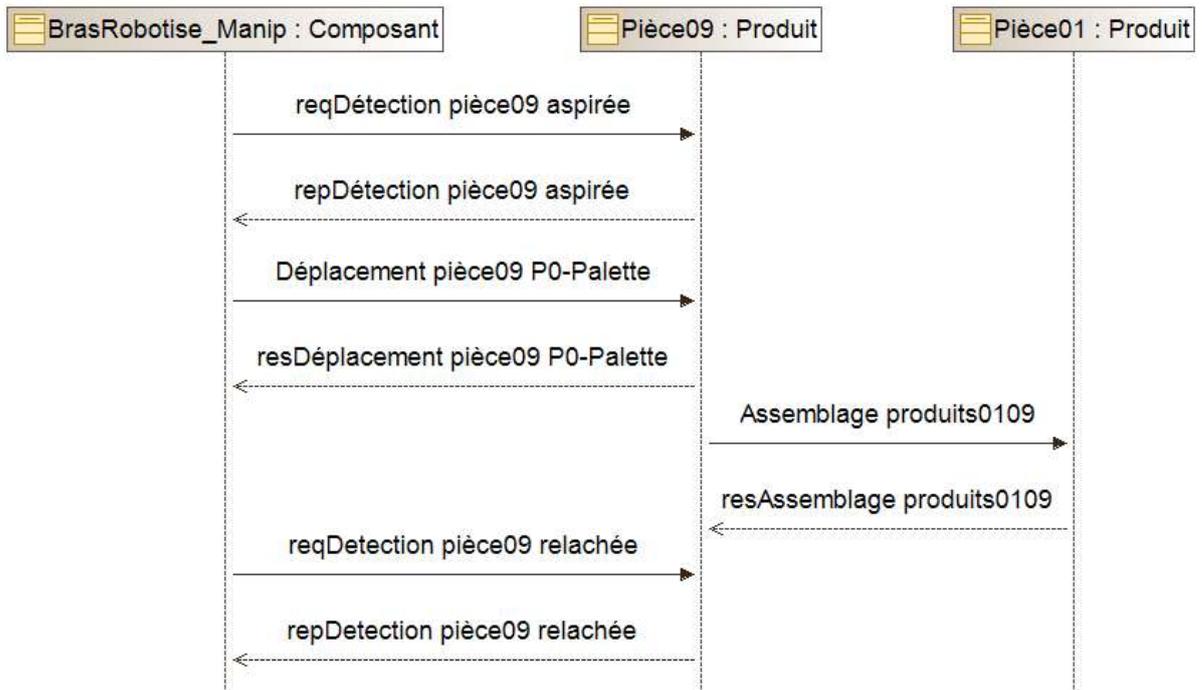
Id : integer = 306
 Acteur : string = [BrasRobotise_Ma...
 TypeActivite : string = Fonctionnem...
 FluxIn : list = [Pièce09, EP]
 FluxOut : list = [Pièce09]
 PreCondition : list = [Pièce09 en p...
 PostCondition : list = [Pièce09 en ...
 Invariant : list = [Portes 12 et 03 fe...
 TDebut : integer = 125
 Duree : integer = 5
 Frequence : float = 0.012



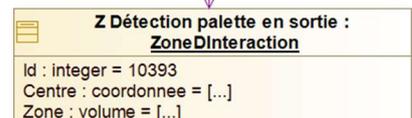
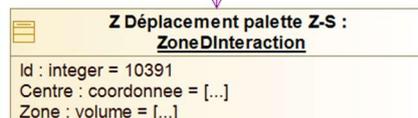
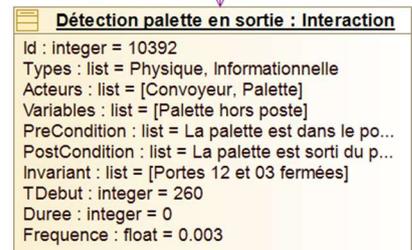
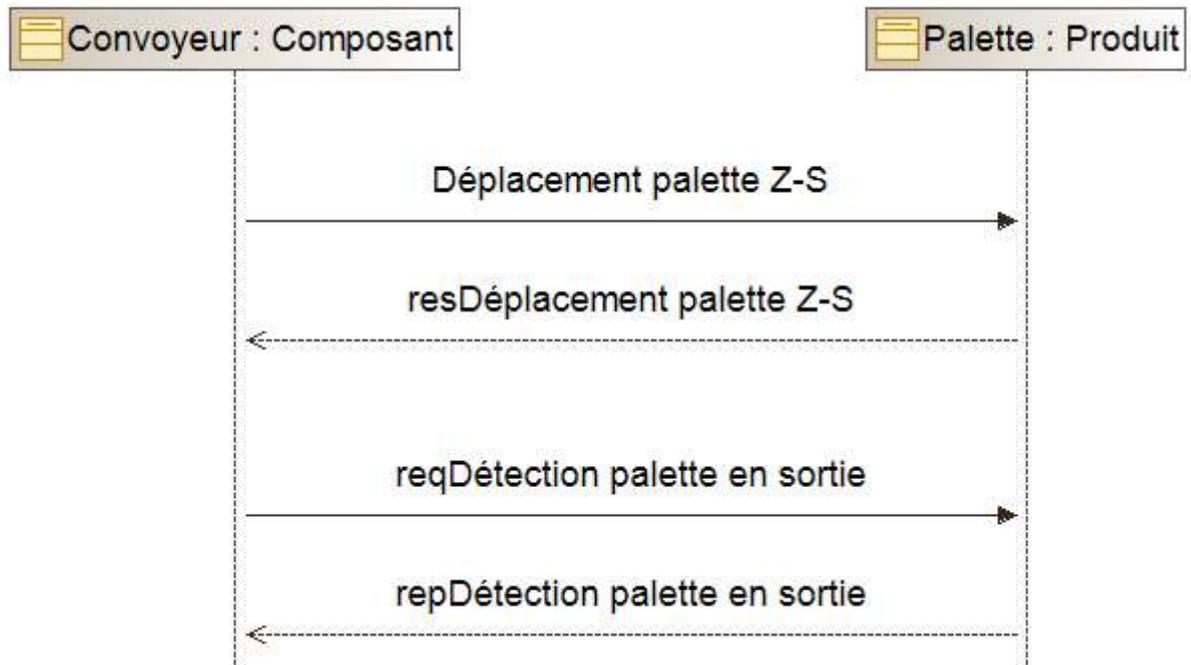
Indexer pièce09



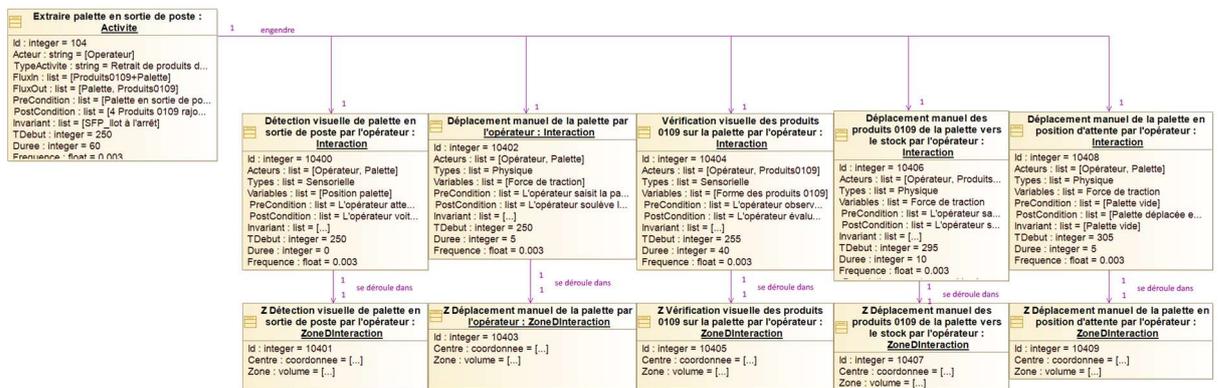
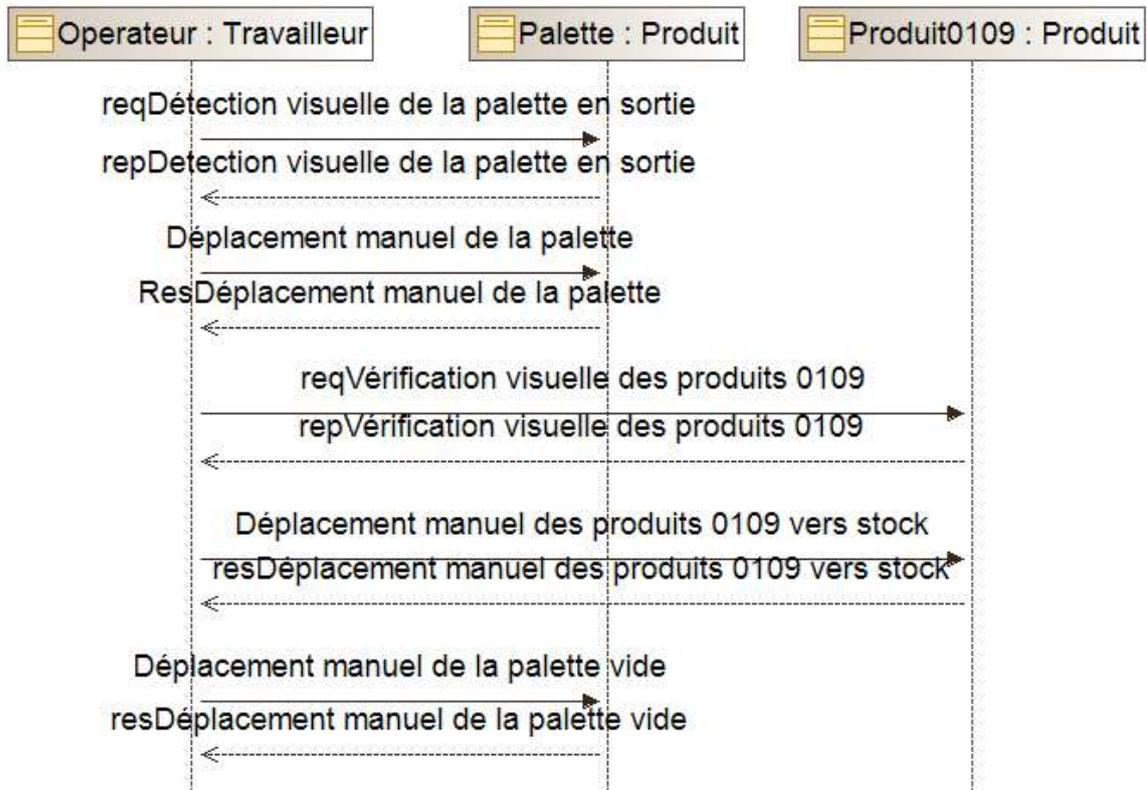
Déplacer pièce09 : P0 > Palette



Déplacer palette : Zone de travail > Sortie



Extraire palette en sortie de poste



Annexe C : Tableau complet des résultats de l'étape 2

Acteurs	Activités	Dérives techniques					Perceptions		Réponses		C		
		Modes de défaillance	Causes internes	Causes externes	F	Effets locaux ((Produits))	Effets au niveau supérieur ((Produits))	M sur H ou P sur H	N sur M ou H sur P	Phénomènes dangereux		G	
Poste_3 (P3)	Assembler produits0109 sur palette	AD	AD A1 AD A2 AD C	Autre pression EP Autre tension EE Moins de débit pièce01 Moins de débit pièce09 Moins de débit palette	2	Moins de débit produits 0109	AD ST	Moins de débit produits 0109	Moins de fréquence Détection visuelle de palette en sortie de poste ...	2	-	-	
		DF	DF A1 DF A2 DF M DF O	Pas d'EP Pas d'EE Pas de débit pièce01 Pas de débit pièce09 Pas de palette	1	Pas de débit produits 0109	DF ST	Pas de débit produits 0109	(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine	1	-	Plus de fréq. Ouverture porte 12... Plus de fréq. Ouverture porte 03...	
Alim_1 (A1)	Déplacer Pièce01 : Magasin_1 > P1	AD	« Déplacement ralenti »	Moins de pression EP	2	Moins de débit pièce01	AD P3	Moins de débit palette Moins de débit produits 0109	Moins de fréquence Détection visuelle de palette en sortie de poste ...	2	-	-	
		DF	« Ejection Pièce01 »	Plus de pression EP	2	Pas de débit pièces 01 Autre position pièce01	DF P3	Pas de débit palette Pas de débit produits 0109	(Emergence) Détection visuelle pièce sur le sol... (Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine...	1	-	Plus de fréq. Ouverture porte 12... (Emergence)Dépl.Manuel .Pièce01 : stock > P1... Plus de fréq. Ouverture porte 12... (Emergence)Dépl.Manuel .Pièce01 : nappe > P1...	3 Elec 12
Alim_2 (A2)	Déplacer Pièce09 : Magasin_2 > P2	AD	« Déplacement ralenti »	Moins de pression EP	2	Moins de débit pièce09	AD P3	Moins de débit palette Moins de débit produits 0109	Moins de fréquence Détection visuelle de palette en sortie de poste ...	2	-	-	
		DF	« Ejection Pièce09 »	Plus de pression EP	2	Pas de débit pièces 09 Autre position pièce 09	DF P3	Pas de débit palette Pas de débit produits 0109	(Emergence) Détection visuelle pièce sur le sol... (Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine... (Emergence) Détection visuelle pièce dans la nappe de câble...	1	-	Plus de fréq. Ouverture porte 12... (Emergence)Dépl.Manuel .Pièce09 : stock > P2... Plus de fréq. Ouverture porte 12... (Emergence)Dépl.Manuel .Pièce09 : nappe > P2...	3 Elec 12
		DF		Pas d'EP Pas de débit pièce09	1	Pas de débit pièces 09	DF P3	Pas de débit palette Pas de débit produits 0109	(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine...	1	-	Plus de fréq. Ouverture porte 12...	-

Acteurs	Activités	Modes de défaillance	Causes internes	Causes externes	F	Effets locaux (Produits)	Dérives techniques		Perceptions		Réponses			
							Effets au niveau supérieur (Acteurs)	(Produits)	M sur H ou F sur H	N D	Interactions dérivées ou émergentes H sur M ou H sur F	Phénomènes dangereux	G	C
Eras robot manip (MA)	Déplacer Pièce01 : F1>P0	DF « Perte de pièce »	-	Moins de pression EP	2	Pas de débit pièce01 -Autre position pièce01	DF F3	Pas de débit palette Pas de débit produits 0109	(Emergence) Détection visuelle pièce sur le sol...	1	Plus de fréq. Ouverture porte 03...	-		
	Déplacer Pièce01 : P0>Palette							(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine...	1	(Emergence)Dépl.Manuel Pièce01 : stock > P0...				
	Déplacer Pièce09 : F2>P0	DF « Perte de pièce »	-	Moins de pression EP	2	Pas de débit pièce 09 -Autre position pièce09	DFP3	Pas de débit palette Pas de débit produits 0109	(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine...	1	Plus de fréq. Ouverture porte 03...			
	Déplacer Pièce09 : P0>Palette							(Emergence) Détection visuelle pièce dans la nappe de câble...	2	(Emergence)Dépl.Manuel Pièce01 : nappe > P0...	Elec	3	12	
Orient_0 (O)	Indexer Pièce01	DF « Indexage bloqué »	-	Pas de pression EP Pas de tension EE	2	Pas de débit pièce 01	DF F3	Pas de débit palette Moins de débit produits 0109	(Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine.....	1				
	Indexer Pièce09	DF « Indexage bloqué »	-	Pas de pression EP Pas de tension EE	2	Pas de débit pièce 09	DF F3	Pas de débit palette Moins de débit produits 0109	Emergence) Détection visuelle d'un arrêt machine....	1	Plus de fréq. Ouverture porte 03...	Meca	2	8
Convoyeur r(C)	Déplacer palette : Entrée > ZJT	AD « Déplacement ralenti »	-	Moins de tension EE	2	Moins de débit palette	AD F3	Pas de débit palette Moins de débit produits 0109	Moins de fréquence Détection visuelle de palette en sortie de poste ...	2	Plus de fréq. Ouverture porte 03...	Meca	2	
	Déplacer palette : ZCT > Somie	AD « Déplacement ralenti »	-	Moins de tension EE	2	Moins de débit palette Moins de débit produits 0109	AD F3	Moins de débit palette Moins de débit produits 0109	Moins de fréquence Détection visuelle de palette en sortie de poste ...	2	(Emergence)Index.Manue 1 Pièce09 ...			
		AD « Déplacement ralenti »	-	Moins de tension EE	2	Autre position palette	AD F3	Autre position palette	Autre message Détection visuelle de palette en sortie de poste ...	2	Autre zone d'interaction Déplacement manuel palette ...	Posture	3	12

Contribution à l'identification de situations dangereuses et à leurs détections par l'analyse des dérives de l'équipement de production. Application à une ligne d'assemblage automatisée.

Dans une situation de travail sur une machine d'assemblage automatisée, des dérives techniques en cours de fonctionnement peuvent conduire à des dysfonctionnements de la machine. Ces dysfonctionnements peuvent amener l'opérateur supervisant la machine à s'adapter et à réagir pour réduire l'effet de ces dérives techniques sur le reste de la situation de travail. Pour répondre à ces dysfonctionnements, l'opérateur peut se placer dans une situation dangereuse.

Dans ce contexte, la contribution de ce manuscrit s'inscrit donc dans la prévention des accidents du travail sur machine. La contribution majeure de cette thèse est méthodologique. L'objectif de la méthode proposée, nommée Working Situation Health Monitoring (WSHM), est de définir un indicateur d'état de santé de la situation de travail permettant la surveillance de l'apparition de ces situations potentiellement dangereuses, à partir de données générées par les machines.

Pour définir cet indicateur, nous proposons d'identifier ces situations potentiellement dangereuses en analysant les dérives potentielles de la situation de travail. Ces dérives peuvent être techniques (dérives de caractéristiques des produits, de flux de produits, et/ou de l'état de santé de la machine) et/ou d'interactions entre l'opérateur, la machine et/ou les produits.

Pour supporter cette identification, nous proposons de modéliser la situation de travail dans son ensemble en la représentant comme un système. Cette modélisation permettant de capitaliser les informations sur la situation de travail étudiée dans un modèle de données unique basé sur un patron (modèle de référence de situation de travail).

La contribution de ces travaux a été testée sur un cas d'étude (une machine d'assemblage automatisée à vocation pédagogique) dans le but de prouver sa faisabilité.

Mots-clés : *Analyse du risque, Dérive technique, Erreur humaine, Modélisation système, Sécurité, Situation de travail, Sureté de fonctionnement,*

Contribution to the identification of hazardous situations and their detection by analyzing the drifts of the production equipment. Application to an automated assembly line.

In a work situation on an automated assembly machine, technical drifts during operation can lead to machine malfunctions. These malfunctions can lead the operator supervising the machine to adapt and react to reduce the effect of these technical drifts on the rest of the working situation. To respond to these malfunctions, the operator may place himself in a hazardous situation.

In this context, this manuscript contributes therefore to prevent work accidents on machines. The major contribution of this thesis is methodological. The aim of the proposed method, named Working Situation Health Monitoring (WSHM), is to define a working situation's health indicator that will enable the monitoring of the appearance of these potentially hazardous situations, from data generated by the machines.

To define this indicator, we suggest identifying these potentially hazardous situations by analyzing the potential drifts of the work situation. These drifts can be technical (drifts of product characteristics, drifts of the product flow characteristics, and/or drift of the machine health) and/or from interactions between the operator, the machine and/or the products.

To support this identification, we suggest modeling the work situation as a whole by representing it as a system. This modeling allows capitalizing the information on the studied work situation in a unique data model based on a pattern (working situation's reference model).

The contribution of this work has been tested on a case study (an automated assembly machine for educational purposes) in order to prove its feasibility.

Keywords: *Human error, Reliability, Risk analysis, Safety, System modelling, Technical drift, Working situation,*