



HAL
open science

Étude d'un système robotique coopératif en milieu sidérurgique sévère

Baptiste Menges

► **To cite this version:**

Baptiste Menges. Étude d'un système robotique coopératif en milieu sidérurgique sévère. Informatique [cs]. Université de Lorraine, 2021. Français. NNT : 2021LORR0261 . tel-03598213

HAL Id: tel-03598213

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03598213v1>

Submitted on 4 Mar 2022

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

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



AVERTISSEMENT

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

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

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

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

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

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

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

Ecole doctorale IAEM

THESE

présentée et soutenue publiquement le Jeudi 02 décembre 2021

Doctorat de l'Université de Lorraine

Spécialité : Robotique / informatique

par

Baptiste Menges

Etude d'un système robotique coopératif en milieu sidérurgique sévère

Composition du jury

Président : *Benoit Iung*

M.	E. Monacelli	<i>Professeur, Université de Versailles Saint-Quentin UVSQ</i>	Rapporteur
M.	S.Haliyo	<i>Maitre de conférences HDR, Sorbonne Université</i>	Rapporteur
Mme	Y. Delevoye	<i>Professeure, SCALab Lille</i>	Examinatrice
M.	B. Iung	<i>Professeur Université Lorraine-CRAN</i>	Président
M.	S. Manitsaris	<i>Enseignant chercheur HDR- Mines ParisTech</i>	Examineur
Mme.	P. Maurice	<i>Chargée de recherche CNRS, LORIA</i>	Examinatrice
M.	P. Henaff	<i>Professeur, Université de Lorraine</i>	Directeur
M.	J-S. David	<i>Directeur Usine Foug, Saint-Gobain PAM</i>	Invité
M.	M. Sarrey	<i>Chercheur, INRS Nancy</i>	Invité

Résumé :

Etude d'un système robotique coopératif en milieu sidérurgique sévère

Le travail proposé dans le cadre de cette thèse s'inscrit dans l'amélioration de la qualité de production et des conditions de travail des sites sidérurgiques de Saint-Gobain PAM. Il a été proposé d'étudier et de développer un système robotique collaboratif capable d'assister un opérateur dans des tâches répétitives, pénibles et parfois dangereuse dans un environnement extrême de chaleur et de poussières. Récemment passé CMR, les poussières de silice cristallines représentent la plus grande problématique nécessitant d'étudier des solutions alternatives aux méthodes de production actuelles. Le travail de l'opérateur consiste à surveiller, nettoyer, revêtir, maintenir un organe de coulée de fonte d'une machine à centrifuger servant à la production de tuyau en fonte ductile. De nombreux mouvements réalisés par l'opérateur sont caractérisés comme rythmique et forme un cycle limite fermé dont on observe un comportement identique chez les oscillateurs dynamiques.

L'objectif de cette thèse est d'étudier une solution alternative permettant de réduire l'exposition de l'opérateur. Le choix technologique c'est porté sur la téléopération d'un système robotique afin de reproduire les tâches à distance hors des zones d'expositions via un dispositif maître de commande. Le contrôle du système robotique permettant de réaliser ces tâches rythmiques sera effectué par différents modèles d'oscillateur dynamiques commandées par 3 différents moyens de téléopération (ThrustMaster, Falcon, geomagic). Différentes expériences nous permettrons d'étudier deux modèles d'oscillateurs dynamiques, le modèle de Hopf et le modèle Rowat-Selverston.

Les résultats de ces expériences montrent que l'utilisation d'un oscillateur permet de synchroniser les signaux de commandes des différents dispositifs avec celui de contrôle du robot pour réaliser une tâche de brossage. L'ajout d'une règle Hebbien dans les lois de contrôle permet l'apprentissage et la modification des paramètres de fréquence des oscillateurs en fonction de celles reçu par les dispositifs maîtres. Le résultat de ces expériences montre que l'intégration d'un oscillateur permet de réduire les puissances consommées par le robot lorsque les dispositifs maîtres sont de faibles qualité.

Mots clefs : **Robotique collaborative ; Téléopération ; Oscillateur dynamique ;**

Remerciements :

Je tiens tout d'abord à remercier l'ensemble des membres du jury pour m'avoir permis de soutenir ma thèse. Aux rapporteurs, Eric Monacelli et Sinan Haliyo pour leurs critiques constructives sur mes travaux, et également à Yvonne Delevoye, Benoit Iung, Sotiris Manitsaris et Pauline Maurice pour l'ensemble des pistes de réflexions qu'ils ont pu m'ouvrir.

Un grand merci à l'un des acteurs principaux de cette thèse, Patrick Henaff, sans qui je ne serai pas là à écrire mes remerciements. Tu as su me motiver et m'entraîner là où je ne voulais, à première vue ne pas aller. Tu m'as beaucoup appris sur le monde de la recherche, domaine qui m'était totalement inconnu, moi venant de l'industrie lourde. Je sors énormément grandi de notre collaboration et j'espère que nos chemins se recroiseront.

Je remercie également l'équipe Neurosys ou Neurorhythms et spécifiquement Laurent Bougrain pour m'avoir accueilli de la meilleure des façons au LORIA. Nous avons très peu de choses en commun dans nos sujets, j'étais un petit peu l'élément à part, mais vous avez su m'ouvrir votre porte pour que je m'intègre à vous.

Je remercie par la même occasion Adrien Guenard, qui par sa disponibilité et son engagement m'a grandement aidé dans la préparation de mes expériences et m'aura appris énormément de chose du monde de la robotique.

Je remercie l'ensemble de la grande famille de Saint-Gobain PAM avec qui j'ai pu interagir de près ou de loin sur cette thèse. Spécifiquement Christophe Regnault pour avoir initié cette thèse, mes nombreux encadrants industriels, Michaël Sarrey, Martial Molter et Jean-Sébastien David, qui m'auront accompagné, guidé, instruit sur la merveilleuse histoire et le savoir-faire de Saint-Gobain PAM.

L'ensemble des acteurs des usines de Pont-à-Mousson et de Foug pour mes différentes sollicitations. Egalement l'équipe Centrif/Métal, Ludovic, Pascal, Christian, Joël, Patrick, François, Rémi, Nicolas, Morgan, Marc et Michael qui ont su m'accueillir dans ma deuxième partie de thèse. Merci pour vos accompagnements, votre aide dans mes expériences et pour votre culture transmise au quotidien.

Mes pensées vont ensuite à mon entourage, famille, belle famille et amis qui de près comme de loin m'accompagne, me conseille ou me surveille d'où ils sont. Merci ou désolé de devoir me supporter au quotidien, mais je voudrais simplement vous dire qu'aujourd'hui je suis devenu cette personne grâce à vous.

*Que tu sois loin derrière, loin devant ou à mes côtés,
l'essentiel est que l'on ait partagé le même train*

Sommaire

Sommaire	6
1 Introduction générale	14
1.1 Silices cristallines.....	15
1.2 Difficultés de recrutement des opérateurs / perte métier	16
1.3 Opportunités industrielles	16
1.3.1 Compétitivité française	17
1.3.2 Industrie 4.0	17
1.4 Conclusion	18
2 Gestes Métier	20
2.1 Processus de production SG-PAM.....	21
2.1.1 Elaboration de la fonte	21
2.1.2 Centrifugation	21
2.1.3 Finitions / revêtements	22
2.2 Analyse du poste de production.....	23
2.2.1 Description du poste de production	23
2.2.1.1 La machine à centrifuger	23
2.2.1.2 Le Basket	24
2.2.1.3 Le canal de coulée	24
2.2.2 Organisation du poste de production de « canaliste ».....	25
2.2.2.1 Écrémage basket :	26
2.2.2.2 Grattage canal :	26
2.2.2.3 Dépose du noir à canal.....	27
2.2.3 Analyse ergonomique	27
2.2.3.1 Entretien et questionnaire	27
2.2.3.2 Enregistrement des mouvements du poste :	28
2.2.3.3 Expositions :	29
2.3 Conclusion :	31
3 Robotique collaborative : des principes au milieu sidérurgique.....	34

3.1	Origine de la Robotique :	35
3.2	Divers domaines d'applications	35
3.3	Robotique collaborative	36
3.3.1	Description	36
3.3.2	Intégration industrielle :	37
3.3.2.1	Mode de collaboration :	37
3.3.2.2	Conformité :	39
3.3.3	Principaux robots collaboratifs	39
3.4	Exemple du robot de Foug de SG PAM	41
3.4.1	Tâches à TMS	42
3.4.2	Analyse du poste de travail	42
3.4.3	Mise en conformité / sécurité	44
3.4.4	Conclusion :	45
3.5	Conclusion	46
4	Mouvement humain et contrôleur bio-inspiré	50
4.1	Tâches rythmiques :	51
4.1.1	Description :	51
4.1.2	Analyse des mouvements rythmiques en milieu sidérurgique:	52
4.1.3	Analyse de la tâche de brossage :	54
4.2	Oscillateur dynamique pour le contrôle robotique	56
4.2.1	Introduction des oscillateurs	56
4.2.2	Description des oscillateurs utilisés	57
4.2.2.1	Oscillateur de Hopf :	57
4.2.2.2	Oscillateur de Rowat et Selverston :	59
4.2.3	Mise en œuvre d'un contrôle par oscillateur dynamique	61
4.2.3.1	Description du schéma de contrôle	61
4.2.3.2	Signaux de forçage périodiques :	62
4.2.3.3	Signal de forçage non périodique de type rampe :	63
4.2.3.4	Signaux humains enregistrés :	64
4.2.3.5	Signaux téléopérés :	64
4.2.4	Apprentissage du signal de forçage :	65
4.2.4.1	Oscillateur de Hopf :	65
4.2.4.2	Oscillateur de Rowat-Selverston :	66

4.3	Conclusion :	68
5	Solution proposée.....	71
5.1	Orientation du projet.....	72
5.2	Simulation de la solution :	72
5.2.1	Modélisation :	73
5.2.2	Simulation :	74
5.2.2.1	Pulvérisation de noir à canal :	74
5.2.2.2	Coactivité avec opérateur :	75
5.2.2.3	Téléopération de tâche :	75
5.2.3	Organisation du poste :	76
5.2.4	Réalité virtuelle :	77
5.3	Plateforme expérimentale :	78
5.3.1	Robot Franka :	79
5.3.2	Système de téléopération :	79
5.3.3	Framework ROS	80
5.3.4	Architecture générale de contrôle	82
5.4	Conclusion	86
6	Résultats expérimentaux :	89
6.1	Preuve de concept : Brossage d'une surface plane	91
6.1.1	Contrôle avec un signal de forçage rectangle	91
6.1.1.1	Signaux de contrôle / commande.....	92
6.1.1.2	Analyse de la puissance dissipée	93
6.1.2	Contrôle avec le dispositif Falcon :	95
6.1.2.1	Contrôle commande.....	95
6.1.2.2	Analyse de la puissance dissipée :.....	96
6.1.3	Conclusion	98
6.2	Téléopération d'une tâche de brossage	98
6.2.1	Téléopération par le dispositif Geomagic :.....	100
6.2.1.1	Commande sans oscillateur	100
6.2.1.2	Commande avec l'oscillateur de Hopf	100
6.2.1.3	Commande avec l'oscillateur de Rowat Selverston :	101
6.2.1.4	Analyse de la puissance dissipée	102
6.2.2	Téléopération par le joystick ThrustMaster	103

6.2.2.1	Commande sans oscillateur	103
6.2.2.2	Commande avec l'oscillateur de Hopf :	104
6.2.2.3	Oscillateur de Rowat Selverston :	105
6.2.2.4	Consommation de puissance	106
6.3	Conclusion	107
7	Expériences complémentaires.....	110
7.1	Mesure de l'efficacité des brossages :	111
7.1.1	Analyse par traitement d'image :.....	111
7.1.2	Comparaison des force du robot durant un brossage :.....	113
7.1.3	Conclusion :	115
7.2	Réalisation de tâches discrètes : :.....	115
8	Conclusion générale et perspective.....	120
	Publications.....	126
9	Annexe 1	128
10	Annexe 2	132
10.1	Analyse posture opérateurs	132
10.2	Suivi oculaires :.....	133
11	Bibliographie.....	135

Tables des Figures

Figure 1: Processus d'élaboration de la fonte ductile.....	21
Figure 2 : Processus de centrifugation d'un tuyau	22
Figure 3 : Processus de finitions/revêtements d'un tuyau	23
Figure 4 : Principe de fonctionnement d'une machine à centrifuger.....	24
Figure 5 : Basket de coulée pour un tuyau de 6m.....	24
Figure 6 : Canal de coulée : le canal de gauche vient d'être utilisé, le canal de droite est en cours d'utilisation	25
Figure 7 : Ecrémage du Basket	26
Figure 8: Illustration du grattage d'un canal	27
Figure 9: IMU T-sens Motion avec schéma d'implantation.....	28
Figure 10: Lunette eye tracking Tobii	29
Figure 11: Postures de référence selon le référentiel ergonomique Saint-Gobain PAM.....	29
Figure 12: Robot industriel Unimate installé sur les lignes de productions de General Motors en 1961	35
Figure 13: Cycle du poste de travail sans automatisation à gauche et avec automatisation à droite.....	42
Figure 14: Cycle du poste de travail du système robotique	43
Figure 15: Système de robotique collaborative avec le convoyeur à noyaux.....	44
Figure 16: Plans de sécurité configurés sur l'interface robot UR10	44
Figure 17: Préhenseur du robot avec système de détection de choc avec l'opérateur	45
Figure 18 : Angles d'articulation du bras droit et du dos d'un opérateur durant une tâche de « dépose de noir à canal ». Extrait de 30 secondes d'enregistrement sur 1h30 au total.....	52
Figure 19 : Angles d'articulation du bras droit et du dos d'un opérateur durant une tâche de « grattage du canal ». Extrait de 2minutes d'enregistrement sur 1h30 total.	53
Figure 20 : Déplacement cartésien du 2 métacarpe de la main droite de l'opérateur durant la tâche de brossage. Bleu : axe X, Gris : axe Z, Orange : axe Y.	54
Figure 21 : Cycle limite du mouvement de grattage du canal reconstruit à l'aide des données enregistrées par les capteurs de mouvements de la société TEA. En vert : point de début de mouvement, en rouge : point de fin de mouvement.	55
Figure 22: Exemple de cycle limite (rapport entre une position et un vitesse) pour différents essais réalisés avec l'oscillateur de Rowat et Selverston pour des expériences de Handshaking [25]	55
Figure 23: Modèle de Hopf sous Simulink.....	58

Figure 24: Comportement oscillateur de Hopf libre	58
Figure 25: Oscillateur de Rowat et Selverston	59
Figure 26: Effet du paramètre σ_f sur les courants rapides, extrait de [48].....	59
Figure 27: Différents réponse à un échelon 1 de 0,1s, en fonction des valeurs σ_s et σ_f , extrait de [48]. Am : oscillation amortie ; Os : oscillation ; Qu : Hyper Amortie ; Pl : potentiel plateau	60
Figure 28 : Réponse de l'oscillateur de Rowat-Selverston	61
Figure 29 : Schéma de contrôle en boucle ouverte avec oscillateur	62
Figure 30: Oscillateur de Hopf avec signaux périodiques	63
Figure 31: Comportement oscillateur avec signal rampe	63
Figure 32: Gauche :Comportement de l'oscillateur avec le mouvement de la main de l'opérateur ; Droite : Apprentissage de ω avec signal du mouvement humain.....	64
Figure 33: Gauche :Comportement de l'oscillateur avec le dispositif maître Falcon et variation du mouvement désiré; Droite : Apprentissage de ω en fonction des 3 changements de fréquence du mouvement [0s-10s], [18s-30s] et [35s-45s]	65
Figure 34: Gauche : Comportement de l'oscillateur de Rowat et Selverston avec un signal d'entrée provenant du dispositif maître Géomagic ;Droite : Apprentissage σ_s avec deux changements de fréquence [0s à 15s] et [25s à 45s].....	67
Figure 35: Modélisation du système robotique téléopéré	73
Figure 36: Simulation de pulvérisation avec le robot UR10 sous Vrep	74
Figure 37: Simulation de la co-activité et du contact avec un opérateur déplacé manuellement sous V-rep.....	75
Figure 38: Impression d'écran de la simulation de la téléopération sous V-rep.....	76
Figure 39: Conception d'une organisation du poste de canaliste vue par le système de robotique collaborative.....	77
Figure 40: Interface VR de l'opérateur pour la téléopération	78
Figure 41: Robot Panda de Franka Emika	79
Figure 42: Différents dispositifs maîtres non-haptique ou haptiques (à retour de force)	80
Figure 43: Architecture ROS	81
Figure 44: Schéma d'architecture Maître/esclave ROS du contrôle du robot Franka.....	81
Figure 45: Illustration d'une première configuration expérimentale : dispositif maître Falcon ; brosse en nylon ; robot Franka-Panda	82
Figure 46: Architecture de contrôle direct (sans oscillateur).....	83
Figure 47: Architecture de contrôle dite bio-inspirée (avec oscillateur)	84
Figure 48 :Réponse du robot Franka en fonction de la fréquence du signal et le paramètre d'impédance	86
Figure 49: Setup expérimental pour la preuve de concept composé du robot Franka, du dispositif maître Falcon et d'une brosse en nylon rigide.....	91
Figure 50: Contrôle avec un signal rectangle, sans utilisation d'un oscillateur.....	92
Figure 51: Contrôle avec un signal rectangle, avec oscillateur de Hopf. Echelle de droite : Signal de commande correspondant à la sortie de l'oscillateur.	93
Figure 52: Puissance dissipée pour chacune des articulations pour le contrôle avec un signal rectangulaire. Bleu : sans oscillateur, Orange : avec oscillateur	94
Figure 53: Contrôle avec le dispositif Falcon, sans l'utilisation d'un oscillateur.....	95

Figure 54: Contrôle avec le dispositif Falcon, avec l'utilisation de l'oscillateur de Hopf	96
Figure 55: Puissance dissipée pour chacune des articulations pour le contrôle avec le dispositif maître Falcon. Bleu : sans oscillateur ; Orange : avec oscillateur.....	97
Figure 56: Illustration des différents éléments pour l'expérience de téléopération du brossage	98
Figure 57: Représentation du setup pour la téléopération du brossage d'un canal via un dispositif maître.....	99
Figure 58: Retour visuel permettant le contrôle à distance.....	99
Figure 59: Contrôle avec le dispositif Geomagic, sans oscillateur	100
Figure 60: Gauche : Contrôle avec le dispositif Geomagic, avec utilisation de l'oscillateur de Hopf. L'axe secondaire de droite représente l'entrée du Geomagic en orange. Droite : Apprentissage du paramètre ω de l'oscillateur de Hopf lors de la commande avec le bras Geomagic.....	101
Figure 61: Gauche : Contrôle avec le dispositif geomagic, avec utilisation de l'oscillateur de Rowat-Silverston. Droite : Apprentissage du paramètre σs de l'oscillateur de RS lors de la commande avec le bras geomagic	102
Figure 62: Puissance consommée durant la téléopération avec le bras Geomagic. Bleu : sans oscillateur ; orange : Oscillateur de Hopf ; Jaune : Oscillateur RW	102
Figure 63: Contrôle avec le joystick ThrustMaster, sans l'utilisation d'oscillateur	103
Figure 64: Contrôle avec le dispositif ThrustMaster ; avec utilisation de l'oscillateur de Hopf et apprentissage de ω	104
Figure 65: Contrôle avec le dispositif ThrustMaster, avec l'oscillateur de l'oscillateur de Rowat-Silverston avec apprentissage de σs	105
Figure 66: Puissance consommée durant la téléopération avec le dispositif ThrustMaster. Bleu : sans oscillateur ; orange : Oscillateur de Hopf ; Jaune : Oscillateur Rowat-Silverston	106
Figure 67: Puissance consommée avec les 3 dispositifs maître, sans l'utilisation d'oscillateur ; Jaune :ThrustMaster, Bleu : Falcon, Vert : Geomagic	108
Figure 68: Mesure de la surface de brossage en téléopération.	111
Figure 69 : Mesure de la quantité de craie avant brossage	112
Figure 70 : Mesure de la quantité de craie après brossage	112
Figure 71: Mesure de la surface brossée par soustraction des captures avant et après brossage	113
Figure 72: Force du robot exercée durant une tâche de brossage selon l'axe X. Bleu : sans oscillateur ; orange : Oscillateur de Hopf ; Jaune : Oscillateur Rowat-Silverston	114
Figure 73: Force du robot exercée durant une tâche de brossage selon l'axe Y. Bleu : sans oscillateur ; orange : Oscillateur de Hopf ; Jaune : Oscillateur Rowat-Silverston	114
Figure 74: Force du robot exercée durant une tâche de brossage selon l'axe Z. Bleu : sans oscillateur ; orange : Oscillateur de Hopf ; Jaune : Oscillateur Rowat-Silverston	115
Figure 75: Réalisation de mouvements discrets avec l'oscillateur de Rowat-Silverston et le dispositif ThrustMaster.....	117

Figure 76: Pourcentage de temps en zone à risque du canaliste 1 132
Figure 77: Pourcentage de temps en zone à risque canaliste 2 132
Figure 78: Capture d'écran du suivi oculaire de l'opérateur 133
Figure 79: Répartition des zones surveillance de l'opérateur, en nombre d'occurrence..... 133

1 Introduction générale

Cette thèse est le résultat d'une collaboration entre le LORIA et Saint-Gobain PAM dans le cadre d'une convention CIFRE. L'objectif de la thèse s'inscrit dans le développement de nouvelles technologies à mettre en œuvre dans les sites industriels de Saint-Gobain PAM dans le contexte de "l'industrie du futur".

Ce travail de thèse vise à étudier un système robotique innovant pour la collaboration avec un opérateur qui doit cycliquement réaliser, dans un environnement hostile, des tâches impliquant des mouvements rythmiques vigoureux et des efforts importants et qui sont propres à un savoir-faire particulier dont l'acquisition est longue et fastidieuse.

Plus concrètement, ce poste de production est indispensable à la production de Saint-Gobain PAM, il nécessite une attention et un savoir-faire exigeant. De plus en plus restrictives, les normes d'hygiène poussent à rechercher et développer une nouvelle façon de réaliser des métiers encore manuels. L'objectif étant d'améliorer les conditions de travail en délocalisant l'opérateur de la zone d'exposition.

Sommaire :

1.1 Silices cristallines.....	15
1.2 Difficultés de recrutement des opérateurs / perte métier	16
1.3 Opportunités industrielles	16
1.3.1 Compétitivité française	17
1.3.2 Industrie 4.0	17
1.4 Conclusion	18

1.1 Silices cristallines

Récemment mentionnées par l'ANSES dans un rapport ¹, les expositions aux silices cristallines deviennent une problématique sur laquelle Saint-Gobain PAM souhaite réduire l'exposition de ses opérateurs de production dont certains y sont exposés sous différentes formes. Les principales variétés de la silice cristalline sont le quartz, la tridymite et la cristobalite. Le quartz est l'un des minéraux les plus naturellement présents dans l'ensemble de la croûte terrestre (12% du poids de celle-ci). La silice industrielle, ainsi que les matières minérales et matériaux contenant de la silice cristalline sont utilisés en tant que matière première, additif ou auxiliaire technologique avec ou sans transformation, pour de nombreuses applications. Les principaux secteurs d'activité exposant à l'inhalation de poussières de silice cristalline sont :

- Les travaux dans les mines et les carrières de minerais ou de roches renfermant de la silice libre (houille, or, étain, ardoise, schiste, ...)
- L'extraction et préparation de sables industriels
- L'industrie de la pierre et de la construction : taillage et polissage des pierres de taille riche en silice (grès, granite), ...
- Les fonderies : fabrication des moules de sable, décochage, ébarbage et sablage
- Les fabrications de porcelaine, faïence, céramique et de produits réfractaires
- La verrerie et cristallerie
- Les démolitions et réparations des fours industriels en briques réfractaires

L'inhalation par les voies respiratoires est le plus grand risque lié aux silices cristallines, les particules se déposent dans la trachée, les bronches et les poumons et y persistent, si bien qu'une exposition unique à forte dose peut provoquer des effets durables. D'un point de vue de la santé, la granulométrie des particules a son importance puisque, selon leurs tailles, les particules atteindront plus ou moins les poumons. On retrouve ces particules de silice cristalline sur différents postes de production de Saint-Gobain PAM à l'image de l'utilisation des poudres de noirs décrites en section 2.2.2. Ces poudres montrent une forte concentration dans les parties inhalables pouvant atteindre les alvéoles pulmonaires, représentant ainsi un véritable danger.

Les poussières de silices peuvent ainsi provoquer des irritations aux yeux et également de nombreuses maladies pulmonaires. En France près de 365 000 travailleurs seraient exposés à des inhalations de silice cristalline, en particulier au quartz. L'ANSES estime entre 23 000 et 30 000 le nombre de travailleurs exposés à des niveaux excédant la Valeur Limite d'Exposition Professionnelle (VLEP) de 0,1 mg/m³ actuellement en vigueur en France, et plus de 60 000 à des niveaux excédant la VLEP la plus basse proposée au niveau international établie à 0,025 mg/m³. Pour lutter contre ces expositions, l'ANSES a récemment classifié les

¹ Agence Nationale de Sécurité Sanitaire : Exposition à la silice cristalline : des risques élevés pour la santé des travailleurs

silices cristallines comme agents CMR² et recommande également de réviser les VLEP jugés insuffisamment protectrices.

Dans ce mémoire, la solution mise à l'étude visera à réduire au maximum l'exposition de l'opérateur aux silices cristallines sur un poste utilisant ces poudres de noirs à Saint-Gobain PAM. Anciennement étudiées pour des aspects de performance, les différentes poudres de noirs de divers fournisseurs font maintenant l'objet d'amélioration sur les plans EHS³.

1.2 Difficultés de recrutement des opérateurs / perte métier

Toute entreprise est exposée à des rotations de son personnel tout au long de l'année et sur l'ensemble de ses postes. Que ce soit pour des départs en retraite, des évolutions de carrière au sein ou en dehors de l'entreprise mais également avec l'arrivée de nouveaux opérateurs pour les remplacements, la transmission des savoirs et savoir-faire entre ces départs et arrivées est une grande problématique. Une passation de poste sans formation préalable ne peut se faire sans perte de compétences essentielles au travail de qualité de l'entreprise.

Dans un environnement sidérurgique en présence de silices cristallines, les contraintes appliquées aux opérateurs alourdissent leur travail. Ces contraintes induisent une difficulté à pérenniser les carrières sur les lignes de production, obligeant Saint-Gobain PAM à se tourner de plus en plus vers des contrats intérimaires. Ces contrats n'ont pas pour but de pourvoir durablement les postes (maximum 18 mois) mais de pallier des manques temporaires et réguliers. L'accumulation de ces contrats amène à un fort taux de rotation du personnel sur ces postes de travail exposés. Le transfert des savoirs et savoir-faires devient donc de plus en plus difficile et expose les usines à des pertes de compétences ou des dérives. Les bonnes pratiques se perdent ainsi et vont impacter la qualité de production locale jusqu'à la qualité du produit final.

Etudier une solution d'assistance avec un système robotique permettra de généraliser les méthodes de travail sur les postes à fort taux de rotation. Développer un système de contrôle à distance intuitif guidera ainsi un opérateur formé ou débutant dans la réalisation des tâches en toute sécurité et réduira les difficultés de transmission de savoir-faire entre opérateurs.

1.3 Opportunités industrielles

Depuis de nombreuses années, les marchés sont soumis à une concurrence de plus en plus grandissante. Pour pouvoir conquérir ces nouveaux marchés, de nombreux industriels ont joué la carte de la délocalisation de leur production afin de chercher des coûts de production le plus faible possible. Ces phénomènes ont poussé les industriels privilégiant le « made in France » à repenser leur méthode de production afin de rester compétitifs et de pouvoir faire perdurer leur position de leader. Pour ce faire, le développement au milieu du XX^{ème} siècle des systèmes automatisés n'a fait qu'augmenter et se trouve maintenant soutenu par l'apparition

² Agent cancérigène, mutagène et reprotoxique

³ Environnement, Hygiène, Sécurité

d'une 4^{ème} révolution industrielle. Ce concept d'industrie 4.0 se base sur la transformation de structures ou lignes de production rigides conçues anciennement pour une production de masse, en des structures dynamiques et agiles capables de fournir des produits et services optimisés et personnalisés tout en gardant une efficacité de production importantes.

1.3.1 Compétitivité française

A l'image de Saint-Gobain PAM, de nombreuses industries ont gardé une place forte en France, durement perturbées par la concurrence positionnée dans les pays émergeant et bénéficiant ainsi de main d'œuvre peu chère et en abondance. Afin de se différencier, Saint-Gobain PAM a dû faire valoir d'autres valeurs de production plus locales appelées « made in France » et s'orienter dans de moindre proportions à l'automatisation (cf 3.1, le nombre de systèmes robotiques en France est largement inférieur à celui des pays ayant accueilli le phénomène de délocalisation tel que la Chine ou l'Inde). L'un des points forts d'une production française est la valorisation de son savoir-faire, connu et reconnu à travers le monde. Bien souvent assimilé à un gage de qualité, le savoir-faire français permet de se démarquer sur les marchés grâce notamment aux performances haut de gamme mises en valeur dans les produits. La marque PAM est la référence mondiale des solutions complètes de canalisations en fonte ductile grâce à ses innovations et la qualité de ses solutions techniques. C'est ainsi que chaque année, Saint-gobain PAM équipe plus de 100 capitales et plus de 1000 villes dans le monde. Privilégier le « made in France » c'est aussi faire le choix de garder une production en circuits courts, à l'image de l'implantation de Saint-gobain PAM avec ses 5 usines en France. Faire ce choix c'est d'une part favoriser l'emploi local mais également garder une proximité avec ses clients. Pour rester compétitif et perdurer dans le temps face à sa concurrence, Saint-Gobain PAM s'implique également sur des sujets écologiques, avec son implantation et sa démarche de développement durable grâce au recyclage à 100% de la fonte ductile, matière première à la réalisation des tuyaux.

1.3.2 Industrie 4.0

Garder une place forte dans la production mondiale est donc un sujet des plus importants et il devient obligatoire d'améliorer ou d'optimiser les moyens de production. A l'image du sujet développé dans ce mémoire, Saint-Gobain PAM travaille à la recherche et au développement de solutions qui permettraient de retrouver une pleine compétitivité sur le marché mondial notamment grâce à l'utilisation de nouvelles technologies issus de l'Industrie 4.0. Ce concept vise à transformer les lignes de production rigides, conçues anciennement pour des productions de masse en des structures dynamiques et agiles capables d'améliorer les indices de productivités. Pour ce faire, différentes technologies sont introduites afin de rendre les produits plus intelligents et porteurs d'informations jusqu'à les appeler système cyber-physique. De nombreuses informations peuvent maintenant être collectées grâce aux objets connectés (IoT) afin de mieux contrôler ou superviser les machines de production. L'analyse de ces nouvelles données collectées appartient au domaine appelé « Big data » et permettra d'explorer au maximum le potentiel de ces données. De nombreuses technologies auront également pour but d'améliorer directement la productivité des sites en aidant les opérateurs avec de la réalité augmentée. Tel que le sujet abordé dans ce mémoire, la robotique

collaborative prendra une place importante à l'amélioration de production en faisant évoluer des systèmes robotiques au côté de l'homme. Ces robots pourront ainsi être déployés dans des espaces restreints ou en collaboration avec l'homme afin de réaliser des tâches de productions plus complexe ou de façon plus efficiente.

1.4 Conclusion

C'est sur ces différents points que Saint-Gobain PAM a initié le sujet de thèse présenté dans ce mémoire. Les restrictions sur les silices cristallines deviennent de plus en plus importantes, et l'ANSES pousse à ce que les VELP soient réévaluées. L'utilisation des poudres de noirs étant stratégique à la production de Saint-Gobain PAM, cette réévaluation pourrait avoir un impact important sur la production. Les pénibilités des postes de production de tuyaux en fonte ductile entraînent également des difficultés à pérenniser les emplois sur ces postes, ce qui entraîne des rotations de personnel importantes. Après observation, le savoir métier se transmet difficilement et entraîne dans certains cas une dégradation de la qualité de production. Compenser ces aspects devient une nécessité et permettrait de renforcer les positions industrielles de Saint-Gobain PAM en France et à l'étranger. Grâce aux nouvelles technologies induites par l'Industrie 4.0, il est maintenant possible d'améliorer ces postes de production de manière différente.

Ce mémoire sera articulé de la façon suivante. Dans un premier temps nous développerons les parties techniques relatives aux savoirs faire de Saint-gobain PAM dans la production de tuyaux en fonte ductile, vieux de plus de 150 ans, en y présentant les processus de fabrication mais également en analysant plus en profondeur le poste mis à l'étude, celui de canaliste.

La partie suivante abordera différents points de la robotique et de la robotique collaborative qui seront les technologies utilisées dans ce mémoire. Nous présenterons notamment les principes de la robotique collaborative et comment elle peut se mettre en place dans des industries en donnant quelques exemples de robots collaboratifs.

Dans un troisième temps, nous présenterons l'approche de contrôle par oscillateurs. Cette approche dite « Bio-inspiré » a permis de faire réaliser au robot des mouvements proches de ceux de l'opérateur. Différents modèles d'oscillateurs dynamiques sont présentés, le modèle de Hopf et celui de Rowat-Selverston ainsi que leurs différents comportements de base.

La section suivante présentera la manière dont nous avons implémenté les oscillateurs dynamiques pour le contrôle d'un robot collaboratif en proposant différentes architectures de contrôle. Nous présenterons également les différentes technologies que nous avons utilisées durant nos expériences afin de téléopérer ce robot via un dispositif maître.

Nous continuerons en présentant les différents résultats que nous avons obtenus suite à la mise en place des oscillateurs dynamiques pour téléopérer un robot collaboratif en fonction de 3 dispositifs maîtres différents, haptique ou non-haptique.

La section finale présentera différentes expériences complémentaires que nous avons réalisées en parallèle. Elles nous ont permis d'essayer de caractériser les différents brossages réalisés avec la plateforme de téléopération par des traitements d'images et interprétation des données du robot.

2 Gestes Métier

Le projet d'étude et de conception d'un système robotique s'inscrit dans le processus de production des tuyaux en fonte ductile de Saint-Gobain. Nous détaillerons dans cette section les processus de production de Saint-Gobain PAM ainsi que le poste étudié, essentiel à la production d'un tuyau et nécessitant un savoir-faire métier important. L'utilisation d'un robot collaboratif aura pour but de soulager l'opérateur dans la réalisation de ses tâches et permettra ainsi d'améliorer les conditions sanitaires du poste. Nous décrirons rapidement les différentes études ergonomiques que nous avons réalisées et qui nous ont permis de quantifier les différentes pénibilités du poste de production. Certaines données liées à ces études restent confidentielles et n'apparaissent pas dans ce manuscrit.

Sommaire :

2.1 Processus de production SG-PAM.....	21
2.1.1 Elaboration de la fonte	21
2.1.2 Centrifugation	21
2.1.3 Finitions / revêtements	22
2.2 Analyse du poste de production.....	23
2.2.1 Description du poste de production	23
2.2.1.1 La machine à centrifuger	23
2.2.1.2 Le Basket	24
2.2.1.3 Le canal de coulée.....	24
2.2.2 Organisation du poste de production de.....	25
2.2.2.1 Écrémage basket	26
2.2.2.2 Grattage canal	26
2.2.2.3 Dépose du noir à canal.....	27
2.2.3 Analyse ergonomique	27
2.2.3.1 Entretien et questionnaire	27
2.2.3.2 Enregistrement des mouvements du poste.....	28
2.2.3.3 Expositions.....	29
2.3 Conclusion	31

2.1 Processus de production SG-PAM

Leader mondial de solutions complètes de canalisation en fonte ductile, Saint-Gobain PAM conçoit, produit et commercialise un éventail complet de solutions dédiées au transport de l'eau. La marque mondiale PAM est la référence dans le domaine des canalisations grâce aux innovations et à la qualité de ses solutions techniques. Chaque année, le Centre de Recherches et de Développement dépose plus de 50 inventions à l'INPI (Institut National de la Propriété Industrielle) sur les produits et les procédés. L'objectif de Saint-Gobain PAM est de proposer des solutions complètes de canalisation en phase avec les nouvelles attentes de ses clients et les évolutions du secteur de l'eau.

Canalisations, raccords, robinetterie et accessoires, Saint-Gobain PAM propose plus de 50000 références dans son catalogue. Les canalisations en fonte ductile avec leurs revêtements, leurs joints adaptés et adaptables aux différentes configurations de terrain, sont conçues pour résister à tous les aléas de transport, de manipulation, d'installation et d'exploitation.

2.1.1 Elaboration de la fonte

Le métal liquide peut être obtenu directement par réduction du minerai de fer dans un haut fourneau ou par fusion de gueuses de fonte et de ferrailles dans un cubilot (ou dans un four électrique). Dans tous les cas, les matériaux sont sélectionnés et contrôlés avec soin, afin de produire un métal de base de grande pureté. Après désulfuration, la température de la fonte est ajustée dans un four électrique, afin d'assurer une température optimale de coulée. A ce stade, des corrections peuvent être apportées à la composition chimique par ajout de ferrailles ou de ferro-alliages spécifiques. Le magnésium est introduit dans le métal liquide afin de rendre la fonte ductile, un procédé qui lui confère des propriétés exceptionnelles en termes de résistance mécanique et de flexion (Cf. Figure 1)

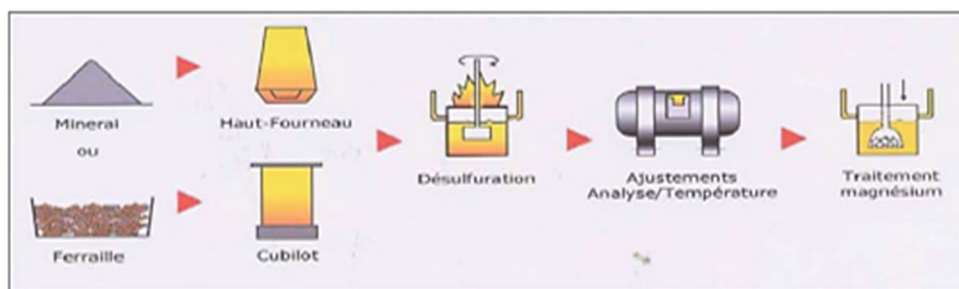


Figure 1: Processus d'élaboration de la fonte ductile

2.1.2 Centrifugation

La centrifugation remplaça le principe de la coulée verticale dans les années 1930. Inventée et mise au point par deux ingénieurs brésiliens, la société achète le brevet et en améliore son principe. L'idée de la centrifugation est basée sur l'utilisation de la force centrifuge pour

mouler des tuyaux avec une arrivée régulière de fonte. (Cf. Figure 2). Un canal de coulée permet d'assurer l'écoulement de la fonte à environ 1300°C dans un moule en rotation. Un système de refroidissement de ce moule permet de solidifier la fonte avant extraction formant ainsi un tuyau. Le moulage du côté emboîtement des tuyaux se forme grâce à l'insertion d'un noyau dans le moule de centrifugation, préalablement réalisé à base de sable.

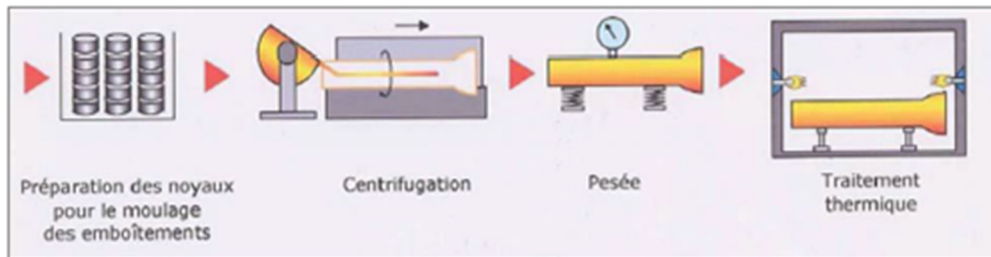


Figure 2 : Processus de centrifugation d'un tuyau

Après centrifugation des tuyaux, il est nécessaire d'effectuer un recuit en faisant passer ces tuyaux dans un four. Ce traitement thermique à 950°C permet d'éliminer la cémentite présente dans la fonte et de faire apparaître des nodules de graphites. Une fois le tuyau coulé et refroidi, des revêtements peuvent être appliqués.

2.1.3 Finitions / revêtements

En sortie du four de traitement thermique, les tuyaux reçoivent sur l'extérieur du fût une couche de zinc ou de ZINALIUM métallique obtenu par fusion de fil à l'arc électrique ou de lingots de zinc ou de zinc-aluminium selon les cas, puis par projection par air comprimé. Plusieurs types d'inspections et essais sont exécutés systématiquement afin de garantir la qualité du tuyau : contrôle de la structure et des caractéristiques mécaniques du métal, inspection visuelle, contrôle dimensionnel, épreuve hydrostatique unitaire. Compte tenu de leur importance dans l'étanchéité du joint, le bout-uni et l'emboîture subissent des contrôles particuliers.

Le revêtement intérieur est constitué de mortier à ciment qui est appliqué par centrifugation. Dans la méthode choisie par Saint-Gobain PAM, le mortier est déversé dans le tuyau, mis en rotation à grande vitesse, ce qui permet d'obtenir une faible porosité et une bonne compacité du revêtement intérieur. Le mortier de ciment des tuyaux est ensuite mûri à température et hygrométrie contrôlées. Après mûrissement du ciment, les tuyaux sont introduits dans les "lignes de vernissage". Une couche de peinture bitumineuse ou de peinture époxy bleue est appliquée par projection sur le tuyau. Les tuyaux sont ensuite bouchés aux extrémités, colisés et rangés sur parc en attente d'expédition. (cf. Figure 3)

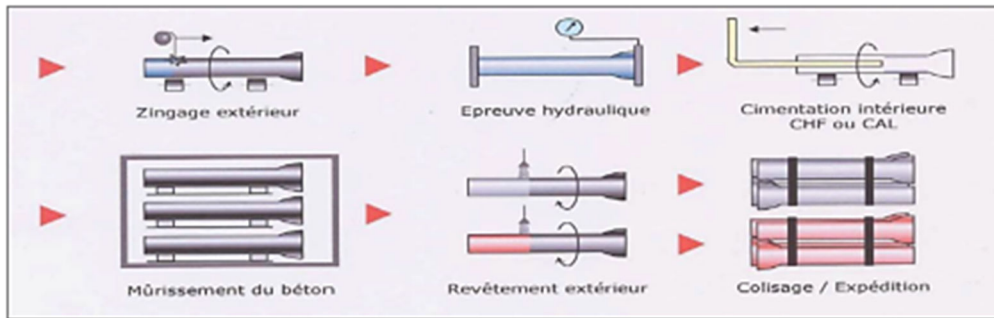


Figure 3 : Processus de finitions/revêtements d'un tuyau

2.2 Analyse du poste de production

Dans notre étude, nous nous sommes focalisés sur le corps de métier de la centrifugation permettant de passer d'une fonte à l'état liquide à une forme de tuyau grâce à une machine à centrifuger. Nous détaillerons dans cette section plus en détail les différents organes permettant de réaliser les tuyaux ainsi que les études ergonomiques réalisées pour caractériser les différentes expositions des opérateurs.

2.2.1 Description du poste de production

Placée en début de chaîne de production, la centrifugation est un élément critique dans la conception d'un tuyau. La centrifugation a pour rôle principal de transformer la fonte qui arrive à l'état liquide des hauts-fourneaux en un tuyau brut en fonte ductile.

Pour se faire, après réalisation des phases permettant d'obtenir la fonte ductile, la fonte arrivant sur le plancher de coulé à environ 1300°C dans de grosses poches (moyen de transport de la fonte constitué de brique réfractaire). Ces poches sont vidées au fur et à mesure des cycles de production dans des baskets associés chacun à une machine à centrifuger.

2.2.1.1 La machine à centrifuger

Le procédé de centrifugation consiste à déposer une couche de fonte liquide dans une coquille cylindrique en rotation via le canal de coulée Figure 4. Afin de couler la totalité d'un tuyau, la machine à centrifuger fait translater la coquille sur la longueur désirée. Cette coquille est continuellement refroidie afin de permettre la solidification du métal en rotation. Le côté emboîtement d'un tuyau est formé grâce à un noyau composé de sable, plaqué contre la coquille par l'appui d'un bras hydraulique appelé « bras de remmoulage ». Une fois la fonte liquide solidifiée, le tuyau est prêt à être sorti de la machine à centrifuger, ce qui est fait avec un extracteur afin de passer à la phase de traitement thermique.

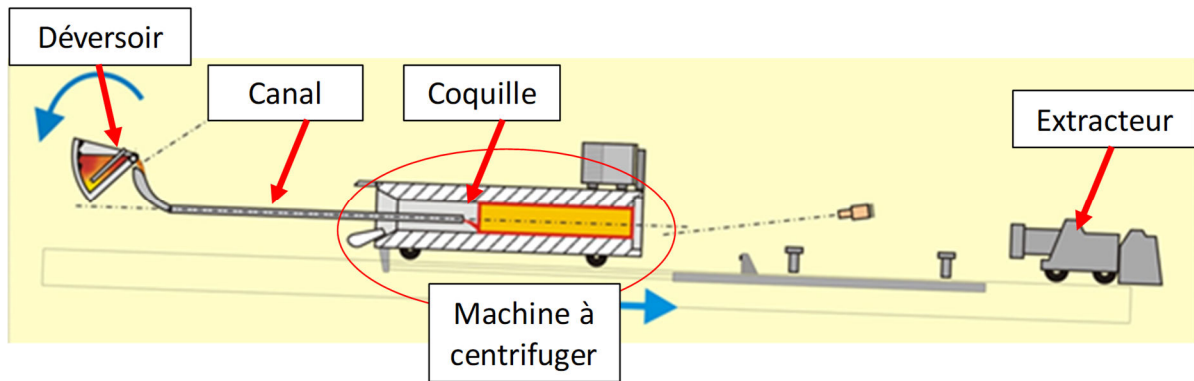


Figure 4 : Principe de fonctionnement d'une machine à centrifuger

2.2.1.2 Le Basket

Le basket Figure 5, constitue une réserve de fonte prête à l'emploi pour la production des tuyaux. Constitué principalement de briques réfractaires, le basket a pour but également de conserver du mieux possible la fonte à température en attendant d'être coulée. Un cycle de production débute lorsque le basket bascule afin d'écouler la fonte dans le « canal de coulée » via un déversoir.

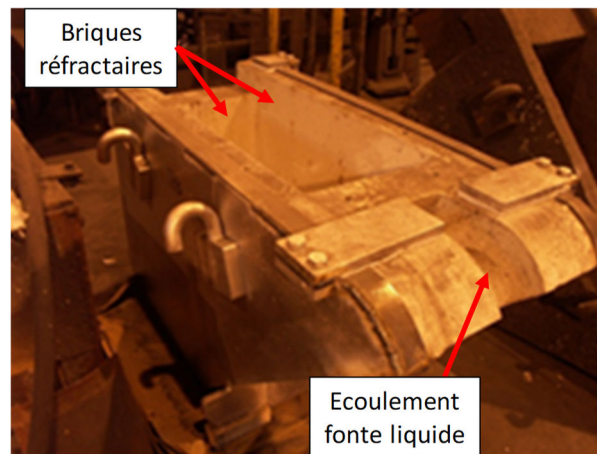


Figure 5 : Basket de coulée pour un tuyau de 6m

2.2.1.3 Le canal de coulée

Le canal et le déversoir sont des longs tronçons demi-sphériques de fonte ou d'acier servant à écouler la fonte à l'intérieur de la machine à centrifuger Figure 6. Le canal et le déversoir sont recouvert d'un enduit appelé «noir» afin d'être protégés du contact de la fonte en fusion. Principalement composé de talc, de coke, d'alumine, de bentonite et de graphite, le *noir* est un matériau peu visqueux de masse volumique de 750 kg/m^3 . Il possède deux propriétés essentielles qui justifient son utilisation :

- Barrière thermique : Il permet d'éviter le perçage du canal par la fonte liquide ($\approx 1400^\circ\text{C}$), de limiter les déformations du canal par dilatation et, par conséquent, sa détérioration. Le noir doit répondre à des critères de conductivité thermique précis. La fonte ne doit pas se solidifier trop vite, ni trop lentement. La « baguette » formée par

les restes de fonte dans le canal lors du refroidissement entre deux cycles doit être assez solidifiée pour être évacuée rapidement lors de la production en chaîne.

- **Anti-adhésion** : Il permet également de concéder à un bon écoulement et d'accéder à une bonne mouillabilité, représentée par l'angle de contact entre la fonte liquide et le revêtement. En effet, si la fonte adhère au revêtement, une partie de la fonte destinée à la fabrication de tuyau restera dans le canal et risque d'altérer la qualité du tuyau fabriqué et gêner les futures coulées.

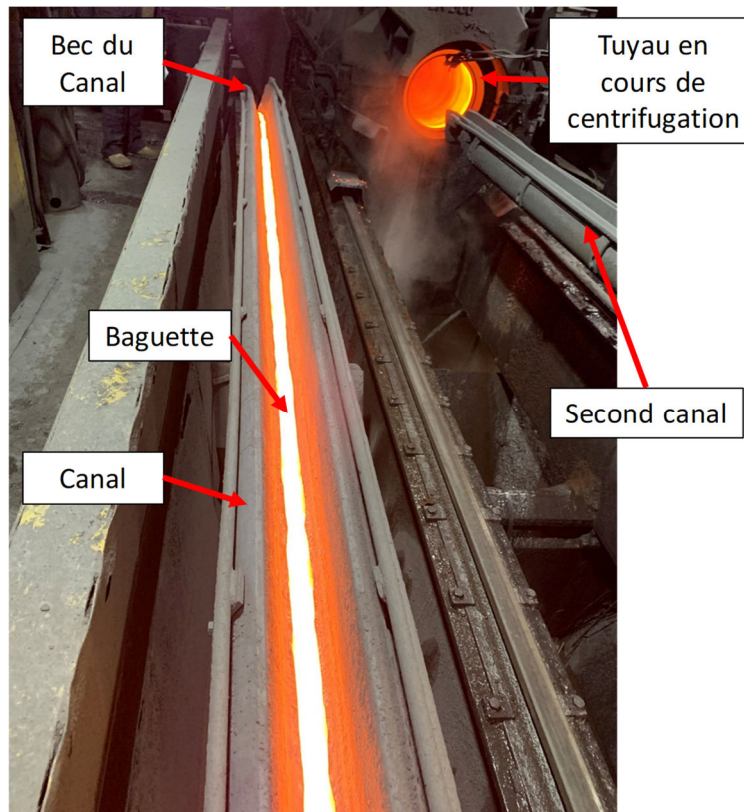


Figure 6 : Canal de coulée : le canal de gauche vient d'être utilisé, le canal de droite est en cours d'utilisation

Au fur et à mesure des cycles de production et des coulées de fonte sur le canal, le traitement de surface se détériore. La fonte s'écoule plus lentement en s'accrochant aux parois du canal faisant ainsi varier le débit de fonte nécessaire à la réalisation d'un tuyau engendrant ainsi des défauts de qualité. Pour remédier à cette usure du traitement de surface du canal, l'enduit usé est enlevé manuellement par grattage afin d'enduire de noir à nouveau et pouvoir ainsi tenir des cycles d'environ 2h de production.

2.2.2 Organisation du poste de production de « canaliste »

Le poste de production qui nous intéresse est dénommé « canaliste ». Il se focalise sur les organes de la machine permettant de réaliser la coulée de fonte. Ces organes sont le déversoir et le canal. Le canaliste a pour mission de maintenir ces organes de coulées en fonctionnement

et de veiller à l'efficacité de revêtement par le biais de différentes tâches : écrémage basket, grattage canal et dépose du noir à canal dans le canal.

2.2.2.1 Écrémage basket

Arrivant des hauts fourneaux dans des poches, la fonte est déversée dans chacun des baskets associés à une machine à centrifuger. Quelques « crasses » résiduelles sont encore présentes dans la fonte, le canaliste doit ainsi écrémer (Figure 7) la fonte afin de retirer cette « crasse » présente car ces résidus présents dans un tuyau génèreraient des problèmes de qualité.



Figure 7 : Ecrémage du Basket

2.2.2.2 Grattage canal

Arrivée en fin de vie après environ 1h30 de production, la couche de *noir* qui protège le canal commence à se consumer avec l'enchaînement des coulées et à cause du carbone présent dans le noir. Afin de ne pas dégrader la qualité de production, le noir doit être retiré ou gratté avant d'être renouvelé. Deux façons différentes existent pour enlever cette couche.

La première méthode consiste à brosser le canal (Figure 8) avec une brosse en aluminium afin de gratter la couche de noir présente dans le canal. Cette méthode reste physiquement pénible pour le canaliste de par les mouvements qu'il doit réaliser mais également par la chaleur sous laquelle l'opérateur doit réaliser l'effort. Le port du masque obligatoire permet de le protéger des poussières de noirs qui se dégagent du grattage.

La seconde méthode utilise un système de nettoyage à haute pression afin de décaper la couche de noir. Cette méthode est utilisée depuis quelques années afin de réduire les troubles musculo-squelettiques liés à l'utilisation de la brosse métallique. Cependant, le nettoyeur à haute pression ne peut pas remplacer entièrement la brosse métallique car son utilisation a tendance à faire baisser la température du canal et a donc un impact sur la qualité de la coulée de la fonte liquide.



Figure 8: Illustration du grattage d'un canal

2.2.2.3 Dépose du noir à canal

Après grattage de la couche de noir, le canaliste doit réaliser le dépôt d'un nouveau revêtement de noir sur le canal. Préalablement, le canaliste doit préparer le noir qui se trouve initialement sous forme de poudre en le diluant avec de l'eau selon une méthodologie et une recette bien précise.

Cette tâche a donc pour but de déposer du noir sous forme liquide dans le canal grâce à une gamelle semblable à une casserole remplie de noir. Sous la chaleur du canal, l'eau mélangée au noir bouillonne laissant place à la formation de bulles dues à l'évaporation de l'eau. Un lissage est effectué afin d'obtenir une surface lisse et une répartition homogène sur l'ensemble de la surface du canal afin d'éviter la formation d'alvéoles nuisibles à la qualité de production lors des coulées.

2.2.3 Analyse ergonomique

Analyser ergonomiquement un poste de production permet d'étudier tous les aspects des conditions de travail d'un opérateur, que ce soit sur des aspects de santé du travail ou sur des aspects de performance du poste. L'analyse du poste de production vise à diagnostiquer la méthode et les mouvements du canaliste. Ce travail a été mené en collaboration avec un étudiant alternant en ergonomie de Saint-Gobain PAM avec qui nous avons réalisé différentes études ergonomiques.

2.2.3.1 Entretien et questionnaire

L'une des premières étapes de notre analyse ergonomique a concerné la réalisation d'un entretien individuel avec chaque opérateur du poste de canaliste. Ces entretiens qui ont pu être guidés ou libres, nous ont permis d'échanger sur la représentation que chaque opérateur peut se faire de son poste de production. Pour ce faire nous avons expliqué le but de l'entretien afin d'obtenir l'approbation de l'opérateur concerné permettant ainsi de créer un lien et d'obtenir des réponses pertinentes.

L'ensemble des données récoltées (voir Annexe 1), nous a permis de mieux comprendre le poste de production afin de mieux cibler les actions d'améliorations. On y retrouve l'ensemble

des tâches effectuées par l'opérateur ainsi que le ressenti technique et physique à la réalisation de ces tâches vues par chaque opérateur.

2.2.3.2 Enregistrement des mouvements du poste

Afin de mettre en évidence l'activité de l'opérateur durant la production, nous avons fait réaliser un enregistrement de l'ensemble des mouvements de l'opérateur à son poste par l'intervention de l'entreprise TEA ergo [1]. C'est une entreprise française développant une solution d'instrumentation nommée CAPTIV permettant l'enregistrement, la visualisation et l'analyse de multiples données pour des applications industrielles, sur l'étude des facteurs humains et des postes de travail, sur des applications dans la recherche, la biomécanique, le sport ou encore en neurosciences. L'acquisition des données se fait grâce à des capteurs appelés T-sens Motion (Figure 9) positionnées sur chaque membre supérieur de l'opérateur selon un schéma précis. Ces capteurs sont des centrales inertielles (IMU) qui fusionnent des données provenant d'accéléromètres, de gyroscopes et de magnétomètres pour en déduire l'orientation des capteurs dans l'espace. La reconstitution des différentes données des capteurs permet de reconstruire les mouvements du corps de l'opérateur en 3D et de calculer des angles articulaires d'un ou de plusieurs membres.

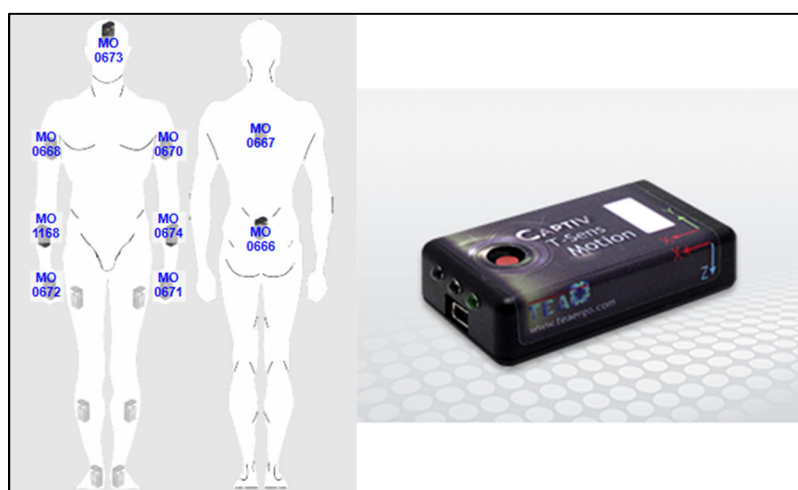


Figure 9: IMU T-sens Motion avec schéma d'implantation

Grâce à l'acquisition de ces données et à leur traitement numérique avec le logiciel CAPTIV développé par TEA, il est possible de calculer de nombreuses données statistiques d'ergonomie telles que le temps passé dans les angles limites des articulations de l'opérateur durant l'enregistrement. Par traitement logiciel il est possible d'obtenir des rapports et des graphiques relatifs aux différentes données comme par exemple l'identification des postures comportant des risques de TMS (données calculées avec les angles et temps d'exposition). Chacune de ces IMU ont été placées sur les membres supérieurs par-dessus les équipements de sécurités des opérateurs selon un schéma de placement défini par TEA, voir Figure 9. Ces enregistrements étaient une première dans un tel milieu sidérurgique, où des doutes se sont portés sur les communications sans fil mais également sur la résistance du matériel utilisé face aux sources de chaleurs en production.

En complément de ces données, nous avons équipé l'opérateur de lunette Tobii [2] permettant un suivi oculaire de l'opérateur (Figure 10). Cette technologie permet d'enregistrer le mouvement des yeux avec une caméra infrarouge afin de reconstituer la direction du regard. Ces données permettent de mettre en évidence le déplacement des yeux et de faire apparaître les zones où l'opérateur porte souvent son regard.



Figure 10: Lunette eye tracking Tobii

Deux opérateurs ont ainsi été équipés durant ces analyses, qui ont permis de récolter des données pendant 1h15 et 1h20 de production.

2.2.3.3 Expositions :

Suites à ces analyses ergonomiques réalisées sur le poste de canaliste, nous avons pu identifier différentes expositions. La première exposition concerne les postures des différentes tâches de l'opérateur durant les postes de production. Grâce aux mouvements enregistrés par TEA, nous avons pu évaluer les risques d'exposition du poste aux TMS. Pour se faire nous nous sommes basés sur des référentiels ergonomiques [3] permettant d'évaluer l'exposition de chacune des tâches en fonction des différents facteurs aggravants. Il est défini qu'une tâche est à risque de TMS s'il représente une problématique de posture couplée à une fréquence d'occurrence de la tâche et s'il y a nécessité d'exercer une force ou le port de charge.

- La posture :

La figure ci-dessous indique différentes aires et volumes d'action sur quelques exemples d'articulation pour un poste de travail. La cotation de couleur permet de mettre en évidence les zones et aires à favoriser ou à éviter, pas/peu sollicitant en vert, sollicitant en orange et très sollicitant en rouge (cf. Figure 11)

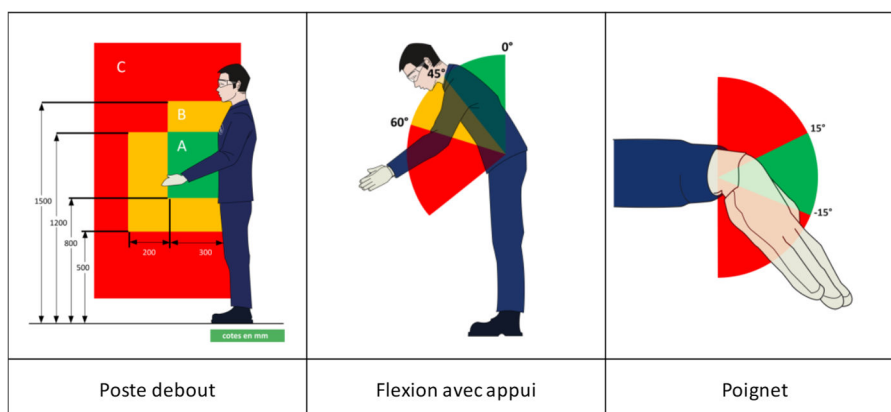


Figure 11: Postures de référence selon le référentiel ergonomique Saint-Gobain PAM

Il est défini que la zone rouge est à proscrire pour de longues périodes de temps (>1h par jour) ou trop fréquentes (> 50 fois par jour).

- Fréquence de la tâche :

La fréquence d'apparition de la tâche peut être également un facteur aggravant l'importance des TMS. Il est défini que plus une tâche est répétée au cours du poste de production, plus les charges manipulées devront être faibles. Le Tableau 1 montre un exemple de l'importance de la fréquence pour la manipulation de charges à deux mains pour un homme.

Tableau 1: Fréquence de manutention de charge

Zone de manutention	Fréquence horaire de manutention			
	1 à 10/h	10 à 30/h	30 à 60/h	> 60/h
A	15 Kg	12 Kg	9 Kg	6 Kg
B	10 Kg	7 Kg	5 Kg	3 Kg
C	5 Kg	Posture contraignante et fréquence trop élevée		

- Force nécessaire.

Dans le cas d'activité de manutention répétée il convient généralement de calculer le tonnage journalier manipulé par l'opérateur. Le calcul des valeurs limites se fait à partir de valeurs de référence pondérées par des coefficients de correction en fonction de la posture et de la fréquence d'exécution. Le Tableau 2 montre un exemple pour les valeurs seuils de référence pour le tonnage sur une période de 8 heures.

Tableau 2: Valeurs seuils de port de charge

	Valeurs seuils de référence
Contrainte à risque minimum	3t
Valeur maximale acceptable	7, 5t
Valeur maximale sous conditions	12t

Différents facteurs extérieurs peuvent également rentrer en compte dans l'évaluation des TMS tel que la vitesse d'exécution du mouvement, l'exposition aux chaleurs, aux vibrations, ...

La seconde exposition de l'opérateur concerne l'exposition aux silices cristallines causée par l'utilisation du noir à canal dans les différentes tâches du poste de canaliste. L'exposition aux silices cristallines peut être évaluée par différents moyens normalisés de prélèvements de l'air, qui sont capables de détecter jusqu'à quelques microgrammes par m³ de silices cristalline. La réglementation française fixe deux valeurs seuils pour évaluer la concentration dans l'atmosphère. La valeur limite moyenne d'exposition (VME), correspond à la valeur limite admise dans le temps des concentrations auxquelles est exposé un travailleur durant huit heures. La seconde est la valeur limite d'exposition à court terme ou VLE qui correspond à la valeur maximale admise sur une période au plus égale à 15min. Le montre les valeurs limites d'exposition aux poussières :

Tableau 3: Valeurs limites d'exposition de différentes poussières relative au poste de canaliste

Composé	VME (mg/m ³)
Poussières alvéolaires	5
Quartz	0,1
Cristobalite	0,05
Tridymite	0,05
Poussières alvéolaires non silicogène	5

L'ensemble des données relatives aux différentes analyses ne sont pas publiées pour des raisons de confidentialité, mais un aperçu de certains résultats sont présentés en Annexe 2. Certains mouvements enregistrés seront utilisés dans les chapitres suivants dans le but de concevoir un système robotique.

2.3 Conclusion :

Les processus de production de Saint-Gobain PAM existent depuis près de 160 ans et ont permis de développer un savoir-faire technologique et industriel riche. Toutes ces connaissances sont au service de la production de tuyaux en fonte ductile en passant par l'élaboration de la fonte liquide, sa centrifugation afin de former des tuyaux, et l'ensemble des revêtements intérieur et extérieur permettant d'octroyer des capacités techniques aux tuyaux. Notre projet se focalise sur le poste de canaliste qui a pour principale mission d'entretenir les organes de coulées. Dans le but de comprendre l'organisation de ce poste, nous avons réalisé différentes études ergonomiques à commencer par des entretiens individuels avec les opérateurs. Nous avons également enregistré l'ensemble des mouvements d'un opérateur durant son poste de production grâce à des centrales inertielles couplées à des lunettes de suivi oculaire qui nous a permis d'identifier les risques exposant l'opérateur.

Nous allons voir dans le chapitre suivant les différents systèmes de robotiques actuellement mis en place dans l'industrie manufacturière et dans quelle mesure elle pourra venir soulager l'opérateur dans ses tâches.

3 Robotique collaborative : des principes au milieu sidérurgique

Ce chapitre présente la robotique collaborative qui est une technologie qui ne cesse d'évoluer et devient présente dans de nombreux domaines d'application. Cette technologie est maintenant bien encadrée dans le milieu industriel par des normes et recommandations telles que celles décrites dans l'ISO 10218, et de nombreux constructeurs proposent maintenant leur propre robot collaboratif. Nous présenterons également dans ce chapitre un premier projet développé au sein de Saint-Gobain PAM qui porte sur l'intégration d'un robot collaboratif sur une ligne de production.

Sommaire :

3.1 Origine de la Robotique	35
3.2 Divers domaines d'applications	35
3.3 Robotique collaborative	36
3.3.1 Description	36
3.3.2 Intégration industrielle	37
3.3.2.1 Mode de collaboration	37
3.3.2.2 Conformité	39
3.3.3 Principaux robots collaboratifs	39
3.4 Exemple du robot de Foug de SG PAM	41
3.4.1 Tâches à TMS	42
3.4.2 Analyse du poste de travail	42
3.4.3 Mise en conformité / sécurité	44
3.4.4 Conclusion	45
3.5 Conclusion	46

3.1 Origine de la Robotique :

Regroupant dans un même ensemble les techniques de l'électronique, de la mécanique, de l'informatique... ; la robotique vise à aider ou assister l'être humain. Ce domaine est maintenant bien loin du terme robotique introduit par Isaac Asimov via son ouvrage *Runaround* qui énonçait les "trois règles de la robotique" en 1942, ou encore comparé au premier robot industriel Unimate intégré sur une ligne de production par l'entreprise General Motors en 1961 (Figure 12).



Figure 12: Robot industriel Unimate installé sur les lignes de productions de General Motors en 1961

Depuis ces dernières années, la robotique n'a cessé de se répandre dans le monde entier atteignant en 2019 près de 2,7 millions de robots en service [4]. En perpétuelle augmentation tant dans la recherche que dans l'industrie, 373 000 nouveaux robots ont été commercialisés dans le monde en 2019 soit une augmentation annuelle de 12%. Le marché asiatique se place aux avant-postes avec pas loin des deux tiers de l'offre mondiale, avec comme acteur principal la Chine où on trouve environ 140000 robots installés en 2019. L'Europe quant à elle est loin derrière ses homologues asiatiques avec seulement un parc de robots opérationnels de 58000 unités en 2019, étant cependant en hausse de 7%.

En 7^{ème} place mondiale, on retrouve la France avec 6700 robots installés en 2019, représentant une augmentation de 15%. En effet, depuis 2010 les initiatives gouvernementales de renforcement de la production en France ont engendré des investissements importants de la part de l'industrie automobile et de la plupart des domaines de l'industrie en générale.

3.2 Divers domaines d'applications

Aujourd'hui, la robotique est en continuel développement et est maintenant présente dans de nombreux domaines :

Robotique domestique : plus connue sous le nom de robotique de service, elle vise à être utilisée pour les tâches ménagères et d'une façon plus générale pour l'assistance à la personne.

On peut citer aujourd'hui des robots domestiques pour le balayage, l'aspiration, la tonte du gazon.

Robotique médicale : utilisée à des fins thérapeutiques comme par exemple l'assistance à la chirurgie (robots Da Vinci ou ROSA) ou la réhabilitation post-traumatique avec des exosquelettes (Lokomat, In-Motion), elle reste encore peu répandue du fait de son fort coût d'utilisation et de ses avantages encore trop peu mis en évidence.

Robotique militaire : Bien souvent autonome ou contrôlé à distance, ces robots ont plusieurs types d'applications telles que la surveillance de zones sensibles au sol ou dans les airs (drone "Predator"), voire de combats.

Robotique de transport : En grande évolution, ce domaine vise au déplacement des personnes en parfaite autonomie. On retrouve principalement les voitures autonomes ou également les transports urbains guidés (Tramways ou navette autonome).

Robotique industrielle : Utilisée principalement pour sa précision, sa rapidité et sa répétitivité dans ses mouvements, les applications typiques du milieu industriel sont le soudage, la peinture ou encore l'assemblage. Dans l'industrie, les installations ont augmenté de 11 %, le domaine industriel le plus important est l'automobile avec une part de 40 % des installations en 2019.

Les robots sont maintenant des systèmes répandus dans de multiples domaines et depuis de longues années. Grâce à l'évolution des nouvelles technologies, de nouveaux domaines robotiques naissent tels que la robotique collaborative que nous détaillons par la suite.

3.3 Robotique collaborative

Grâce au concept de l'Industrie 4.0 et à l'introduction de nouvelles technologies, la robotique collaborative, ou cobotique, permet désormais au système robotique d'évoluer avec plus d'autonomie et de manière plus interactive avec l'homme, optimisant ainsi leur objectif commun.

3.3.1 Description

La cobotique, néologisme de robotique collaborative, apparue fin XX^{ème} siècle à partir des mots "coopération" et "robotique" définit ainsi une collaboration entre l'homme et un robot. Avec des projets naissant et une volonté d'obtenir des gains de productivité rapides, les robots collaboratifs se développent de plus en plus mais restent une faible partie des robots industriels, atteignant une part de 4,8 % des 373 000 robots industriels installés en 2019, soit ≈15 000 unités en France. Leur adoption ne cesse cependant d'augmenter (11 %) permettant ainsi de débloquent de nouvelles opportunités et diversifier de plus en plus les applications. Grâce à leur conception différente d'un robot industriel classique, les robots collaboratifs apportent de nombreux avantages à leur intégration :

- Le principal avantage concerne la capacité d'un robot collaboratif à pouvoir évoluer en sécurité dans un environnement restreint, que ce soit dans des espaces étroits d'une ligne

de production ou aux côtés d'opérateurs sans protection, endroit où des robots industriels classiques évoluent en cage isolée. Cet avantage permet ainsi de réduire considérablement les coûts d'installation rendant accessible la robotisation à n'importe quelle entreprise.

- Le second avantage concerne les capacités d'un robot à venir assister un opérateur pour les tâches pénibles permettant ainsi un gain en ergonomie et en sécurité. Son utilisation permet également d'assister l'opérateur sur des tâches à faible valeur ajoutée octroyant des gains de productivité sans menacer d'emplois.
- Le 3^{ème} avantage est leur facilité de programmation : les robots collaboratifs peuvent être reprogrammés rapidement par l'opérateur sans nécessiter de connaissance en programmation, permettant ainsi d'adapter l'activité d'une entreprise en fonction de ses besoins. Elle peut ainsi changer de gamme de produit ou complètement d'activité avec simplicité.

Néanmoins, du fait de la coactivité entre l'homme et le robot, le déploiement de solutions cobotiques dans des milieux industriels nécessite une prévention encadrée des risques.

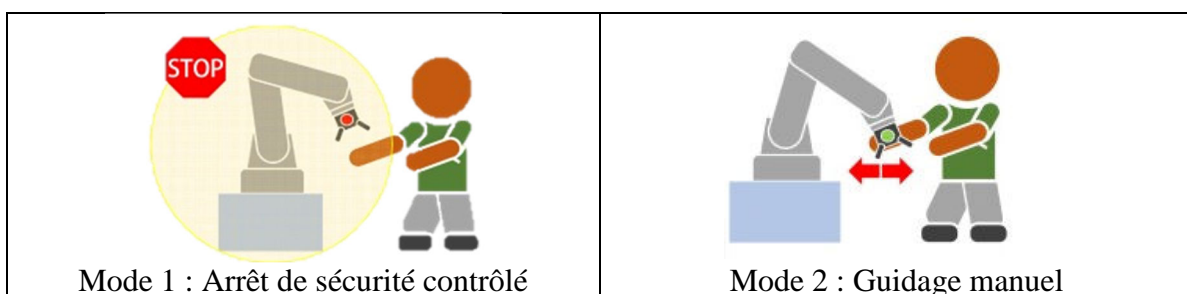
3.3.2 Intégration industrielle :

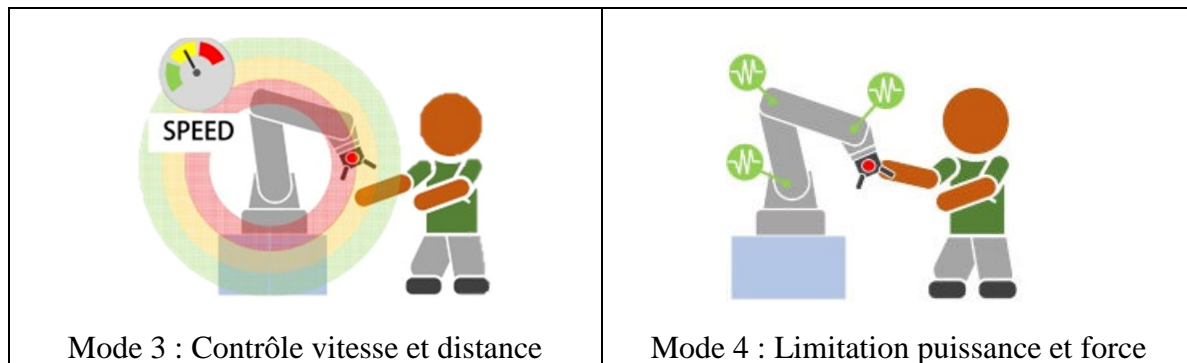
L'introduction de la robotique collaborative dans les milieux industriels pose de nombreuses questions de coactivité homme-robot et des risques associés [5]. En effet, de nombreux risques mécaniques d'écrasement ou de choc sont ainsi liés à la proximité et aux mouvements du robot. Ces risques doivent ainsi être identifiés et pris en charge afin d'éviter le moindre accident.

3.3.2.1 Mode de collaboration :

Pour ce faire, des mesures de prévention liées à la cohabitation sont encadrées et définies par la norme ISO 10218 [6] proposant 4 principes différents de mise en sécurité (Tableau 4).

Tableau 4: Mode de collaboration selon la norme ISO 10218





- Arrêt de sécurité contrôlé : Dans ce mode, le système robotique s'arrête lorsqu'un opérateur rentre dans la zone de collaboration [7]. Cette zone de collaboration peut être définie par des barrières matérielles ou immatérielles, des scrutateurs, ... afin de séparer l'espace en 3 zones. Une zone opérateur, une zone pour le système robotique et une zone de collaboration. Ce mode correspond à une collaboration de bas niveau. Il peut être implémenté avec un robot pas forcément appelé « collaboratif » en ajoutant des modules additionnels. Le point critique de ce mode réside dans le calcul du temps de réponse des instruments nécessaires afin de déterminer la distance parcourue par le robot avant « l'arrêt sûr » de son mouvement (i.e. en toute sécurité).
- Guidage manuel : Dans ce mode l'opérateur humain peut utiliser un dispositif à commande manuelle qui lui permet de déplacer simplement le bras robotique pour l'aider à réaliser son opération ou pour des tâches d'apprentissage [8]. Ce type de mode correspond typiquement au robot dit « cobot », utilisé afin de soulager l'opérateur dans le portage d'une charge. Le guidage est autorisé sous réserve de disposer d'une poignée de validation et d'un arrêt d'urgence.
- Contrôle de la vitesse et de la distance de séparation : Ce cas correspond à un partage d'un espace dit « de collaboration », où le robot adapte sa vitesse en fonction de la distance qui le sépare de l'opérateur. Le point critique de cette utilisation réside dans l'analyse de la vitesse et de la distance avec l'opérateur. De nombreux paramètres peuvent influencer l'évaluation de ces mesures afin de rendre le contrôle fiable du suivi dans temps-réel de l'opérateur dans l'espace de collaboration [9] [10] [11].
- Limitation de puissance et force : Dans ce mode, les interactions entre l'opérateur et le robot sont autorisées sous certaines conditions, permettant ainsi une collaboration au plus haut niveau. Grâce à ses moyens de détection, le robot stoppera son mouvement en cas de contact. Afin de ne pas risquer d'accident, la puissance et la force du robot sont limitées à leur minimum, permettant de réaliser la tâche attribuée. Cette haute collaboration permet ainsi d'intégrer un robot collaboratif au plus proche d'un humain dans des espaces restreints. De nombreux points de conception peuvent limiter les risques comme la réduction de la masse du robot, ou l'utilisation d'outils à surface arrondie.

3.3.2.2 Conformité :

L'utilisation de la robotique collaborative emmène de nombreuses améliorations tant en termes de rentabilité que d'ergonomie. Grâce à des nouvelles fonctions de sécurité facilement accessibles via les interfaces des robots, de nouvelles applications pourront être développées. Néanmoins, « sortir » un robot d'une cage tout en autorisant les interactions homme/robot n'est pas le plus évident et nécessite l'adaptation des normes de sécurité. Dans certains cas, la simple mise en place des fonctions de sécurité peut suffire mais doit être correctement paramétrée. Il n'y a pas de règles clairement définies pour la conception d'un système de robotique collaborative mais comme il s'agit d'un système englobant un robot avec des outils, pour l'intégrer il faut se référer à la directive machine nommée 2006/42/CE [12]. L'application de la norme ISO 12100 [13] permet à l'intégrateur d'identifier et de réduire les principaux risques liés à la sécurité de la machine. L'introduction de la coactivité entre l'homme et un robot engendre de nombreux nouveaux risques notamment mécaniques (écrasement et choc avec le robot et l'environnement). Aujourd'hui, la prévention de ces risques est cependant bien encadrée avec l'introduction de nouvelles normes venant appuyer celles existantes pour la mise en œuvre d'une cellule robotique. D'autre part, la norme NF EN ISO 10218-2 [14] indique les exigences de sécurité des robots industriels ainsi que les différents fonctionnements coopératifs accessibles entre un homme et un robot.


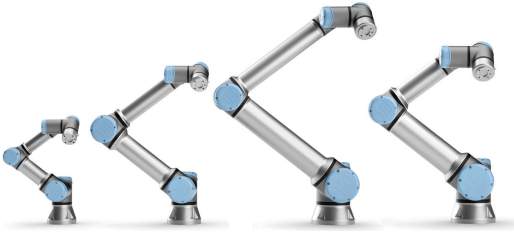


Malgré l'apparition des premiers robots collaboratifs au début des années 2000, ce n'est qu'en 2016 que sont publiées les premières exigences de sécurité concernant l'interaction avec les robots industriels collaboratifs. L'introduction de la norme ISO/TS 15066 [15] propose ainsi des lignes directrices à la conception et à l'organisation d'un espace de travail coopératif de nature à réduire les risques de coactivité. Sont notamment décrites des indications détaillées sur les vitesses maximales et les distances de séparation minimales à respecter ainsi que les forces admissibles lors d'un contact. Ce n'est là qu'une première base de travail qui sera amenée à être révisée à mesure du déploiement d'applications et d'autres avancées de recherche [16] [17]. Néanmoins quelques risques peuvent encore persister et nécessitent d'être mis en évidence via une analyse des risques du poste de travail.





3.3.3 Principaux robots collaboratifs

Malgré l'utilisation du terme robotique collaborative, l'utilisation des robots industriels dit classiques n'est pas interdite, mais nécessite une mise en sécurité plus importante. Depuis l'apparition des normes introduisant de nouveaux moyens de collaboration, de nombreux constructeurs de robots ont développé leur gamme de robots collaboratifs afin de répondre aux nouveaux marchés (cf. Tableau 5). Les robots s'appuient sur des technologies spécifiques pour pouvoir évoluer aux côtés de l'homme. Ils sont munis de différents capteurs permettant d'évoluer dans le mode de collaboration le plus à risque (limitation de la puissance et de la force), comme par la mesure des courants moteurs ou des couples moteurs. D'autres constructeurs utilisent des protections en mousse pour rendre "collaboratifs" des robots à plus forte charge, comme l'entreprise Fanuc avec le robot CR-35iA ayant une charge utile de 35 kg. D'autres constructeurs s'orientent sur la combinaison de capteurs tactiles et de proximité avec des mousses de protection permettant ainsi d'atteindre de plus grandes charges tel que le constructeur Comau avec la commercialisation d'un robot atteignant 170 kg de charge utile.

Bosch utilise également cette technologie de protection en venant l'adapter à un robot non collaboratif Fanuc LR Mate 200iD/7L, rendant ainsi leur système d'assistant APAS sécurisé et collaboratif. De nombreuses autres solutions de système tactile (ex : FOGALE robotics [18]) ou de proximité peinent à voir le jour [19] , mais semblent être la solution d'avenir qui permettrait de faire évoluer un robot en parfaite collaboration tout en évitant le contact.

Tableau 5: Différents robots collaboratifs en 2021

	
<p>ABB – Yumi Charge : 500g x 2 Bras Portée : 559 mm</p>	<p>Universal Robot - UR series : Charge : 3, 5, 10, 16 Kg Portée : 500 – 1300 mm</p>
	
<p>Bosch – APAS: Base: Fanuc LR mate 200iD/7L Charge: 7 Kg Portée : 911 mm</p>	<p>KUKA – LBR iiwa Charge : 7 – 14 Kg Portée : 800-820 mm</p>

	
<p>Franka Emika – Panda : Charge : 3 Kg Portée : 855 mm</p>	<p>FANUC – CR series Charge : 4 - 35 Kg Portée : 550 – 1813 mm</p>
	
<p>Stäubli – TX2Touch : Charge : 5 – 20 Kg Portée : 670 – 1450 mm</p>	<p>COMAU – Aura : Charge : 170 Kg Portée : 2800 mm</p>
	
<p>Omron – TM series Charge : 4 - 6 Kg Portée : 700 - 900 mm</p>	<p>Festo – BionicCobot : Charge : ≈ 1,5 Kg Energie pneumatique</p>

3.4 Exemple du robot de Foug de SG PAM

Afin de mettre en application cette nouvelle technologies de robotique collaborative, nous avons développé en octobre 2017 au sein de Saint-Gobain PAM un sujet de recherche préliminaire visant à améliorer certaines tâches d'un poste de production provoquant des Troubles Musculo-Squelettiques (TMS). Ces tâches concernent la manipulation par l'opérateur des noyaux, devant être réalisés à chaque cycle de production d'un tuyau et servant à modeler le côté emboîtement du tuyau lors de la phase de centrifugation (cf. 2.1). Ce projet a pour but de supprimer cette tâche de manipulation en l'automatisant avec un système de robotique collaborative. Dû à la proximité entre l'opérateur et le lieu d'implantation du robot, l'utilisation d'un robot collaboratif prend son sens et permettra une co-activité en sécurité.

3.4.1 Tâches à TMS

La manipulation du noyau est une tâche manuelle réalisée à la force des membres supérieurs de l'opérateur (voir 3.4.2, tâche en orange). Après chaque cycle de production, le noyau utilisé est détruit par la centrifugation de la fonte, tandis qu'un nouveau noyau doit être de nouveau positionné pour le cycle de production suivant. Ces noyaux peuvent peser entre 1,6 kg et 2,6 kg et l'opérateur en manipule entre 400 à 500 fois par poste de production représentant ainsi une masse totale de manipulation d'environ 1 tonne par jour et par opérateur.

3.4.2 Analyse du poste de travail

Le poste de production sur lequel nous nous focalisons s'organise autour du pilotage de la machine à centrifuger dont on peut séparer deux parties distinctes (cf. Figure 15, poste de production). D'une part, le pilotage à proprement dit de la machine à centrifuger et d'autre part, la manipulation des noyaux nécessaire au pilotage. On remarque que les tâches liées aux noyaux représentent d'importants risques de troubles musculo-squelettiques (tâches en orange) et les tâches de pilotage représente des tâches à forte valeur ajoutée sans risque de TMS (tâche en vert). L'opérateur doit se charger principalement du contrôle de sa machine et peut indépendamment, sur des temps faibles, préparer les noyaux. On retrouve Figure 13, les pourcentages de temps passés dans chacune des tâches sans automatisation où les tâches avec risque de TMS représente environ 27% du temps de l'opérateur.

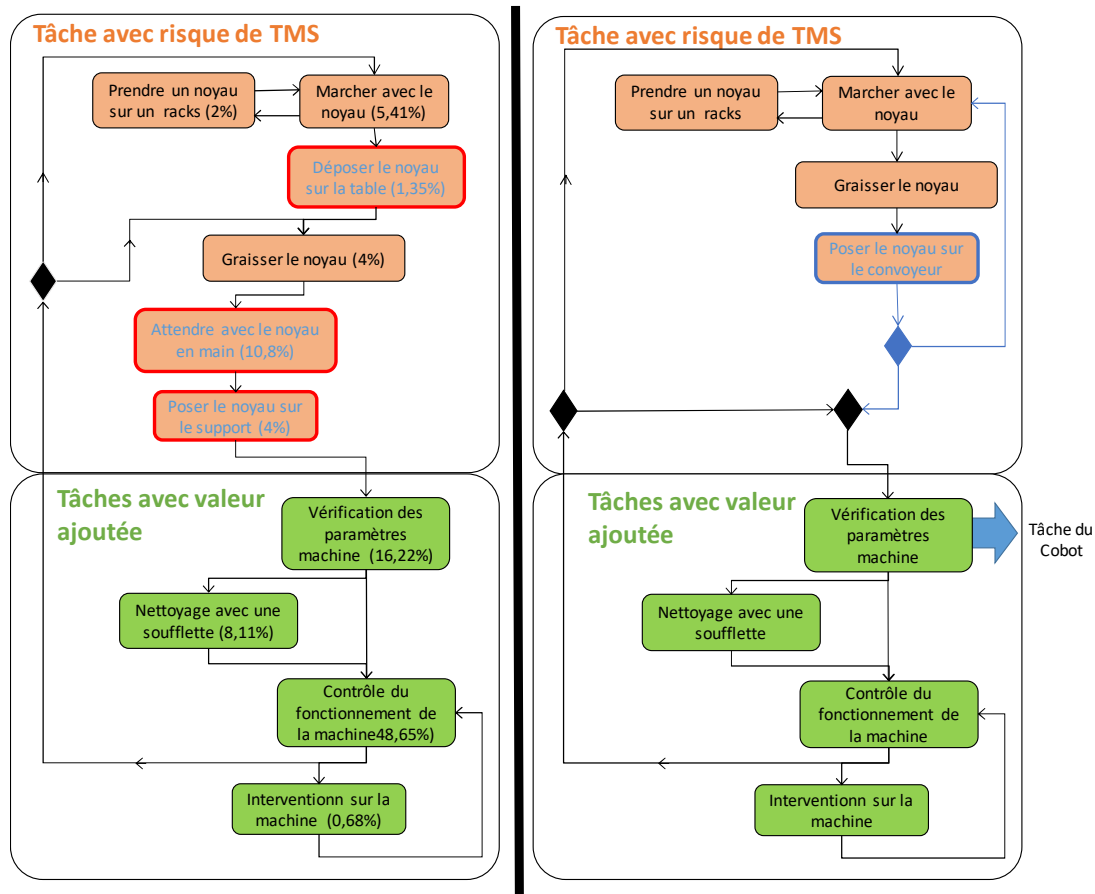


Figure 13: Cycle du poste de travail sans automatisation à gauche et avec automatisation à droite

La solution robotique proposée se base sur l'automatisation des tâches de manipulation des noyaux via un système de robotique collaborative. La mise en place de ce système aura pour but de supprimer deux des tâches créant le plus grand risque de TMS (tâches encadrées en rouge, Figure 13).

La Figure 14, représente les tâches réalisées par le système robotique en parallèle des tâches de l'opérateur vues précédemment. Pour se faire l'opérateur devra déposer les noyaux sur un convoyeur afin d'alimenter en noyaux le système robotique en continu pour qu'il réalise leur dépose sur la machine à centrifuger. Le robot prendra le noyau sur le convoyeur à l'aide de son préhenseur, se déplacera à une position d'attente afin de déposer le noyau sur le support de la machine à centrifuger.

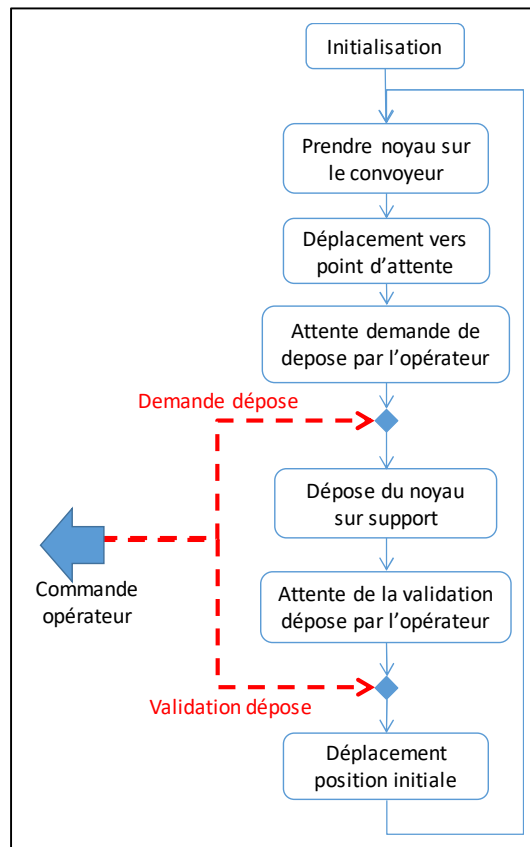


Figure 14: Cycle du poste de travail du système robotique

Ce système robotique mise en place en octobre 2017 est composé d'un robot collaboratif Universal robot UR10, disposant d'une capacité de charge de 10 kg, muni d'un préhenseur passif et d'un convoyeur à rouleau d'une capacité de 10 noyaux. L'ensemble a été placé sur une plateforme positionnée afin d'être mobile, juste au côté de la machine à centrifuger.

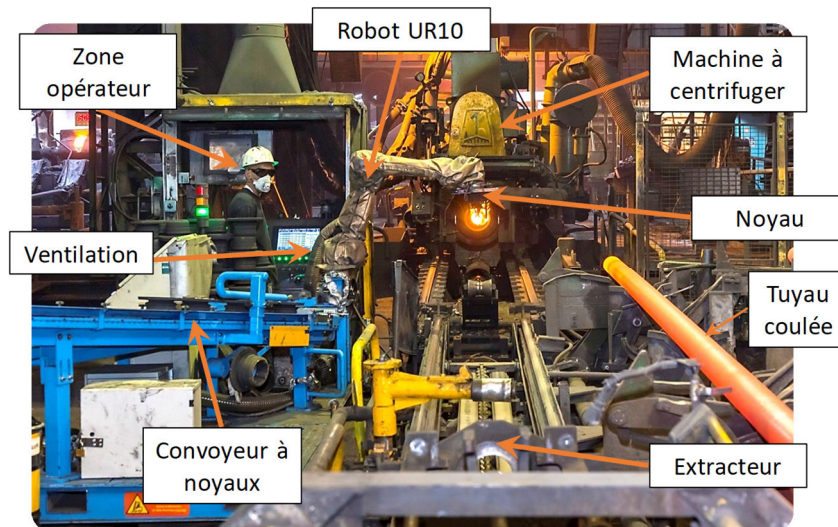


Figure 15: Système de robotique collaborative avec le convoyeur à noyaux.

Malgré une automatisation facile à mettre en œuvre, beaucoup de questions se sont posées sur la mise en conformité et la sécurité de notre système afin de contrôler la coactivité entre le robot et l'opérateur

3.4.3 Mise en conformité / sécurité

Le pilotage d'une machine à centrifuger nécessite un savoir-faire métier important et la présence de l'opérateur est nécessaire. Afin de sécuriser la coactivité avec l'opérateur, le robot est intégré avec une limitation de la puissance et de la force selon les recommandations des normes ISO 10218-2 et ISO/TS 15066 [14] [15]. Ces valeurs ont été réglées en fonction de la charge utile du robot (max 10kg) afin de déposer un noyau sur la machine à centrifuger. Les robots Universal Robot [20] offrent également différents outils de sécurité comme la configuration de murs virtuels qui permet de définir des plans que le robot ne pourra pas franchir afin de lui interdire l'accès à des zones de danger ou aux zones opérateurs. On retrouve ces plans Figure 16 par la définition de 3 points dans un plan des zones dangereuses tel que par exemple la machine à centrifuger. Ainsi le robot ne pourra pas dépasser ces plans définis et sécurisera d'une part son intégrité mais également celle des éléments environnants et de l'opérateur.

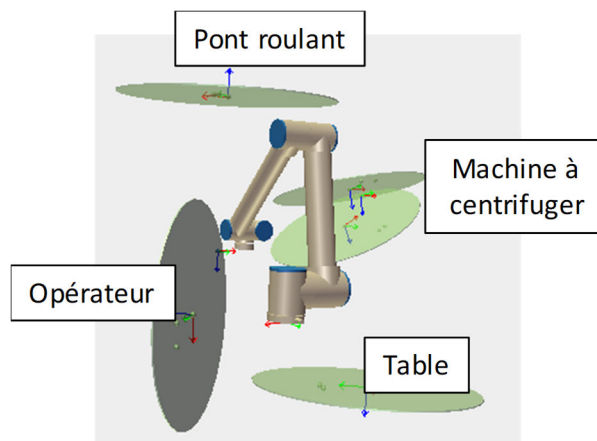


Figure 16: Plans de sécurité configurés sur l'interface robot UR10

Un robot collaboratif à lui seul possède les propriétés pour être sans risque mais comme dans notre cas, dès qu'un outil lui est installé, l'ensemble devient un nouveau système robotique au sens de la directive 2006/42/CE. L'application des normes n'est donc pas suffisante et une analyse des risques spécifique à chaque nouveau système devient nécessaire. Dans notre cas, de nombreux risques ont été identifiés suite à cette analyse, spécialement au niveau du préhenseur monté sur le robot susceptible de heurter la tête de l'opérateur. Suite à l'analyse, ce risque n'a pas pu être supprimé et il a donc fallu autant que possible le mettre en évidence, et procéder à l'arrêt nominal de sécurité contrôlé grâce à des dispositifs de protection en cas de choc. Ainsi, nous avons modifié le préhenseur initial afin de l'équiper d'une tige placée du côté de l'opérateur et qui permet de détecter un choc (Figure 17). En cas de choc, la tige de détection est activée déclenchant la mise en sécurité du robot via son interface de contrôle. Pour un aspect visuel, nous avons coloré la tige de détection en rouge et ajouté un spot lumineux qui viendra éclairer le préhenseur afin de prévenir l'opérateur et mettre en évidence la zone de danger.

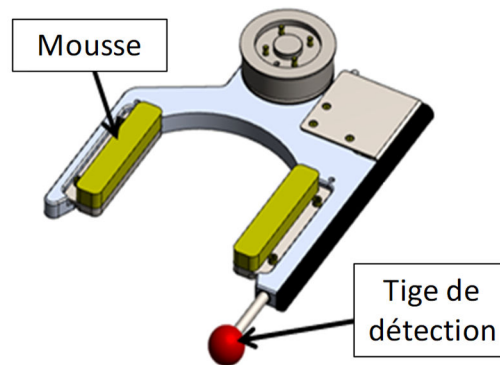


Figure 17: Préhenseur du robot avec système de détection de choc avec l'opérateur

Après différents essais préalables, la dépose du noyau a posé de nombreux problèmes tels que la mise en position de sécurité du robot lors d'une dépose trop brusque du noyau sur le support de la machine à centrifuger. Afin d'améliorer la dépose du noyau et en rendant le préhenseur plus compliant, nous avons ajouté de la mousse en silicone sur les points de prise des noyaux permettant ainsi d'exercer une force moins importante avec plus de compliance.

3.4.4 Conclusion :

Malgré la réussite d'intégration du système de robotique collaborative, cette conception a rencontré plusieurs difficultés. En avril 2017, la robotique collaborative était encore un sujet naissant où les différents acteurs n'avaient pas beaucoup d'expérience. Les différents intégrateurs sollicités pour la réalisation du projet sont restés méfiants puisque pour certains d'entre eux, le projet était le premier auquel ils participaient. Le manque d'expérience de l'ensemble des intervenants s'est ressenti dans le développement du système robotique ainsi que pour sa mise en conformité. Cependant cette première expérience a permis de tirer certaines conclusions intéressantes.

Le premier point concerne l'adaptation d'un robot collaboratif à un milieu spécifique. Dans un environnement sidérurgique, la température ambiante peut varier entre 20°C et 50°C dû à la présence de fonte liquide. La surchauffe des articulations d'un robot est bien connue pour

dans de tel milieux pour les robots industriels, mais le comportement des robots collaboratifs est quant à lui encore très peu étudié. Après la mise en production, la température des différentes articulations du robot UR10 a augmenté progressivement jusqu'à atteindre la valeur limite d'utilisation préconisée par le constructeur, soit 50°C. L'intégration d'un système de ventilation dans la house de protection du robot a permis de maintenir à température des articulations sous les valeurs maximales recommandées. Cette difficulté a mis en évidence un certain manque de maturité de la technologie, encore faiblement adaptée à l'ensemble des milieux industriels.

Le second point concerne la mise en conformité du système robotique. Par la collaboration d'un homme avec un robot, de nombreux risques émergent et doivent être identifiés par une analyse des risques réalisée en collaboration avec les différents intervenants. Dû à la faible expérience de l'ensemble des intervenants, de nombreuses difficultés pour identifier et prendre en compte ces nouveaux risques sont apparues. Une collaboration avec l'INRS⁴ a permis de définir le comportement nécessaire pour la mise en sécurité dans le cas d'un risque de choc avec la tête de l'opérateur. On remarque ainsi de façon générale qu'il y a encore trop peu de sujets développés en milieu industriel pour acquérir différentes compétences qui permettraient de développer des systèmes robotiques collaboratifs plus rapidement et plus efficacement.

Cependant nos doutes sur l'acceptation de la robotique collaborative par les opérateurs de la ligne de production ont vite disparu. Un certain enthousiasme est même apparu chez les opérateurs pour l'introduction de la robotique collaborative. Les améliorations ergonomiques de leurs conditions de travail ont été mises en avant par les opérateurs qui souhaitent voir et développer plus de solutions semblables intégrant des nouvelles technologies qui rendraient leur poste de production plus sécurisé.

3.5 Conclusion

La robotique prend une place importante dans le monde de l'industrie et le nombre d'applications ne cesse de grandir dans beaucoup de secteurs. L'arrivée de la robotique collaborative à la fin du XXème siècle a permis de mettre en collaboration des hommes et des robots pour réaliser des tâches dans un but commun.

Afin d'évoluer en toute coopération, ces robots sont dotés de capacités de sécurité leur permettant de s'arrêter en cas de contact. Ces nouvelles propriétés leur permettent d'évoluer dans des espaces restreints mais également, à terme, de réduire les pénibilités de certains postes générant des TMS chez les opérateurs. Grâce à leur développement, l'intégration de systèmes à base de robotique collaborative se base sur la directive machine couplée à une analyse des risques ainsi que certaines normes ISO. Ces normes définissent également les différents modes de collaboration possible entre un homme et un robot tel que le guidage manuel ou par la limitation en force et en puissance du robot. Pour ce dernier mode, il existe désormais de nombreux fabricants proposant des robots dit collaboratifs, c'est-à-dire munis

⁴ Institut national de recherche et de sécurité

de capacités de sécurité telles que des capteurs de force, de couple articulaire ou d'intensité moteur garantissent la détection d'un contact.

Nous verrons dans le chapitre suivant un nouveau moyen de commande de cette nouvelle génération de robots. L'objectif de ces nouveaux contrôleurs est de rendre les mouvements des systèmes robotiques moins automatisés mais de les rapprocher au maximum des mouvements réels de l'homme. Cette approche est appelée contrôle bio-inspiré.

4 Mouvement humain et contrôleur bio-inspiré

Nombreuses ont été les améliorations des systèmes robotiques ces dernières années, que ce soit tant par leur architecture physique que par leur architecture de contrôle. Dans ce chapitre nous nous focaliserons sur le contrôle bio-inspiré qui servira plus tard à téléopérer par l'opérateur un système robotique afin de réaliser à la place de l'opérateur des tâches dites rythmiques. Pour se faire nous commencerons par présenter dans quelle mesure nous pouvons retrouver des mouvements rythmiques dans les mouvements enregistrés par TEA d'un canaliste. Puis nous présenterons 2 modèles d'oscillateur, le modèle de Hopf et le modèle de Rowat-Selverston ainsi que leur comportement, dans un mode libre et dans un mode forcé ou un signal de forçage sera appliqué à l'oscillateur qui viendra perturber son comportement.

Sommaire

4.1 Tâches rythmiques	51
4.1.1 Description	51
4.1.2 Analyse des mouvements rythmiques en milieu sidérurgique.....	52
4.1.3 Analyse de la tâche de brossage.....	54
4.2 Oscillateur dynamique pour le contrôle robotique.....	56
4.2.1 Introduction des oscillateurs	56
4.2.2 Description des oscillateurs utilisés	57
4.2.2.1 Oscillateur de Hopf	57
4.2.2.2 Oscillateur de Rowat et Selverston	59
4.2.3 Mise en œuvre d'un contrôle par oscillateur dynamique.....	61
4.2.3.1 Description du schéma de contrôle	61
4.2.3.2 Signaux de forçage périodiques	62
4.2.3.3 Signal de forçage non périodiques de type rampe	63
4.2.3.4 Signaux humain enregistrés	64
4.2.3.5 Signaux téléopérer	64
4.2.4 Apprentissage du signal de forçage	65
4.2.4.1 Oscillateur de Hopf	65
4.2.4.2 Oscillateur de Rowat-Selverston.....	66
4.3 Conclusion	68

4.1 Tâches rythmiques :

4.1.1 Description :

On retrouve dans tout le règne animal, une capacité innée à générer des mouvements rythmiques. Que ce soit pour des fonctions vitales telles que la respiration, la mastication ou la locomotion, les mêmes modèles de contrôle moteurs sont observés chez les espèces vertébrées et les invertébrées. Chez les vertébrés, ces modèles de contrôle moteurs sont produits en grande partie par l'activité de groupes de neurones logés dans la moelle épinière dont les potentiels membranaires oscillent rythmiquement. On dénomme plus communément ces groupes de neurones du réseau locomoteur spinal par son anglicisme Central Pattern Generator (CPG). Par exemple chez l'homme [21], on pense que ces contrôleurs rythmiques sont utilisés pour toutes les formes d'activité nécessitant la production de rythmes pour les membres inférieurs ou supérieurs, telles que la marche, la course à pied, le vélo ou la natation. Le contrôle de ces mouvements rythmiques se partage en trois parties autour de la moelle épinière : la partie supra-spinale (représentée par le cerveau), la partie spinale (représentée par les CPG et des interneurons) et une dernière partie composée des retours sensoriels (principalement par les récepteurs de la peau et des muscles activés durant le mouvement). L'activation du mouvement rythmique sera déclenchée par une commande supra-spinale initiant par exemple la décision de commencer une marche, ces commandes sont ensuite transmises aux CPG afin de coordonner l'activité motrice du mouvement rythmique qui devient alors automatique. Les retours sensorimoteurs du membre activé arrivent à la moelle épinière et permettent de réguler la sortie du CPG en fonction des interactions avec l'environnement. Durant certaines expériences, Yang et al. [21] ont mis en évidence cet effet d'adaptation en venant ajouter des perturbations durant des cycles de marche d'un enfant. Ils ont observé que l'enfant s'est adapté à ces perturbations grâce au retour sensoriel et a modifié son cycle locomoteur en produisant une forme de marche adaptée à la situation.

L'ensemble des scientifiques suppose donc que tous les mouvements rythmiques chez l'homme ont donc un contrôle neuronal identique, effectué par des CPGs qui se composent de neurones oscillants générant des patrons rythmiques périodiques aux motoneurons produisant ainsi un mouvement rythmique. Les CPG ont également la spécificité de pouvoir fonctionner en parfaite autonomie indépendamment de signaux descendant du cerveau, les mouvements qu'ils engendrent sont donc automatiques et synchronisés avec la dynamique des membres contrôlés.

Le terme « mouvement rythmique » peut être défini de bien des façons [22] mais généralement il se réfère à un mouvement d'un ou des membres du corps humain (supérieur ou inférieur) qui se répète d'une même façon selon une constante de temps fixe. Ainsi, contrôlé par l'activité envoyée aux motoneurons, un mouvement rythmique se répète de la même façon grâce à l'activation alternée des muscles fléchisseurs et des muscles extenseurs associés au mouvement. Nombreux sont les mouvements où l'on retrouve ces caractéristiques. En dehors de la locomotion humaine, du sport ou de la musique, on retrouve aussi ces

mouvements automatiques dans des tâches de nettoyage ménager ou industriel (curage, brossage, polissage).

4.1.2 Analyse des mouvements rythmiques en milieu sidérurgique:

Dans notre cas d'étude, les tâches réalisées par l'opérateur demandent un savoir-faire métier important. Ces tâches nécessitent en effet une certaine connaissance technique du comportement du processus de fabrication, ainsi que son analyse et sa compréhension, mais également la réalisation optimale des gestes métier. Nombreux sont ces gestes relatifs à une tâche de brossage ou grattage et donc basés sur des mouvements rythmiques. Ainsi, durant le grattage du canal de coulée de fonte, l'opérateur, muni d'une brosse, alterne des mouvements de flexion et extension avec ses bras selon différentes phases et ce en fonction de ce qu'il souhaite faire. Un mouvement avec une grande amplitude et une faible fréquence pour brosser grossièrement ou de petites amplitudes avec une plus grande fréquence pour des retouches précises.

Les expériences d'enregistrement des mouvements de l'opérateur que nous avons menées avec l'entreprise TEA [1] nous ont permis de réaliser une analyse fine des mouvements de l'opérateur. Cette analyse nous a permis d'observer la nature des mouvements qu'il réalise sur l'ensemble de ses tâches. Nous avons pu ainsi déterminer les tâches rythmiques, « grattage canal » et « dépose du noir à canal », et des tâches plutôt réalisées par des mouvements discrets.

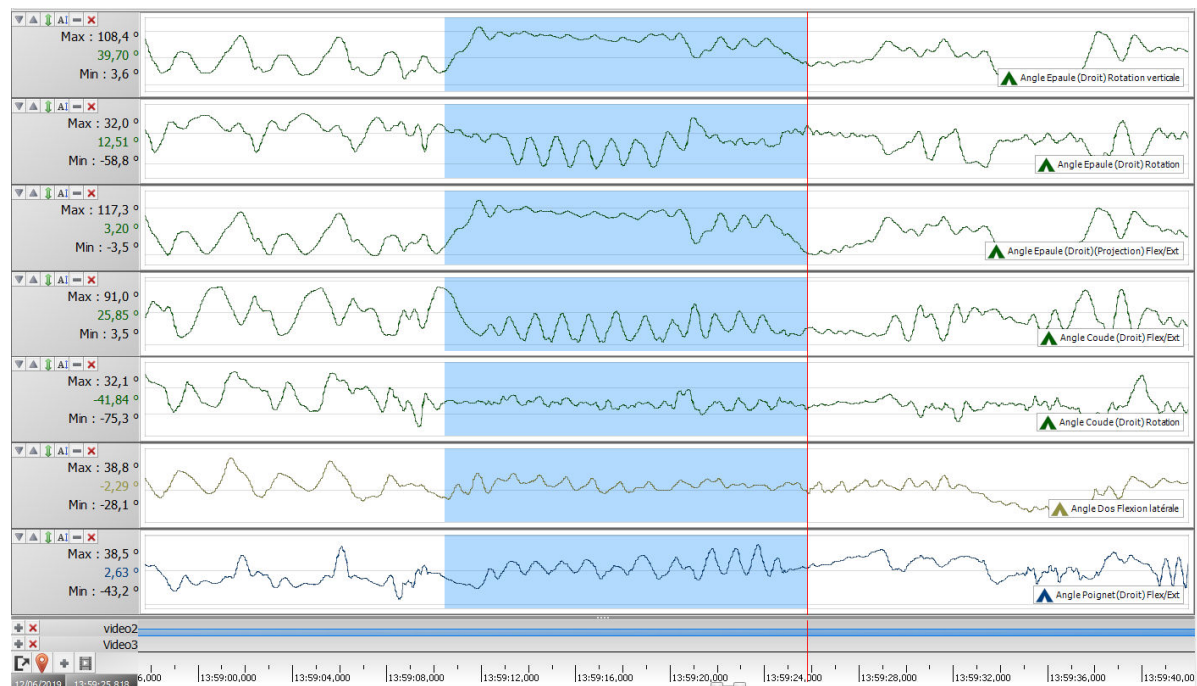


Figure 18 : Angles d'articulation du bras droit et du dos d'un opérateur durant une tâche de « dépose de noir à canal ». Extrait de 30 secondes d'enregistrement sur 1h30 au total

La Figure 18 représente une partie de l'enregistrement des angles articulaires d'un canaliste. Grâce à la synchronisation de ces données avec un enregistrement vidéo, nous avons pu nous focaliser sur la tâche de « dépose de noir à canal » (cf. 2.2.2.3), encadrée Figure 18 en bleu. On observe durant cette période que la majeure partie des articulations des membres supérieurs et du dos sont sollicitées par l'opérateur, selon un patron rythmique qui se répète

dans le temps. Les membres inférieurs n'ont pas fait partie de l'enregistrement et n'ont donc pas été analysés, mais nous avons observé qu'ils ne font pas partie des articulations majeures nécessaires à la réalisation de la tâche. On retrouve ainsi les caractéristiques fondamentales d'un mouvement rythmique : une amplitude de mouvement qui se répète de la même façon sur chaque articulation, ainsi qu'une fréquence constante du mouvement.

A l'identique de la « dépose du noir à canal », la Figure 19 montre une capture des données ergonomiques, en se focalisant sur la tâche de « grattage du canal » (c.f 2.2.2.2). Nous avons observé que pour cette tâche l'ensemble des membres supérieurs sont sollicités afin de produire ce mouvement. Sur cette figure on y retrouve plus particulièrement l'ensemble des articulations du bras droit ainsi que le dos de l'opérateur. Pour la tâche de grattage du canal la fréquence de l'ensemble des articulations impliquées dans le mouvement est évaluée à environ 0,8Hz.

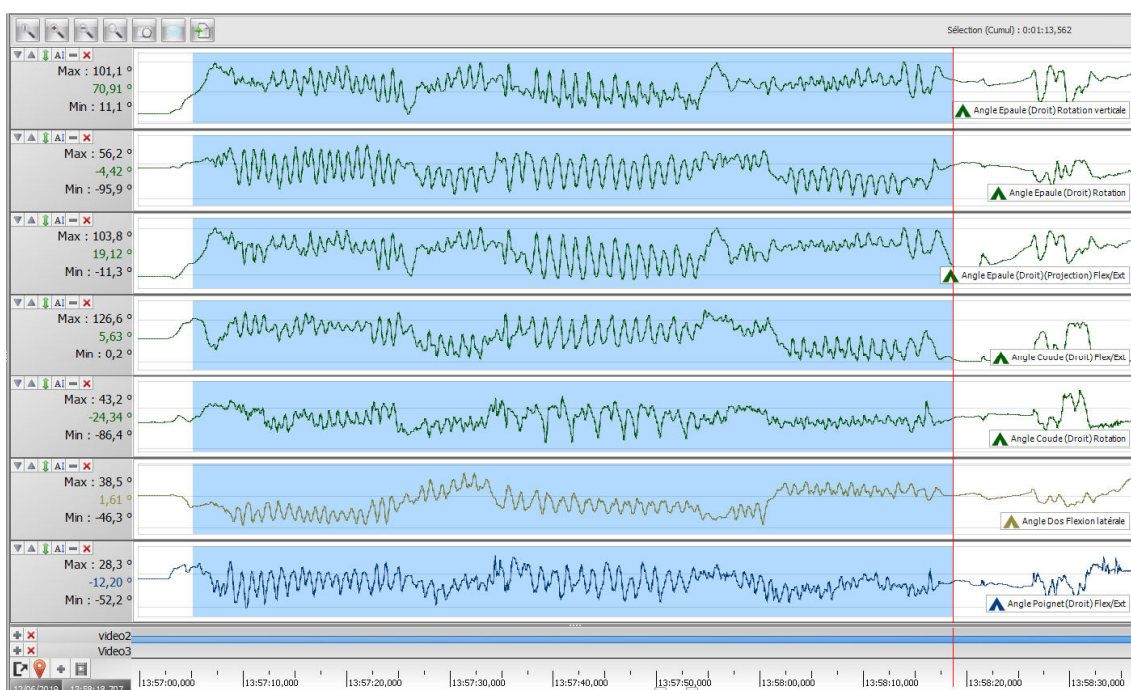


Figure 19 : Angles d'articulation du bras droit et du dos d'un opérateur durant une tâche de « grattage du canal ». Extrait de 2minutes d'enregistrement sur 1h30 total.

Le logiciel CAPTIV offre la possibilité de reconstituer le mouvement dans l'espace cartésien, et donc dans l'espace de travail, à partir des données de chaque articulation plus particulièrement en fonction de n'importe quel os du corps humain. Afin d'étudier et de comprendre en profondeur comment est réalisé le mouvement durant la phase de grattage d'un canal, nous avons reconstitué le déplacement du 2^{ème} métacarpe de la main droite de l'opérateur.

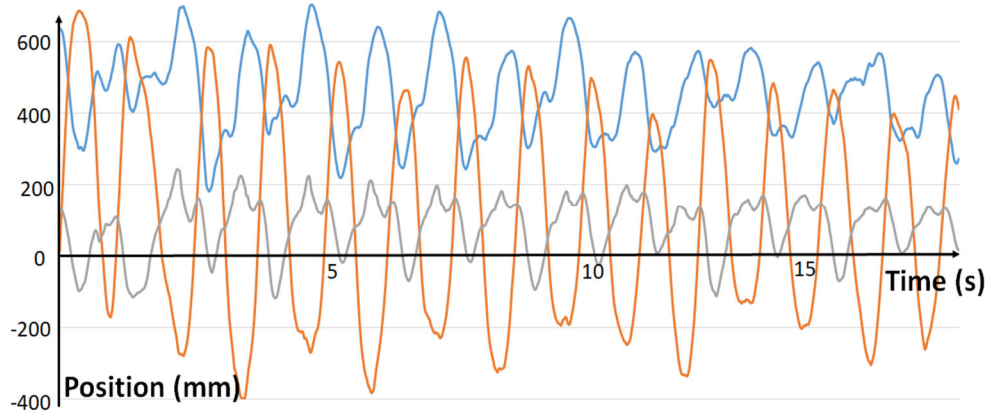


Figure 20 : Déplacement cartésien du 2 métacarpe de la main droite de l'opérateur durant la tâche de brossage. Bleu : axe X, Gris : axe Z, Orange : axe Y.

On retrouve sur la Figure 20, le déplacement de cet os de la main droite de l'opérateur sur les axes X et Z qui correspondent au plan vertical où s'exerce la force verticale avec la brosse et sur l'axe Y correspondant au mouvement de brossage. On observe également, que le mouvement peut être qualifié de rythmique puisqu'il apparaît un motif constant et périodique sur les trois axes (X, Y, Z) avec une fréquence de mouvement constante d'environ 0,8Hz.

4.1.3 Analyse de la tâche de brossage :

Dans l'ensemble des analyses, les données montrent que le coude et l'épaule sont les principales articulations du bras impliquées dans la tâche. Ces mouvements sont basés sur des motifs rythmiques selon une fréquence quasi constante de 0.8Hz, définie par l'opérateur en fonction de l'objectif de sa tâche, mais également contraint par ses propres caractéristiques physiques et celles de la surface à nettoyer.

En effet, comme suggéré dans [23], lorsqu'un humain exécute une tâche rythmique volontaire, la fréquence propre de son bras dépend de la raideur K due aux muscles, et de l'inertie I du bras durant le mouvement suivant l'équation : $w = \sqrt{K/I}$. L'inertie est définie par la masse des membres et peut être considérée comme constante pour un même individu. La raideur est ajustée par l'activité musculaire pour appliquer une force de frottement désirée sur la surface selon l'outil utilisé. Comme on peut l'observer Figure 21 ce type de mouvement rythmique converge vers un cycle limite.

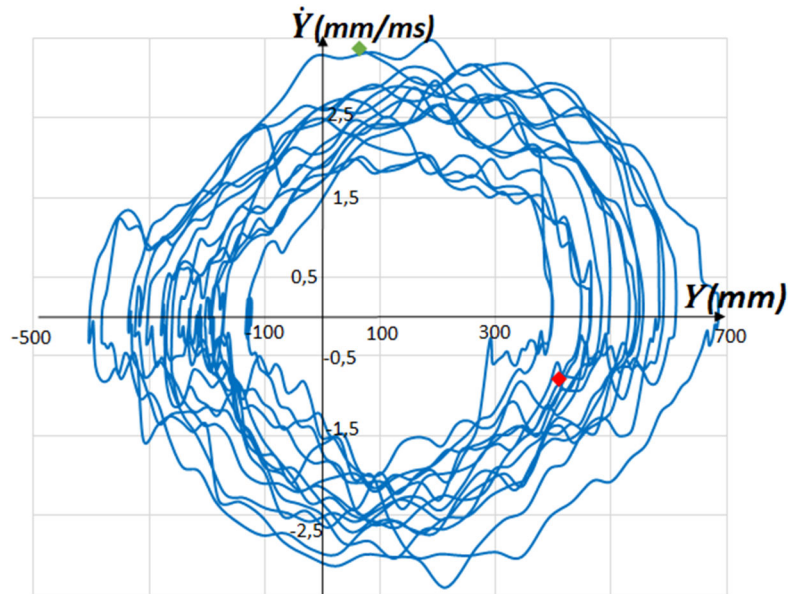


Figure 21 : Cycle limite du mouvement de grattage du canal reconstruit à l'aide des données enregistrées par les capteurs de mouvements de la société TEA. En vert : point de début de mouvement, en rouge : point de fin de mouvement.

Le cycle limite traduit la constance du mouvement de l'opérateur durant l'ensemble de la tâche de grattage canal. On observe cependant des variations de la position et de l'accélération indiquant que le grattage du canal n'est pas un mouvement nécessitant une grande précision. On retrouve des formes très similaires dans le comportement des oscillateurs dynamiques [24] dont certains modèles sont utilisés pour le contrôle de systèmes robotiques.

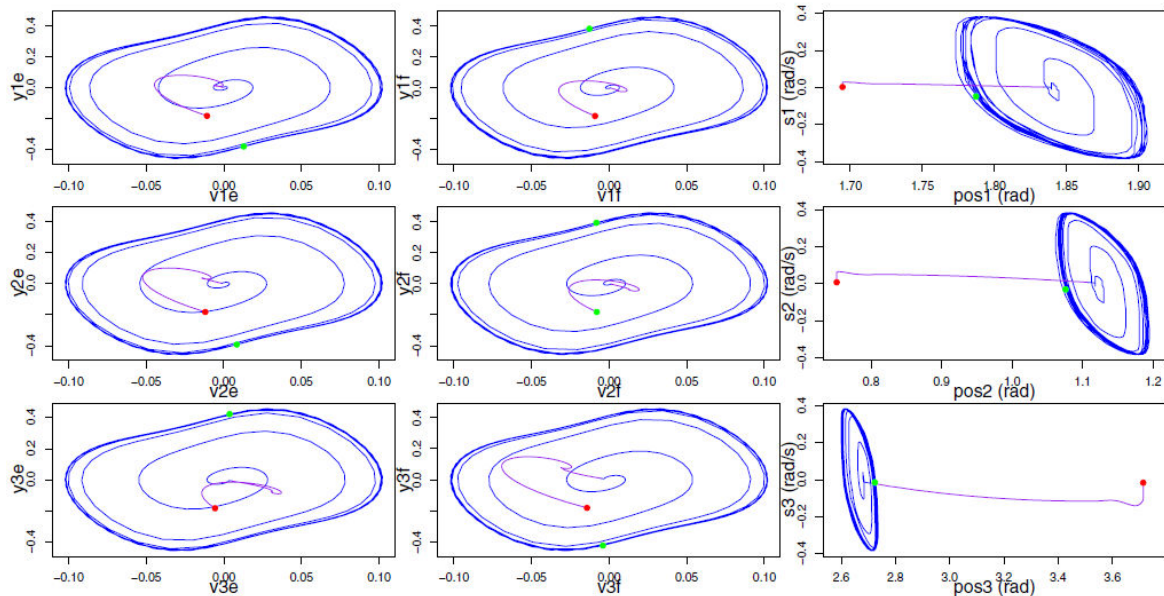


Figure 22: Exemple de cycle limite (rapport entre une position et un vitesse) pour différents essais réalisés avec l'oscillateur de Rowat et Selverston pour des expériences de Handshaking [25]

Par exemple, la Figure 22 montre le comportement d'un oscillateur lors du contrôle d'un bras robotique KINOVA pour réaliser un mouvement rythmique, ici du handshaking réalisé au LORIA [25]. On retrouve sur cette figure (à gauche) les cycles limites des sorties flexeurs et extenseurs relatives aux 3 articulations utilisées du bras robotique. On retrouve également (à

droite) les vitesses angulaires observées par l'utilisation d'oscillateur pour chaque articulation du robot. Ces différents comportements de cycles limites forment des trajectoires fermées des vitesses et positions angulaires du robot caractéristiques des mouvements rythmiques à l'image du comportement pour le « grattage du canal » Figure 21.

L'utilisation d'un oscillateur pour contrôler un système robotique permettra donc d'imiter le mouvement réalisé actuellement par l'opérateur en gardant les oscillations qui le caractérise sans un besoin de grande précision.

4.2 Oscillateur dynamique pour le contrôle robotique

Dans cette partie nous allons introduire les oscillateurs que nous avons mise en œuvre dans nos expériences et plus particulièrement deux modèles. Nous verrons dans un second temps leurs différents comportements en fonction de différents modes de contrôle.

4.2.1 Introduction des oscillateurs

Contrôler un système robotique dans le but de générer un mouvement rythmique n'est pas une chose simple car la plupart des modèles actuellement rependus de contrôleurs sont inspirés des modèles dynamiques des robots et nécessitent un nombre important de calculs sans apporter une bonne à l'environnement. Depuis de nombreuses années, les scientifiques se sont tournés vers des solutions inspirées des systèmes de contrôle du vivant. En section 4.1, nous avons vu le rôle des CPG dans le contrôle des tâches dites rythmiques et leur capacité à générer des oscillations auto-induites chez l'homme [26]. En s'inspirant des CPG biologiques dans le contrôle des mouvements rythmiques, de nombreux chercheurs ont proposé des schémas de CPG pour le contrôle des robots. Différentes utilisations de CPG ont été proposées pour la locomotion d'un robot quadrupède [27] ou pour un robot serpent amphibie, réalisant un mouvement d'exploration grâce à des CPG embarqués [28]. En mettant en œuvre les oscillateurs CPG dans le contrôle d'un bras robotique, ceux-ci génèrent ainsi des comportements plus adaptatifs [24].

Il y a plusieurs propriétés intéressantes dans l'utilisation des modèles de CPG à base d'oscillateurs dynamiques (également appelés oscillateurs à relaxation) dans une boucle de contrôle. Une première concerne leur capacité à présenter un comportement de cycle limite, c'est-à-dire de produire un contrôle rythmique stable indépendamment d'un signal d'entrée. Cela permet aussi au système de revenir rapidement à son comportement rythmique permanent après en avoir été écourté par une perturbation, rendant son utilisation robuste [29] [30]. Un second point concerne la capacité des CPG à également pouvoir s'adapter à une implémentation distribuée, intéressante pour les robots modulaires [31] [32]. Les modèles de CPG ont plusieurs paramètres permettant de moduler le motif de sortie, par exemple pour le contrôle de la locomotion, sa vitesse ou la direction de marche.

Une autre caractéristique intéressante des oscillateurs dynamiques est leur capacité à se synchroniser avec la dynamique de tout système périodique externe [33] qui lui est connecté, à condition que la fréquence propre de ce système soit proche de sa fréquence propre. Dans ce "mode forcé", la fréquence de l'oscillateur converge vers la fréquence du système externe créant un système dynamique global avec une nouvelle fréquence propre.

4.2.2 Description des oscillateurs utilisés

Dans cette thèse, nous avons choisi d'étudier deux des principaux modèles de CPG utilisés en robotique. L'un est un modèle mésoscopique des CPG biologiques, le modèle de Rowat-Silverston (RS) [34], l'autre est un modèle macroscopique, le modèle de Hopf [35]. Nous avons utilisé la représentation de Hopf car elle est connue pour être rapidement et facilement implantable dans une boucle de contrôle et le modèle de RS qui est plus complexe mais qui a des capacités à générer des mouvements discrets en plus des mouvements rythmiques. Différents autres modèles d'oscillateurs plus complexes à mettre en œuvre sont cependant utilisés pour les applications en robotique, comme le modèle microscopique de Hodgkin-Huxley [35], le modèle mesoscopique de Matsuoka [36] ou encore celui de Van der Pol [37].

4.2.2.1 Oscillateur de Hopf :

Le modèle de Hopf [34] est un oscillateur non-linéaire fréquemment utilisé en contrôle robotique dans de multiples domaines tels que la locomotion [38] [39] [40], les robots nageurs [41] [42], les robots sauteurs [43]. Cet oscillateur peut être considéré comme un modèle macroscopique des structures neuronales spinales.

L'oscillateur de Hopf est bien connu pour sa facilité d'intégration et sa bonne résistance aux perturbations [29]. Il se base sur les deux équations suivantes :

$$\dot{x} = (\mu - r^2)x - \omega y + \epsilon F \quad (1)$$

$$\dot{y} = (\mu - r^2)y - \omega x \quad (2)$$

Où $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, F correspond à une entrée considérée comme un signal de forçage appliqué à l'oscillateur via le gain ϵ , y correspond à la sortie de l'oscillateur, x est une variable interne. Le paramètre $\mu > 0$ détermine l'amplitude du signal de sortie qui peut être également influencée par le gain d'entrée ϵ . ω détermine la pulsation propre de l'oscillateur. On peut notamment calculer cette fréquence par l'équation : $frequency (Hz) = \omega \times 0,155$ [44].

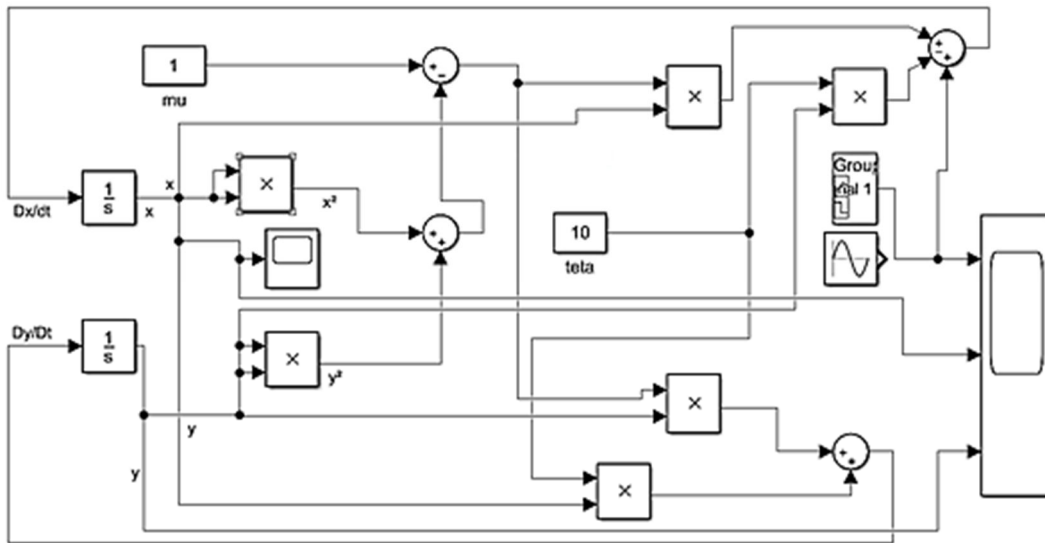


Figure 23: Modèle de Hopf sous Simulink

La Figure 23 représente une implémentation du modèle de Hopf dans Simulink de Matlab : Dans cette configuration, l'oscillateur de Hopf est défini dans un mode libre ou il n'est pas influé par un signal d'entrée F (ou de forçage). On retrouve dans ce modèle la sortie y de l'oscillateur, les différents paramètres de configuration tel que μ et ω (appelé θ dans le schéma bloc), et également la variable d'état x .

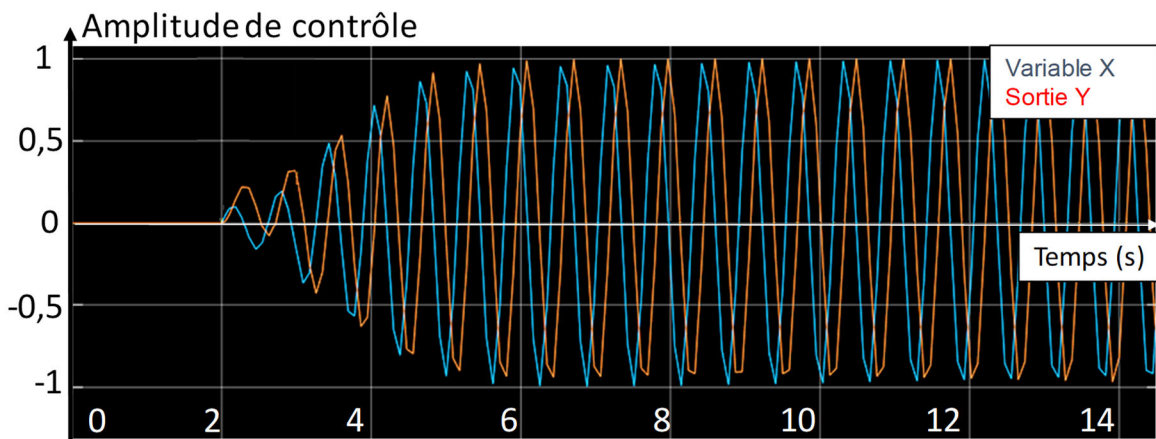


Figure 24: Comportement oscillateur de Hopf libre

La Figure 24 représente le comportement de l'oscillateur dans le mode libre. La fréquence de ces oscillations est définie par le paramètre θ , ici fixé arbitrairement à 10 et l'amplitude du signal par le paramètre μ . On observe également une première phase transitoire de l'oscillateur, période pendant laquelle le cycle limite de l'oscillateur se stabilise en fonction des paramètres définis préalablement. Cette phase transitoire peut être plus ou moins rapide avec lors de la synchronisation la présence d'un signal de forçage [30].

4.2.2.2 Oscillateur de Rowat et Selverston :

Le second modèle d'oscillateur rythmique utilisé dans cette thèse est celui proposé par Rowat et Selverston (RS) [45] [33] qui est une généralisation de l'oscillateur de Van der Pol. Ce modèle est intéressant car il est capable de générer différentes formes de signaux. En effet, seulement deux paramètres d'état permettent de contrôler et de modifier les modes de l'oscillateur parmi 4 comportements différents. Les oscillateurs de Rowat et Selverston ont été utilisés pour la première fois dans un problème de locomotion [46] et depuis pour concevoir différents neuro-contrôleurs pour diverses applications robotiques [47] [48] [49] [50].

Le modèle de Rowat et Selverston est un modèle mésoscopique bio-inspiré de neurone pour lequel on peut identifier deux groupes de courant, un courant rapide et un courant lent. Chacun d'entre eux est défini par une équation différentielle du premier ordre (équation (3) et (4)) :

$$\tau_m \frac{dV}{dt} = -(F(V, \sigma_f) + q - I_{inj}) \quad (3)$$

$$\tau_s \frac{dq}{dt} = -q + (\sigma_s \times V) \quad (4)$$

$$F(V, \sigma_f) = V - A_f \tan\left(\frac{\sigma_f}{A_f} V\right) \quad (5)$$

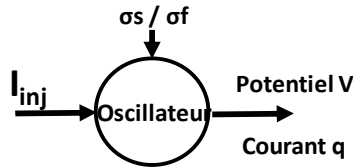


Figure 25: Oscillateur de Rowat et Selverston

Avec $\tau_m < \tau_s$. La constante de temps de la membrane neuronale (courant rapide) est représentée par τ_m , et τ_s représente la constante de temps pour l'activation des courants lents. I_{inj} correspond au courant injecté, c'est-à-dire l'entrée de l'oscillateur, V la tension de membrane cellulaire, c'est-à-dire la sortie de l'oscillateur et q représente le courant lent. Comme défini dans l'équation (6), $F(v, \sigma_f)$ représente une fonction non linéaire de courant/tension pour les courants rapides. On peut voir les différents comportements de cet oscillateur Figure 26 : la forme des courants rapides peut être linéaire ($\sigma_f = 0$), non linéaire mais bijective ($\sigma_f = 1$) et non linéaire et non bijective ($\sigma_f \geq 2$).

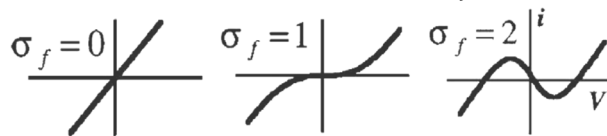


Figure 26: Effet du paramètre σ_f sur les courants rapides, extrait de [48]

$F(v, \sigma_f)$ est une partie fondamentale du modèle de Rowat et Selverston car cette fonction influence directement les différents comportements de l'oscillateur, en fonction des valeurs de σ_f et σ_s [33] [49]. Comme le montre la Figure 27, l'ensemble de ces modes peut être regroupé en fonction de leurs comportement selon la variation de σ_s et σ_f [48]

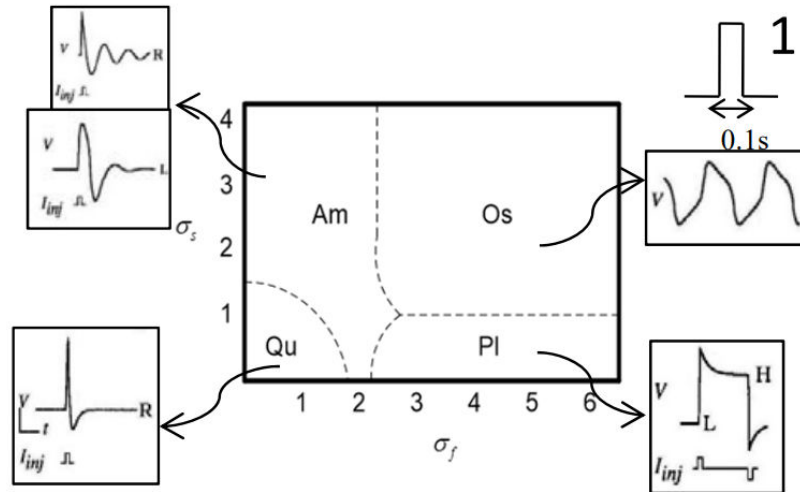
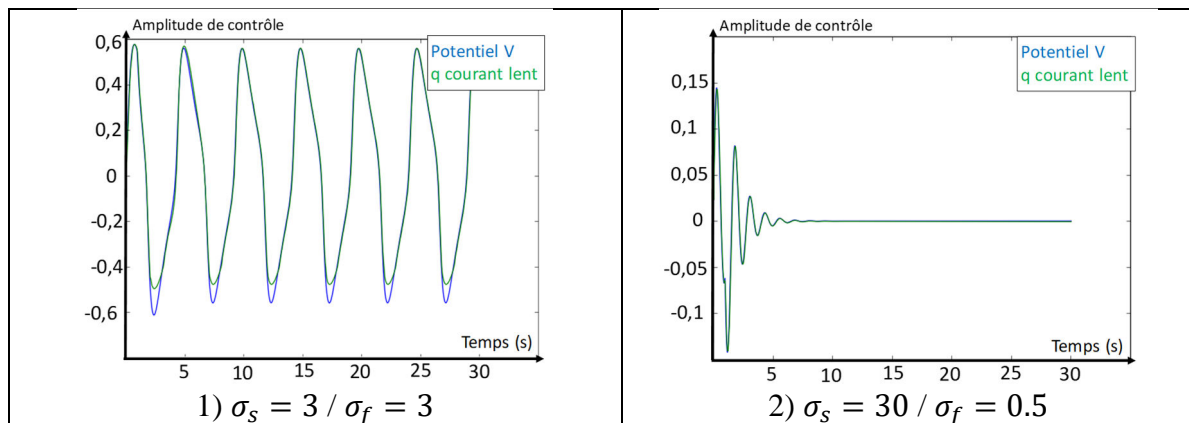


Figure 27: Différentes réponses à un échelon 1 de 0,1s, en fonction des valeurs σ_s et σ_f , extrait de [48]. Am : oscillation amortie ; Os : oscillation ; Qu : Hyper Amortie ; Pl : potentiel plateau

L'étude du comportement des paramètres du modèle de Rowat et Selverston montre que la fréquence d'oscillation est déterminée par la valeur de σ_s et σ_f , et l'amplitude est déterminée par la valeur A_f . Lorsque $\sigma_f > 3$ et $\sigma_s > 2$, la réponse est oscillante et la fréquence de ces oscillations sera déterminée par la valeur de σ_s . De plus si σ_f devient $\sigma_f < 1$ tandis que σ_s est assez grand, le modèle n'oscille plus mais répond de manière amortie. Cependant, si $\sigma_f > 1$ mais que σ_s est inférieur à une certaine valeur seuil, le modèle n'oscille pas mais montre des potentiels plateaux (réponse hyper amortie à plateau).

Nous avons vu précédemment que ce modèle pouvait exhiber différents comportements en fonction des valeurs de σ_s et de σ_f . Dans nos simulations Figure 28, nous avons fait varier ces valeurs afin de visualiser les différentes réponses lorsque I_{inj} est un échelon d'amplitude 0.3 durant 1s. Les différentes constantes de temps sont fixées à $\tau_m = 0,35$ et $\tau_s = 3,5$, et l'amplitude $A_f = 0.5$.

La Figure 28 montre les différentes réponses de l'oscillateur par représentation de sa sortie par le potentiel V et des courants lents, q :



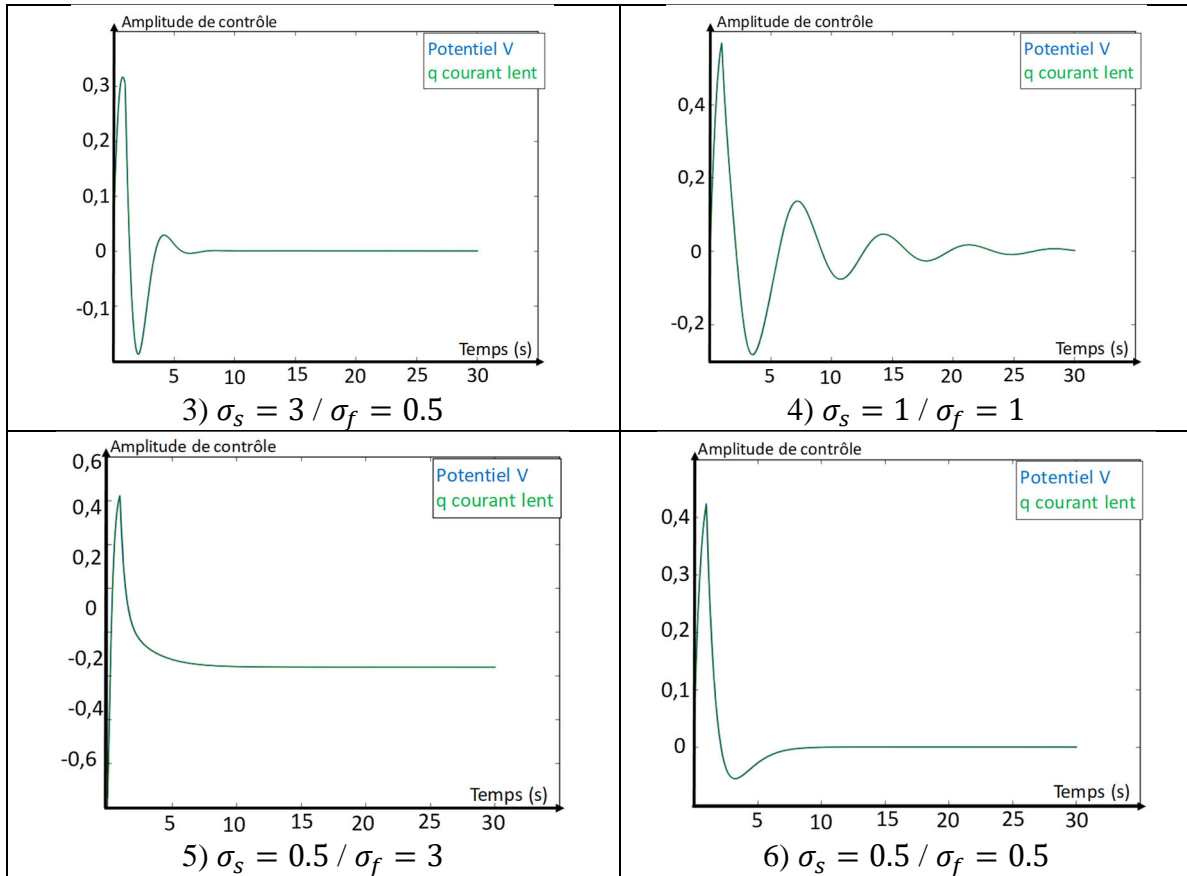


Figure 28 : Réponse de l'oscillateur de Rowat-Selverston

On observe que selon les valeurs de σ_s et σ_f l'oscillateur montre les différents modes d'activité observés également dans d'autres travaux [48]. Ces différentes réponses catégorisées Figure 27 sont retrouvées telles que pour la Figure 28.1 où l'on observe une réponse oscillante synchronisée sur I_{inj} . Sur les essais 2), 3) et 4) nous observons une réponse amortie dont les valeurs d'amortissement sont différentes en fonction de la valeur de σ_s . Concernant l'essai 5) nous observons une réponse en plateau fixé à -0.2 avec une valeur de $\sigma_f = 3$.

4.2.3 Mise en œuvre d'un contrôle par oscillateur dynamique

Nous avons vu précédemment le comportement des oscillateurs dans des fonctionnements libres mais ces deux modèles ont également la capacité de pouvoir être influencés par des signaux extérieurs. Les expériences suivantes vont mettre en évidence les comportements de chacun avec différents types de signaux que l'on appellera signaux de forçage ou d'entrée.

4.2.3.1 Description du schéma de contrôle

La mise en place d'un oscillateur dans une boucle de commande offre ainsi plusieurs propriétés intéressantes. Afin d'illustrer ces propriétés, nous avons réalisé plusieurs expériences avec différents signaux de commande d'un robot collaboratif Franka contrôlé par l'oscillateur ou de Hopf et Rowat-Selverston. On retrouve Figure 29, les différentes parties de notre schéma de contrôle :

- Signal désiré : Représente les différents signaux utilisés pour forcer l'oscillateur tel qu'un signal en dent de scie ou un triangle.
- Oscillateur : représente les deux oscillateurs utilisés, Hopf ou Rowat-Selverston.
- Cinématique Inverse : représente le bloc de contrôle Franka permettant de générer les commandes articulaires au robot à partir des commandes cartésiennes reçues depuis les oscillateurs.
- Robot Franka : représente la physique du robot Franka et ses différentes pertes mécaniques.

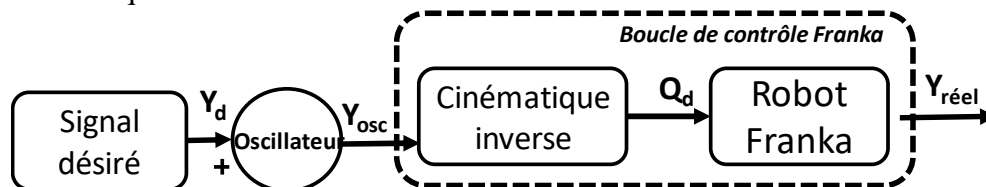


Figure 29 : Schéma de contrôle en boucle ouverte avec oscillateur

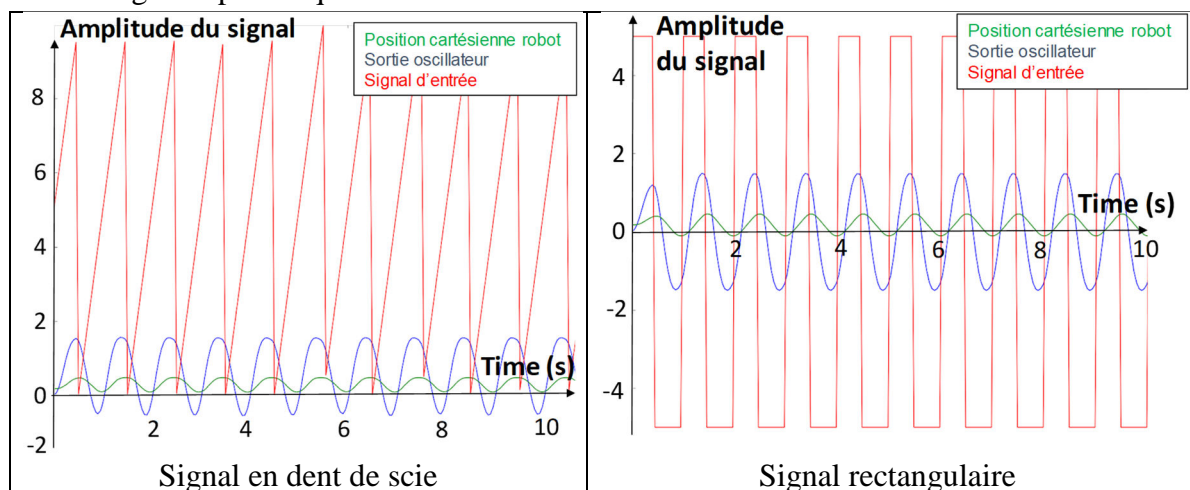
Une des propriétés les plus intéressantes des oscillateurs dynamiques est leur capacité à se synchroniser sur tout signal d'entrée périodique. Dans un mode sans signal de forçage l'oscillateur est capable de générer un signal quasi sinusoïdal à la fréquence définie par son ou ses paramètres (cf. 4.2.2.1).

Une seconde façon d'utiliser un oscillateur correspond à un mode forcé avec l'application d'un signal dit de forçage F sur l'entrée de l'oscillateur. Dans ce mode, l'oscillateur quittera sa fréquence naturelle pour se synchroniser sur la fréquence fondamentale du signal d'entrée et générera donc un signal synchronisé y .

4.2.3.2 Signaux de forçage périodiques :

La Figure 30 représente les différents essais réalisés avec l'oscillateur de Hopf pour différentes formes de signaux périodiques issus des formes fondamentales en automatique.

- Signaux périodiques :



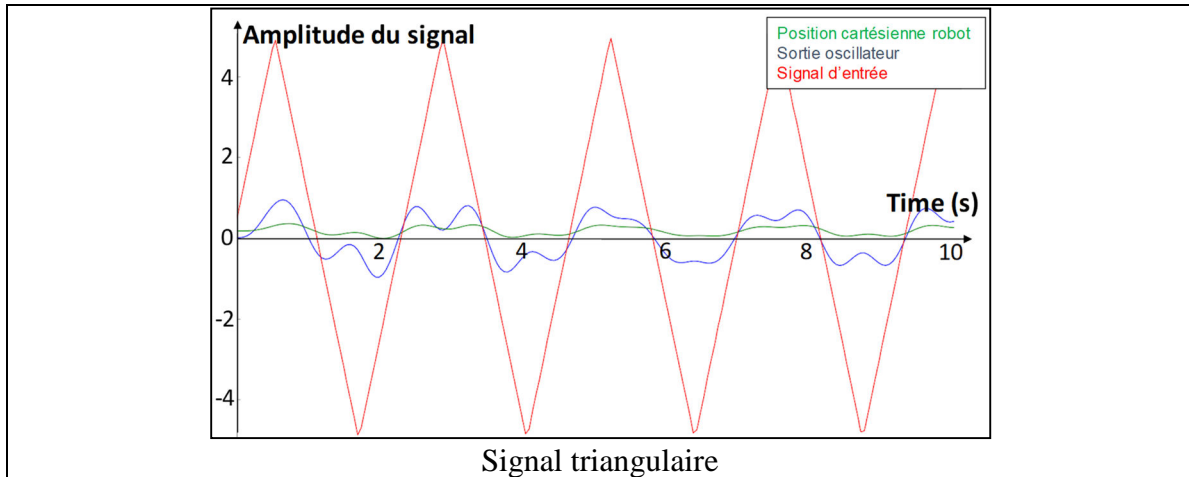


Figure 30: Oscillateur de Hopf avec signaux périodiques

On observe sur les différents essais de la Figure 30 que l'oscillateur de Hopf se synchronise sur la fréquence fondamentale du signal (1hz pour le signal en dent de scie et rectangulaire, 0,5hz pour le signal triangulaire) d'entrée quelle que soit sa forme. On observe également que selon la forme du signal d'entrée, la sortie de l'oscillateur peut être modifiée. Cette modification dépend de l'amplitude de ϵF dans l'équation (1) section 4.2.2.1, car le signal de forçage vient alors de façon plus ou moins importante perturber le cycle limite [29] de l'oscillateur, comme observé sur les essais avec signal en dent de scie.

4.2.3.3 Signal de forçage non périodique de type rampe :

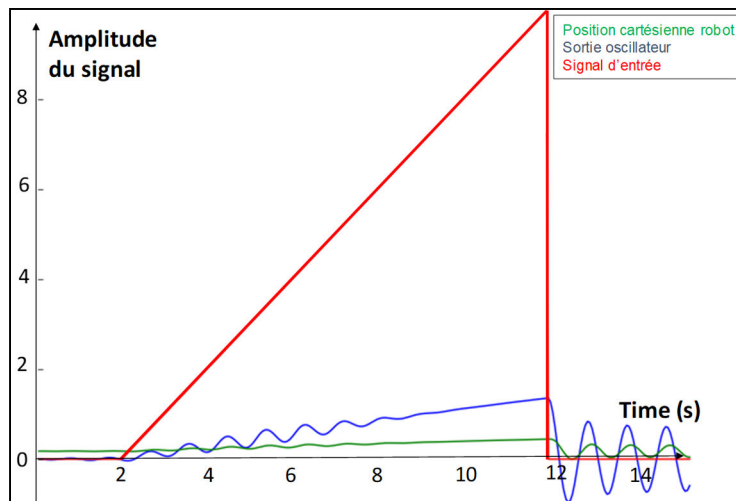


Figure 31: Comportement oscillateur avec signal rampe

Lorsque le signal n'est pas périodique, le cycle limite de l'oscillateur n'existe pas car il n'y a pas de fréquence sur laquelle se synchroniser. On observe également à $t = 12s$, qu'une fois l'amplitude du signal de forçage redescendue à 0, l'oscillateur n'est plus forcé et retrouve un comportement libre d'oscillation à sa fréquence propre définie par ω .

4.2.3.4 Signaux humains enregistrés :

Dans cette expérience, nous avons utilisé les signaux enregistrés lors de l'analyse ergonomique (cf. 2.2.3.2) du poste de canaliste. Le but est de forcer l'entrée de l'oscillateur avec le mouvement rythmique de l'opérateur reconstruit à partir de la position cartésienne du 2^{ème} métacarpien de la main enregistrée durant la tâche de brossage du canal.

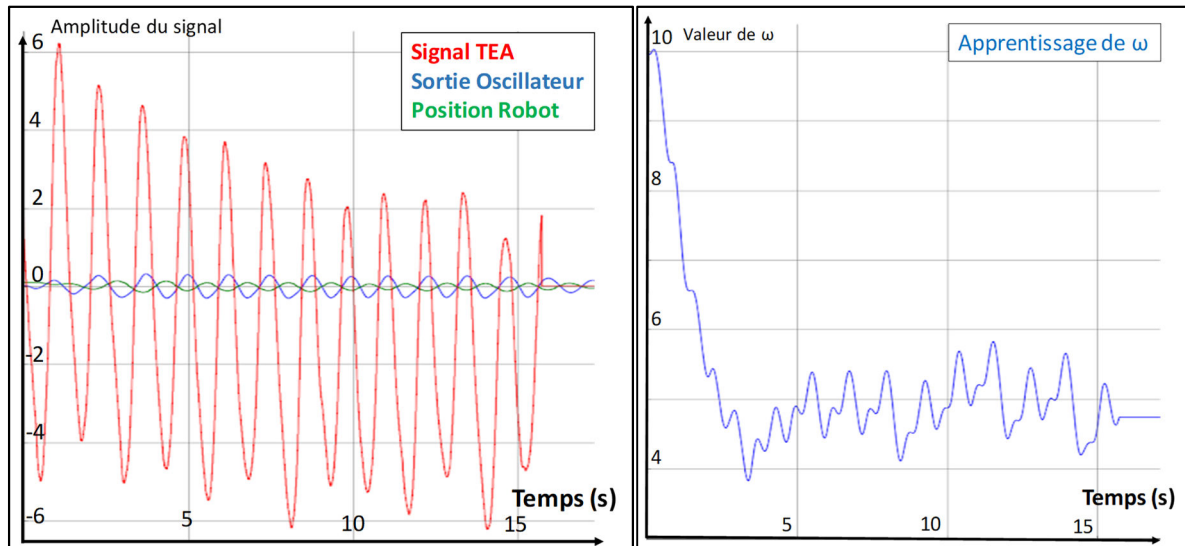


Figure 32: Gauche : Comportement de l'oscillateur avec le mouvement de la main de l'opérateur ; Droite : Apprentissage de ω avec signal du mouvement humain

On observe qu'après une phase transitoire, l'oscillateur se synchronise sur le mouvement enregistré de l'opérateur. On observe que malgré les variations d'amplitude du signal d'entrée, seule la fréquence intrinsèque du signal est captée par l'oscillateur. On peut ainsi dire que l'oscillateur semble uniquement capter la fréquence fondamentale du mouvement rythmique de l'humain.

4.2.3.5 Signaux téléopérés :

L'expérience suivante a consisté à mettre en œuvre un signal de forçage provenant d'un dispositif maître Falcon décrit en section 5.3.2, manipulé par l'opérateur lorsque celui-ci téléopère le robot pour lui faire exécuter un mouvement rythmique comme le brossage. Afin de mettre en œuvre les capacités de l'oscillateur avec différentes fréquences du signal d'entrée, l'opérateur a effectué une même tâche avec 3 différentes fréquences du mouvement de contrôle. On observe Figure 33 les 3 différentes fréquences, une première entre 0s-10s, une seconde entre 15s-30s et une troisième entre 35s-50s avec entre chaque séquence un arrêt du mouvement du Falcon.

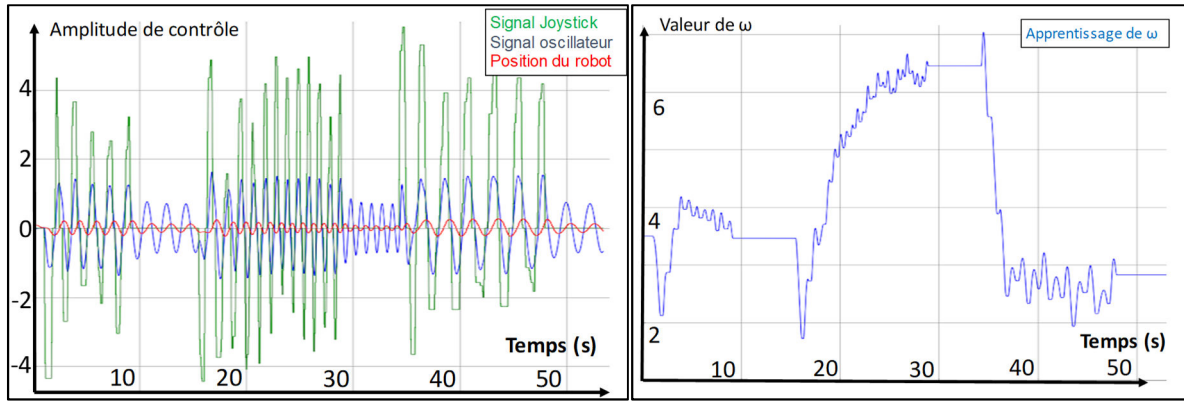


Figure 33: Gauche : Comportement de l'oscillateur avec le dispositif maître Falcon et variation du mouvement désiré; Droite : Apprentissage de ω en fonction des 3 changements de fréquence du mouvement [0s-10s], [18s-30s] et [35s-45s]

On observe Figure 33 que dans cette expérience, l'oscillateur suit la fréquence du signal de forçage, même si celle-ci varie durant le temps de contrôle. On constate également que l'oscillateur change la forme du signal de contrôle provenant du Falcon en lissant les instabilités. En effet, on observe que le signal du Falcon sature sur les grandes amplitudes correspondant aux butés mécaniques de celui-ci qui sont atteintes lors de la réalisation du mouvement rythmique par l'opérateur. On peut également dire que l'oscillateur se comporte donc comme un filtre sélectif synchronisé sur la fréquence fondamentale du signal d'entrée, ce qui permet de générer un signal de commande stable pour le robot.

4.2.4 Apprentissage du signal de forçage :

Nous avons pu voir que les oscillateurs disposent de capacités de convergence, nous allons voir que grâce à l'ajout d'une règle d'apprentissage, les oscillateurs vont pouvoir modifier leurs propres paramètres en fonction des différents types de signaux d'entrée. Cet apprentissage permettra de générer un signal adapté aux différentes fréquences apprises même si le signal de forçage disparaît.

4.2.4.1 Oscillateur de Hopf :

Righetti et al. [29] [30] ont proposé d'intégrer dans les équations de l'oscillateur de Hopf, une règle spécifique d'apprentissage inspirée des connaissances sur l'apprentissage Hebbien, largement utilisée dans les apprentissages des réseaux de neurones. Righetti et al. montrent ainsi qu'avec cette règle, l'oscillateur de Hopf peut apprendre la fréquence fondamentale du signal de forçage en modifiant sa fréquence propre. Cette règle est régie par l'équation suivante :

$$\dot{\omega} = \epsilon F \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (6)$$

On retrouve dans cette équation la variation du paramètre ω permettant de modifier la fréquence propre de l'oscillateur en fonction de celle du signal d'entrée. Dans cette équation $F(t)$ est le signal de forçage, pouvant être amplifié en fonction du pas d'apprentissage ϵ , x et y sont les variables de l'oscillateur. Ainsi une diminution de la fréquence du signal de forçage

fera baisser la valeur de ω , et à l'inverse, une augmentation de la fréquence augmentera la valeur de ω .

- Apprentissage avec un mouvement humain enregistré :

La Figure 32, partie de droite, montre la variation du paramètre ω durant les essais réalisés avec comme signal de forçage les mouvements humains enregistrés lors de nos expériences avec l'entreprise TEA, (voir section 4.2.3.4). Après une phase de transition d'environ 4s, qui correspond à la phase d'apprentissage de l'oscillateur, on observe que la valeur ω initialement fixée à $\omega = 10$, soit l'équivalent de 15,5 hz (cf. 4.2.2.1), diminue car l'oscillateur est forcé par un signal de fréquence 0.8Hz. Après cette phase de transition, cette valeur se stabilise autour de $\omega = 5$ ce qui correspond à une fréquence de 0,8Hz du mouvement de l'opérateur durant la tâche de brosse. Le temps de la phase transitoire peut être allongé ou réduit par la modification du pas d'apprentissage ϵ , mais avec un risque d'instabilité et donc de non convergence de l'apprentissage si ϵ est trop grand. Durant nos expériences, ϵ a été fixé à la valeur de 1 correspondant à une synchronisation acceptable pour nos applications.

- Apprentissage avec signal téléopéré :

La Figure 33 partie de droite, montre l'évolution de ω lorsqu'on applique à l'oscillateur le signal du dispositif maître Falcon (décrit à la section précédente 4.2.3.5) afin de correspondre à une téléopération du robot qui reproduit une tâche de brosse. On peut ainsi voir que la règle de Righetti permet à l'oscillateur de suivre la fréquence du signal d'entrée même si celle-ci est modifiée. Sur la Figure 33, la fréquence est modifiée 3 fois, et on observe que l'oscillateur apprend à chaque changement la nouvelle fréquence. Initialement fixée à la valeur de 3, la valeur de ω change une première fois vers la valeur 4 (0,62 hz) puis une seconde fois vers 7 (1,085hz), puis une dernière fois vers la valeur 3 (0,465 Hz).

Grâce à cette capacité d'apprentissage, l'oscillateur modifie sa fréquence propre à chaque changement de fréquence du signal de forçage. Même si le signal d'entrée est interrompu, l'oscillateur générera un signal à la dernière valeur de ω apprise, comme on peut l'observer sur les périodes 9s-18s, 28s-35s et après 47s.

4.2.4.2 Oscillateur de Rowat-Selverston :

Avec σ_s et $\sigma_m > 3$, l'oscillateur de Rowat et Selverston fonctionne en mode oscillant, il peut être alors être utilisé pour ses capacités de synchronisation lorsqu'on lui applique un signal externe nommé I_{inj} , si ce signal a une fréquence du même ordre que la fréquence propre de l'oscillateur.

Comme pour l'oscillateur de Hopf, la règle dynamique d'apprentissage Hebbien proposée par Righetti et al. [29] peut être appliquée sur les paramètres du modèle de Rowat-Selverston afin qu'il puisse modifier sa fréquence propre et lui permette d'apprendre la fréquence d'un signal de forçage. Cela a été démontré par l'équipe Neurosys du LORIA, voir [50] pour plus de détails mathématiques.

Par l'implémentation de cette règle, l'apprentissage de la fréquence d'oscillation peut être faite par la modification de σ_s en fonction du signal de forçage F appliqué à l'oscillateur et pondéré par ϵ selon l'équation suivant :

$$\dot{\sigma}_s = 2\epsilon F \sqrt{\tau_m \tau_s} \sqrt{1 + \sigma_s - \sigma_f} \frac{y}{\sqrt{V^2 + y^2}}; \quad \sigma_f < 1 + \sigma_s \quad (7)$$

On retrouve dans cette équation les différents paramètres tels que les constantes de temps τ_m et τ_s , les paramètres de conductance σ_s et σ_f ainsi que le pas d'apprentissage ϵ . On retrouve également les différentes variables d'état de l'oscillateur de Rowat-Selverston tel que $y = \dot{V}$ la variation de la variable de sortie et également la variable de sortie V .

On peut voir dans cette équation (7), que lorsque le modèle de Rowat-Selverston est forcé avec un signal de forçage F , la valeur de σ_s sera modifiée jusqu'à la synchronisation mutuelle. On observe sur la Figure 34 la synchronisation de l'oscillateur sur le signal d'entrée provenant d'un dispositif maître Géomagic qui sera présenté au chapitre suivant. Dans une première phase [0s-25s], l'oscillateur se synchronise sur une première fréquence puis dans un deuxième temps [25s-55s] sur une seconde fréquence. On observe également que l'oscillateur se synchronise sur la fréquence fondamentale du signal d'entrée se comportant ainsi comme un filtre sélectif. Il génère ainsi un signal de sortie V synchronisé sur la fréquence fondamentale du signal d'entrée.

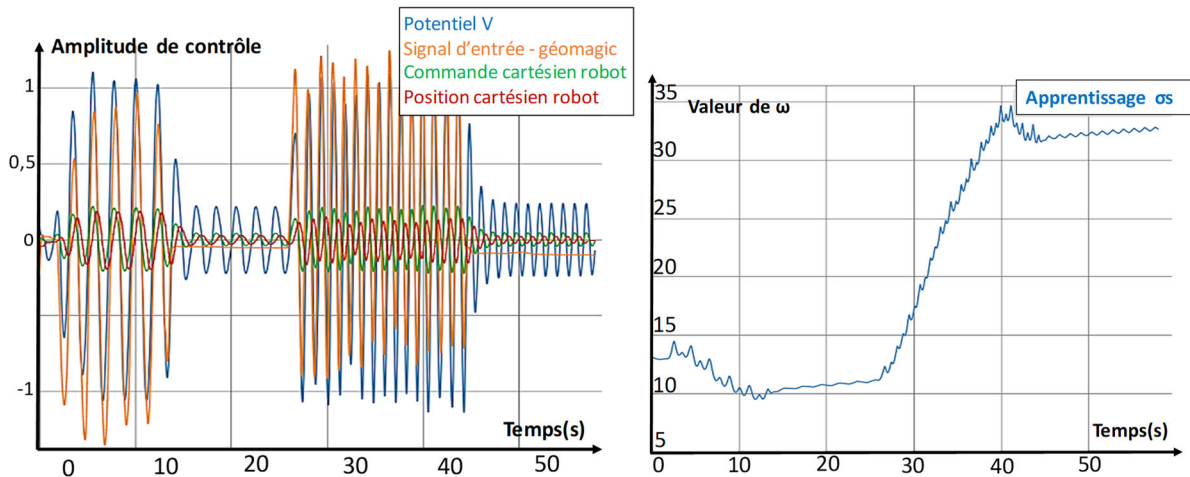


Figure 34: Gauche : Comportement de l'oscillateur de Rowat et Selverston avec un signal d'entrée provenant du dispositif maître Géomagic ; Droite : Apprentissage σ_s avec deux changements de fréquence [0s à 15s] et [25s à 45s]

Grâce à cette règle d'apprentissage, il est donc possible d'adapter la fréquence naturelle d'oscillation du modèle de Rowat-Selverston sur le signal de forçage. La Figure 34 partie de droite représente la valeur de σ_s durant l'essai réalisé avec le dispositif maître Géomagic. On observe sur l'intervalle une variation de ce paramètre en fonction du signal de commande : [0s à 15s] une première synchronisation sur la première fréquence de commande puis de [25s à 45s] la synchronisation sur une seconde fréquence plus grande. Sur les périodes [15s à 25s] et [45s à 60s] sans signal de commande, on observe que l'apprentissage du paramètre σ_s s'arrête, ce qui permet ainsi de délivrer un signal à fréquence précédemment apprise.

Néanmoins nous observons sur les périodes sans commande une dérive du paramètre σ_s modifiant la fréquence propre de l'oscillateur. Après de nombreux essais, nous avons identifié que cette dérive provient du signal de forçage F qui n'est pas réduit par le dispositif maître à une valeur nulle mais à une valeur légèrement inférieure à 0, agissant ainsi comme une dérive.

Concernant l'amplitude, afin d'améliorer le contrôle réalisé par le modèle de Rowat-Selverston, il a été proposé dans [50] d'apprendre l'amplitude A_f en fonction des amplitudes d'oscillation du signal d'entrée F afin de moduler l'amplitude de la sortie V à la même échelle que le signal F . Ce second apprentissage permet de rendre encore plus efficace la synchronisation de modèle de Rowat-Selverston et s'écrit, avec les paramètres, ν le facteur d'échelle et μ le pas d'apprentissage :

$$\dot{A}_f = -\mu \left(\left(\nu \frac{\sigma_f V}{A_f} \right)^2 - F^2 \right) \quad (8)$$

Durant les essais de mise en place de cet apprentissage, nous avons rencontré des difficultés à stabiliser la valeur de A_f sur le signal F relatif à la commande du dispositif maître. Par la présence même de F et de A_f dans la formule d'apprentissage des gains direct, l'apprentissage se fait ainsi de façon instable et non implémentable pour le moment. C'est un aspect du travail qu'il faudra approfondir dans l'avenir.

4.3 Conclusion :

Suite à l'enregistrement des mouvements du poste de canaliste grâce à l'entreprise TEA, nous avons pu observer que certaines des tâches de l'opérateur sont basées sur des mouvements rythmiques. En fixant des IMU sur chacune des articulations des membres supérieurs de l'opérateur, nous avons pu remarquer un certain pattern des mouvements selon une fréquence et une amplitude. Concernant la tâche de grattage du canal, nous avons pu observer que lorsqu'on trace le cycle limite de ce mouvement, il représente une trajectoire fermée similaire à celle générée par les oscillateurs dynamiques. Dans notre mémoire nous avons mis à l'étude deux différents oscillateurs, un premier, l'oscillateur de Hopf car c'est un modèle répandu dans le contrôle robotique et disposant de bonne performance, et un second, l'oscillateur de Rowat Selverston intéressant car il permettant à la fois de contrôler des mouvements rythmiques et des mouvements discrets.

Différentes expériences avec différentes formes de signal de forçage nous ont permis de découvrir les capacités de ces oscillateurs dynamiques. Dans un mode libre sans signaux de forçage, l'oscillateur génère un signal rythmique à sa fréquence propre initialement configurée grâce aux paramètres. Lorsqu'un quelconque signal de forçage est appliqué, les oscillateurs se synchronisent afin de générer un signal synchronisé uniquement sur leur fréquence fondamentale, et ce jusqu'à la disparition du signal de forçage relaxant ainsi les oscillateurs dans un mode libre à la fréquence propre de chacun.

L'intégration de la règle Hebbienne dans les équations des oscillateurs, permet l'apprentissage de la fréquence des signaux de forçage en modifiant la fréquence propre de l'oscillateur. Cette

règle peut être intéressante pour l'apprentissage d'un mouvement qui nécessite d'être adapté dans le temps, comme dans un poste de production.

Nous verrons dans le chapitre suivant comment nous avons pu implanter ces nouveaux contrôleurs dit bio-inspirés. Nos expériences se baseront sur la reproduction de la tâche de grattage canal que nous appellerons ensuite brossage. La plateforme utilisée permettra de téléopérer un robot collaboratif Franka Panda à travers différents dispositifs maîtres.

5 Solution proposée

L'objectif principale de cette thèse est d'étudier une alternative au poste de production afin d'améliorer les conditions de travail de l'opérateur. Le choix s'est orienté sur une technologie nouvelle de l'industrie 4.0, la robotique collaborative. En pleine émergence, la robotique collaborative offre la possibilité de s'implanter facilement sur des lignes de production existantes et permet de soulager l'opérateur dans la réalisation de tâches néfastes à sa santé. Téléopérer le système robotique permettra de garder le contrôle des processus de production à grand savoir-faire de Saint-Gobain PAM.

Afin de développer notre système, nous avons réalisé différentes modélisations et simulations qui vont nous permettre développer notre système robotique. Nous présenterons également dans ce chapitre la plateforme expérimentale que nous avons développée, qui nous permettra de réaliser diverses expériences de téléopération du robot Franka par un dispositif maître

Sommaire :

5.1 Orientation du projet	72
5.2 Simulation de la solution	72
5.2.1 Modélisation	73
5.2.2 Simulation	74
5.2.2.1 Pulvérisation de noir à canal	74
5.2.2.2 Coactivité avec opérateur	75
5.2.2.3 Téléopération de tâche	75
5.2.3 Organisation du poste	76
5.2.4 Réalité virtuelle	77
5.3 Plateforme expérimentale	78
5.3.1 Robot Franka	79
5.3.2 Système de téléopération	79
5.3.3 Framework ROS	80
5.3.4 Architecture générale de contrôle	82
5.4 Conclusion	86

5.1 Orientation du projet

Nous avons vu précédemment que l'intégration d'oscillateurs (cf. 4.2) dans une boucle de contrôle avec ou sans téléopération peut permettre un contrôle dit bio-inspiré. L'approche consiste à exploiter les propriétés de synchronisation des oscillateurs dynamiques afin de synchroniser les mouvements de commande. Intégrer un mode de téléopération peut devenir intéressant car dans notre étude les tâches réalisées par l'opérateur sont principalement manuelles et peuvent être assimilées à des tâches de brossage, nettoyage ou polissage (Cf. 2.2.2.2). En dehors de l'environnement de fonderie, ces types de tâches à base de mouvements rythmiques sont facilement réalisables pour tout être humain quel que soit son âge mais deviennent plus difficiles à exécuter par un système automatique. En effet, pour des tâches de brossage sur des surfaces issues de coulées de fontes, il est très difficile de modéliser et de prédire la rugosité de la surface à nettoyer et donc difficile d'automatiser l'application de la bonne force, au bon moment, et au bon endroit sur la surface voulue. Par conséquent, les solutions à base de téléopération sont donc intéressantes à étudier car elles permettent à l'opérateur de reproduire les mêmes mouvements avec les mêmes forces qu'il aurait exercées manuellement. Avec l'intégration d'oscillateurs, le contrôle des mouvements devient également simplifié grâce à leur comportement oscillant.

Joindre un robot collaboratif doté de compliance à ces systèmes de téléopération augmentera également la dextérité du contrôle car, à un certain niveau d'expertise de l'opérateur, le robot téléopéré devient une extension du système sensori-moteur de l'opérateur [51] [52]. Cependant, dans une situation de téléopération, le contrôle sensori-moteur de l'opérateur est altéré car il existe un décalage entre les paramètres spatio-temporels perçus et ceux véritablement réalisés [53]. Mais ce décalage peut être atténué grâce aux différentes propriétés de contrôle avec oscillateurs dynamiques que nous pourrions mettre en place par la suite.

Enfin, l'utilisation des robots collaboratifs est en constante augmentation sur les sites industriels et permettent d'automatiser facilement des tâches cycliques à plus ou moins grande valeur ajoutée et ce dans de nombreuses applications. Dans d'autres cas, où les applications industrielles sont plus spécifiques, les tâches effectuées par les opérateurs ne sont pas cycliques et nécessite une expertise de l'opérateur. C'est alors que pour la mise en place d'un système automatisé, la téléopération prend tout son sens permettant à l'opérateur de garder le contrôle sur le procédé de fabrication tout en s'éloignant des problématique EHS⁵ décrites en section 2.2.3.3.

5.2 Simulation de la solution :

De nombreuses technologies émergent de jour en jour et rendent ainsi les systèmes de plus en plus complexes à concevoir. Passer du temps dans ces phases de conception permet de mieux maîtriser le développement pour obtenir des systèmes opérationnels plus rapides et à plus faible coût. Pour ce faire, de nombreux outils de modélisation existent mais également des nouvelles méthodes de conception qui sont basées sur des modèles [54] [55] et permettent de formaliser de façon itérative les différentes étapes de la phase de conception. Afin de

⁵ Environnement, Hygiène, Sécurité

développer une preuve de concept de notre système coopératif, nous avons utilisé le simulateur robotique V-REP de CoppeliaSim [56]. V-REP permet d'intégrer et de simuler différents robots industriels avec leur dynamique dans n'importe quel environnement programmé. Il est basé sur une architecture de contrôle distribuée où chaque élément est déclaré comme objet et peut être programmé sous différentes méthodes (script, plugin, ROS, remote API client) ainsi que les contrôleurs sous différents langages (C/C++, Python, Java, Matlab, ...)

Pour avoir un premier point de vue de l'implantation de notre système sur la machine de production de tuyaux, nous avons réalisé une modélisation via V-REP du robot UR-10 de Universal Robots car c'est le robot que nous avons déjà utilisé à Saint-gobain PAM dans un précédent projet (cf.0). Cette simulation a permis dans un premier temps d'étudier la faisabilité d'une mise en place d'un robot collaboratif sur notre moyen de production. Ces différentes illustrations et essais qui n'étaient pas prévus initialement dans le projet de thèse ont été réalisés durant les périodes de confinements liées à la pandémie de COVID 2019.

5.2.1 Modélisation :

Modéliser un système en cours de développement dès la phase conception permet de représenter le système tel qu'il est vu par les développeurs. Les modèles développés ont pour but de mettre au point l'ensemble des éléments du projet dans l'environnement afin de prédire et d'anticiper les comportements de chacun. Afin de réaliser la modélisation de notre système de robotique collaborative, nous nous sommes appuyés sur un logiciel de modélisation 3D nommé SketchUp.

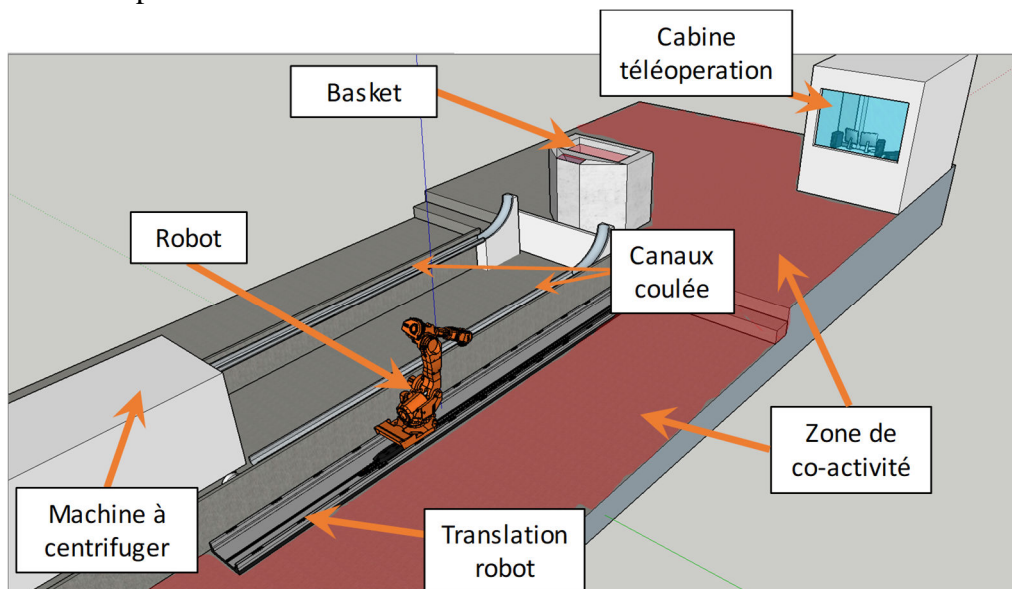


Figure 35: Modélisation du système robotique téléopéré

On retrouve Figure 35, les différents éléments du plancher de coulée tels qu'une représentation d'une machine à centrifuger, des canaux de coulée et du basket nécessaire à la réalisation des tuyaux. Viennent se rajouter les différents éléments du système robotique téléopéré tel que le robot afin de réaliser les tâches, un système de translation afin de déplacer le robot sur un rail sur l'ensemble de la longueur du canal de 6m ainsi qu'une cabine afin de

téléopérer le système robotique dans un environnement protégé. Dû à la présence d'un système de robotique collaborative, nous avons pu délimiter une zone de coactivité dans laquelle l'opérateur sera toujours amené à effectuer des opérations en partageant l'espace de co-activité avec le robot mais le moins souvent possible.

5.2.2 Simulation :

Après avoir modélisé notre système, les simulations suivantes nous ont permis de développer les différents scénarios imaginés tout au long du développement du projet dans l'environnement que nous avons développé. V-Rep est capable de restituer le comportement exact des objets, tel que la dynamique du robot UR10, ce qui permet de mieux comprendre et d'améliorer sans risque et sans surcoût notre système.

5.2.2.1 Pulvérisation de noir à canal :

Pour ce faire nous avons développé différentes situations de notre robot, à commencer par la pulvérisation du noir à canal le long du canal de coulée.

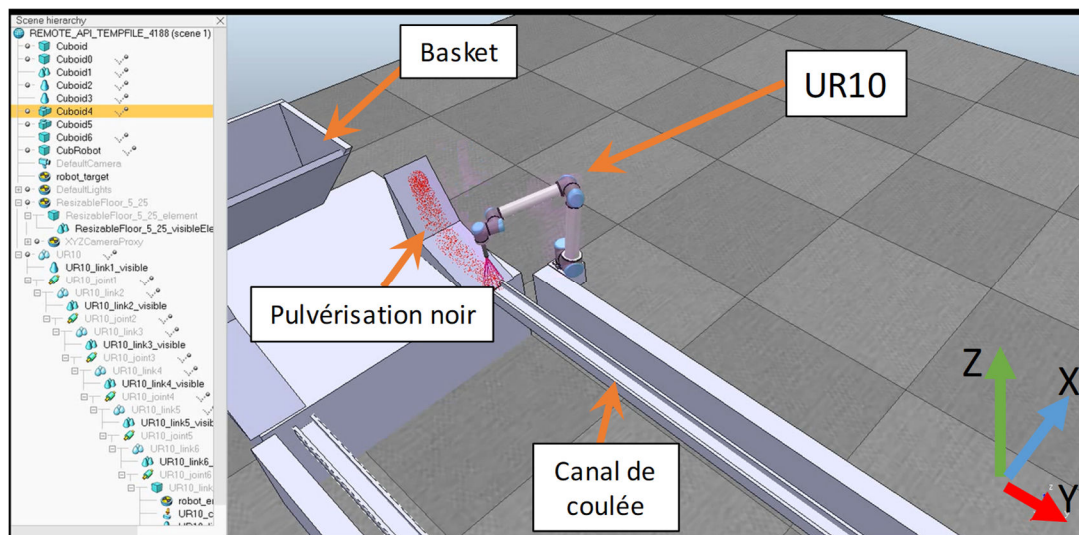


Figure 36: Simulation de pulvérisation avec le robot UR10 sous Vrep

On retrouve Figure 36, une modélisation des éléments principaux de l'environnement du poste de canaliste, tel que les deux canaux de coulées, le basket ainsi que les différentes structures. On retrouve également le robot UR10 que nous avons configuré afin qu'il se déplace grâce aux méthodes de calcul de cinématique inverse. Les calculs par cinématique inverse désignent l'ensemble des méthodes de calcul des positions et rotations d'un modèle robotique afin d'obtenir une position désirée. Leur utilisation nous ont permis de réaliser un contrôle du robot dans l'espace cartésien X, Y, Z de l'environnement et spécialement sur l'axe Y le long du canal.

Pour contrôler les déplacements du robot le long du canal afin d'y pulvériser le noir à canal, nous avons implanté de la même façon qu'en section 4.2.3.1, le mode de contrôle par oscillateur. Les simulations réalisées nous ont permis d'une part de mettre en œuvre ces oscillateurs dans le contrôle d'un bras robotique sans risque de mettre en péril le matériel mais également afin de paramétrer son utilisation.

Pour réaliser la tâche nous avons simulé un dispositif de pulvérisation permettant de projeter des particules rouges sur les différentes surfaces visées par la cible. Pour pulvériser l'ensemble du canal, le robot UR10 est déposé sur un support que nous avons fait déplacer durant le temps de simulation.

L'ensemble de ces simulations ont été programmées via un script directement dans l'interface de V-REP. Elles nous ont permis d'avoir dans un premier temps une représentation de l'intégration d'un robot autour de l'environnement du canaliste. Dans un deuxième temps, nous avons pu mettre en œuvre l'oscillateur de Hopf pour le contrôle du système robotique avec sa dynamique réelle.

5.2.2.2 Coactivité avec opérateur :

La seconde simulation réalisée a pour but de simuler la coactivité entre le robot collaboratif UR10 et un opérateur dans la zone opérationnelle du robot. Pour se faire, grâce au simulateur V-REP permettant de simuler la dynamique des robots, nous avons pu mettre en œuvre certaines fonctions de sécurité.

Les simulations nous ont permis d'observer le comportement du robot UR10 dans VREP au contact d'un mannequin virtuel ou d'un obstacle potentiel en mouvement (Figure 37). Au cours du mouvement du robot selon l'axe Y, le robot arrête son mouvement lors du contact pour le reprendre après disparition du contact.

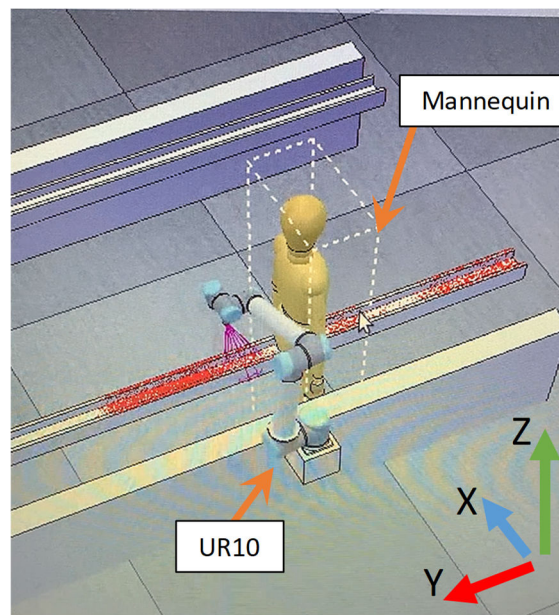


Figure 37: Simulation de la co-activité et du contact avec un opérateur déplacé manuellement sous V-rep

5.2.2.3 Téléopération de tâche :

Les dernières simulations ont visé à introduire la téléopération d'un système robotique (Figure 38) afin de réaliser des tâches à distance via un retour visuel. Pour ce faire nous avons utilisé les simulations précédentes en y intégrant un module de commande distant, Pygame. Pygame est une bibliothèque libre d'accès programmable sous python, souvent utilisée dans le développement de petits jeux vidéo en temps réel. Grâce à cette bibliothèque nous avons

programmé un script permettant de récupérer les informations des flèches directionnelles d'un clavier.

Nous avons utilisé la flèche de gauche pour déplacer l'ensemble du robot vers la gauche et à l'inverse la flèche droite pour déplacer le robot vers la droite. Outre la partie téléopération, le robot exécute un mouvement oscillant le long de l'axe Y en mode automatique afin de simuler une pulvérisation de noir à canal.

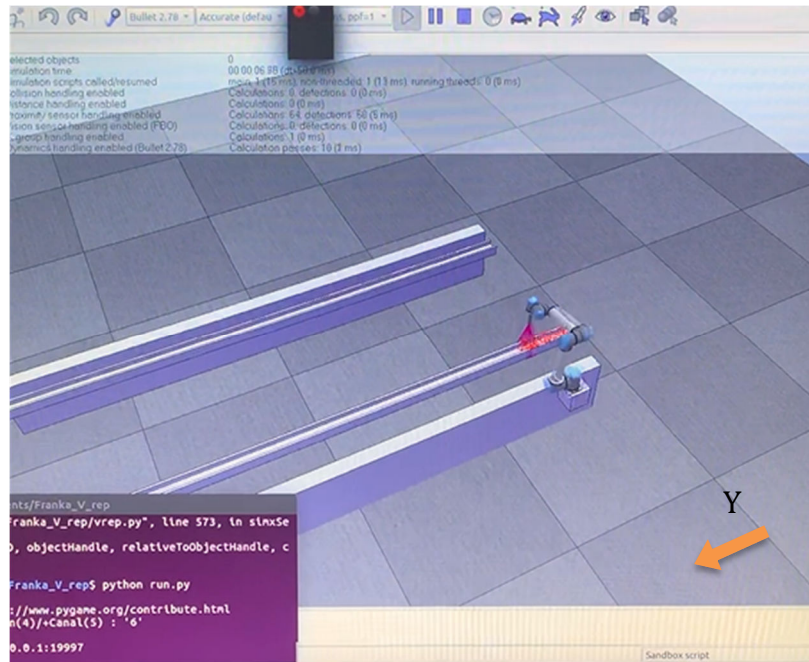


Figure 38: Impression d'écran de la simulation de la téléopération sous V-rep

Cette simulation nous a permis de mettre en œuvre le scénario de téléopération du système robotique et ainsi observer les différents éléments en mouvement. Ces simulations nous ont aussi permis de visualiser l'ensemble du poste en fonction d'une solution que l'on a développée durant la conception. Elles nous ont permis également d'identifier des points dangereux dus à l'utilisation d'un robot collaboratif autour de la machine de production mais également vis à vis des tâches effectuées par le robot.

5.2.3 Organisation du poste :

Grâce aux différentes simulations, nous avons pu réfléchir aux tâches que notre système robotique devrait réaliser. Au-delà des tâches réalisées sur le canal de coulée vues précédemment en section 2.2.2, nous avons pu imaginer d'autres tâches que le système robotique pourrait réaliser. Afin de mettre en forme les différentes tâches, nous nous sommes inspirés des diagramme d'activités en UML afin de modéliser les actions et leurs transitions. Grâce aux différentes réflexions et simulations nous avons pu ainsi réfléchir à une nouvelle organisation du poste de production qui permettra de téléopérer un système robotique pour réaliser l'entretien d'un canal de coulée :

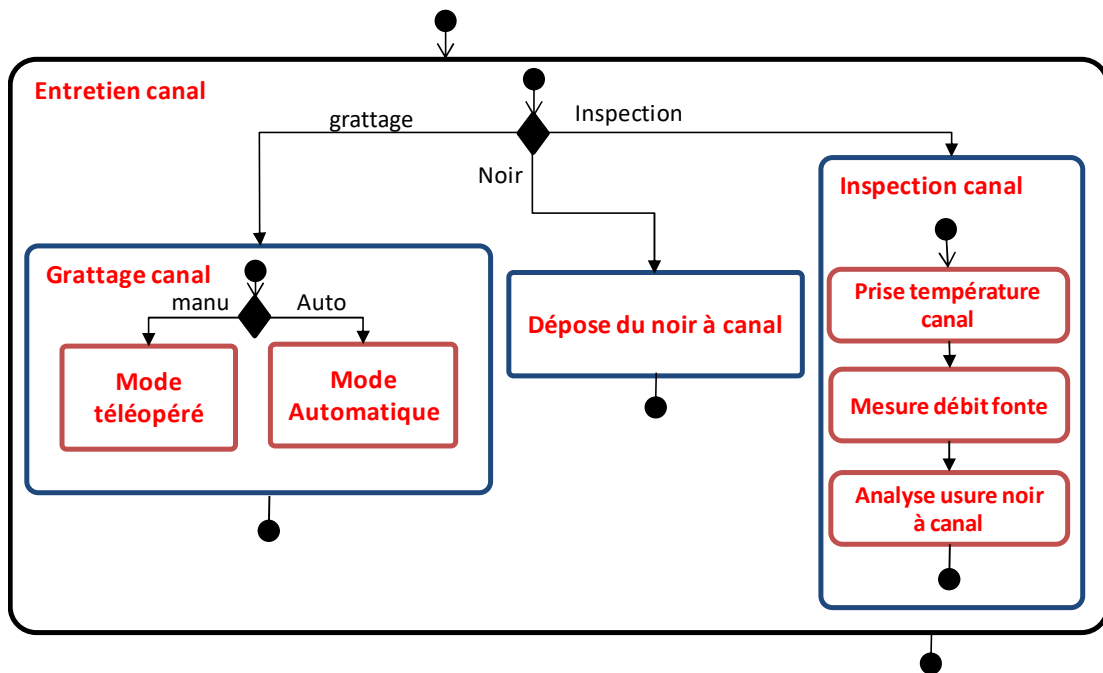


Figure 39: Conception d'une organisation du poste de canaliste vue par le système de robotique collaborative

On retrouve Figure 39, la tâche principale de l'opérateur, son objectif principal est d'entretenir l'état du canal afin de pouvoir y écouler de façon optimale la fonte. L'entretien du canal peut être divisé en 3 différentes tâches (tâches avec le contour bleu sur la Figure 39), dont 2 actuellement effectuées par l'opérateur, le grattage du canal et la dépose du noir à canal, ainsi qu'une nouvelle tâche, l'inspection du canal. Le choix d'activer ces tâches vient uniquement de l'opérateur dans un premier temps car le savoir-faire métier étant très important sur ce poste, l'opérateur doit ainsi garder le contrôle du système robotique.

Concernant la tâche de grattage on retrouve deux possibilités (tâches au contour rouge), l'une pour une réalisation automatique par le système robotique avec par exemple une brosse spécialement conçue, une seconde pour une réalisation manuelle. Dans le mode manuel nous pouvons imaginer utiliser un système haptique ou un joystick afin que l'opérateur prenne le contrôle du grattage afin de faire des retouches ponctuelles. Grâce à l'intégration de la règle d'apprentissage de Righetti à un oscillateur, il sera possible également d'apprendre une nouvelle fréquence de grattage en prenant le contrôle de la commande. La tâche de dépose du noir à canal pourra se faire via un système de pulvérisation qui sera plus facilement réalisable pour un système robotique. Concernant la nouvelle tâche d'inspection du canal, plusieurs mesures pourront être faites par le système robotique avec par exemple des caméras thermiques qui renvoient l'image sur le poste de contrôle de l'opérateur. Ainsi, ces nouvelles données de température en surface du canal permettra à l'opérateur d'avoir des informations de diagnostic précises qui lui permettront d'analyser l'usure du noir même à distance.

5.2.4 Réalité virtuelle :

Contrôler un système robotique à distance peut devenir réellement difficile lorsque le savoir-faire métier à une place importante. Un premier point d'appui peut être le développement d'une interface de commande la plus accessible et lisible par l'opérateur. Le concept de réalité

virtuelle permet de plonger une personne dans un monde artificiel créant numériquement un espace réel ou totalement imaginaire.

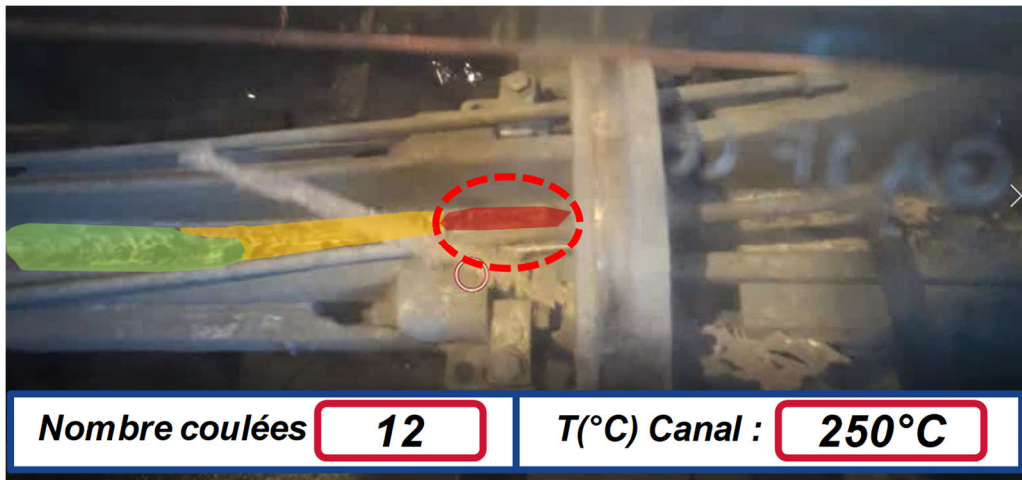


Figure 40: Interface VR de l'opérateur pour la téléopération

Dans notre concept d'interface VR, nous avons cherché à reproduire l'immersion de l'opérateur tel qu'il le serait en réalité. Pour ce faire l'interface serait basée sur une représentation de la réalité. On observe Figure 40 un exemple de visuel d'un canal de coulée sur lequel différentes informations sont ajoutées. Ces images sont issues des enregistrements réalisés avec lunette Tobii par TEA (cf. 2.2.3.2), où l'on peut retrouver entouré en rouge la zone où le regard de l'opérateur se focalise. Restituer des éléments réels à l'opérateur tels que le visuel du canal lui permet de mieux ressentir l'environnement comme s'il y était. Dans notre scénario nous avons imaginé une zone d'information dynamique permettant la coloration du canal en fonction de la température de surface, ainsi qu'une autre zone résumant les données importantes du diagnostic de l'état du canal. Différentes données pourront y être introduites telles que le nombre de coulées réalisées sur le canal, l'épaisseur résiduelle de noir dans le canal ou encore la localisation de perçage possible du canal (point où la fonte perce le noir à canal à cause de son usure et provoque l'échauffement ponctuel du canal). Différents scénarios ont pu également être imaginés tels que la diffusion des flux de réalité virtuelle sur un casque porté par l'opérateur lui permettant de se plonger encore plus dynamiquement dans l'environnement.

5.3 Plateforme expérimentale :

Nos premières études se sont orientées sur la tâche la plus complexe pour le robot, la tâche de « grattage du canal » pouvant être assimilée à un mouvement de brosse (cf. 2.2.2.2). Pour ce faire nous avons mis en place une plateforme expérimentale au LORIA dans le but de reproduire cette tâche que l'on dénommera par la suite tâche de brosse, par une téléopération du robot. Pour essayer de téléopérer le robot avec la plus grande efficacité, nous essaierons d'intégrer dans notre boucle de contrôle un oscillateur qui pourrait nous permettre de produire un mouvement plus proche de celui d'un humain.

5.3.1 Robot Franka :

Pour réaliser nos essais, nous utilisons le robot Panda de la compagnie Franka Emika [57], car c'est un robot très récent et fréquemment utilisé dans la recherche [58] [59] [60]. Ce robot (Figure 41) est dit collaboratif. Il possède 7 degrés de liberté et une capacité de charge utile maximale de 3kg. Pour le rendre collaboratif il est doté de capteurs de couples au niveau de ses 7 axes de rotation afin de lui conférer une très grande compliance grâce à un mode de contrôle par impédance. Le robot Panda est polyvalent et rapide à prendre en main via son interface web. Une version recherche existe disposant de différents packages et bibliothèques afin de pouvoir le contrôler par différentes méthodes (C++, ROS et MoveIt!).



Figure 41: Robot Panda de Franka Emika

5.3.2 Système de téléopération :

La téléopération indique souvent le contrôle d'une machine à distance. Elle permet d'immerger un opérateur dans un environnement distant en lui mettant à disposition différentes informations visuelles, auditives, sensorielles issues du terrain. L'objectif est que l'opérateur se sente présent dans l'environnement distant en projetant sa présence « à travers le robot » également distant. Pour ce faire, l'utilisation de différents outils est nécessaire, comme l'ajout de caméra 2D/3D pour le retour visuel, des capteurs sonores pour le retour auditif et des retours de forces pour la partie contact physique.

Utilisés pour téléopérer des systèmes robotiques [61] [62] [63], les dispositifs maîtres sont des systèmes tactilo-kinesthésiques utilisés pour créer une communication physique et sensorielle entre un humain et un environnement. Ils permettent aux utilisateurs de manipuler ou de contrôler des objets avec une perception kinesthésique, bien souvent des retours de forces, pour un meilleur retour sensoriel et une meilleure efficacité dans l'exécution de la tâche.

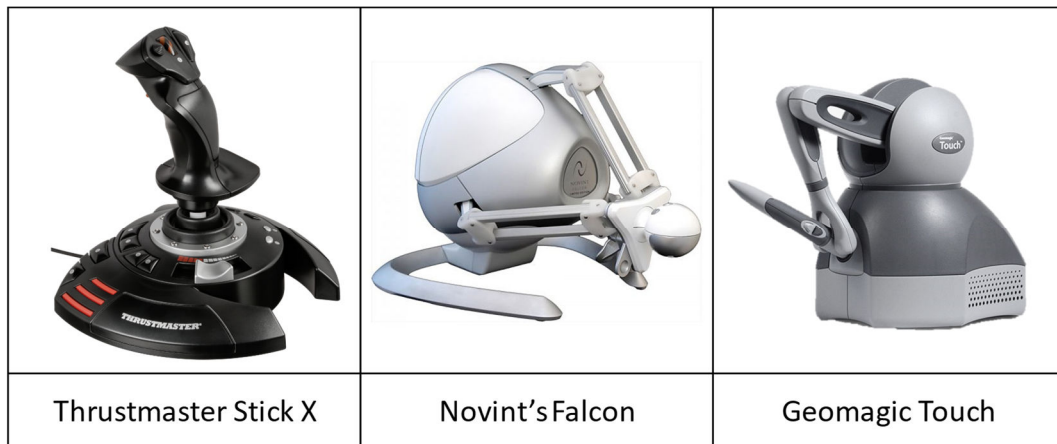


Figure 42: Différents dispositifs maîtres non-haptique ou haptiques (à retour de force)

Afin de contrôler notre système robotique nous avons utilisé différents dispositifs maîtres, un premier joystick non haptique conçu pour le jeu ainsi que deux dispositifs haptiques (Figure 42) de contrôle 3D avec retour de force. Le premier dispositif Figure 42 est le Sitck X de Thrustmaster connu pour sa compatibilité et son faible coût (40€). Il est composé de 3 axes de contrôle chacun codé sur 8bits, droite/gauche, vers le haut et bas ainsi qu'une rotation. Le second est le Novint's Falcon [64] dont le rapport qualité/prix est bon ($\approx 420\text{€}$) et est doté de retour de force de 9N max. Ce dispositif maître est composé de 3 axes de contrôle dont la résolution est de 160 incrément/cm, droite/gauche, vers le haut et le bas ainsi que vers l'avant et l'arrière. Le dernière dispositif est le Touch de Geomagic [65], souvent utilisé en recherche grâce à sa grande précision ($>450\text{dpi}$), mais est le dispositif le plus onéreux de notre étude ($\approx 3000\text{€}$). Il peut être contrôlé sur 6 axes (X, Y, Z, Rx, Ry, Rz) avec un retour de force de 3.3N max.

Leur utilisation dans notre boucle de contrôle permettra de contrôler le robot Franka via différents principes de commande avec différents niveaux de performance. Les forces externes mesurées sur le préhenseur du Robot Franka sous ROS (cf. 5.3.3) permettront un retour d'effort aux dispositifs qui sont haptiques donnant ainsi à l'opérateur la sensation de « ressentir » le broissage comme si il l'effectuait lui-même.

5.3.3 Framework ROS

ROS (Robot Operating System [66]) est un environnement de programmation pour des applications robotiques. Parmi les nombreux frameworks robotiques déjà existant, l'avantage de ROS est qu'il est conçu pour être généraliste, assez simple à utiliser avec une grande gamme de produits compatibles dans diverses catégories d'application. De nombreuses applications sont envisagées de devenir industrielles grâce à l'extension de ROS nommé ROS-Industrial, version dotée de capacités avancées tel qu'une meilleure robustesse et une meilleur fiabilité temporelle. Avec une certification en « temps réel » en cours de développement, ROS-Industrial permettra de répondre aux besoins industriels de robotisation et d'automatisation. Différentes bibliothèques sont également fournies pour développer une application complète sous ROS avec différents langages, Python (rospy) ou C++(roscpp) pour l'utilisation de robots industriels, préhenseurs, capteurs, etc...

Fournissant des services proches des systèmes d'exploitation (abstraction de la couche « matériel », gestion des processus et de la concurrence), ROS est un environnement open source permettant de mutualiser une collection d'outils et de bibliothèques.

ROS permet de faire abstraction du matériel utilisé en proposant des fonctionnalités standardisées (appels asynchrones, appels synchrones, base de données centralisée) afin de pouvoir gérer ou piloter n'importe quel matériel ou de transmettre des données compatibles. Pour ce faire, ROS offre une architecture qui fait communiquer entre eux processus et machines. Les processus ROS (Figure 43) sont nommés *nodes* et chaque *node* peut communiquer avec d'autres par des *topics*, et l'ensemble des communications entre *nodes* est administré par un *master*. Un *node* peut-être à la fois *publisher* ou *subscriber*, selon qu'il publie des données ou s'il souscrit à des données. La plupart des messages envoyés via les *topics* sont standardisés et permet au système d'être flexible.

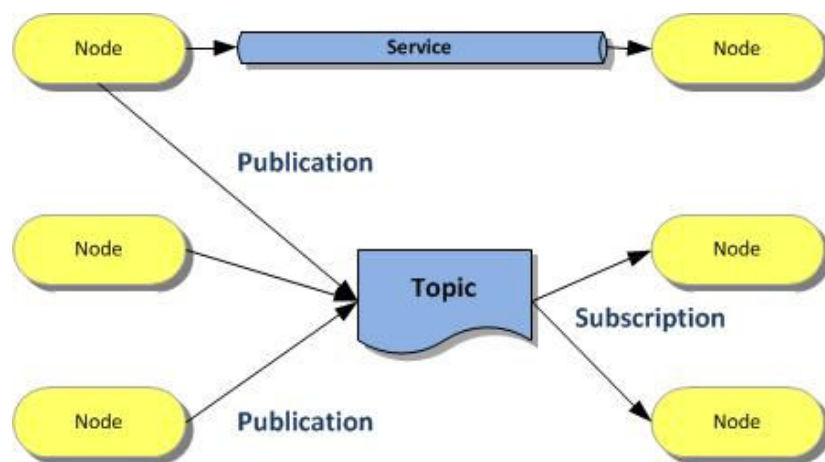


Figure 43: Architecture ROS

La compatibilité ROS du robot Panda nous a permis de concevoir facilement l'ensemble de notre architecture de contrôle. La Figure 44 présente l'ensemble des éléments que nous avons implémenté sous ROS.

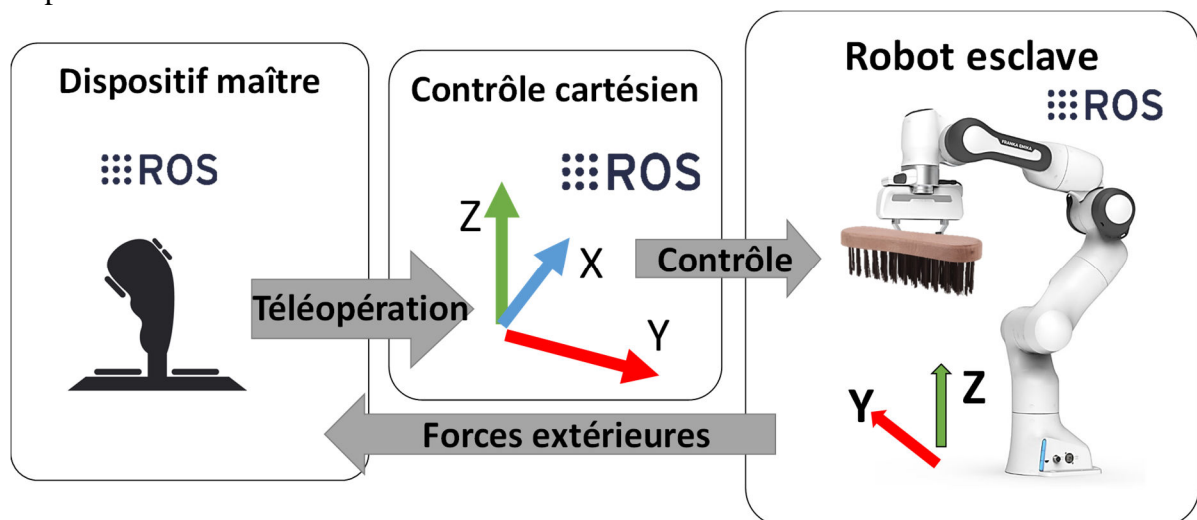


Figure 44: Schéma d'architecture Maître/esclave ROS du contrôle du robot Franka

On retrouve dans cette architecture, les 3 composants principaux de notre plateforme expérimentale maître/esclave : nos moyens de contrôle via les dispositifs maîtres haptiques

ou non, les commandes de contrôle Cartésien et le robot esclave Franka. Pour récupérer les commandes des dispositifs maîtres nous avons utilisé des drivers spécifiques à chacun d'eux pour les publier sous un *node* ROS. Le contrôle du robot se fait par un contrôle en impédance via les bibliothèques ROS du robot Franka. Le retour des forces extérieures appliquées au robot aux dispositifs haptiques est programmé grâce au topic « Robot_state » de la bibliothèque Franka via les bibliothèques ROS.

5.3.4 Architecture générale de contrôle

Dans le but de téléopérer le robot avec plus d'efficacité, tout en produisant un mouvement du bras robotique plus proche du mouvement humain, nous avons inséré dans notre boucle de commande les différents oscillateurs vus précédemment (cf. 4.2). L'idée est que, grâce à ses capacités de synchronisation l'oscillateur se synchronisera sur les signaux de commande provenant du dispositif maître et donc de l'opérateur, et rendra ainsi les mouvements du robot plus fluides. Comme vu section 4.1, le mouvement de grattage du canal est un mouvement rythmique évoluant principalement le long du canal selon l'axe Y. Grâce aux fonctions et bibliothèques accessibles via le Framework ROS, nous avons choisi de contrôler le robot Panda dans l'espace Cartésien (espace de travail de l'opérateur) afin d'être plus représentatif du mouvement réel. Nos expériences seront découpées en deux temps : une première tâche expérimentale de brossage où nous avons utilisé une brosse fixée au préhenseur du robot panda illustré Figure 45, et une seconde tâche de brossage à l'intérieur d'un canal de coulée, cf. 6.2.

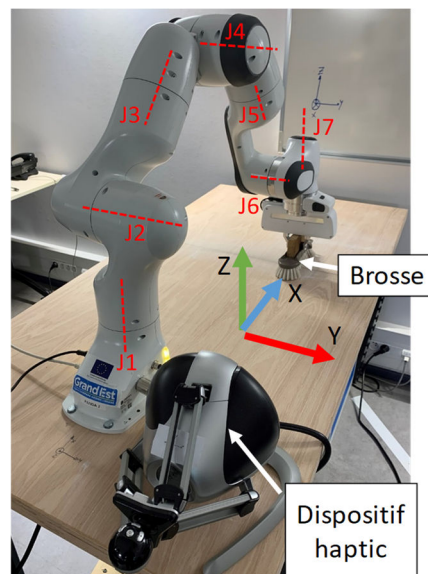


Figure 45: Illustration d'une première configuration expérimentale : dispositif maître Falcon ; brosse en nylon ; robot Franka-Panda

Ces deux expériences seront articulées selon deux différentes architectures de téléopération afin de mettre en évidence l'intérêt d'utiliser un oscillateur dans une boucle de commande. Une téléopération dite directe (sans oscillateur) et une téléopération dite bio-inspirée (avec oscillateur). Dans ces deux modes de téléopération (cf. Figure 46 et Figure 47) nous retrouverons les différents éléments généraux qui seront utilisés pour l'ensemble des expériences:

- Opérateur : représente la personne téléopérant le robot via le dispositif maître.
- Dispositif maître : représente les différents dispositifs maîtres utilisés
- Oscillateur : représente l'oscillateur de Hopf ou l'oscillateur de Rowat-Selverston en fonction des différentes expériences.
- Boucle de contrôle Franka : représente la boucle de contrôle Franka permettant de générer les commandes articulaires au robot à partir des commandes Cartésiennes reçues directement du dispositif maître ou des oscillateurs.
- Robot Franka : représente la physique du robot Franka et ses différentes pertes mécaniques.
- Forces extérieures : représente l'ensemble des forces en interaction avec le robot ou son outil. On retrouve notamment les forces qui seront liées au brossage à l'intérieur du canal qui sont renvoyées au dispositif maître comme retour d'efforts.

Dans le cas où le dispositif maître fournit un retour d'effort, les forces exercées selon les axes cartésien (X, Y, Z) sur le préhenseur du robot permettent ainsi à l'opérateur de sentir ces forces pendant la tâche de brossage, en particulier sur les deux axes qui sont contrôlés, l'axe Z et l'axe Y. Pour nos expériences, seul l'axe Y est contrôlé à travers un oscillateur car il correspond à l'axe principal de la tâche de brossage (cf. Figure 20 et Figure 45). L'axe X n'est pas contrôlé car aucun mouvement n'y est nécessaire à la réalisation de la tâche. L'axe Z est contrôlé directement, c'est-à-dire par le dispositif maître sans oscillateur, car il correspond à la force du brossage exercée sur la surface et nécessite une précision en fonction du ressenti de l'opérateur.

Le premier schéma de contrôle (Figure 46) est basé sur l'envoi direct des commandes du dispositif maître $Y_{désirée}$ et $Z_{désirée}$ à la boucle de contrôle Franka sans utilisation d'oscillateur.

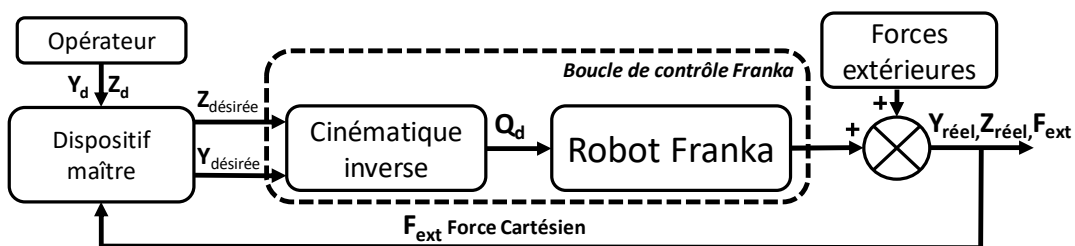


Figure 46: Architecture de contrôle direct (sans oscillateur)

La seconde architecture, dite bio-inspirée, intègre un oscillateur entre la commande du dispositif maître et la boucle de contrôle Franka (cf. Figure 47). Ainsi, les capacités d'apprentissage des oscillateurs permettront d'apprendre la fréquence du mouvement de l'opérateur à travers le dispositif maître. Pour synchroniser l'oscillateur sur la position cartésienne mesurée $Y_{réel}$ et la position désirée $Y_{désirée}$ du dispositif maître, nous définissons le signal de forçage Y_{osc} de l'oscillateur par $Y_{osc} = Y_{désirée} - Y_{réel}$. Combiner la commande du dispositif maître avec la position Cartésienne du robot permet de forcer le contrôle du robot en fonction de l'erreur dynamique calculée. Comme l'oscillateur se synchronise sur la fréquence intrinsèque du signal de forçage, cette combinaison permet de couvrir deux cas d'usage :

- Cas n°1 : $Y_{désirée} - Y_{réel} = 0$, dans ce cas il n'existe pas de différence entre la fréquence désirée de commande du robot et la fréquence du mouvement réel du robot. Aucun changement n'est donc nécessaire et le signal de forçage F ne modifie pas la fréquence propre de l'oscillateur.

- Cas n°2 : $Y_{désirée} - Y_{réel} \neq 0$: dans ce cas il existe une différence entre la fréquence ou le déphasage d'oscillation du dispositif maître et la fréquence du mouvement du robot. Alors, une erreur dynamique apparaîtra et viendra en tant que signal de forçage Y_{osc} , modifier la fréquence de l'oscillateur. La règle d'apprentissage permettra de créer une dynamique globale entre le mouvement de l'opérateur, l'oscillateur qui envoie la commande à la boucle de contrôle Franka et le robot afin d'avoir une même fréquence globale d'oscillation

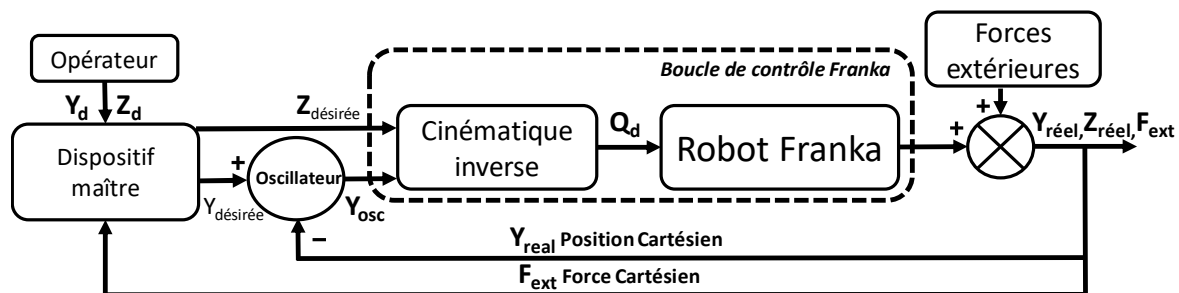
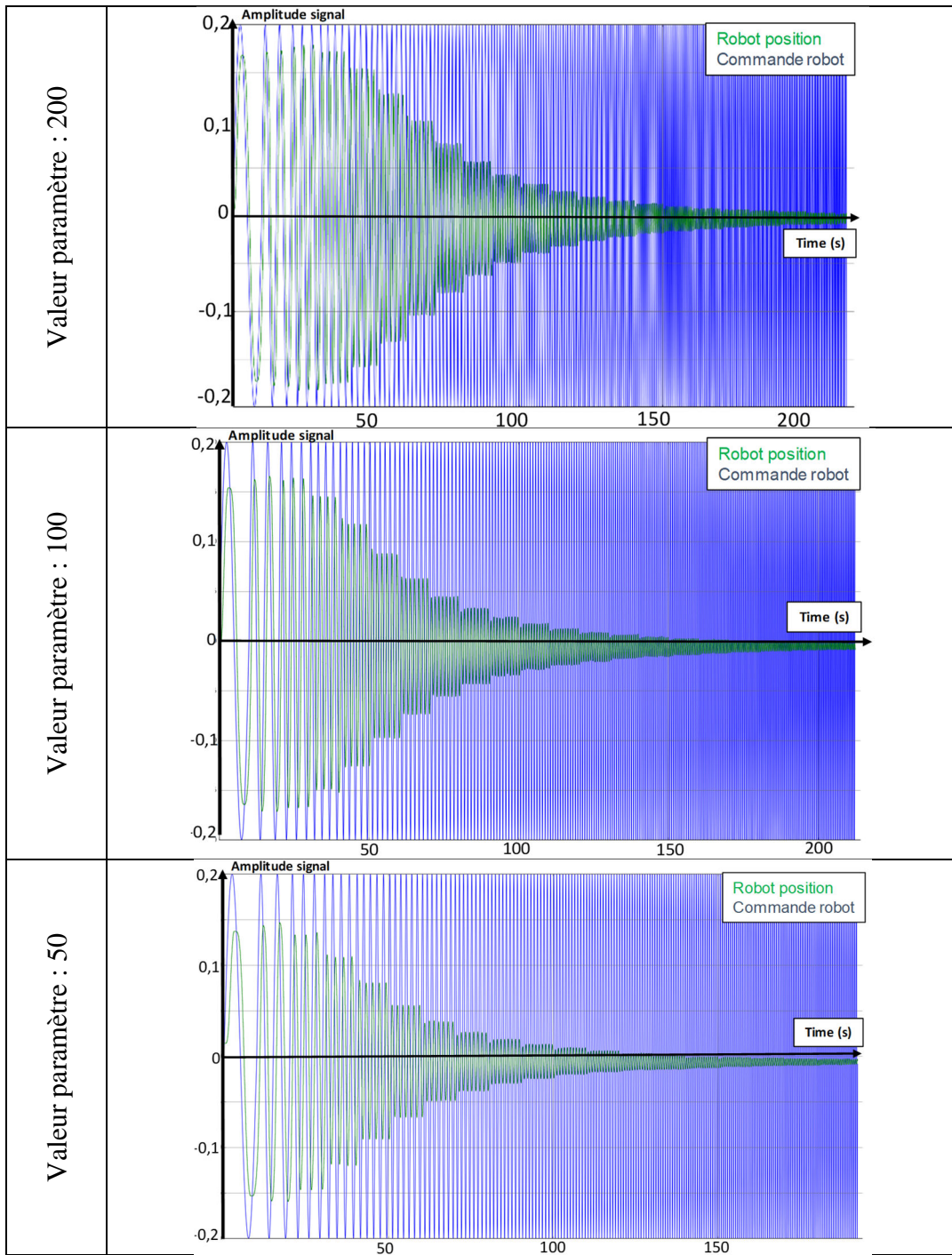


Figure 47: Architecture de contrôle dite bio-inspirée (avec oscillateur)

L'environnement sidérurgique apporte de nombreuses incertitudes sur la position des éléments de production. En effet, de par leur envergure leur déplacements ne sont pas identiques et sont peu précis. Pour ce faire nous avons choisi de contrôler les mouvements du robot dans le mode « contrôle en impédance » fourni par le constructeur Franka Emika, afin qu'il puisse réaliser les tâches de téléopération dans le mode n°4 de collaboration avec limitation de la puissance et de la vitesse. Le contrôle en impédance permet un contrôle dynamique dans l'espace où le robot peut interagir avec l'homme ou son environnement grâce à la corrélation de la force et de la position du robot. Les tâches pourront être ainsi réalisées sans blocage lorsque le préhenseur ou la brosse vient heurter les bords du canal ou d'autres parties du dispositif de production.

Néanmoins le contrôle en impédance a un impact sur la commande du système robotique en fonction de paramètres tels que la valeur d'impédance configurée ou la fréquence du signal de commande. Pour mettre en évidence l'impact de ce contrôle, nous avons réalisé des essais mettant en œuvre différentes valeurs de paramètre d'impédance (200,100 qui est la valeur par défaut, 50 et 25) en fonction d'un signal oscillatoire dont la fréquence a été incrémenté de 0.1Hz toutes les 5 secondes. On observe Figure 48, que pour un réglage d'impédance de 200, plus la fréquence sera grande plus la réponse du robot diminuera passant d'une amplitude de déplacement de 0.18 pour une fréquence initiale de 0.1Hz, à une amplitude quasi nulle pour une fréquence finale de 5Hz. Il s'agit d'une réduction de la bande passante due à l'augmentation de la fréquence de commande qui altère la position finale. On observe avec les essais (Figure 48) que pour la fréquence initiale de 0.1Hz, le paramètre d'impédance affecte également la réponse du robot passant d'une amplitude de déplacement de 0.18 pour un paramètre d'impédance de 200 à 0.07 et pour un paramètre d'impédance de 25.



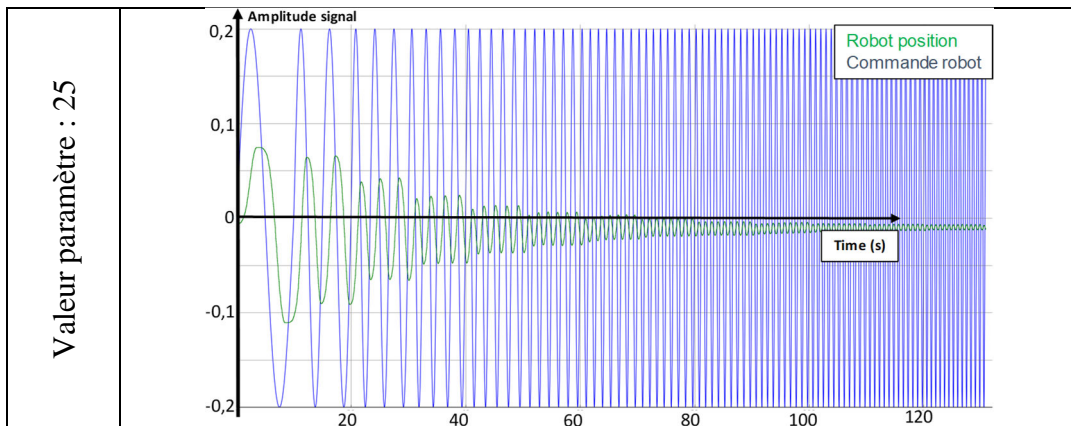


Figure 48 : Réponse du robot Franka en fonction de la fréquence du signal et le paramètre d'impédance

Ces variations de la réponse du robot en fonction de la fréquence et du paramètre d'impédance seront prisent en considération dans les essais réalisés par la suite afin d'obtenir d'une réponse similaire et comparable sur l'ensemble des essais.

5.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats d'expériences et de simulations préliminaires correspondants aux orientations que nous avons choisi de suivre. Dans un premier temps nous avons développé quelques scénarios possibles sous différents moyens de simulation. Ces développements nous ont permis de mettre en situation notre système de robotique collaborative au sein du milieu sidérurgique afin d'identifier les problématiques d'interaction. Nous avons également présenté un concept de l'interface de téléopération qui permettra à l'opérateur de contrôler le système robotique à distance.

Dans un second temps nous avons développé une plateforme expérimentale qui nous a permis de réaliser différentes expériences de grattage d'un canal de coulée. Pour ce faire nous avons utilisé un robot collaboratif disponible au sein du LORIA, le Franka Emika Panda que nous avons commandé avec différents dispositifs maîtres sous le Framework ROS.

Afin de comparer les différents dispositifs maîtres en fonction des différents moyens de contrôle avec et sans oscillateur, nous avons développé plusieurs architectures de contrôle.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons les différents résultats que nous avons obtenus en fonction des différentes architectures possibles. Nous comparerons les réponses obtenues en termes de forme des signaux de commande et les impacts qu'ils auront dans la réalisation d'un brossage.

6 Résultats expérimentaux :

Un des objectifs de la thèse est de prouver que les oscillateurs peuvent avoir différents intérêts dans la réalisation de tâches industrielles. Comme vu précédemment, l'idée principale des expériences suivantes sera d'utiliser les capacités de synchronisation des oscillateurs afin de téléopérer une tâche de brossage via un dispositif maître. Dans un premier temps, afin de prouver l'utilité de notre concept, nous avons réalisé une tâche expérimentale, le brossage de la surface d'une table. Ces premiers essais nous permettront d'implémenter le dispositif Falcon selon deux moyens de contrôle : sans oscillateur et avec l'oscillateur de Hopf.

Après avoir validé le premier concept, nous avons développé une seconde plateforme de téléopération qui nous a permis de réaliser une tâche de brossage dans un environnement plus réaliste. Pour se faire nous avons intégré un morceau de 1 mètre d'un canal de coulée usagé ajouté à un retour visuel afin de téléopérer à distance. Par la même occasion deux autres dispositifs maîtres seront testés afin d'étudier l'apport d'oscillateurs en fonction des performances des dispositifs maîtres. Pour ce faire, nous avons réalisé 10 expériences de 30 secondes de brossage pour chacun des dispositifs maîtres et ce pour chacun des moyens de contrôle (sans oscillateur, avec l'oscillateur de Hopf, pour le Falcon et avec l'oscillateur de Rowat-Selverston pour le ThrustMaster et geomagic). Afin de comparer de la même façon chacun des dispositifs maîtres, nous avons enregistré le signal de commande selon les différents moyens de contrôle. Chaque première expérience avec un dispositif maître et sans oscillateur a été enregistrée via la commande *rosbag* de ROS.

Sommaire :

6.1 Preuve de concept : Brossage d'une surface plane	91
6.1.1 Contrôle avec un signal de forçage rectangle	91
6.1.1.1 Signaux de contrôle / commande	92
6.1.1.2 Analyse de la puissance dissipée	93
6.1.2 Contrôle avec le dispositif Falcon.....	95
6.1.2.1 Contrôle commande	95
6.1.2.2 Analyse de la puissance dissipée	96
6.1.3 Conclusion	98
6.2 Téléopération d'une tâche de brossage	98
6.2.1 Téléopération par le dispositif Geomagic	100
6.2.1.1 Commande sans oscillateur.....	100
6.2.1.2 Commande avec l'oscillateur de Hopf.....	100

6.2.1.3	Commande avec l'oscillateur de Rowat Selverston.....	101
6.2.1.4	Analyse de la puissance dissipée	102
6.2.2	Téléopération par le joystick ThrustMaster	103
6.2.2.1	Commande sans oscillateur.....	103
6.2.2.2	Commande avec l'oscillateur de Hopf.....	104
6.2.2.3	Oscillateur de Rowat Selverston.....	105
6.2.2.4	Consommation de puissance.....	106
6.3	Conclusion	107

6.1 Preuve de concept : Brossage d'une surface plane

Téléopérer une tâche à distance n'est pas une chose simple et encore moins lorsque que c'est une tâche dynamique nécessitant un grand savoir-faire. Afin de vérifier notre approche de contrôle nous avons réalisé une preuve de concept de brossage par téléopération avec le dispositif Falcon, dispositif que nous disposons déjà. Cette preuve de concept sera menée en deux séries d'essais. La première série a pour but de prouver les capacités de l'oscillateur avec l'utilisation d'un signal rectangle, la forme choisie car elle peut être assimilée à un dispositif maître à faible performance. La seconde série permettra d'implémenter un premier dispositif maître, le Falcon afin d'évaluer le comportement du robot lors de la téléopération d'un brossage (Figure 49).

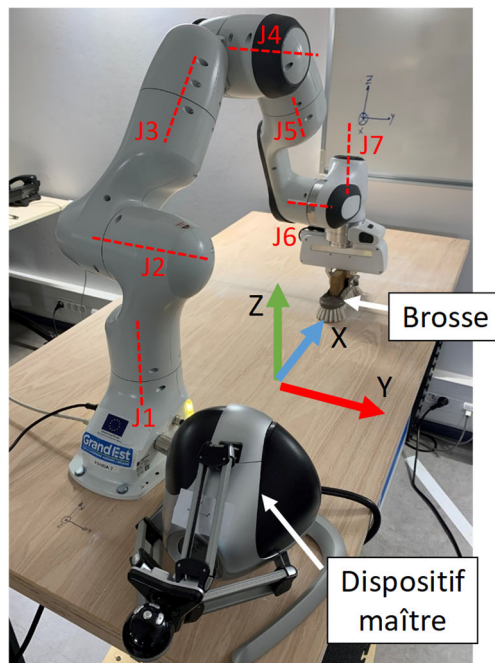


Figure 49: Setup expérimental pour la preuve de concept composé du robot Franka, du dispositif maître Falcon et d'une brosse en nylon rigide.

Le premier choix de commande par téléopération s'est porté sur un dispositif dont nous disposons qui est considéré comme un dispositif haptique grâce à son retour de forces, le Falcon de Novint disposant également d'un bon rapport prix / performance. L'oscillateur de Hopf sera quant à lui mis en place car il combine une mise en œuvre simple avec de bonnes performances comme nous l'avons montré dans la section précédente. La combinaison de ces deux éléments aura pour but de nous donner des résultats rapides et significatifs pour la preuve de concept.

6.1.1 Contrôle avec un signal de forçage rectangle

Dans cette première série d'expériences, nous montrons comment l'oscillateur de Hopf peut améliorer un mouvement de brossage. Le signal de commande sera un signal rectangulaire d'amplitude 0,3m à une fréquence de 0.8Hz, choisi ainsi car c'est une forme correspondant le plus à une forme délivrée par un dispositif de commande simple, tel le dispositif ThrustMaster utilisé dans la section ci-après (cf 6.2.2).

6.1.1.1 Signaux de contrôle / commande

Les Figure 50 et représentent les différents signaux enregistrés durant le contrôle du robot Franka avec un signal rectangulaire pour la tâche de brossage, avec et sans utilisation de l'oscillateur de Hopf. Nous y retrouverons en vert la position cartésienne Y du robot, en orange le signal rectangulaire représentant la commande assimilée à un dispositif maître très simple, en bleu nous retrouverons les signaux de commande envoyés à la boucle de contrôle Franka (cf. Figure 29 pour l'architecture de contrôle avec oscillateur). Les commandes correspondent au signal rectangulaire sans oscillateur et à la sortie de l'oscillateur avec son utilisation.

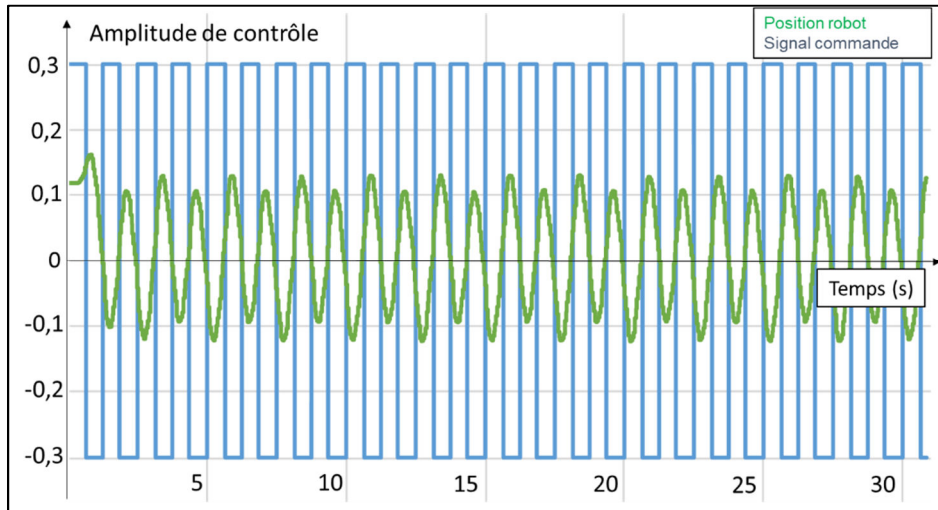


Figure 50: Contrôle avec un signal rectangle, sans utilisation d'un oscillateur

On retrouve Figure 50 le signal de commande rectangulaire ainsi que la position Cartésienne du robot sans utilisation d'oscillateur. On observe que la position du robot évolue de façon quasi sinusoïdale au cours de l'expérience de brossage. A cause de la bande passante du Franka observée Figure 48, on observe une différences entre le signal de commande et la position réel du robot. On observe également que l'amplitude de la position du robot n'est pas stable, fluctuant entre -0,13 et -0,09 pour la partie négative et de 0,13 à 0,09, tout au long de l'expérience provoquant un brossage irrégulier. La position du robot est en opposition de phase avec le signal de commande à cause de la bande passante du robot car il n'y a aucun retour entre la position du robot et la commande

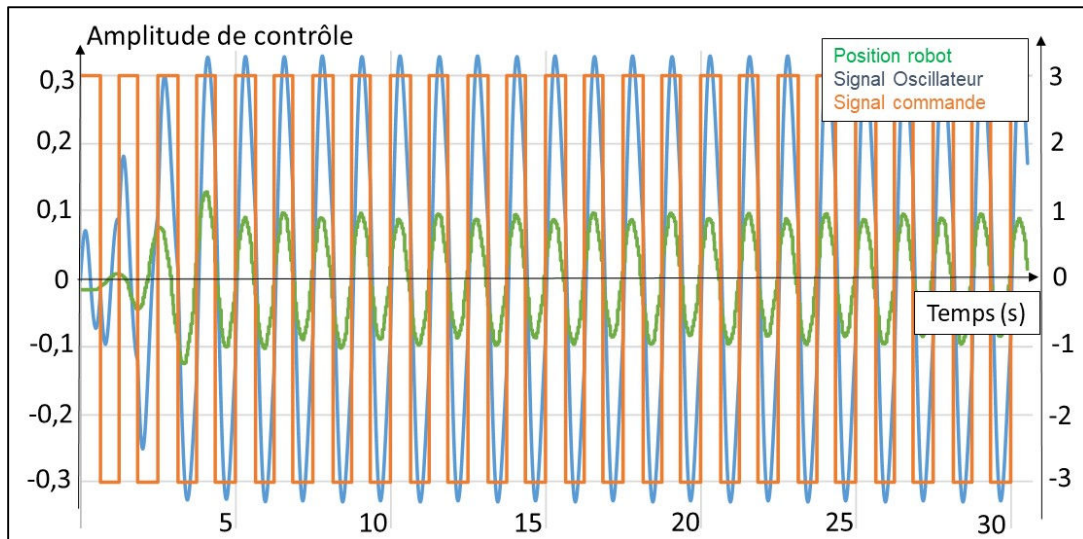


Figure 51: Contrôle avec un signal rectangulaire, avec oscillateur de Hopf. Echelle de droite : Signal de commande correspondant à la sortie de l'oscillateur.

La montre le résultat du contrôle du robot réalisé via l'oscillateur de Hopf avec comme signal de forçage, le même signal rectangulaire préalablement enregistré. Après une phase d'apprentissage [0-5s], on observe la synchronisation de l'oscillateur sur la fréquence du signal de rectangulaire. On constate que le signal de commande envoyé au robot se transforme un signal oscillant d'amplitude stable de 0,1 (avec une variation de 0,01) et de forme quasi-sinusoidale.

6.1.1.2 Analyse de la puissance dissipée

Avec ces deux premiers essais, on peut observer que lorsque le signal de commande à une forme rectangulaire, il a tendance à générer des variation l'amplitude du mouvement du robot et altérant le contrôle et la réalisation du brossage. Par contre, on observe que l'utilisation d'un oscillateur forcé par ce même signal rectangulaire permet de réduire notablement ces variations et d'appliquer au robot un signal de commande stable en amplitude.

Afin de quantifier l'impact de ce phénomène lié à l'utilisation d'un oscillateur, nous calculons un indicateur souvent utilisé dans la robotique industrielle [67] [68] : la consommation de puissance. Pour ce faire nous avons calculé la puissance consommé durant l'expérience, P_j de chaque articulation j selon l'expression suivante :

$$P_j = \sum_{k=0}^T |C_j(k) \times \omega_j(k)| \quad (9)$$

On retrouve dans cette équation, k qui représente l'index du temps d'échantillonnage (données échantillonnées à 0,05s) durant le temps T de 30s de brossage. C_j représente le couple articulaire et ω_j la vitesse angulaire de chaque articulation mesurée à chaque temps k par le système de commande du robot Franka.

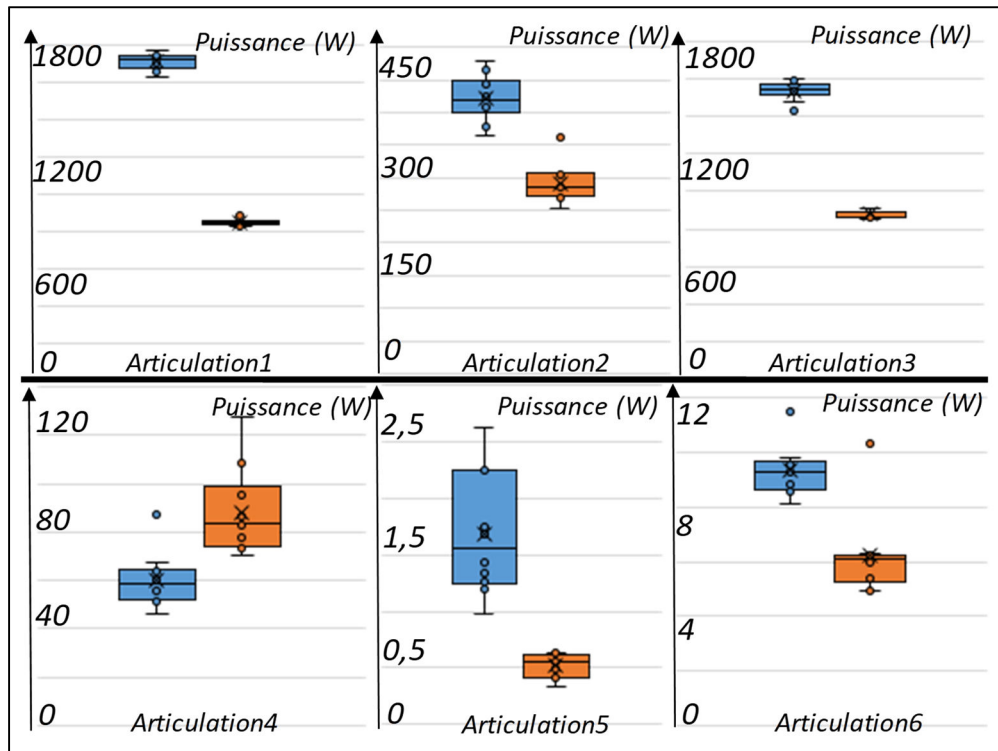


Figure 52: Puissance dissipée pour chacune des articulations pour le contrôle avec un signal rectangulaire. Bleu : sans oscillateur, Orange : avec oscillateur

La Figure 52 montre la distribution de la puissance consommée par les 6 articulations du robot Franka selon 10 expériences identiques réalisées en 30 secondes chacune. On retrouve en bleu les résultats obtenus sans l'utilisation d'oscillateur et en orange avec oscillateur (pour l'application du signal rectangulaire). On observe une réduction globale de la puissance consommée pour la série avec utilisation de l'oscillateur de Hopf. Cette réduction est principalement observée par la modification du signal de contrôle du robot par l'intégration de l'oscillateur qui permet de réduire les instabilités présentes, rendant un signal plus stable et synchronisé avec la dynamique du robot, donc plus optimal.

Le Tableau 6 ci-dessous représente la moyenne des puissances consommées par chacune des articulations. On observe, que l'utilisation de l'oscillateur de Hopf permet de réduire la consommation sur la quasi-totalité des articulations. On remarque également que certaines articulations sont plus sollicitées que d'autres pour réaliser le mouvement de brossage uniquement réalisé sur l'axe Y. C'est sur ces articulations que l'utilisation de l'oscillateur de Hopf a le plus d'impact avec des réductions d'environ 50% pour l'articulation 1 (voir Figure 49 pour les numéros des articulations), 42% pour l'articulation 3 et jusque 69% pour l'articulation 5. En revanche, la puissance dissipée de l'articulation 4 augmente de 46% par rapport au contrôle sans oscillateur. L'articulation 4 est principalement utilisée dans l'espace Cartésien pour le contrôle de l'axe Z correspondant à l'axe d'application de la force de brossage. Il n'est pas contrôlé par l'opérateur ou par une autre boucle d'asservissement, la hauteur du préhenseur a pu varier durant l'expérience et donc la force d'application aussi.

Tableau 6: Résumé des puissances moyennes dissipées avec un signal de contrôle rectangle

	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P _{robot}
sans oscillateur	1712,3	421,3	1538,2	60,2	1,7	9,3	3743,0
avec oscillateur	846,4	292,2	881,5	88,1	0,5	6,2	2114,9
% réduction	-50,6	-30,7	-42,7	+46,5	-69,2	-33,1	-43,5

En conclusion, on observe d'une part, que l'utilisation d'un oscillateur permet de générer un signal oscillatoire synchronisé sur la fréquence du signal de commande. D'autre part, en captant uniquement la fréquence fondamentale du signal de forçage et se synchronisant sur celle-ci, l'oscillateur permet de faire abstraction des éventuelles instabilités présentes dans un signal de commande (rectangulaire dans notre cas) permettant ainsi de réduire globalement la puissance consommée par le robot de 43%.

6.1.2 Contrôle avec le dispositif Falcon :

Dans la deuxième série d'expérience, nous avons ajouté le dispositif maître Falcon dans notre boucle de contrôle (cf. Figure 46 section 5.3.4 les architectures de contrôle) afin de passer prudemment de notre preuve de concept à une plateforme dite de téléopération. Ces expériences nous ont permis de découvrir le comportement de l'oscillateur avec comme signal désiré, les commandes envoyées par le dispositif Falcon.

6.1.2.1 Contrôle commande

Comme dans le premier jeu d'expériences réalisé en section 6.1.1, nous allons comparer la commande avec et sans oscillateur. Le dispositif maître Falcon est manipulé par un opérateur et les signaux générés sont appliqués en entrée de la boucle de contrôle du robot Franka, tel que défini dans l'architecture de contrôle en section 5.3.4. L'axe Y et l'axe Z seront ainsi contrôlés par les signaux provenant du dispositif Falcon, directement pour l'axe Z afin d'exercer la bonne force durant le brossage et pour l'axe Y avec et sans oscillateur. Les Figure 53 et Figure 54 représenteront ainsi les différents signaux de commande enregistrés lors des expériences avec et sans utilisation d'un oscillateur.

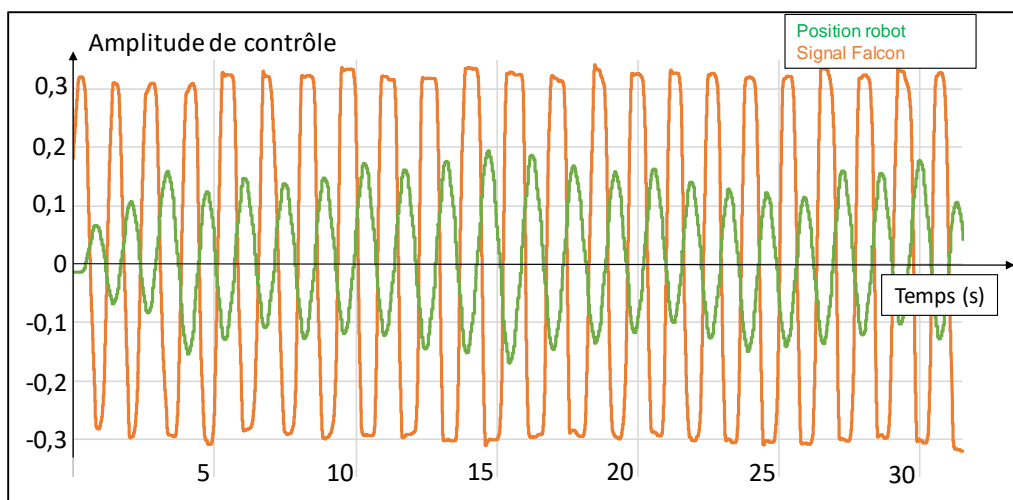


Figure 53: Contrôle avec le dispositif Falcon, sans l'utilisation d'un oscillateur

Dans un premier temps, la Figure 53 nous permet d'observer la forme du signal délivré par le Falcon. On observe que ce signal comporte certaines instabilités lors des changements de direction à l'image des premiers essais réalisés avec un signal de forme rectangulaire. Identiquement à ces premiers essais, ces instabilités génèrent une variation d'amplitude de la position (de 0,19 à 0,1 en positif et de -1,7 à -0,09 en négatif) et de la fréquence du mouvement du robot, altérant la qualité finale du brossage.

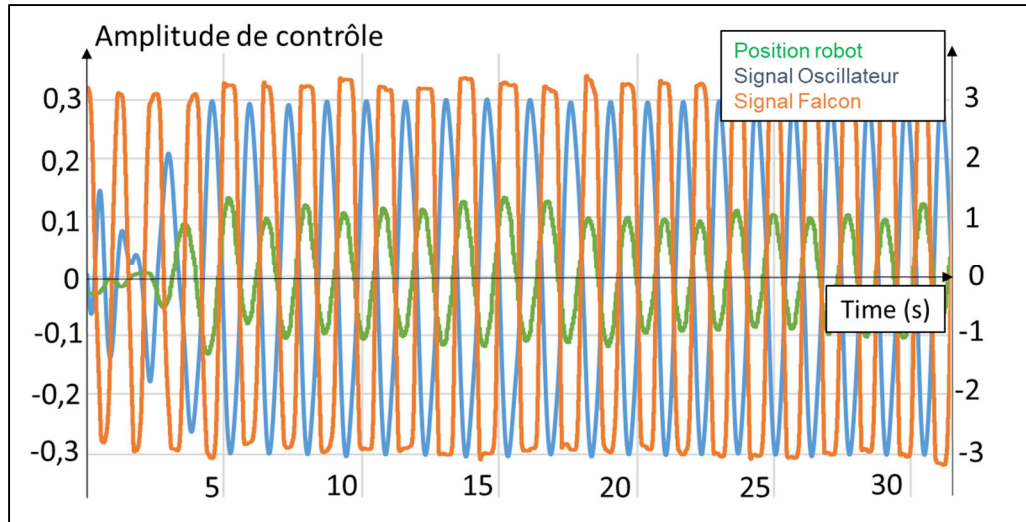


Figure 54: Contrôle avec le dispositif Falcon, avec l'utilisation de l'oscillateur de Hopf

La Figure 54 confirme que l'utilisation d'un oscillateur permet la synchronisation d'un signal de contrôle sur la fréquence du signal de forçage, avec ici un signal désiré venant du Falcon. On observe également, qu'après une phase de synchronisation, l'oscillateur permet de générer un signal rythmique avec des amplitudes plus stable (variations de 0,13 à 0,1 pour les amplitudes positive et -0,13 à -0,1 pour les amplitudes négatives) afin de commander le robot. Ce signal est ainsi synchronisé uniquement sur la fréquence fondamentale du signal désiré du Falcon, ce qui nous permet d'assimiler le comportement de l'oscillateur à celui d'un filtre sélectif qui serait axé sur la fréquence fondamentale du signal de désiré provenant du dispositif Falcon.

Ces capacités de l'oscillateur permettent de stabiliser la fréquence et l'amplitude du mouvement du robot et ce malgré les différentes variations du signal de forçage.

6.1.2.2 Analyse de la puissance dissipée :

A l'identique des premiers essais, pour comparer les deux modes de contrôles avec l'utilisation du dispositif Falcon, nous avons calculé la puissance consommée par chacune des articulations selon l'équation (9) :

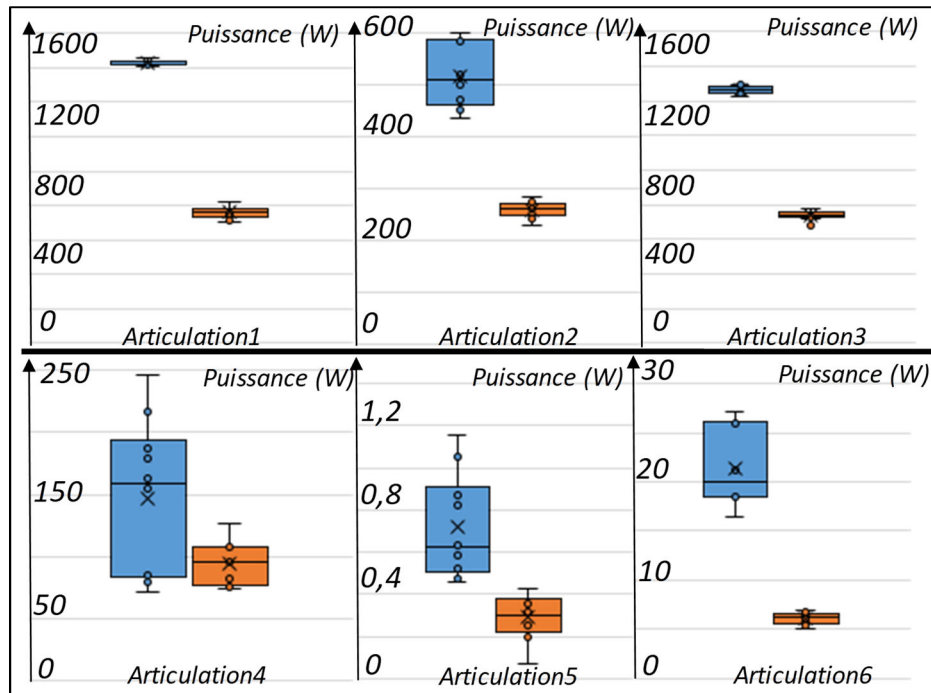


Figure 55: Puissance dissipée pour chacune des articulations pour le contrôle avec le dispositif maître Falcon. Bleu : sans oscillateur ; Orange : avec oscillateur

La Figure 55, représente la distribution des 10 expériences pour chacun des modes de contrôle. En comparaison avec les expériences précédentes, on observe une augmentation globale des puissances consommées par articulation. Cette augmentation provient de l'utilisation du dispositif maître Falcon avec lequel nous contrôlons l'axe Y mais également l'axe Z générant ainsi plus de puissance.

Concernant l'analyse de l'utilisation de l'oscillateur, à l'identique de la commande rectangulaire, on observe une réduction majeure de la puissance consommée sur chacune des articulations du robot. Cette réduction est également dû à la réduction des instabilités du signal de contrôle et à la synchronisation sur le signal désiré.

Tableau 7 : Résumé des puissances moyennes dissipées avec un signal de contrôle avec le Falcon.

	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P _{robot}
Sans oscillateur	1630,4	515,2	1465,3	146,8	0,7	21,3	3779,7
Avec oscillateur	757,4	260,2	734,6	94,4	0,3	6,1	1852,9
% reduction	-53,5	-49,5	-49,9	-35,7	-59,9	-71,3	-51,0

On observe Tableau 7, de la même façon une réduction de puissance plus marquée sur les articulations 1, 3 et 5, articulations composant le mouvement sur l'axe Y. De plus en comparaison avec l'expérience précédente, la puissance consommée par l'articulation 4 et 6 sont également réduites. Cette réduction est due à l'intégration du dispositif Falcon qui en comparaison du contrôle précédent permet d'exercer la force nécessaire à la réalisation du brossage grâce aux retours d'efforts à l'opérateur. Ces deux réductions permettent de réduire jusqu'à 51% la puissance globale entre un contrôle avec et sans oscillateur.

6.1.3 Conclusion

Grâce aux premières expériences réalisées comme preuve de concept, nous avons pu voir l'intérêt d'utiliser un oscillateur comme celui de Hopf. Ses propriétés permettent d'obtenir un signal de contrôle plus stable et également synchronisé sur la fréquence du signal de commande quel que soit la forme du signal émis par l'opérateur. Ces propriétés de synchronisation auront comme effet de réduire la consommation de puissance jusque 51% entre un contrôle avec et sans oscillateur.

6.2 Téléopération d'une tâche de brossage

Dans cette section nous nous appuyerons sur les résultats obtenus précédemment afin de réaliser la téléopération d'une tâche de brossage dans un canal de coulée issu de la production de Saint-Gobain PAM. Pour ce faire, la Figure 56 illustre les différents éléments mis en œuvre constitués du robot Franka-Panda, d'une brosse en nylon rigide, d'un canal de coulée usagé et d'un dispositif maître.

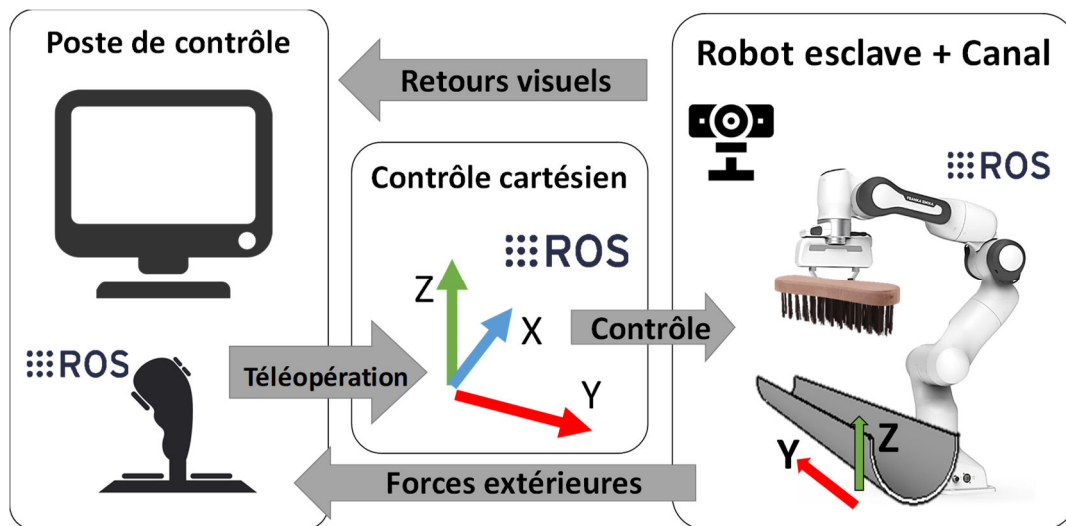


Figure 56: Illustration des différents éléments pour l'expérience de téléopération du brossage

La mise en place d'un dispositif maître pour faire réaliser à distance un mouvement dynamique à un robot n'est pas facile, d'autant plus dans un environnement difficile tel qu'une fonderie industrielle. En effet, en raison des contraintes environnementales et des EPIs des opérateurs, les dispositifs doivent être suffisamment robustes afin de résister dans le temps aux manipulations « brutales ». Par conséquent, déterminer le choix d'un dispositif entre celui issu du commerce ou d'un dispositif développé spécifiquement pour un environnement devient une question importante. Pour essayer de répondre également à cette problématique, les expériences suivantes nous aideront à comparer les 3 différents dispositifs présentés section 5.3.2. Les prochains essais porteront notamment sur l'utilisation des dispositifs maîtres Thrustmaster et du bras Géomagic que nous comparerons aux essais réalisés précédemment avec le Falcon.

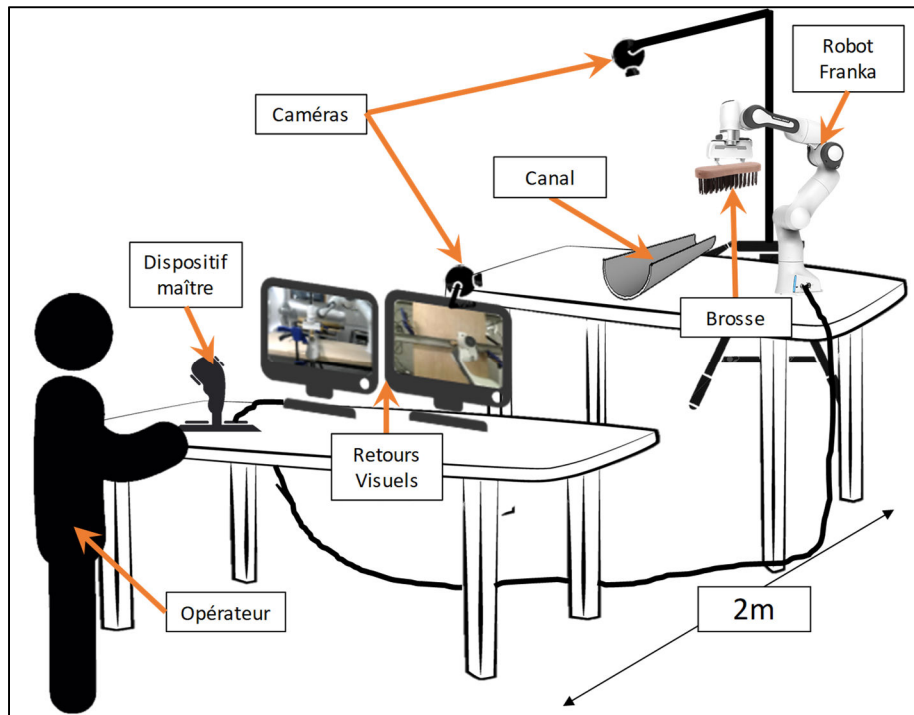


Figure 57: Représentation du setup pour la téléopération du brossage d'un canal via un dispositif maître.

On retrouve Figure 57 les différents éléments que nous avons utilisés afin de réaliser les expériences de téléopération du brossage d'un canal. Nous retrouverons notamment l'opérateur et les dispositifs maîtres qui permettront d'envoyer les commandes au robot Franka. L'installation sera complétée par un système de retour visuel doté de deux caméras, afin que l'opérateur, délocalisé de la zone, téléopère le robot (Figure 58). Le canal utilisé est un canal récupéré sur les lignes de production de Saint-Gobain PAM et permettra de se rapprocher le plus possible des contraintes de l'environnement réel. La brosse utilisée est une brosse à poil en nylon rigide afin d'être suffisamment robuste pour brosser l'intérieur du canal.

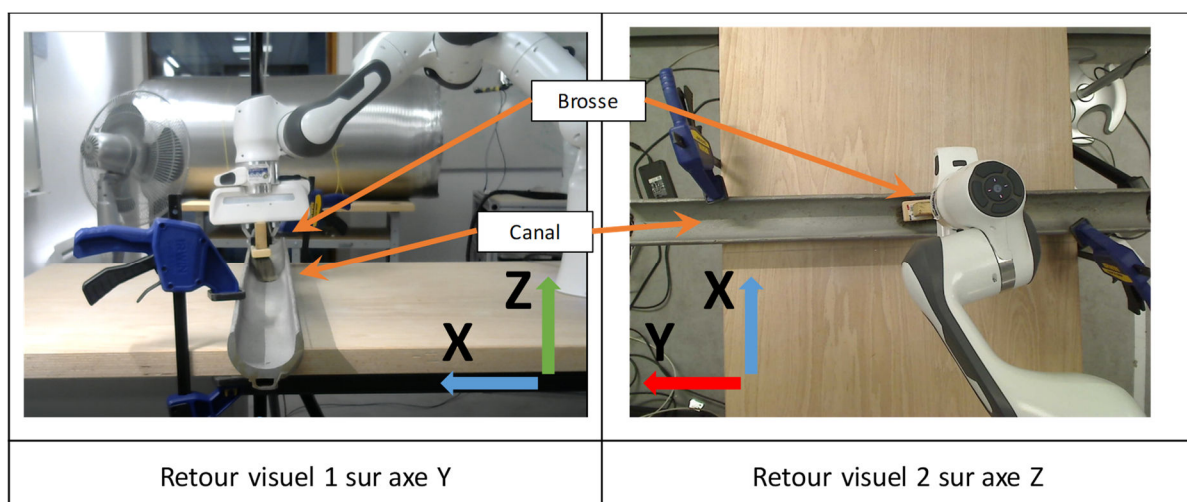


Figure 58: Retour visuel permettant le contrôle à distance

Comme seulement 2 axes sont contrôlés pour la réalisation la tâches de brossage (cf. 5.3.4), nous avons mis en place 2 retours visuels 2D sur chacun de ces axes. Le retour visuel 1 permet

de visualiser la position du robot dans le plan (X ; Z) relatif à la force de brossage exercée et le retour visuel 2 dans le plan (X ; Y) relatif aux déplacements du robot afin de réaliser le brossage du canal selon l'axe Y.

6.2.1 Téléopération par le dispositif Geomagic :

Le bras Geomagic est un dispositif haptique destiné à des contrôles de précision et muni de 6 axes de contrôle avec retour d'efforts. Afin de comparer son intérêt par rapport aux autres dispositifs maîtres, nous avons mis en œuvre 3 contrôles différents : sans oscillateur, avec l'oscillateur de Hopf et avec l'oscillateur de Rowat-Selverston. L'amplitude de l'entrée du geomagic sera adaptée afin d'obtenir un signal de commande compris entre 0,3 et -0,3 m de déplacement du robot.

6.2.1.1 Commande sans oscillateur

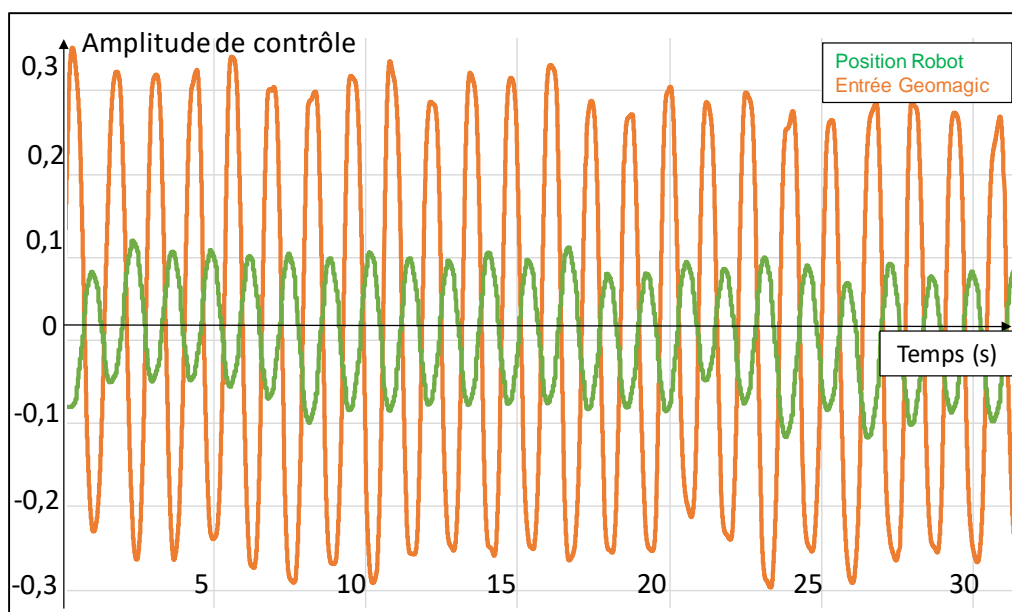


Figure 59: Contrôle avec le dispositif Geomagic, sans oscillateur

On observe Figure 59, les différents signaux liés à la téléopération du robot par le dispositif Geomagic, sans oscillateur. En comparaison des précédentes expériences avec le dispositif Falcon, le signal délivré par le dispositif Geomagic comporte moins d'instabilités dans du mouvement et apporte ainsi moins de variation du signal de commande. On observe néanmoins quelques variations d'amplitude ([0,13 à 0,8] et [-0,14 à -0,05]) ainsi qu'un décentrage du signal qui vont pouvoir altérer légèrement la qualité du mouvement de brossage.

6.2.1.2 Commande avec l'oscillateur de Hopf

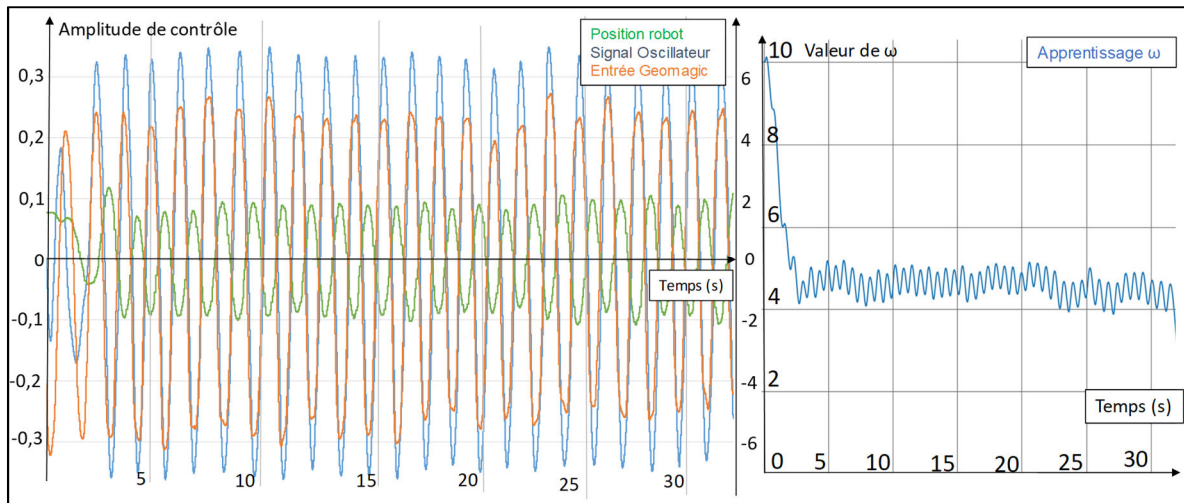


Figure 60: Gauche : Contrôle avec le dispositif Geomagic, avec utilisation de l'oscillateur de Hopf. L'axe secondaire de droite représente l'entrée du Geomagic en orange. Droite : Apprentissage du paramètre ω de l'oscillateur de Hopf lors de la commande avec le bras Geomagic

La partie gauche de la Figure 60 représente les signaux de contrôle enregistrés avec l'utilisation de l'oscillateur de Hopf. On observe une nouvelle fois la synchronisation en fréquence et en phase de l'oscillateur sur le signal désiré provenant du dispositif Geomagic. Les faibles instabilités résiduelles du Geomagic sont réduites grâce aux capacités de l'oscillateur permettant ainsi de stabiliser ($[0,12$ à $0,09]$ et $[-0,08$ à $-0,12]$) encore plus le signal de commande du brosse.

Dans cette expérience nous avons également inséré la règle de Righetti (cf. équation 6) dans les lois de contrôle. Cela nous a permis l'apprentissage et la modification de la fréquence propre de l'oscillateur ω , par rapport à la fréquence du signal désiré envoyé par le dispositif geomagic (Figure 60 droite). Avec une valeur initiale de $\omega = 10$, on observe qu'après une phase d'apprentissage la valeur du paramètre ω se stabilise entre 4.5 et 5. On utilisera la valeur moyenne de ω une fois synchronisé qui sera évaluée à $\omega = 4.8$ soit 0.744 Hz, fréquence naturelle de brosse de l'opérateur observée durant les analyses ergonomiques.

6.2.1.3 Commande avec l'oscillateur de Rowat Selverston :

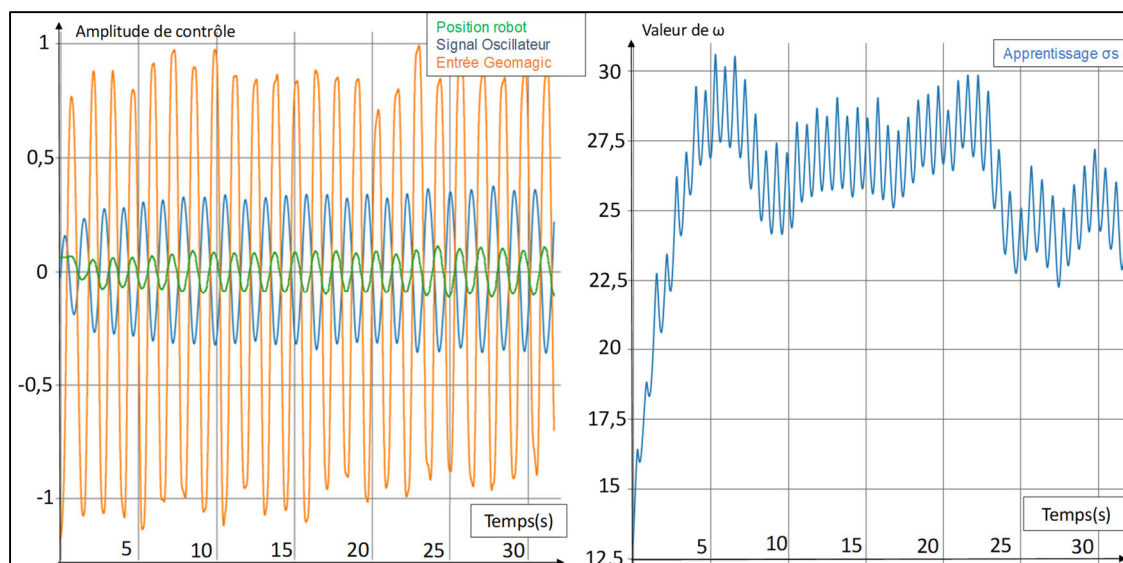


Figure 61: Gauche : Contrôle avec le dispositif geomagic, avec utilisation de l'oscillateur de Rowat-Selverston. Droite : Apprentissage du paramètre σ_s de l'oscillateur de RS lors de la commande avec le bras geomagic

La partie gauche de la Figure 61 présente les signaux de contrôle ainsi que le comportement de l'oscillateur de Rowat-Selverston contrôlé de la même façon que dans l'expérience précédente avec l'oscillateur de Hopf. L'implantation de la règle de Righetti dans l'oscillateur de Rowat-Selverston (cf. équation 7), permet l'apprentissage de la fréquence du signal désiré reçu du dispositif geomagic, comme le montre l'apprentissage du paramètre σ_s sur la partie de droite de la Figure 61 qui, initialement fixé à 10 change et se stabilise autour de 27. On observe néanmoins une variation de ce paramètre [24s à 30s] dû à une baisse de fréquence dans le signal provenant du geomagic, cette variations peut être optimiser en ajustant le pas d'apprentissage ϵ dans l'équation (7).

6.2.1.4 Analyse de la puissance dissipée

Identiquement aux expériences précédentes, afin de comparer l'utilisation des différents modes de contrôle, nous avons calculé la puissance consommée durant chacun des essais réalisés avec le bras Geomagic. La Figure 62 montre les différentes distributions de puissance calculées des articulations du robot avec l'équation (9) section 6.1.1.2 :

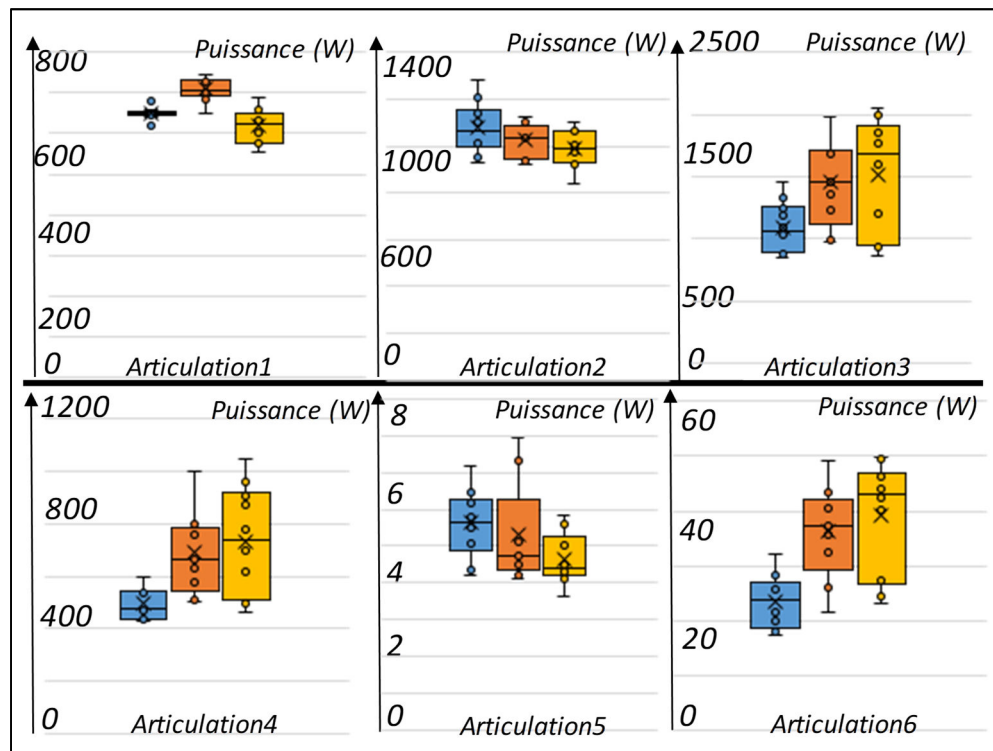


Figure 62: Puissance consommée durant la téléopération avec le bras Geomagic. Bleu : sans oscillateur ; orange : Oscillateur de Hopf ; Jaune : Oscillateur RW

On constate Figure 62 qu'avec le dispositif geomagic, la puissance consommée par le robot est relativement constante en fonction des différents schémas de contrôles. Les différentes valeurs de consommations varient en fonction des articulations sans véritable influence de l'utilisation d'un l'oscillateur.

L'explication vient du fait que le bras Geomagic est le bras le plus précis de notre sélection et permet de générer un signal plus fluide que les autres dispositifs, permettant de réaliser des grandes amplitudes précises de mouvements rythmiques tel que le brossage. Cette précision permet d'obtenir un signal sans instabilité réduisant fortement les différentes accélérations du robot et par conséquent la puissance consommée pendant ses mouvements.

6.2.2 Téléopération par le joystick ThrustMaster

Le dispositif ThrustMaster se caractérise par un dispositif simple d'utilisation et robuste sans retour d'effort, et est souvent utilisé dans le domaine du jeu vidéo. Les Figure 63,

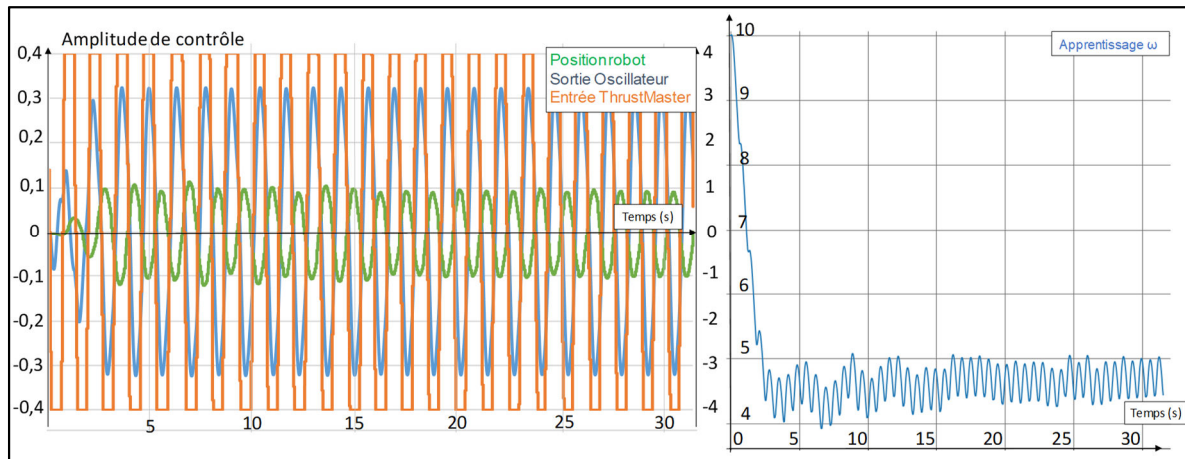


Figure 64 et Figure 65 présentent les résultats obtenus avec les 3 différents mode de contrôle, sans oscillateur, avec oscillateur de Hopf et avec l'oscillateur de RW.

6.2.2.1 Commande sans oscillateur

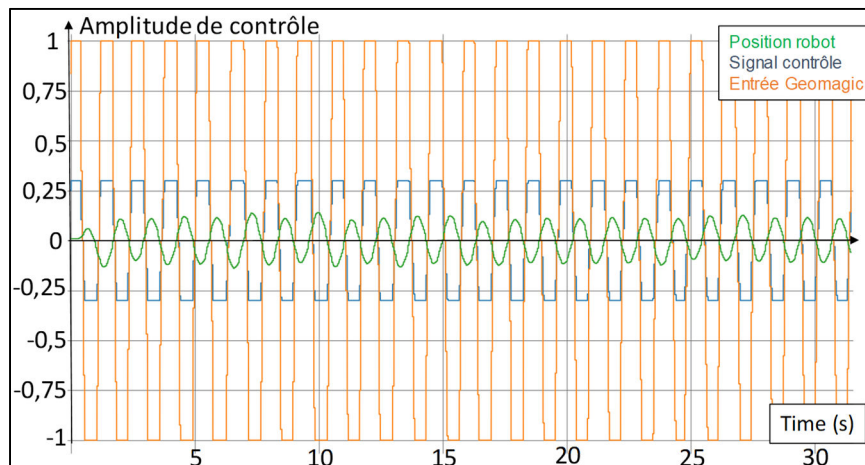


Figure 63: Contrôle avec le joystick ThrustMaster, sans l'utilisation d'oscillateur

La Figure 63 représente le contrôle du robot avec l'utilisation du dispositif maître ThrustMaster, sans oscillateur. On peut notamment observer que la forme du signal produit par le dispositif ThrustMaster se rapproche d'une forme rectangulaire telle qu'expérimenté précédemment en section 6.1.1. Elle est due à la faible mobilité et précision de ce dispositif pour le contrôle d'un mouvement de brossage dans notre cas. Cette forme de signal a pour conséquence de générer de nombreuses variations dans la contrôle du robot, comme on peut

l'observer en vert sur la position du robot, faisant ainsi varier la stabilité du mouvement. Cependant, un tel signal rectangulaire pourrait correspondre à un signal de commande généré par un dispositif d'automatisation du robot, c'est-à-dire sous téléopération. La bande passante du robot limitera donc dans ce cas les consignes appliquées par un dispositif entièrement automatisé qui remplacera l'opérateur.

6.2.2.2 Commande avec l'oscillateur de Hopf :

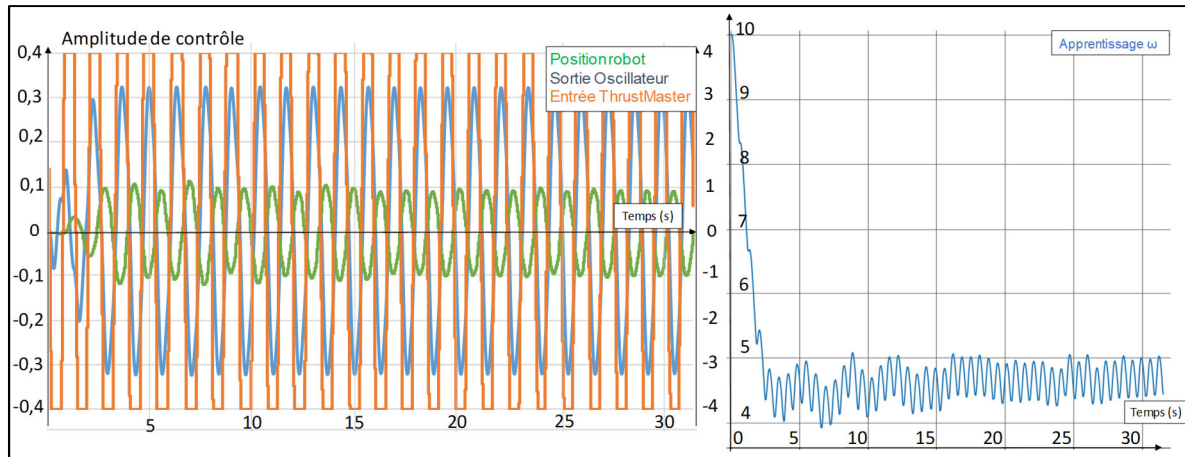


Figure 64: Contrôle avec le dispositif ThrustMaster ; avec utilisation de l'oscillateur de Hopf et apprentissage de ω

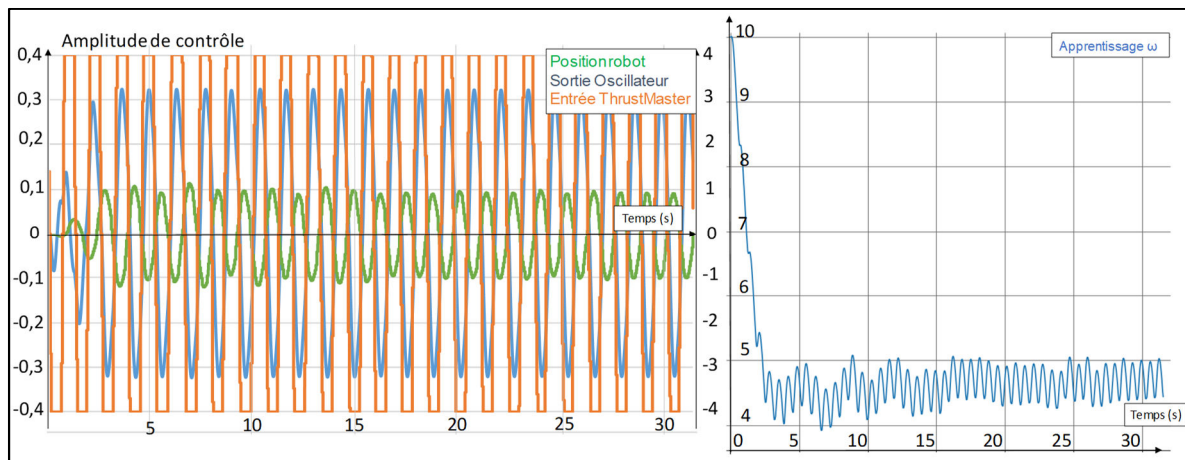


Figure 64 que combiner un oscillateur avec le dispositif ThrustMaster, permet de supprimer ces instabilités quel que soit la qualité du signal du dispositif tout en synchronisant l'oscillateur et le contrôle robot sur la fréquence fondamentale. Ces propriétés de l'oscillateur permettent ainsi de stabiliser le mouvement du robot en le rendant plus rythmique indépendamment du signal du dispositif maître.

On constate aussi que l'apprentissage du paramètre ω permet de faire varier la fréquence propre de l'oscillateur, initialement fixé à 10, la valeur se stabilisant sur la

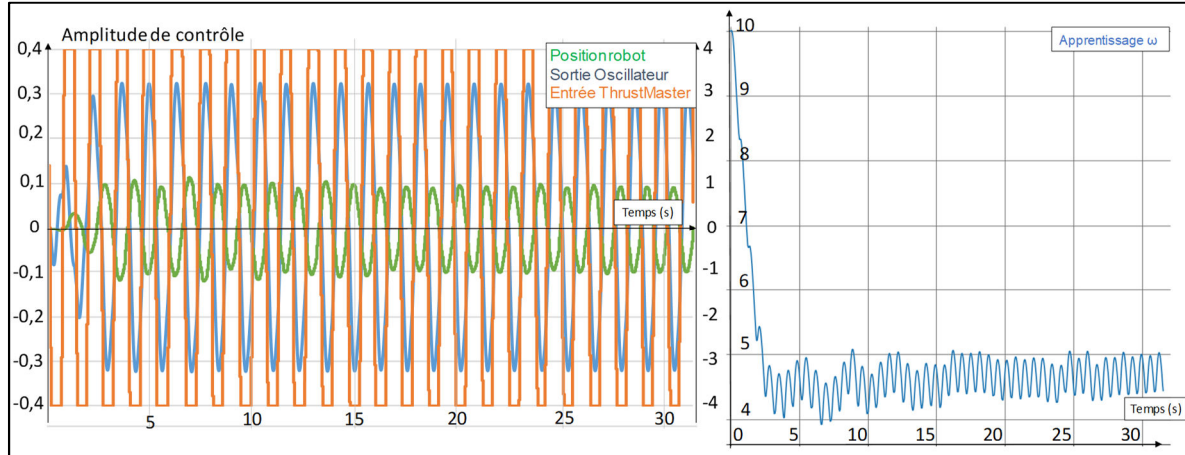


Figure 64 entre 4,5 et 5 ce qui correspond à une fréquence du signal de commande de 0,73Hz donc toujours représentative des signaux enregistrés lors de la tâche réelle.

6.2.2.3 Oscillateur de Rowat Selverston :

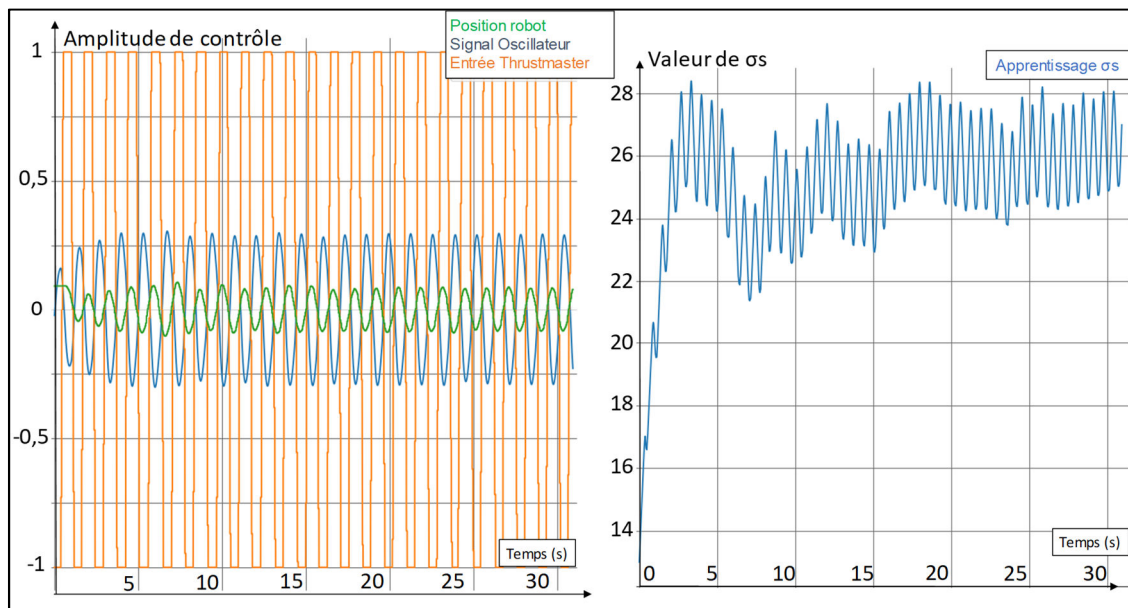


Figure 65: Contrôle avec le dispositif ThrustMaster, avec l'oscillateur de Rowat-Selverston avec apprentissage de σ_s

On retrouve Figure 65 les différents signaux de synchronisation de l'oscillateur de Rowat-Selverston lors du contrôle avec le dispositif ThrustMaster. Le signal de sortie de l'oscillateur est ainsi dépourvu d'instabilités à l'identique de l'oscillateur de Hopf ce qui rend le contrôle fluide.

Avec la règle d'apprentissage Hebbien, on observe l'apprentissage de la fréquence fondamentale du dispositif ThrustMaster avec une phase de transition [0s-3s] où la valeur de σ_s , initialement fixée à 10, augmente jusqu'à se stabiliser autour de la valeur 26 après transition.

6.2.2.4 Consommation de puissance

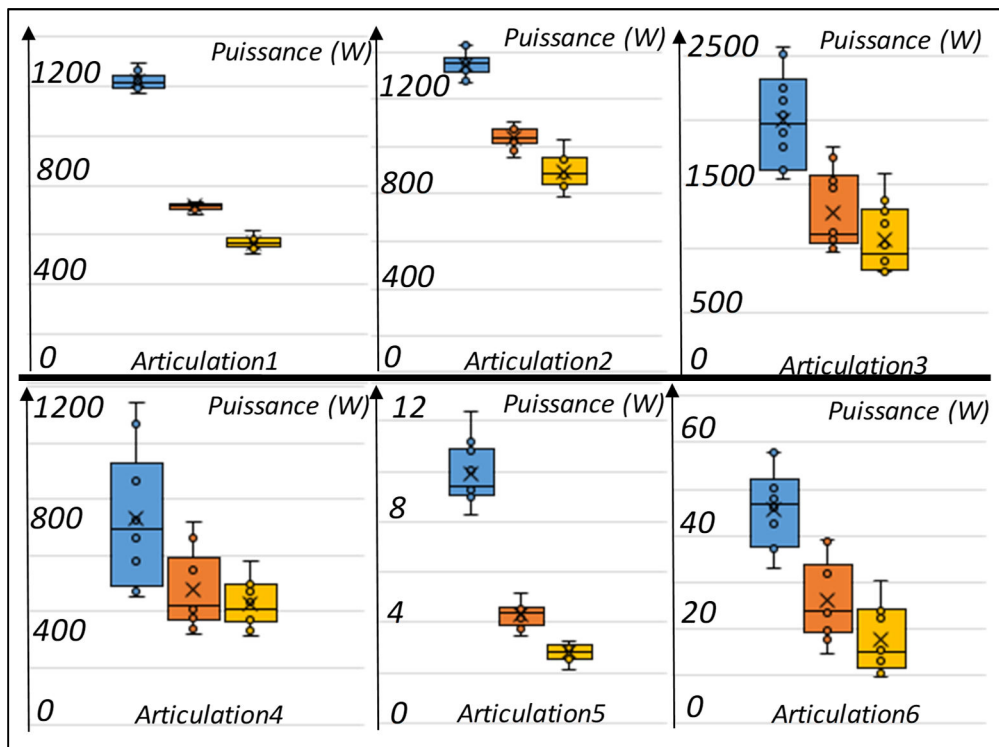


Figure 66: Puissance consommée durant la téléopération avec le dispositif ThrustMaster. Bleu : sans oscillateur ; orange : Oscillateur de Hopf ; Jaune : Oscillateur Rowat-Selverston

La Figure 66 montre la distribution des puissances dissipées durant les essais réalisés avec le dispositif ThrustMaster. En fonction des différentes méthodes de contrôle on observe une réduction de la puissance plus ou moins importante. Ces résultats nous permettent de conclure que l'utilisation d'un oscillateur permet de réduire la puissance consommée par le robot téléopéré par le ThrustMaster malgré les variations dans les signaux de commande du robot.

Tableau 8 : Répartition de la puissance consommée par le robot, contrôle avec le joystick ThrustMaster

	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P _{robot}
Sans oscillateur	1219,7	1346,7	2002,8	735,3	9,9	45,8	5360,3
Oscillateur de Hopf	713,9	1036,4	1285,1	480,2	4,3	26,3	3546,2
Oscillateur de RS	569,1	892,6	1073,7	427,9	2,8	17,7	2983,8
% réduction Hopf	-41,5	-23,0	-35,8	-34,7	-56,5	-42,7	-33,8
% réduction RS	-53,3	-33,7	-46,4	-41,8	-71,7	-61,4	-44,3

Le Tableau 8 complète la Figure 66. Il représente les différentes puissances moyennes dissipées par articulation en fonction des 3 commandes utilisées : sans oscillateur, avec l'oscillateur de Hopf et avec celui de Rowat-Selverston. On observe une réduction sur chacune des articulations du robot entre une utilisation avec oscillateur et sans oscillateur. Les articulations où l'on observe une réduction la plus significative sont celles qui permettent au robot de réaliser le mouvement de brossage sur l'axe Y (cf. Figure 49), l'articulation 1 avec 41% de réduction avec l'oscillateur de Hopf et 53% pour Rowat-Selverston, l'articulation 3

avec respectivement 35% et 46% et afin l'articulation 5 avec 56% et jusque 71%, la plus grande réduction. De façon générale, l'oscillateur de Rowat-Selverston permet d'obtenir une réduction plus importante jusqu'à 44% de puissance pour un même moyen de commande.

6.3 Conclusion

Ces expériences nous ont permis de réaliser une tâche de brossage d'un canal de coulée de fonte semblable à la tâche réelle de grattage. Différentes configurations de contrôle ont été possibles (sans oscillateur, avec oscillateur de Hopf et avec l'oscillateur de Rowat et Selverston) et pour des dispositifs maîtres de différentes qualités (Falcon, bras Geomagic et le ThrustMaster). Durant ces expériences, nous avons pu nous rendre compte que pour la génération d'un signal rythmique tel qu'un brossage, le niveau de performance d'un dispositif maître peut impacter le contrôle en générant de plus ou moins d'instabilités dans le signal. Nous avons également observé que l'intégration d'un oscillateur entre la commande d'un dispositif maître et la boucle de contrôle permet de façon générale de réduire les imperfections du signal de commande dues à la qualité du dispositif maître ou d'un mauvais contrôle. Grâce à ses propriétés de synchronisation, l'oscillateur permet de synchroniser les mouvements du robot sur la fréquence fondamentale du signal de commande de l'opérateur et ce quel que soit la qualité de ce signal envoyé.

Avec ces expériences, nous avons pu observer que les réductions de puissances consommées sont dues à la transformation des formes des signaux de commande, conséquence de l'utilisation d'un oscillateur. En effet plus le signal du dispositif maître sera irrégulier plus l'intérêt de l'oscillateur à rendre le signal bio-inspiré sera important et réduira la puissance consommée.

Lorsque le dispositif maître est de qualité inférieure (amplitude de mouvements faible, sans forces ressenties, ...) tel que le ThrustMaster, les expériences nous ont montré la présence de d'instabilités dans le contrôle à la différence du bras Geomagic qui permet de générer un signal plus stable. Ces instabilités peuvent apparaître également dans le cas où l'opérateur qui téléopère le robot n'est pas formé ou exerce une commande brutale et ce même avec un dispositif de qualité supérieur.

En effet, on observe sur la Figure 67, les différentes distributions des puissances consommées sans l'utilisation d'oscillateur pour contrôler le robot en fonction des 3 dispositifs maîtres utilisés. Cette figure nous permet de mettre en évidence les différentes performances des dispositifs maîtres, et montre une réduction jusqu'à 37% de la puissance consommée uniquement due à la qualité du dispositif de téléopération entre les deux extrêmes, le ThrustMaster et bras Geomagic.

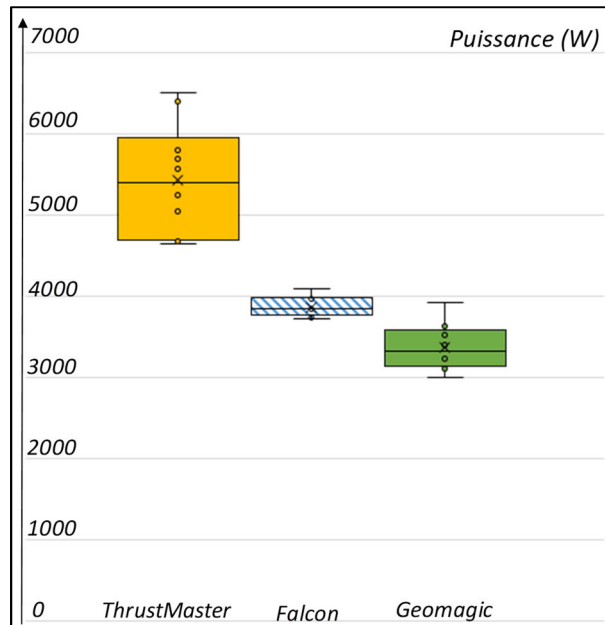


Figure 67: Puissance consommée avec les 3 dispositif maître, sans l'utilisation d'oscillateur ; Jaune :ThrustMaster, Bleu : Falcon, Vert : Geomagic

La règle d'apprentissage introduite dans les lois de contrôle, permet d'apprendre des signaux de commande utilisés afin de modifier les paramètres de fréquence propre aux oscillateurs (ω et σ_s). Pour chacun des oscillateurs, nous avons observé la convergence de ces paramètres correspondant aux valeurs de fréquence similaire aux commandes des dispositifs maîtres. Son utilisation permet ainsi d'étendre la bande passante usuelle des oscillateurs via une phase d'apprentissage du mouvement. Suite à cette phase d'apprentissage, l'oscillateur sera capable de générer un signal par rapport à la dernière fréquence apprise et ce même s'il n'y a plus la présence d'un signal de forçage. Cela peut par exemple permettre à l'opérateur de commander le robot afin de lui apprendre à n'importe quel moment un mouvement via un dispositif maître, afin qu'il puisse le reproduire en toute autonomie une fois l'apprentissage de fréquence effectué.

De façon générale, ces différentes propriétés rendues possibles par l'utilisation d'un oscillateur pour téléopérer un robot par un dispositif maître devienne intéressantes dans un environnement difficile identique à celui de Saint-gobain. Chaque installation doit être robuste afin de résister aux contraintes d'environnement et aux manipulations avec les EPIs. Utiliser alors un dispositif maître simple et robuste prend tout son sens et la combinaison avec un oscillateur permet d'obtenir un contrôle performant sans le besoin d'investir dans un dispositif haptiques performant mais peu robuste.

7 Expériences complémentaires

Dans cette section nous allons parcourir différentes expériences complémentaires que nous avons réalisé durant cette thèse en parallèle des expériences précédentes. Ces expériences nous ont permis de mieux comprendre les phénomènes liés à l'utilisation de nos 3 dispositifs maîtres dans la téléopération du brossage par le bras Franka.

Dans une première partie, nous avons essayé d'évaluer et de caractériser le brossage effectué avec le robot Franka. Nous y étudierons 2 méthodes, une première avec l'analyse des images capturées grâce aux retours visuels de notre plateforme de téléopération, et une seconde par les forces exercées par le robot durant le brossage.

La seconde partie porte sur les essais réalisés de l'oscillateur de Rowat-Selverston afin de commander des mouvements discrets. Commander des mouvements discrets peut être intéressant dans notre application pour réaliser des déplacements d'objets ou des tâches ponctuelles.

Sommaire :

7.1 Mesure de l'efficacité des brossages.....	111
7.1.1 Analyse par traitement d'image.....	111
7.1.2 Comparaison des force du robot durant un brossage.....	113
7.1.3 Conclusion.....	115
7.2 Réalisation de tâches discrètes.....	115

7.1 Mesure de l'efficacité des brossages :

Dans ce chapitre nous présentons les 2 méthodes étudiées afin d'évaluer l'efficacité du brossage réalisé par le robot, point essentiel au développement de l'ensemble de notre système. Dans un premier temps nous présenterons notre système de mesure nous permettant d'évaluer l'efficacité de notre brossage, dans un second temps nous comparerons les forces exercées en fonction des 3 différentes architectures de contrôle.

7.1.1 Analyse par traitement d'image :

Réaliser la tâche de brossage correctement reste l'objectif principal de notre projet de robotisation. Etant impossible de reproduire en laboratoire les conditions réelles de brossage d'un canal enduit de « noir », nous avons utilisé de la craie afin de recouvrir une surface rugueuse à brosser. L'évaluation du brossage reste en effet difficilement quantifiable par un simple capteur classique et nécessite une mesure de la surface brossée. Pour se faire nous avons réalisé une mesure de l'état de surface avant brossage afin de la comparer à une mesure après brossage.

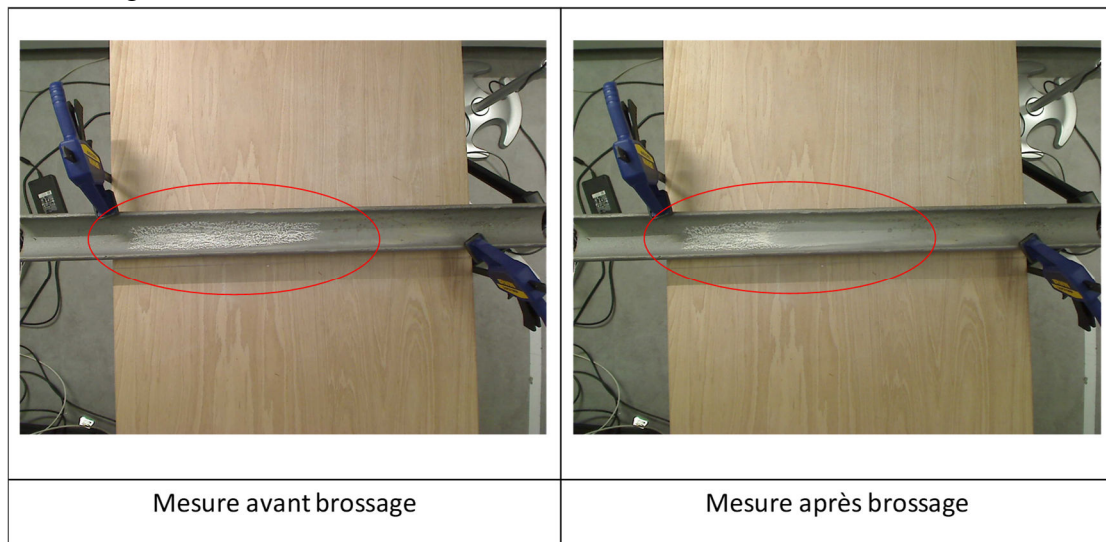


Figure 68: Mesure de la surface de brossage en téléopération.

Afin d'évaluer l'état de surface initial nous avons réalisé une capture de cette surface grâce à l'une des caméras utilisées pour la téléopération. La Figure 68 montre la surface du canal recouverte de craie à brosser. Pour évaluer l'impact du brossage nous avons effectué une seconde mesure de la surface après brossage dans le but de comparer ces deux états. Pour ce faire nous avons recherché un moyen de quantifier un écart de mesure entre ces deux captures. N'étant pas l'objectif prioritaire de la thèse, nous nous sommes orienté vers un software simple nommé Mesurim [69], réalisé par Jean-François Madre, enseignant associé à l'équipe ACCES de l'ENS-Lyon. Mesurim permet de réaliser différents types d'analyse sur des images numérisées ou des photos.

Nous avons dans un premier temps essayé de quantifier la zone sous différentes formes en utilisant l'outil de mesure de surface de Mesurim. Cet outil permet de quantifier le nombre de pixel semblable à ceux précédemment sélectionnés avec la souris et de les mettre en surbrillance en jaune.

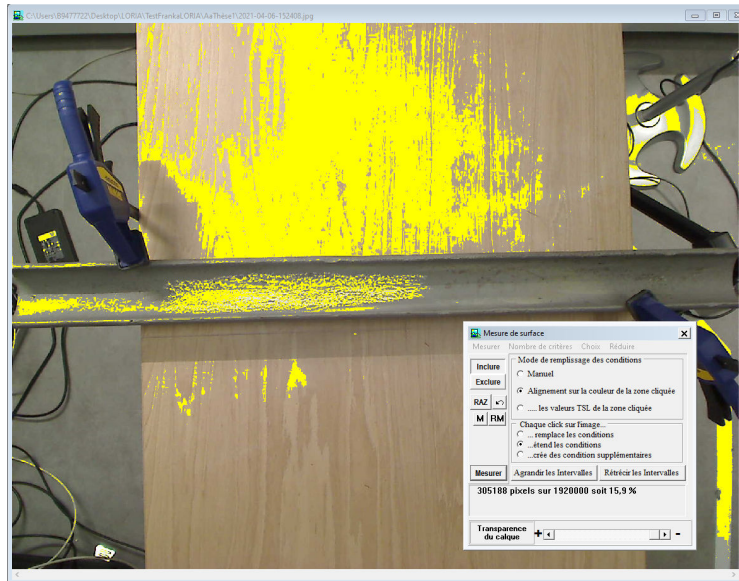


Figure 69 : Mesure de la quantité de craie avant brossage

La Figure 69 représente, surlignée en jaune, la quantité de craie mesurée suite à la sélection des pixels blanc sur la trace de craie. On remarque rapidement que l'utilisation de cet outil permet de mesurer la quantité de craie à l'intérieur du canal mais on remarque également qu'il comptabilise les pixels hors du canal. Après différents essais réalisés afin de trouver différents paramètres de mesure, ces mesures ne nous permettent pas d'effectuer une mesure précise de la quantité de craie sur l'ensemble de l'image.

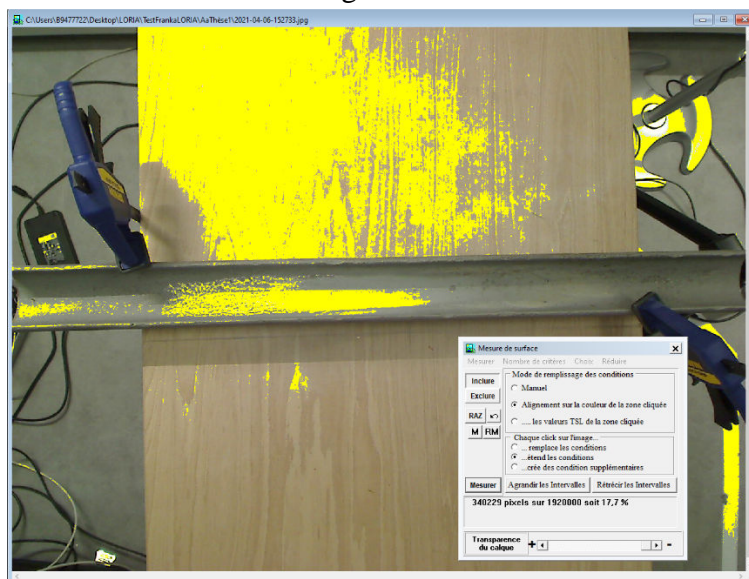


Figure 70 : Mesure de la quantité de craie après brossage

La Figure 70 représente l'essai de mesure de quantité de craie sur la surface brossée. À l'identique de la mesure précédente nous nous retrouvons avec une mesure à la fois sur le canal mais également sur l'ensemble de la capture. Afin de remédier à ce problème de mesure, nous avons cherché un second moyen de mesure rapide. Nous nous sommes porté sur la comparaison pixel à pixel des captures avec et après brossage de la craie.

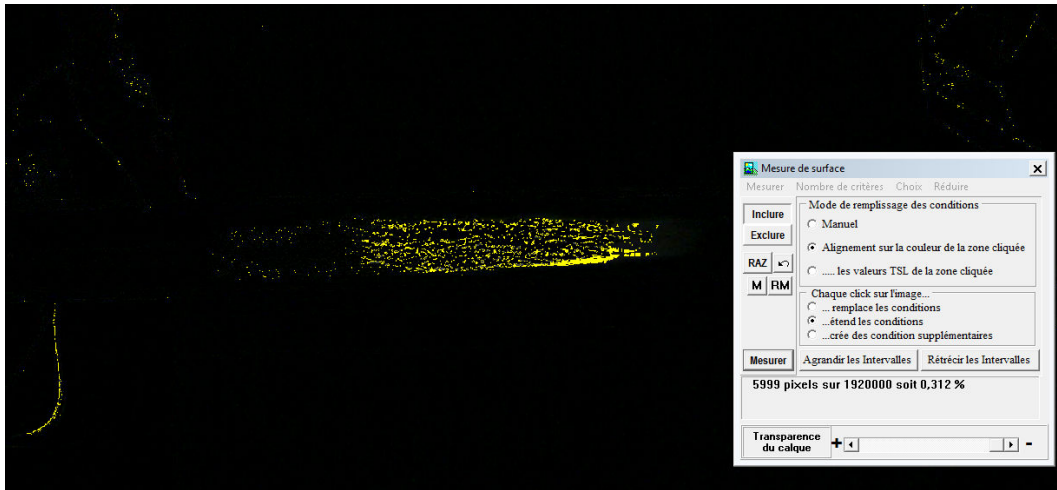


Figure 71: Mesure de la surface broyée par soustraction des captures avant et après broyage

On retrouve Figure 71 la deuxième méthode que nous avons utilisée afin de quantifier la surface de craie broyée par le robot durant les expériences. Pour ce faire nous avons utilisé différents outils disponibles dans Mesurim dont un permettant de réaliser des combinaisons entre différentes captures. Afin de quantifier la quantité de craie broyée, nous avons réalisé une soustraction pixel à pixel entre les deux captures de la Figure 68. Cette combinaison permet de faire sortir en noir les pixels inchangés et en blanc les pixels modifiés entre les deux captures correspondant à la zone broyée. On retrouve ainsi le résultat sur la Figure 71, la mesure des pixels (0,312% des pixels global) qui ont été modifiés en blanc nous permettant d'avoir une mesure plus fine et représentative de la surface broyée par le robot afin d'évaluer l'efficacité du broyage.

Ces mesures nous ont permis d'avoir une tendance du broyage, l'utilisation de la craie comme substituant le plus porche du noir à canal n'a pas eu le comportement escompté. En effet une fois la surface broyée, les poussières de craie stagne à l'intérieur du canal formant des taches blanches perturbant les différentes mesures que nous avons effectuées. Ces expériences nous renforcent dans l'idée qu'une mesure de la qualité du broyage du canal sera plus efficace avec une caméra infra-rouge thermique que le robot pourrait porter, plutôt que des caméras classiques.

7.1.2 Comparaison des force du robot durant un broyage :

La seconde méthode mise en place afin de qualifier la performance du broyage s'est basée sur l'analyse des forces extérieures du robot disponibles par le topics ROS « *Robot_state* ». Nous avons montré précédemment que l'une des propriétés des oscillateurs est de générer un signal oscillatoire similaire aux mouvements rythmiques appliqués par l'homme. Leur utilisation dans une boucle de contrôle avec un signal de forçage modifie la forme du signal de commande appliqué au robot mais également le mouvement de broyage. Les forces exercées par le robot sur la surface broyée peuvent ainsi être un bon indicateur afin d'évaluer la performance du mouvement de broyage. La Figure 72 représente ainsi un exemple d'enregistrement des forces exercées par le robot lors du contrôle avec le ThrustMaster. Sont représentées les valeurs moyennes des forces enregistrées sur les 3 axes calculées sur une

fenêtre glissante de 20 valeurs (0,05s d'échantillonnage) pour chacun des moyens de contrôle. En bleu sont représentées les forces mesurées pour un contrôle direct, en orange pour le contrôle avec l'oscillateur de Hopf et en jaune pour l'oscillateur de Rowat et Selverston.

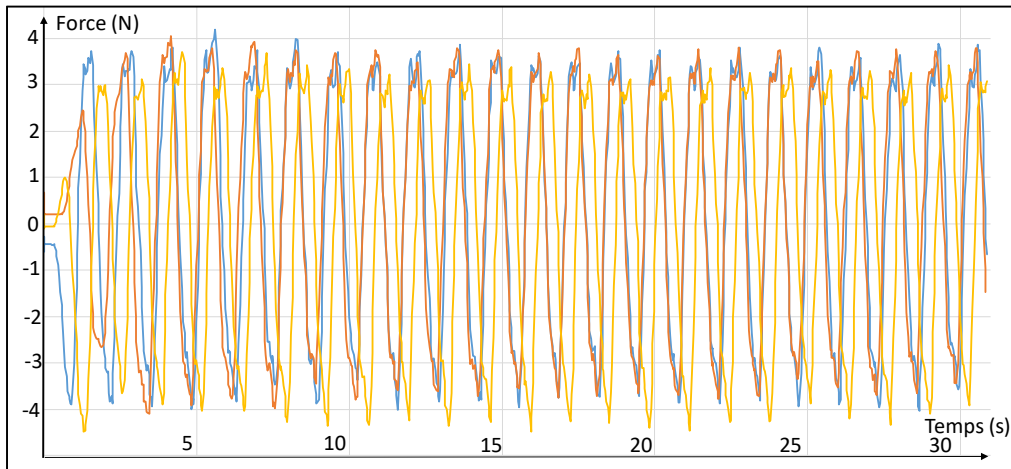


Figure 72: Force du robot exercée durant une tâche de brossage selon l'axe X. Bleu : sans oscillateur ; orange : Oscillateur de Hopf ; Jaune : Oscillateur Rowat-Selverston

La position du robot sur l'axe X étant fixé à une valeur constante, on n'observe pas de changement significatif entre les différents moyens de contrôle. Les forces mesurées proviennent des frottements de la brosse sur les parois cylindriques du canal en fonction du mouvement de l'axe Y. L'implantation d'oscillateur n'a donc pas d'effet visible sur cet axe.

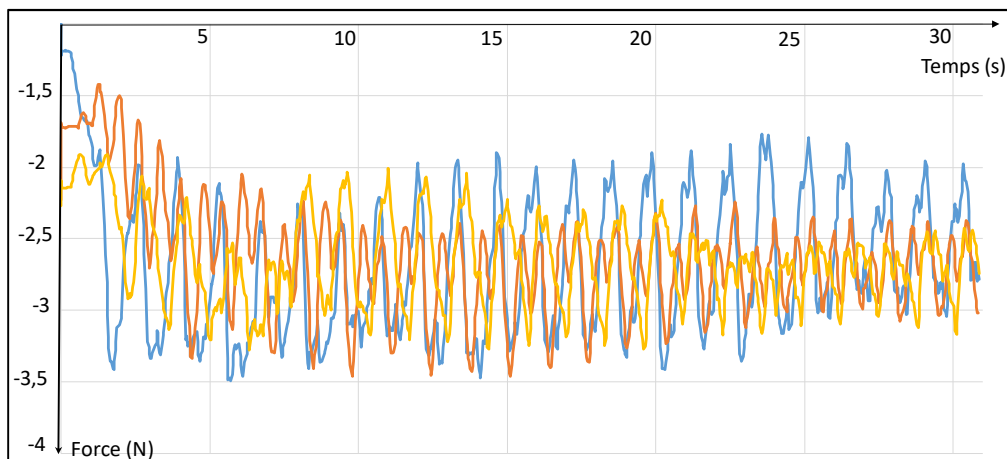


Figure 73: Force du robot exercée durant une tâche de brossage selon l'axe Y. Bleu : sans oscillateur ; orange : Oscillateur de Hopf ; Jaune : Oscillateur Rowat-Selverston

Concernant l'axe Y sur la Figure 73, axe sur lequel nous avons implémenté un oscillateur, nous observons deux effets significatifs. Le premier concerne la réduction des valeurs crêtes des forces observées sur la courbe bleue et qui correspondent à une utilisation sans oscillateur. Nous avons vu précédemment que l'utilisation d'oscillateurs permet de réduire les instabilités présentes dans les signaux de commande ce qui impacte la force exercée et de façon identique la consommation de puissance. En second point, on observe que la valeur moyenne est de même grandeur ($\approx -2,5N$) la même en fonction des types de commandes ce qui permet de conclure sur le fait que le mouvement est quasi similaire. L

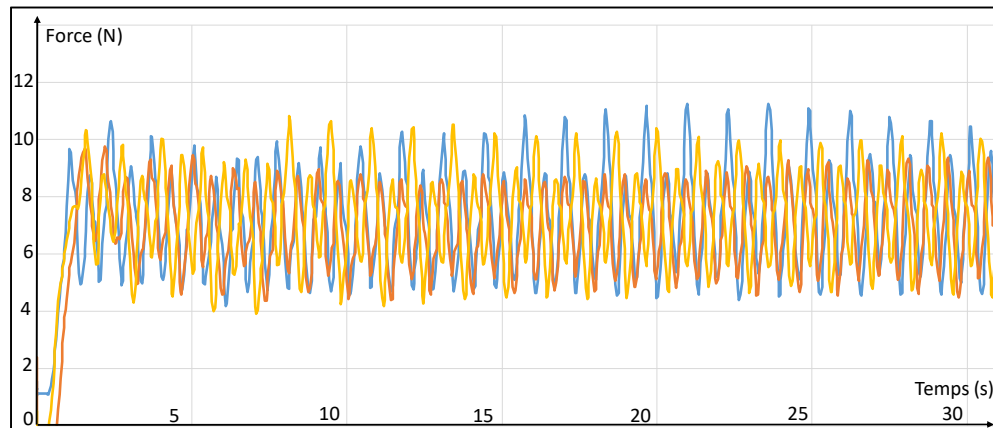


Figure 74: Force du robot exercée durant une tâche de brossage selon l'axe Z. Bleu : sans oscillateur ; orange : Oscillateur de Hopf ; Jaune : Oscillateur Rowat-Selverston

Concernant l'axe Z (Figure 74), on remarque un comportement quasi-similaire à l'axe Y. On observe qu'en fonction des 3 différentes configurations, la valeur moyenne de la force exercée sur l'axe Z est quasi similaire ($\approx 7\text{N}$). La similitude de ces valeurs permet nous fait dire que sur la durée des expériences, la force moyenne exercée sur la surface a été la même en fonction des configurations. On observe néanmoins, identiquement au résultat sur l'axe Y une réduction des valeurs crêtes entre une utilisation avec et sans oscillateur.

En conclusion, ces résultats nous permettent de dire que qualitativement la force exercée par le robot est le même en fonction des différents types contrôle, avec ou sans utilisation d'un oscillateur. De légères réductions peuvent être observées notamment sur l'axe Y, axe contrôlé avec oscillateur. Ces réductions peuvent cependant être compensées par l'augmentation du gain dans le contrôle du mouvement tout en gardant une réduction significative de la puissance consommée.

7.1.3 Conclusion

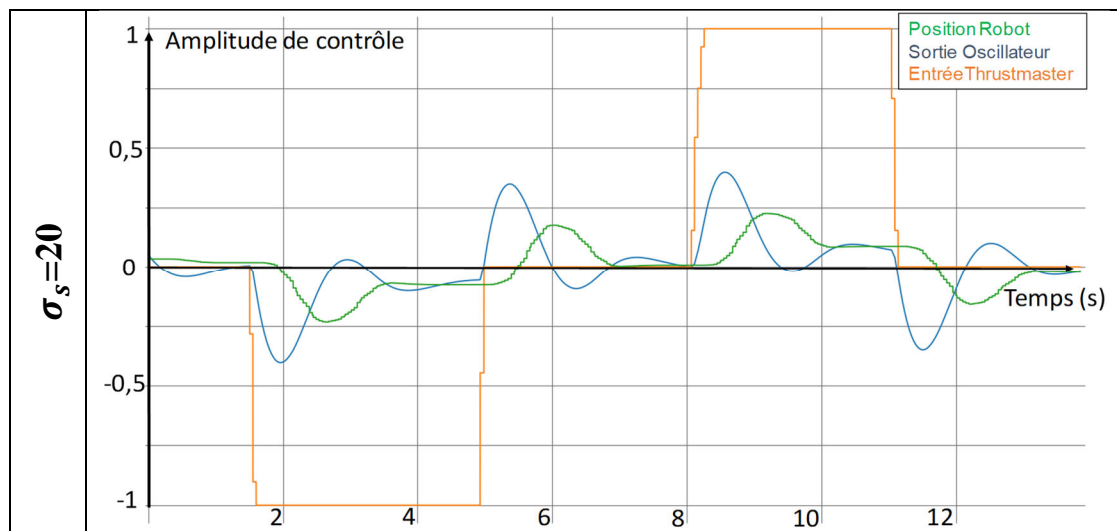
Evaluer la qualité du brossage peut devenir un point stratégique dans un mode de téléopération, car l'opérateur n'étant pas sur place doit disposer d'un moyen lui permettant de connaître l'état de son installation. N'étant pas l'objectif principal dans nos expériences de contrôle avec oscillateurs, ces 2 méthodes d'évaluation nous ont permis néanmoins d'obtenir un 1^{er} aperçu de la situation. L'analyse d'image peut être une bonne solution si elle est associée à une image thermique par une approche « réalité augmentée », car dans un système de téléopération l'opérateur devra disposer de différents retours visuels qu'il sera bon d'analyser afin d'être exploités au maximum. Analyser le comportement des forces extérieures sera également nécessaire car piloter un système robotique avec un dispositif maître passera par la conception d'une interface simple avec oscillateur.

7.2 Réalisation de tâches discrètes

Les mouvements discrets peuvent être définis comme des mouvements commençant et finissant à vitesse nulle, les mouvements rythmiques sont eux définis comme continus et

reproduits périodiquement selon un modèle identique. Il a été proposé que les mouvements rythmiques pourraient être un enchaînement de mouvements discrets [70] [71] ou au contraire, les mouvements discrets pourraient être des mouvements rythmiques avortés [72] [73]. Bien que ces questions ne soient pas encore résolues, il est évident que les tâches complexes impliquent à la fois des mouvements discrets et rythmiques. Si les robots sont capables de reproduire ces tâches, leurs contrôleurs doivent être capables de réaliser les deux et de passer facilement d'un mode à l'autre. Différentes structures ont déjà été proposées [74] [75] afin de générer des mouvements discrets et des mouvements rythmiques. Dans nos études, l'oscillateur de Rowat et Selverston [45] (décrit section 4.2.2.2) est capable de basculer facilement d'un comportements discret à un comportements rythmique contrairement à l'oscillateur de Hopf. Comme démontré dans [22], sous certaines conditions cet oscillateur peut en effet se comporter comme un contrôleur PID.

Dans nos essais, on retrouve des mouvements discrets dans certaines tâches métiers mais également dans les phases d'approches des mouvements rythmiques. Comme décrit en section 4.2.4, la modification des paramètres σ_s et σ_f permet d'influencer la réponse de l'oscillateur afin qu'il se comporte comme un contrôleur PID. La Figure 75 représente les différents essais réalisés afin d'évaluer le comportement de l'oscillateur contrôlé par le dispositif haptique ThrustMaster. Dans ces expériences, le paramètre σ_f est fixé à 0 afin d'obtenir un comportement PID, A_f à 0,2 ($\tau_m = 0.35$ et $\tau_s = 3.5$).



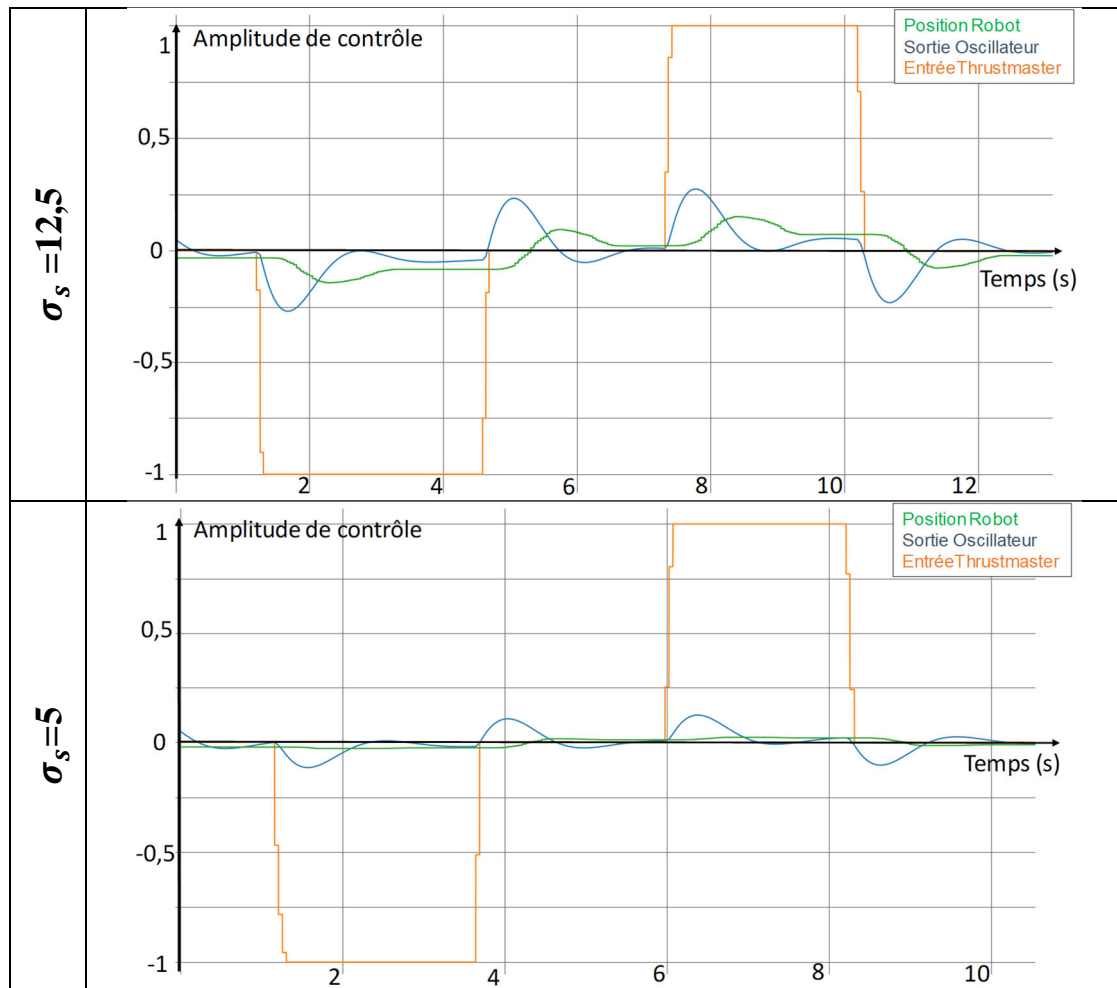


Figure 75: Réalisation de mouvements discrets avec l'oscillateur de Rowat-Selverston et le dispositif ThrustMaster

La Figure 75 représente les différentes réponses obtenues avec l'utilisation de l'oscillateur de Rowat-Selverston pour un contrôle de mouvement discret. On observe ainsi différentes réponses amorties en fonction des commandes envoyées par le dispositif ThrustMaster. On observe qu'en fonction du paramètre σ_s la réponse de l'oscillateur peut augmenter ou réduire l'amplitude d'amortissement de la réponse (en bleu).

La possibilité de réaliser à la fois des mouvements rythmiques et mouvements discrets avec une même boucle de contrôle et un même dispositif maître devient intéressante. Dans notre situation elle peut nous permettre de déplacer le robot afin de saisir une brosse ou toute autre objets pour de réaliser par la suite différentes tâches plus rythmiques nécessaires à l'entretien d'un canal de coulée.

8 Conclusion générale et perspective

Afin de garder une place forte, Saint-Gobain PAM et ses 150 ans de savoir-faire se doit d'entretenir une grande compétitivité dans ses usines. Pour ce faire elle s'efforce de rechercher et développer de nouveaux moyens de production afin de garantir un niveau de productivité au plus haut. De plus en plus restrictives, les normes d'hygiène relatives aux silices cristallines nous poussent à réaliser des analyses ergonomiques des postes de production et réfléchir à garantir les meilleures conditions sanitaires possibles aux opérateurs.

Dans un second chapitre, nous avons présenté le poste de production sur lequel notre étude s'est focalisée, le canaliste. Le canaliste a la charge d'entretenir un canal de coulée d'une machine à centrifuger, organe nécessaire à la production de tuyau en fonte ductile. Les études ergonomiques menées sur ce poste nous ont permis d'analyser les tâches réalisées par les opérateurs, les postures adoptées ainsi que les expositions aux poussières. Afin d'améliorer le poste de production, l'objectif de ces travaux de recherche est d'étudier la mise en œuvre d'un système de téléopération d'un robot collaboratif permettant de réaliser les tâches d'entretien du canal de coulée. Les études ergonomiques menées avec TEA nous ont permis d'analyser les différentes tâches réalisées et d'identifier qu'une grande partie d'entre elles sont semblables à des tâches de broyage, polissage ou curage. Les mouvements réalisés dépendent des caractéristiques biomécaniques de l'opérateur mais se répètent selon un modèle identique et sont donc qualifiés de mouvements rythmiques.

Dans le troisième chapitre, nous avons introduit une nouvelle technologie qui est la robotique collaborative permettant d'introduire des systèmes robotiques au plus près des opérateurs afin de les soulager dans les tâches difficiles, physiques, ou dangereuses. Grâce à différentes fonctions de sécurité, ces robots sont autorisés à réaliser des tâches ensemble tout en garantissant un arrêt de sécurité en cas de situation dangereuse. Ces technologies sont maintenant encadrées par différentes directives et normes afin d'aider intégrateurs et utilisateurs à respecter les règles de l'art. Introduire ce type de technologies est pour Saint-Gobain PAM un grand centre d'intérêt, car cela permettra d'améliorer les conditions de production tout en s'adaptant aux lignes actuelles, à l'image du premier projet d'intégration d'un robot UR10 sur une ligne de production de l'usine de Foug.

Dans le quatrième chapitre, nous avons présenté les oscillateurs dynamiques, souvent utilisés pour le contrôle de la locomotion robotique et qui ont la particularité de se comporter de la même façon que ces mouvements rythmiques réalisés par les opérateurs. L'un des objectifs de cette thèse a été d'implémenter ces oscillateurs pour contrôler un mouvement de broyage typique du poste de canaliste de Saint-Gobain PAM. Pour ce faire nous avons réalisé différentes expériences mettant en œuvre 2 modèles d'oscillateurs, l'oscillateur de Hopf et l'oscillateur de Rowat-Selverston, afin de prouver leurs capacités de synchronisation.

Dans le chapitre cinq, nous avons développé une plateforme expérimentale mettant en œuvre le robot collaboratif Franka contrôlé par téléopération sous ROS. Un dispositif maître permettant d'appliquer les signaux de commandes au robot à travers un oscillateur a permis de montrer qu'il est possible de réaliser la tâche de brossage dans un canal. L'environnement des lignes de production de Saint-Gobain PAM étant difficile, de nombreux EPIs équipent les opérateurs, ce qui impose des interfaces de contrôle machines simples et robustes.

Le chapitre six nous a permis via plusieurs expériences de mettre en œuvre 3 dispositifs maîtres de différentes qualités/robustesse, afin de comparer leur performance à la réalisation de telles tâches. Les résultats nous ont montré que, les signaux délivrés par les dispositifs dépendent de leur qualité. Plus un dispositif sera de faible qualité plus les mouvements de contrôle du brossage seront difficiles à réaliser et le signal envoyé sera discontinu et irrégulier. Dans ce cadre, l'utilisation d'un oscillateur permet de synchroniser le signal de commande du robot sur la fréquence fondamentale du mouvement qui est appliqué au dispositif maître, permettant ainsi de faire abstraction des instabilités générées. Nous avons observé que les dispositifs ThrustMaster et Falcon, avaient tendance à créer d'importantes instabilités durant leur contrôle et lorsqu'ils sont utilisés par le biais d'un oscillateur, ces instabilités sont transformées en un signal rythmique continu et régulier. Nous avons mesuré l'impact de cette transformation par le calcul de la puissance consommée par le robot durant nos expériences. Environ 51% de réduction de puissance globale a été observé avec le dispositif Falcon, et 44% avec le ThrustMaster pour un même mouvement. Quant au dispositif Geomagic, plus performant mais plus fragile que les deux premiers, les signaux générés ne présentent pas d'instabilités et la puissance consommée se retrouve ainsi similaire avec et sans l'utilisation d'un oscillateur.

En parallèle de ces expériences, dans le chapitre sept, nous avons mis à l'étude deux méthodes de quantification, afin d'évaluer l'efficacité du brossage réalisé par téléopération. La première méthode est basée sur l'analyse des retours visuels déjà utilisés en téléopération, sur lesquels nous avons mesuré une quantité de pixel. La seconde méthode correspondant à la comparaison des forces mesurées par le robot, pouvant être assimilées aux forces exercées par le robot sur une surface. Ces deux méthodes nous ont permis d'avoir une tendance sur l'efficacité du brossage mais non un résultat précis. Nous avons pu ainsi observer que le brossage est quasi identique que ce soit avec ou sans utilisation d'oscillateur. L'intégration d'un moyen de mesurer l'état du canal sera ainsi nécessaire afin d'avoir le résultat sur la performance du brossage tel que proposé par la mesure thermique du canal.

La contribution principale de cette thèse concerne l'implémentation d'un contrôle bio-inspiré pour un robot collaboratif sur la base d'oscillateurs dynamiques afin de réaliser des tâches existantes d'un milieu industriel. Pour ces applications l'utilisation d'oscillateurs permet de rendre le contrôle moins automatisé et plus proche du mouvement qu'un opérateur pourrait réaliser. Grâce à leurs capacités, les oscillateurs sont capables d'adapter leur comportement face aux changements de signal de contrôle (fréquence, amplitude, nature), permettant ainsi d'adapter le contrôle en fonction de la situation. L'intégration de l'oscillateur

de Rowat-Selverston permettra de compléter le spectre d'action du contrôle bio-inspiré en élargissant les mouvements possibles du robot aux mouvements discrets.

L'utilisation d'un système de téléopération permettra de délocaliser l'opérateur des différentes expositions liées à son poste de travail. Ce mode de contrôle est particulièrement intéressant pour Saint-Gobain PAM car il permet de garder l'opérateur au cœur du savoir-faire métier tout en lui assurant des bonnes conditions de travail. Afin que l'opérateur réalise correctement les mouvements de contrôle, différentes études devront être menées afin d'étudier le ressenti de l'opérateur vis à vis du système de contrôle global. L'intégration d'oscillateurs dans une boucle de commande peut causer des perturbations entre les mouvements de contrôle réalisés par l'opérateur avec le dispositif haptique et les mouvements réellement réalisés par le robot. Les retours visuels portés à l'opérateur pour contrôler le robot pourront également perturber l'opérateur s'ils ne sont pas représentatifs de la réalité. Pour quantifier ces perturbations, nous souhaitons mettre en place des expériences avec différents opérateurs de contrôle et des questionnaires pour récolter leur ressenti.

L'intérêt de développer une interface de contrôle devient ainsi important et ouvre la possibilité de nouveaux axes de recherches. L'objectif sera d'immerger au maximum l'opérateur dans l'environnement réel, afin qu'il puisse avoir un panel d'indicateurs qui lui permettront de contrôler le système robotique de manière efficiente. L'ensemble de ces réflexions ouvrent la possibilité à de nouveaux axes de recherche qui permettront d'améliorer le contrôle global.

Le premier axe concernera la conception d'un dispositif haptique spécifique, robuste à l'environnement sidérurgique tel que la poussière ou la chaleur mais devra également résister aux différentes manipulations brusques causées par les nombreuses EPIs qui équipent les opérateurs. Les efforts produits par le système robotique en contact de son environnement devront également être retransmis à l'opérateur par un dispositif de retour d'effort à l'opérateur. Ces retours permettront à l'opérateur d'exercer la bonne force durant les mouvements du robot en fonction de son ressenti. Nous pourrions également imaginer une maquette d'un canal de coulée, sur laquelle l'opérateur réalisera les tâches avec le dispositif haptique, tâches que le système robotique réalisera à l'identique dans l'environnement réel. L'intégration d'un oscillateur permettra de compenser les différentes imperfections à la génération d'un mouvement rythmique, qu'elles soient causées par la qualité intrinsèque du dispositif comme nous avons pu le voir pour le dispositif ThrustMaster, ou également causées par la qualité du contrôle de l'opérateur que ce soit en fonction de l'encombrement de ses EPIs ou de son expérience.

Le second axe, concernera les informations qui permettront à l'opérateur d'avoir un retour sur l'état de organes de production. Grâce à l'utilisation d'un système robotique, différentes nouvelles mesures pourront venir s'ajouter de manière répétitive telles que l'analyse du canal par prise de température en surface ou avec un traitement par photogrammétrie. Ces données pourront être transmises à l'opérateur via une interface de réalité augmentée qui permettra d'immerger au maximum l'opérateur dans l'environnement réel.

Une analyse ergonomique, identique à celle menée précédemment, permettra d'identifier si de nouveaux risques de TMS sont introduits par le contrôle avec un dispositif haptique ou si

cette nouvelle méthode d'entretien du canal par téléopération permettra de réduire les risques de TMS de l'opérateur. Ces données nous permettront également de comparer les gestes de l'opérateur via le dispositif haptique par rapport aux mouvements réalisés par le système robotique et ainsi analyser leur synchronisation. Avec l'utilisation d'une interface virtuelle, la question se posera de savoir si ces retours visuels ne viendront pas influencer l'opérateur d'une telle manière que l'opérateur se synchronisera sur le mouvement perçu et non sur celui qu'il doit réellement produire. Pour limiter au maximum ces dérives, différents essais devront également être réalisés afin d'adapter le design du dispositif haptique et de l'interface virtuelle au plus proche des conditions réelles. La mise en situation des véritables opérateurs dans des conditions réelles avec des questionnaires de retours d'expériences seront ainsi nécessaires afin de comprendre et de faire concorder les éléments ressentis avec les éléments réels. La conductivité électrodermale, l'oculométrie ou encore la fréquence cardiaque seront différents indicateurs à approfondir, sur lesquelles nous pourrons nous appuyer afin de quantifier le ressenti ou l'état de l'opérateur durant ces expériences et ainsi d'évaluer son aisance à piloter le système robotique d'une telle manière. En effet, la technique de l'oculométrie permet maintenant d'obtenir de nombreuses informations sur l'opérateur et notamment par la dilatation de sa pupille déduire son état de fatigue. La fréquence cardiaque permet également de refléter l'état de fatigue ou de stress de l'opérateur par une accélération du nombre de battements par minutes, moyen ou à un instant spécifique.

Cette thèse est une première étude de faisabilité concernant l'intégration d'oscillateur dynamiques pour la réalisation de tâches industrielles. De nombreuses expériences restent nécessaires au développement et à l'intégration d'un tel système de robotique collaborative et spécifiquement dans un milieu sidérurgique. Cette environnement contraindra également le design d'un dispositif de téléopération devant être robuste. Mais, nous avons vu que l'utilisation d'un oscillateur dynamique peut avoir un rôle important afin de rendre les mouvements plus inspiré du vivant. Nombreux nouveaux axes de réflexion ont été introduits dû à la pluridisciplinarité du sujet. Plonger l'opérateur dans son environnement production via des interfaces réelles ou virtuelles sera nécessaire afin qu'il soit en pleines capacités à contrôler à distance le système robotique. L'analyse comportementale de l'opérateur par l'oculométrie ou fréquence cardiaque permettra également de guider l'opérateur dans ses choix quelle que soit sa situation.

Publications

- Baptiste Menges, Michaël Sarrey, Patrick Henaff. Integration of collaborative robot in a hard steel industrial environment. *CASE 2018 - 14th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, Aug 2018, munich, Germany. ([hal-01843017](#))
- Baptiste Menges, Michaël Sarrey, Patrick Henaff. Implementation, risk assessment and safety human/robot interaction of collaborative robot UR10. *SIAS 2018 - 9th International Conference on Safety of Industrial Automated Systems*, Oct 2018, Nancy, France. ([hal-01842999](#))
- Baptiste Menges, Adrien Guenard, Patrick Henaff. Improving Control of a Teleoperated Robot Using an Adaptive Oscillator to Perform a Rhythmic Task for Foundry Applications. *ISR 2021 - IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics*, Mar 2021, Nagoya/ Virtual, Japan. ([hal-03164389](#))
- Baptiste Menges, Adrien Guenard, Patrick Henaff. Dynamic Oscillators to Compensate Master Devices Imperfections in Robots Teleoperation Tasks Requiring Dynamic Movements. *IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE2021)*, Aug 2021, Lyon, France. ([hal-03336509](#))

9 Annexe 1

Rapport entretien ergonomique

Usine de PAM 6m	Semaine n°6 2019
<p><u>Conclusion :</u></p> <p>-Tâches difficiles :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ecrémage basket • Décalage du basket • Remplissage du pot à Ferro <p>- Infos Canal :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nettoyage avec gants ou brosse pour par refroidir le canal • Goute de fonte colle au canal ou baguette -> grattage + noir • Si trop de noir déposé sur le canal, Pb qualité : noir emboitement • Si canal froid, le noir risque de décrocher • Si canal chaud, fonte s'écoule bien, attention canal trop chaud -> risque de percer <p>- Infos secondaires :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Entretien des buses à ferro, encrassement • Cassage des baguettes à la cave • Pistolet : air ou air + noir pour lisser • Interactions Machiniste → canaliste → Pontier (unidirectionnel) 	
Equipe Matin	
<p>Opérateur n°1 : ~1an d'exp</p> <p>- Canal chauffé avant de commencé et gratté au début, Regarder que le canal réagisse bien sinon retouche.</p> <p>- Si canal froid au début, le noir partira (si on garde la main + 5s -> pas assez chaud),</p> <p>- Grattage au bout d'1h avec la brosse pour pas refroidir le canal avec le karcher.</p> <p>- Faire attention aux buses de ferro en bout de canal.</p> <p>- Attention à trop mettre de noir ou pas assez de noir et qu'il soit bien sec avant de repartir en coulé sinon le noir se décolle et ça fait des noirs emboitement.</p> <p>- Température fonte, important, si trop faible faire plusieurs mesures régulières</p> <p>Faire attention aux arrêts machine, le canal refroidit et le noir peut partir à la reprise</p> <p>Foug : pistolet soit juste de l'air pour lisser, soit air +produit</p> <p>- Pistolet utilisé à Foug, conviendrait pas à PAM car canal plus grand qu'à Foug</p> <p>- Projections de fonte sont connu, si respect formation, elles peuvent être évitées</p>	
<p>Opérateur n°2 : +30 ans d'exp</p> <p>- Etat des lieux après les changements de poste, connaitre les tâches à faire (init système)</p> <p>- Casser les baquettes coincées avant qu'il y ai un gros tas</p> <p>- Tâches difficiles : Remplir les trémies AZL et boîtes à ferro en bas 6, derrière la balustrade</p>	

- Tâches difficile : Décaler les baskets (effort physique)
Opérateur n°3 : 2 mois d'expérience - Tâche principale : Garder canal propre, - Nettoyage du canal avec gants et soufflette Tâche difficile : Grattage brosse -> mal dos (les premières semaines) Tâche difficile : Décaler le basket
Opérateur n°4 : Tâches dures, boîte de ferro + décrassage basket
Opérateur n°5 : 30 ans d'expérience Au bout d'1h grattage du canal + 3gamelles de noir Idée : Remplissage boîte de ferro (BE et inoculant toutes les 45min) Tâche répétitive : écrémage (poids sur les bras et dos)
Equipe Après-midi
Opérateur n°1 : 20 ans canaliste 6m Mission : Garder le canal propre (pas de baguette, pas de crasse) - Tâches : Enlever la crasse du basket ; grattage : karcher (toutes les 2h) ; mettre du noir juste après grattage - Quand : Noircir quand la baguette colle au canal. - Tâches + importantes : entretiens canal + écrémage basket - Tâches plus physique : décrasser le basket -> visuellement - Interaction avec des gestes canaliste -> machiniste -> pontier - Eléments dangereux : pont + poche ou projection de fonte - Entre 2 grattages possibilité de gratter un peu (gants ou brosse) et quelques gamelles de noir - Si trou dans le canal, mettre du ciment pour combler
Opérateur n°2 : 30 ans canaliste (Liverdun + PAM) - Pilotage du canal avec le pupitre, transfert pour faire un grattage - Grattage toutes les deux heures (brosse à 1h, karcher à 2h) - Tâches physiques : grattage canal (posture, mieux avec le karcher), noir + masque (opération cloison nasal) - Points les plus dangereux : chaleur + poussière - Zones sensibles : ensemble du canal et déversoir - Amélioration : Idée de brosse automatique pour brosser le canal - Grattage dès que la fonte colle au canal (baguette ne tombe pas directement à la cave) si trop de noir rajouté -> défaut noir emboitement
Opérateur n°3 : 15 ans +machiniste - Si crasse dans/sur tuyaux on retrouve la crasse en amont dans le canal - Tâches difficile : Pot à ferro, acheminement par conduite

<p>Opérateur n°4 : Polyvalent</p> <ul style="list-style-type: none"> - Douleurs : Rupture de coiffe à l'épaule à cause de port de charges - Aujourd'hui beaucoup d'améliorations - Nb et fréquence des tâches peut dépendre de la qualité de fonte
<p>Opérateur n°5 : 2,5j canaliste intérim</p>
<p>Opérateur n°6 : 8 mois canaliste intérim</p> <p>Pas de tâches compliquées, beaucoup de surveillance à faire Eléments dangereux : pont, montée machine, sol glissant (bien nettoyer)</p>
<p>Opérateur n°7 : 11ans, machiniste</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nouveauté : Enregistrement des profils d'épaisseurs. - Principalement paramétrage de vitesse : vitesse de rotation, translation, montée, bascule - Plus le canal est chaud et bien entretenu, plus la fonte arrivera vite et sera fluide - Canal mal entretenu (froid, mal gratté) -> résistance par rapport à la fonte -> placage (galette brillante sur tuyau), noir emboitement (petits trous tête du tuyau) -> fonte arrache le noir - Si noir emboitement, machiniste dit au canaliste de gratter - Tâches physiques : évacuer les noyaux cassés (Machiniste) <p>- Tâches dangereuse canaliste : machines-en haut, canaliste rempli pas le pot à ferro. Pot lourd (15/17kg). Rester debout, monter les escaliers, chaleur un peu, poussière beaucoup moins qu'avant</p>
<p>Opérateur n°8 : 3 mois, intérim, canaliste</p> <ul style="list-style-type: none"> - Prise de température à mains nue, si on arrive à rester 5s -> canal pas assez chaud - Si canal est de couleur noirci -> le noir est trop chaud et le canal n'est pas loin de percer - Tâches difficiles : A force de mal faire on s'adapte, avec la bonne technique OK - Beaucoup de chaud et froid (nez qui coule) - tâches + physiques : porter les pots à ferro (chaque heure) - Masque pas supportable, chaud, bué dans les lunettes - Tâches + importante, grattage et attention aux ferro <p>Attention au pont</p>
<p>Opérateur n°9 : Pontier, 12 ans</p> <p>Canaliste : projection fonte, été chaleur + poussière 5 à 6 semaines de formations pour le poste, Fiches techniques</p>

10 Annexe 2

Rapport Ergonomique

L'analyse ergonomique réalisée avec l'entreprise TEA a permis d'analyser le poste de canaliste sous deux angles, les différentes postures adoptées par l'opérateur ainsi que les zones d'importances. Ci-dessous sont présentés succinctement différents résultats pour ces deux parties analysées.

10.1 Analyse posture opérateurs

Les deux figures suivantes représentent une cartographie générale des sollicitations corporelles de deux opérateurs. Cela permet de voir quelles sont les articulations les plus sollicitées pour l'activité de canaliste.

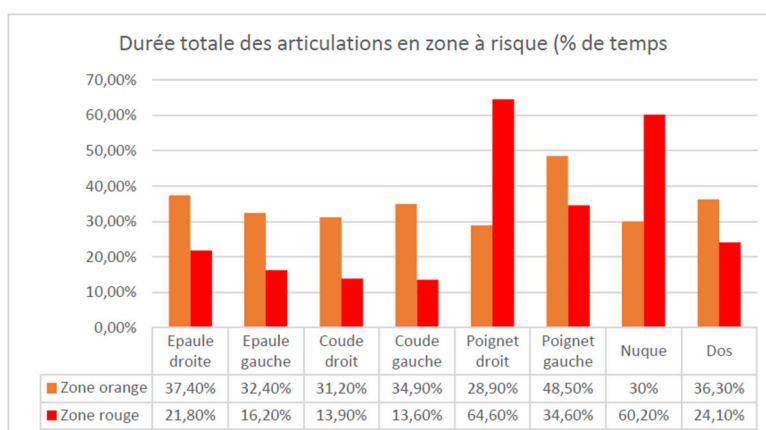


Figure 76: Pourcentage de temps en zone à risque du canaliste 1

On observe que pour le canaliste 1, trois articulations sont fortement sollicitées : le poignet droit, poignet gauche et la nuque. Ces articulations sont sollicitées plus 1/3 du temps d'enregistrement dans des zones à risques.

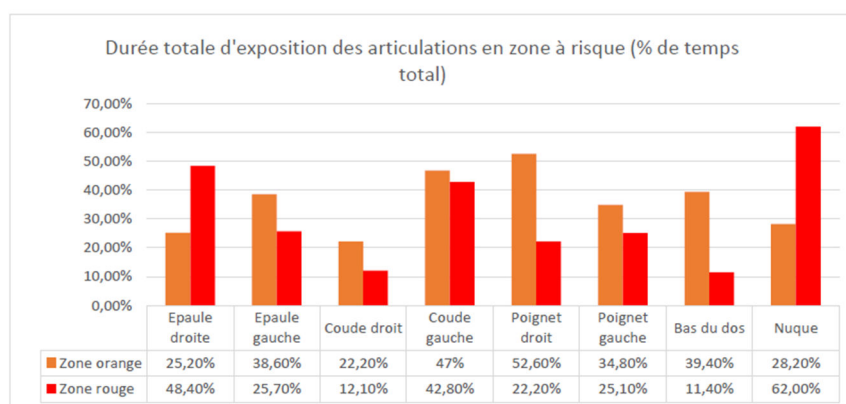


Figure 77: Pourcentage de temps en zone à risque canaliste 2

On observe que pour le canaliste 2, trois articulations sont également fortement sollicitées : l'épaule droite, le coude gauche et la nuque. Ces articulations sont sollicitées plus 1/3 du

temps d'enregistrement dans des zones à risques. Par ces deux figures nous pouvons voir que le poste de canaliste de façon générale sollicite les articulations de l'opérateur. En fonction de l'opérateur les articulations sollicitées sont différentes et sont dépendants des méthodes de l'opérateur et des bonnes pratiques que celui-ci peuvent adopter. Il est ainsi important de travailler à la réduction des différentes sollicitations en modifiant les outils ou l'environnement de travail mais également de bien former les opérateurs aux différents risques.

10.2 Suivi oculaires :

L'ensemble des données collectées par le système de suivi oculaire Tobii nous a permis de retracer l'activité visuelle de l'opérateur durant les enregistrements (Figure 78).

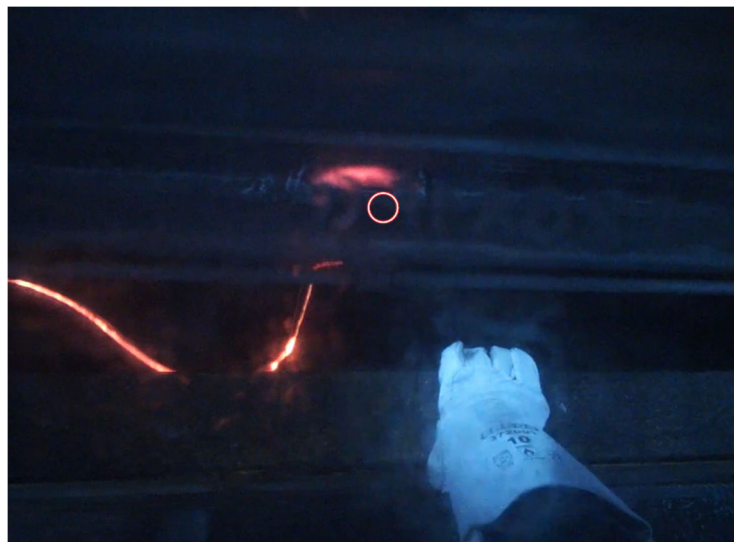


Figure 78: Capture d'écran du suivi oculaire de l'opérateur

L'activité oculaire de l'opérateur s'est portée sur de nombreux points stratégiques du poste de production. On retrouve Figure 79 la répartition des zones de surveillance sur lesquelles l'opérateur s'est le plus focalisé. On remarque que ces zones se portent sur les éléments principaux de production que l'on a pu décrire en section 2.2.1.

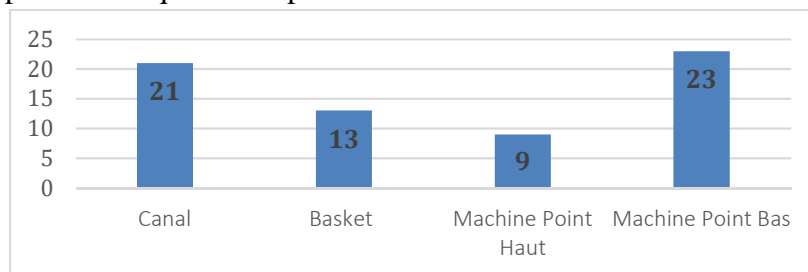


Figure 79: Répartition des zones de surveillance de l'opérateur, en nombre d'occurrence

On note au total 66 occurrences de surveillance d'une durée moyenne de 30 secondes chacune, c'est donc au totale 33 minutes que l'opérateur a passé à surveiller sur un total de 1h15 d'enregistrement. Cette répartition nous permet de dire que l'opérateur porte un intérêt particulier à son processus de production que ce soit pour des aspects de sécurité ou pour la surveillance de ses outils de production.

11 Bibliographie

- [1] T-SENS, «TEA T-SENS,» 2020. [En ligne]. Available: www.teaergo.com.
- [2] TobiiPro. [En ligne]. Available: <https://www.tobiiipro.com/fr/>. [Accès le 05 2021].
- [3] P. Thibault et R. Alexandre, «Référentiel Ergonomie SGD,» Janvier 2014.
- [4] I. F. o. Robotics. [En ligne]. Available: <https://ifr.org/>. [Accès le 05 2021].
- [5] B. Matthias, S. Kock, H. Jerregard, M. Kallman, I. Lundberg et R. Mellander, «Safety of collaborative industrial robots: Certification possibilities for a collaborative assembly robot concept,» *IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM)*, pp. pp. 1-6, 2011.
- [6] I. 10218-1:2006, «Robots for industrial environments – Safety,» *ISO Copyright Office, Geneva*, 2006.
- [7] F. D. Y. Z. K. W. Jeffrey Too Chuan Tan, «Human-Robot Collaboration in Cellular Manufacturing: Design and Development,» *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2009.
- [8] RB3D. [En ligne]. Available: <https://www.rb3d.com/>. [Accès le 08 09 2021].
- [9] L. Joseph, V. Padois et G. Morel, «Online minimization of the projected mass of a robot for safe workspace sharing with a human,» Montreal, Canada, hal-02333065, 2019 May.
- [10] A. Meguenani, V. Padois, J. D. Silva, A. Hoarau et P. Bidaud, «Energy based control for safe human-robot physical interaction,» *2016 International Symposium on Experimental Robotics, Springer Proceedings in Advanced Robotics*, n° %1hal-01398790, 2017.
- [11] C. Byner, B. Matthias et H. Ding, «Dynamic speed and separation monitoring for collaborative robot applications – Concepts and performance,» *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. Volume 58, n° %1ISSN 0736-5845, pp. Pages 239-252, 2019.
- [12] «DIRECTIVE 2006/42/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 17 mai 2006 relative aux machines et modifiant la directive 95/16/CE (refonte).,» 2009.
- [13] ISO, ISO 12100:2010, Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction, Geneva: ISO, 2010.
- [14] ISO, ISO 10218 : Robots and robotic devices—safety requirements for industrial robot, 2011.
- [15] ISO, ISO/TS 15066:2016, Robots and robotic devices Collaborative robot, Geneva, 2016.

- [16] R. J. Kirschner, N. Mansfeld, G. G. Pena, S. Abdolshah et S. Haddadin, «Notion on the Correct Use of the Robot Effective Mass in the Safety,» *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics*, 2021.
- [17] R. J. Kirschner, N. Mansfeld, S. Abdolshah et S. Haddadin, «Experimental Analysis of Impact Forces in Constrained Collisions According to ISO/TS 15066,» *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics*, 2021.
- [18] FOGALE robotics, [En ligne]. Available: <https://www.fogale-robotics.com/>. [Accès le 03 2021].
- [19] K.-E. M'Colo, B. Luong, A. Crosnier, C. Néel et P. Fraise, «Obstacle Avoidance using a Capacitive Skin for Safe Human-Robot Interaction,» *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2019.
- [20] U. R. UR10. [En ligne]. Available: <https://www.universal-robots.com/fr/produits/robot-ur10/>. [Accès le 05 2021].
- [21] J. Yang, T. Lam, M. Pang, E. Vasudevan, K. Musselman et E. Seinen, «Infant stepping : A window to the behaviour of the human pattern generator for walking,» *Canadian journal of physiology and pharmacology*, pp. 82. 662-74. 10.1139/y04-070, 2011.
- [22] S. D. Hogan N, « On rhythmic and discrete movements: reflections, definitions and implications for motor control.,» *Exp Brain Res.*, pp. 181(1):13-30., 2007 Jul.
- [23] D. Bennett, Hollerbach et e. al, «Time-varying stiffness of human elbow joint during cyclic voluntary movement,» *Exp brain Res*, pp. 88(2):433–442. 40, 83, 129, 186, 193.
- [24] M. Williamson, «Rhythmic robot arm control using oscillators,» *Proc. of 1998 International Conference on Intelligent Robots and systems*, Vols. %1 sur %2Victoria-Canada, pp. 77-83, 1998.
- [25] M. Jouaiti et P. Henaff, «CPG-based Controllers can Generate Both Discrete and Rhythmic Movements,» *IEEE IROS*, 2018.
- [26] F. Mattia, A. Paolo et F. Luigi, «Bio-inspired emergent control of locomotion systems,» *World Scientific Publishing*, 2004.
- [27] Y. Fukuoka, H. Kimura et A. Cohen, «Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on irregular terrain based on biological concepts,» *The International Journal of Robotics Research*, vol. 22, n° %13-4, pp. 187-202, 2003.
- [28] A. J. Ijspeert et A. Crespi, «Online optimization of swimming and crawling in an amphibious snake robot,» *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 24, n° %11, pp. 75-87, 2008.
- [29] L. Righetti, J. Buchli et A. J. Ijspeert, «Dynamic Hebbian learning in adaptive frequency oscillators,» *Physica D 216*, p. 269–281, 2006.
- [30] A. J. Ijspeert, «Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A review,» *Neural networks 21*, p. 642–653, 2008.
- [31] J. Conradt et P. Varshavskaya, «Distributed central pattern generator control for serpentine robot,» *International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN)*, 2003.

- [32] A. Kamimura, H. Kurokawa, E. Toshida, K. Tomita, S. Murata et S. Kokaji, «Automatic locomotion pattern generation for modular robots,» *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2003.
- [33] P. F. Rowat et A. I. Selverston, «Oscillatory mechanisms in Pairs of neurons connected with fast inhibitory synapses,» *Journal of Computational Neuroscience*, vol. 4, n° 12, pp. 103-127, 1997.
- [34] H. E., «Abzweigung einer periodischen lösung von einer stationären lösung eines di,» *Ber Math-Phys Kl Sächs Akad Wiss Leipzig*, vol. 94, pp. 1-22, 1942.
- [35] A. Kazuyuki, M. Gen et I. Yuhji, «Periodic and non-periodic responses of a periodically forced Hodgkin-Huxley oscillator,» *Journal of Theoretical Biology*, vol. 109, pp. 249-269, 1984.
- [36] M. K., «Sustained oscillations generated by mutually inhibiting neurons with adaptation,» *Biological cybernetics*, vol. 52, pp. 367-376, 1985.
- [37] L. A. Low, P. G. Reinhall, D. W. Storti et E. B. Goldman, «Coupled van der pol oscillators as a simplified model for generation of neural patterns for jellyfish locomotion,» *Control Health Monit.*, vol. 13, p. 417-429, 2006.
- [38] C. Li, R. Lowe et T. Ziemke, «Humanoids learning to walk ; a natural CPG-actor critic architecture,» *Frontiers in neurorobotics*, p. 7:5, 2013.
- [39] I. A. Jan et J. Buchli, «A simple adaptive locomotion toy-system.,» *From Animals to Animats 8: Proceedings of the Seventh [ie Eighth] International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, vol. 8, p. 153, 2004.
- [40] L. Righetti et A. Ijspeert, «Programmable central pattern generators: an applications to biped locomotion control,» *Robotics and automation ICRA*, pp. pp 1585-1590, 2006.
- [41] L. K. Zhou C., «Design and locomotion control of a biomimetic underwater vehicle with fin propulsion,» *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, n° 117, pp. 25-35, 2012.
- [42] K. Seo, S. Chung et J. Slotine, «CPG-based control of a turtle-like underwater vehicle,» *Autonomous Robots*, vol. 3, n° 128, pp. 247-269, 2010.
- [43] J. Buchli, L. Righetti et A. Ijspeert, «A dynamical systems approach to learning : a frequency-adaptive hopper robot,» *European Conference on Artificial Life*, vol. Springer, pp. 210-220, 2005.
- [44] J. Mélanie et P. Henaff, «Comparative study of forced oscillators for the adaptive generation of rhythmic movements in robot controllers,» *Biol Cybern*, n° 1547-560, p. pp. 113, 2019.
- [45] F. Rowat et I. Selverston, «Modeling the gastric mill central pattern generator of the lobster with a relaxation-oscillator network,» *Neurophysiology*, vol. 70, pp. 1030-1053, 1993.
- [46] T. Hoinville, «Evolution de contrôleurs neuronaux plastiques. De la locomotion adaptée vers la locomotion adaptative,» *Ph.D. thesis (In French) University of Versailles St Quentin, Vélizy*, 2007.

- [47] J. Nassour, P. Henaff, F. Benouezdou et G. Cheng, «Mutli-layered multi-pattern CPG for adaptive locomotion of humanoid robots,» chez *Biological cybernetics*, 2014.
- [48] E. Amrollah et P. Henaff, «On the role of sensory feedbacks in Rowat-Selverston CPG to improve robot legged locomotion,» chez *Frontiers in Neurorobotics*, 2010.
- [49] S. Debnath, J. Nassour et G. Cheng, «Learning Diverse motor patterns with a single multi-layered multi-pattern CPG for a humanoid Robot,» chez *Humanoid Robot*, 2014.
- [50] M. Jouaiti, C. Lancelot et P. Hénaff, «Hebbian Plasticity in CPG Controllers Facilitates Self-Synchronization for Human-Robot HandShaking,» *Frontiers in Neurorobotics*, vol. 12, n° %129, 2018.
- [51] T. Heed, «Tool use : Two mechanisms but one experience,» *Current Biology*, Vols. %1 sur %2R1301-R1303, p. 29, 2019.
- [52] L. E. Miller, L. Montroni, E. Koun et R. Sa, «Sensing with tools extends somatosensory processing beyond the body,» *Nature*, n° %1239-242, p. 561(7722), 2018.
- [53] I. Milleville-Pennel, C. Ferrel-Chapus, Y. Coello et O. Jean-Pierre, «Contrôle sensori-moteur en situation de téléopération : données théoriques et perspectives ergonomiques,» *Presses Universitaires de France | « Le travail humain »,* vol. 65, n° %11, p. 29 à 58, 2002.
- [54] A. L. Ramos, J. V. Ferreira et J. Barcelo, «Model-Based Systems Engineering: An Emerging Approach for Modern Systems,» *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 42, n° %11, pp. 101-111, Jan. 2012.
- [55] J. A. Estefan et et al., « Survey of model-based systems engineering (MBSE) methodologies.,» *In cose MBSE Focus Group*, vol. 25, n° %18, pp. 1-12, 2007.
- [56] C. V-Rep. [En ligne]. Available: <https://www.coppeliarobotics.com/>. [Accès le 03 09 2021].
- [57] F. Emika, «Franka Emika Panda,» [En ligne]. Available: <https://www.franka.de/technology>. [Accès le 03 2021].
- [58] C. Gaz, M. Cognetti, A. Oliva, P. R. Giordano et e. al., «Dynamic Identification of the Franka Emika Panda Robot With Retrieval of Feasible Parameters Using Penalty-Based Optimization,» *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, n° %14, pp. 4147-4154, 2019.
- [59] H. Ochoa et R. Cortesão, «Control Architecture for Robotic-Assisted Polishing Tasks Based on Human Skills,» *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 630-637, 2019.
- [60] J. Singh, A. R. Srinivasan, G. Neumann et A. Kucukyilmaz, «Haptic-Guided Teleoperation of a 7-DoF Collaborative Robot Arm With an Identical Twin Master,» *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 13, n° %11, pp. 246-252, Jan.-March 2020.
- [61] L. Cohen, «Interaction naturelle avec une scène virtuelle de micromanipulation,» *Theses - Université Pierre et Marie Curie*, 2015.

- [62] R. Rahal, «Shared Control and Authority Distribution for Robotic Teleoperation,» *Univ Rennes 1*, 2020.
- [63] F. ABI-FARRAJ, «Contributions to Shared Control Architectures for Advanced,» *UNIVERSITE DE RENNES 1*, 2018.
- [64] S. Martin et N. Hillier, «Characterization of the Novint Falcon haptic device for application as a robot manipulator,» *Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA)*. Citeseer, 2009.
- [65] 3. SYSTEMS, «3D SYSTEMS TOUCH,» [En ligne]. Available: <https://fr.3dsystems.com/haptics-devices/touch>. [Accès le 04 2021].
- [66] M. Quigley, K. Conley, B. Gerkey et et al., «ROS : an open-source Robot Operating System,» *ICRA workshop on open-source software*, p. 5, 2009.
- [67] C. Hansen, J. Kotlarski et T. Ortmaier, «Experimental validation of advanced minimum energy robot trajectory optimization,» *16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, pp. pp. 1-8, doi: 10.1109/ICAR.2013.6766463., 2013.
- [68] G.-C. Vosniakos et Z. Kannas, «Motion coordination for industrial robotic systems with redundant degrees of freedom,» *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, pp. 25. 417- 31. 10.1016/j.rcim.2008.02.005., 2009.
- [69] J.-F. Madre, «Mesurim,» [En ligne]. Available: <http://acces.ens-lyon.fr/acces/logiciels/applications/mesurim>.
- [70] L. Baratto, P. Morasso et R. Zaccaria, «Complex moto patterns : walking,» *Advances in Psychology - Elsevier*, vol. 33, 1986.
- [71] A. Feldman, «Superposition of motor programs-i. rhythmic forearm movements in man,» *Neuroscience*, vol. 5, n° %11, pp. 81-90, 1980.
- [72] D. Mottet et R. J. Bootsma, «The dynamics of goal-directed rhythmical aiming,» *Biological cybernetics*, vol. 80, n° %14, 1999.
- [73] Y. Guiard, «On fitts's and hooke's laxes: Simple harmonic movement in upper-limb cyclical aiming,» *Acta psychologica*, vol. 82, n° %11-3, pp. 139-159, 1993.
- [74] D. Sternad, W. J. Dean et S. Schaal, «Interaction of rhytmic and discrete pattern generators in single-joint movements,» *Human Movement Science*, vol. 19, n° %14, pp. 627-664, 200.
- [75] A. de Rugy et D. Sternad, «Interaction between discrete and rhythmic movements: reaction time and phase of discete movement initiation during oscillatory movements,» *Brain Research*, vol. 2, n° %1994, pp. 160-174, 2003.