



**HAL**  
open science

# Apports de la démarche ergonomique dans l'intégration de la robotique collaborative en milieu sidérurgique sévère : cas du canaliste

Aurélien Adam

► **To cite this version:**

Aurélien Adam. Apports de la démarche ergonomique dans l'intégration de la robotique collaborative en milieu sidérurgique sévère : cas du canaliste. Sciences de l'Homme et Société. 2019. dumas-02399493

**HAL Id: dumas-02399493**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02399493>**

Submitted on 9 Dec 2019

**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.

**CNAM NORMANDIE – Centre de Caen**

Master Sciences Humaines et Sociales - Mention Ergonomie

Voie Professionnelle (MR11100A)

2018-2019

**Apports de la démarche ergonomique dans  
l'intégration de la robotique collaborative en milieu  
sidérurgique sévère : cas du canaliste.**

**ADAM Aurélien**

Soutenu le 18 Septembre 2019 à Hérouville Saint Clair

Composition du Jury :

- Willy BUCHMANN** Président du jury – Maître de conférence en ergonomie –  
CNAM PARIS
- Nicole CARLIN** Ergonome – Responsable Pédagogique Filière Ergonomie  
– CNAM NORMANDIE
- Bénédicte SIX-TOUCHARD** Ergonome – Chargée d'enseignement – CNAM  
NORMANDIE
- Eric PELTIER** Ergonome – Chargé de mission ARACT
- Lauriane ROGER** Ergonome – Chargée d'enseignement – CNAM  
NORMANDIE
- Dorine TALBOT-ROUDEL** Ergonome – Chargée d'enseignement – CNAM  
NORMANDIE



## AVANT PROPOS

Ce mémoire a pour objectif de présenter le travail mené pendant près d'un an au sein de l'entreprise X, dans le but de valider un Master en Sciences Humaines et Sociales, mention ERGONOMIE.

Originaire d'une formation en Ergonomie des Activités Physiques effectuée au STAPS de l'Université de Savoie Mont Blanc, j'ai toujours eu comme motivation la curiosité et de ce fait, la volonté de comprendre l'activité afin de pouvoir y apporter une solution. Mon expérience professionnelle qui a suivi cette formation m'a fait prendre conscience de l'importance de l'ergonomie au sens plus général (non seulement tourné vers l'élaboration de produits pour l'activité physique).

Ainsi, mon expérience dans la société a débuté en Septembre 2017, suite à une reprise d'étude. L'opportunité de suivre une formation en alternance tant l'expérience sur le terrain apporte en compétences et en connaissances. L'offre, alors proposée par l'entreprise X, permettait d'évoluer dans un groupe de renommée mondiale et au sein d'un secteur industriel riche en savoir-faire.

Dès le premier entretien, j'ai souhaité rejoindre la société, tant les missions proposées étaient variées. De plus, la responsable en entreprise, en la personne de Mme MASET Corine, avait une double casquette EHS et Ergonomie, pouvant m'apporter de précieux conseils dans mon parcours professionnel.

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement Mme MASET Corine pour son accompagnement au cours de ces deux années d'alternance. Elle a su m'accorder la confiance nécessaire pour que je puisse travailler en autonomie tout en assurant un suivi régulier en m'accompagnant dans les différents projets. Son apport de précieux conseils tant dans le domaine de l'ergonomie que les domaines de l'Environnement, l'Hygiène et la Sécurité m'a permis d'élargir mon champ de connaissances en matière de santé-sécurité au travail.

Je remercie dans un second temps l'ensemble de l'équipe EHS du Technocentre auprès de qui j'ai pu m'enrichir tant professionnellement qu'humainement.

Je remercie également l'ensemble du personnel de la centrifugation 6 mètres, les opérateurs, les contremaîtres, les responsables de production, pour le temps qu'il m'ont accordé, le partage de leur savoir-faire et leur implication dans le projet.

Je souhaite remercier le corps enseignant du CNAM de Normandie pour la qualité de leur enseignement tout au long de ces deux années de formation. La pertinence des intervenants externes a permis d'offrir une vision plus globale de ma future pratique de l'ergonomie, merci à eux également.

Je tiens à remercier également l'ensemble de mes collègues de formations pour les nombreux échanges que nous avons pu avoir, tant pour se soutenir que pour débattre sur divers sujets.

Je remercie enfin mon entourage, mes amis, ma famille, pour leur soutien durant ces deux années.

Merci à tous !

# PLAN DU MEMOIRE

<b>AVANT PROPOS.....</b>	<b>3</b>
<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>4</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>9</b>
<b>1 PRESENTATION DE L'ENTREPRISE .....</b>	<b>10</b>
1.1 PRESENTATION DU GROUPE .....	10
1.2 LA SOCIETE : ACTIVITE DE CANALISATION.....	10
1.3 L'USINE .....	10
1.3.1 PRESENTATION DU SITE .....	10
1.3.2 LE PROCESSUS DE PRODUCTION DE TUYAUX .....	10
1.3.3 LA CENTRIFUGATION 6 METRES .....	10
<b>2 INSTRUIRE LA DEMANDE POUR COMPRENDRE LES ENJEUX DU PROJET .....</b>	<b>12</b>
2.1 UN POSTE EN REORGANISATION .....	12
2.1.1 EVOLUTION DE LA PRODUCTION .....	12
2.1.2 ANALYSE DE LA POPULATION DU POSTE.....	12
2.2 LES INDICATEURS SANTE.....	14
2.2.1 LES ACCIDENTS DE TRAVAIL (AT).....	14
2.2.2 LES MALADIES PROFESSIONNELLES (MP).....	16
2.3 UN ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL CONTRAIGNANT .....	17
2.3.1 UNE EXPOSITION A DES TEMPERATURES EXTREMES .....	17
2.3.2 UNE EXPOSITION A LA SILICE CRISTALLINE .....	18
2.3.3 BRUIT AMBIANT.....	19
2.4 LES INDICATEURS DE PRODUCTION.....	19
2.4.1 UNE GRANDE VARIABILITE DE CADENCE.....	19
2.4.2 L'INDICE QUALITE : LE REBUT.....	20
2.4.3 UN RENDEMENT INTERDEPENDANT .....	22
2.5 INTRODUCTION A LA ROBOTIQUE COLLABORATIVE : UNE BREVE BIBLIOGRAPHIE .....	23
2.5.1 INTRODUCTION A LA ROBOTIQUE COLLABORATIVE : LA TELE OPERATION .....	23
2.5.2 DE L'ACCEPTABILITE A L'ACCEPTATION DE LA TECHNOLOGIE.....	25
2.5.3 PERSPECTIVES POUR L'INTERVENTION .....	26
2.6 REFORMULATION DE LA DEMANDE .....	27
<b>3 UN TRAVAIL INDEPENDANT AU SEIN D'UNE ORGANISATION : UNE ACTIVITE RICHE PAR L'EXPERIENCE.....</b>	<b>28</b>
3.1 LE TRAVAIL REEL DES CANALISTES .....	28
3.1.1 UNE PRESCRIPTION INFORMELLE.....	28
3.1.2 UN TRAVAIL PARTAGE ENTRE LES CANALISTES.....	30
3.1.3 UN TRAVAIL COMMUN MAIS INDEPENDANT.....	32
3.1.4 LE TRAVAIL DU COLLECTIF .....	35
3.2 ANALYSE DE L'ACTIVITE PHYSIQUE AU POSTE .....	36
3.2.1 METHODOLOGIE D'INTERVENTION .....	36
3.2.2 RESULTATS DE L'INTERVENTION .....	37

<b>3.3</b>	<b>UNE ORGANISATION RYTHMEE PAR LA SECURITE ET LA MAINTENANCE .....</b>	<b>39</b>
3.3.1	UNE ORGANISATION SPATIALE LIEE A LA SECURITE.....	39
3.3.2	UNE ATTRIBUTION DE MACHINE LIEE A LA MAINTENANCE .....	41
<b>3.4</b>	<b>PRE DIAGNOSTIC : LES OBSERVATIONS JUSTIFIENT LE CHOIX DE LA TELE OPERATION .....</b>	<b>41</b>
<b>4</b>	<b>IDENTIFICATION DE LA TELE OPERABILITE DU TRAVAIL : VERS UNE TRANSFORMATION DE L'ACTIVITE.....</b>	<b>42</b>
<b>4.1</b>	<b>D'UNE METHODOLOGIE THEORIQUE A UNE METHODOLOGIE PRATIQUE .....</b>	<b>42</b>
4.1.1	LE CHOIX D'UN MODELE CARACTERISTIQUE A LA COBOTIQUE .....	42
4.1.2	DETAILS DE LA METHODOLOGIE MISE EN PLACE .....	43
<b>4.2</b>	<b>RESULTATS DES ENTRETIENS EXPLORATOIRES .....</b>	<b>44</b>
4.2.1	LE CHOIX DU SCENARIO .....	44
4.2.2	ORIENTATION SUR UNE ACTION A COURT TERME .....	46
<b>4.3</b>	<b>ACTION A COURT TERME : REPOSITIONNEMENT DU PUPITRE DE COMMANDE .....</b>	<b>47</b>
<b>4.4</b>	<b>LA TELE OPERATION : IDENTIFIER LA PRISE D'INFORMATIONS .....</b>	<b>49</b>
4.4.1	IDENTIFIER LES NIVEAUX D'AUTOMATISATION DES FUTURES OPERATIONS.....	50
4.4.2	L'AUTO CONFRONTATION : FORMALISER LES INFORMATIONS UTILES AU CANALISTE .....	50
4.4.3	TRANSPOSITION DES INFORMATIONS VISUELLES.....	53
<b>4.5</b>	<b>PISTES D'AMELIORATIONS TECHNIQUES ET ORGANISATIONNELLES.....</b>	<b>54</b>
4.5.1	PRECONISATIONS TECHNIQUES .....	54
4.5.2	PRECONISATIONS ORGANISATIONNELLES .....	55
<b>4.6</b>	<b>METHODOLOGIE POUR LA POURSUITE DU PROJET .....</b>	<b>56</b>
	<b>DISCUSSIONS .....</b>	<b>58</b>
	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>60</b>
	<b>ANNEXES.....</b>	<b>61</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>74</b>
	<b>RESUME .....</b>	<b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>

## Table des Figures

Figure 3: Schéma du processus de production d'un tuyau .....	10
Figure 4 : Représentation des zones d'action du canaliste .....	11
Figure 5 : Schéma organisationnel du plancher de coulée .....	13
Figure 6 : Graphique présentant l'évolution du personnel au cours du premier semestre 2019 .....	13
Figure 7 : Répartition des AT sur la ligne 6M depuis 2013 en fonction des secteurs.....	14
Figure 8 : Répartition des AT dans le secteur "Machine" depuis 2013 .....	15
Figure 9 : Détail des Accident de Travail au poste de canaliste depuis 2013 .....	15
Figure 10 : Nombre de MP en fonction des postes pour la ligne 6M depuis 2001 .....	16
Figure 11 : Répartition des MP en fonction de la typologie (depuis 2001) .....	17
Figure 12 : Graphique représentant la cadence de production en fonction du diamètre et de la classe du tuyau .....	20
Figure 13 : Graphique représentant la cadence en fonction du diamètre et de l'emboîtement. 20	
Figure 14 : Graphique représentant le nombre de rebuts en fonction de leur cause et du secteur de déclaration .....	21
Figure 15 : Graphique représentant l'épaisseur de deux tuyaux consécutifs en différents points .....	22
Figure 16 : Graphique présentant le rendement réel vs le rendement théorique 100%.....	22
Figure 17 : Les différents modes de coopération selon Helms et al (2002).....	24
Figure 18 : Schéma cybernétique du système cobotique proposé par Moulières-Seban (2017) .....	25
Figure 19 : Schéma représentant l'orientation spatiale du poste .....	28
Figure 20 : Extrait du chronogramme d'activité.....	30
Figure 21 : Illustration d'un enchaînement de coulées avec translation des canaux .....	33
Figure 22 : Représentation des interactions entre les différents opérateurs.....	35
Figure 23 : Illustration du placement des centrales inertielles (Réel VS Avatar) .....	36
Figure 24 : Illustration de l'opérateur lors d'un écrémage à gauche et l'avatar à droite .....	37
Figure 25 : Illustration de l'opérateur lors du graissage du coupe fonte à gauche et l'avatar à droite.....	38
Figure 26 : Illustration de l'opérateur lors du décalage du basket à gauche et l'avatar à droite .....	38
Figure 27 : Illustration de l'opérateur lors du port et du remplissage des sceaux à ferro à gauche et l'avatar à droite .....	38
Figure 28 : Illustration de l'opérateur lors de la surveillance du canal à gauche et l'avatar à droite .....	39
Figure 29 : Processus global de conception d'un système cobotique industriel (Moulières-Seban et al, 2016).....	42
Figure 30 : Système EyeTracking Tobii® .....	44
Figure 31 : Schéma de travail pour le groupe de travail pupitre de commande.....	48
Figure 32 : Schéma de la solution retenue avec photo d'illustration.....	49
Figure 33 : Modèle de la situation envisagée .....	49
Figure 34 : Schéma décisionnel relatif à la situation explicitée.....	52
Figure 35 : Schéma décisionnel relatif au traitement des boulettes de fonte dans le déversoir.....	53
Figure 36 : Illustration schématique de la solution envisagée.....	54

## Table des Photos

Photo 1 : Port de vêtements ignifugés lors d'une opération d'écémage du basket .....	18
Photo 2 : Opérateur réalisant l'écémage du basket.....	31
Photo 3 : Opérateur en train de décaler la théière .....	32
Photo 4 : Canaliste en train de casser les baguettes dans la fosse .....	34
Photo 5 : Placement du canaliste lors du remplissage du basket .....	40
Photo 6 : Placement du canaliste en fin de coulée de tuyau.....	40
Photo 7 : Canaliste utilisant le pupitre de commande .....	47
Photo 8 : Le canaliste repère un point chaud sur la baguette de fonte .....	51
Photo 9 : Boulettes de fonte dans le déversoir .....	51
Photo 10 : A gauche, bras automatisé Inductotherm ARMS® / A droite, canaliste en train de relevé la température .....	55

## **Table des Tableaux**

Tableau 1: Coûts liés aux MP reconnues pour le poste de canaliste.....	16
Tableau 2 : Temps d'arrêt( en minutes) de la production en fonction de leur origine .....	23
Tableau 3 : Extrait de la grille de questions de l'entretien exploratoire .....	45
Tableau 4 : Extrait de la grille d'entretien sur la télé opérabilité.....	50

## INTRODUCTION

Le travail proposé dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'une collaboration avec un ingénieur en thèse CIFRE. Il rapporte le rôle que j'ai tenu en tant qu'ergonome en fin de professionnalisation, dans le projet de mise en place d'un cobot.

Le sujet présenté par l'ingénieur en thèse proposait alors d'étudier la mise en place d'une solution de robotique collaborative sur un poste de travail, afin de répondre à des questions d'amélioration de la qualité de la production d'une part et des conditions de travail des opérateurs d'autre part. On voit donc apparaître un double objectif, avec une question de performance et une question de santé, auxquelles, est déjà proposée une solution. La demande initiale a été formulée comme suit :

*« Proposer une solution nouvelle pour réduire la pénibilité d'un poste de travail en se basant sur une coopération humain/robot qui permettra, par ailleurs, d'accroître la qualité des produits des usines pour la fabrication des tuyaux en fonte ductile »*

Initialement, la demande d'inclure un ergonome dans le projet portait sur l'analyse physique du travail. L'objectif était de montrer, d'une part la pénibilité physique du travail actuel et d'autre part d'accompagner, par des recommandations biomécaniques, l'élaboration de la future activité. Nous verrons donc au cours de ce mémoire comment le rôle de l'ergonome a permis d'élargir le champ d'intervention de l'ingénieur.

Ce projet m'a motivé par son actualité. En effet, ce projet s'inscrit dans le contexte de l'usine du futur : « l'industrie 4.0 ». De plus, la thématique de la robotique collaborative fait l'objet d'études très récentes dans le monde de l'ergonomie (Kleinpeter, 2015 ; Moullières-Seban, 2017). Il s'agissait donc pour moi d'être acteur d'un projet qui est amené à se développer davantage dans le milieu industriel.

L'intervention concernait le poste de canaliste. Il s'agit du cœur même de la production du site, puisqu'il s'agit du poste où sont produits les tuyaux bruts.

Après une rapide présentation de l'entreprise, présentant le contexte général d'intervention, nous analyserons la demande initiale pour expliquer l'orientation des choix d'intervention. Nous verrons ensuite l'apport de l'ergonomie dans l'analyse de l'activité des opérateurs. Enfin, nous verrons la participation sociale au cœur du projet.

# 1 Présentation de l'entreprise

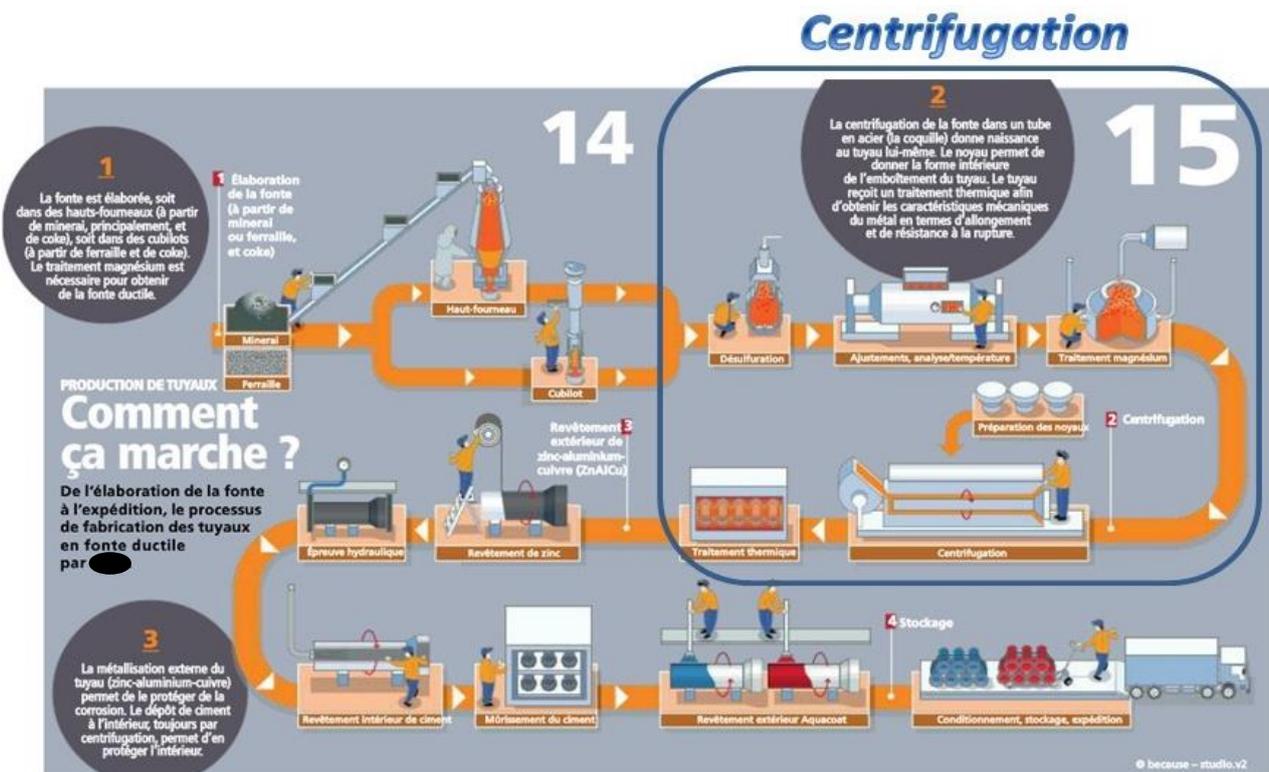


Figure 1: Schéma du processus de production d'un tuyau

## 1.3.2 Le processus de production de tuyaux

Etant donné l'orientation du mémoire sur le cœur même de la production des tuyaux en fonte ductile, il paraît essentiel de faire un bref tour du processus de production (Figure 3).

Dans un premier temps, la fonte est élaborée, dans des hauts-fourneaux (à partir de minéral, principalement, et de coke). Il y a ensuite un traitement magnésium nécessaire afin d'obtenir de la fonte ductile. Dans un second temps, la fonte est centrifugée dans une machine à centrifuger pour donner forme au tuyau. Le tuyau reçoit ensuite un traitement thermique afin d'obtenir les caractéristiques mécaniques du métal souhaitées. Dans un troisième temps, le tuyau passe à l'ébarbage afin d'y réaliser des retouches si nécessaires. Ensuite, un revêtement extérieur et un revêtement intérieur permettent de protéger le tuyau. Enfin, le tuyau est peint avant stockage et envoi.

Chacun des revêtements appliqués au tuyau a des caractéristiques particulières permettant de protéger le tuyau en fonction de son utilisation future. En effet, le revêtement va dépendre de la typologie du sol dans lequel il va être déposé (pH, type de terre...) ainsi que de sa fonction (approvisionner en eau potable, évacuer les eaux usées...).

## 1.3.3 La centrifugation 6 mètres

Pour comprendre la suite de cet écrit, il convient d'entrer davantage dans le détail de la centrifugation des tuyaux. Le schéma en Annexe 2 reprend la description suivante : un système de pont roulant, avec cabine de pilotage autoportée permet d'acheminer la fonte depuis les Hauts-Fourneaux (HFx). Ce système est conduit par un pontier qui vient verser la fonte dans les baskets (réserve de fonte de chaque machine). Un machiniste est ensuite chargé de

paramétrer la machine à centrifuger (vitesse de rotation, vitesse de descente...) et la levée du basket pour centrifuger le tuyau. Les canalistes, répartis en binômes, sont chargés d'entretenir l'appareillage de coulée, c'est-à-dire du basket jusqu'à l'entrée de la machine à centrifuger, en passant par le canal (zone verte, Figure 4). Ainsi, ils assurent l'acheminement de la fonte du basket à la machine à centrifuger. Enfin, le tuyau est extrait de la machine pour être convoyé jusqu'au four.

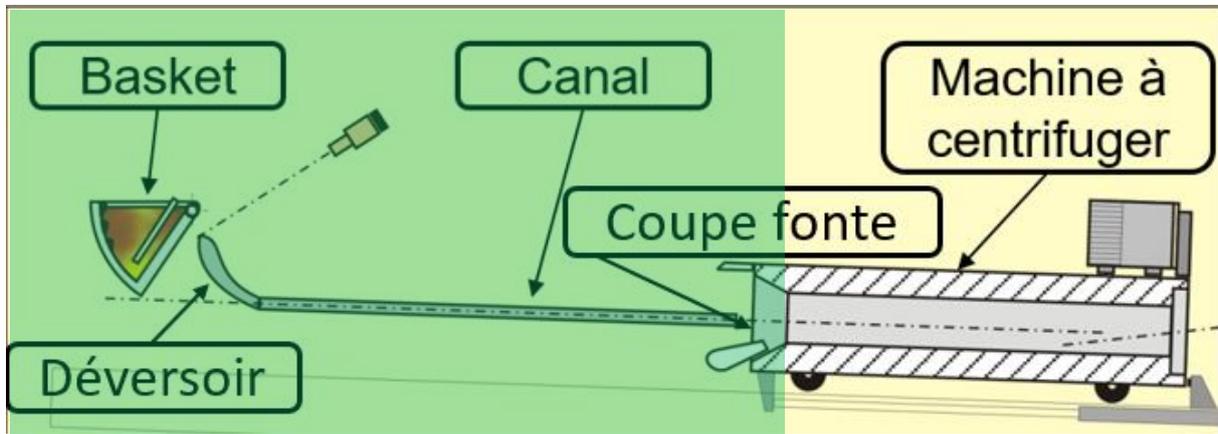


Figure 2 : Représentation des zones d'action du canaliste

## **2 Instruire la demande pour comprendre les enjeux du projet**

---

Pour rappel, la demande initiale est la suivante :

*« Proposer une solution nouvelle pour réduire la pénibilité d'un poste de travail en se basant sur une coopération humain/robot qui permettra, par ailleurs, d'accroître la qualité des produits des usines pour la fabrication des tuyaux en fonte ductile »*

L'instruction de la demande permet de « poser un diagnostic de projet orienté vers les décideurs et de contribuer à la structuration et à la redéfinition des objectifs du projet » (Barcellini et al, 2013). Nous allons donc chercher à générer des connaissances sur le projet (enjeux, travail réel) afin d'orienter la suite de l'intervention pour qu'elle soit la plus pertinente possible pour l'entreprise.

### **2.1 Un poste en réorganisation**

#### **2.1.1 Evolution de la production**

Afin de comprendre l'intérêt de l'entreprise à investir dans ce projet de thèse, des entretiens ont été réalisés dans un premier temps avec les différents acteurs du projet. Ces entretiens ont permis de capitaliser l'ensemble de enjeux liés au projet. Ainsi, il en est ressorti que la ligne 6M, suite à une réorganisation de l'activité de production de la société, allait récupérer une partie de la production jusqu'alors réalisée sur un autre site en Allemagne. Cette production concerne les PDN. Ils seront ainsi produits d'ici fin 2019 majoritairement sur le site de l'étude (Ligne 6M) ainsi qu'un second site de la société. La production des PDN à la ligne 6M va entraîner la remise en marche des machines 3, 4 et 5 qui n'étaient plus utilisées depuis plusieurs années.

Cette évolution va entraîner une réorganisation des postes avec davantage de machines qui vont fonctionner en même temps, nécessitant un personnel plus important. Cette réorganisation a pour objectif de réduire les coûts de production et de redonner de l'activité au site principal. L'objectif étant pour le premier trimestre 2020, d'avoir une production au moins équivalente à celle actuellement réalisée sur le site allemand.

D'un point de vue purement organisation, on note qu'au dernier trimestre 2018, le poste s'organisait en 2\*8 avec une machine par poste. A partir de Janvier 2019, la production était organisée toujours en 2\*8 mais avec un poste tournant à 2 machines et le second avec une seule machine. A l'heure où le mémoire est rédigé, la production est toujours en 2\*8, mais chaque poste tourne avec 2 machines (1 MDN et 1 PDN).

#### **2.1.2 Analyse de la population du poste**

Le canaliste n'est pas la seule fonction présente sur le plancher de coulée pour réaliser un tuyau. Le schéma ci-dessous (Figure 5) représente l'organisation des postes du plancher de coulée en fonction du nombre de machines en fonctionnement. Ainsi, pour chaque machine supplémentaire lors d'un poste, il faudra compter une augmentation du personnel de 3 (un machiniste et 2 canalistes).

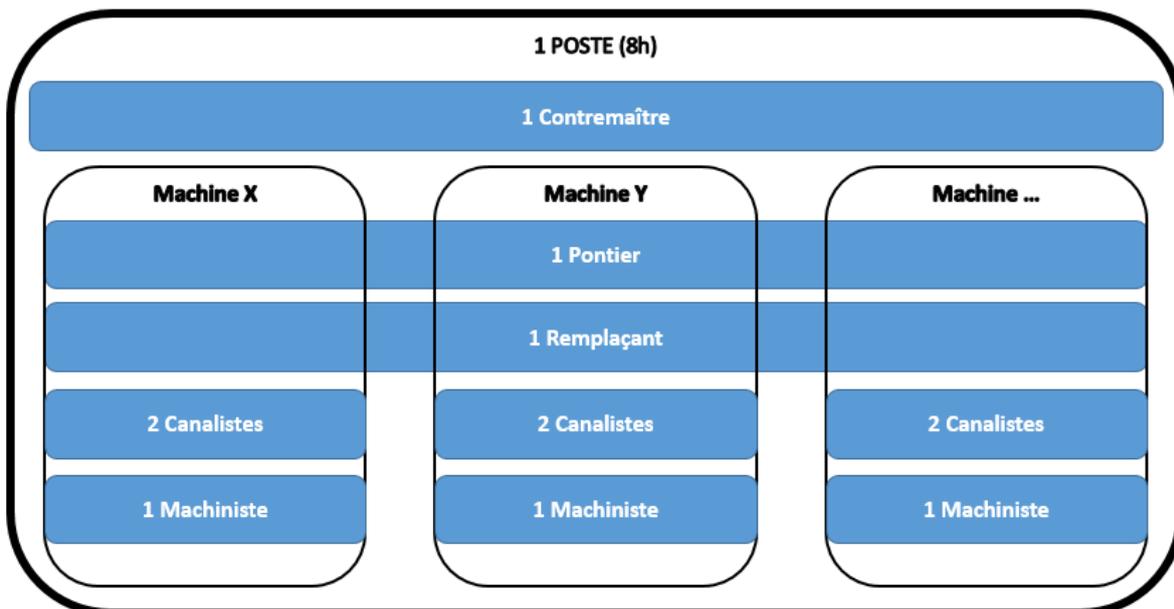


Figure 3 : Schéma organisationnel du plancher de coulée

L'augmentation de la production de la ligne 6M a donc engendré une augmentation du personnel. Ainsi, plusieurs contrats d'intérim ont dû être signés pour renforcer les équipes (Figure 6, ci-dessous). En même temps, du personnel provenant des lignes 7M et 8M ont pu être déplacés car ils occupent les mêmes fonctions. Ce déplacement d'éléments permettait notamment de conserver des opérateurs expérimentés afin de pouvoir former les intérimaires. En effet, les entretiens avec les différents acteurs du projet ont mis en évidence le savoir-faire des opérateurs et la reconnaissance de celui-ci, appuyant la nécessité d'une formation longue et pragmatique.

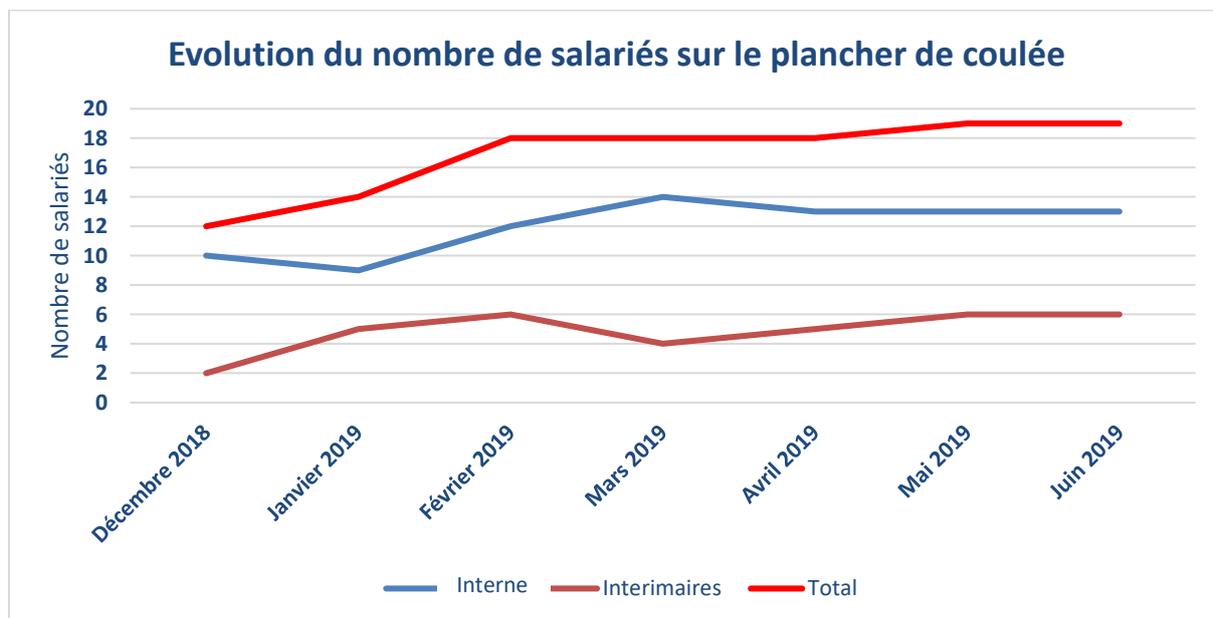


Figure 4 : Graphique présentant l'évolution du personnel au cours du premier semestre 2019

Les entretiens ont révélé que l'ensemble de ces postes sont occupés par des hommes, ce qui est notamment dû à l'histoire et à la sollicitation physique du poste. De plus, le chargé du personnel

a révélé que l'évolution professionnelle était limitée. Il est toutefois possible pour le canaliste d'être formé en tant que machiniste ce qui lui accorde une prime plus avantageuse. Il est possible également d'être formé pour devenir polyvalent/remplaçant afin de pouvoir occuper l'ensemble des fonctions du plancher de coulée.

Quant à l'ancienneté au poste, si nous ne comptons pas les intérimaires, celle-ci est de plus de 10 ans en moyenne, attestant des difficultés d'évolution au poste. Cette moyenne sera amenée à diminuer lorsque les intérimaires seront embauchés par la suite.

## 2.2 Les indicateurs santé

### 2.2.1 Les Accidents de Travail (AT)

J'ai dans un premier temps analysé les accidents du travail relatifs à l'ensemble de la ligne 6M, afin de comparer l'accidentologie du poste de canaliste par rapport à l'ensemble de la ligne (Figure 7, ci-dessous). Les Accident de Travail Bénins (ATB), c'est-à-dire des accidents ne nécessitant que les premiers soins et les Accidents de Travail Sans Arrêt (ATSA), qui concernent les accidents nécessitant un passage à l'infirmerie sont ici différenciés, selon la politique sécurité de l'entreprise. Enfin, les Accidents de Travail Avec Arrêt (ATAA) sont les accidents occasionnant un arrêt de travail, peu importe sa durée. Le secteur où on observe le plus d'accidents est le secteur « Machine », qui est le secteur dans lequel évoluent les canalistes.

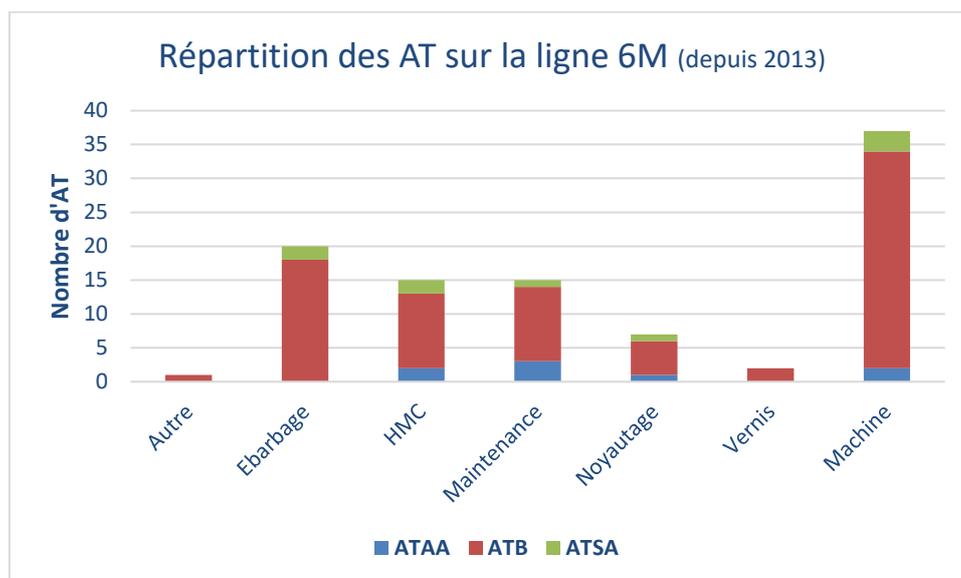


Figure 5 : Répartition des AT sur la ligne 6M depuis 2013 en fonction des secteurs

Au sein du secteur « Machine », nous observons que le poste le plus accidentogène est celui du canaliste (Figure 8). En effet, nous relevons 17 accidents alors que les autres postes ne présentent pas plus de 4 accidents. Il faut toutefois prendre en considération qu'il s'agit exclusivement d'ATB, n'engendrant aucun arrêt de travail, ce qui limite le surcoût provoqué par ce genre d'accident (pas de coûts indirects).

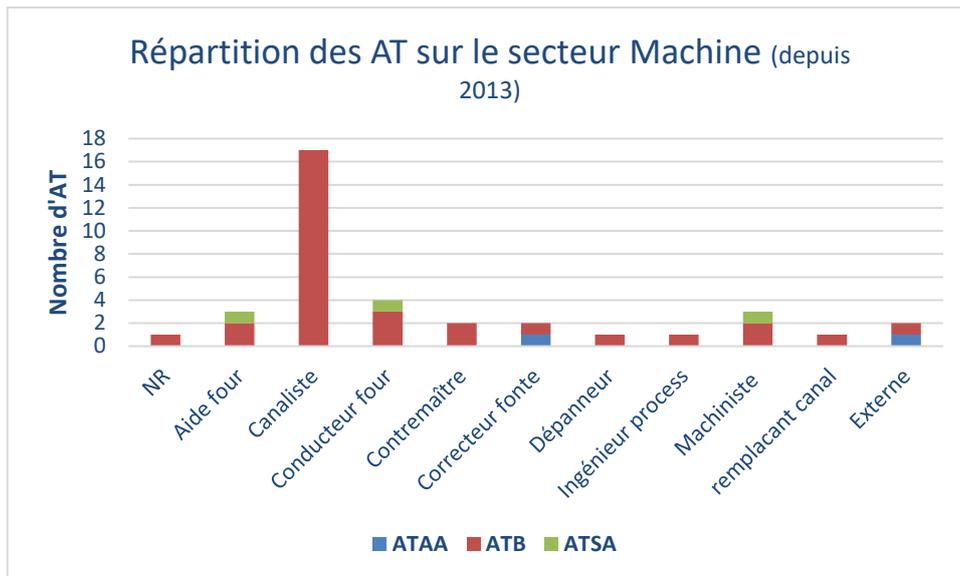


Figure 6 : Répartition des AT dans le secteur "Machine" depuis 2013

Le graphique ci-dessous (Figure 9) nous montre le détail des accidents enregistrés en fonction du contrat des opérateurs (salariés de l'entreprise ou intérimaires). On remarque alors 4 sources d'accident :

- Brûlure, due aux projections de fonte en fusion
- Corps étranger, éléments volatiles (poussière) dans les yeux
- Choc/coup, lié à la manutention manuelle
- Douleur, lié également à la manutention manuelle

De plus, les entretiens ont révélé que les brûlures sont davantage déclarées chez les intérimaires, malgré qu'ils sont moins nombreux que les salariés de l'entreprise, car les salariés ont « l'habitude » de ce genre d'incident.

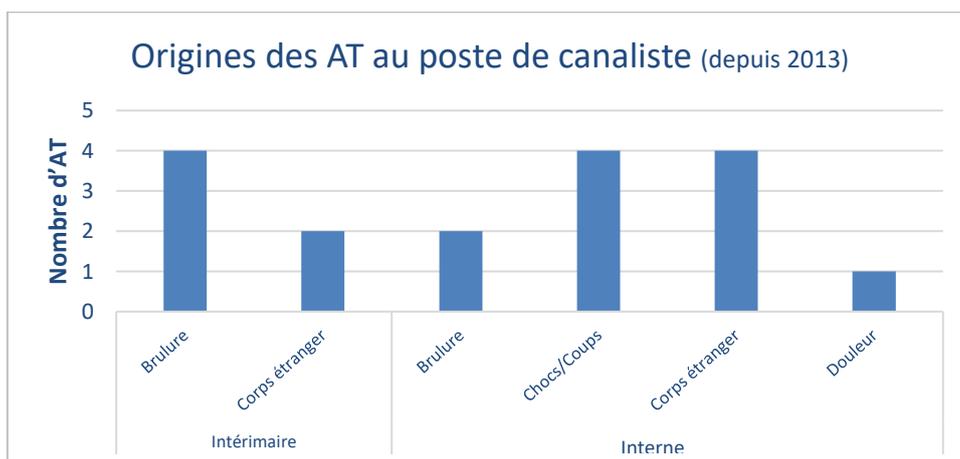


Figure 7 : Détail des Accidents de Travail au poste de canaliste depuis 2013

## 2.2.2 Les Maladies Professionnelles (MP)

Afin de mettre en évidence le poste de canaliste vis-à-vis du reste de la ligne 6M, nous nous rapportons toujours à la globalité de la ligne, pour comparer le nombre de MP reconnues. Ainsi, nous observons que le canaliste est le poste pour lequel le plus de MP ont été reconnues (Figure 10). Les données présentées ici ne peuvent être discutées directement. En effet, un entretien avec l'animateur sécurité a révélé que certaines maladies professionnelles pouvaient être reconnues pour un poste alors qu'elles ont pu être contractées pour l'activité d'un poste précédemment occupé.

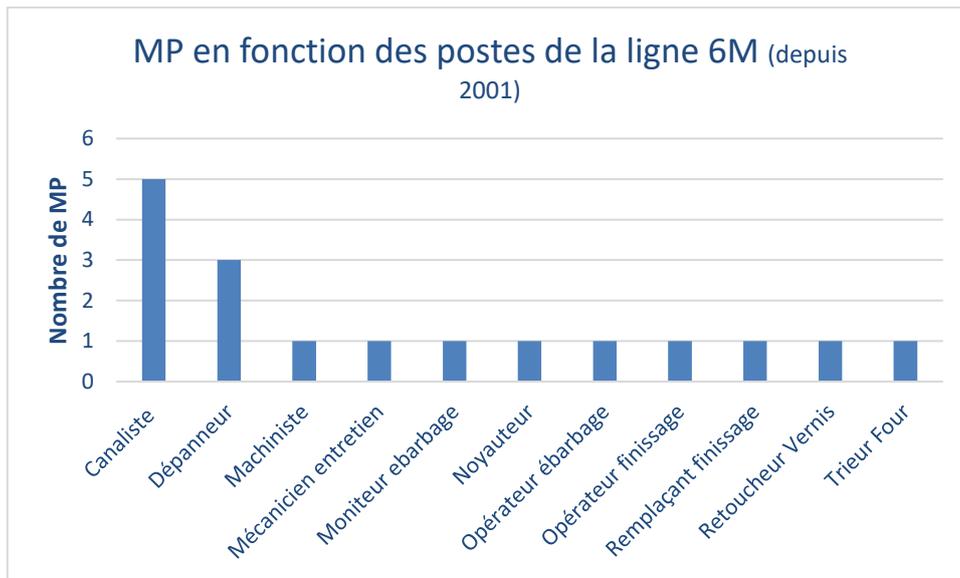


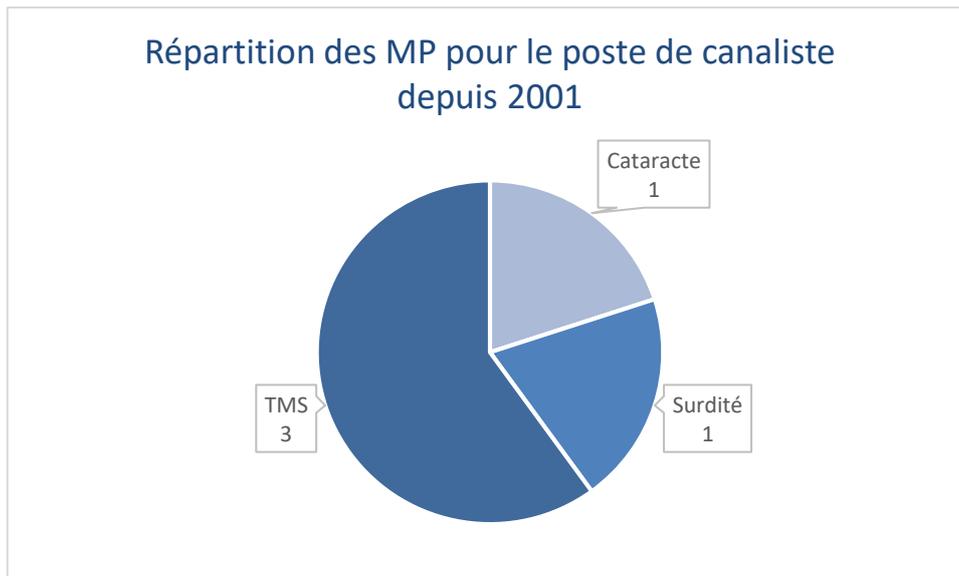
Figure 8 : Nombre de MP en fonction des postes pour la ligne 6M depuis 2001

Toutefois, je me suis renseigné sur la répartition des maladies professionnelles afin de déterminer de potentielles pistes de réflexion pour la suite de l'intervention. Le graphique ci-dessous (Figure 11) détaille la répartition de celles-ci sur l'ensemble de la ligne 6M. On s'aperçoit alors que la majeure partie des MP sont des Troubles Musculo Squelettiques (TMS). Parmi ces TMS, 2 concernent l'épaule, tandis que le troisième concerne un coude. La cataracte et la surdité, ici évoqués, sont dus à l'environnement dans lequel évoluent les opérateurs.

De plus, ces maladies professionnelles ont un coût pour l'entreprise. Le tableau 1 ci-dessous précise les coûts totaux (direct + indirect). On observe alors des frais non négligeables comme pour la surdité par exemple.

Année	Maladie Professionnelle	Coût Direct + Indirect (en k€)
2001	TMS Coude	27
2003	Surdité	118
2004	Cataracte	9
2010	TMS Epaule	4
2011	TMS Epaule	33

Tableau 1: Coûts liés aux MP reconnues pour le poste de canaliste



*Figure 9 : Répartition des MP en fonction de la typologie (depuis 2001)*

Les AT concernant les canalistes, ne nécessitant que des soins bénins, n'entraînent pas de coûts excessifs pour la société, mais reste toutefois des indicateurs montrant qu'un risque existe. En revanche, les MP, moins nombreuses, entraînent des coûts élevés pour l'entreprise, ce qui justifie à la fois d'un enjeu de sécurité vis-à-vis des opérateurs, mais également un enjeu économique.

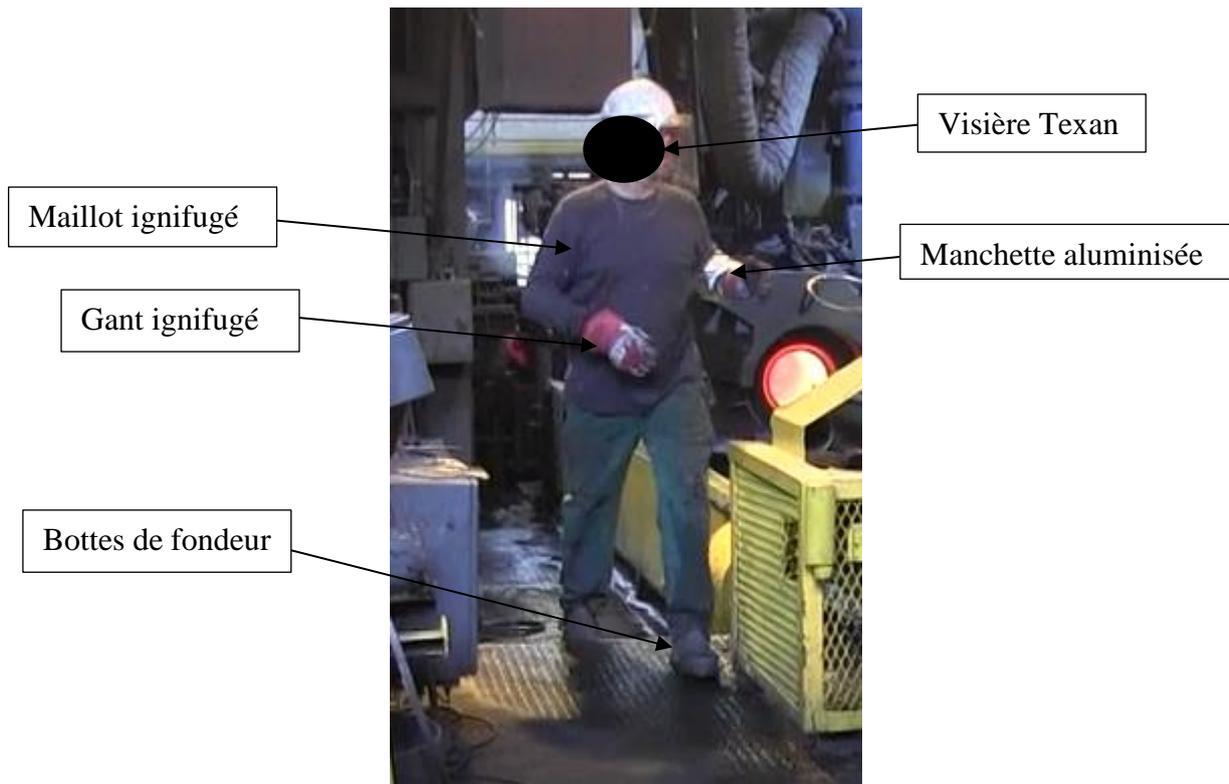
## **2.3 Un environnement de travail contraignant**

### **2.3.1 Une exposition à des températures extrêmes**

La température de la fonte à laquelle sont exposés les canalistes est de  $1450 \pm 20$  degrés en moyenne. Comme vu dans le paragraphe 2.1.1, il existe un risque de brûlure. Par l'étude de la documentation et par des entretiens avec les opérateurs, il a pu être vu que ces brûlures sont principalement dues à des projections de fontes lors de certaines phases de travail (remplissage du basket, fonte déversée en sortie de machine à centrifuger). En plus de ses projections, un risque de brûlure par rayonnement existe, à cause de la proximité des opérateurs avec la fonte. Ces derniers portent toutefois les EPI adéquats (Photo 1), à savoir :

- Des vêtements ignifugés
- Des chaussures ignifugées
- Une visière de type Texan

L'animateur EHS a exprimé à ce sujet, la volonté de mettre en place des Equipements de Protections Collectifs (EPC).



*Photo 1 : Port de vêtements ignifugés lors d'une opération d'écrouissage du basket*

Cependant, la fonte n'est pas la seule source de chaleur possible. En effet, lors de la période estivale, les températures ambiantes augmentent à mesure que la température extérieure augmente. Pour soulager les opérateurs, une pause supplémentaire est accordée par opérateur lors du poste, ce qui a pour conséquence de réorganiser le travail afin d'assurer une production continue. Les entretiens réalisés avec les opérateurs appuient notamment cet aspect de chaleur ambiante en été : « Sans ventilo, je ne tiens pas l'été » ; « L'été il fait très chaud ».

Mais la chaleur n'est pas le seul point relevé par les opérateurs. L'hiver, des courants d'air froids sont ressentis près de la machine 2, dus à l'implantation des ouvertures du bâtiment.

### 2.3.2 Une exposition à la silice cristalline

Pour réaliser l'entretien du basket et du canal dont il a la charge, l'opérateur utilise un produit appelé du « noir ». Ce produit, à disposition sous forme liquide, permet à la fois d'isoler thermiquement et de proposer des propriétés de frottement qui permettent à la fonte de s'écouler sans abîmer les éléments du système de coulée (canal, basket et accessoires de travail). Ce liquide, une fois réchauffé par la chaleur de l'élément avec lequel il est en contact, va se solidifier et devenir quelque peu friable. Par conséquent, il devient volatile et se retrouve en suspend dans l'air avant de retomber au sol. Dans ce produit, nous retrouvons du Quartz et de la Cristobalite qui, sous l'effet de la chaleur, vont former de la silice cristalline.

L'exposition à la silice cristalline est référencée dans le tableau 22 des maladies professionnelles comme étant à l'origine de la silicose. Ainsi, l'Agence Nationale de la Sécurité Sanitaire (ANSES) indique dans son rapport d'expertise collective (2019), que dans le Code du Travail, la silice est reconnue comme agent chimique dangereux, mais non cancérigène. Or, elle précise également qu'outre Atlantique elle est déjà considérée comme cancérigène et les valeurs limites d'expositions professionnelles (VLEP) sont moins tolérantes.

Les dernières mesures réalisées datant de Mars 2015 montrent que les canalistes sont exposés à une valeur approchant les 60% de la VLEP. Cependant, le rapport précédemment cité précise que la VLEP devrait être amenée à être diminuée, ce qui impliquerait que la valeur d'exposition actuelle se rapprocherait voire pourrait dépasser la valeur limite. Il convient donc d'anticiper ce changement de la réglementation grâce au projet.

Aujourd'hui, les opérateurs disposent de masques filtrants pour réaliser certaines tâches au cours desquelles le noir est amené à se disperser dans l'air. Cependant, avec la chaleur ambiante, les opérateurs expliquent qu'il devient « compliqué de respirer », et que cela fait de la « buée dans les lunettes ».

En parallèle du projet, d'autres projets travaillent sur la possibilité de disposer du Noir afin de ne plus exposer les opérateurs (nouvelle substance chimique, nouveaux matériaux...). Cependant, aucune solution n'est à l'heure envisageable tant ce produit est « miracle » d'un point de vue technique.

### 2.3.3 Bruit ambiant

L'environnement industriel dans lequel évolue les opérateurs les expose au bruit des nombreuses machines environnantes. Les mesures de bruits ambiants, effectuées en 2018, indiquent une exposition moyenne de 97 dB(A), avec des valeurs de crêtes atteignant 141 dB(C). Pour réduire le risque, les opérateurs portent des bouchons d'oreille.

Cependant, une partie du bruit leur est utile pour la prise d'informations. Par exemple, lorsque le pontier utilise son avertisseur sonore, cela signifie qu'il souhaite interagir avec le personnel sur le plancher de coulée.

## 2.4 Les indicateurs de production

La demande initiale expose également une question d'accroissement de la qualité des tuyaux. Celle-ci est directement dépendante de la production. Ainsi, nous allons voir différents points caractéristiques de la production, à savoir les cadences, le rebut et le rendement.

### 2.4.1 Une grande variabilité de cadence

Comme il l'a été précisé précédemment, 5 machines différentes permettent de produire des tuyaux de différents diamètres. Ainsi les tuyaux produits sur la ligne 6M sont régis par trois caractéristiques :

- Leur diamètre, voire Annexes 1 ;
- Leur classe, ce qui correspond à l'épaisseur du tuyau, en fonction de leur utilité future ;
- Leur emboîtement, ce qui correspond au type d'emboîtement permettant de faire la liaison avec les autres tuyaux lors de l'installation.

Ces trois paramètres vont avoir une influence sur la cadence de travail, car la machine à centrifuger ne met pas le même temps pour fabriquer des tuyaux différents. Les Figure 12 et 13 nous donnent un aperçu de la variabilité de cette cadence, en fonction de l'emboîtement et de la classe. On observe ainsi, que pour un même diamètre, la classe et l'emboîtement ont un impact. De même, pour une même classe ou un même emboîtement, le diamètre du tuyau a un effet.

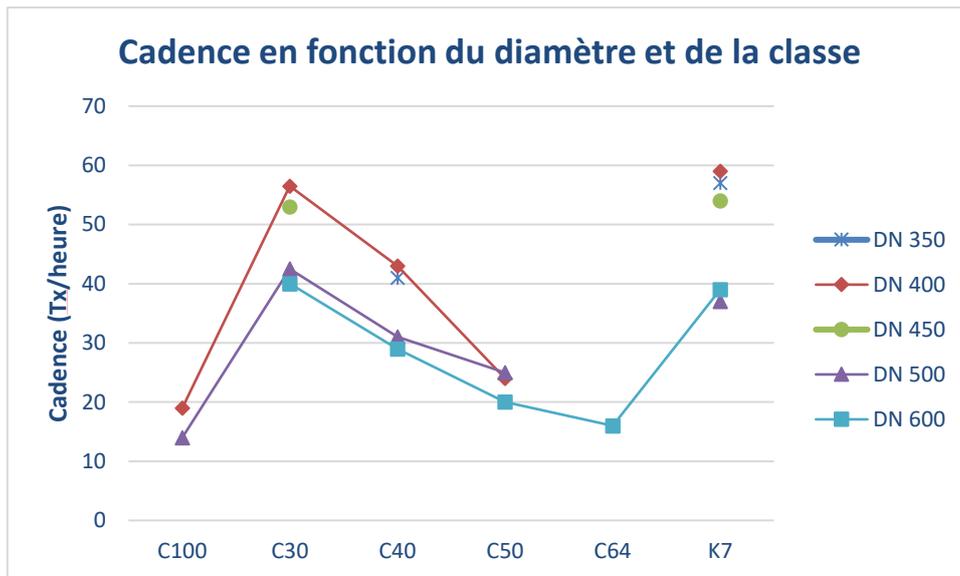


Figure 10 : Graphique représentant la cadence de production en fonction du diamètre et de la classe du tuyau

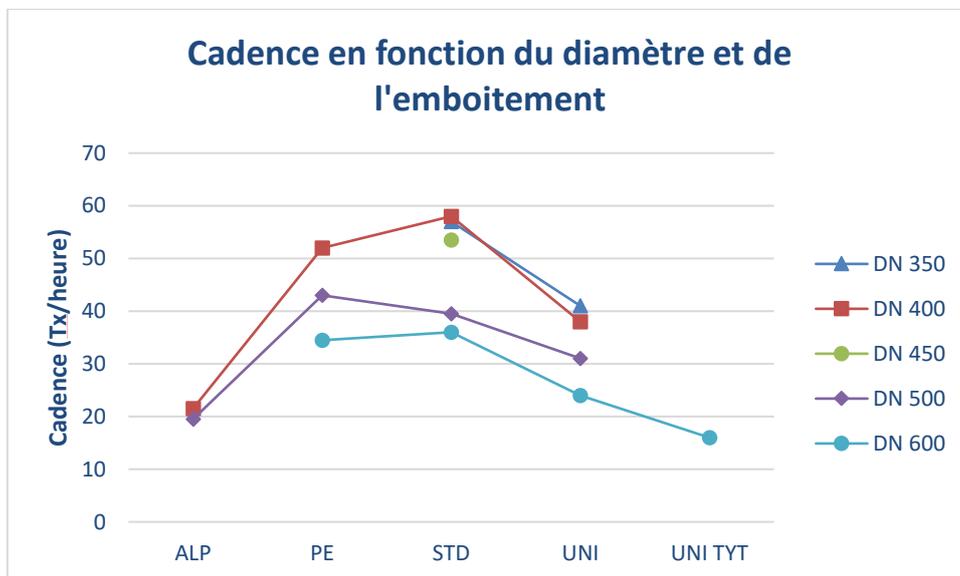


Figure 11 : Graphique représentant la cadence en fonction du diamètre et de l'emboîtement

#### 2.4.2 L'indice qualité : le rebut

Le rebut est l'indicateur qualité numéro 1 de la production. Il en existe un éventail important, tant le procédé de production demande une rigueur exemplaire. De plus, d'après le responsable de production, il est difficile de les détecter dès la sortie de la centrifugeuse. En effet, la fonte étant encore très chaude, le tuyau est encore rouge, ce qui ne permet pas une détection aisée de défauts. Les rebuts sont donc plus souvent signalés après le traitement thermique, au niveau de l'ébarbage. Dans le cadre du projet, je me suis donc concentré sur les rebuts déclarés en sortie de centrifugeuse et ceux déclarés à l'ébarbage. D'autres tuyaux peuvent être signalés défectueux plus en aval de la chaîne, mais cela concerne essentiellement la qualité des revêtements déposés sur les tuyaux.

Les données ont donc été analysées sur le premier trimestre 2019. Il en ressort que sur 21 404 tuyaux produits, 284 ont été déclarés rebuts en sortie de machine et 772 l'ont été sur le secteur ébarbage, ce qui représente un taux de rebut de 5%. Concernant le chiffrage de ce taux de rebut,

il est difficile à estimer et je n'ai pas pu obtenir de chiffres précis. En effet, les pertes se comptent en fonction du tonnage de déclaré rebut, et non au nombre de tuyaux. La diversité entre les tuyaux étant tellement grande, un tuyau peut peser le double d'un autre. Je n'ai pu obtenir que le prix de perte à la tonne, qui est de 300€/T.

Pour se recentrer sur le projet et la question de qualité en jeu, je me suis intéressé au détail de ces rebuts pour en comprendre l'origine et voir ainsi lesquels peuvent avoir un lien avec l'activité des canalistes.

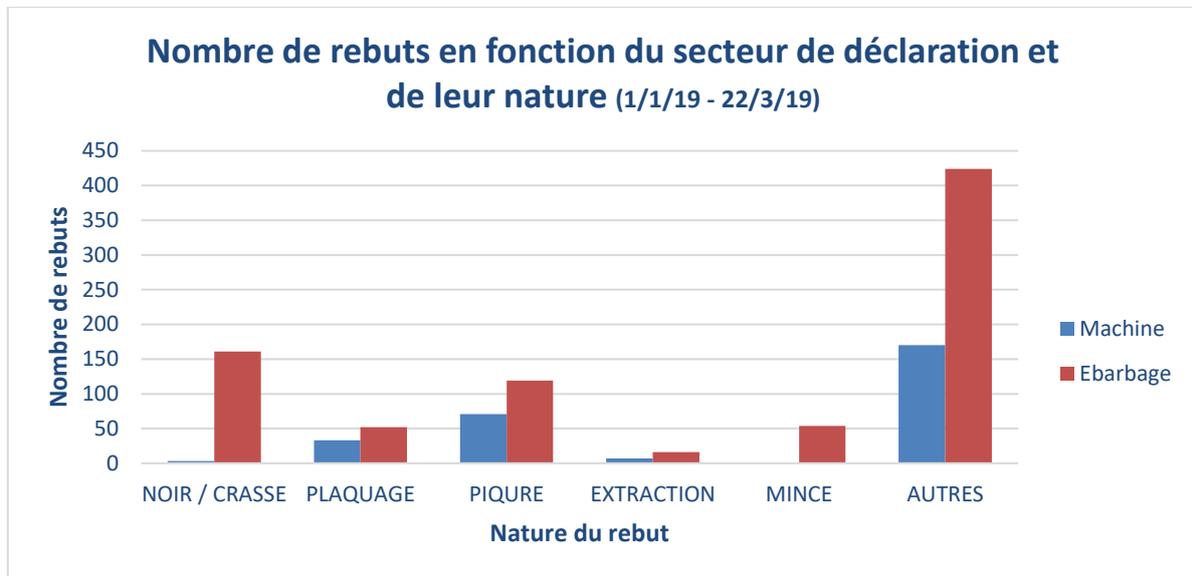


Figure 12 : Graphique représentant le nombre de rebuts en fonction de leur cause et du secteur de déclaration

Le contremaître et le responsable de production m'ont expliqué que les principaux rebuts en lien avec les tâches effectuées par les canalistes sont les « Noir/Crasse ». Il s'agit de résidus de noir (isolant thermique) ou de crasse (fonte « sale ») qui se sont mêlés à la fonte lors de la coulée, en se décrochant soit du canal, soit du basket. Selon le responsable de production, ces rebuts sont la conséquence d'un manque de vigilance de la part des opérateurs. Le graphique ci-dessus (Figure 14), indique que ces rebuts sont déclarés exclusivement au niveau de l'ébarbage, puisqu'ils ne sont visibles qu'une fois le tuyau refroidit (Annexes 3 & 4) et représentent 16% des rebuts totaux. Les « plaquages » et les « piqûres » sont principalement dus à l'usure de la coquille<sup>1</sup>, illustrées en Annexes 5 & 6. L'extraction correspond à une arrachée de la tête du tuyau lors de sa sortie de la machine. Les « Autres rebuts » correspondent essentiellement à des problèmes lors des tests de pression ou d'ovalisation pour l'ébarbage et à des problèmes d'éclatement de noyau<sup>2</sup> lors de la coulée ou d'apparition de criques (Annexe 7) pour la Machine.

Les tuyaux « minces » (Annexes 8) présentés dans ce même graphique sont, d'une part, causés par les paramètres de rotation et de vitesse de descente de la machine et d'autre part par la « coulabilité » du canal. Le graphique suivant (Figure 15), obtenu auprès du service métallurgie du centre de recherche, explique notamment qu'en fonction de l'état du canal, pour des paramètres machines identiques, l'épaisseur du tuyau ne sera pas identique en tous points.

<sup>1</sup> Pièce tubulaire de la machine servant de moule

<sup>2</sup> Noyau en sable permettant de former la partie emboîtement du tuyau et obstruant la sortie de la machine lors de la coulée.

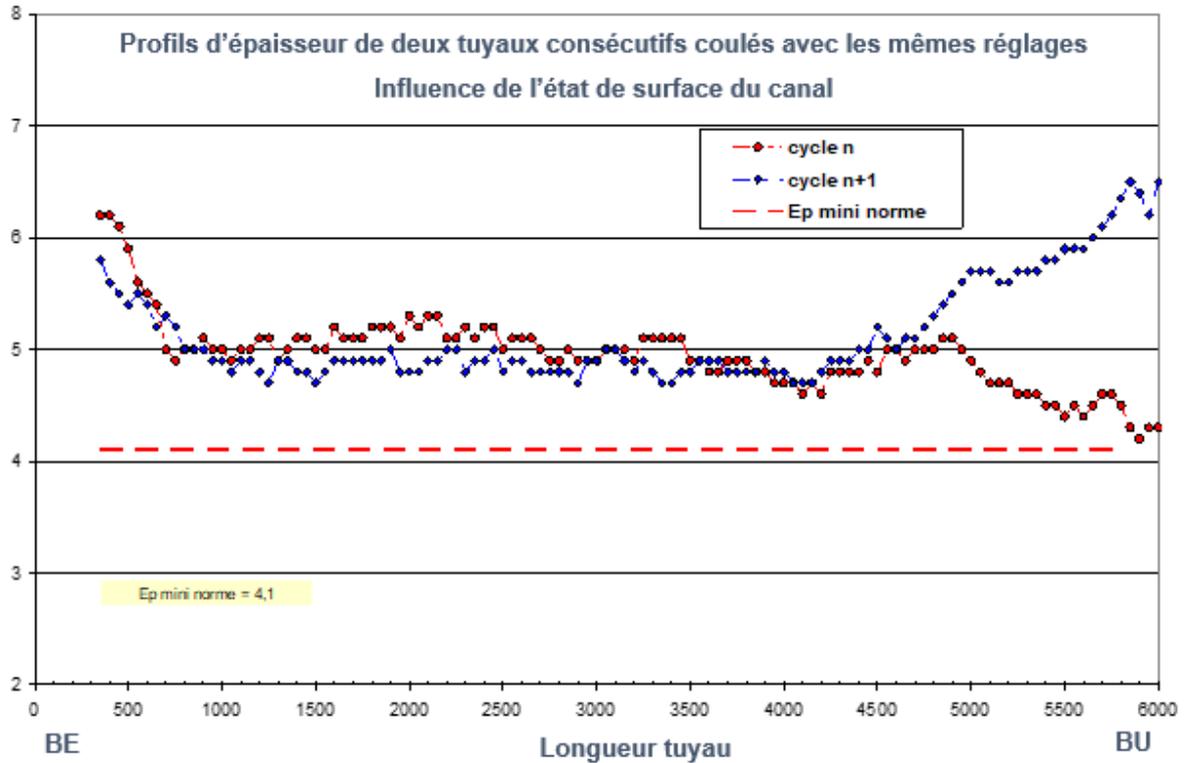


Figure 13 : Graphique représentant l'épaisseur de deux tuyaux consécutifs en différents points

### 2.4.3 Un rendement interdépendant

Sur la même période que celle étudiée précédemment (premier trimestre 2019), je me suis intéressé au rendement du plancher de coulée.

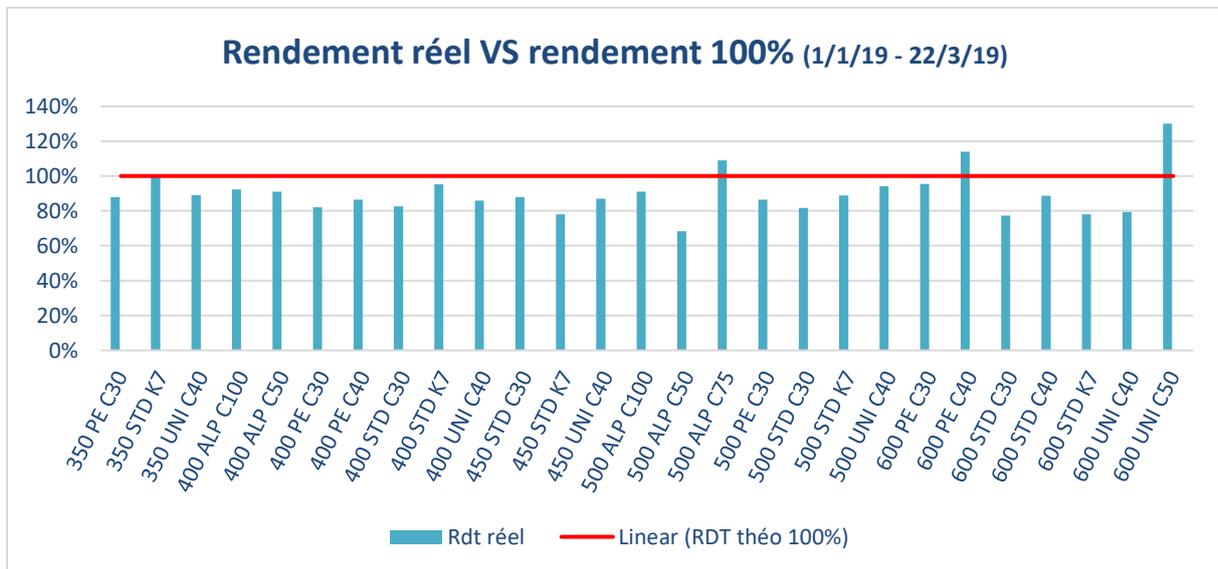


Figure 14 : Graphique présentant le rendement réel vs le rendement théorique 100%

Le graphique ci-dessus (Figure 16) présente le rendement réel pour chacune des références analysées sur le premier trimestre 2019 face au rendement théorique à 100%. On observe alors que seulement 3 références atteignent et dépassent le rendement de 100%. De plus, il s'agit de références qui ne sont réalisées que sur la Machine 6. La question est alors d'essayer de

comprendre l'origine de cette perte de rendement. Je me suis alors penché sur les temps d'arrêts de la ligne. Le tableau 2 synthétise, sur le même trimestre, les temps d'arrêts moyens par poste de la ligne. Il en ressort alors que la ligne est arrêtée en moyenne 76 minutes sur un total de 480 minutes.

<b>Four</b>	<b>Ebarbage</b>	<b>Hauts Fourneaux</b>	<b>Techniques</b>
2	7	28	39

Tableau 2 : Temps d'arrêt( en minutes) de la production en fonction de leur origine

Etant données que la ligne est organisée en flux poussée, c'est-à-dire que c'est la production en amont qui donne le rythme de la ligne, deux problèmes sont à souligner. L'ébarbage et le four, qui sont en aval du poste de coulée peuvent bloquer la production. S'il y a une panne dans l'un de ces deux secteurs, il n'est plus possible de produire de tuyaux car le stock tampon est limité. Les problèmes liés aux Hauts Fourneaux sont à analyser dans le sens inverse. Si la fonte n'est pas produite en suffisamment grande quantité, ou si l'organisation de la distribution avec les lignes 7M et 8M est mal répartie, il peut y avoir des temps d'attente. Enfin, les problèmes techniques vont correspondre à toutes les pannes machines et accessoires. Elles prennent également en compte la maintenance des machines, notamment les changements de coquilles.

Lors de ces arrêts de production, les opérateurs réalisent des tâches de nettoyage et de remise en état du poste.

## 2.5 Introduction à la robotique collaborative : une brève bibliographie

Les entretiens avec le responsable du projet ont permis de mettre en avant 3 scénarii quant à l'orientation du projet. Tous trois sont basés sur une solution de téléopération.

- **Scénario 1** : Quelques tâches seraient éliminables avec le Cobot
  - Quelles tâches éliminer ?
  - Y a-t-il un réel intérêt à les éliminer ?
  - Que faire pour les autres tâches ?
- **Scénario 2** : Toutes les tâches seraient automatisables mais avec une fiabilité inférieure à 100%
  - Y a-t-il un réel intérêt, si l'opérateur doit se déplacer à chaque cycle ?
- **Scénario 3** : Toutes les tâches seraient éliminables avec le cobot

Voici donc une brève revue bibliographique permettant de mieux comprendre l'Interaction Homme-Machine (IHM) dans le cadre d'une collaboration.

### 2.5.1 Introduction à la robotique collaborative : la télé opération

Nous parlerons bien ici de collaboration et non de coopération. Ces deux termes se distinguent selon Rogalski (1994), bien qu'il les emploie dans un contexte de travail entre humains. Ainsi, dans le cadre d'une coopération, les acteurs vont se voir attribuer des tâches respectives afin d'atteindre un but commun, tandis que dans le cadre d'une collaboration, les différents acteurs se voient assigner une tâche commune pour atteindre un but commun. Au vu des scénarii proposés précédemment, les cas de figure de coopération et de collaboration sont envisageables.

Helms et al (2002) définissent différents types de coopérations qui peuvent exister entre un humain et un robot. Ainsi, l'action entre l'humain et le robot peut être indépendante,

synchronisée, simultanée ou assistée (Figure 17). Les modèles qui y sont présentés montrent différentes formes de travail qui peuvent toutes être envisagées dans le cadre de la mise en place d'une solution de télé opération.

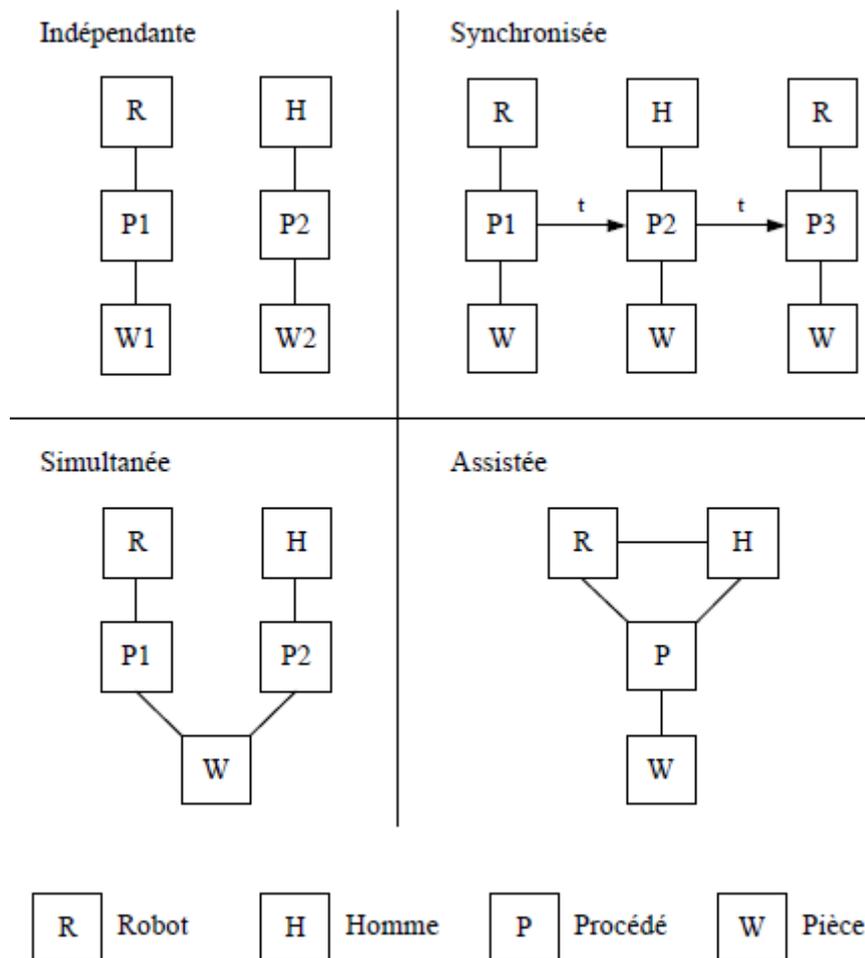


Figure 15 : Les différents modes de coopération selon Helms et al (2002)

En effet, la télé opération peut prendre différentes formes selon le degré de contrôle de l'opérateur. Bitonneau (2018) propose dans sa thèse trois formes de contrôle par l'opérateur :

- Direct, sans contrôle de l'opérateur, le robot n'effectue aucune action
- Partagé, le robot peut enclencher une série d'action à partir d'une commande de l'opérateur
- Supervisé, le robot dispose d'une certaine autonomie et l'opérateur s'assure du bon déroulé des actions.

On voit ainsi apparaître différents degrés d'autonomie pour le robot, néanmoins, l'opérateur conserve l'autorité dans les différents niveaux de décision. En effet, la télé opération a été principalement développée dans le milieu nucléaire afin de sortir les opérateurs de zones de travail hostiles. La nécessité de composer avec leur savoir-faire étant toutefois indispensable, il était impossible d'automatiser la tâche.

Dans le cadre de la mise en place d'une activité télé opérée, il convient donc d'étudier un système Homme-Robot-Tâche plutôt que d'étudier chaque entité individuellement. En effet, Moulières-Seban (2017) propose un modèle de la cybernétique auto-apprenant, dans lequel le couple Homme-Robot réagit à des informations appelées « Input » pour produire un résultat appelé « Output ». Ce modèle met en évidence une boucle rétroactive qui aura un effet sur la tâche, les procédés ou encore les objectifs qui nourrissent le système (Figure 18).

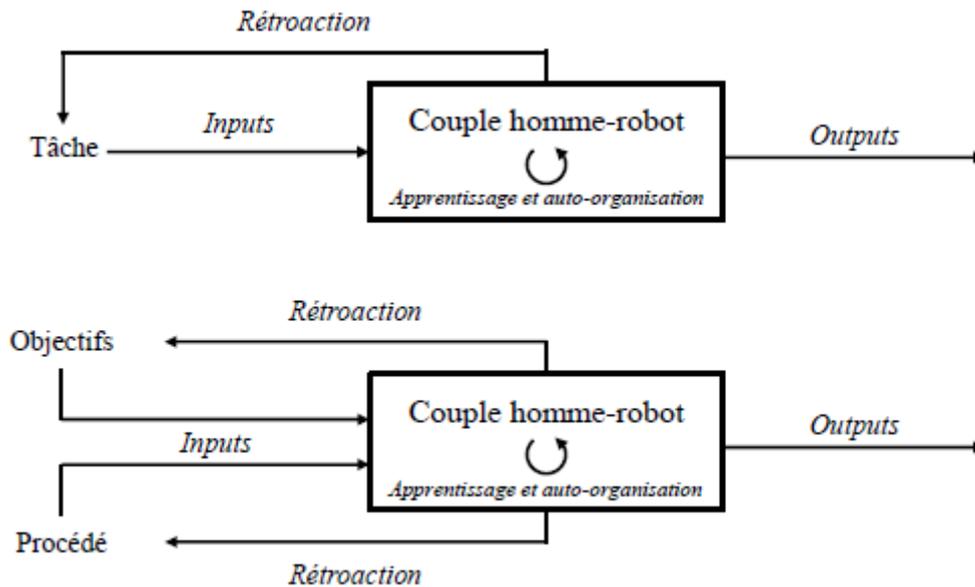


Figure 16 : Schéma cybernétique du système cobotique proposé par Moulières-Seban (2017)

L'étude de ce système nous amène au point suivant et la notion d'acceptation de la technologie pour la situation de travail future.

### 2.5.2 De l'acceptabilité à l'acceptation de la technologie

La transformation d'une situation de travail en y implantant une technologie n'est pas toujours évidente. On rencontre souvent une certaine réticence de la part des opérateurs quant à leur possible substitution par une technologie, dans le cas présent un robot. Malgré que celui-ci est considéré comme collaboratif et qu'il n'aura pas vocation à remplacer l'opérateur, ce dernier sera influencé par deux formes d'acceptabilité<sup>3</sup> : l'acceptabilité pratique et l'acceptabilité sociale. L'acceptabilité est donc un indicateur antérieur à la situation future permettant d'estimer le degré d'acceptation future de la technologie.

L'acceptabilité pratique va alors faire référence au caractère pratique de la future situation de travail. La technologie sera-t-elle suffisamment flexible et adaptable afin qu'elle permette à l'opérateur d'atteindre ses buts de manière efficace et efficiente. Dans ce sens, Davis (1986) a développé un modèle appelé le Technology Model Acceptance, basé sur deux notions :

- L'utilité perçue (PU), qui est le degré de croyance d'une personne de l'apport d'un système pour améliorer sa performance
- La facilité d'utilisation perçue (PEOU), qui est le degré de perception que l'utilisation d'un système se fera sans effort

<sup>3</sup> « Valeur de la représentation mentale que se construisent les individus concernant un objet technologique. Volonté explicite de l'utilisateur de faire usage de la technologie » (Ozenne et al, 2018)

En complément, l'acceptabilité sociale à une approche plus socio-cognitive. Comment va réagir l'opérateur face à la technologie vis-à-vis de ses valeurs et de l'organisation au sein de laquelle il va évoluer. Humbert (2010) met en garde face au processus de résistance de certains opérateurs en réponse au changement. Il émet alors une liste de craintes récurrentes qui dépendent du contexte d'implantation de la technologie :

- **Changement de nature du travail**, un travail manuel peut se transformer en travail téléopéré entraînant une perte de plaisir de faire ;
- **Perte de statut**, un travail reconnu par son savoir-faire peut être dévalorisé par la réalisation de la tâche par un automate ;
- **Altération des relations interpersonnelles**, les deux points précédents peuvent avoir un effets plus importants si on les retrouve dans une organisation collective du travail ;
- **Perte de pouvoir**, l'opérateur n'a plus le droit d'agir de son plein gré
- Changement de prise de décision,
- **Incertitude des informations**, la mise en place de la technologie réduit voire supprime l'accès à certaines informations, essentielles pour l'opérateur ;
- **Remise en cause des compétences**, manque de compétences pour occuper un même poste qui dispose d'une nouvelle technologie.

Plus le niveau d'acceptabilité sera élevé, plus l'acceptation de la technologie sera simplifiée. L'acceptation est un processus dynamique effectif à partir du moment où l'opérateur interagit avec la nouvelle technologie. Afin de s'assurer que celle-ci soit optimale Bobilier-Chaumon & Dubois (2009) proposent deux niveaux d'analyse :

- L'anticipation qui est l'évaluation de l'utilisateur des coûts/bénéfices liés à l'utilisation de la technologie. L'opérateur se représente ainsi le système dans lequel il évoluera avec la technologie de manière abstraite.
- L'acceptation effective qui est une forme où l'utilisateur connaît déjà la technologie. Son acceptation va donc dépendre de l'expérience passée avec cette technologie.

Ses deux niveaux d'analyse placent l'opérateur au centre de la question. La question devient alors, comme le soulèvent Brangier et al (2010), quel est le processus cognitif mis en place par l'opérateur pour accepter la nouvelle technologie ; on parle alors d'acceptation opératoire.

### 2.5.3 Perspectives pour l'intervention

Cette brève revue bibliographique a pour objectif de montrer la complexité de la transformation de travail lorsqu'il s'agit d'y insérer une nouvelle technologie. Les notions d'acceptabilité et d'acceptation montrent que la transformation est un processus long qui nécessite de placer l'opérateur en son centre. L'aspect pratique pour ce qui est de l'atteinte de l'objectif et l'aspect socio cognitif pour ce qui est de la perception de soi au sein de l'organisation sont les éléments déterminants de l'acceptation de la technologie.

Il sera donc indispensable d'inclure les opérateurs du début à la fin du projet, d'une part pour les faire adhérer au projet, et d'autre part pour assurer la pérennité de la future situation de travail.

Il s'agit de ne pas tomber dans le « Men Are Better At – Machine Are Better At » (MABA-MABA) dont parle Dekker et Woods (2002) qui tend à répartir les tâches au préalable alors qu'on ne sait pas encore comment va s'organiser l'activité future. Les futures fonctions de chacun, le robot et l'opérateur, doivent être définies à partir de l'analyse de la situation de travail

actuelle et de la simulation du travail futur. La démarche ergonomique est en ce sens la solution puisqu'elle offre la possibilité de co-construire les solutions en faisant participer les opérateurs.

## **2.6 Reformulation de la demande**

Les indicateurs santé ont montré que le poste de canaliste fait partie des plus accidentogènes de la ligne 6M, malgré qu'il ne s'agit que d'accidents bénins, ils sont toutefois à prendre en compte de manière préventive. De plus, l'apparition de TMS sous-entend que les conditions de travail peuvent être contraignantes physiquement.

L'environnement dans lequel évoluent les opérateurs est hostile à leur santé et nécessite une intervention afin de réduire leur exposition aux différents dangers, notamment la silice cristalline.

Enfin, la question de l'amélioration de la qualité, en lien direct avec les canalistes, laisse supposer que les opérateurs rencontrent des difficultés à réaliser certaines tâches nécessitant de la vigilance.

Étant donné le changement radical que s'apprête à connaître la situation de travail avec la mise en place d'une nouvelle technologie, l'intervention devra permettre dans un premier temps de favoriser l'implication des opérateurs dans le projet afin de favoriser l'acceptation de la transformation de leur travail.

Dans un second temps, l'intervention aura pour objectif d'apporter les connaissances nécessaires sur l'activité réelle des opérateurs. Ceci, afin que la solution de téléopération réponde aux attentes, dans un premier temps, des opérateurs eux-mêmes par la définition des fonctions réalisées par chacun des acteurs (robot ou opérateur), mais également de la hiérarchie pour tout ce qui est de l'ordre de la production (coûts, cadences...)

### 3 Un travail indépendant au sein d'une organisation : une activité riche par l'expérience

Pour rappel, le travail du canaliste consiste à entretenir l'appareillage de coulée, c'est-à-dire, du basket jusqu'à l'entrée de la machine à centrifuger. Afin de faciliter l'intervention, notamment pour la compréhension des termes techniques employés sur le plancher de coulée, un premier entretien ainsi qu'une visite des locaux ont été réalisés avec le responsable de production. Il est notamment apparu que pour se repérer spatialement, les termes employés sont PAM, Blénod, Canal et Route (en référence à la situation géographique de l'usine, Figure 19). On dénomme alors les canalistes en fonction du côté duquel ils se situent de la machine (Canaliste PAM –CP- et Canaliste Blénod –CB-). Cet entretien a eu également pour objectif de me présenter auprès du cadre lui-même, et de me présenter auprès des opérateurs en poste.

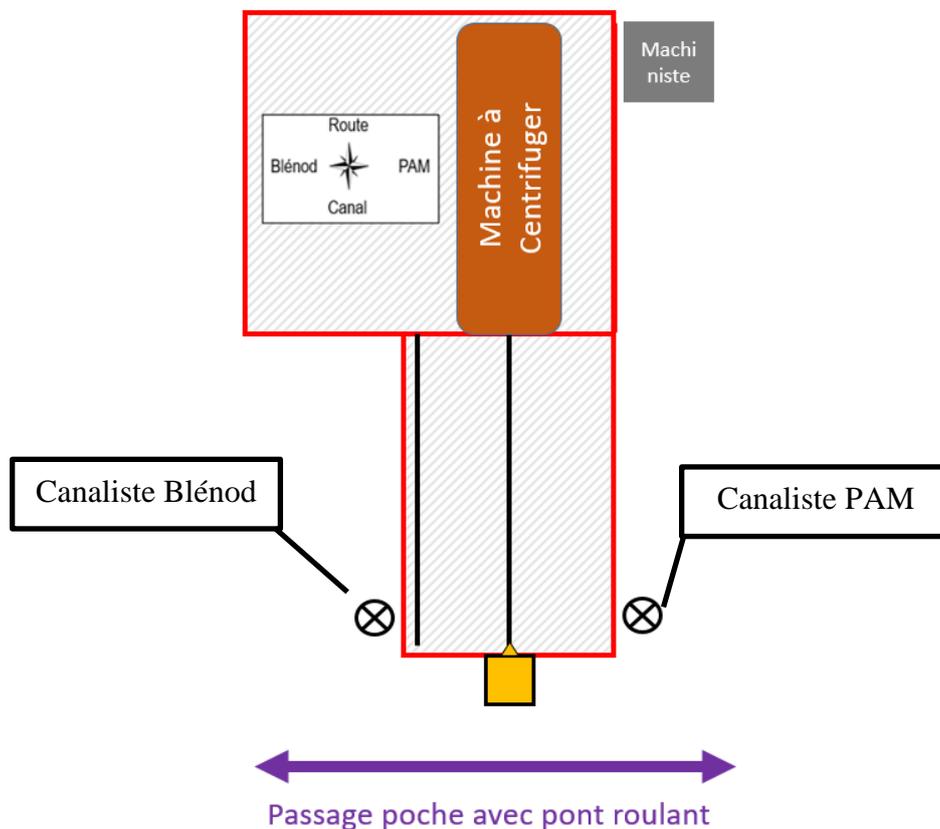


Figure 17 : Schéma représentant l'orientation spatiale du poste

Dans un second temps, après s'être familiarisé avec la zone de travail, j'ai réalisé une intervention dont le but était d'observer les opérateurs lors d'un poste. En complément de cette intervention, des entretiens exploratoires ont été réalisés avec l'ensemble des opérateurs du plancher de coulée (machinistes, pontier, canalistes) afin d'obtenir davantage d'informations sur l'activité des opérateurs.

#### 3.1 Le travail réel des canalistes

##### 3.1.1 Une prescription informelle

Les premières observations ouvertes ont abouti à la réalisation d'un chronogramme d'activité (Annexe 9). Ce chronogramme d'activité, réalisé sur 5h30 de poste, met en évidence les

différentes opérations réalisées par chacun des canalistes du binôme. On y voit également apparaître le côté de coulée (PAM ou Blénod), chaque moment où le basket a été rempli par le pontier et la machine sur laquelle les opérateurs travaillaient. Ce chronogramme montre notamment que l'enchaînement des opérations par chacun des opérateurs n'est pas cyclique. En effet, on ne voit pas de pattern se dessiner et se reproduire au fil du temps, ce qui rend complexe la description de l'activité comme le montre l'aperçu sur la Figure 20. En revanche, certaines opérations sont réalisées régulièrement, particulièrement au niveau du basket, puisqu'elles sont liées au fait que le pontier le remplisse. De plus, la fiche de formation au poste (Annexe 10) n'énumère que 6 tâches, sans toutefois proposer trop de descriptions. Ce manque d'informations officielles sous-entend une grande activité informelle. Les entretiens sur le terrain confirment cet aspect du travail. En interrogeant un opérateur récemment embauché, on entend : « Je regarde les anciens faire », tandis qu'un opérateur avec plus de 10 ans d'expérience dira : « On en apprend tous les jours, je dirais qu'il faut au moins 2 ans pour avoir tout vu ». L'activité se construit sur la transmission des connaissances entre les anciens et les nouveaux entrants.

Pour autant, la Fiche EHS du poste (Annexe 11) détaille davantage les opérations réalisées par les opérateurs du plancher de coulée. Celle-ci a été mise à jour récemment, tandis que la fiche de formation date de 2013. Ce manque de formalisation de l'activité laisse une grande place à une activité gérée par les opérateurs.

Nous allons donc voir dans un premier temps, les opérations partagées entre les opérateurs, puis nous verrons dans un second temps, les opérations communes mais réalisées indépendamment avant d'aborder la notion de travail collectif.

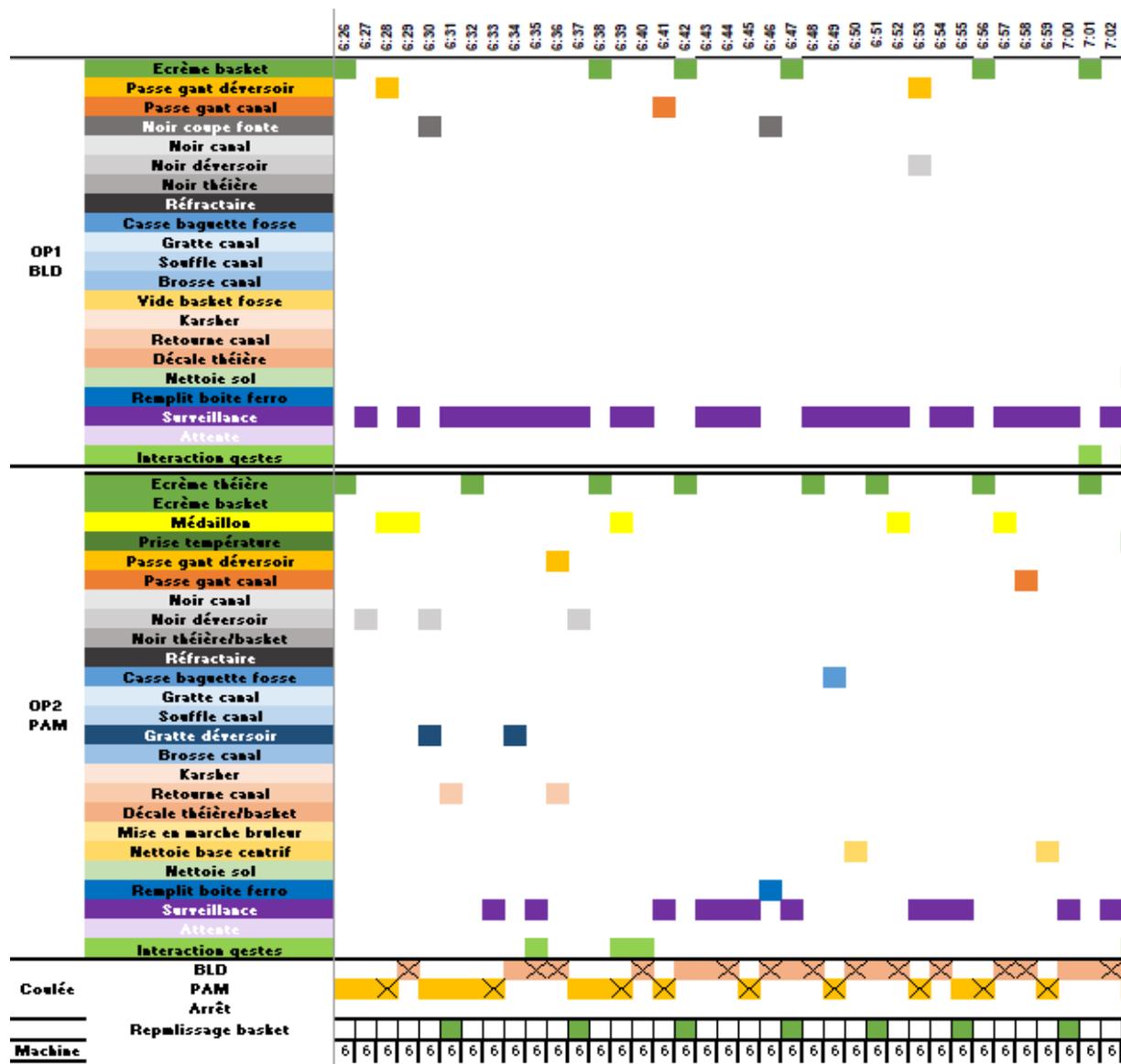


Figure 18 : Extrait du chronogramme d'activité

### 3.1.2 Un travail partagé entre les canalistes

Comme il l'a été précisé au-dessus, certaines opérations sont réparties entre les deux canalistes. Cette répartition se veut informelle selon les opérateurs et n'apparaît pas dans la fiche de poste. Ces opérations concernent principalement les tâches effectuées sur le basket et sur la machine à centrifuger, qui sont, au regard de l'aménagement du poste, les seules zones communes aux deux canalistes.

Ainsi, le CB va être le seul à intervenir sur la machine à centrifuger. Pour cela, il va réaliser une prise d'information visuelle régulière pour constater de l'état du coupe fonte et de la paroi extérieure de la machine. En fonction de ses observations, il interviendra pour mettre de la graisse au coupe fonte et décollera la fonte agglomérée sur la paroi à l'aide d'une perche en métal.

En ce qui concerne les opérations réalisées sur le basket, elles étaient auparavant réalisées par un opérateur appelé le correcteur fonte, dont le poste a été supprimé, redistribuant les tâches d'entretien du basket aux deux canalistes.

Une première consiste à écrémer le basket. Cette opération consiste à retirer la crasse (fonte impure) de la surface du basket à l'aide d'une perche au bout de laquelle est fixée une spatule (Photo 2). L'écrémage est réalisé à chaque fois que le pontier remplit le basket, c'est-à-dire tous les 2 à 5 tuyaux en fonction de la machine et de la référence du tuyau. Le CB s'occupe du basket, tandis que le CP s'occupe de la théière (Bec du basket). L'activité physique des opérateurs va alors dépendre de la quantité de crasse à enlever ainsi que la profondeur à laquelle aller la chercher.



*Photo 2 : Opérateur réalisant l'écrémage du basket*

Une seconde opération réalisée sur le basket consiste à « décaler » ce dernier. Il s'agit de décoller la fonte agglomérée sur les parois intérieures du basket et de la théière. Cette opération se réalise une fois que le basket est quasiment vide. Les opérateurs utilisent une barre à mine pour taper et décoller la fonte. Il s'agit selon les canalistes d'une activité difficile physiquement et qu'il y a « une technique à avoir pour le faire ». Comme pour l'écrémage, le CB s'occupe du basket tandis que le CP s'occupe de la théière (Photo 3). Les entretiens ont été unanimes sur le fait qu'il était essentiel de surveiller l'état du basket pour faciliter son décalage et éviter d'intervenir trop tard.



*Photo 3 : Opérateur en train de décaler la théière*

Le CP réalise des opérations liées à la qualité de la fonte. Il prélève à l'aide d'une louche de la fonte dans le basket afin de réaliser un échantillon qui s'appelle le médaillon. Celui-ci est annoté du numéro de la poche avant d'être envoyé au service qualité. Cet échantillon est réalisé toutes les 3 poches. Le CP prend également la température de la fonte dans le basket, à chaque fois qu'il est rempli par une nouvelle poche. Cela permet de contrôler que la fonte est à la bonne température. Dans le cas contraire, les canalistes utilisent des chaînes pour accrocher le basket au pont roulant afin que celui-ci soit renvoyé et vidé avec la poche aux Hauts Fourneaux.

Etant donné le fonctionnement en 2\*8, si le poste n'a pas de relève, le CP place un brûleur au-dessus du basket afin de continuer de le maintenir à une température élevée, en vue de la prochaine prise de poste. Cette opération peut également être réalisée lorsqu'au cours d'un même poste, les opérateurs changent de machine.

Enfin, le CP remplit la boîte à ferro située à proximité du basket ainsi que celle située un peu plus excentrée du côté canal, l'obligeant à traverser le chemin du pont roulant.

Malgré que ces opérations sont réparties entre les différents canalistes, il a été observé dans certaines situations, que les opérateurs s'entraident, notamment lorsque l'un d'entre eux est occupé à réaliser une autre opération, comme gratter le canal par exemple.

### 3.1.3 Un travail commun mais indépendant

Les opérations communes aux deux canalistes vont concerner celles réalisées sur le canal. En effet, le CP se voit attribuer le canal PAM et le CB se voit attribuer le canal Blénod. Lors d'un poste, les coulées sont alternées entre le canal PAM et le canal Blénod, comme illustrer sur la Figure 21. Ainsi, pendant qu'un canal sert à la coulée, le second est dit « à quai » pour que le canaliste effectue les opérations d'entretien dessus. Lors de la coulée suivante, les deux canaux translatent et le canal qui était à quai sert à la coulée tandis que l'autre se retrouve à quai ce qui permet au second canaliste de réaliser les opérations de maintenance.

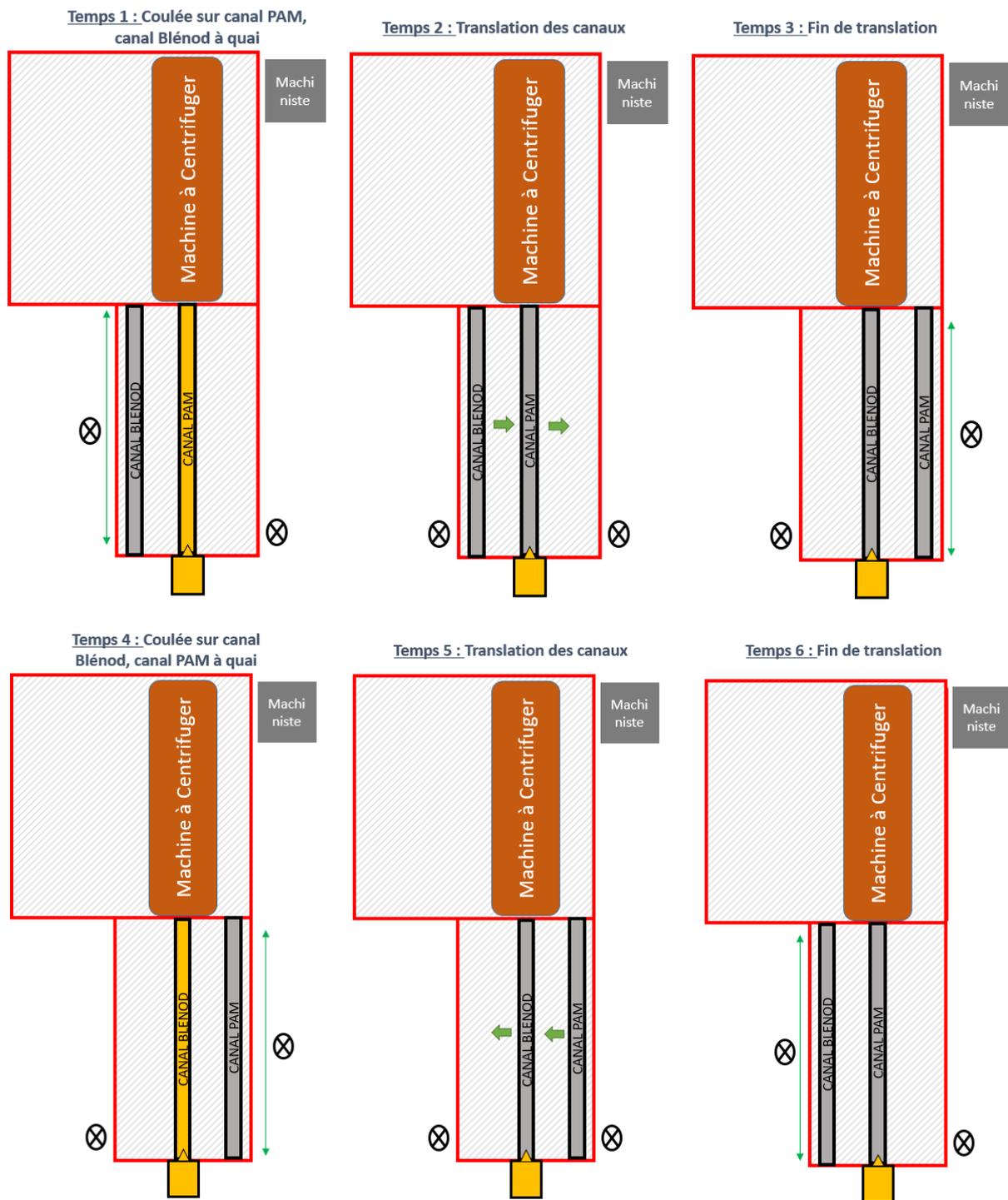


Figure 19 : Illustration d'un enchaînement de coulées avec translation des canaux

Les canalistes interviennent physiquement sur le canal, une fois que ce dernier est à quai. Cependant, l'activité des canalistes est continue, puisqu'ils observent la fonte pendant la coulée. Cette prise d'information leur permet de prévoir l'intervention qu'ils vont réaliser sur le canal par la suite. De plus, quand le canal revient à quai, il reste une fine couche de fonte sur la longueur qu'on appelle « baguette ». Cette baguette est retirée automatiquement par retournement du canal, qui l'envoie dans la fosse située en-dessous. Une nouvelle fois, les canalistes observent la chute de cette baguette pour orienter leur intervention sur le canal. Lors de leur chute, les baguettes heurtent des barres qui les cassent en plus petits morceaux afin de

pouvoir les évacuer plus facilement par la suite. Cependant, il arrive que les baguettes se soient trop solidifiées en refroidissant et qu'elles ne cassent pas lors de leur chute. Elles restent alors coincées sur les barres et l'opérateur doit utiliser une barre à mine pour les casser (Photo 4).



*Photo 4 : Canaliste en train de casser les baguettes dans la fosse*

Une fois que le canal est revenu de sa position retournée, le canaliste procède à son entretien, si toutefois, il a jugé qu'il était nécessaire d'intervenir dessus. En effet, sa prise d'information peut lui permettre d'estimer que le canal est en bon état et qu'aucune action n'est à mener. Dans le cas contraire, le canaliste identifie les zones du canal sur lesquelles il doit intervenir. En fonction de l'anomalie repérée par le canaliste il peut être amené à :

- Utiliser une barre à mine pour enlever un résidu de fonte collé dans le canal
- Utiliser un gant pour lisser les aspérités du noir dans le canal
- Gratter le canal avec une brosse en fer pour décoller une section de noir avant d'en remettre à l'aide d'un pinceau large.

Pour extraire les éléments décollés du canal par les opérations listées précédemment, chaque canaliste dispose d'un pupitre de commande situé derrière lui, lui permettant de commander le canal en mode manuel. Le machiniste n'a alors plus la main sur le canal.

De plus, toutes les 2 heures, les canalistes doivent réaliser le grattage de leur canal. Cette opération consiste à mettre à blanc le canal en enlevant le noir à l'aide d'un karcher. Cela permet de voir les défauts du canal (trous, déformations) qui pouvaient être masqués par le noir. Si l'opérateur constate qu'il y a un trou dans le canal, il utilise une pâte, appelé ciment réfractaire, pour colmater le trou. Une fois la maintenance du canal faite, il verse du noir à l'aide d'une gamelle du déversoir au bas du canal. Il utilise ensuite une soufflette, pour que celui-ci se répartisse bien sur les bords du canal. Le grattage du canal générant beaucoup de poussière étant donné la friabilité du noir, le canaliste passe ensuite un coup de jet d'eau sur le sol afin d'éviter de rendre le sol trop glissant.

Cependant, lors des observations ouvertes, il est arrivé que le grattage se fasse avant la durée de 2 heures préconisée. Les canalistes ont expliqué que les canaux étaient trop abîmés, ce qui les a poussés à agir plus rapidement.

Enfin, étant donné la durée d'un « grattage canal », les coulées ne peuvent plus se réaliser successivement sur les deux canaux. Dans cette situation précise, les coulées sont toutes réalisées sur le canal qui n'est pas gratté, ce qui a pour conséquence d'augmenter l'activité du canaliste qui en a la charge.

### 3.1.4 Le travail du collectif

L'analyse de la demande a mis en évidence que les canalistes travaillent au sein d'un collectif. Leur activité est ainsi liée à celle du machiniste et du pontier. Etant donné le bruit ambiant et les distances qui séparent les différents opérateurs, sans compter que le pontier est en hauteur dans une cabine fermée, les interactions se font principalement par gestes. Lorsque les canalistes interagissent entre eux ou avec le machiniste, ils s'interpellent par un cri avant de communiquer par geste. Pour ce qui est des communications avec le pontier, les canalistes l'interpellent par des gestes. De par l'implantation des postes, le machiniste et le pontier ne peuvent communiquer directement. Le machiniste passe alors par l'intermédiaire du canaliste PAM pour transmettre une information au pontier comme l'illustre la Figure 22.

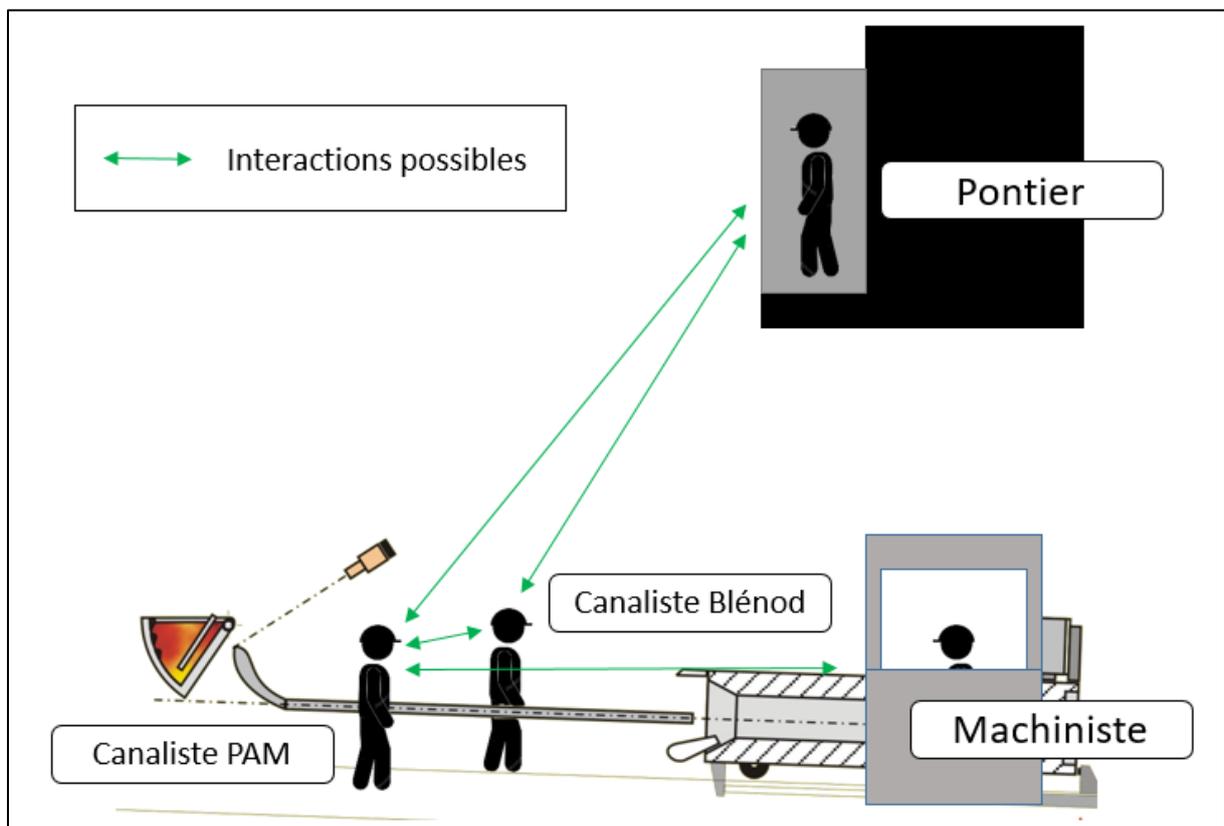


Figure 20 : Représentation des interactions entre les différents opérateurs

La gestuelle employée pour interagir est commune à l'ensemble du personnel. Il s'agit d'un code pour lequel : « chaque geste à une signification et permet de réagir rapidement si nécessaire ».

Par exemple, lors des observations ouvertes, la machine a rencontré des difficultés à extraire un tuyau. Le machiniste a alors alerté le canaliste pour que celui-ci prévienne le pontier, afin qu'il ne remplisse pas le basket et ainsi éviter que la fonte refroidisse en attendant que le problème soit résolu.

De même, lors du grattage d'un canal le canaliste prévient qu'il bloque le canal à quai afin que le machiniste adapte les paramètres du système de coulée, pour ne couler plus que sur un canal.

## 3.2 Analyse de l'activité physique au poste

### 3.2.1 Méthodologie d'intervention

Pour analyser la pénibilité physique du poste, qui a été pour rappel, le point d'entrée de l'ergonomie dans le projet, nous avons fait appel à la société TEA (Tech Ergo Appliquée) et de sa technologie CAPTIV. Ce choix s'est justifié par le manque de temps à mettre en place une telle étude et par le fait que l'ingénieur en charge du projet avait besoin des données angulaires posturales pour programmer les mouvements de la future solution.

Les données sont collectées à partir de centrales inertielles disposées sur les différents segments des membres supérieurs, la tête et le tronc de l'opérateur (Figure 23). Les membres inférieurs ont été volontairement omis étant donné que les premières observations ouvertes n'ont pas permis de voir de sollicitations angulaires au niveau des genoux et des hanches importantes.



Figure 21 : Illustration du placement des centrales inertielles (Réal VS Avatar)

Les données collectées sont traitées et permettent d'obtenir des chiffres caractérisant la sollicitation articulaire en fonction des opérations réalisées. Trois zones de sollicitation sont estimées, de la moins contraignante à la plus contraignante : Vert, Orange et Rouge. Ces sollicitations sont caractérisées par des recommandations issues des documents suivants :

- ERGONOMIE », H. MONOD ; B. KAPITANIAK. *Collections des Abrégés de Médecine*. 2009, 2<sup>ème</sup> édition, 272 pages.
- Norme NF X35-119 Ergonomie - Manipulation à fréquence élevée - Évaluation et valeurs seuils de la contrainte biomécanique de tâches répétitives des membres supérieurs
- ED 957 « Les troubles musculo-squelettiques du membre supérieur (TMS-MS), INRS, 2011

Les valeurs recommandées dans ces documents sont détaillées en Annexe 12.

Pour réaliser les mesures, deux opérateurs ont été équipés des capteurs : une en poste du matin et un en poste d'après-midi. L'autonomie des capteurs ne permettant d'enregistrer que pour une durée de 4 heures et étant donné la chaleur environnante, l'autonomie aurait été réduite, c'est pourquoi la durée de 2 heures a été définie pour l'acquisition. De plus, cette durée de 2 heures permet de couvrir un maximum d'opérations, dont au moins un grattage canal. Les deux canalistes ont exercé côté Blénod.

### 3.2.2 Résultats de l'intervention

Les résultats proposés par la société ne traitant que de données d'amplitudes articulaires, il était indispensable de les croiser avec les observations réalisées au préalable. En effet, la mobilisation des articulations dans des zones définies comme rouges peut être un facteur de contrainte articulaire. Toutefois, il faut tenir compte de la répétitivité et de la force exercée lors de la mobilisation des articulations pour définir si l'activité physique est source de Troubles Musculo Squelettiques (TMS).

L'étude révèle des différences entre les deux opérateurs au niveaux des contraintes articulaires enregistrées. Ceci s'explique en partie par les opérations réalisées sur le temps d'enregistrement. En effet, le canaliste de l'après-midi a réalisé davantage d'opérations que le canaliste du matin, notamment un décalage de basket. Ceci vient confirmer la variabilité des opérations effectuées observée dans le premier chronogramme. De plus, cela peut s'expliquer par la différence d'expérience entre les deux opérateurs qui n'ont pas la même gestuelle pour réaliser certaines opérations, comme le confirme le verbatim suivant : « On s'adapte, à force de mal faire on se rend compte qu'on a mal au dos ».

Cependant on retrouve des opérations contraignantes articulairement communes aux deux opérateurs. Il s'agit de l'écramage (Figure 24) et du passage de graisse au coupe fonte (Figure 25). De plus, ces opérations sont réalisées régulièrement dans le poste (17 fois chacune pour chacun des opérateurs en 2 heures). Enfin, la première nécessite de dégager une force considérable pour porter la perche (10kg) et la crasse, tandis que la seconde nécessite de la précision pour étaler la graisse à bout de perche. Ces deux opérations peuvent potentiellement être sources de TMS.



Figure 22 : Illustration de l'opérateur lors d'un écramage à gauche et l'avatar à droite



Figure 23 : Illustration de l'opérateur lors du graissage du coupe fonte à gauche et l'avatar à droite

D'autres opérations, réalisées uniquement par l'opérateur d'après-midi lors des enregistrements, nécessitent une activité physique intense dans des postures contraignantes. Il s'agit du décalage du basket (Figure 26) et du remplissage des boîtes à ferro (Figure 27). Cependant, ces deux opérations apparaissent rarement dans le poste, mais sont toutefois des sources d'activité physique importante.



Figure 24 : Illustration de l'opérateur lors du décalage du basket à gauche et l'avatar à droite



Figure 25 : Illustration de l'opérateur lors du port et du remplissage des sceaux à ferro à gauche et l'avatar à droite

Enfin, la surveillance a été remontée comme une opération articulairement contraignante (Figure 28), cependant, au regard de l'activité réelle, il se trouve que l'opérateur est en permanence en appui sur ces bras, ce qui ne nécessite pas d'exercée une force excessive. Ces éléments ne permettent pas de dire que cette opération est source de TMS.



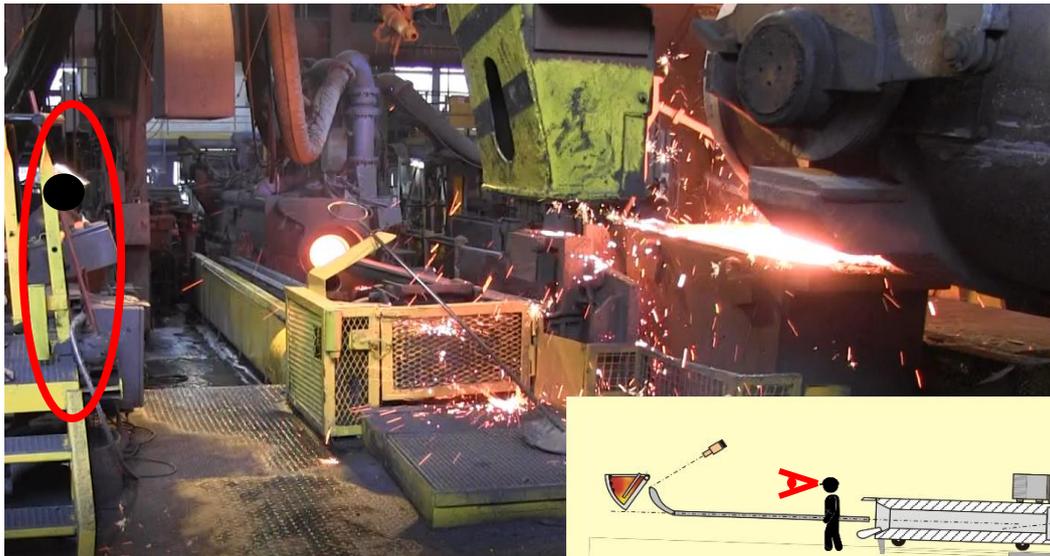
Figure 26 : Illustration de l'opérateur lors de la surveillance du canal à gauche et l'avatar à droite

Ce point nous a permis de mettre en avant l'activité physique des opérateurs au poste, avec certaines opérations pouvant être potentiellement sources de TMS par leur fréquence, la force ou la précision nécessaire pour les réaliser ainsi que les contraintes posturales dans lesquelles elles sont effectuées.

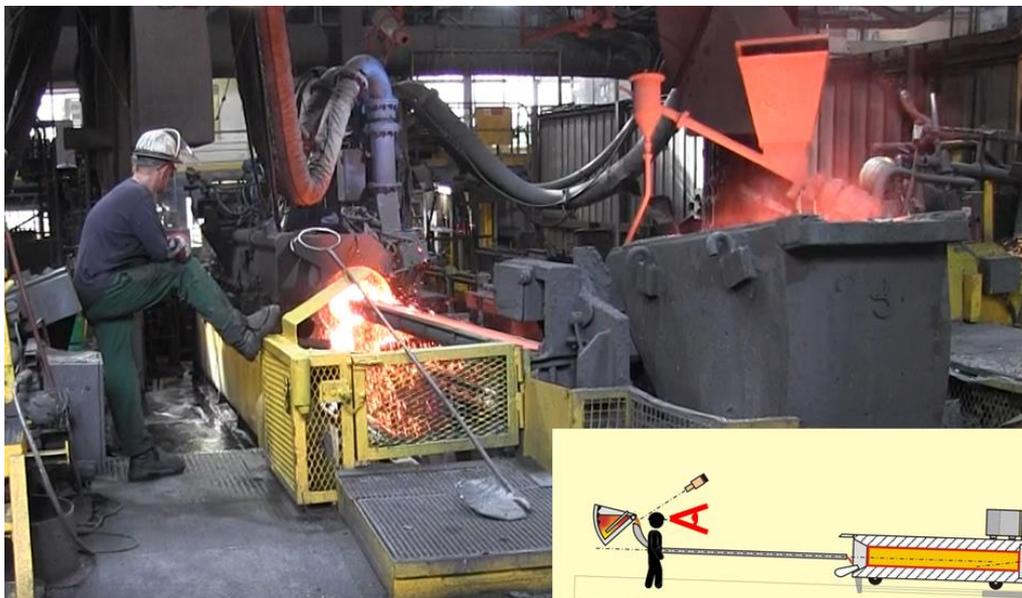
### 3.3 Une organisation rythmée par la sécurité et la maintenance

#### 3.3.1 Une organisation spatiale liée à la sécurité

Comme nous avons pu le voir lors de l'analyse de la demande, le plancher de coulée expose les opérateurs à de nombreux dangers (fonte en fusion, poussière...). Les premières observations ont appuyé ce point. En effet, il a été observé que lorsque le pontier remplit le basket, les deux canalistes se placent de manière à éviter les projections de fonte, soit en se plaçant à mi-canal (Photo 5), soit en se plaçant derrière la poche. De même, lorsque la machine arrive en position basse, en fin de coulée, les canalistes se placent de manière à éviter les projections de fonte provoquées par la rotation de la machine (Photo 6). Ces placements sont issus de règles informelles mises en place par les canalistes eux-mêmes. En effet, la fiche de sécurité au poste spécifie simplement de « ne pas rester aux abords du basket lors du remplissage ». On voit alors qu'au-delà d'une sécurité réglée, une sécurité gérée existe. L'articulation de ces deux modes de sécurité rejoint les propos de Nascimento et al (2013), qui expliquent que le géré et le réglé sont une « articulation entre la production de règles cohérentes et leur utilisation / transformation / invention raisonnée en situation ». Ces placements vont contraindre l'organisation, notamment lors de la réalisation de certaines opérations.



*Photo 5 : Placement du canaliste lors du remplissage du basket*



*Photo 6 : Placement du canaliste en fin de coulée de tuyau*

Par exemple, le remplissage de la boîte à ferro<sup>4</sup>, qui se situe à proximité du basket, côté PAM, est contraint par le fait qu'elle ne peut pas être complétée lorsque le basket se remplit. Plusieurs opérateurs ont rapporté qu'il faut « anticiper avant qu'il ne soit vide », c'est pourquoi ils vérifient en début de poste son niveau, puis régulièrement au cours du poste.

De même, lorsque le canaliste souhaite intervenir sur la partie basse de son canal, il ne peut le faire lorsque la machine est en fin de coulée, au risque de se faire brûler par les projections.

Le point le plus important relatif à la sécurité selon les opérateurs concerne le risque de collision avec la poche du pont roulant. Celle-ci se déplace à hauteur d'homme et elle « est toujours prioritaire car elle ne peut pas freiner dans l'urgence ». Ceci impacte l'organisation pour les opérations nécessitant de croiser le chemin de la poche, à savoir la réalisation du médaillon et

<sup>4</sup> Poudre qui limite l'accroche du tuyau dans la machine

l'accès au stock de ferro. Cependant, les opérateurs expliquent qu'il est « simple d'anticiper son approche même quand on lui tourne le dos, par la chaleur qu'elle dégage ». De plus, des lumières bleues projetées sur le sol annoncent son déplacement.

### 3.3.2 Une attribution de machine liée à la maintenance

Lors d'un poste, le responsable de production définit la ou les machines qui vont être utilisées ainsi que le détail des références qui vont y être produites. Cette organisation est définie par les priorités de production selon le planning.

Cependant, lors de l'intervention, le problème lié à l'extraction du tuyau a contraint à une réorganisation de la production. Ainsi, la machine 6 sur laquelle est arrivé l'incident technique a dû être remise en état. Afin de limiter l'impact sur la production, les opérateurs affectés à la machine 6 ont été affectés à la machine 2 afin de produire une autre référence de tuyaux.

## **3.4 Pré diagnostic : les observations justifient le choix de la télé opération**

Il faut bien prendre en considération que l'analyse de l'activité n'est jamais terminée. La suite de l'intervention va continuer de nous apporter des détails pertinents et nécessaires à la compréhension du travail, c'est pourquoi nous parlons bien ici de pré diagnostic. Celui-ci nous permet d'orienter et de construire la suite de notre intervention.

L'analyse de la demande et les observations présentées en amont dans ce mémoire présentent une activité réalisée dans un milieu hostile à l'homme, de par l'exposition aux poussières, au risque de brûlure et le risque de heurt avec la poche du pont roulant. De plus, le rapport de l'ANSES invitant à une réduction de la VLEP à la silice cristalline, incite fortement à sortir l'opérateur de la zone de travail.

Les observations ouvertes ont également mis en évidence le savoir-faire des opérateurs par la nécessité d'une prise d'information dans le but de déclencher l'action. De plus, le chronogramme d'activité montre que l'activité n'est pas cyclique et que le canaliste reste décideur. Ces deux points viennent renforcer le caractère non automatisable du travail.

Ces deux aspects justifient le choix de la télé opération comme solution de transformation de la situation de travail. En effet, si on se réfère à l'article paru dans *Travail & Sécurité* (Février 2018), les systèmes de « télé opération sont employés pour des tâches qui ne sont pas automatisables, où le savoir-faire de l'opérateur reste incontournable ».

L'ensemble de ces éléments a fait l'objet de la mise en place d'un Comité de Pilotage (COPIL) auprès duquel ont été présentés les premières analyses. Cette première réunion de COPIL a notamment été l'occasion de négocier du temps avec les opérateurs dans le cadre de la suite de l'intervention. Cependant, l'activité croissante avec la récupération des commandes de l'usine de Brebach donne la priorité à la production et non à l'étude. Ceci a compliqué la suite de l'intervention, notamment en ce qui concerne la disponibilité du personnel.

## 4 Identification de la télé opérabilité du travail : vers une transformation de l'activité

### 4.1 D'une méthodologie théorique à une méthodologie pratique

#### 4.1.1 Le choix d'un modèle caractéristique à la cobotique

De nos jours, la démarche ergonomique de conception se base sur le modèle proposé par Barcellini et al (2013). Bien entendu, ce modèle est adapté en fonction du projet auquel il est appliqué. Plus récemment, et dans un contexte d'étude similaire au projet sur lequel je travaille, Moulières-Seban et al (2016) ont proposé un processus de conception caractéristique à la cobotique (Figure 29). Il s'agit d'un processus qu'ils ont appliqué dans le cadre du développement d'un système télé opéré servant à nettoyer des cuves.

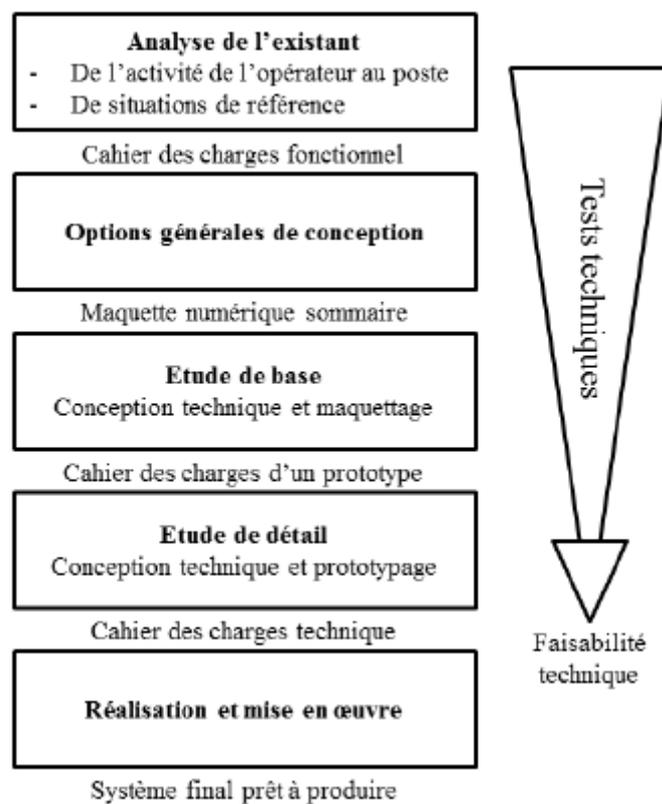


Figure 27 : Processus global de conception d'un système cobotique industriel (Moulières-Seban et al, 2016)

L'analyse de l'existant correspond à la première partie de cet écrit et permet notamment de reformuler les objectifs du projet ainsi que d'orienter la suite de l'intervention.

Les options générales de conception vont concerner la répartition des tâches entre le système mécanisé et l'opérateur. Cette étape consiste à modéliser l'Interface Homme Machine (IHM) à partir de l'analyse de l'activité de l'opérateur.

L'étude de base consiste à définir des Situations d'Action Caractéristiques (SAC), faisant office d'hypothèses afin de tester le modèle retenu lors de l'étape précédente. Des maquettes sont alors utilisées pour simuler le travail. L'objectif de ces simulations est de parvenir à une maquette détaillée.

L'étude de détail correspond à la simulation de la situation future à l'aide d'un prototype sur lequel seront effectuées les dernières modifications. Cette étape nécessite la participation des opérateurs. Cette condition est primordiale afin d'assurer une acceptabilité maximale du futur système de travail.

La réalisation et mise en œuvre interviennent lors de l'installation de la solution cobotique. Il s'agit de s'assurer de la bonne formation théorique, mais surtout pratique des opérateurs. De plus, le système doit pouvoir être adaptable et subir quelques ajustements afin de correspondre à l'ensemble des profils des futurs utilisateurs.

L'ensemble des étapes susmentionnées nécessite l'intervention d'une équipe pluridisciplinaire. Les besoins relatifs à chacune d'entre elles reprennent les disciplines de l'ergonomie et de la robotique principalement. En effet, l'ergonomie va apporter les connaissances relatives à l'activité des opérateurs et la conception des IHM, tandis que la robotique sera qualifiée dans l'expression de la faisabilité technique.

#### 4.1.2 Détails de la méthodologie mise en place

La concordance des calendriers de formation et professionnel n'ont pas permis de réaliser la démarche dans sa globalité, puisqu'à l'heure de l'écriture du mémoire la maquette numérique sommaire est en cours de réalisation. Les paragraphes 4.2 et 4.4 rapporteront donc le détail de ce qui a pu être mis en place tandis que le paragraphe 4.6 rapportera la méthodologie proposée pour la suite de l'étude.

La méthodologie mise en place pour la suite de l'intervention se devait d'intégrer les opérateurs. Si l'on reprend le processus exposé précédemment, l'objectif est dans un premier temps, à partir de l'analyse de l'activité, de fournir un cahier des charges fonctionnel à l'ingénieur. Celui-ci permettra à l'ingénieur de disposer des informations nécessaires afin d'intégrer l'ensemble des activités actuelles des canalistes aux fonctionnalités futures du système. Etant donné que les premières observations ont mis en évidence l'importance de la surveillance par prise d'informations visuelles et le savoir-faire technique pour réaliser les gestes justes (décalage du basket, écrémage, gratter le canal), l'idée est de réaliser des entretiens exploratoires avec les canalistes pour approfondir nos connaissances sur ces deux sujets.

Les informations obtenues permettent d'une part de donner des pistes à l'ingénieur dans sa recherche de solutions techniques, et d'autre part, de préciser les situations clés à analyser pour l'ergonome. De plus, ces entretiens sont l'occasion de connaître la représentation qu'ont les opérateurs de la télé opération. En effet, n'étant pas un système commun dans les industries, il s'agit de s'assurer que les opérateurs comprennent la finalité du projet.

Ainsi, il a pu être organisé des entretiens de 15 minutes par canaliste. Six canalistes et deux polyvalents ont pu être interrogés. Les polyvalents ont été intégrés aux entretiens étant donné que par leur rôle, ils sont également amenés à réaliser le travail du canaliste. Les entretiens ont été réalisés dans une salle de réunion à proximité du chantier de coulée, afin de permettre aux opérateurs de quitter et de rejoindre rapidement leur poste pour ne pas perturber les rotations avec le polyvalent.

Pour la suite, il s'agit d'équiper un opérateur d'un système de capture vidéo Tobii® (fournit également par la société TEA), traçant le regard de l'opérateur (Illustration Figure 30). Ces vidéos vont être le support d'entretiens en auto-confrontation, dont l'objectif sera d'explicitier sur les situations retenues lors des entretiens exploratoires précédents. Les informations alors recueillies permettront de compléter le cahier des charges fonctionnel en réalisant des schémas

décisionnels. Ainsi, il sera possible d'établir des liens déterminants-activité vis-à-vis de situations rencontrées par les opérateurs.



*Figure 28 : Système EyeTracking Tobii®*

Ces enregistrements ont fait l'objet d'un appel à participation, diffusé auprès de l'ensemble des canalistes avec l'accord de la direction. Ainsi les opérateurs ont été sélectionnés sur la base du volontariat. L'enregistrement devait durer 2 heures minimum afin de s'assurer de prendre en considération un maximum d'opérations, notamment un grattage canal.

Enfin, comme expliqué précédemment, la priorité est à la production et non à l'étude. De plus, les vagues de canicule ont contraint les opérateurs à prendre davantage de pauses, ce qui n'a pas permis de dégager de temps pour réaliser tous les entretiens en auto confrontation souhaités. Cependant, l'analyse de l'activité et les entretiens exploratoires ont permis de repérer des pistes d'amélioration sur le court terme. Ces améliorations sont indépendantes du projet de télé opération mais sont le fruit de la participation des opérateurs.

## **4.2 Résultats des entretiens exploratoires**

### **4.2.1 Le choix du scénario**

Les entretiens ont débuté avec la question de la représentation de la télé opération. Les représentations qu'ont chacun des opérateurs sont assez divergentes. Certains ont une idée assez concrète du projet : « J'imagine qu'on va avoir une télécommande pour contrôler une machine », tandis que d'autres ont une vision plus pessimiste vis-à-vis de la solution : « On va devoir surveiller si la machine travaille bien à notre place ». Afin que chaque opérateur ait la même idée du projet, il a été présenté une vidéo montrant un opérateur commandant un bras articulé à partir d'un joystick. Ainsi, il a été possible de leur faire comprendre qu'ils seraient toujours les décideurs dans l'activité et non des superviseurs d'un automate.

Ensuite, les entretiens exploratoires ont été réalisés à l'aide d'une grille de questions ouvertes. Ces questions étaient centrées sur la prise d'informations des opérateurs et sur la technicité des gestes pour réaliser une opération. Le tableau 3 propose un extrait des questions qui ont été posées aux opérateurs.

**Exemple de questions relatives à la prise d'information**

- Graisser le coupe fonte      A quel moment savez-vous qu'il faut graisser le coupe fonte ?
- Décalage                              Comment savez-vous où taper pour décoller la fonte ?  
A quel moment décidez-vous de décaler ?
- Remettre du noir                      Quelle quantité de noir remettez-vous ?  
A quel moment remettez-vous du noir ?  
Comment savez-vous que le noir est abîmé ?

**Exemple de questions relatives à la technique**

- Ecrémage                              Comment vous servez-vous de la perche pour écrémer ?
- Grattage canal                        Y a-t-il une technique précise pour passer le karcher ?  
Comment remettez-vous du ciment réfractaire ?

Tableau 3 : Extrait de la grille de questions de l'entretien exploratoire

Les résultats de ces entretiens ont conforté l'idée que les opérateurs disposent d'un savoir-faire indispensable à la réalisation du travail. De plus, ils ont mis en évidence que la technicité de certaines opérations fait qu'elles ne pourront être réalisées par un système robotisé, même si celui-ci est contrôlé par un opérateur. Prenons pour exemple la dépose de ciment réfractaire : « *Le ciment, il faut le malaxer pour qu'il se réchauffe et qu'il devienne plus malléable. Quand je trouve qu'il est bien, j'en coupe un bout que je mets dans le canal pour boucher le trou. Là, il faut s'assurer de bien le lisser pour que la fonte coule bien après.* ». Le canaliste explique qu'il juge de la qualité du réfractaire par retour tactile. Un automate ne pourrait pas offrir une telle qualité de retour informatif.

De même, le décalage du basket a été défini comme une opération nécessitant de l'expérience. Comme le laisse entendre les verbatims suivants, il s'agit d'exercer une certaine force avec une certaine adresse : « C'est très physique, il faut taper fort », « Il faut taper intelligemment pour décaler », « Je regarde les anciens faire ». Le dernier verbatim fait notamment référence à une situation observée, où l'opérateur le plus expérimenté a décalé le basket à la place de l'opérateur intérimaire.

De plus, certaines opérations ont été remontées comme n'apportant pas de plus-value par les canalistes. Il s'agit des opérations suivantes :

- Réaliser le médaillon
- Prendre la température
- Remplir les pots à ferro
- Graisser le coupe fonte

En ce qui concerne le ferro, une réserve sur les deux nécessaires à une machine dispose d'un remplissage automatique. Celle qui doit être remplie par le canaliste lui demande près d'une minute, ce qui l'empêche de surveiller son canal pendant ce temps. Pour pallier cette contrainte, une entraide se met en place : « La plupart du temps je demande au collègue de surveiller pour moi en attendant ».

Enfin, les graisseurs du coupe fonte ne fonctionnent pas, à part sur les machines 2 et 6. Les salariés ont expliqué qu'ils ne sont jamais réparés. La question a été posée auprès du responsable de production et du contremaître, qui ont expliqué que les graisseurs ne sont pas suffisamment précis et qu'ils entraînent des rebuts en déposant de la graisse dans le tuyau. La dépose de la graisse serait mieux réalisée lorsque les canalistes le font eux-mêmes.

La mise en avant de la technicité de certaines opérations, ainsi que celle des opérations sans valeur ajoutée pour les opérateurs a permis de faire un choix dans les trois scénarios présentés en introduction. Pour rappel, voici les trois scénarios :

- **Scénario 1** : *Quelques tâches seraient éliminables avec le Cobot*
- **Scénario 2** : *Toutes les tâches seraient automatisables mais avec une fiabilité inférieure à 100%*
- **Scénario 3** : *Toutes les tâches seraient éliminables avec le Cobot*

Ainsi, le scénario 1 semble être le plus adéquat au vu des éléments exposés. La suite de l'intervention va donc permettre de définir les tâches à automatiser, celles qui seront télé opérées et celles pour lesquelles le canaliste devra toujours intervenir en définissant les conditions d'intervention.

#### 4.2.2 Orientation sur une action à court terme

Les observations ouvertes ont montré que les opérateurs utilisaient un pupitre de commande pour agir sur le canal. Lors des entretiens exploratoires, les canalistes ont détaillé les fonctionnalités que le pupitre leur permettait d'assurer. De plus, il est apparu que le canaliste PAM et le canaliste Blénod n'ont pas le même pupitre. Le pupitre côté Blénod permet de contrôler les deux canaux ainsi que le basket, tandis que le pupitre PAM ne permet de contrôler que le canal du même côté. Les fonctionnalités du pupitre sont les suivantes :

- Monter/Descendre le basket, ce qui correspond à son inclinaison pour verser ou non la fonte
- Retourner le canal, après avoir fait une action dessus qui nécessite de faire tomber des impuretés
- Amener le canal à quai ou le recentrer

Il a alors été évoqué lors des questions sur la prise d'informations que les pupitres sont orientés de sorte que les canalistes s'en servant se retrouve dos aux canaux. La photo ci-dessous (Photo 7) illustre le positionnement d'un canaliste. Or, les canalistes ont besoin d'avoir une vue sur la situation de travail afin de contrôler que l'action se réalise comme souhaitée. En effet, les entretiens ont mis en évidence ce manque de visibilité : « Des fois je suis obligé de m'y prendre à deux fois parce que je ne vois pas si le canal s'est bien nettoyé ». Le paragraphe 4.3 reprend le travail réalisé sur ce sujet.



*Photo 7 : Canaliste utilisant le pupitre de commande*

### **4.3 Action à court terme : Repositionnement du pupitre de commande**

Avant de pouvoir organiser les groupes de travail en vue d'étudier le repositionnement des pupitres, une réunion de suivi a été organisée avec le responsable de production et le personnel EHS du secteur. L'objet de cette réunion était la validation du lancement du groupe d'étude pour les pupitres, mais également de savoir s'il y avait une raison au positionnement actuel des pupitres. Cependant, aucune raison précise n'a pu être donnée.

Un groupe de travail a pu être mis rapidement en place. Cependant, étant donné les contraintes organisationnelles précisées plus tôt dans ce document, l'intervention a été structurées de la manière suivante :

- Dans un premier temps, des entretiens ont été réalisés avec les opérateurs un par un autour d'un schéma (Figure 31) au format A3 de la situation actuelle.
- A partir de ce schéma, une discussion était entamée afin de proposer des suggestions quant au futur placement du pupitre.
- Dans un dernier temps, je suis allé sur le plancher de coulée pendant la production et l'objectif était de voir en situation réelle si les pistes envisagées seraient adaptées aux situations de travail.

La contrainte la plus importante à prendre en compte était le manque de visibilité lors de l'action. Pour émettre les pistes d'amélioration, la question suivante était posée : « Y a-t-il un endroit d'où vous pouvez voir l'ensemble du canal et le basket ? ». A partir de là, une piste a été proposée à l'unanimité par les opérateurs.

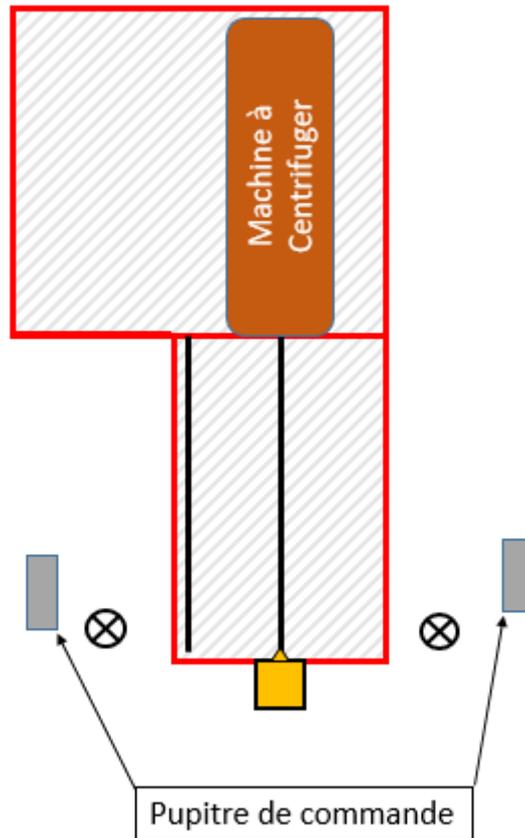


Figure 29 : Schéma de travail pour le groupe de travail pupitre de commande

En ce qui concerne le côté Blénod, la solution proposée consiste à placer le pupitre à même les barrières de protection. De ce fait, l'opérateur se situerait en surplomb du canal, lui permettant d'avoir une visibilité complète sur celui-ci. Concernant la vue sur le basket, les entretiens ont révélé que l'opérateur avait besoin de voir le niveau de fonte à l'intérieur. En effet, lorsque le pontier vient remplir le basket mais que sa poche est quasiment vide, il arrive que le basket ne soit pas rempli au maximum. Lorsque le machiniste enclenche la coulée, les paramètres sont réglés de sorte que la fonte se déverse instantanément. Or, si la fonte n'est pas à ras bord dans le basket, elle ne s'écoulera pas tout de suite et le tuyau risque de manquer de fonte. De plus, le machiniste n'a pas de vue sur le niveau de fonte, c'est donc au canaliste de lever le basket, jusqu'à ce que la fonte soit au bord. Une attention supplémentaire a été portée sur le fait que le pupitre doit être protégé des projections de fonte, notamment lors du remplissage du basket.

La solution co-construite avec les opérateurs est donc la suivante (Figure 32) :

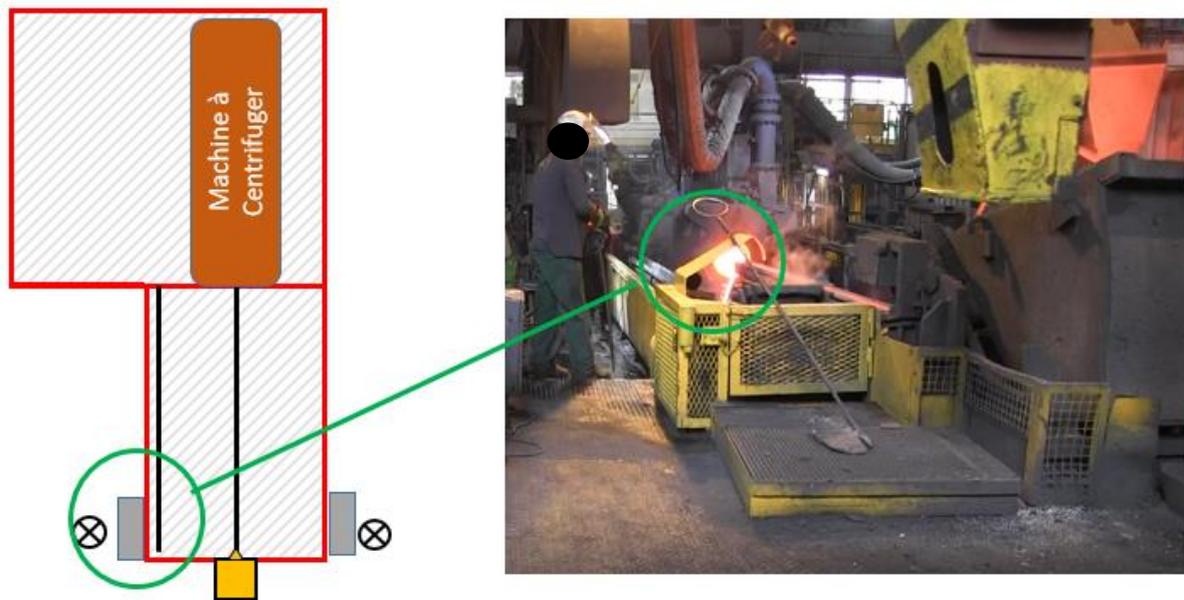


Figure 30 : Schéma de la solution retenue avec photo d'illustration.

Ce premier travail, bien qu'indépendant du projet de télé opération, a permis de fédérer les opérateurs au projet global, notamment grâce au sentiment d'être acteur du changement.

#### 4.4 La télé opération : Identifier la prise d'informations

Le scénario 1 ayant été privilégié, un modèle a pu être élaboré quant à la future situation envisagée (Figure 33). Ce modèle, inspiré du modèle proposé par Moullières-Seban (2017), reprend des éléments vus précédemment. Ainsi, l'opérateur devrait disposer des informations par l'intermédiaire de capteurs situés sur la zone de travail et agirait pour certaines opérations via le système de télé opération, et devrait intervenir pour d'autres opérations. De par son intervention directe sur la zone de travail il sera amené à prendre des informations autrement que par l'intermédiaire du système de télé opération.

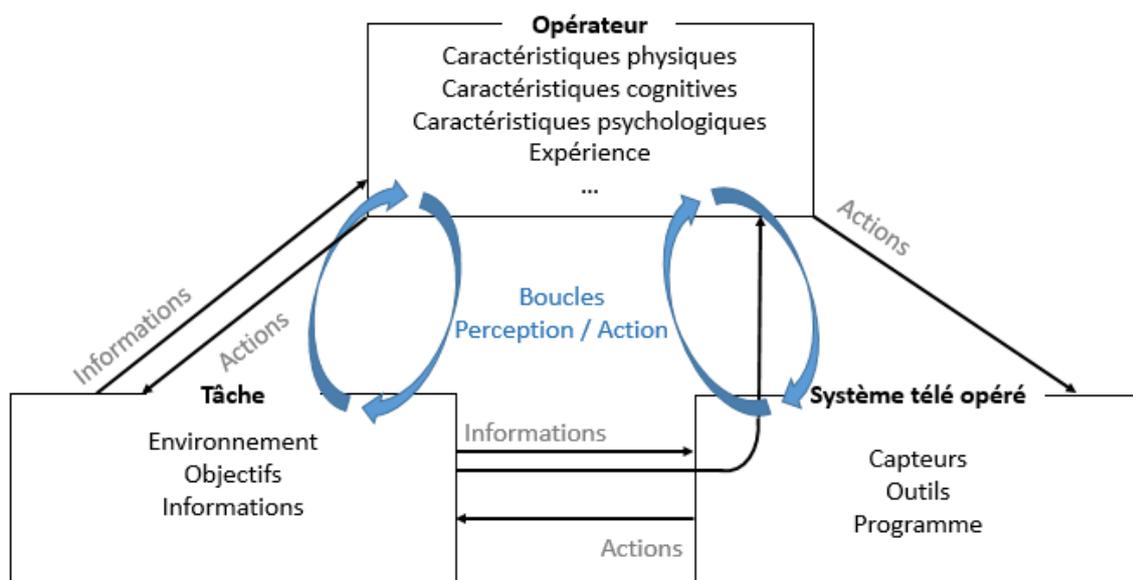


Figure 31 : Modèle de la situation envisagée

#### 4.4.1 Identifier les niveaux d'automatisation des futures opérations

Comme présenté lors de l'analyse de la demande, l'intervention ergonomique a pour but de ne pas tomber dans un modèle MABA MABA, mais bien de permettre aux opérateurs d'identifier les tâches qu'ils estiment pouvoir être télé opérées, celles qui peuvent être automatisables et enfin celles qui nécessiteront toujours leur intervention physique. De ce fait, de nouveaux entretiens ont été réalisés avec une grille recensant l'ensemble des tâches réalisées par les opérateurs (Tableau 4).

Opération	Degré d'automatisation			Informations
	Automatisable	Télé opérable	Intervention	
Grattage karcher				
Ecrémage				
Noir gamelle				
Casse baguette				
Coupe fonte				

Tableau 4 : Extrait de la grille d'entretien sur la télé opérabilité.

Bien entendu, tous les opérateurs n'avaient pas le même avis concernant chacune des opérations. Il a donc fallu mettre en débat certaines opérations pour savoir dans quelle catégorie la classer. De plus, les résultats ici présentés ne sont pas définitifs. En effet, cette grille d'entretien permet d'avoir une première approche de la représentation que se font les opérateurs de la future situation de travail. Ainsi, ils sont acteurs de la construction de la future solution. La suite de l'étude, notamment grâce aux simulations permettra de confirmer ou non, si une solution technique permet effectivement d'automatiser ou de télé opérer une action.

Les résultats des entretiens en Annexe 13 vont permettre par l'identification des opérations télé opérables d'orienter la suite de l'intervention. En effet, ces opérations vont être considérées comme des Situations d'Actions Caractéristiques (SAC), qui vont être le support des entretiens en auto confrontation.

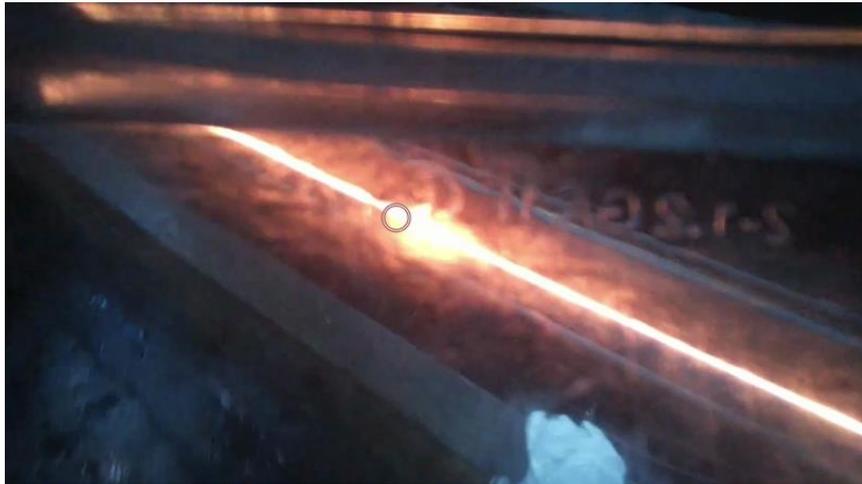
La liste des tâches automatisables reprend celles présentées auparavant. De plus, l'ingénieur, dans sa recherche de solutions techniques a trouvé un fournisseur proposant des automates réalisant les opérations de prise de médaillon et de température. L'automatisation de ces opérations va permettre de libérer du temps aux opérateurs afin de pouvoir se concentrer davantage sur les autres opérations.

#### 4.4.2 L'auto confrontation : formaliser les informations utiles au canaliste

L'auto confrontation permet au-delà des entretiens exploratoires de remettre en situation l'opérateur et de lui éviter de parler d'une généralité. Six-Touchard et Falzon (2013) expliquent que les opérateurs expérimentés « savent déployer une activité efficace, efficiente, pertinente mais n'ont pas conscience de leurs modes opératoires et des prises d'informations et de décisions qui les sous-tendent ». Le but visé par ces entretiens en auto confrontation est effectivement de formaliser ces prises d'informations et de décisions qui régissent les modes opératoires des canalistes. L'objectif à terme étant d'assurer l'accès aux informations depuis un espace de travail déporté.

Comme expliqué plus en amont, un seul entretien a pu être réalisé étant donné les contraintes liées au contexte d'intervention. A partir des vidéos enregistrées grâce au système Tobii®, une séquence de 2 minutes a été découpée, dans laquelle l'opérateur repère deux défauts sur le canal.

Le premier correspond à un point chaud sur le canal (Photo 8) et le second correspond à de la fonte restée collée dans le déversoir (Photo 9).



*Photo 8 : Le canaliste repère un point chaud sur la baguette de fonte*



*Photo 9 : Boulettes de fonte dans le déversoir*

L'entretien a permis de faire expliciter le canaliste sur la situation de travail présentée. Cependant, la situation étant singulière, elle ne permet pas de proposer tous les cas de figures que peuvent rencontrer les opérateurs. C'est pourquoi davantage d'entretiens en auto confrontation sont nécessaires pour couvrir un maximum de situations et ainsi créer un maximum de connaissances.

Dans le cas présent, deux schémas décisionnels ont été réalisés sur la base de l'entretien. La Figure 34 reprend le schéma traitant du point chaud dans le canal, en décrivant l'activité de l'opérateur en fonction des actions de la machine. Le second schéma (Figure 35) présente le traitement des boulettes de fonte dans le déversoir. Les schémas apportent des informations sur des opérations qui ont été identifiées télé opérables, à savoir le passage du gant et la dépose de noir dans le canal.

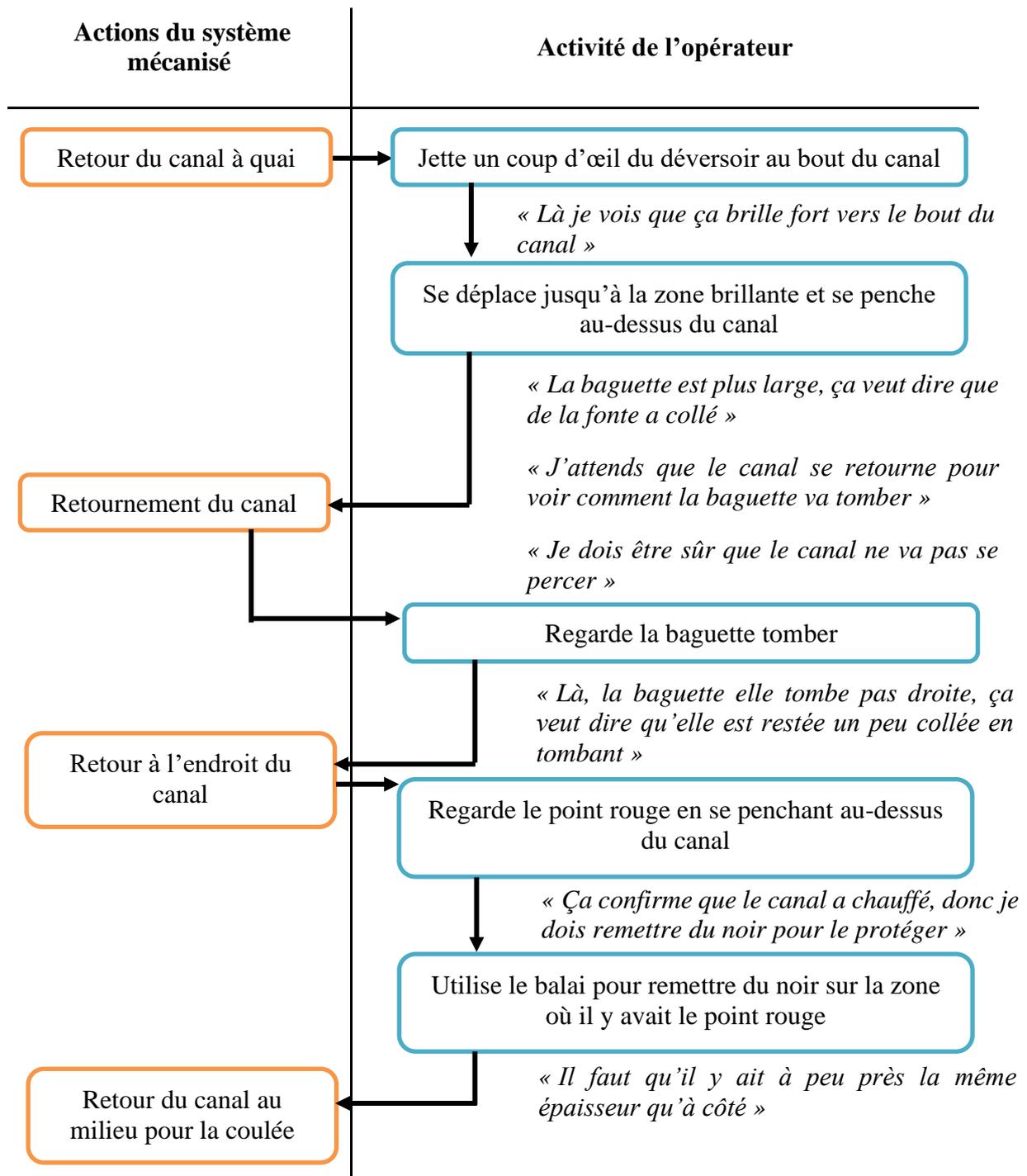


Figure 32 : Schéma décisionnel relatif à la situation explicitée

Le schéma met en avant la nécessité pour l'opérateur d'avoir une vue d'ensemble sur les éléments qu'il a à surveiller, mais aussi la possibilité d'avoir une vue rapprochée sur une zone précise afin de confirmer la détection d'un défaut. La solution future doit également lui permettre d'agir sur une zone déterminée, dans le cas présent, le canaliste a eu besoin de ne remettre du noir que sur une partie précise du canal.

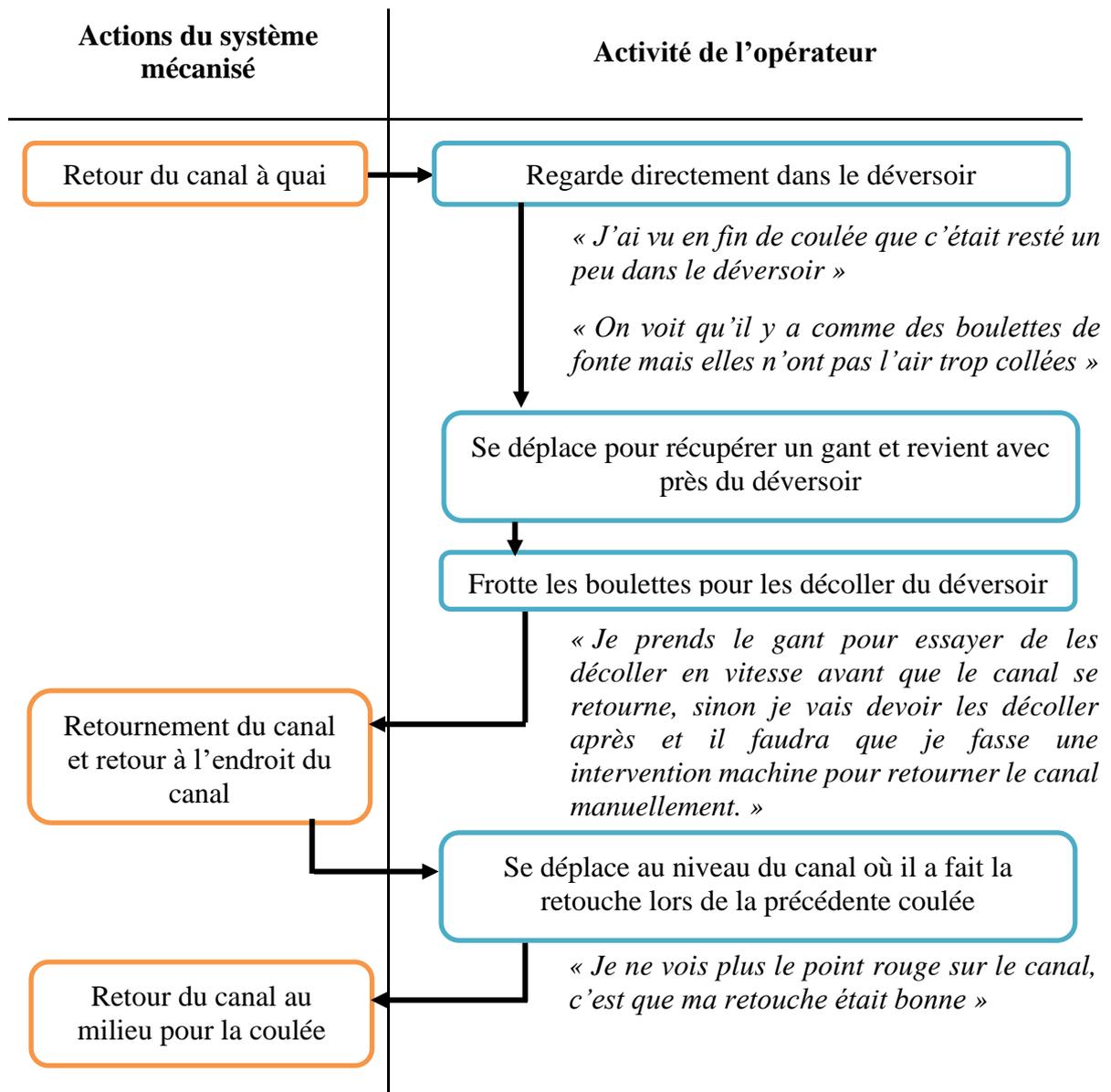


Figure 33 : Schéma décisionnel relatif au traitement des boulettes de fonte dans le déversoir

Le schéma met en avant la possibilité d'anticipation de l'opérateur en ayant une vue sur le déversoir alors qu'il est encore en coulée. De plus, le canaliste fait part d'une nécessité d'action rapide pour ne pas avoir à retourner manuellement le canal et risquer de ralentir la production. Cependant, cette action lui fait prendre un risque d'écrasement si jamais le canal se retournait au même moment. Enfin, l'opérateur a besoin de retourner vérifier si la retouche qu'il a faite a été suffisante.

#### 4.4.3 Transposition des informations visuelles

Selon Garrec et al (2010), la téléopération est « un ensemble de techniques qui permettent à l'homme de transposer ses capacités d'action (observation, manipulation) en temps réel à distance grâce à des retours sensoriels ». La solution doit donc permettre aux opérateurs d'avoir accès à suffisamment d'informations provenant de la zone de travail afin de pouvoir mettre en place ses modèles opératoires.

En ce qui concerne l'accès aux informations visuelles, les deux schémas précédents ont permis de montrer la diversité des plans de vue nécessaires aux opérateurs. Malheureusement, les

connaissances sur l'activité n'ont pu être davantage développées étant donné qu'un seul entretien en auto confrontation a été réalisé. Cependant celui-ci a montré toute sa pertinence par la qualité des informations obtenues sur la situation de travail. En extrapolant cette méthode à d'autres situations de travail rencontrées par le canaliste, il sera possible de compléter la liste des besoins liés à la recherche d'informations.

Dans un second temps, la question des caméras nécessaires à la capture des images de la situation de travail n'a pas été abordée, due au manque de connaissances. Cependant, Kofman et al (2005) insiste sur le bon choix de caméra et le bon placement de celles-ci. En effet, les images que renvoient les caméras, pour des questions de perspective et de qualité d'image peuvent induire en erreur l'opérateur, lui donnant une mauvaise visibilité de la situation de travail.

## 4.5 Pistes d'améliorations techniques et organisationnelles

### 4.5.1 Préconisations techniques

En parallèle de l'analyse de l'activité, l'ingénieur travaille sur la solution technique. Le dispositif final devrait prendre la forme d'un bras articulé au bout duquel différents outils permettraient de réaliser les différentes opérations. Ce bras serait disposé sur un rail permettant d'agir sur la longueur complète du canal (Figure 36). L'opérateur qui aura à charge de piloter ce bras articulé sera lui à l'écart de la zone, dans une cabine permettant de l'isoler de l'environnement. Cependant, les informations à l'heure actuelle ne permettent pas de définir si l'opérateur aura une vue sur la situation de travail directe en plus du système de caméras ou s'il sera aveugle d'un point de vue direct.

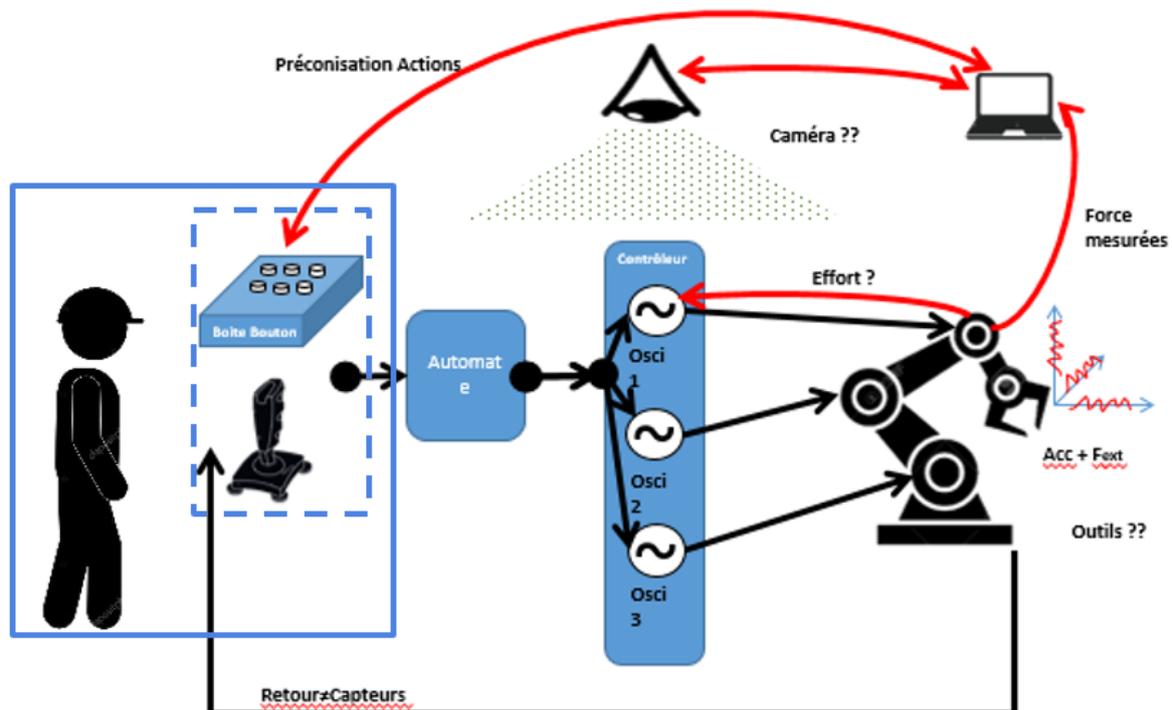


Figure 34 : Illustration schématique de la solution envisagée

Parmi les outils envisagés pour équiper le bras robotisé, un pistolet permettant de pulvériser du noir serait privilégié à la place de l'actuel dépose à l'aide d'une gamelle ou d'un balai. Cette

hypothèse a été l'occasion de se rendre dans une autre usine de la société, pour observer une situation de référence. Les canalistes de cette usine utilisent justement ce système de pulvérisation pour isoler thermiquement les canaux. Les entretiens sur site ont révélé que cette technique permettait de bien répartir le noir sans avoir à utiliser une soufflette supplémentaire. Cependant, il ne permet de projeter qu'une fine couche de noir ce qui ne serait pas suffisant sur les canaux de l'usine de Pont-à-Mousson qui ont un diamètre plus important que ceux utilisés dans l'autre usine, notamment lorsque le canal a commencé à chauffer. En revanche, si le débit pouvait être réglé, il pourrait être adapté aux différentes situations.

Un autre outil envisagé pour équiper le robot est un marteau piqueur. Ce dernier serait à tester et permettrait de décaler les baskets sans que l'opérateur n'ait à sortir de sa cabine de contrôle. Cette solution n'est encore qu'une hypothèse, car il faudrait que l'outil soit suffisamment précis pour ne pas abîmer le réfractaire du basket (matière à l'intérieur du basket protégeant son armature). Cependant, elle permettrait d'éliminer une des opérations considérées comme non mécanisables et que l'analyse de l'activité a révélée comme contraignante physiquement.

Enfin, concernant les opérations considérées sans plus-value pour les opérateurs, trois d'entre elles pourraient être en parti automatisées. En effet, le chargé de projet a découvert lors de son benchmarking une société américaine produisant des automates pour le milieu de la fonderie réalisant des opérations similaires à celles évoquées par les opérateurs. Pour exemple, la Photo 10 ci-dessous illustre l'automatisation de la prise de température. Toujours dans un soucis d'anticipation vis-à-vis de l'activité future, il sera nécessaire de s'assurer que les tâches résiduelles nécessitant l'intervention de l'opérateur ne soient pas perturbées par cet automate.



*Photo 10 : A gauche, bras automatisé Inductotherm ARMS® / A droite, canaliste en train de relevé la température*

#### 4.5.2 Préconisations organisationnelles

L'analyse de l'activité collective du plancher de coulée a mis en évidence que le canaliste PAM sert de relais dans les communications entre le machiniste et le pontier. Ainsi, lorsqu'il sera délocalisé de la zone de travail, un système de communication sera nécessaire assurer les interactions entre les deux opérateurs. De plus, ce système de communication devra également permettre aux canalistes d'interagir avec le pontier et le machiniste.

L'analyse de la demande a fait apparaître que les cadences varient d'une machine à une autre. La solution de téléopération se devra donc d'être testée sur l'ensemble des machines. En effet, si la solution est testée pour une machine à cadence lente, l'opérateur peut gérer la situation, mais si on place le même système sur une machine avec une cadence plus rapide, l'opérateur

devra certainement mettre en place d'autres stratégies pour réaliser la même tâche. De plus, la charge mentale risque d'être augmentée avec la cadence.

C'est pourquoi, la retranscription des informations doit être étudiée avec les opérateurs afin qu'ils aient accès à celles qui sont les plus pertinentes pour accomplir les différentes tâches. Ainsi, les dispositifs informatifs et les dispositifs d'action devront être organisés de manière à ne pas contraindre le travail de l'opérateur.

Enfin, les tâches qui ont été définies comme non mécanisables vont entraîner des déplacements de la part des canalistes afin qu'ils puissent intervenir sur la zone de travail. Le système télé opéré devra donc permettre à l'opérateur d'intervenir en toute sécurité (arrêt du robot) et ne devra pas le gêner dans la réalisation de son action. De plus, les opérations qui ont été identifiées comme non mécanisables ne surviennent que très rarement dans le poste, ce qui limitera le nombre d'interventions de l'opérateur.

#### **4.6 Méthodologie pour la poursuite du projet**

En accord avec la méthodologie de projet proposée au début du chapitre 4, il serait pertinent de réaliser de nouveaux entretiens en auto-confrontation afin de collecter davantage de connaissances sur la prise d'informations des opérateurs ainsi que sur la technicité des opérations. Cette dernière permet notamment à l'ingénieur d'explorer des pistes de solutions enrichissant les capacités du système télé opéré. La répartition des tâches entre les opérateurs et le système ayant été définie au travers des entretiens sur la télé opérabilité, il va s'agir dorénavant de simuler l'activité future.

La simulation permet de faire émerger une activité langagière commune aux opérateurs et au groupe projet. Cette activité permet aux deux parties de trouver des compromis quant à la situation future. De plus, elle permet aux opérateurs d'avoir une importance dans les décisions et de se familiariser avec la situation future, permettant ainsi de faciliter l'acceptation du changement (Jacobs et al, 2019).

La démarche participative orchestrée par l'ergonomie, au cours de cette intervention a placé les opérateurs au cœur de la conception. En effet, ils sont devenus acteurs du projet et non plus de simples destinataires du projet. L'intégration des opérateurs lors de la phase de simulation permet également de faire un état de leurs compétences et d'anticiper par rapport aux compétences futures, nécessaires pour la nouvelle situation de travail. Ainsi, le développement des compétences pourra être anticipé, permettant une maîtrise des futures situations avant même leur déploiement. Il s'agit donc d'une étape clé dans le développement des opérateurs (Barcellini, Van Belleghem & Daniellou, 2013).

En effet, l'activité développée aujourd'hui par les opérateurs est partagées entre l'activité mentale (aspect surveillance et prise de décision) et l'activité physique (actions sur les éléments du système de coulée). La situation future proposera une activité davantage mentale que physique. De plus, les opérateurs seront amenés à intervenir par l'intermédiaire d'un système télé opéré et non plus à même le canal ou le basket, ce qui changera leur perception de l'activité de travail. Ainsi, les compétences nécessaires pour piloter un robot à distance et celles nécessaires à intervenir dans la situation actuelle ne sont pas la même.

La simulation permet entre autre d'établir des scénarii d'action et de les évaluer. Cette évaluation se réalise (dans la cadre d'une étude sur la télé opération) sous la manière d'une analyse des interactions entre la tâche, le robot et l'opérateur. Elle va permettre d'identifier les

bons points du système, mais également ses lacunes afin de les optimiser avant de les tester de nouveau.

Dans le cadre du projet actuel, la simulation permettra d'identifier que l'opérateur a conscience des propriétés du robot : ses objectifs, ses capacités/limites, ses caractéristiques mécaniques, etc. Le robot, quant à lui, devra avoir en quelque sorte conscience des propriétés de l'homme, notamment en ce qui concerne la détection d'erreurs.

Il sera intéressant lors de la simulation de prototyper les moyens supposés mis à disposition de l'opérateur (écrans, joysticks, boîte à boutons...)

## DISCUSSIONS

L'intervention ergonomique a permis d'élargir le champ d'action de l'ingénieur. D'une entrée par la démonstration de la pénibilité physique du poste, l'analyse de l'activité a permis de mettre en avant l'existence de cette activité physique, certes, mais aussi d'une activité mentale et cognitive importante au travers des schémas décisionnels mis en œuvre par les opérateurs. En effet, l'entretien en auto confrontation a permis de formaliser des raisonnements de la part de l'opérateur, basés sur un savoir-faire certain.

Ces connaissances empiriques sur l'activité de l'opérateur, générées par ces entretiens (Theureau, 2002), permettent de définir des scénarii d'action caractéristiques. Ces derniers vont alors permettre à l'ingénieur, avec la participation des opérateurs d'anticiper les fonctionnalités de la future solution. Le rôle de l'ingénieur va alors être d'apporter ses connaissances techniques et technologiques qui vont pouvoir suppléer l'activité actuelle des opérateurs. Dans le cadre du projet de cobotique actuel, ces améliorations technologiques doivent être proposées par le concepteur en réponse aux différents schémas de raisonnement des opérateurs afin d'intégrer les scénarii de simulation.

En tant qu'ergonome, mon rôle aura été d'accompagner au changement des représentations que peuvent avoir les opérateurs de leur future situation de travail. La démarche appliquée dans le cadre de ce projet, en expliquant les enjeux pour les canalistes (santé actuelle et travail futur) dès le début du projet, a permis de faire évoluer la représentation initiale qu'ils pouvaient avoir de l'installation d'un système robotisé au poste. Par une posture neutre, il a été possible de faire prendre du recul aux opérateurs sur leur poste. Il s'agit d'un procédé de production ancien, qui n'a peu ou pas connu d'évolution. La représentation d'une solution aussi innovante que celle-ci a pu paraître impensable pour les anciens. La démarche ergonomique est un outil pour permettre la transition vers l'acceptation du changement.

Pour aller plus loin, la simulation de l'activité future va permettre de développer un langage commun aux deux parties pour faciliter l'acceptation du changement pour les opérateurs. De plus, cette démarche participative permet aux futurs utilisateurs de se familiariser avec la nouvelle technologie (Ozenne et al, 2018). La participation permet un apprentissage partagé (Kleinpeter, 2015) entre la technologie qui sera alors adaptée à l'activité de l'opérateur et l'opérateur lui-même qui pourra évoluer dans une situation confortable.

Ainsi, l'analyse de l'activité a donc permis de faire évoluer le projet à l'état de symbiose (Brangier, 2003). En effet, les connaissances sur l'activité vont permettre de faire évoluer la solution au cours de la simulation, ce qui va également permettre un développement de l'activité du concepteur (Barcellini et al, 2013), tandis que cette nouvelle solution va permettre aux opérateurs de développer de nouvelles compétences. En ce qui concerne ces nouvelles compétences, la simulation va permettre dans un premier temps d'identifier les besoins des opérateurs en terme de formation mais paradoxalement de les former en même temps.

La question de formation a pu également être mise en avant au cours de l'intervention. En effet, l'étude des différents documents en parallèle de l'analyse de l'activité a soulevé une grande part de sécurité gérée, ainsi qu'un savoir-faire transmis entre les anciens et les novices. Ces points doivent faire l'objet de formalisation et être intégré aux fiches de poste et de formation.

La mise en place d'un nouveau système permet de supprimer des déterminants qui étaient sources de contraintes pour l'activité de l'opérateur, mais peut aussi apporter d'autres contraintes qu'il va falloir anticiper (Moullières-Seban, 2017). En effet, du point de vue organisationnel, la maintenance, la révision, le réglage des bras télé opérés devra être prévue et

fera partie de l'activité du plancher de coulée. Comment faire en cas de panne d'un des systèmes ? La zone sera-t-elle toujours adaptée pour que l'opérateur puisse travailler sans la machine ? Ces questions devront être anticipées afin que l'organisation ne soit pas source de contraintes.

Malgré les complications liées aux différents calendriers sur le cours de l'année, cette intervention aura permis de faire ressortir de nombreux axes d'améliorations. Le manque de temps pour réaliser des entretiens d'auto confrontation n'aura pas permis de générer suffisamment de modèles de raisonnement sur le travail des opérateurs. Cependant, il aurait été intéressant de réaliser l'exercice sous forme d'entretien en allo confrontation par groupe de 2 ou 3 opérateurs, afin de pouvoir débattre des raisonnements et ainsi mutualiser l'expérience entre les anciens et les novices. Cependant, ce type d'entretien n'était pas évident à mettre en place étant donné la difficulté de sortir des opérateurs en même temps et pour une durée plus significative.

Enfin je dirais qu'il est frustrant de ne pas avoir atteint l'étape de simulation sur une première maquette, ce qui aurait pu permettre d'avoir des retours très intéressants et très riches. Etre acteur d'un projet qui est amené à devenir de plus en plus commun dans l'ère de l'industrie 4.0 aura été pour moi une riche opportunité, qui plus est, dans un milieu industriel proposant tant de savoir-faire.

## CONCLUSION

La demande d'intervention ergonomique dans le cadre de ce projet de développement basé sur le principe de la robotique collaborative a permis de mettre en évidence l'intérêt de l'analyse du travail réel. En effet, par l'analyse du travail, il a été possible de justifier le choix de la télé opération comme solution à l'amélioration du poste. L'activité physique et l'activité cognitive développées dans un environnement hostile à l'Homme ont été mis en avant lors de l'analyse de l'activité et de l'analyse de la demande.

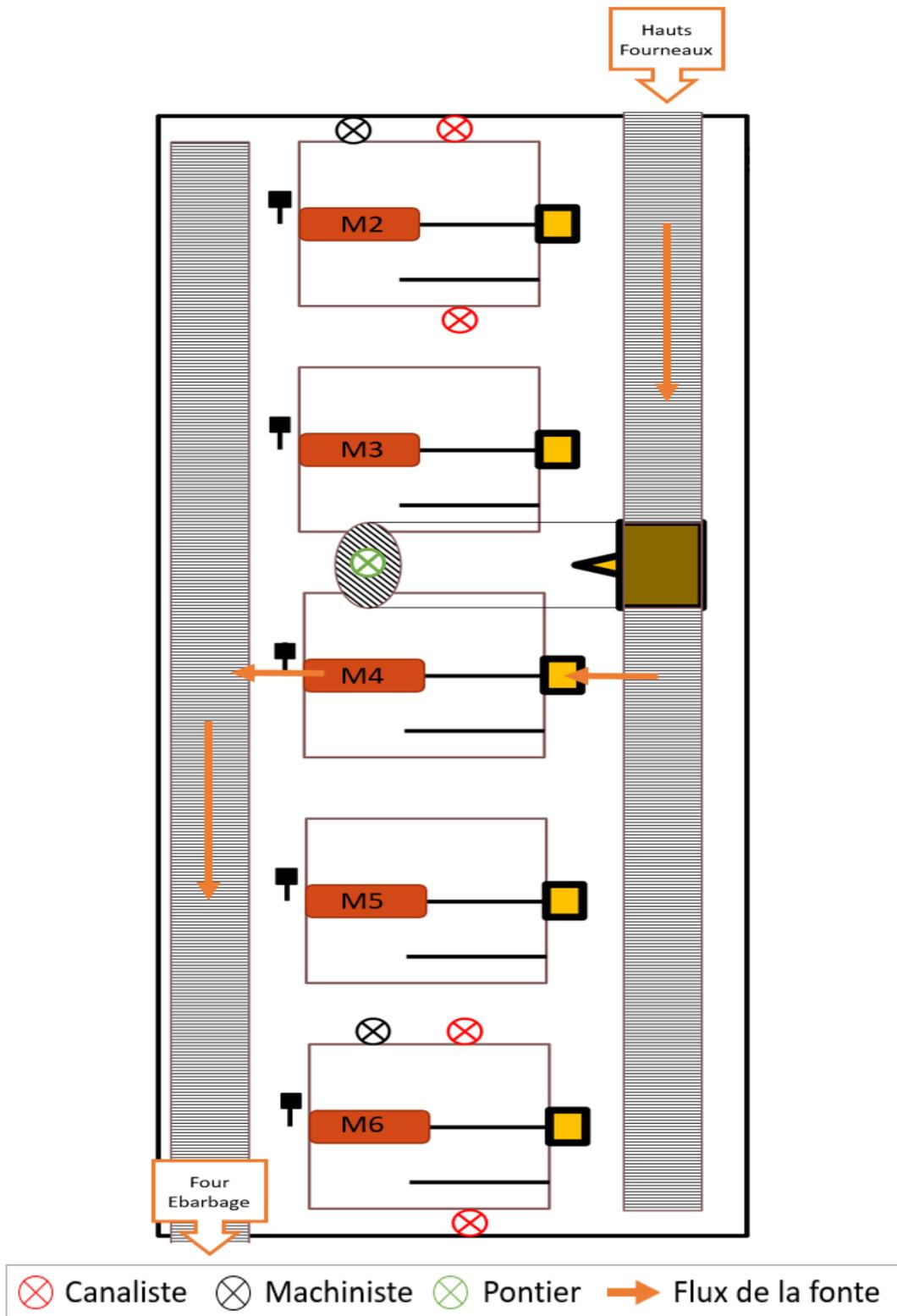
La mise en place d'une démarche participative, plaçant les opérateurs au cœur du projet a permis de faire évoluer les représentations relatives à l'insertion de la télé opération. En effet, de l'image du robot, la représentation de la télé opération a évolué vers une aide pour la réalisation de l'activité. Ainsi, l'intervention ergonomique aura permis de favoriser l'acceptabilité de la transformation du travail en attendant son acceptation.

## ANNEXES

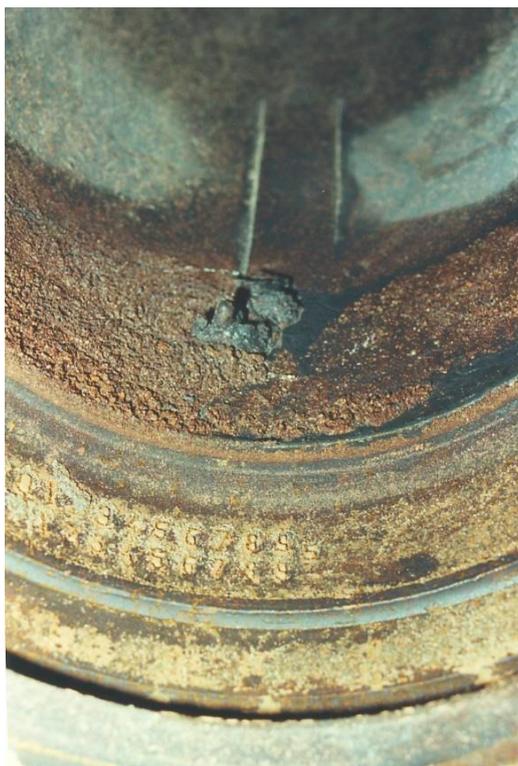
*Annexe 1 : Tableau récapitulatif des diamètres produits en fonction des machines de la ligne 6M*

<b>Machines</b>	<b>Diamètres de tuyaux produits</b>
Machine 2 (M2)	DN 350 – 400 – 450
Machine 3 (M3)	DN 150 - 200
Machine 4 (M4)	DN 150 - 200
Machine 5 (M5)	DN 250 – 300
Machine 6 (M6)	DN 500 - 600

Annexe 2 : Schéma du flux de la fonte sur le plancher de coulée



*Annexe 3 : Photo représentant un rebut pour « Crasse »*



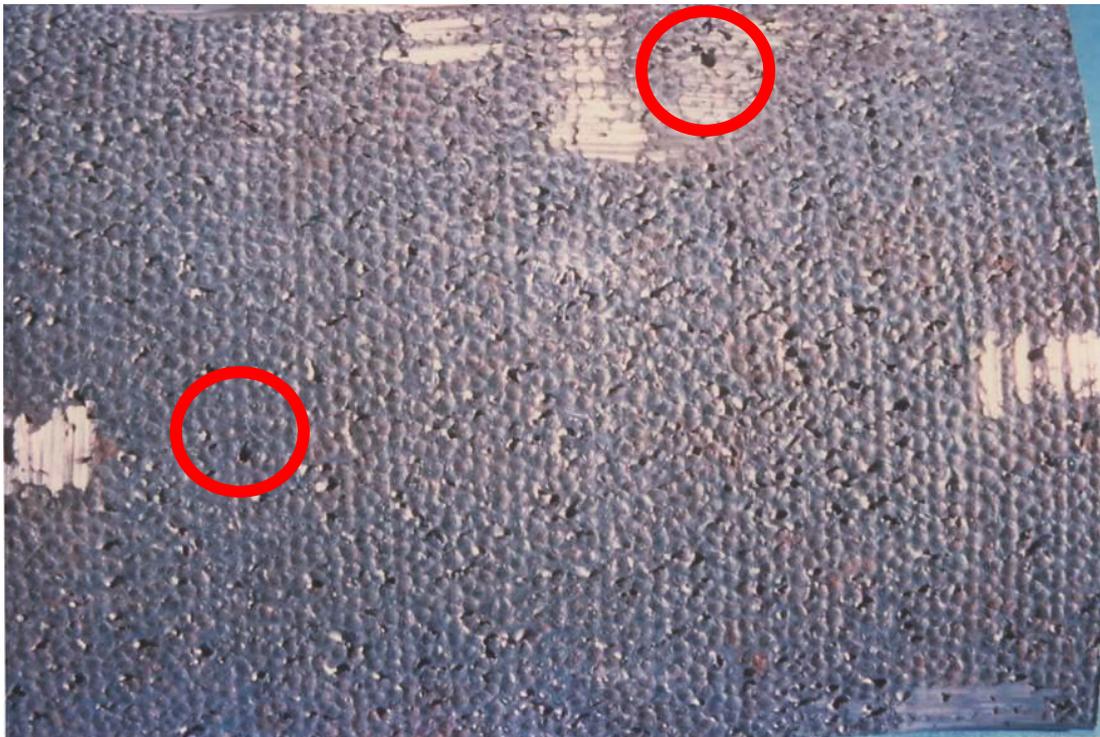
*Annexe 4 : Photo d'un rebut « Noir emboîtement »*



*Annexe 5 : Photo d'un rebut « Plaquage »*



*Annexe 6 : Photo d'un rebut « Piqûre »*



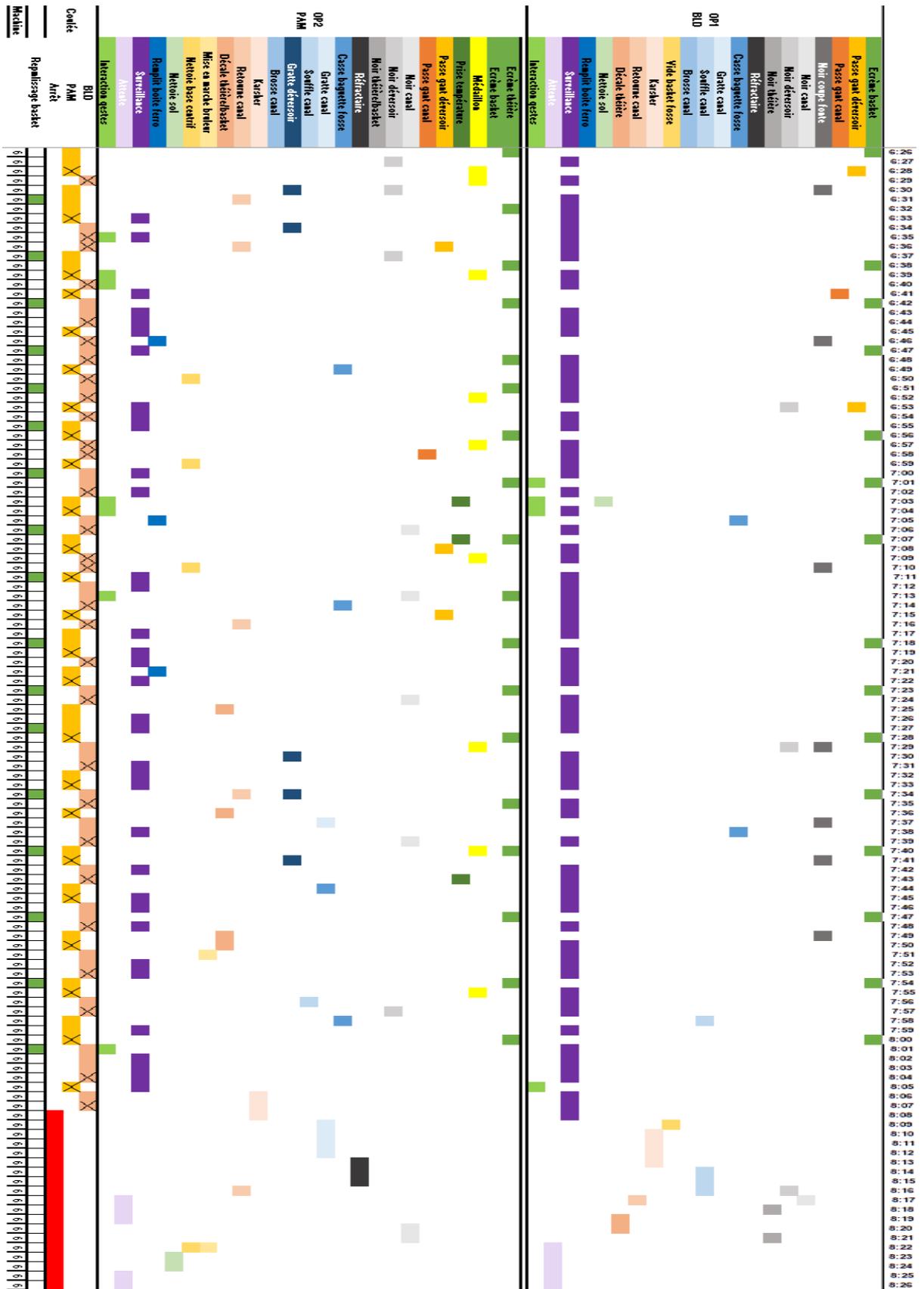
*Annexe 7 : Photo d'un rebut « Crique »*

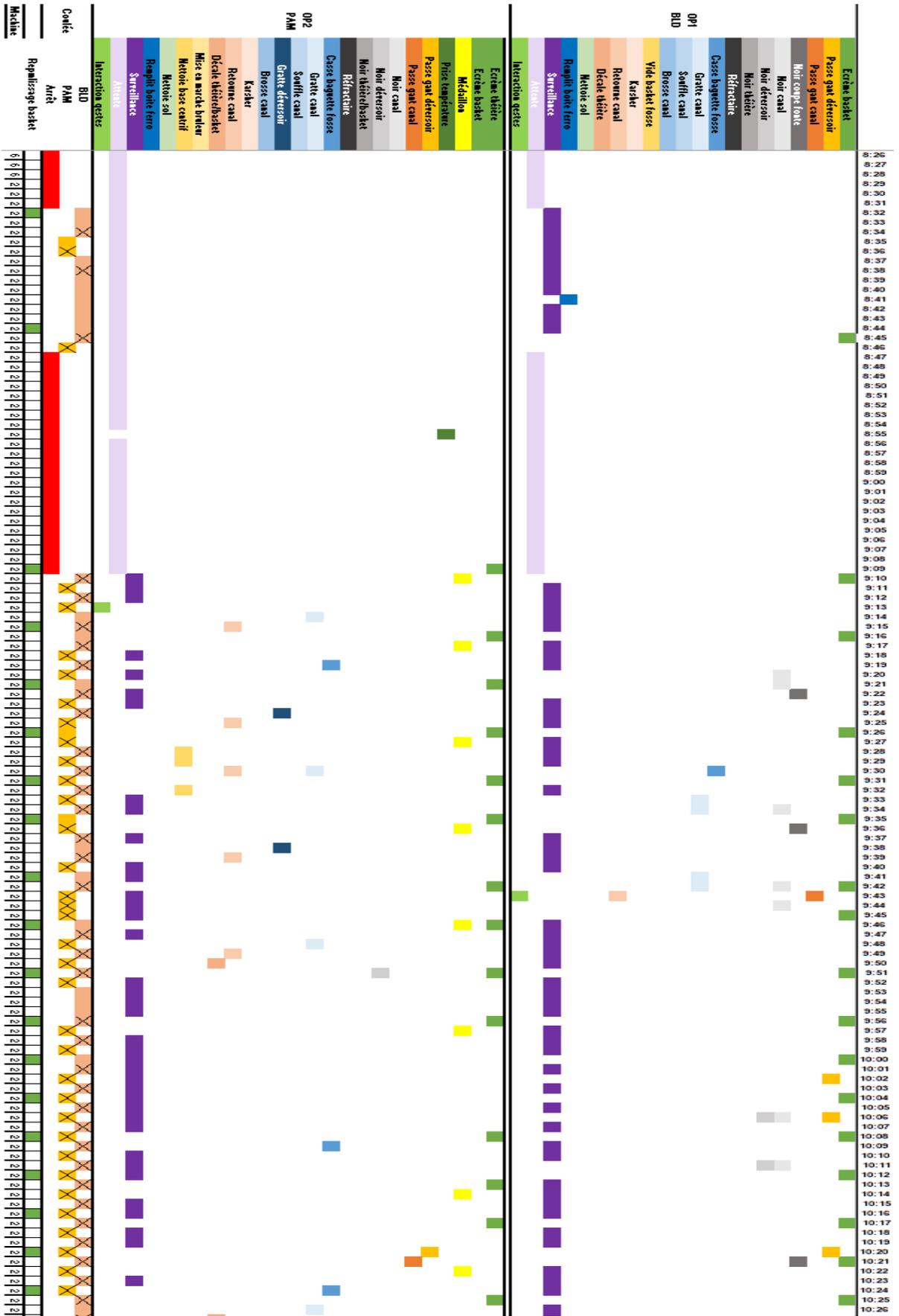


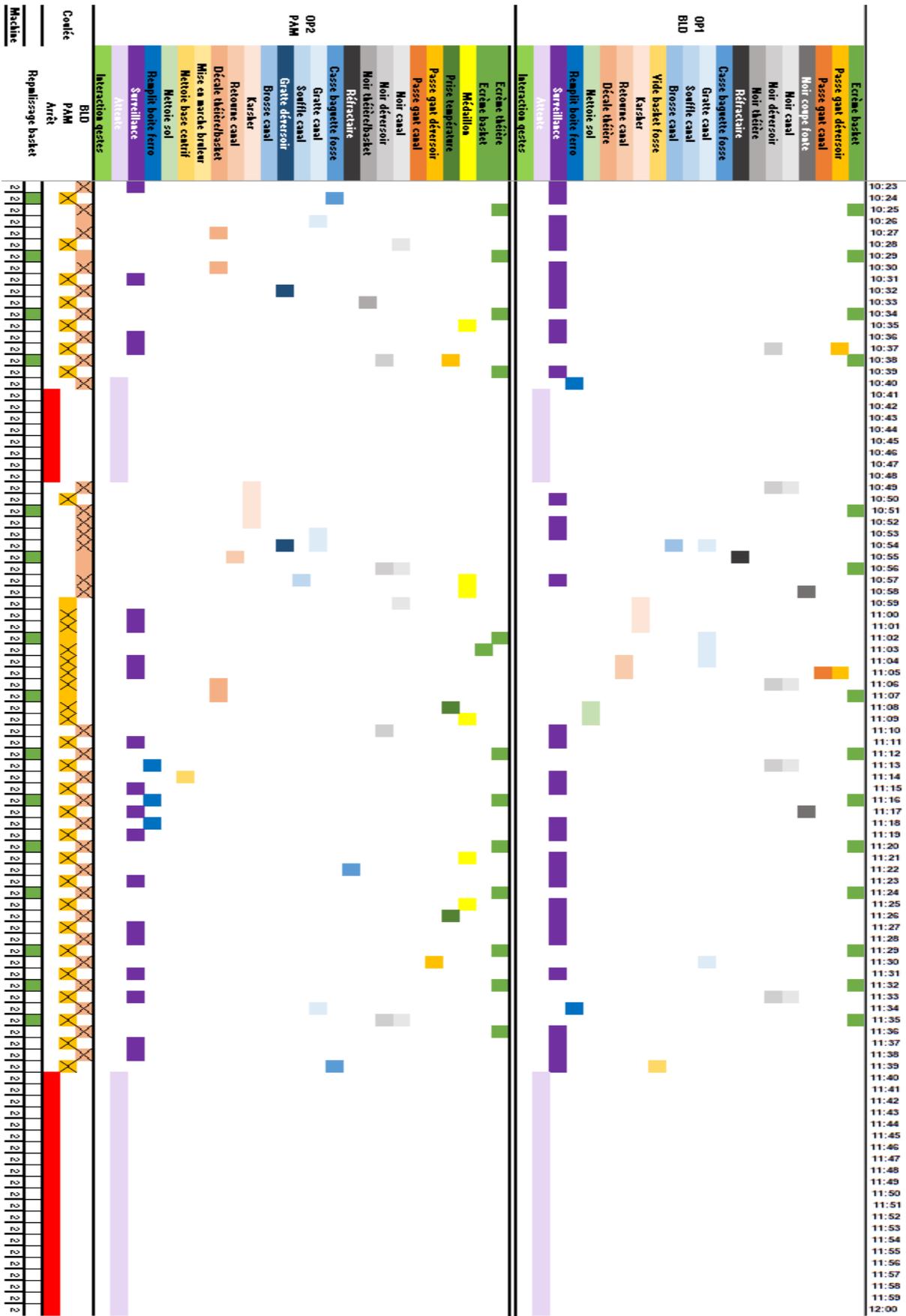
*Annexe 8 : Photo d'un rebut « Mince »*



### Annexe 9 : Chronogramme d'activité des canalistes







Annexe 10 : Fiche de Formation au poste de canaliste

	FORMATION AUX POSTES DE TRAVAIL	CENTRIFUGATION 6M SECTEUR COULEE	REF 10107/10110 Mise à jour : 28.03.2013
<b>FORMATION CANALISTE secteur 6 mètres</b>			
	INT : CDI :	FORMATEUR	INT CDI <b>24/10/2013</b>
date debut formation : .....		Durée prévisible de la formation : .....	
OBJECTIFS DU POSTE			
formation complétée par permis et habilitations nécessaires			
OPERATION N°1 Le formateur montre à l'opérateur le poste en effectuant les tâches de travail sans explications particulières.			
OPERATION N°2 Le formateur montre à l'opérateur le poste en effectuant les tâches de travail tout en expliquant les points importants :			
		<b>I FORMATION PRELIMINAIRE DE BASE</b>	<b>ANNEXES</b>
Formateur		1 Avoir suivi l'accueil EHS RH	
		2 Avoir suivi l'accueil sécurité du service	
		3 Prendre connaissance de la fiche de sécurité au poste de travail avec son formateur	
		4 Connaître et appliquer le contenu de la fiche de sécurité au poste de travail	
		5 Connaître et appliquer le contenu des FCE : Fiche Consigne Environnement	
		<b>II ACCES AU POSTE</b>	
		6 S'équiper des protections individuelles de sécurité aux vestiaires	
		7 Utiliser le seul chemin d'accès au poste de travail enseigné par le formateur	
		8 Connaître le chemin d'accès au point de rassemblement en cas d'alerte	
		9 Incendie : Bouton arrêt d'urgence / donner l'alarme / attaquer le foyer avec extincteurs	
		<b>III PRISE DE POSTE ET ETAT DES LIEUX</b>	
		10 En début de poste, s'informer des consignes auprès de son supérieur direct	
		11 Avec relève : S'informer de la marche auprès de son collègue relevé	
		12 s'assurer que toutes les matières 1ères, stock et matériel soient sur place (ou le correcteur fonte)	
		13 Informer sa hiérarchie de toutes les anomalies avant la prise de poste	
		<b>IV CONNAISSANCE DU POSTE</b>	
		15 Connaître l'organisation de la ligne et du secteur coulée	
		16 Connaître la marche des installations	
		17 Connaître la marche du chantier	
		18 Avoir reçu l'information sur les OPL / WCM relatives aux postes de travail	
		19 Avoir des notions de métallurgie	
		<b>V TACHES: FORMATION AUX TACHES DU POSTE, PRENDRE CONNAISSANCE DU MODE OPERATOIRE ET DE L'ANALYSE DES RISQUES</b>	
		20 Couler une baguette pour le nettoyage de la théière et le séchage du canal et vérifier que la baguette tombe lors du retournement canal	
		21 Appliquer un anticollant (protex 20001) sur le coupe fonte	
		22 Gratter et noircir le canal et le dévervoir	
		23 Nettoyer le bec de versement basket (fonte apparente, bec de couleur rouge)	
		24 Contrôler la théière afin d'éliminer les remontées de crasses	
		25 Décasser le basket après chaque remplissage	
		<b>VI FIN DE POSTE</b>	
		29 Ranger le poste de façon propre et ordonnée	
		30 Avec relève : Toujours se faire emplacer avant de quitter son poste en transmettant les consignes	
		31 Sans relève : Vidange du basket et si pas de nettoyeur, tirer la fonte du basket	
	VALIDATION DE L'OPERATION N°2	OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/>	DATE DE VALIDATION : .....
OPERATION N°3 L'opérateur effectue les tâches en veillant à appliquer les points importants acquis précédemment. Le formateur regarde et intervient quand une mauvaise opération est effectuée.			
OPERATION N°4 L'opérateur manipule et explique au formateur les différents points importants. Le formateur regarde et écoute les explications.			
	VALIDATION DE L'OPERATION N°3 ET N°4	OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/>	Signature de l'opérateur:
	DATE DE VALIDATION	...../...../.....	Signature du formateur:
VALIDATION PAR LE CONTREMAITRE, Signature :		Direction, représentée par : Signature :	
M...../...../..... Le .....		M...../...../..... Le .....	



<b>ECHEMAGE</b> Ecrêter la fonte	Brûlure par rayonnement de fonte et projection Coups, chocs, heurts	<b>POINTEUX EN MANICHÈTES AULUSIENNES</b> - S'assurer de l'absence d'humidité sur les outils (craquelure...), avant chaque opération - Utiliser des outils adaptés, conformes et en bon état
<b>ECHANTILLONNAGE</b> Réaliser l'échantillon avec un marteau et une pince	Coups, chocs, heurts Brûlure Coups, chocs, heurts Corps Etranglers dans les yeux	<b>UTILISER DES Outils adaptés, conformes et en bon état</b> - Porter des GANTS ANTI CHOC/ANTI - Porter des LUNETTES ETANCHES -> TGVAN ou MESSUE ETANCHE
<b>VIDANGE DU BASKET</b> Manipuler les étagères du palanostier	Coups, chocs, heurts, coincements Brûlure Coups, chocs, heurts	- Se signaler au travail de couleur et s'assurer d'être vu <b>Porter des GANTS DE MANUTENTION</b> - Respecter le mode opératoire Utilisation Palanostier Vidange Basket
Garder le portier pendant les phases de maintenance du basket	Brûlure Coups, chocs, heurts	- Se signaler au porteur de fonte et s'assurer d'être vu - Respecter le mode opératoire Utilisation Palanostier Vidange Basket
<b>PRISE DE TEMPERATURE</b> Prendre la température avec la perche et un embout	Chute de platin-pied Brûlure, projection de fonte Coups, chocs, heurts	- Ranger la perche à son emplacement dédié - Utiliser des thermocouples secs - Veiller à l'absence de personnes au bord lors de l'utilisation de la perche
<b>UTILISATION DE BRULEURS</b> Alimentation des brûleurs	Brûlure	<b>Porter des GANTS ANTI CHOC/ANTI</b>
<b>RECHARGE DES CUVES DE FERRO</b> Utiliser un palan	Ecrasements liés à la chute de la charge Chocs/heurts/collisions avec le personnel environnant	- Utiliser du matériel adapté, conforme et en bon état - Faire manœuvrer le palan par une personne habilitée (ANUSPPI) - Respecter les consignes acquises lors de la formation ANUSPPI - Respecter les règles de manutention et d'élagage - Manœuvrer uniquement en l'absence d'intervenants à l'aplomb ou dans la trajectoire de la charge - Ne pas stationner sous la charge, à l'écart de la charge et ne pas rester dans sa trajectoire
<b>RECHARGE DES POTS A GRAISSE</b> Mettre/bonner le couvercle du pot à graisse	Coups, chocs, heurts	- Respecter le MODE OPERATOIRE Contrôle et remplissage pot à graisse
<b>DEGRASSAGE DE LA DOUCINE</b> Utiliser le coupeur fonte	Coups, chocs Corps Etrangers dans les yeux	- Veiller à l'absence de personnes au bord lors de l'utilisation du Coupe fonte - Utiliser des outils adaptés, conformes et en bon état
<b>AIDE LORS DE PAGAILLE AU FOUR</b> Aider à l'évacuation des tuyaux à l'aide d'une grande pince ou d'une barre	Douleurs dorsales, aux bras et aux épaules Frottements/écrasements/chocs	<b>Porter des LUNETTES ETANCHES -&gt; TGVAN ou MESSUE ETANCHE</b> - Respecter les règles du guide des bonnes pratiques "Gestes et Postures" - Utiliser des outils adaptés, conformes et en bon état - Respecter la procédure de demande d'intervention - Utiliser des outils adaptés, conformes et en bon état - Respecter les consignes du chef de manœuvre
<b>TACHES DIVERSES</b> Nettoyer son chantier avec un jet d'eau	Chute de platin-pied	<b>Porter des GANTS DE MANUTENTION</b> - Garder les locaux propres (net), ranger les outils à leur emplacement, ne pas encombrer les passages et appliquer DRP (DRE+Planogramme+Progrés) - Assurer ses appuis

Annexe 12 : Tableaux récapitulatifs des Valeurs Seuils pour chacune des articulations analysées.

	Nuque			
Angle (°)	Rotation	Flexion	Extension	Flexion latérale
Zone orange	+/-15	15	-10	+/-10
Zone rouge	+/- 30	30	-20	+/-20

[Tableau 1 : Seuils articulaires de la nuque](#)

	Dos			
Angle (°)	Rotation	Flexion	Extension	Flexion latérale
Zone orange	+/-15	30	-10	+/-10
Zone rouge	+/- 30	45	-20	+/-20

[Tableau 2 : Seuils articulaires du dos](#)

	Coudes		
Angle (°)	Rotation externe	Rotation interne	Flexion
Zone orange	20	-40	70
Zone rouge	45	-60	100

[Tableau 3 : Seuils articulaires des coudes](#)

	Épaules				
Angle (°)	Rotation horizontale inter	Rotation horizontale externe	Rotation verticale	Rotation interne	Rotation externe
Zone orange	-70	10	60	-40	20
Zone rouge	-90	30	90	-60	45

[Tableau 4 : Seuils articulaires des épaules](#)

	Poignets			
Angle (°)	Flexion	Extension	Abduction	Adduction
Zone orange	30	-10	10	-10
Zone rouge	45	-30	20	-20

[Tableau 5 : Seuils articulaires des poignets](#)

Annexe 13 : Tableau des résultats sur la télé opérabilité des opérations

Localisation	Nom de la tâche	Télé opérabilité		
		Automatisable	Télé opérable	Opérateur
Déversoir / Canal	Grattage karcher		X	
	Grattage brosse		X	
	Noir gamelle		X	
	Noir balais		X	
	Lissage noir		X	
	Gant		X	
	Mettre du ciment (réfractaire)			X
Basket	Ecrémage		X	
	Médailon	X		
	Prise de température	X		
	Noir		X	
	Décalage		X	X
	Faire retirer			X
Tâches ponctuelles	Retourne le canal		X	
	Remplit les boites à ferro	X		
	Casse baguette fosse		X	
	Casse fonte agglomérée à la machine			X
	Passe noir au coupe fonte	X		

## BIBLIOGRAPHIE

“Téléopération : séparer le risque de l’opérateur”, Travail & Sécurité, n°791, Février 2018

“Dangers, expositions et risques relatifs à la silice cristalline”, Rapport d’expertise collective de l’ANSES, Avril 2019.

Barcellini, F., Van Belleghem, L., & Daniellou, F. (2013). Les projets de conception comme opportunité de développement des activités. *Ergonomie constructive*, 191-206.

Bitonneau, D. (2018). *Conception de systèmes cobotiques industriels : approche robotique avec prise en compte des facteurs humains : application à l'industrie manufacturière au sein de Safran et Ariane Group* (Doctoral dissertation, Bordeaux).

Bobillier-Chaumon, M. E., & Dubois, M. (2009). L'adoption des technologies en situation professionnelle : quelles articulations possibles entre acceptabilité et acceptation ? *Le travail humain*, 72(4), 355-382.

Brangier, E., Hammes-Adelé, S., & Bastien, J. M. (2010). Analyse critique des approches de l’acceptation des technologies : de l’utilisabilité à la symbiose humain-technologie-organisation. *Revue européenne de psychologie appliquée/European Review of Applied Psychology*, 60(2), 129-146.

Davis, F. (1986), A technology acceptance model for empirically testing new end-user information systems: theory and results, *Doctoral dissertation, MIT Sloan School of Management, Cambridge, MA*

Dekker, S. W., & Woods, D. D. (2002). MABA-MABA or abracadabra? Progress on human–automation co-ordination. *Cognition, Technology & Work*, 4(4), 240-244.

Garrec, P., Measson, Y., Gelin, R., Friconneau, J. P., Desbats, P., & Riwan, A. (2010). Téléopération : les applications en zone contrôlée. *Techniques de l'ingénieur*, S7812 1-S7812 15.

Helms, E., Schraft, R. D., & Hagele, M. (2002, September). rob@ work: Robot assistant in industrial environments. In *Proceedings. 11th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication* (pp. 399-404). IEEE.

Humbert, P. (2010). Pilotage de la conception d'outils numériques. *Les cahiers du numérique*, 6(4), 49-75.

Jacobs, J. V., Hettinger, L. J., Huang, Y. H., Jeffries, S., Lesch, M. F., Simmons, L. A., ... & Willetts, J. L. (2019). Employee acceptance of wearable technology in the workplace. *Applied Ergonomics*, 78, 148-156.

Kleinpeter, É. (2015). Le Cobot, la coopération entre l'utilisateur et la machine. *Multitudes*, (1), 70-75.

Kofman, J., Wu, X., Luu, T. J., & Verma, S. (2005). Teleoperation of a robot manipulator using a vision-based human-robot interface. *IEEE transactions on industrial electronics*, 52(5), 1206-1219.

Moulières-Seban, T., Bitonneau, D., Thibault, J. F., Salotti, J., & Claverie, B. (2016). La Cobotique : un domaine pluridisciplinaire émergent utile à l'ergonome. *Congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française*.

Moulières-Seban, T. (2017). *Conception de systèmes cobotiques industriels. Approche cognitive Application à la production pyrotechnique au sein d'Ariane Group* (Doctoral dissertation).

Nascimento, A., Cuvelier, L., Mollo, V., Dicioccio, A., & Falzon, P. (2013). Construire la sécurité : du normatif à l'adaptatif. *Ergonomie constructive*, 103-116.

Ozenne, R., Terriot, K., Spirito, V., Laeuffer, C., Lhotellier, L., & Bernaud, J. L. (2018). Intention d'usage des nouvelles technologies dans le conseil en orientation : perceptions des professionnels et des bénéficiaires. *Le travail humain*, 81(2), 115-141.

Rogalski, J. (1994). Formation aux activités collectives. *Le travail humain*, 367-386.

Six-Touchard, B., & Falzon, P. (2013). L'auto-analyse du travail : une ressource pour le développement des compétences. *Ergonomie constructive*, 223-23.

Theureau, J. (2002). L'entretien d'autoconfrontation comme composante d'un programme de recherche empirique et technologique. D. *Lehénaff & C. Mathieu, Expertise et sport de haut niveau, Actes des II èmes Journées Internationales des Sciences du Sport.*