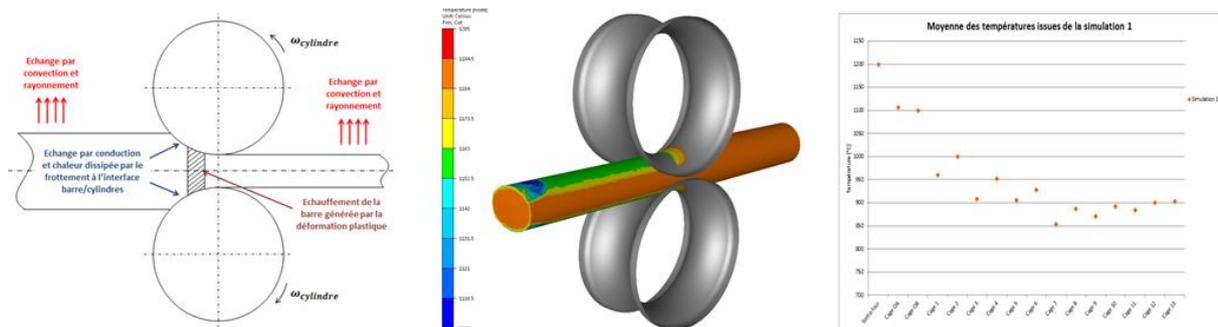


Modélisation du procédé de laminage de la ligne LUNA



Résumé :

Le chapitre 2 présente la stratégie mise en place pour modéliser la descente de laminage. Savoir prédire les sollicitations thermomécaniques (les états de déformation, la température, et les contraintes) dans la barre au cours du procédé permet d'aller plus loin dans la compréhension de l'évolution des défauts. Les raisons de modéliser le laminoir ne s'arrêtent pas là. En effet cela va permettre également de l'optimiser afin de diminuer la mise au mille, diminuer la consommation énergétique et l'usure des cylindres et enfin réduire les coûts, à la fois de la production et des essais.

SOMMAIRE

2.1 Modélisation du laminage & mesures expérimentales.....	85
2.1.1 Mise en place d'un modèle numérique.....	85
2.1.2 Résultats de la simulation numérique.....	93
2.1.3 Mesures expérimentales réalisées sur le laminoir	98
2.1.4 Résultats des mesures expérimentales.....	102
2.2 Confrontation du modèle numérique aux mesures expérimentales	108
2.2.1 Comparaison des résultats	108
2.2.2 Calage du modèle numérique avec la partie expérimentale	110
2.2.3 Vérification du caractère prédictif du modèle numérique.....	127
2.2.4 Conclusions.....	129
2.3 Sollicitations thermomécaniques subies dans la barre au cours du laminage	130
2.3.1 Evolution de la température	132
2.3.2 Evolution de la déformation.....	135
2.3.3 Evolution de la pression hydrostatique	144
2.3.4 Evolution de la vitesse de déformation	148
2.4 Conclusion.....	153
Références bibliographiques	154

Dans le chapitre précédent, l'étude bibliographique a permis de mettre en évidence les principales grandeurs thermomécaniques entrant en jeu lors de l'évolution de la propreté inclusionnaire des aciers au cours du laminage. Dans ce chapitre, la ligne de laminage LUNA va être modélisée et simulée afin d'obtenir la valeur de ces grandeurs thermomécaniques tout au long du laminage. Les résultats issus de cette simulation permettront de spécifier le cahier des charges pour le choix et le dimensionnement de l'essai de caractérisation du laminage, objet du chapitre 3.

2.1 Modélisation du laminage & mesures expérimentales

Les études rencontrées dans la littérature ont mis en avant les méthodes de modélisation d'un laminoir composé de plusieurs cages. Les grandeurs macroscopiques comme les efforts de laminage issues du modèle numérique sont comparées à celles relevées sur la ligne de production. Les grandeurs comparées sont dans le plus souvent des cas les efforts ou les couples de laminage. Les lois de comportement et d'échanges thermiques utilisées par divers auteurs pour réaliser leur modèle numérique sont développées. Il en est de même pour les modèles de frottement.

Dans la partie qui suit est présentée la méthode employée pour modéliser le laminoir LUNA. Le modèle de frottement ainsi que les lois de comportement et d'échanges thermiques retenus sont également détaillés. Les grandeurs macroscopiques données par la simulation numérique seront comparées à celles relevées expérimentalement sur le laminoir. Par la suite les paramètres thermomécaniques seront calés en se basant sur les résultats expérimentaux. Un nouveau modèle numérique sera réalisé, en conservant les valeurs des divers paramètres thermomécaniques mais en modifiant la nuance de la barre laminée et la descente de laminage afin de valider son caractère prédictif. Les résultats simulés avec ce second modèle seront de nouveau comparés à de nouvelles données expérimentales. Pour résumer deux modèles numériques sont développés en gardant les mêmes valeurs des paramètres thermomécaniques mais avec des diamètres de cylindres et des levées différentes. De plus, deux campagnes de mesures sont réalisées.

Lorsque le modèle sera calé et validé il sera alors possible de suivre les sollicitations thermomécaniques subies dans la barre lors des opérations de laminage.

Dans un premier temps, la méthode retenue pour modéliser le train de laminage est développée.

2.1.1 Mise en place d'un modèle numérique

2.1.1.1 Les objectifs du modèle numérique

Le logiciel Forge.NxT©, qui est un logiciel métier répandu dans le domaine de la mise en forme par déformation plastique à chaud, permet de faire une simulation par la méthode des éléments finis des phénomènes thermomécaniques qui se passent dans la barre au cours

du procédé. Il permet de prédire à l'échelle macroscopique les couples et les efforts sur les cages de laminage, les états de déformation, les champs de contraintes, la température, les vitesses de déformation et l'évolution de critères d'endommagement subis dans le produit mis en forme.

2.1.1.2 La méthodologie employée pour mettre en œuvre le modèle numérique

La mise en place de ce modèle numérique consiste à simuler les déformations successives de la barre dans chaque cage de laminage. Afin de réduire les temps de calculs, le modèle est découpé cage par cage et ne prend pas en compte directement les interactions avec les cages environnantes. Les études de LI et YUAN ont permis de déterminer la longueur initiale de la barre à 2m à l'entrée de chaque cage de laminage [LI05], [YUA07]. Il n'est pas nécessaire de laminier complètement la barre. La longueur de barre laminée est optimisée pour chaque cage afin de limiter les temps de calcul. En s'appuyant sur les études présentées précédemment et sur une étude préliminaire la longueur laminée en régime établi est fixée à 300mm et elle sera commune à toutes les cages. La Figure 58 illustre en détail les étapes de la méthodologie.

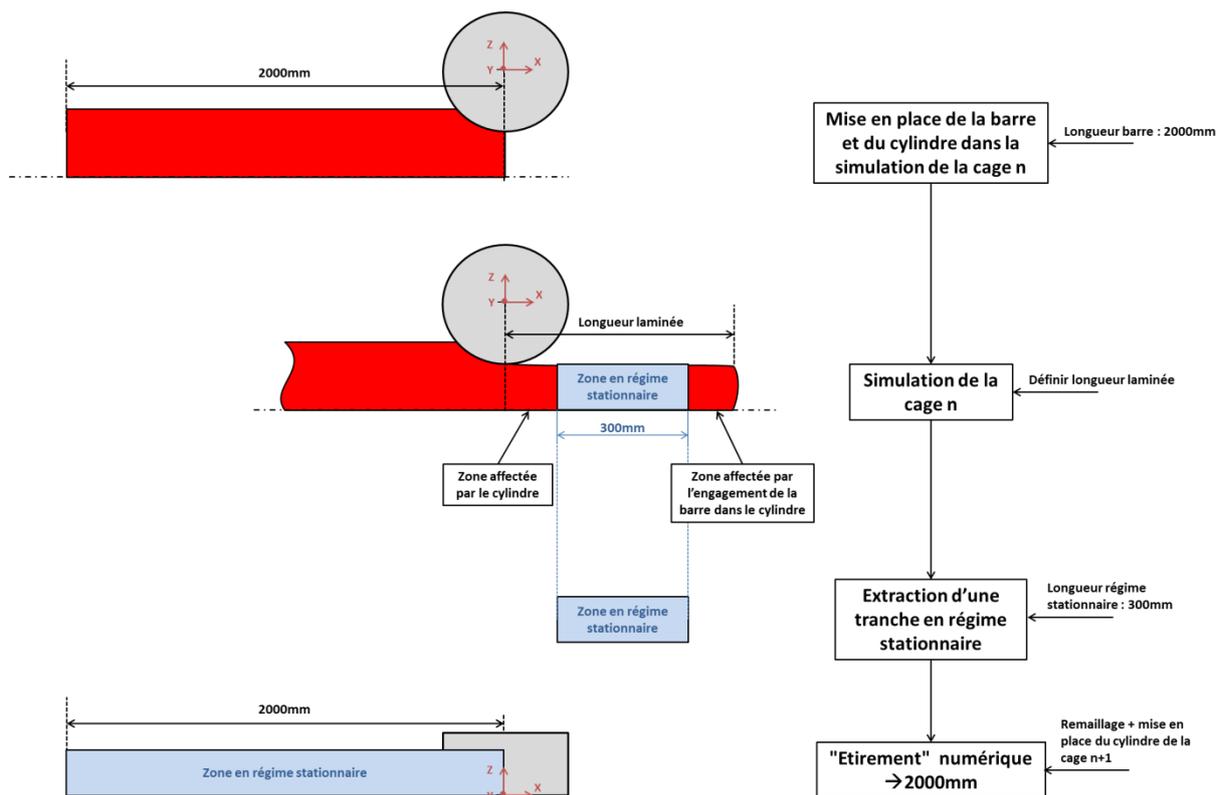


Figure 58 : Schéma de principe du modèle numérique découpé de la descente de laminage LUNA

Lors de sa mise en forme la barre peut être fractionnée en trois parties : le corps, la tête et le pied de barre. La tête et le pied de barre sont sujets à des défauts liés au régime instationnaire. En production les extrémités sont chutées à l'aide des cisailles volantes. L'impact de la barre dans les cylindres de laminage lors de l'engagement n'est pas pris en compte. La barre est engagée dans le cylindre de laminage dès le début de la simulation par une opération booléenne. Comme le montre la Figure 59, la tête de la barre est soumise à l'influence de l'engagement dans les cylindres de laminage. Les longueurs L1 et L2 représentent les zones affectées respectivement par les cylindres de laminage et par l'engagement de la barre. La valeur de la longueur L1 varie entre 100mm et 150mm tandis que la longueur L2 est d'environ 300mm. Loin des extrémités et des cylindres on suppose que la barre est dans un état thermomécanique identique à celui qu'elle aurait en sortie du laminage. Une partie de la barre laminée de longueur 300mm en régime stationnaire est prélevée. Cette portion de barre est allongée numériquement à une longueur de 2 mètres et elle est remaillée en conservant les valeurs calculées précédemment pour être ensuite placée dans la cage suivante. Tous les champs (températures, déformations, contraintes...) sont transportés d'une cage n à une cage n+1.

Le critère pour établir le régime permanent se base sur une variation de la température ($\frac{\Delta T}{T} < 2\%$) et de la déformation ($\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} < 2\%$). La Figure 59 illustre la méthode employée pour vérifier les deux critères retenus. Lorsque la barre a une longueur laminée suffisante, quatre plans sont placés dans la longueur de la barre avec un intervalle de 100mm. Dans chaque plan, sept capteurs sont introduits dans le quart de section de la barre afin de relever la valeur des températures et de la déformation équivalente afin de déterminer si les écarts d'un plan à l'autre sont inférieurs aux critères établis. Les valeurs de températures relevées ainsi que l'écart en pourcentage sont mentionnés dans le Tableau 6. Les écarts concernant les températures sont nettement inférieurs à 2%, le critère de température est donc vérifié. Cette démarche est également employée pour valider le critère de la déformation équivalente qui doit lui aussi être inférieur à 2%. Les valeurs de la déformation équivalente relevées dans chaque plan et les écarts en pourcentage sont indiqués dans le Tableau 7. Il est à noter que l'écart de la déformation équivalente calculé entre chaque plan ne dépasse pas 2%, ce qui permet d'affirmer que le critère est respecté.

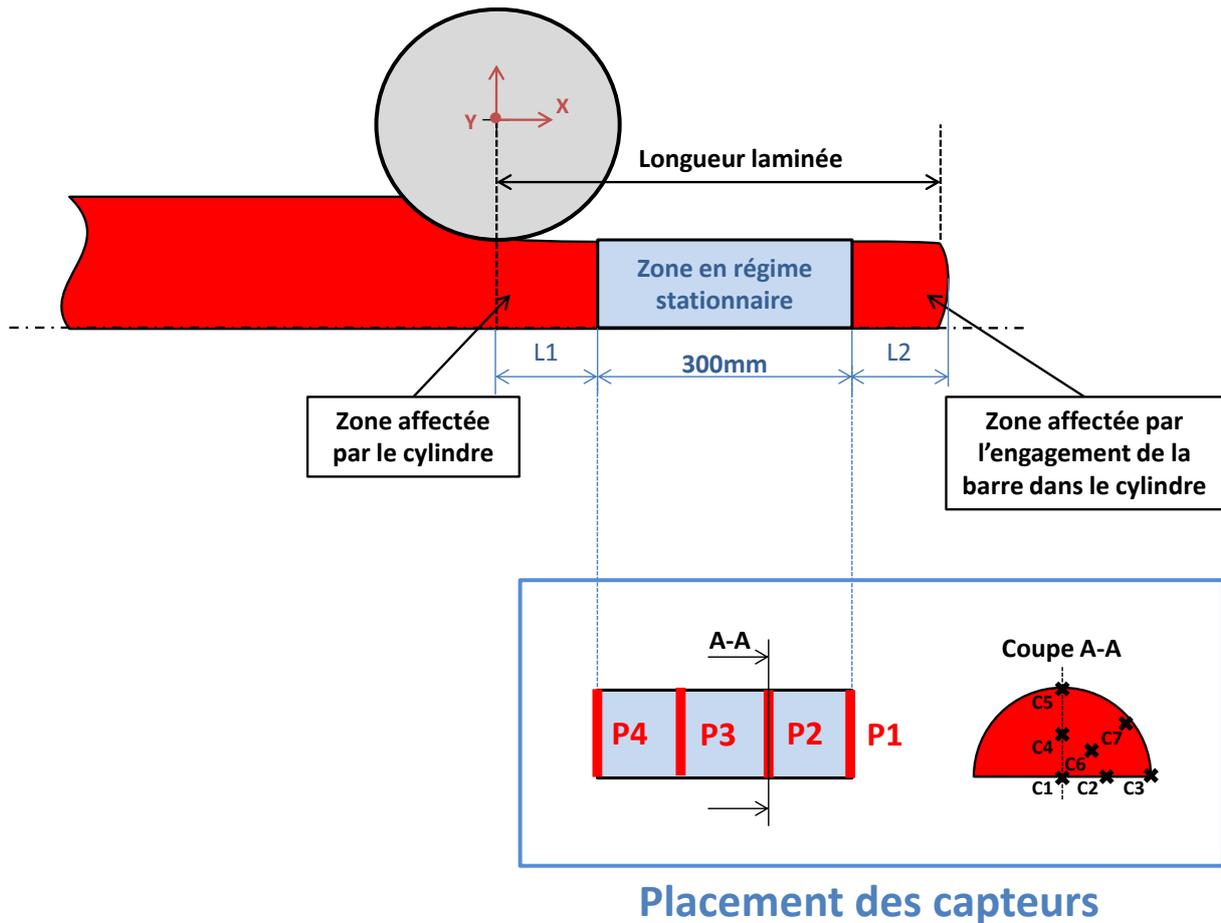


Figure 59 : Critère permettant de valider le régime établi de la portion de barre de 300mm

Tableau 6 : Relevé des températures et écarts en pourcentage pour vérifier que $\frac{\Delta T}{T} < 2\%$

	Température						
	Plan 1	Plan 2	$\Delta T(P1P2)/T(P1)$	Plan 3	$\Delta T(P1P2)/T(P1)$	Plan 4	$\Delta T(P1P2)/T(P1)$
Point 1	1204,45	1204,45	0,00%	1204,47	0,00%	1204,50	0,00%
Point 2	1204,43	1204,40	0,00%	1204,30	-0,01%	1204,31	-0,01%
Point 3	1144,76	1145,24	0,04%	1145,00	0,02%	1144,36	-0,03%
Point 4	1204,91	1204,90	0,00%	1204,88	0,00%	1204,94	0,00%
Point 5	1137,60	1134,48	-0,28%	1136,36	-0,11%	1138,04	0,04%
Point 6	1202,16	1202,90	0,06%	1202,77	0,05%	1202,62	0,04%
Point 7	1129,87	1131,30	0,13%	1130,90	0,09%	1130,30	0,04%

Tableau 7 : Relevé de la déformation équivalente et écarts en pourcentage pour vérifier que $\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} < 2\%$

	Déformation équivalente						
	Plan 1	Plan 2	$\Delta\varepsilon(P1P2)/\varepsilon(P1)$	Plan 3	$\Delta\varepsilon(P1P3)/\varepsilon(P1)$	Plan 4	$\Delta\varepsilon(P1P4)/\varepsilon(P1)$
Point 1	0,60	0,60	0,00%	0,60	0,00%	0,60	0,00%
Point 2	0,59	0,59	0,00%	0,59	0,00%	0,59	0,00%
Point 3	0,53	0,53	0,00%	0,53	0,00%	0,53	0,00%
Point 4	0,63	0,63	0,00%	0,63	0,00%	0,63	0,00%
Point 5	0,59	0,59	0,00%	0,58	-1,72%	0,59	0,00%
Point 6	0,64	0,64	0,00%	0,65	1,54%	0,65	1,54%
Point 7	0,70	0,71	1,41%	0,71	1,41%	0,70	0,00%

2.1.1.3 Mise en données du modèle numérique découplé cage par cage du laminoir LUNA

En entrée du laminoir, les semi-produits de diamètre 270mm issus de la coulée continue sont réchauffés dans un four à longerons mobiles pour atteindre une température d'environ 1200°C. Une fois la température atteinte, les blooms sont envoyés sur le train de laminage pour y être déformés afin d'obtenir la section finale souhaitée. Dans la configuration étudiée le produit laminé passe à travers 15 cages de laminage duo et 4 cages kocks pour atteindre un diamètre de 38mm avec un taux de corroyage d'environ 30. Les levées entre les cylindres des cages duo sont notées dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Levées entre les cylindres de laminage pour la simulation 1

N° Cage	OA	OB	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Levée LUNA (mm)	25	25	190	37	53	12	21	12	12	10	5	11	9	9	7

Les réductions par passes sont listées dans le Tableau 9. Le taux de réduction est donné par le rapport de la valeur de la section finale sur la section initiale et il est généralement exprimé en pourcentage ($Taux\ déformation = \frac{Section\ finale}{Section\ initiale} \times 100$). Le taux de réduction appliqué au produit dans chaque cage de laminage dépend de la levée entre les cylindres. Le diamètre final de la barre après calibration dans les cages Kocks est de 38mm. Le choix de suivre cette gamme de fabrication vient du fait qu'elle permet d'étudier le plus grand nombre de cages. Les données d'entrée du modèle numérique sont recensées dans le Tableau 10.

Tableau 9 : Taux de réduction par passe de laminage

Réduction par passe (%)	
Passe OA	17
Passe OB	16
Passe 1	6
Passe 2	20
Passe 3	28
Passe 4	30
Passe 5	25
Passe 6	30
Passe 7	27
Passe 8	25
Passe 9	20
Passe 10	26
Passe 11	21
Passe 12	28
Passe 13	25

Tableau 10 : Données d'entrée pour le modèle numérique

Paramètres	Bloom	Cylindres
Diamètre initial	270mm	Entre 350 et 700mm
Diamètre final	38mm	-
Température initiale	1200°C	Entre 65 et 90°C
Matériau	41Cr4	-
Longueur initiale	2000mm	-
Nombre de cages		15

Comme dans l'étude de YUAN, seulement un quart de bloom et un demi cylindre sont représentés pour analyser le procédé de laminage jusqu'à la cage 17 [YUA07]. Afin de prendre en compte les aspects thermiques dans la dernière étape de laminage, la moitié du bloom et un galet et demi sont modélisés dans les cages Kocks. La Figure 60 illustre la modélisation de la barre dans les cages duo et les cages Kocks. Dans le modèle numérique la barre est assimilée à un objet déformable. Quant aux cylindres, ils sont assimilés à des corps rigides, c'est-à-dire qu'ils ne subissent aucune déformation et que leur température reste constante tout au long de l'opération de mise en forme.

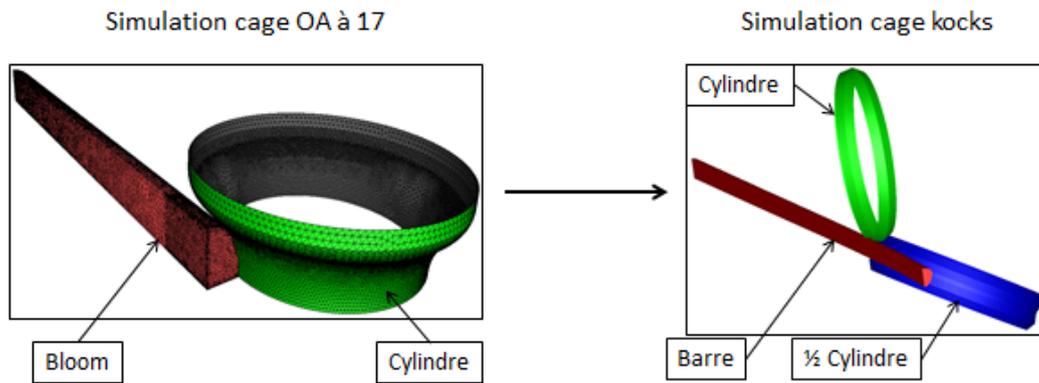


Figure 60 : Modélisation 1/4 de bloom pour les cages OA à 17 et 1/2 de bloom pour les cages Kocks

En s'appuyant sur les études de WANG, SABY, SILVA ou encore de HAWRYLUK, l'écoulement de la matière pendant le laminage est modélisé par la loi de comportement HANSEL-SPITTEL [WAN15], [SAB15], [SIL11], [HAW16]. Le frottement entre le produit laminé et les cylindres de laminage est modélisé par une loi de COULOMB limité TRESCA. En s'appuyant sur la littérature le coefficient de frottement suivant TRESCA dans notre étude est de 0,8 [LI05]. Une pré-étude a montré qu'un coefficient de frottement inférieur à 0,6 entre la barre et le cylindre de laminage provoque du glissement. Les phénomènes de transfert de chaleur décrits sur la Figure 61 sont pris en compte dans le logiciel Forge.NxT©. Conformément aux travaux de DEVADAS la valeur retenue pour le coefficient d'échange par conduction entre la barre et les cylindres de laminage dans notre étude est de 50 000W/m²K [DEV91]. La valeur du coefficient d'échange thermique par convection donnée par défaut dans le logiciel Forge.NxT© est de 10 W/m²K. Cette valeur est retenue pour notre étude. Par défaut la valeur de l'émissivité introduite dans le logiciel de simulation Forge.NxT© est 0,88.

La valeur des différents coefficients intervenant dans les échanges thermiques entre la barre et les cylindres sont listées dans le Tableau 11. Le temps de refroidissement entre chaque cage de laminage a également été pris en compte pour déterminer les échanges par convection et rayonnement.

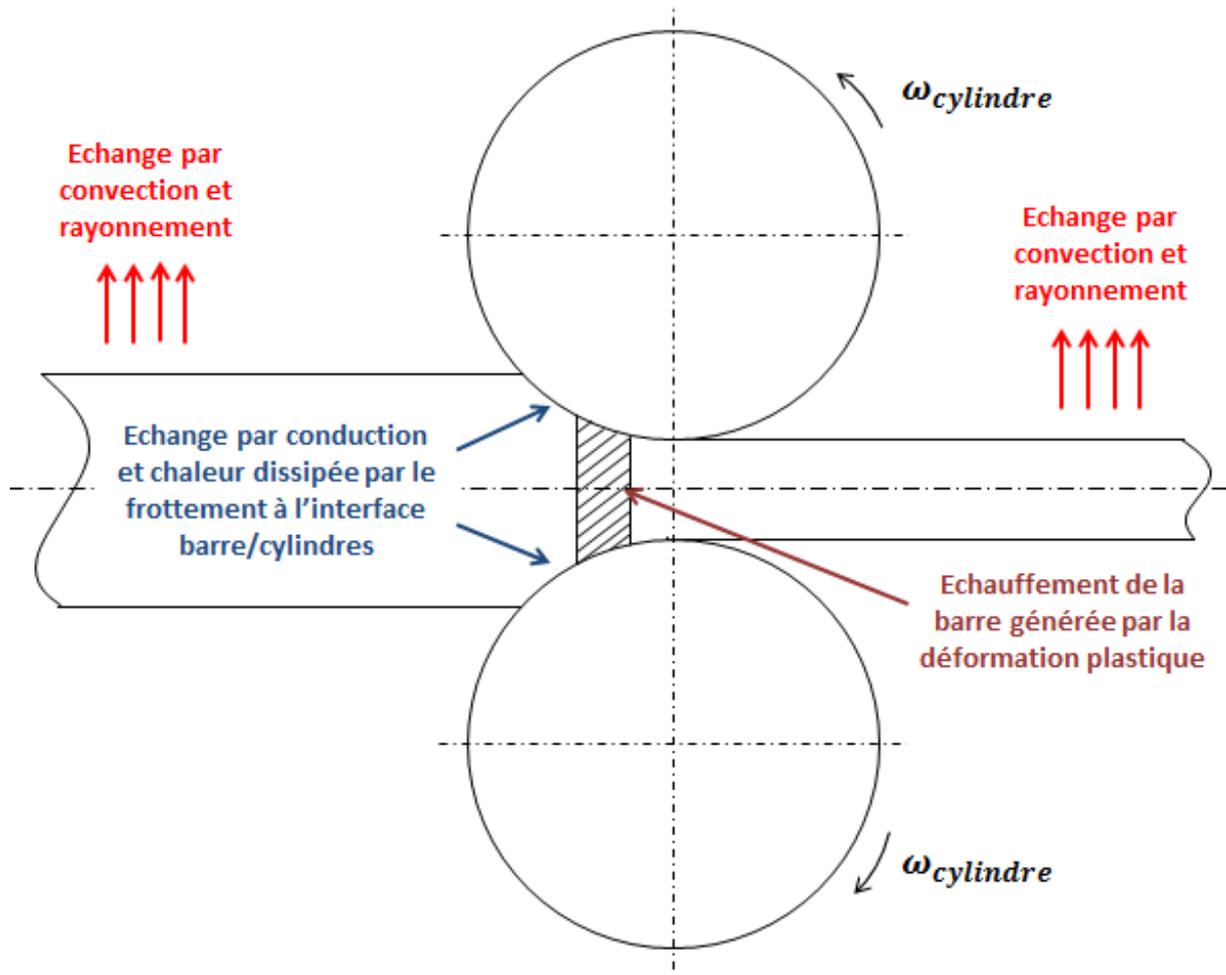


Figure 61 : Illustration des phénomènes thermiques pris en compte dans le logiciel Forge.NxT©

Tableau 11 : Valeurs des coefficients d'échanges thermiques intervenant dans la simulation numérique n°1

Type de transfert de chaleur	Valeur du coefficient
Coefficient de frottement	0,8
Effusivité des cylindres [b en $J \cdot K^{-1} \cdot m^{-2} \cdot s^{\frac{1}{2}}$]	11763
Conduction [α en $W/m^2 \cdot ^\circ C$]	50000
Convection [h en $W/m^2 \cdot ^\circ C$]	10
Rayonnement [ε sans unité]	0,88

2.1.2 Résultats de la simulation numérique

Les données de sortie du modèle numérique sont illustrées sur la Figure 62. Ces données se classent en deux catégories. La première regroupe les données de sortie servant à caler le modèle numérique par rapport aux mesures expérimentales et la seconde recense les paramètres influant sur le comportement des inclusions. En effet, le modèle numérique permet d'évaluer les paramètres influant sur la propreté inclusionnaire et la microstructure afin d'établir une référence pour le choix et le dimensionnement de l'essai représentatif (cf chapitre 3).

Les couples et les températures simulés vont permettre de faire une comparaison avec les résultats mesurés sur la ligne de production. Les couples et les températures simulés numériquement sont moyennés. Des outils pour réduire le temps de dépouillement des données numériques ont été mis en place. Dans la simulation n°1 aucun calage du modèle numérique n'a été réalisé.

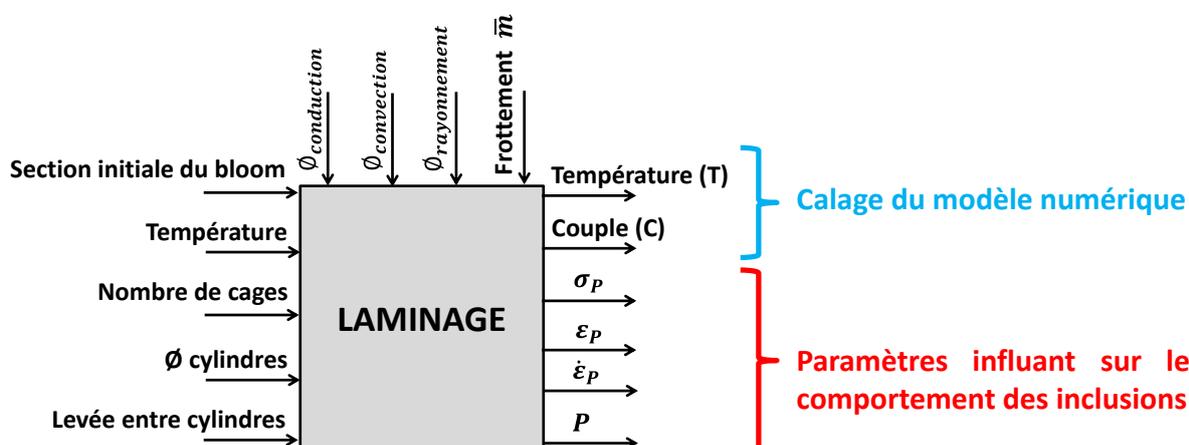


Figure 62 : Données d'entrée et de sortie permettant le calage du modèle numérique et influant sur le comportement des inclusions

2.1.2.1 Résultats des couples de laminage simulés

L'exemple présenté Figure 63 montre l'évolution du couple de laminage simulé de la cage 5. Lorsque la barre commence à être laminée le couple atteint une valeur maximum puis un régime établi se met en place ①. Les couples simulés présents dans la zone de régime établi repérée en rouge sont moyennés pour être comparés par la suite aux couples expérimentaux ②. La zone de régime permanent est déterminée de sorte à ce que le couple simulé maximal et minimal ne dépasse pas $\pm 5\%$ de la valeur moyenne afin de supprimer le pic initial. Dans le cas présenté sur la Figure 63 la valeur moyenne du couple simulé présent dans la zone de régime permanent est de 50450N.m. Les couples maximal et minimal à ne pas dépasser pour respecter la règle des 5% ont une valeur respective de 52972,5N.m et 47927,5N.m. Les couples simulés dans cette zone ont une valeur maximale de 51421N.m et une valeur minimale de 50343N.m ce qui représente un écart inférieur à 2% de la valeur

moyenne pour les deux cas. Par comparaison les couples simulés sont inférieurs aux bornes fixées par la règle des 5%.

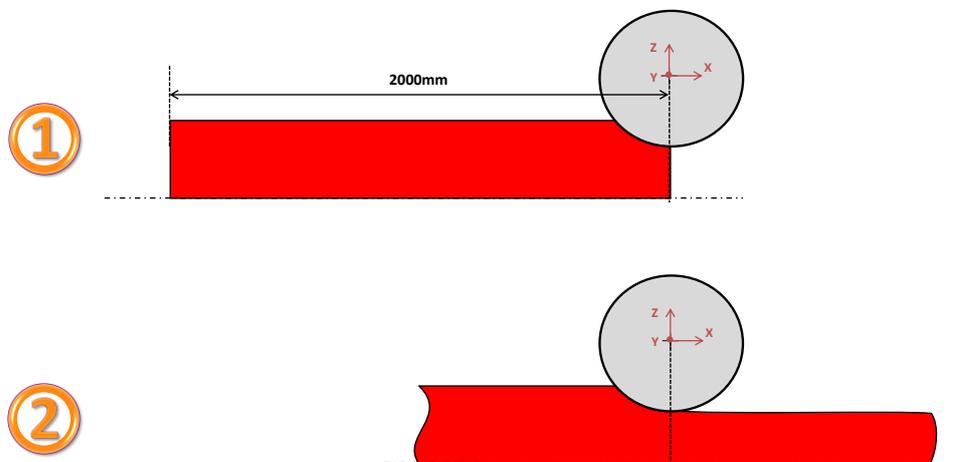
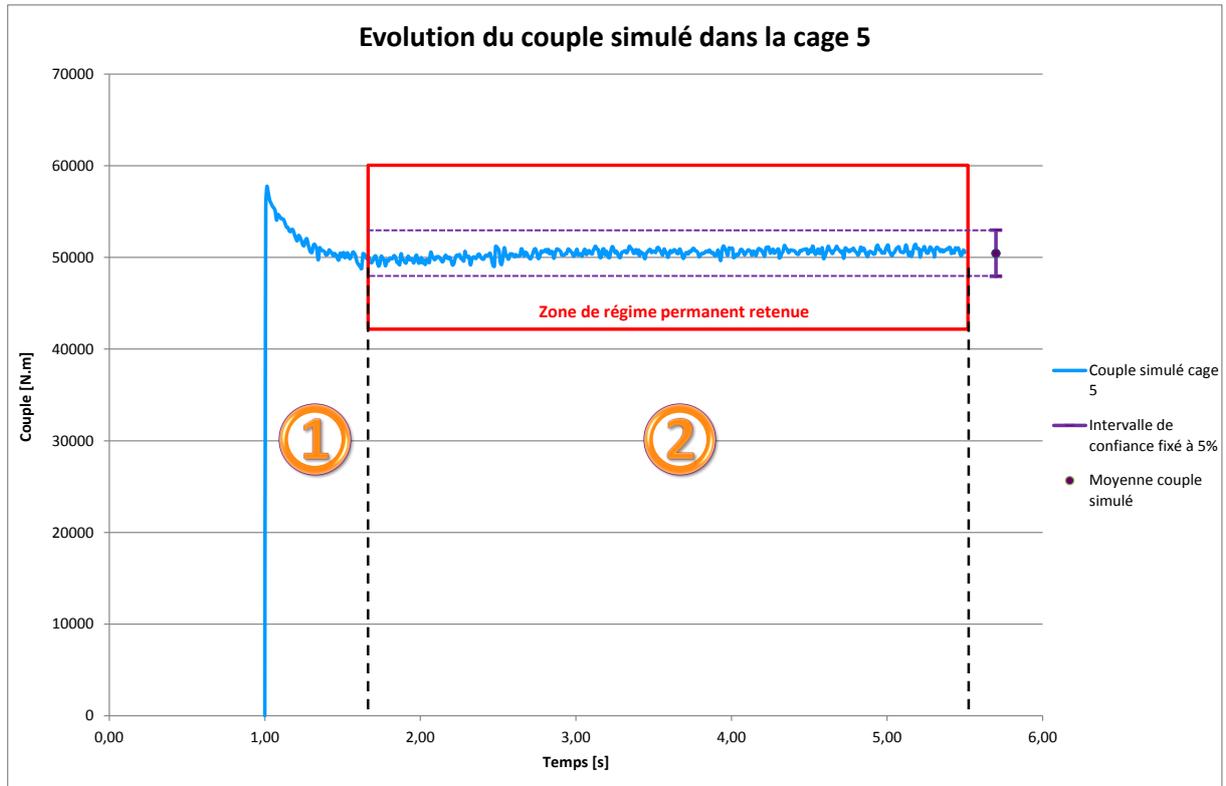


Figure 63 : Exemple de l'évolution du couple de la cage 5

La Figure 64 présente la moyenne des couples issus de la simulation n°1. Pour les cages dégrossisseuses OA et OB le niveau de couples atteint 160 000N.m. Les couples pour les cages 1 à 7 (cages intermédiaires) varient entre 40 000 et 120 000N.m. Tandis que pour les cages finisseuses les couples mis en jeu se trouvent aux alentours de 20 000N.m. Avec ces résultats une première tendance se dessine puisqu'une différence de couples est notable suivant le type de cages dans lequel se trouve la barre.

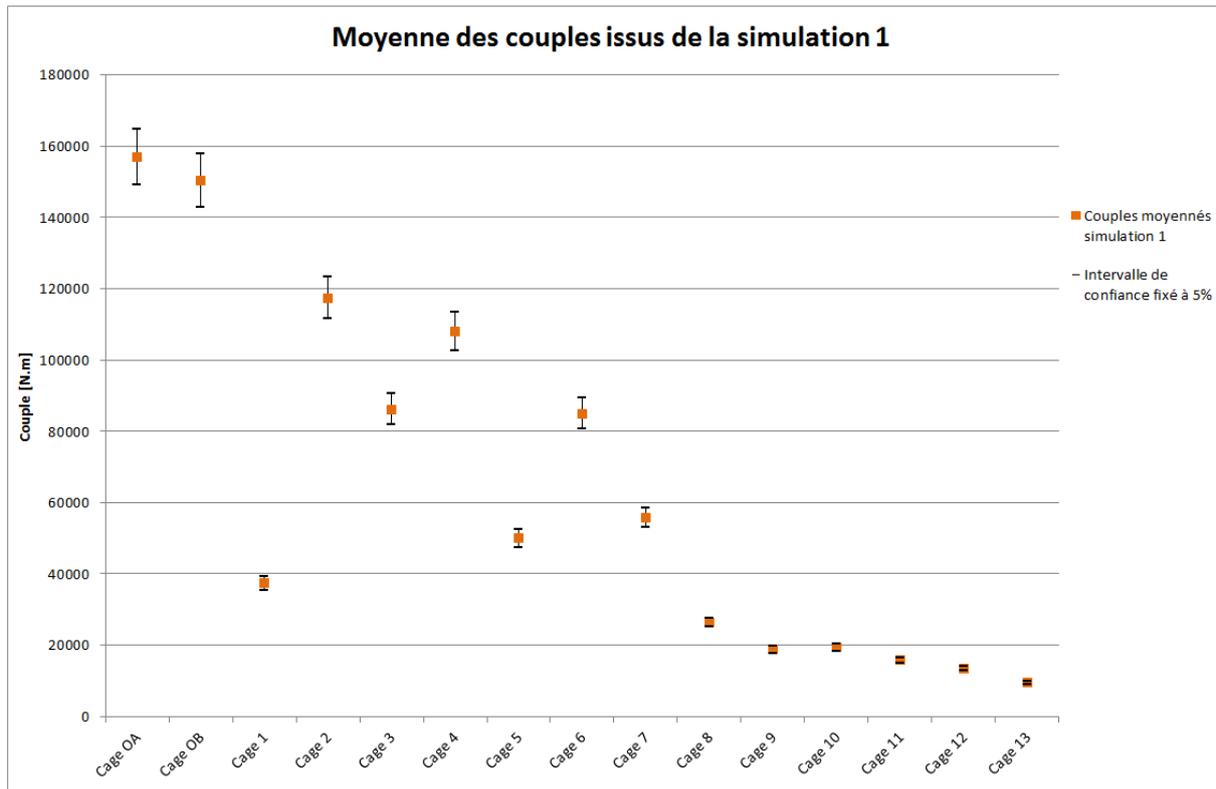


Figure 64 : Moyenne des couples simulés pour chaque cage de laminage (simulation 1)

2.1.2.2 Résultats des températures simulées

La Figure 65 présente la méthode employée pour obtenir la moyenne des températures de surface issues de la simulation. Pour relever les températures sur la longueur de la barre laminée une ligne est tracée alternativement sur la surface forgée (cages impaires) et sur le bord libre (cages paires). Une moyenne des valeurs relevées est calculée après chaque cage. L'alternance du relevé de températures sur la face forgée et sur le bord libre vient de l'alternance des axes de rotation vertical-horizontal des cylindres de laminage. En procédant de la sorte une comparaison des températures simulées avec celles relevées expérimentalement sera possible. La Figure 66 illustre l'orientation des mesures de température sur la ligne de production.

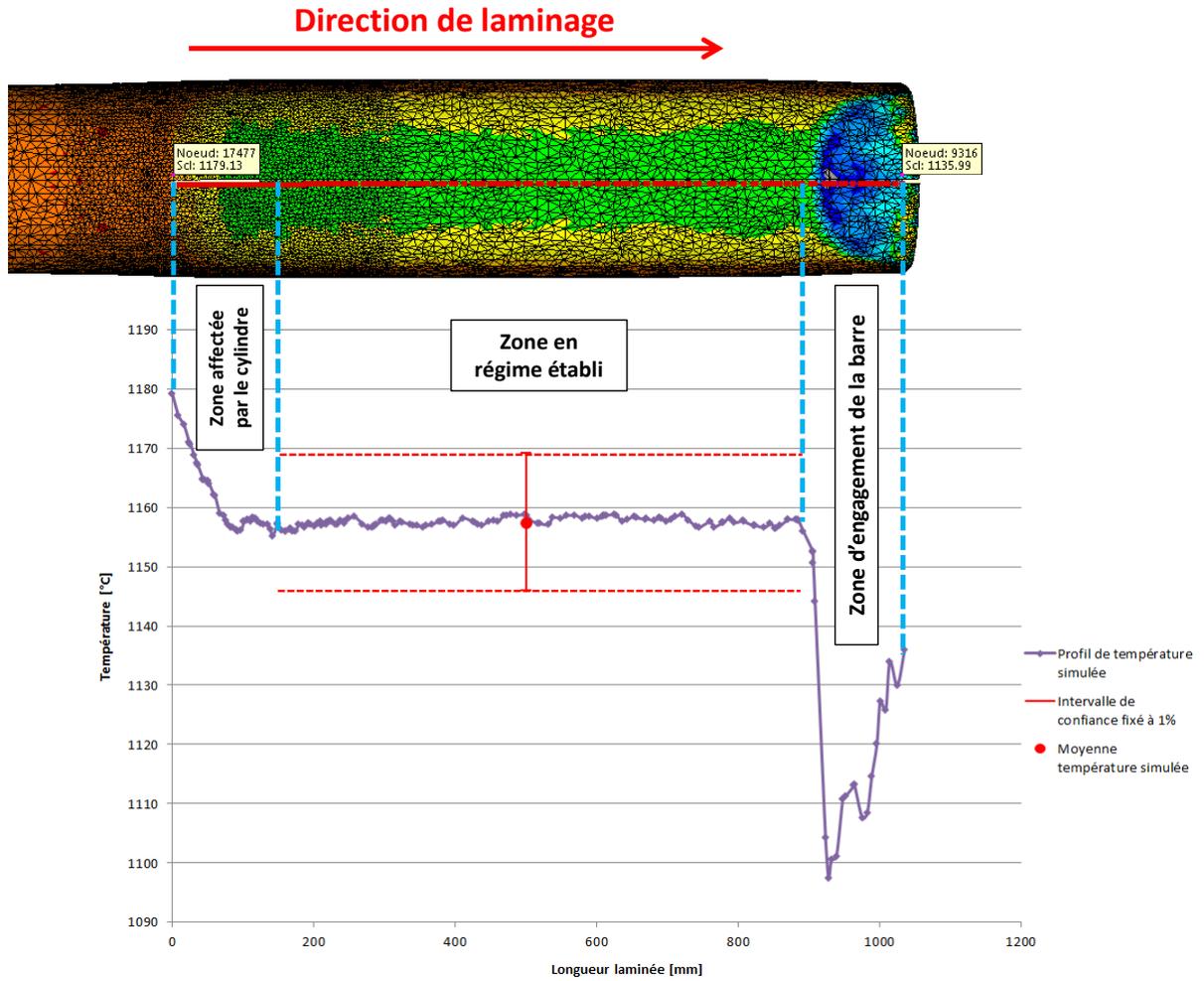


Figure 65 : Méthode employée pour relever la température des barres forgées en simulation

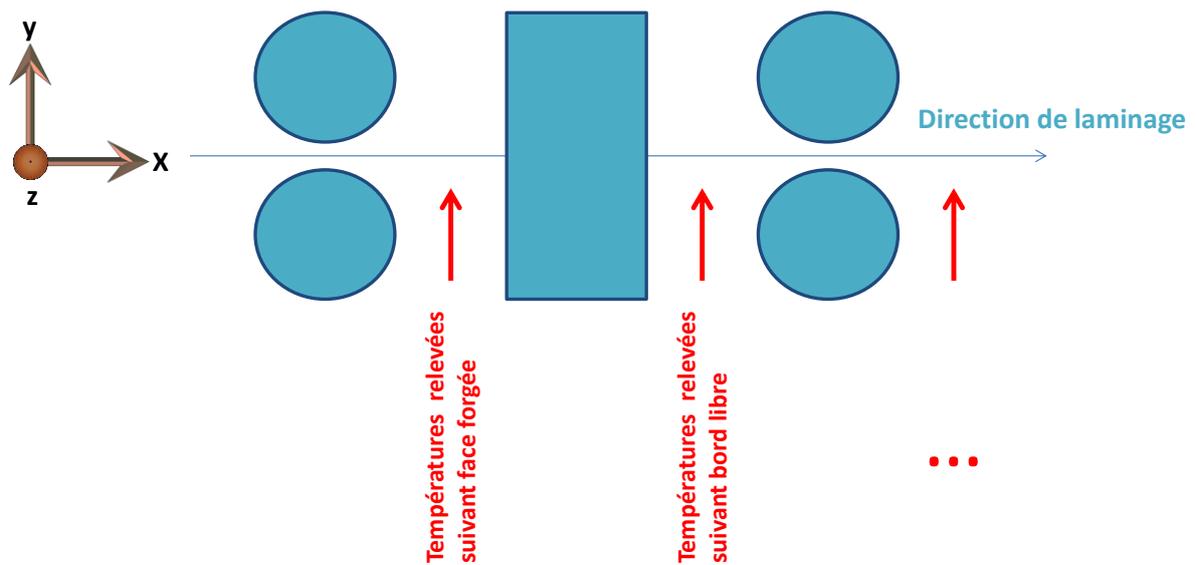


Figure 66 : Orientation des mesures de températures sur le laminier LUNA

La Figure 67 montre les moyennes de température de la barre après chaque passe de laminage. Le graphique présente une alternance des niveaux de température entre les cages impaires et paires. Le relevé de températures pour les cages impaires se fait suivant la face forgée ce qui implique des échanges thermiques par conduction élevés entre la barre et le cylindre. Ce qui n'est pas le cas suivant le bord libre qui est soumis à des échanges par convection avec le milieu ambiant. C'est pourquoi les températures relevées suivant la face forgée sont inférieures à celles relevées sur le bord libre.

Le temps mis par la barre pour aller de la cage OB à la cage 1 est d'environ 30 secondes. Une chute de température est à noter en surface de la barre entre ces deux cages notamment due à des échanges par rayonnement avec le milieu ambiant. A partir de la cage 3 la température se trouve aux alentours de 900°C et elle évolue peu. En fin de forgeage la température de la barre se trouve toujours au-dessus de la température du domaine austénitique qui est recherché pour la mise en forme par déformation plastique à chaud.

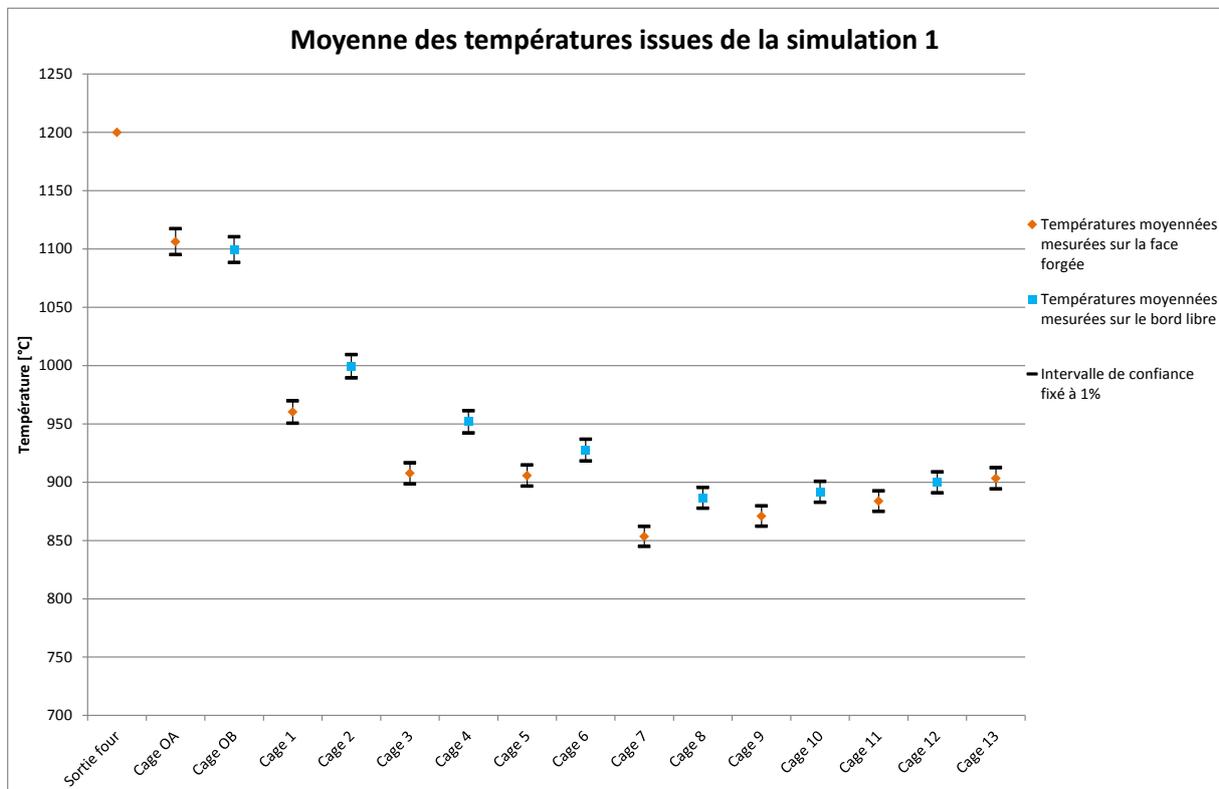


Figure 67 : Moyenne des températures simulées à la sortie de chaque cage de laminage (simulation 1)

Les résultats de la simulation numérique vont maintenant pouvoir être comparés aux mesures expérimentales afin de réaliser le calage du modèle numérique.

2.1.3 Mesures expérimentales réalisées sur le laminoir

Disposer d'un modèle numérique prédictif de la ligne de production passe par l'étape de validation. Deux campagnes de mesures sont réalisées sur la ligne de production. La première campagne de mesures a servi à caler le modèle numérique. En effet, les paramètres de frottement et d'échanges thermiques sont ajustés en se basant sur la comparaison des grandeurs macroscopiques que sont les températures et les couples de laminage. La seconde campagne réalisée sur une gamme de production différente de la première a permis de valider le modèle numérique en utilisant les mêmes paramètres thermomécaniques que ceux du modèle calé. Les grandeurs macroscopiques comparées lors de cette seconde campagne sont également les températures et les couples de laminage.

2.1.3.1 Les données mesurées sur le laminoir

Pour les deux campagnes de mesures, les données de sortie mesurées sur la descente de laminage sont : les couples de laminage et la température en surface du bloom. Plusieurs auteurs, dont les études ont été présentées précédemment, réalisent un calage de leur modèle numérique avec ces deux données de sortie [NAL13], [YUA07], [LI05]. Pour des questions de sécurité et d'accessibilité sur la ligne de production le placement des appareils de mesures est limité à certaines zones.

Pour l'acquisition des couples, des capteurs sont disposés sur le système d'entraînement des cylindres de laminage. Les enregistrements des couples sont disponibles pour la totalité des cages composant le laminoir en mesurant l'intensité consommée par les moteurs d'entraînement. Dans notre étude les deux cylindres qui composent une cage de laminage duo sont moteurs.

La température en surface du bloom est collectée à différents points de la production à l'aide d'appareils de mesures sans contact. La barre émet un rayonnement mais celui-ci peut être en partie absorbé par le milieu extérieur. De plus le rayonnement d'un corps environnant peut venir perturber la mesure de la température de la surface souhaitée.

Le matériel utilisé pour relever les températures est : une caméra thermique, des pyromètres monochromatiques et bi-chromatiques. La caméra thermique fonctionne avec un système de mesure infrarouge. Elle enregistre les différents rayonnements infrarouges émis par un corps dont la température varie. La Figure 68 illustre la mesure par caméra thermique du flux de chaleur par rayonnement émis depuis une surface. Par la suite, un détecteur transforme l'énergie infrarouge obtenue en signaux électriques qui permettent une conversion en température via une électronique d'interprétation. La valeur de l'émissivité peut être entrée lors du post traitement et dépend de l'environnement dans lequel la caméra se trouve. De nos jours les caméras thermiques sont équipées de filtre de correction atmosphérique afin d'éviter les pertes de transmission dues à la vapeur d'eau ou au gaz carbonique qui absorbent les radiations infrarouges. Il est nécessaire de prendre en compte les sources de rayonnements thermiques proches de la cible de mesures car elles peuvent fausser les mesures. Il en est de même pour les poussières et les fumées qui peuvent entacher l'optique. La plage de

fonctionnement pour la caméra thermique de la marque FLIR SYSTEMS est de 300 à 1500°C.

Les pyromètres monochromatiques fonctionnent avec une seule longueur d'onde ce qui nécessite de rentrer une valeur d'émissivité qui dépend fortement de l'environnement de la mesure. D'après la documentation du fabricant de pyromètres OPTRIS, pour des aciers laminés à chaud la valeur de l'émissivité varie entre 0,8 et 0,9. Une étude préliminaire a permis d'établir une valeur de l'émissivité du matériau à 0,88. Lors de cette étude des lopins de diverses nuances sont chauffés dans un four électrique à 1200°C et leur température en sortie de four est mesurée à l'aide de pyromètres. La comparaison entre la température relevée et la consigne du four a permis d'ajuster la valeur de l'émissivité. Les pyromètres utilisés ont une plage de fonctionnement de 500 à 2 000°C.

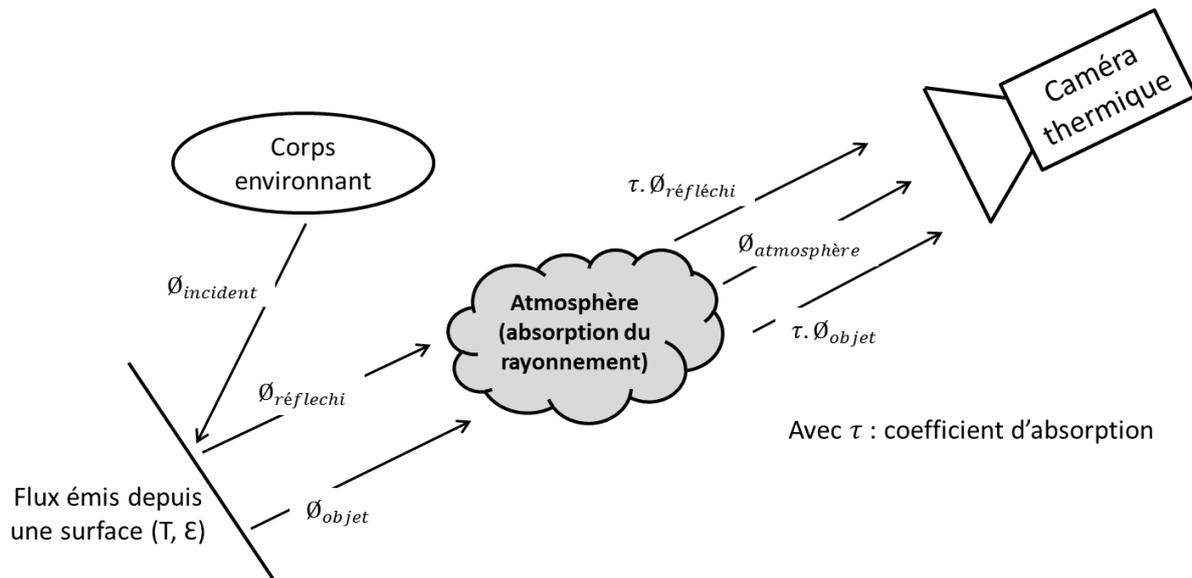


Figure 68 : Mesure de température par caméra thermique

Des pyromètres bi-chromatiques fixes sont implantés le long de la ligne de production. Cette technologie de pyromètres ne nécessite pas de réglages de l'émissivité. Les pyromètres bi-chromatiques fonctionnent suivant deux longueurs d'ondes distinctes proches l'une de l'autre afin de supposer constant le paramètre d'émissivité. Ils peuvent être utilisés pour évaluer la valeur de l'émissivité à fournir aux pyromètres monochromatiques et aux caméras thermiques en comparant les mesures de températures (Figure 69). Ce type de fonctionnement rend les pyromètres bi-chromatiques peu sensibles aux poussières et aux fumées.



Figure 69 : Relevé de températures avec un pyromètre bi-chromatique et une caméra thermique afin d'évaluer la valeur de l'émissivité

2.1.3.2 Configuration du laminoir lors de la campagne de mesure n°1

La configuration du laminoir lors de la campagne de mesures permettait de produire des barres en acier de nuance 41Cr4 avec un diamètre de 38mm. Pour atteindre ce diamètre de produit fini, la barre de diamètre initial 270mm passe à travers les quinze premières cages du laminoir et quatre cages Kocks. Les mesures de couples et de températures sont relevées sur une production de 35 barres. La température de la barre en sortie de four est de 1200°C, ce qui permet d'effectuer les opérations de mise en forme en ayant une microstructure de la barre dans le domaine austénitique tout au long du laminage avant les cages Kocks. Les données sur les blooms et les cylindres sont listées dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Configuration du laminoir lors de la campagne de mesures n°1

Paramètres	Bloom	Cylindres
Diamètre initial	270mm	€ [350mm ; 700mm]
Diamètre final	38mm	-
Température initiale	1200°C	€ [65°C ; 90°C]
Matériau	41Cr4	-
Longueur initiale	6000mm	-
Nombre de cages		15

La Figure 70 montre la disposition des appareils de mesures lors de la première campagne. Les triangles pleins de couleur rouge représentent les quatre pyromètres monochromatiques utilisés au sein du centre de recherche ACM. Le placement des deux caméras thermiques est représenté par les triangles pleins jaunes. Les triangles vides désignent les pyromètres bi-chromatiques qui sont fixes le long de la descente de laminage. Les caméras thermiques se trouvent aux mêmes endroits que les pyromètres bi-chromatiques installés par les soins de l'usine afin de pouvoir comparer les températures.

Tous les appareils de mesure sont placés de sorte à évoluer dans les meilleures conditions afin de limiter l'influence de l'environnement mais aussi de cibler des zones sur la barre non contaminées par la calamine.

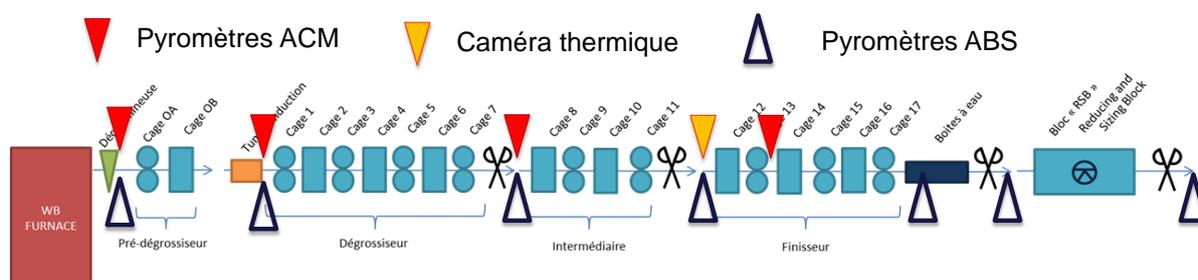


Figure 70 : Répartition des appareils de mesures sur le laminoir LUNA (campagne 1)

2.1.3.3 Configuration du laminoir lors de la campagne de mesure n°2

Lors de la seconde campagne de mesures, la gamme de production permet d'obtenir des produits finis de diamètre 60mm. La nuance des barres laminées est un acier C45. Les diamètres des cylindres ainsi que les levées entre ces derniers sont différents de la campagne précédente. Seules les treize premières cages de l'outil de production et quatre cages Kocks sont utilisées. Les mesures de couples et de températures ont été enregistrées sur soixante blooms laminés. Les données concernant l'outil de production sont renseignées dans le Tableau 13. La température relevée sur la surface des blooms en sortie de four lors de cette seconde campagne est de 1200°C et elle est similaire à celle relevée lors de la première campagne.

Tableau 13 : Configuration du laminoir lors de la campagne de mesures n°2

Paramètres	Bloom	Cylindres
Diamètre initial	270mm	€ [350mm ; 700mm]
Diamètre final	60mm	-
Température initiale	1200°C	€ [65°C ; 90°C]
Matériau	C45	-
Longueur initiale	6000mm	-
Nombre de cages		13

Les données de sortie relevées lors de la deuxième campagne de mesures sont identiques à la précédente à savoir la température du bloom et les couples de laminage. La Figure 71 montre la position des appareils de mesures servant à relever les températures des blooms au cours du laminage. Les moyens de mesures utilisés sont également identiques à savoir des pyromètres monochromatiques repérés par des triangles pleins rouges et les pyromètres bi-chromatiques propres à l'usine par des triangles vides. Lors de cette nouvelle campagne de mesures la caméra thermique n'a pas été utilisée.

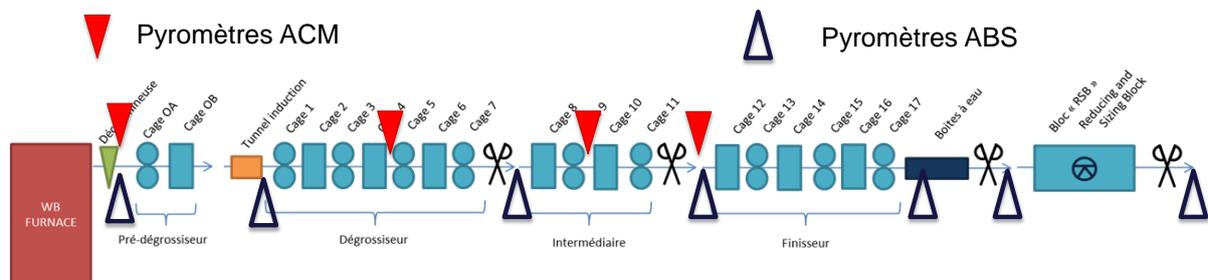


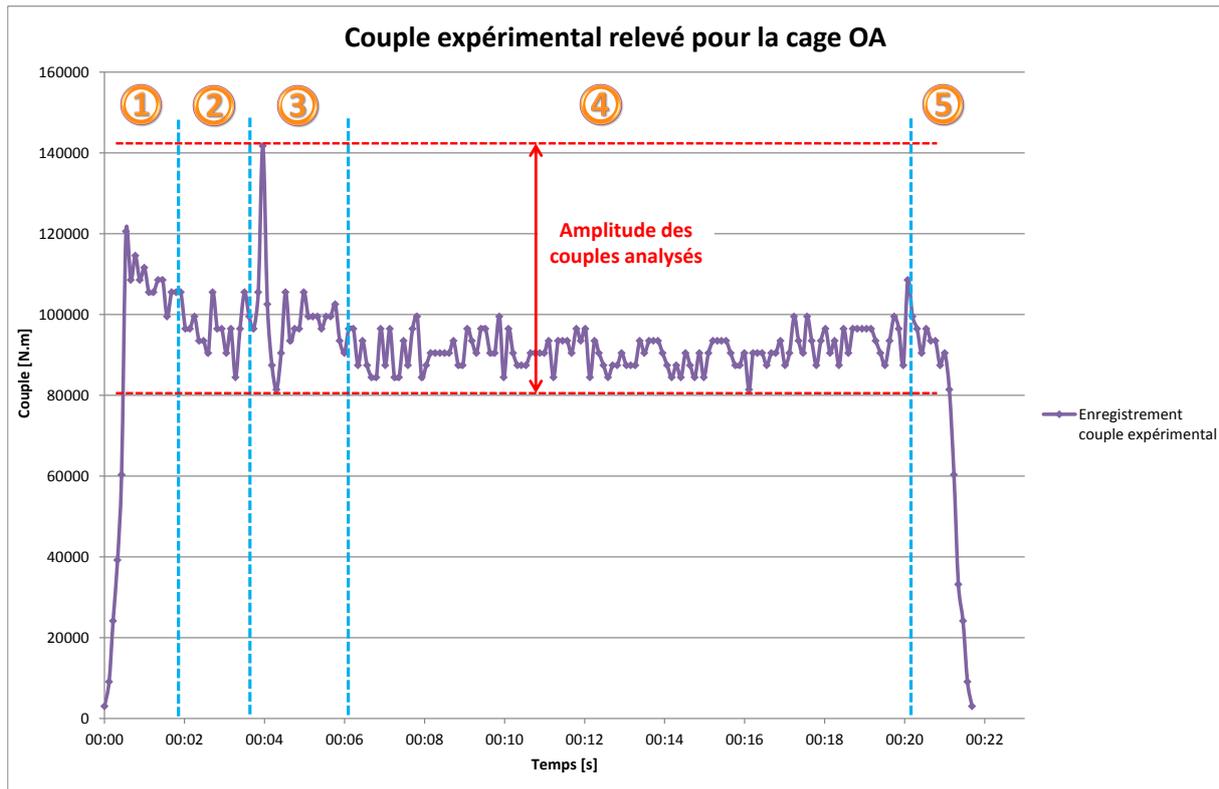
Figure 71 : Répartition des appareils de mesures sur le laminoir LUNA (campagne 2)

2.1.4 Résultats des mesures expérimentales

2.1.4.1 Les mesures de couples lors de la campagne n°1

La Figure 72 illustre l'enregistrement du couple expérimental relevé pour la cage OA. La courbe fait apparaître plusieurs phases durant le laminage de la barre. Tout d'abord la barre est engagée dans la cage OA d'où le pic de couple visible dans la phase ①. Un régime établi se met en place ② jusqu'à ce que la barre entre dans la cage suivante ce qui fait intervenir un nouveau pic de couple ③. Le couple atteint ensuite une nouvelle phase de régime établi ④. La phase ⑤ représente la sortie de la barre de la cage OA. La zone délimitée par les traits pointillés rouges montre l'amplitude des couples à fournir aux cylindres de laminage afin d'assurer l'entraînement de la barre à travers la cage OA. L'amplitude des couples s'étend de 81500N.m à 141700N.m. L'allure de la courbe observée Figure 72 pour le relevé du couple de la cage OA est valable pour les autres cages composant le laminoir.

La valeur maximale du couple de laminage est atteinte lorsque le bloom s'engage dans la cage étudiée et dans la suivante. Il serait aisé de dire que si la moyenne des couples simulés se situe dans la zone définie par les traits pointillés rouges alors le modèle est prédictif. Or, ce n'est pas le cas car la variation de l'étendue des mesures entre le couple minimale et maximale est d'environ 40% soit un écart de 60000N.m. Afin d'avoir une meilleure précision dans la comparaison de nos résultats, une boîte entre le premier et le troisième quartile a été mise en place. En effet, cette boîte regroupe 50% des valeurs mesurées durant la production. La méthode présentée pour analyser les couples de la cage OA est employée pour les cages suivantes du laminoir. Les mesures de couples lors de l'engagement de la barre entre les cylindres ne sont pas prises en compte car cette étape n'est pas modélisée dans notre modèle numérique.



- ① Engagement de la barre dans la cage OA
- ② Couple en régime établi
- ③ Engagement de la barre dans la cage OB
- ④ Couple en régime établi
- ⑤ Sortie de la barre de la cage OA

Figure 72 : Allure du couple enregistrée pour la cage OA

La Figure 73 montre l'amplitude des couples relevés sur la ligne LUNA délimitée par le premier et le troisième quartile. La moyenne des couples est représentée en rouge. Les couples pour les cages pré-dégrossisseuse (OA, OB) et dégrossisseuses (cage 1 à 7) sont supérieurs à 60 000N.m. Ce n'est pas le cas pour la cage 1 dont le couple est d'environ 40 000N.m. En effet, cette cage est composée de deux cylindres circulaires et le taux de réduction de 6% lors de cette passe est faible, comparé par exemple au taux de déformation de la cage 4 qui est de 30%.

Les couples mis en jeu pour les cages intermédiaires (cage 8 à 11) et finisseuses (cage 12 à 13) se situent en dessous de 40 000N.m et tendent à diminuer jusqu'à la cage 13 pour atteindre 10 000N.m. La réduction de la section de la barre au cours du laminage entraîne une diminution des couples cage après cage avec un diamètre des cylindres restant à peu près identique.

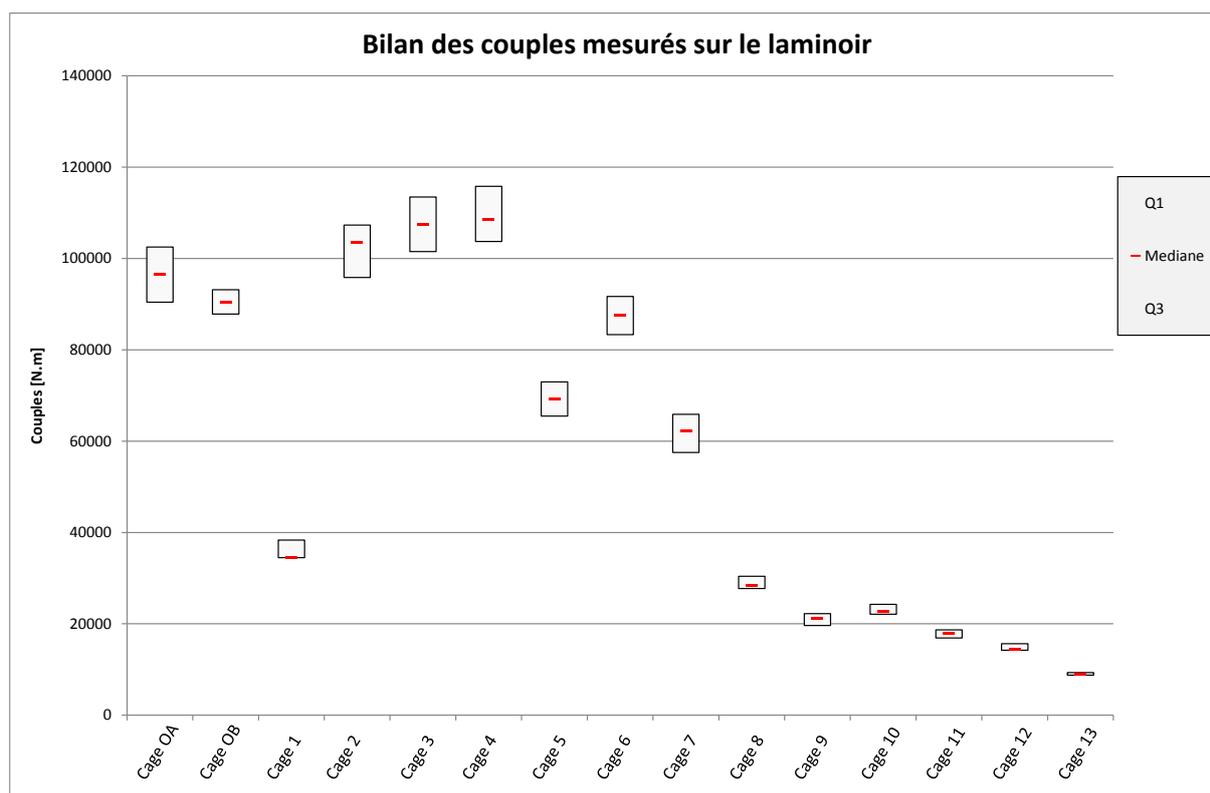


Figure 73 : Couples relevés sur la ligne de production LUNA lors de la première campagne

2.1.4.2 Les mesures de températures lors de la campagne n°1

Un relevé de la température expérimentale en sortie de cage 7 est représenté sur la Figure 74. A partir de cette courbe il est possible de visualiser deux phénomènes. Premièrement un gradient de température est présent entre le début et la fin de la barre laminée, la température en début de barre étant plus élevée. Le second phénomène rencontré est le saut de température régulier, indiqué en rouge sur le graphique, qui provient de l'étape de réchauffage. En effet, dans le four la barre repose sur des longerons en matériaux réfractaires ce qui engendre un gradient thermique à proximité des zones d'appui. Ce phénomène est seulement visible à partir de la cage 1 car avant d'entrer dans cette cage la barre n'est en prise dans aucune cage et elle est libre de s'orienter comme elle le souhaite. La Figure 75 montre que la zone de la barre en appui sur les longerons dans le four peut se retrouver orientée dans la direction des appareils de mesures.

La dérive de température au cours du laminage ne pourra pas être prise en compte dans le modèle numérique du fait de la stratégie de simulation choisie qui consiste à découpler le modèle cage par cage. Pour la suite de l'étude, l'amplitude des températures relevées en surface de la barre est bornée par la valeur maximale et minimale. La température moyenne est également calculée. L'étendue et la moyenne des températures enregistrées sur la ligne sont représentées en orange sur le graphique de la Figure 74.

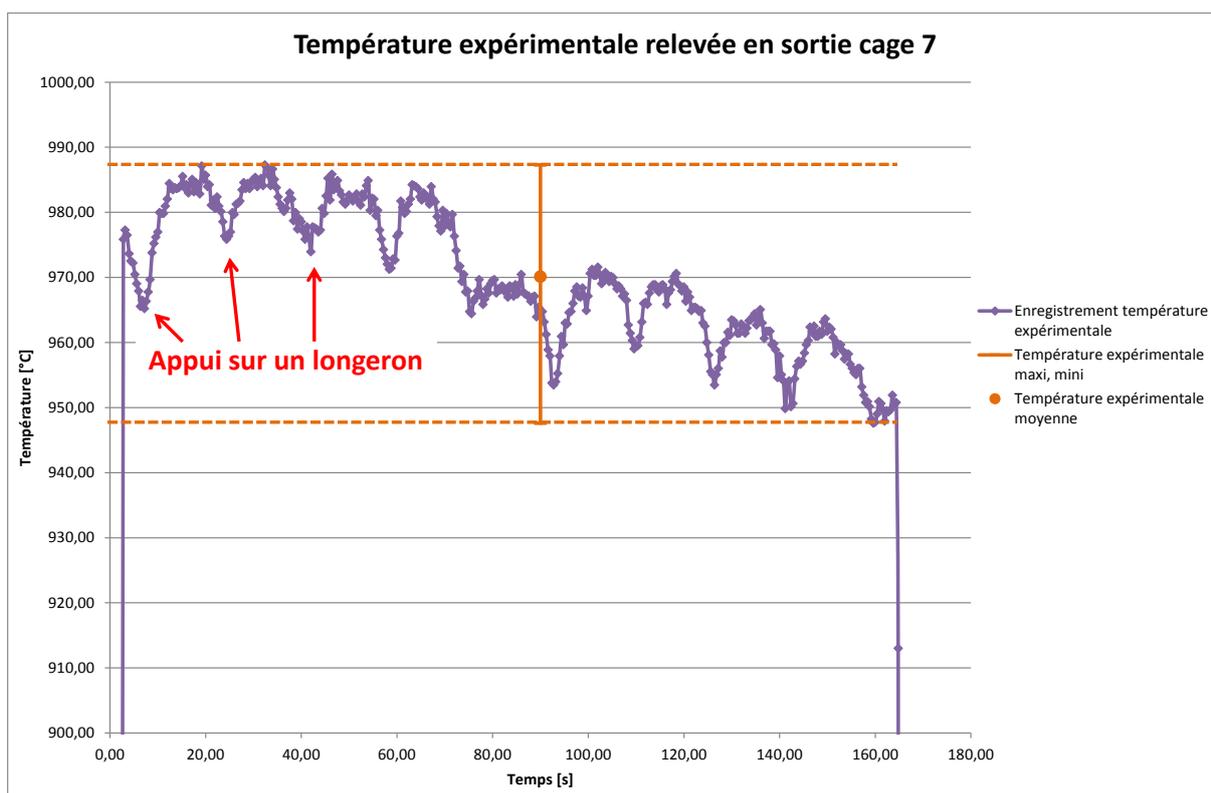


Figure 74 : Température expérimentale relevée à la surface de la barre en sortie de cage 7 lors de la campagne de mesure n°1

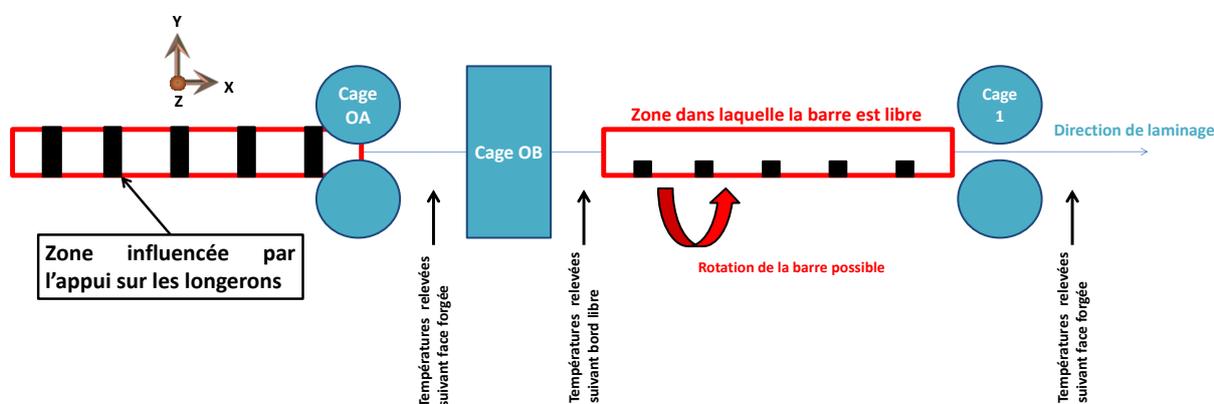


Figure 75 : Illustration de la zone dans laquelle la barre n'est en prise dans aucune cage

Les températures relevées avec les différents appareils de mesure à divers points de la ligne de production sont montrées sur la Figure 76. En bleu, on retrouve les températures acquises avec les pyromètres bi-chromatiques de l'usine et en vert les températures relevées avec le matériel du centre de recherche ACM. Les températures issues du modèle numérique seront comparées à celles-ci.

Un écart d'environ 50°C est notable entre les deux relevés. La technologie des pyromètres utilisée par ACM et ABS est différente, ce qui peut expliquer cet écart. En effet, ACM utilise des pyromètres monochromatiques tandis que des pyromètres bi-chromatiques

équipent l'usine. Le pyromètre bi-chromatique offre une meilleure "robustesse" de mesure comparée au pyromètre monochromatique. Pour ce dernier il est nécessaire de rentrer la valeur de l'émissivité. La détermination de ce paramètre n'est pas aisée car il dépend de plusieurs phénomènes à savoir la température, l'état de surface et l'environnement dans lequel évolue le produit.

Dans notre cas la différence entre les mesures de température vient du fait que les pyromètres bi-chromatiques de l'usine font abstraction des effets de la fumée et des poussières environnantes contrairement aux pyromètres monochromatiques. Dans la mesure où le rayonnement est affecté de la même façon pour les deux longueurs d'ondes alors la température mesurée est juste.

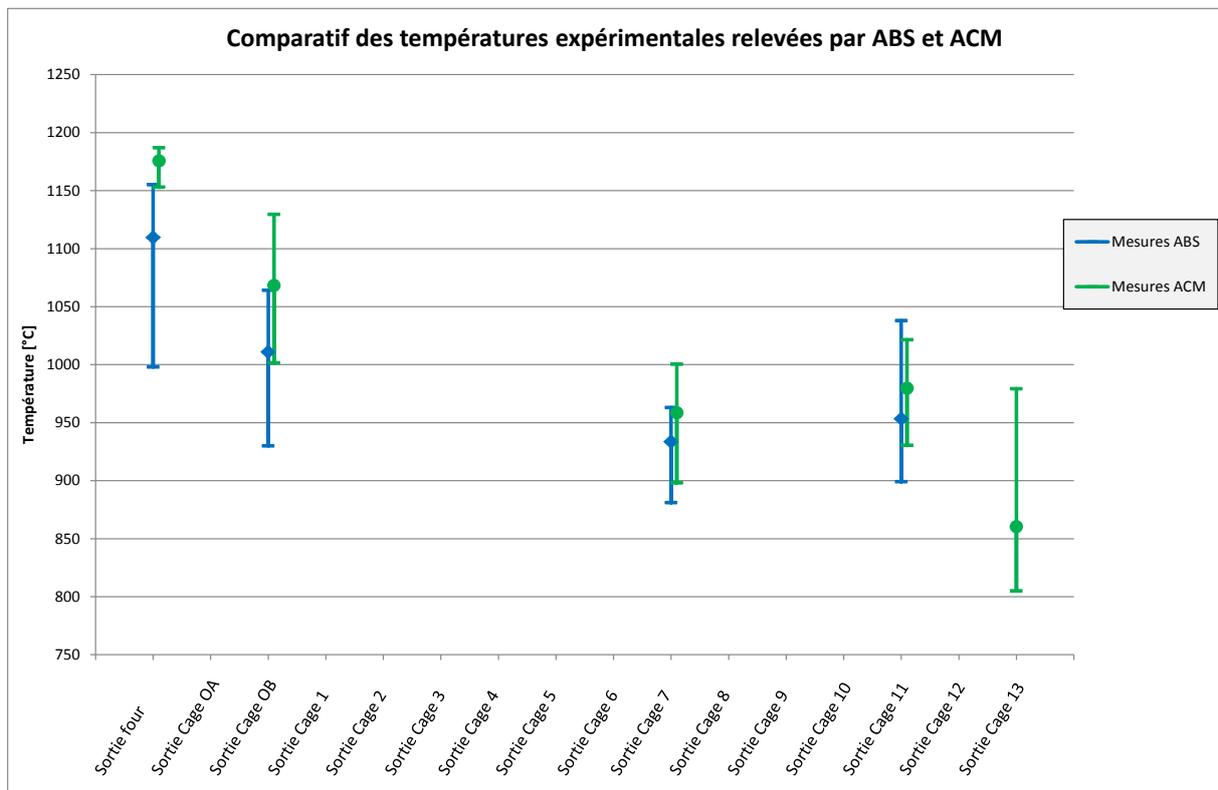


Figure 76 : Evolution de la température des blooms au cours du laminage lors de la première campagne de mesures

2.1.4.3 Les mesures de couples lors de la campagne n°2

Les couples relevés sur la ligne de production apparaissent sur la Figure 77. Par comparaison, à partir de la cage 4 les couples enregistrés lors de la seconde campagne de mesures sont légèrement plus faibles que ceux relevés lors de la première. En effet lors de la campagne de mesures n°2 les couples pour les cages 5, 6 et 7 sont compris entre 40 000 et 60 000N.m tandis que lors de la précédente campagne ils se trouvaient entre 60 000 et 80 000N.m.

Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que la nuance de la barre laminée et la descente de laminage (\emptyset cylindres, levées) sont différentes par rapport à la campagne de

mesures n°1. L'écart de température ne semble pas significatif pour jouer un rôle prépondérant sur la diminution de la contrainte d'écoulement et par conséquent des couples de laminage.

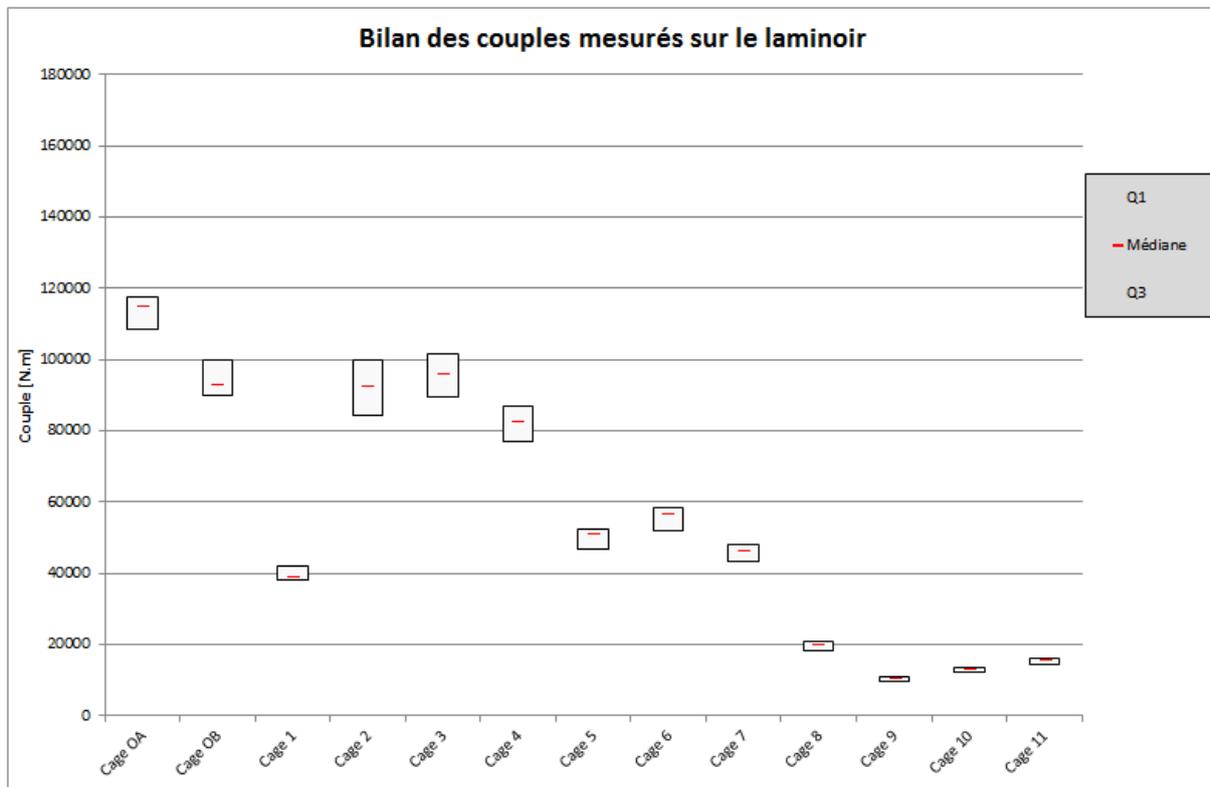


Figure 77 : Couples relevés sur la ligne de production LUNA lors de la seconde campagne

2.1.4.4 Les mesures de température lors de la campagne n°2

La Figure 78, montre les températures relevées par l'ensemble des pyromètres. Un écart de température de 50°C est à noter pour la cage OA. Toutefois, la tendance des températures entre les deux campagnes de mesures est similaire.

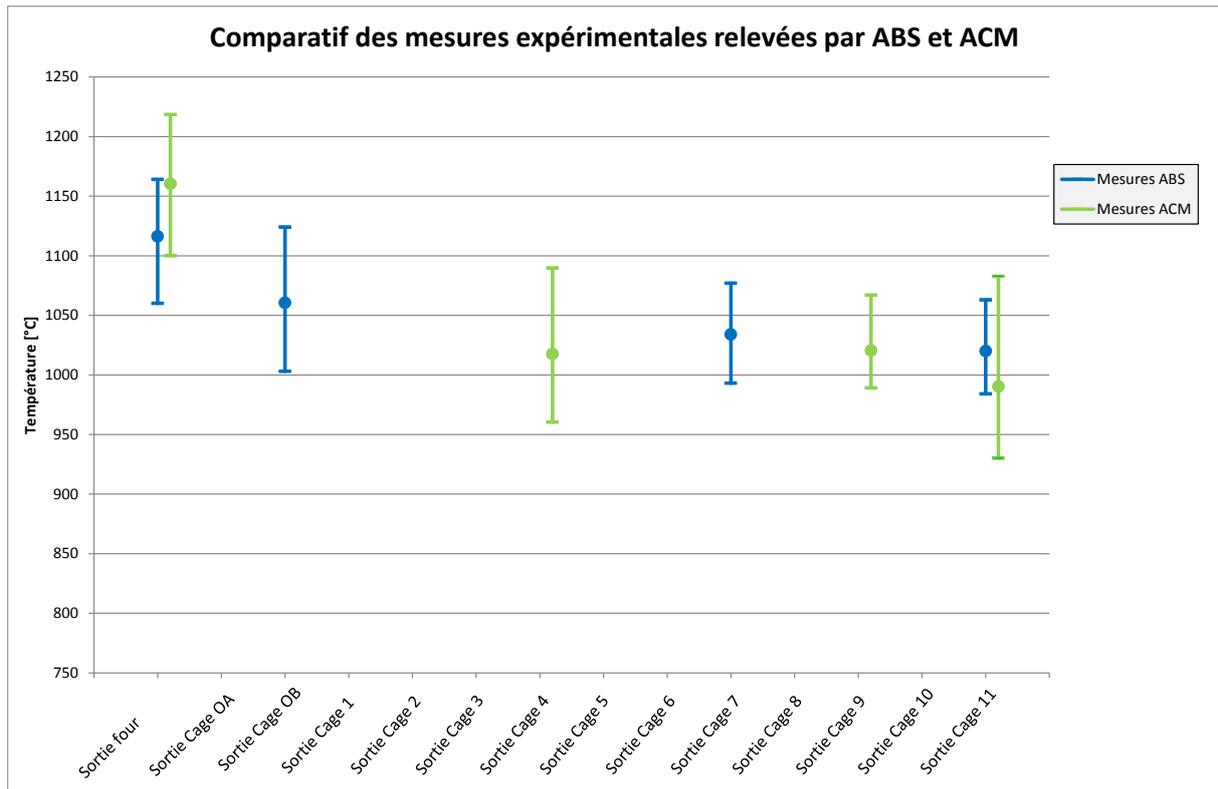


Figure 78 : Evolution de la température des blooms au cours du laminage lors de la seconde campagne de mesures

Les résultats des mesures expérimentales des couples de laminage et des températures présentées précédemment vont permettre de caler et valider le caractère prédictif du modèle numérique. La première campagne de mesures a pour objectif de servir au calage du modèle numérique tandis que la seconde va permettre de vérifier son caractère prédictif. La descente de laminage lors de la seconde campagne de mesures est différente de la première. En effet, la nuance du matériau, le diamètre du produit fini, le nombre de cage, le diamètre des cylindres et les levées sont autant de paramètres qui diffèrent d'une campagne à l'autre.

2.2 Confrontation du modèle numérique aux mesures expérimentales

2.2.1 Comparaison des résultats

Les couples de laminage et les températures issus de la simulation numérique et mesurés expérimentalement étant analysés, il est maintenant possible de les comparer.

2.2.1.1 Comparaison des couples simulés (simulation 1) et mesurés expérimentalement (campagne 1)

Sur la Figure 79 sont présentés les couples calculés numériquement et mesurés

expérimentalement. Pour rappel les boîtes sont délimitées par le premier et le troisième quartile des valeurs de couples expérimentales. Le trait repéré en rouge correspond à la moyenne des valeurs expérimentales qui est la cible vers laquelle les couples simulés doivent tendre. Les couples issus de la simulation sont représentés par des carrés violets.

La tendance des couples simulés est en accord avec les couples relevés sur site mis à part pour les cages 2 et 3. Il en est de même pour les niveaux des couples. Cependant un écart d'environ 35% est à noter pour les couples des cages dégrossisseuses OA et OB.

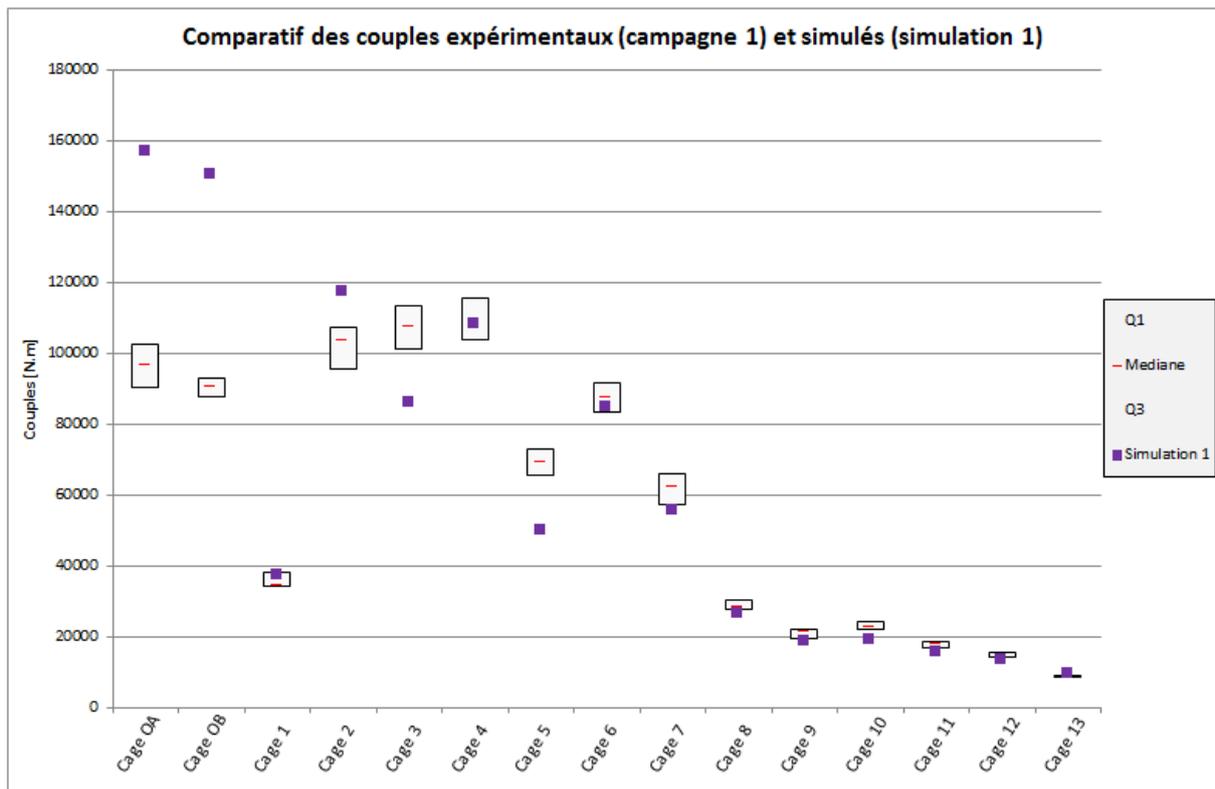


Figure 79 : Comparatif des couples expérimentaux (campagne de mesures n°1) et simulés (simulation 1)

2.2.1.2 Comparaison des températures simulées (simulation 1) et mesurées expérimentalement (campagne 1)

La Figure 80 présente la comparaison des températures simulées et relevées sur le site de production lors de la campagne de mesures n°1. Les barres vertes représentent l'étendue des mesures de températures relevées avec le matériel ACM. La moyenne des températures issues de l'outil de simulation est représentée par les carrés orange. La tendance des températures simulées est en accord avec les températures mesurées sur le laminoir. Pour la sortie de four et la cage OB les niveaux de températures simulées correspondent avec les températures expérimentales. Cependant des écarts de l'ordre de 10% sont à noter pour les cages 7 et 11.

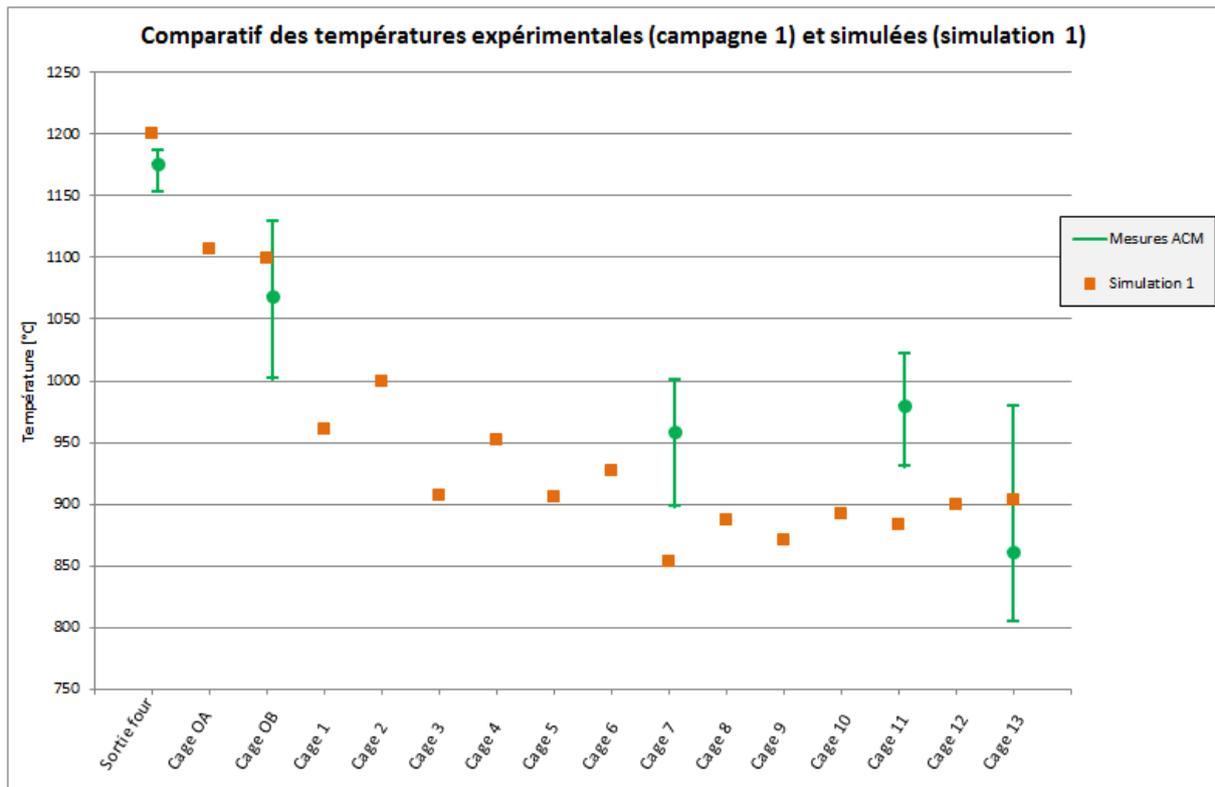


Figure 80 : Comparatif des températures expérimentales (campagne de mesures n°1) et simulées (simulation 1)

La comparaison entre les grandeurs simulées et expérimentales présentées sur les deux figures précédentes montre que les résultats simulés présentent peu d'écart avec les résultats expérimentaux à part pour les cages OA, OB et 3. Les valeurs des paramètres de frottement et thermiques dans la simulation 1 ont été choisis à travers les études présentes dans la littérature. La prochaine étape consiste à ajuster les valeurs de ces paramètres sur la base des résultats expérimentaux.

2.2.2 Calage du modèle numérique avec la partie expérimentale

Le calage du modèle numérique consiste à déterminer les valeurs de diverses grandeurs afin d'avoir une bonne corrélation entre les résultats simulés et expérimentaux. Les paramètres variables sont de différentes natures :

- Les paramètres du procédé : la vitesse de laminage, le diamètre des cylindres et la levée entre ces derniers.
- Les paramètres du produit : nuance du matériau, la loi de comportement du matériau, température initiale.
- Les paramètres d'interface : le frottement, les échanges thermiques, la tension inter-cage

En laminage la tension inter-cage est une donnée de sortie mais compte tenu de la stratégie de modélisation employée elle devient une donnée d'entrée de la simulation. Parmi les paramètres énumérés précédemment il est difficile d'en faire varier certains comme par exemple le comportement du matériau. En effet la loi de comportement du matériau fait intervenir un grand nombre de paramètres et le matériau laminé varie d'une coulée à l'autre. Le comportement du bloom à haute température n'a pas été caractérisé. Quant aux levées entre les cylindres et les vitesses de laminage, ce sont des données fournies par l'industriel. Seuls les échanges thermiques et le frottement sont sélectionnés pour caler le modèle. Toutefois, une étude concernant la tension inter-cage est présentée par la suite afin d'identifier son influence sur les grandeurs de sortie que sont le couple et la température.

Pour réaliser le calage du modèle plusieurs simulations ont été menées en faisant varier dans un premier temps les deux paramètres retenus. A la fin de chaque simulation les couples et les températures sont comparés avec ceux enregistrés sur la ligne de production jusqu'à ce que les valeurs de sortie corrélient. Pour réaliser le calage du modèle numérique sept simulations ont été réalisées. Dans un premier temps le calage a été réalisé sur les couples de laminage qui sont influencés à la fois par le frottement et la thermique.

2.2.2.1 Comparaison des couples de laminage simulés et mesurés expérimentalement (campagne n°1) pour le calage du modèle numérique

Les différents points représentés sur la Figure 81 sont les résultats des couples de laminage des simulations numériques ayant permis le calage du modèle.

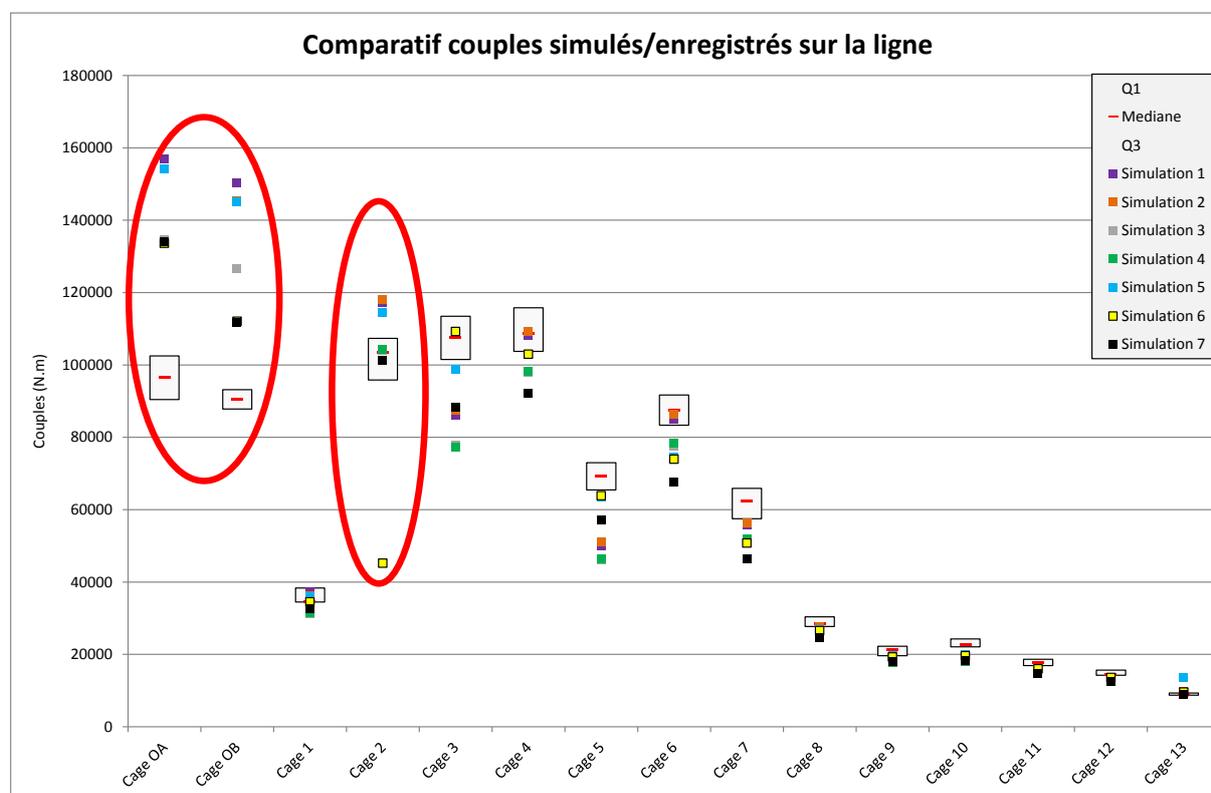


Figure 81 : Comparatif des couples simulés et enregistrés sur le laminoir

Les cages OA, OB et 2 sont prises comme exemple pour montrer les modifications apportées sur les coefficients de frottement, d'échanges thermiques ainsi que sur les levées entre les matrices. Le choix des deux premières cages vient du fait que la barre qui sort du four et qui entre dans la cage OA n'est pas influencée par les cages en amont. La barre qui entre dans la cage OB est influencée par les effets indirects des variations des paramètres de la cage OA. Par exemple, la variation du coefficient d'échange thermique lors de la passe OA entraîne une variation de température de la barre qui entre dans la cage OB ce qui influence les couples des cylindres de cette même cage. La cage 2 permet de voir l'influence de la variation de la levée entre les cylindres.

Pour chaque simulation les valeurs des paramètres des cages OA, OB et 2 sont répertoriées dans les Tableau 14, Tableau 15 et Tableau 16. La Figure 82 montre la comparaison des couples expérimentaux et simulés avec une variation des paramètres thermomécaniques afin de caler le modèle numérique. Les couples expérimentaux sont représentés par les boîtes regroupant 50% des valeurs expérimentales. La moyenne des couples simulés des cages OA, OB et 2 sont désignés respectivement par les carrés de couleur bleu, rouge et vert. Les couples des cages OA et OB évoluent de la même manière car les paramètres sélectionnés ont les mêmes valeurs. Le bon compromis est trouvé avec une valeur des coefficients de frottement et d'échanges thermiques égale respectivement à 0,6 et à 20000W/m².°C.

Pour la cage 2 le couple moyen relevé lors de la simulation 6 montre que le coefficient de frottement est trop faible car la barre patine entre les cylindres et a du mal à être entraînée à cause d'un manque d'adhérence. Les valeurs des paramètres de frottement et d'échanges thermiques retenus sont respectivement de 0,8 et 20000W/m².°C.

Tableau 14 : Valeurs des paramètres thermomécaniques retenus pour les simulations de la cage OA

	Cage OA			
	Température barre (°C)	Levée (mm)	Frottement	Echange thermique (W/m ² .°C)
Simulation1	1200	25	0,8	50000
Simulation2	1200	25	0,7	50000
Simulation3	1200	25	0,7	20000
Simulation4	1200	25	0,6	20000
Simulation5	1150	25	0,7	50000
Simulation6	1200	25	0,6	20000
Simulation7	1200	25	0,6	20000

Tableau 15 : Valeurs des paramètres thermomécaniques retenus pour les simulations de la cage OB

	Cage OB			
	Température barre (°C)	Levée (mm)	Frottement	Echange thermique (W/m ² .°C)
Simulation1		25	0,8	50000
Simulation2		25	0,7	50000
Simulation3		25	0,7	20000
Simulation4		25	0,6	20000
Simulation5		25	0,7	50000
Simulation6		25	0,6	20000
Simulation7		25	0,6	20000

Tableau 16 : Valeurs des paramètres thermomécaniques retenus pour les simulations de la cage 2

	Cage 2			
	Température barre (°C)	Levée (mm)	Frottement	Echange thermique (W/m ² .°C)
Simulation1		37	0,8	50000
Simulation2		37	0,8	20000
Simulation3		37	0,8	20000
Simulation4		37	0,8	20000
Simulation5		39	0,8	20000
Simulation6		39	0,6	20000
Simulation7		39	0,8	20000

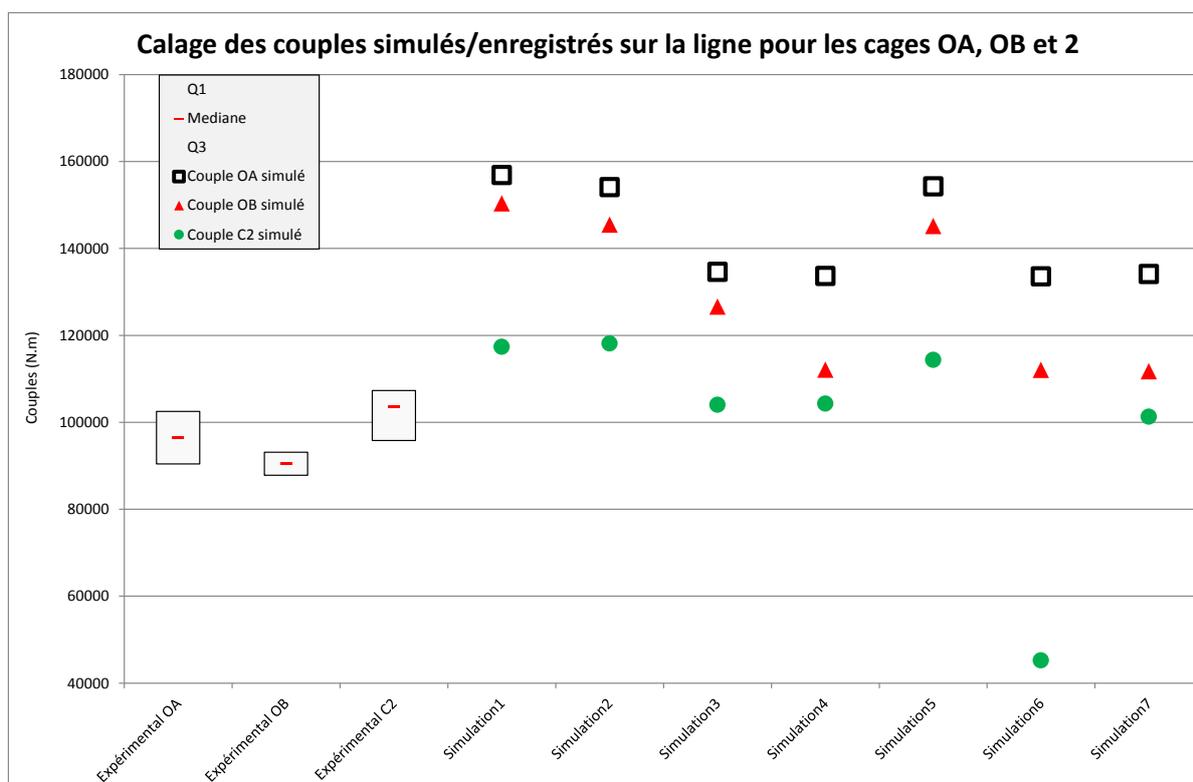


Figure 82 : Comparaison des couples simulés et expérimentaux des cages OA, OB et 2 avec une variation des coefficients de frottement et thermiques et des levées entre les cylindres

Les résultats des simulations 1,2 et 3 montrent qu'une baisse du coefficient d'échange thermique semble avoir plus d'impact qu'une diminution du coefficient de frottement sur les couples de laminage. La baisse des échanges thermiques peut provenir d'une diminution du coefficient d'échange et d'une montée de la température des cylindres.

La simulation n°7 dispose de paramètres avec des valeurs permettant d'avoir le meilleur compromis entre les couples simulés et expérimentaux.

Les valeurs des paramètres retenus sont mentionnées dans le Tableau 17. La première hypothèse est que le frottement entre la barre et le cylindre tend à augmenter avec la diminution de la température de la barre. L'étude menée par QINGQIANG prend en compte ce phénomène [QIN13]. Dans notre étude le coefficient de frottement est de 0,6 pour les deux

premières cages du laminoir et il augmente pour prendre une valeur de 0,8 pour les cages suivantes. Une autre hypothèse est que le coefficient d'échange thermique ne change pas d'une cage à l'autre.

Tableau 17 : Valeurs des coefficients retenus pour la simulation n°7

Coefficients thermomécaniques	Valeur du coefficient
Coefficient de frottement	ϵ [0,6; 0,8]
Effusivité des cylindres [b en J.K-1.m-2.s-1/2]	11763
Conduction [α en W/m ² .°C]	20000
Convection [h en W/m ² .°C]	10
Rayonnement [ϵ sans unité]	0,88

En effet comme le montre la Figure 83, les niveaux et la tendance suivie par les couples de la simulation n°7 sont en accord avec les couples mesurés sur le laminoir mis à part toujours pour les cages 2 et 3. Cet écart peut s'expliquer par la tension inter-cage qui n'est pas prise en compte dans la simulation numérique car le modèle est découplé cage par cage. Une étude est menée sur les effets de cette tension. Pour cela les cages OA et OB sont sélectionnées car en sortie de cette dernière la barre est libre avant d'entrer dans la cage 1.

Les écarts de couple relevés pour les cages OA et OB sont toujours présents. Ces écarts peuvent s'expliquer par des données industrielles qui ne correspondent pas exactement aux réglages fait sur le laminoir.

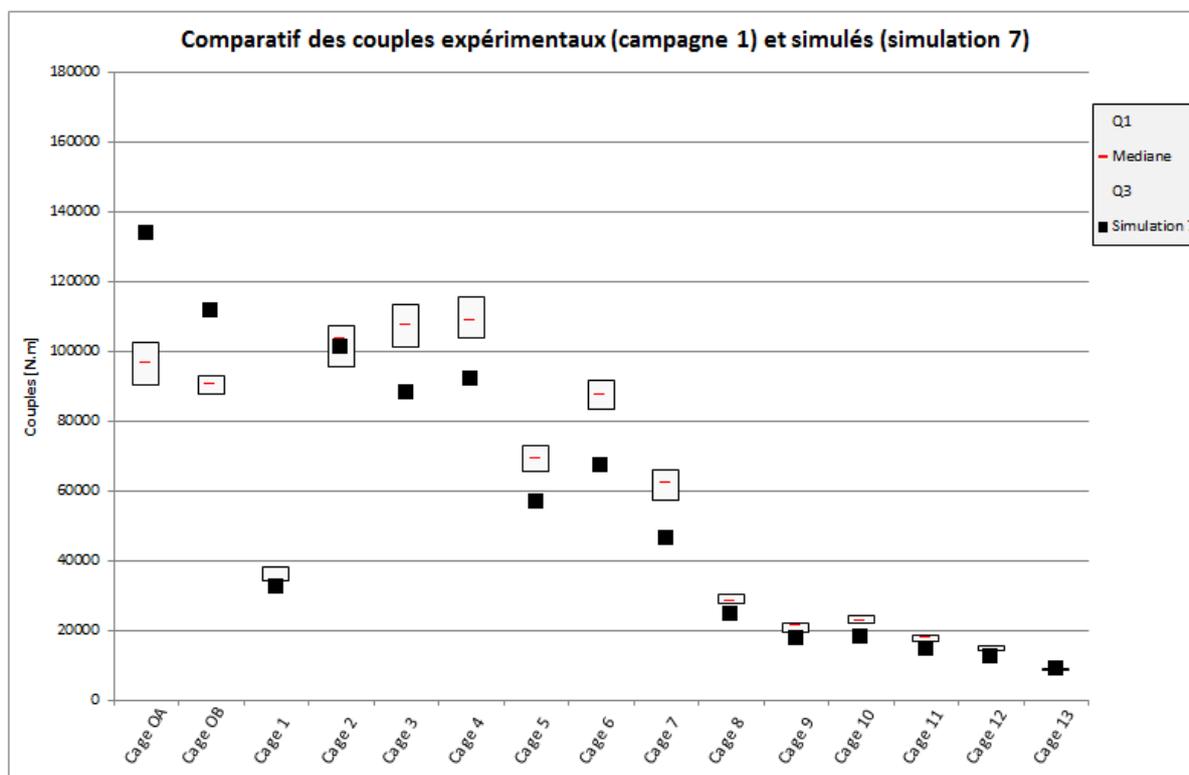


Figure 83 : Corrélation entre les couples expérimentaux et simulés lors du calage du modèle numérique

2.2.2.2 Etude de la tension inter-cage

L'objectif de cette étude est d'identifier à l'aide de la simulation numérique l'influence des paramètres physiques sur les couples de laminage et sur les sollicitations subies dans la barre. Les deux premières cages du laminoir sont sélectionnées car à la sortie de la cage OB la barre n'est en prise dans aucune autre cage. Le modèle réalisé pour cette étude n'est pas découplé, les cages OA et OB se trouvent dans la même simulation afin de visualiser les effets sur les grandeurs de sortie lorsque la barre est en prise simultanément dans les deux cages. Les paramètres du modèle sont identiques à ceux de la simulation 1 mis à part la longueur de la barre qui passe de 2m à 3,5m à cause de la distance entre les deux cages qui est de 2,5m. Les divers paramètres sont énoncés dans le Tableau 10.

Lors du passage de la barre dans les cages OA et OB il est possible de visualiser trois phases distinctes comme le montre la Figure 84 : la barre est en prise dans la cage OA, la barre est en prise simultanément dans les cages OA et OB, la barre est en prise uniquement dans la cage OB. La Figure 84 montre l'évolution des couples de laminage simulés pour les cages OA et OB. Ils sont représentés respectivement en bleu et en rouge. Le couple moyen est calculé pour chaque phase de régime établi et est représenté en noir sur la Figure 84. Après l'introduction de la barre dans la cage OA le couple se trouve dans une phase de régime établi jusqu'à ce qu'elle rentre dans la cage OB. A ce moment-là un pic de couple est atteint dans la cage OA et se stabilise par la suite, c'est également le cas pour le couple de la cage OB. Une augmentation d'environ 13% du couple de la cage OA est notable lorsque la barre est en prise dans les deux cages simultanément. Ce phénomène montre que la barre est en compression car la cage OA tend à pousser la barre et la cage OB tend à la retenir. Les contraintes de compression dans la section de la barre suivant la direction de laminage sont montrées sur la Figure 85. Une contrainte d'environ 2,5MPa est relevée dans la barre. Lorsque la barre quitte la cage OA le couple de la cage OB augmente. L'explication vient du fait que la barre est entraînée seulement par la cage OB et par conséquent cette dernière n'est plus aidée par la poussée de la cage OA.

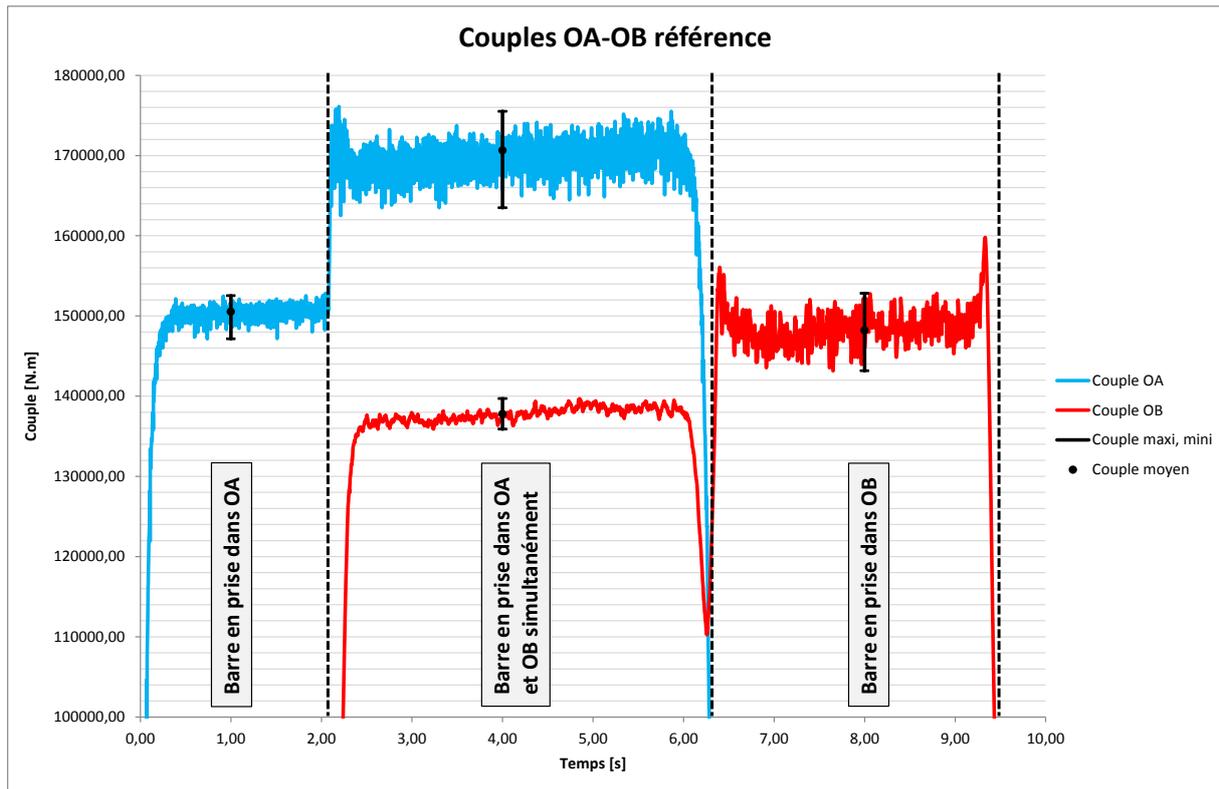


Figure 84 : Evolution des couples de laminage simulés des cages OA et OB

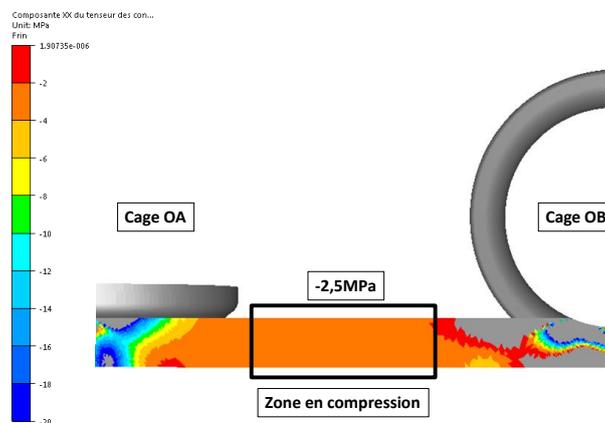


Figure 85 : Illustration de la compression dans la barre lorsqu'elle est en prise dans les cages OA et OB pour des données de références

La Figure 86 illustre l'influence des paramètres physiques sur le couple des cages OA et OB et cela pour les trois phases décrites plus haut. Les paramètres variables sont la vitesse de rotation des cylindres de la cage OB, la levée de la cage OA et le frottement entre la barre et les outils. L'influence des paramètres sélectionnés sur les couples est exprimée en pourcentage par rapport aux couples de référence présenté sur la Figure 84.

Dans un premier temps le paramètre variable est la vitesse de rotation des cylindres de la cage OB qui est initialement de 23tr/min. Le paramètre sélectionné varie de +2tr/min et -1tr/min. La variation de la vitesse de rotation des cylindres de la cage OB n'a aucune

influence sur le couple de la cage OA lorsque la barre n'est engagée que dans celle-ci. Lorsque la vitesse de rotation des cylindres augmente une diminution et une augmentation d'environ 7% du couple est à noter respectivement pour les cages OA et OB quand la barre est en prise dans les deux cages simultanément. Une augmentation de la vitesse de rotation des cylindres entraîne une augmentation de la vitesse de la barre en sortie de la cage OB. La Figure 86 montre que le couple de la cage OB est plus élevé car la barre est tirée par cette dernière. Tandis que le couple demandé par les cylindres de la cage OA est moins élevé car le passage de la barre est facilité par la cage OB. Inversement lorsque la vitesse de rotation des cylindres de la cage OB diminue la vitesse de la barre en sortie de laminage diminue également. Les conséquences sont que la barre est retenue par la cage OB tandis que la cage OA tend à la pousser d'avantage. La Figure 87 illustre les vitesses de sortie de la barre après les cages OA et OB et les phénomènes décrits précédemment. Le phénomène rencontré explique l'augmentation d'environ 3% du couple de la cage OA. Les effets sur le couple de laminage de la cage OB sont négligeables.

La Figure 88 illustre l'état des contraintes dans la barre suivant la direction de laminage pour les deux vitesses de rotation des cylindres sélectionnées pour la cage OB. En augmentant la vitesse de rotation des cylindres de laminage la contrainte de compression dans la barre tend à diminuer. La valeur relevée dans la barre lorsque celle-ci est en prise dans les deux cages est de 1MPa. La contrainte de compression tend à augmenter avec une diminution de la vitesse de rotation des cylindres de la cage OB. Dans ce cas la valeur relevée est de 3,5MPa. La variation des contraintes relevées dans la barre permet de justifier les phénomènes de traction ou de compression rencontrés lors de l'analyse des couples de laminage.

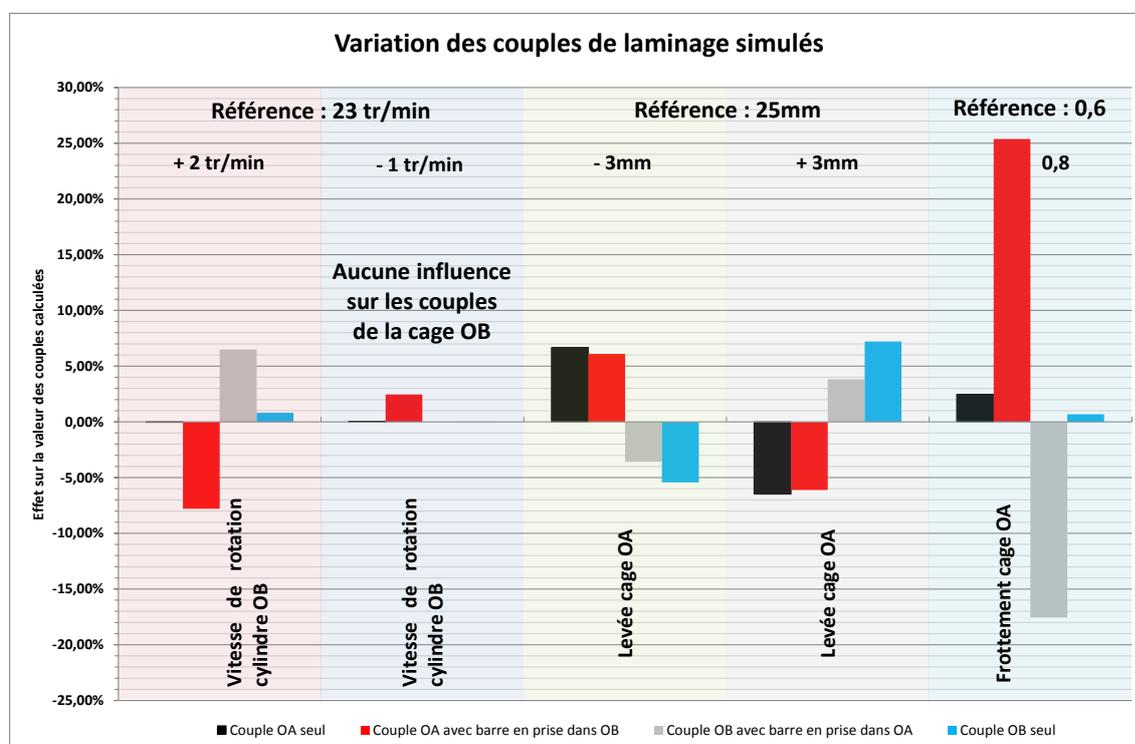


Figure 86 : Influence des paramètres physiques sur les couples de laminage des cages OA et OB

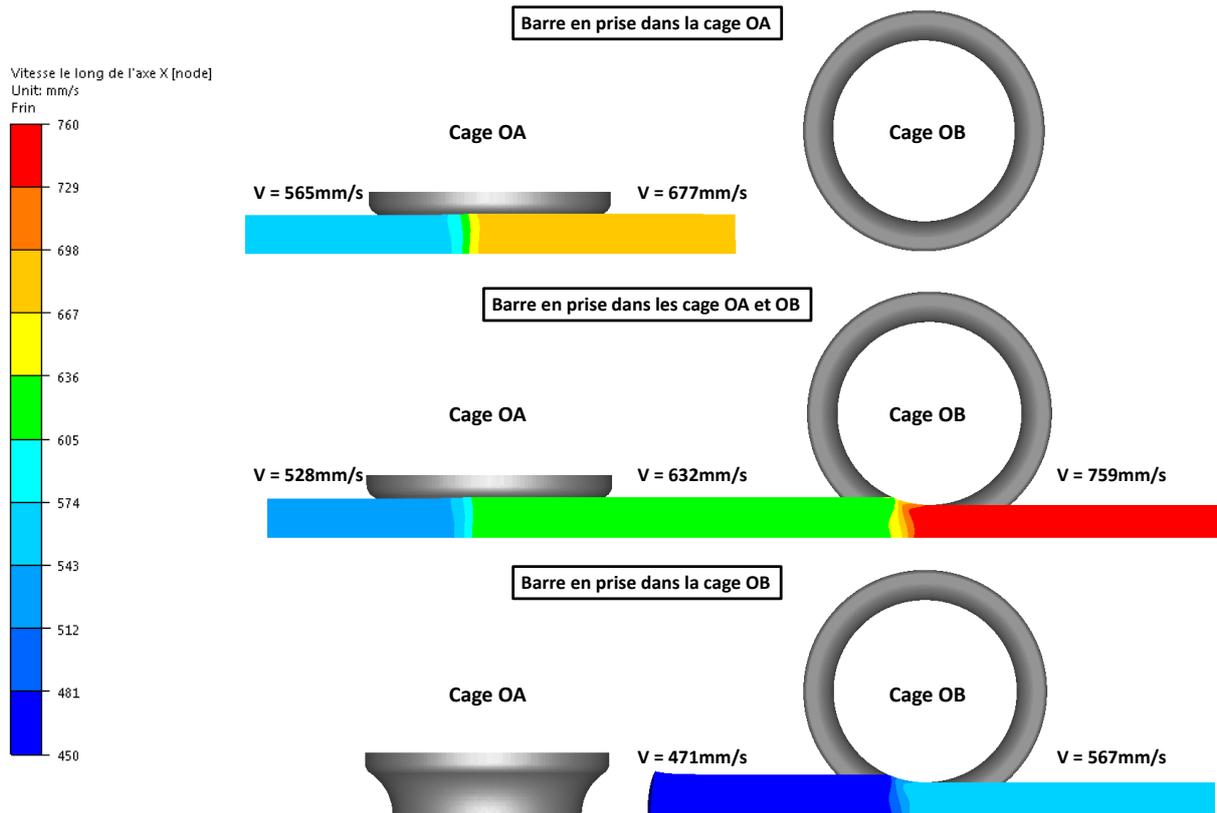


Figure 87 : Evolution de la vitesse linéaire de la barre laminée dans les cages OA et OB

Le second paramètre étudié est la levée entre les cylindres de la cage OA qui varie de $\pm 3\text{mm}$ par rapport à la levée de référence qui est de 25mm. La Figure 86 montre qu'une diminution de la levée entraîne une augmentation de 7% du couple de la cage OA car la déformation subie par la barre est plus importante. La section de la barre entrant dans la cage OB est ainsi plus petite entraînant une diminution du couple de l'ordre de 5% car la déformation subie dans cette cage est plus faible. Il se produit le phénomène inverse lorsque l'ouverture entre les cylindres de la cage OA est plus grande. Le couple de la cage OA diminue de 7% tandis que celui de la cage OB augmente d'autant. En effet dans la cage OA la barre subie moins de déformation et par conséquent la section qui entre dans la cage OB est plus grande ce qui demande à fournir un couple plus élevé. La Figure 88 montre que dans les deux cas la levée a une influence négligeable sur la contrainte de compression dans la barre.

Pour finir, le dernier paramètre variable est le frottement entre la barre et les cylindres de la cage OA. Le coefficient de frottement a une valeur initiale de 0,6 et il prend une valeur de 0,8 pour analyser son influence sur les couples et les sollicitations subies dans la barre. Lorsque la barre n'est engagée que dans la cage OA le couple augmente de 2%. Cependant le couple de la cage OA augmente de plus de 20% et celui de la cage OB diminue d'autant quand la barre est en prise dans les deux cages simultanément. Finalement l'augmentation du frottement entre la barre et les cylindres de la cage OA ne fait qu'amplifier le phénomène rencontré lors de l'analyse du couple de référence présenté Figure 84. En effet la cage OA pousse la barre à travers la cage OB ce qui entraîne une diminution du couple fourni à cette dernière. La valeur de cette poussée est d'autant plus forte que le coefficient de frottement est

élevé. La contrainte de compression relevée dans la barre entre les deux cages est de 7MPa.

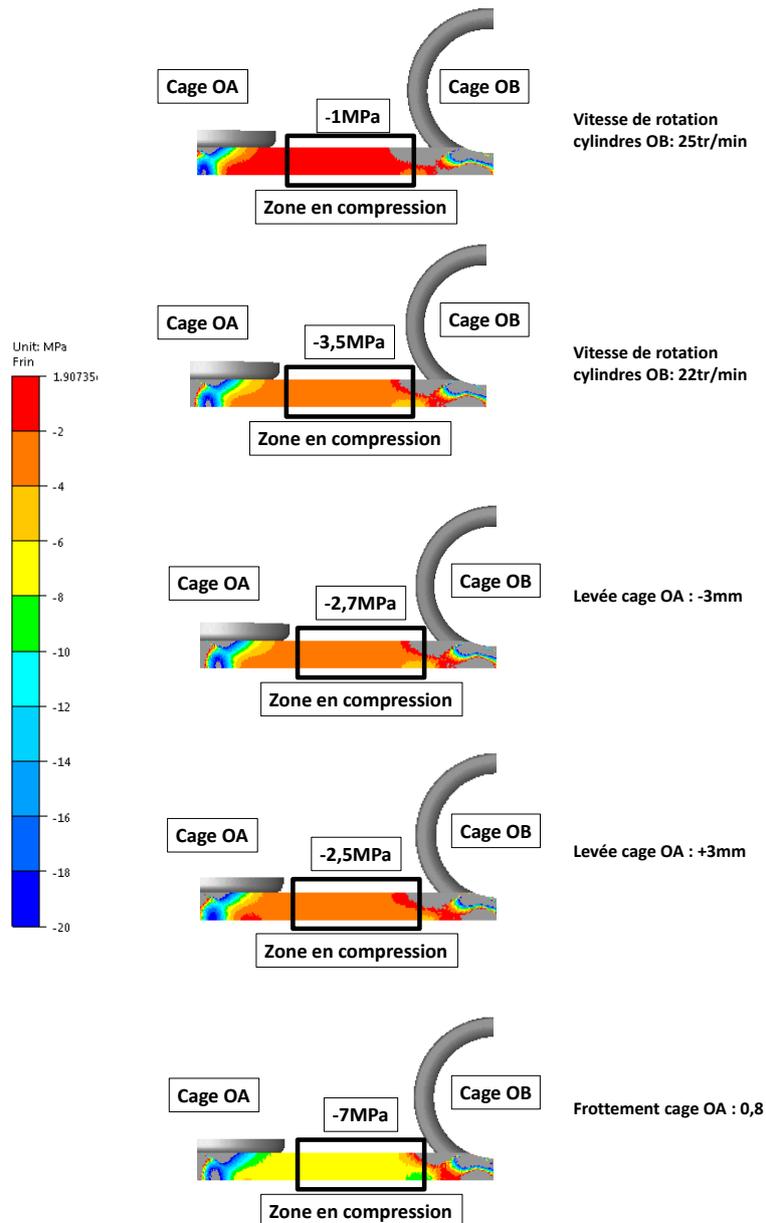


Figure 88 : Contraintes dans la barre suivant la direction de laminage en fonction des variations des paramètres d'entrée

L'étude montre que certains paramètres comme la vitesse de rotation des cylindres et le frottement ont une influence sur les couples de laminage. L'objectif étant de connaître également l'influence de ces paramètres sur la tension inter-cages. Les écarts relevés dépendent de la variation du paramètre d'entrée. Des variations ne dépassant pas 6MPa sont relevées pour la contrainte de compression dans la barre. A 1200°C la contrainte d'écoulement est d'environ 70MPa pour un acier de nuance C15 et une vitesse de déformation égale à 1. La contrainte relevée dans le cas de référence est de 2,5MPa, cela représente environ 3,5% de la contrainte d'écoulement. La contrainte maximale relevée dans la barre

pour un coefficient de frottement de 0,8 est de 7MPa ce qui représente 10% de la contrainte d'écoulement.

Les écarts relevés lors de la comparaison des couples simulés et expérimentaux sur le laminoir LUNA sont en dessous de 15%. Par conséquent il est possible d'affirmer que les écarts sur la contrainte de compression sont en dessous de 10%. L'étude a permis d'identifier l'influence des paramètres physiques sélectionnés sur les sollicitations en contraintes dans la barre et sur les couples de laminage. De plus, l'étude valide l'hypothèse sur le fait de négliger la tension inter-cage dans notre modèle de laminage dont la variation estimée est inférieure à 10%.

2.2.2.3 Comparaison avec les données expérimentales

La Figure 89 montre l'évolution des couples des cages OA et OB relevés expérimentalement. Lorsque la barre s'engage dans la cage OB le couple de la cage OA diminue. Ce phénomène s'explique par le fait que la barre est soumise à une contrainte de traction entre ces deux cages tandis qu'en simulation la barre est soumise à de la compression. Cette différence de contrainte ne peut pas s'expliquer par une erreur sur les valeurs des coefficients de frottement et d'échanges thermiques. Il en est de même pour les levées qui malgré les valeurs extrêmes retenues n'influencent le couple que d'environ 5%. Il faudrait faire varier les levées encore plus mais cela ne serait pas représentatif de ce qu'il est possible de faire sur le laminoir industriel. Une différence entre les données remises par l'industriel et les valeurs réelles utilisées sur le laminoir peuvent expliquer ce phénomène.

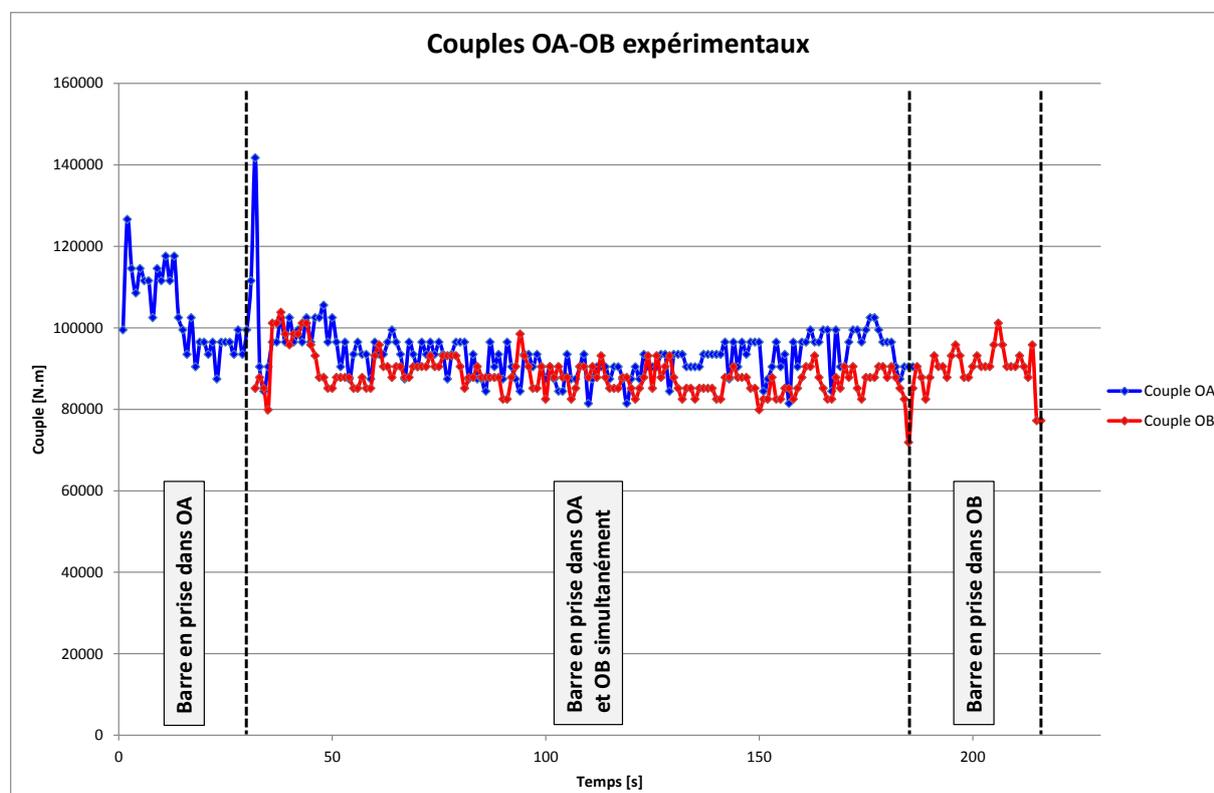


Figure 89 : Evolution des couples expérimentaux des cages OA et OB

La variation d'un paramètre telle que la levée ou la vitesse de rotation des cylindres fait dans un cas diminuer OA et augmenter OB et inversement. Cela implique qu'il n'est pas possible de corriger les écarts de couples sur ces cages uniquement en modifiant ces paramètres. Cette explication est valable pour expliquer les écarts de couple relevés pour les cages 2 et 3. En faisant diminuer les couples de la cage 2 les couples de la cage 3 vont augmenter. Quant à la surestimation des couples des cages OA et OB le paramètre restant permettant d'expliquer ces écarts est la loi de comportement du matériau qui n'est pas caractérisée pour les bruts de coulée.

2.2.2.4 *Prise en compte de la tension inter-cage dans le modèle découplé*

La stratégie de simulation employée avec le modèle découplé de base ne prend pas en compte la tension inter-cage. L'étude précédente a montré que les couples de laminage des cages OA et OB sont influencés du fait que la barre est en prise simultanément dans ces deux cages. Dans cette partie l'objectif est de déterminer s'il est possible de prendre en compte la tension inter-cage dans le modèle découplé en se servant des contraintes relevées dans le modèle couplé. Pour valider la faisabilité, les couples des cages OA et OB du modèle découplé seront comparés à ceux du modèle couplé.

Le cas de référence avec les cages OA et OB est pris comme exemple pour présenter la méthode permettant de mettre en place la tension inter-cage dans le modèle découplé. La mise en donnée du modèle est identique à la simulation 1. Les résultats de la Figure 85 montrent que dans le cas de référence la barre est en compression lorsqu'elle se trouve en prise simultanément dans les deux cages. Pour modéliser les contraintes dans la barre un effort est calculé en tenant compte de la section de la barre laminée et de la contrainte relevée dans le modèle couplé :

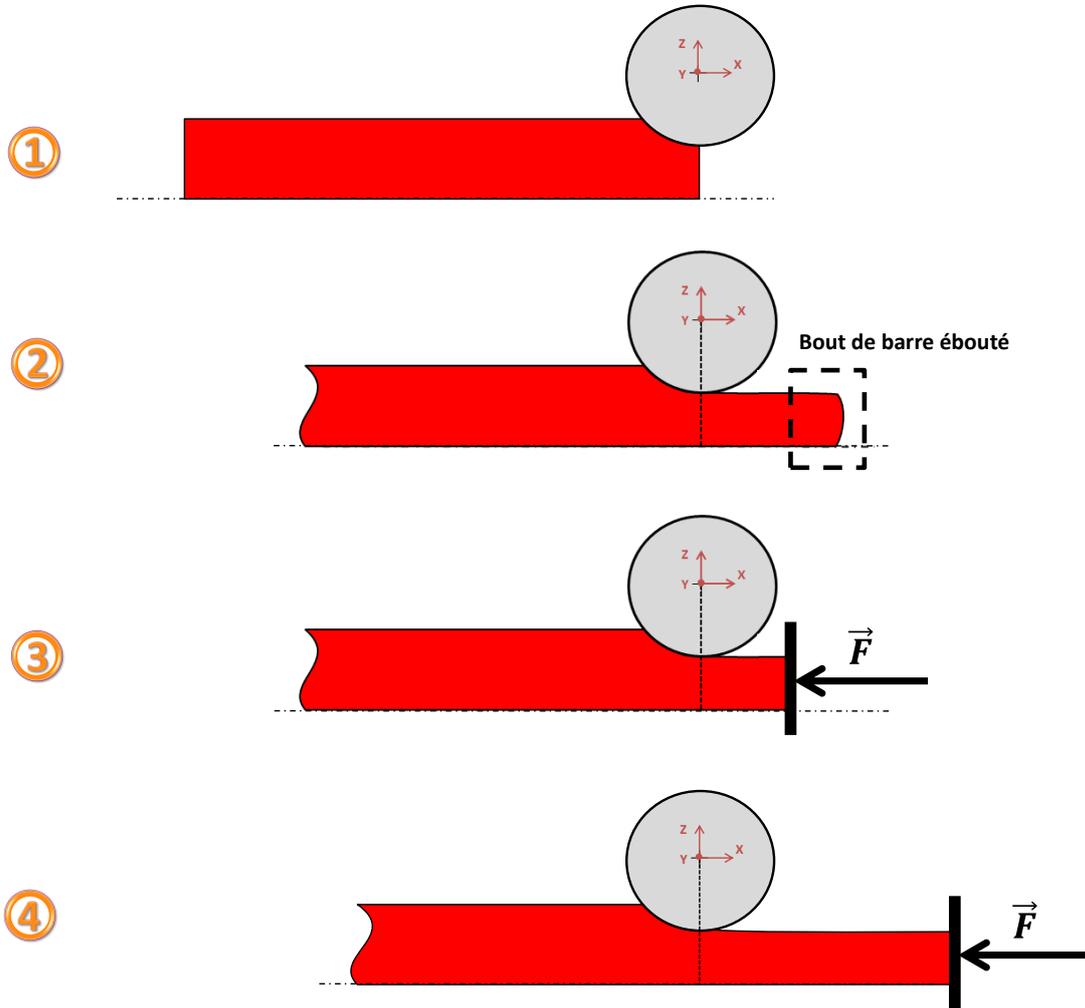
$$\vec{F} = \int \sigma \cdot \vec{n} \cdot dS \approx \sigma_{xx} \cdot S \text{ avec } \sigma_{xx} \text{ uniforme dans la section de la barre}$$

La méthode utilisée pour placer les efforts inter-cage dans le modèle numérique est présentée sur la Figure 90. Que ce soit en entrée ou en sortie de cage les efforts inter-cage sont placés à l'aide de set d'interface. L'introduction de la tension inter-cage en sortie de cage présentée dans le cas a). Afin d'engager la barre entre les cylindres de la cage OA un bout de barre est laminée au départ sans prendre en compte l'effort inter-cage ①. L'extrémité de la barre est éboutée pour lui donner une surface plane ② puis la tension est appliquée via un set d'interface ③. La barre est ensuite laminée en tenant compte de la tension inter-cage ④. Le cas b) présente la mise en place de l'effort à l'arrière de la barre qui la pousse à travers la cage OB. Dans ce cas il est possible de placer le set d'interface dès le début de la simulation.

La démarche présentée est également utilisée pour les cas avec la variation de la levée de $\pm 3\text{mm}$ entre les cylindres de la cage OA. Les valeurs des contraintes relevées dans la barre en fonction de la levée des cylindres de la cage OA sont mentionnées sur la Figure 88.

Méthode pour placer les efforts inter-cage dans le modèle numérique

a) Tension introduite en sortie de cage de la cage OA



b) Tension introduite en entrée de la cage OB

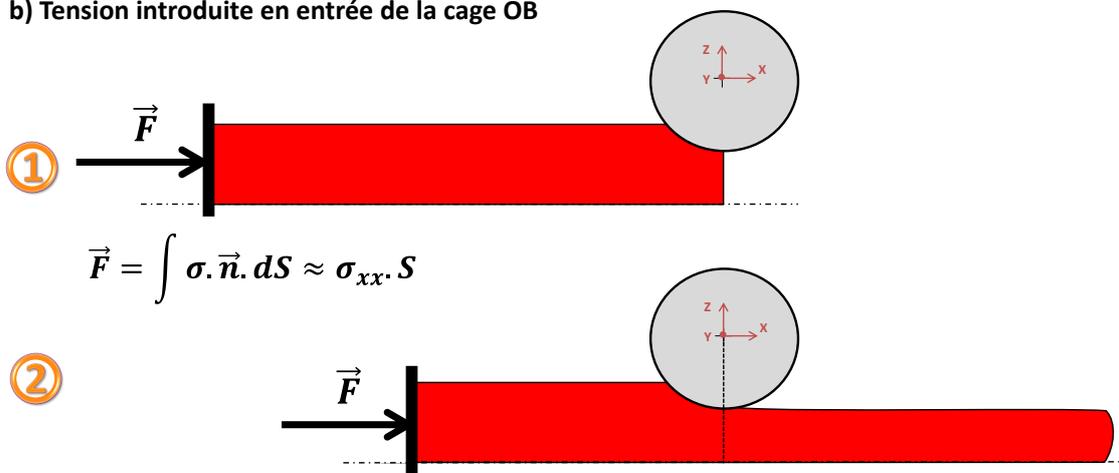


Figure 90 : Méthode pour mettre en place les efforts inter-cage aux extrémités de la barre a) en sortie de cage ; b) en entrée de cage dans le modèle numérique

La partie qui suit compare les couples des cages OA et OB entre les modèles couplé et découplé pour les trois cas étudiés. La Figure 91 présente la comparaison des couples des cages OA et OB pour le cas de référence. Sur ce graphique les couples des cages OA et OB pour le modèle couplé sont représentés respectivement en bleu et en rouge. Les couples des cages OA et OB du modèle découplé calculés avec un set d'interface en tenant compte de la tension inter-cage sont désignés par les courbes en violet et en noir. Les couleurs désignant les couples présentés sur ce graphique sont identiques pour les graphiques présentés par la suite. La comparaison des couples moyens de la Figure 91 montre qu'un écart de 4000N.m est notable pour la cage OA soit un écart d'environ 2%. Concernant la cage OB les couples simulés dans le modèle découplé ont un niveau quasi identique à ceux simulés dans le modèle couplé.

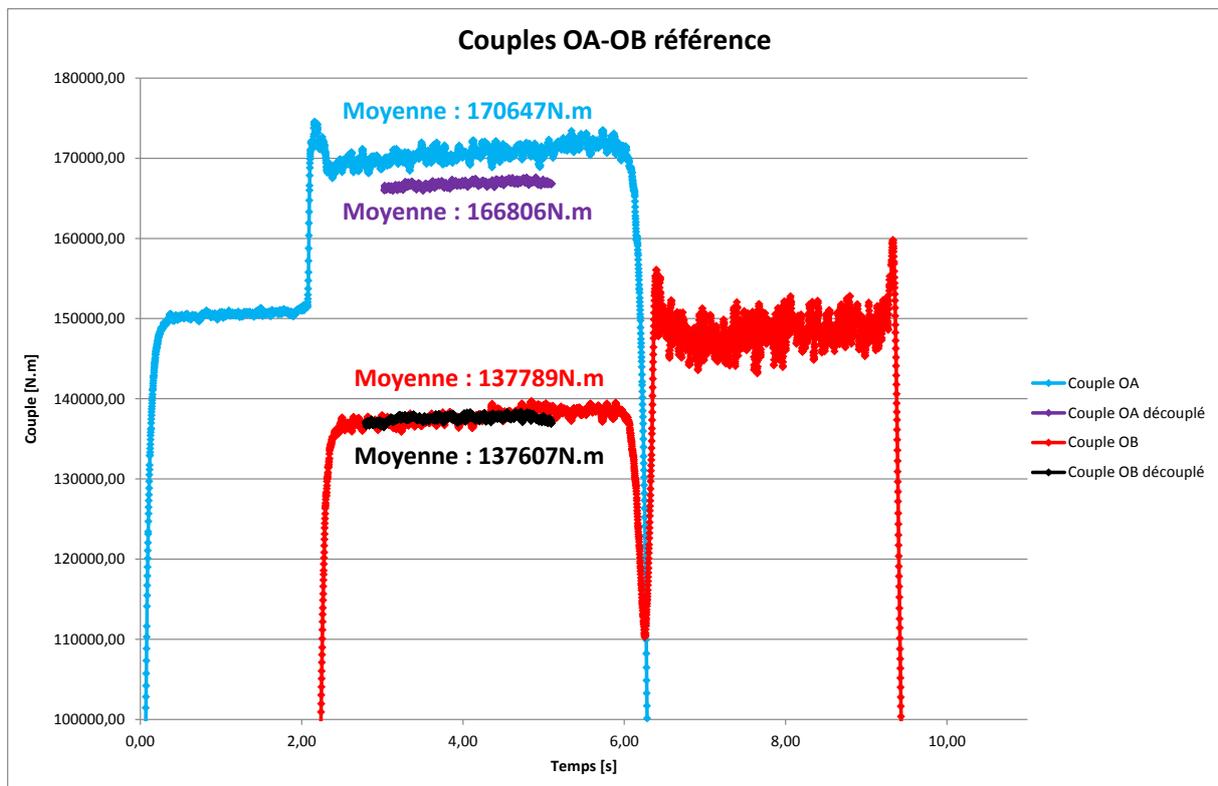


Figure 91 : Allure des couples des cages OA et OB lorsque la barre est en prise simultanément dans les deux cages pour le cas de référence

La Figure 92 montre la comparaison des couples simulés des cages OA et OB dans les modèles couplé et découplé lorsque la barre est en prise dans les deux cages. Dans la configuration présentée sur cette figure la levée de la cage OA est de 28mm soit une ouverture de +3mm. La contrainte de compression relevée dans la section de la barre lorsque celle-ci se trouve à la fois en prise dans les cages OA et OB est de 2,5MPa. Cette contrainte est appliquée aux extrémités de la barre dans les deux simulations du modèle découplé comme indiqué sur la Figure 90. Par comparaison les couples simulés avec le modèle découplé, que ce soit pour les cages OA ou OB, ont des niveaux identiques à ceux simulés à l'aide du modèle couplé. Les écarts relevés avec la variation du paramètre d'entrée choisi ne dépassent

pas 2%.

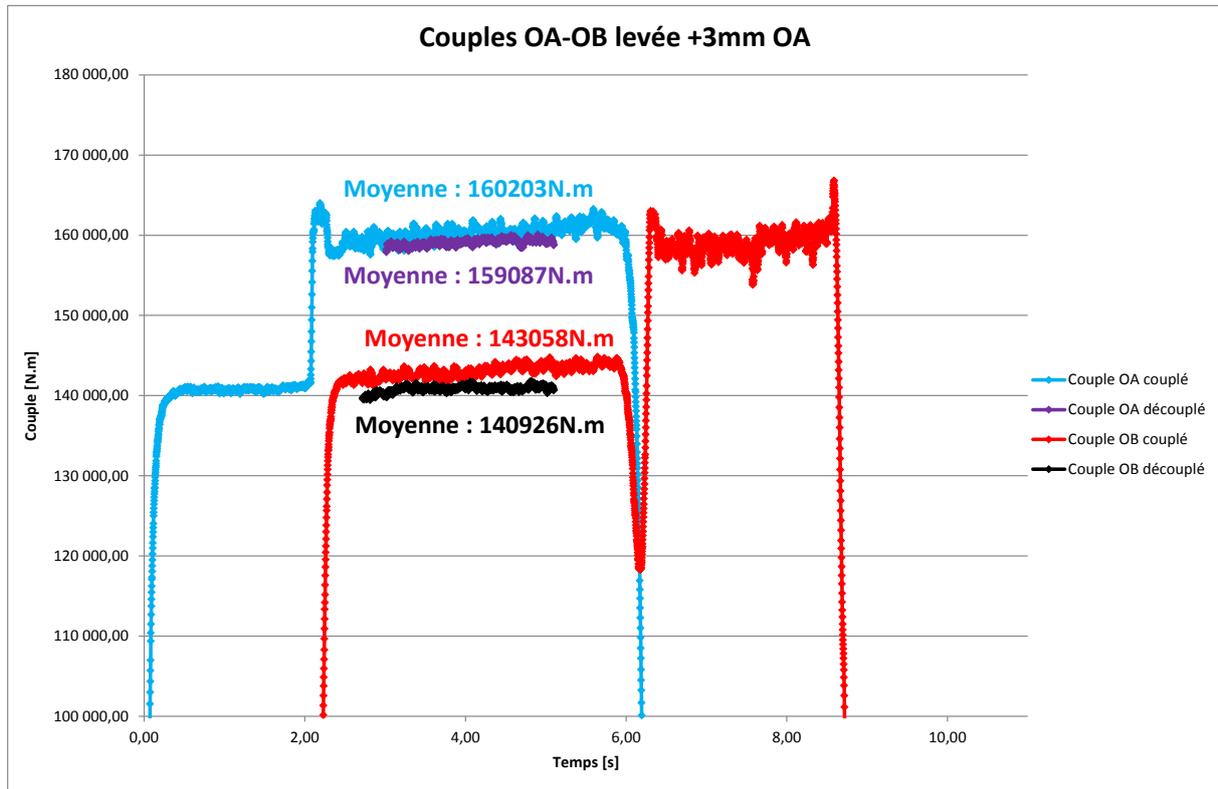


Figure 92 : Allure des couples des cages OA et OB lorsque la barre est en prise simultanément dans les deux cages pour le cas avec une levée de +3mm entre les cylindres de OA

Pour finir la Figure 93 montre la comparaison des couples des deux premières cages suivant les deux modèles couplé et découplé avec une levée de la cage OA de 22mm. La contrainte de compression relevée dans la barre est de 2,7MPa lorsqu'elle est laminée en même temps dans les cages OA et OB. Les couples de la cage OA avec la simulation découplée sont inférieurs à ceux issus de la simulation couplée. L'écart relevé est d'environ 4300N.m. L'écart relevé entre les deux simulations concernant les couples de la cage OB est négligeable.

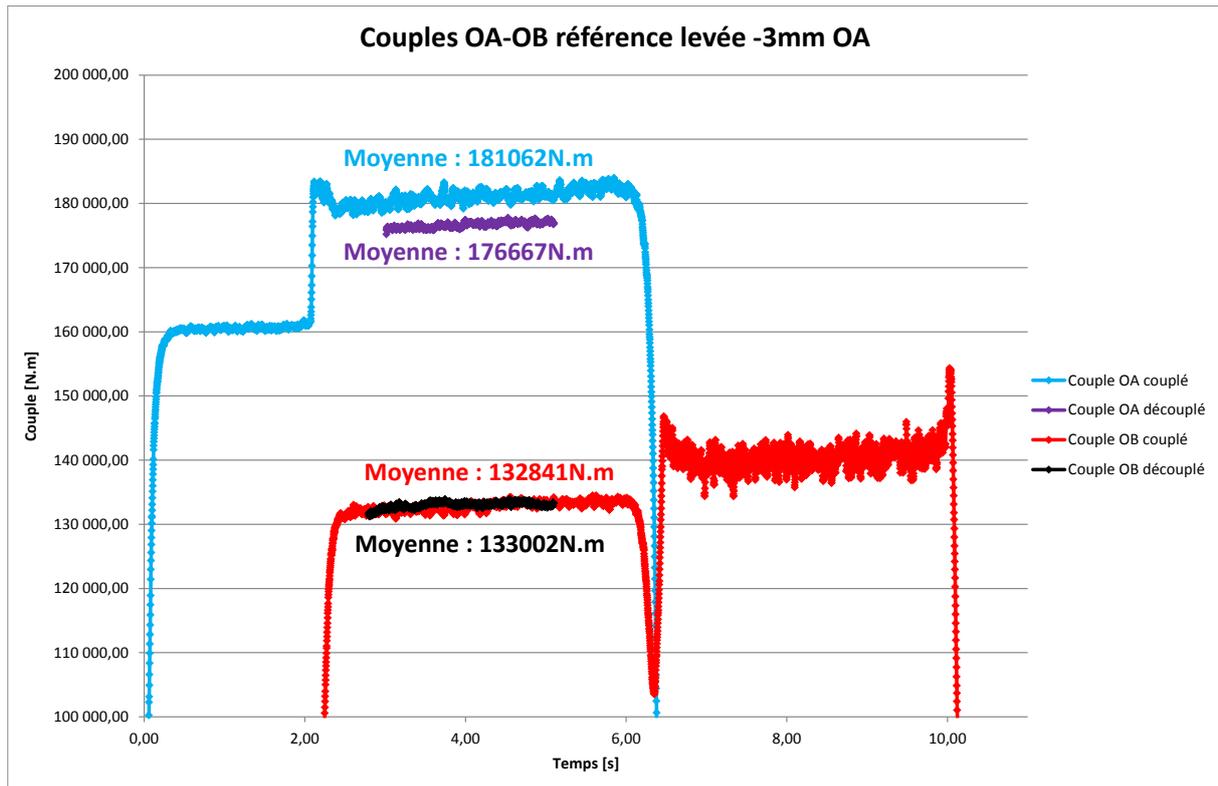


Figure 93 : Allure des couples des cages OA et OB lorsque la barre est en prise simultanément dans les deux cages pour le cas avec une levée de -3mm entre les cylindres de OA

La conclusion de cette étude est qu'il est possible de prendre en compte les tensions inter-cage dans le modèle découplé. La comparaison des couples issus de la simulation découplée avec ceux de la simulation couplée montre que les écarts relevés ne dépassent pas 2%. La prise en compte des efforts inter-cage peut permettre de recalibrer les écarts de couple rencontrés entre la simulation et les mesures expérimentales.

2.2.2.5 Comparaison des températures simulées et mesurées expérimentalement (campagne n°1) pour le calage du modèle numérique

En s'appuyant sur la simulation n°7, les températures simulées sont comparées à celles provenant des mesures expérimentales de la campagne n°1. Sur la Figure 94 les températures expérimentales sont représentées en vert et les températures issues de la simulation sont représentées par des carrés noirs. La confrontation des températures simulées et expérimentales montre qu'elles suivent la même tendance. Cependant un écart d'environ 7% peut être noté entre les deux valeurs de température.

L'exemple de la cage OB montre que la température simulée est supérieure à la température expérimentale. Pour cette même cage le couple simulé est supérieur au couple expérimental. L'erreur en couple ne peut être imputée à l'erreur de température. En effet si la température simulée tend à diminuer cela entraîne une augmentation de la contrainte

d'écoulement du matériau et par conséquence du couple de laminage.

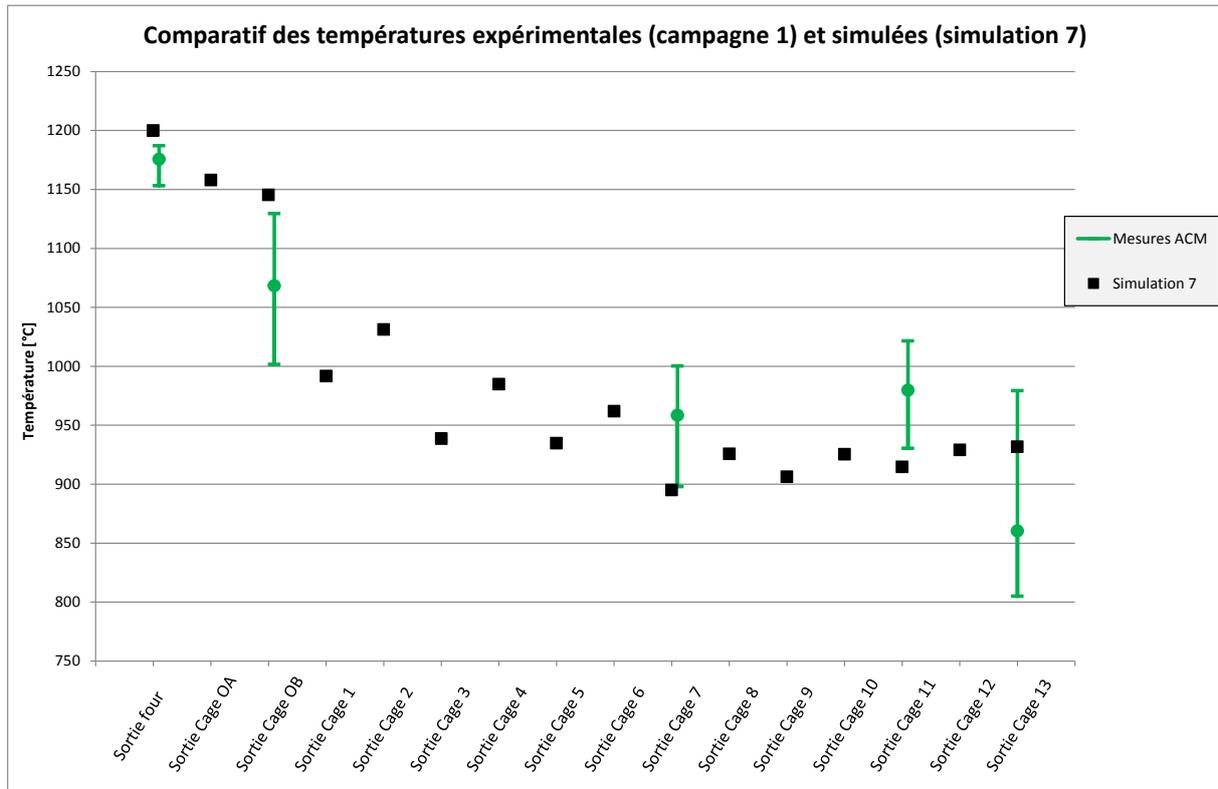


Figure 94 : Corrélation entre les températures expérimentales et simulées lors du calage du modèle

Le modèle a été calé sur les résultats expérimentaux d'une première campagne de mesure en ajustant les paramètres de frottement et d'échanges thermiques. Les couples de laminage obtenus par la simulation suivent les mêmes tendances qu'expérimentalement. Ils sont toutefois surestimés pour les deux premières cages de laminage et sous-estimés pour les suivantes. L'action sur les frottements et les échanges thermiques ou sur les tensions inter-cage ne semblent pas en mesure de corriger les écarts sauf à donner aux paramètres des valeurs déraisonnables ou, du moins, hors des domaines rencontrés dans la littérature.

La mise en place d'un outil de simulation fiable va contribuer à la compréhension des phénomènes thermomécaniques se produisant dans la barre durant les opérations de laminage afin d'identifier les sollicitations influant sur le comportement des inclusions et des porosités. Pour ce faire, les données de sortie relevées lors de la seconde campagne de mesures seront confrontées aux résultats issus de la simulation configurée sur cette même campagne. L'idée est de savoir si dans cette nouvelle configuration les écarts entre les couples simulés et expérimentaux sont équivalents à la première. Cela va permettre de déterminer si les mêmes erreurs se répètent comme par exemple la surestimation des couples des cages OA et OB.

2.2.3 Vérification du caractère prédictif du modèle numérique

L'étape précédente a servi à définir les valeurs des paramètres du modèle numérique en se basant sur les résultats expérimentaux. Les résultats des couples de laminage et des températures de la campagne n°2 présentés précédemment vont permettre de vérifier le caractère prédictif du modèle numérique.

Le Tableau 18 liste les données de la barre ainsi que celles du laminoir rentrées dans l'outil de simulation. Les paramètres du laminoir que sont les géométries des cylindres de laminage et les levées sont modifiés. Il en est de même pour le matériau du bloom. Quant aux paramètres tels que les coefficients de frottement ou d'échanges thermiques, ils restent identiques à ceux utilisés dans la simulation n°7 présentée précédemment.

Tableau 18 : Données d'entrée du modèle pour vérifier son caractère prédictif

Paramètres	Bloom	Cylindres
Diamètre initial	270mm	∈ [350mm ; 700mm]
Diamètre final	60mm	-
Température initiale	1 200°C	∈ [65°C ; 90°C]
Matériau	C45	-
Longueur initiale	2 000mm	-
Nombre de cages	-	13
Coefficient de frottement	∈ [0,6 ; 0,8]	-
Effusivité des cylindres [b en $J \cdot K^{-1} \cdot m^{-2} \cdot s^{\frac{1}{2}}$]	-	11 763
Conduction [α en $W/m^2 \cdot ^\circ C$]	20 000	-
Convection [h en $W/m^2 \cdot ^\circ C$]	10	-
Rayonnement [ε sans unité]	0,88	-

Après avoir simulé l'opération de laminage avec les nouvelles données d'entrée, une nouvelle comparaison des résultats simulés avec les résultats expérimentaux est possible.

2.2.3.1 Comparaison des couples de laminage simulés et mesurés expérimentalement (campagne n°2)

La Figure 95 compare les couples de laminage issues de la simulation numérique et les mesures faites sur l'outil de production. Les couples simulés, mis à part pour la cage 10, suivent la même tendance que les mesures acquises sur le laminoir. L'écart entre le couple

expérimental et simulé peut s'expliquer par la présence de glissement entre la barre et les cylindres. En effet, le couple moyen de la cage 10 enregistré lors de la seconde campagne de mesures ($\sim 13\ 000\ N.m$) est inférieur au couple moyen mesuré lors de la première campagne ($\sim 23\ 000\ N.m$). Les niveaux des couples simulés sont en accord avec les couples expérimentaux. Cependant une surestimation des couples pour les cages OA et OB est notable comme c'était le cas après la simulation 7. La tendance des couples des cages 2 et 3 est correcte ce qui n'était pas le cas pour la campagne 1. La loi de comportement du matériau utilisée pour la simulation du laminage de cette nouvelle gamme semble plus adaptée que précédemment. En plus d'avoir une tendance correcte pour les couples des cages 2 et 3, les écarts de couples pour les cages OA et OB sont inférieurs à ceux relevés lors de la première campagne.

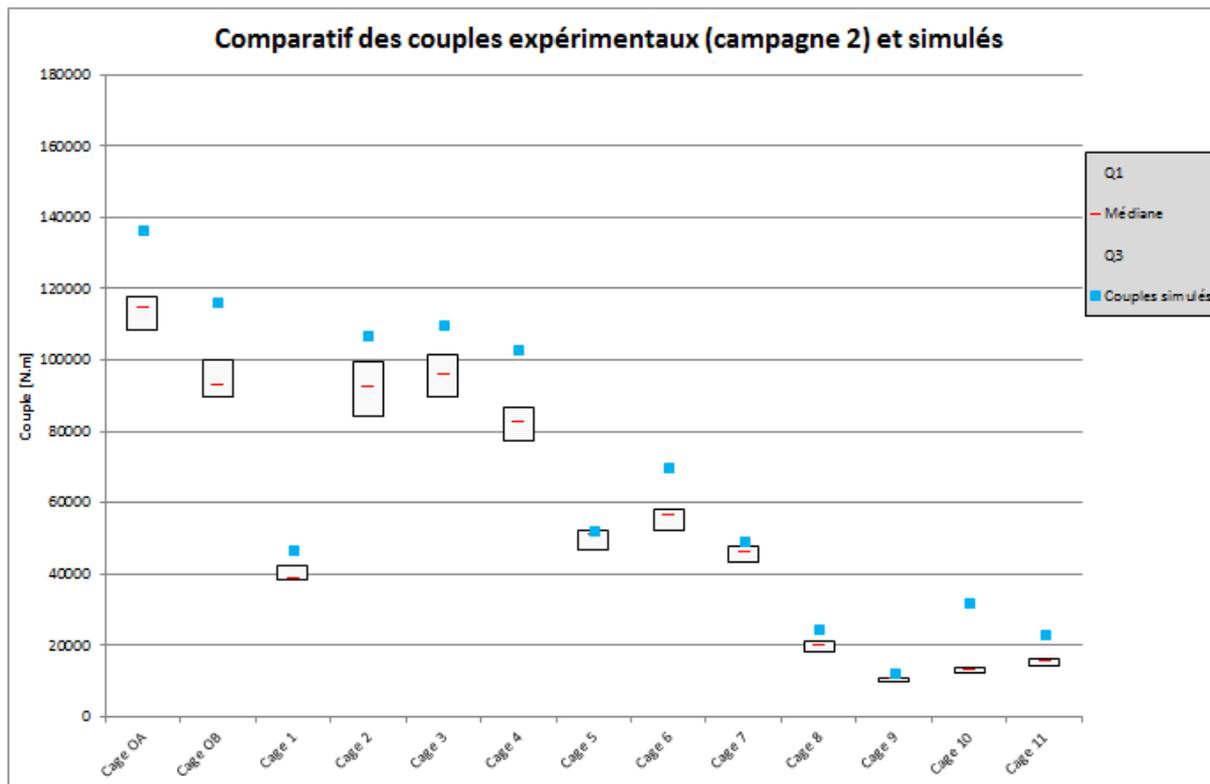


Figure 95 : Corrélation entre les couples expérimentaux et simulés lors de la validation du modèle numérique

2.2.3.2 Comparaison des températures simulées et mesurées expérimentalement (campagne n°2)

La Figure 96 compare les températures simulées à celles mesurées sur la ligne de production. L'amplitude et la moyenne des températures mesurées lors de la seconde campagne sont représentées en vert et les températures simulées sont repérées par les carrés bleus. La tendance des températures simulées est en accord avec les températures expérimentales. Cependant à la sortie des cages 9 et 11 les températures mesurées sont supérieures d'environ 10% aux températures simulées, ce qui était déjà le cas pour la

campagne précédente.

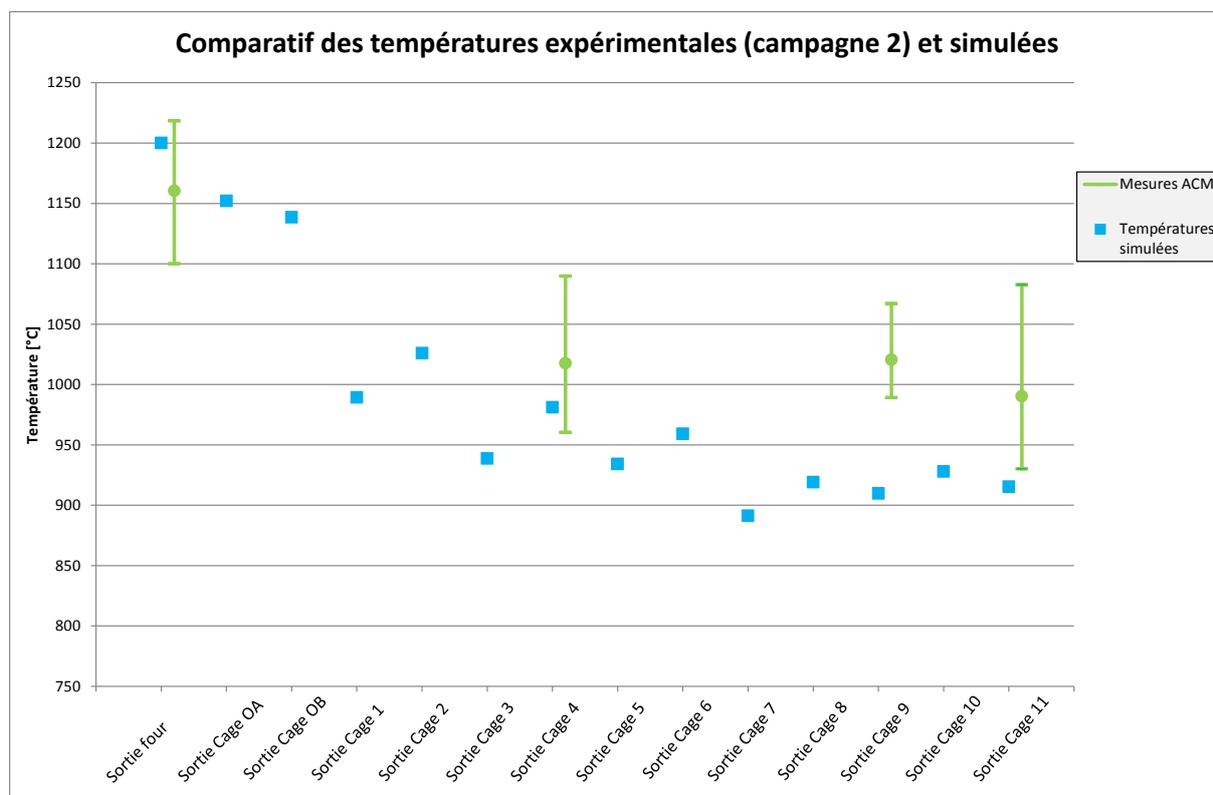


Figure 96 : Corrélation entre les températures expérimentales et simulées lors de la vérification du modèle

2.2.4 Conclusions

La comparaison des résultats issus du train de laminage avec ceux de la simulation permet de valider le caractère prédictif du modèle numérique. En moyenne les écarts des grandeurs mesurées et simulées ne dépassent pas 10%. Concernant l'évolution des températures et des couples de laminage on s'aperçoit que pour les deux cas la tendance est similaire, ce qui en fait un modèle satisfaisant.

En revanche pour la campagne 1 les couples simulés des cages OA et OB sont surestimés mais après ces deux cages c'est l'inverse qui se produit, les couples simulés sont inférieurs à ceux relevés sur le laminoir. Pour la campagne 2 l'écart sur les couples des deux premières cages peut s'expliquer par l'erreur de température. En effet si les températures simulées tendent à augmenter pour atteindre les valeurs mesurées, cela entraînerait une diminution des couples simulés ce qui les rapprocherait des couples expérimentaux. La non prise en compte des tensions inter-cage a certes une influence sur les couples mais ce paramètre est difficilement transposable d'un cas à l'autre comme le montre l'exemple des cages 2 et 3. Pour prendre en compte ce paramètre en simulation il faudrait recalculer les tensions à chaque nouvelle nuance laminée ce qui nuit à la prédictivité du modèle. La solution consisterait à simuler les cages par deux en faisant l'hypothèse que la tension entre les cages $n+1$ et $n+2$ n'influence pas le laminage et les couples de la cage n . Cependant au vu du

nombre de paramètres d'entrée important beaucoup de combinaisons sont possibles pour avoir des couples simulés et expérimentaux similaires. Cela n'enlève rien au fait qu'il faudrait disposer des données industrielles identiques à celles utilisées sur le laminoir et de la loi rhéologique adaptée au laminage de brut de coulée.

Les résultats de ce travail valident le modèle numérique par éléments finis de la ligne complète de laminage LUNA. Le modèle ainsi présenté va permettre de comprendre les phénomènes thermomécaniques se produisant dans la barre au cours du laminage. Pour cela, les sollicitations (contraintes, pression hydrostatique, déformation plastique, vitesse de déformation...) subies dans la barre au cours du laminage peuvent maintenant être déterminées.

2.3 Sollicitations thermomécaniques subies dans la barre au cours du laminage

Les travaux présentés précédemment ont permis la mise en place d'un modèle numérique. La Figure 97 rappelle l'objectif initial qui est de suivre le chemin thermomécanique en chaque point de la barre laminée.

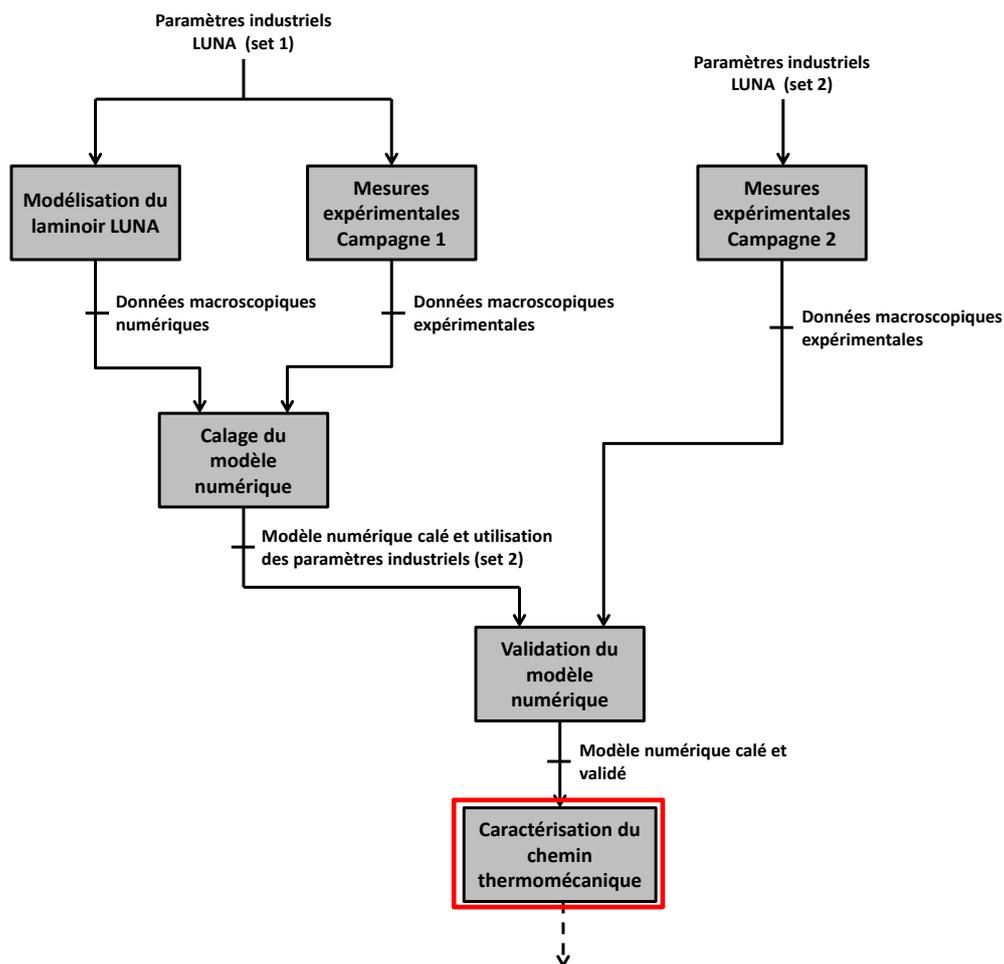


Figure 97 : Etape du suivi du chemin thermomécanique dans la barre laminée

La simulation via le modèle numérique calé permet d'avoir une image des sollicitations thermomécaniques subies dans la barre lors du laminage. Les sollicitations thermomécaniques subies dans les cages Kocks ne sont pas étudiées car elles sont négligeables comparées à celles subies dans les cages duo et ne semblent pas jouer un rôle prépondérant pour l'évolution des inclusions. Les sollicitations thermomécaniques présentées par la suite sont issues du modèle numérique calé sur la première campagne de mesures. Pour rappel la configuration du laminoir permet d'obtenir des produits finis de Ø38mm après la cage 13.

Une représentation d'un quart de la barre est nécessaire pour modéliser le procédé jusqu'à la cage 17. Comme le montre la Figure 98, sept points assimilés à des capteurs sont répartis dans le quart de section de la barre :

- le point 1 est situé au cœur de la barre
- les points 2, 4 et 6 sont localisés à mi rayon
- les points 3, 5 et 7 sont positionnés en peau

Les points 3 et 5 permettent de voir l'effet de l'alternance des directions de mise en forme.

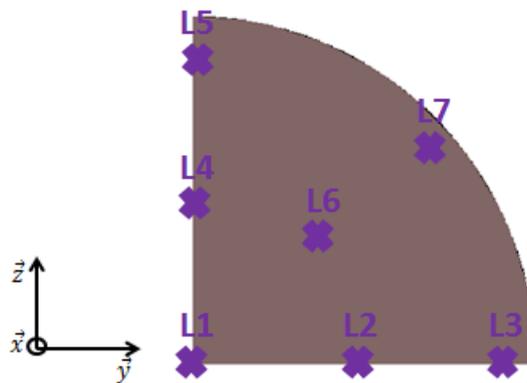


Figure 98 : Points répartis dans un quart de la section de la barre

L'outil de simulation développé avec le logiciel par éléments finis Forge.NxT© permet de suivre l'évolution de plusieurs données de sortie pour chaque point dans la barre. Ces données de sortie sont :

- la température
- les déformations longitudinales et transverses
- la déformation équivalente
- les critères d'endommagement (LATHAM & COCKROFT, OYANE...)
- la pression hydrostatique
- la vitesse de déformation

Toutes les données de sorties ne vont pas être analysées car la littérature a mis en évidence que certains paramètres sont plus influents que d'autres pour garantir une bonne

santé interne des produits laminés. Les paramètres les plus influents sont la température, les déformations principales, la pression hydrostatique et la vitesse de déformation [LUO01a], [WAN96].

2.3.1 Evolution de la température

Pour commencer, la température est analysée en suivant son évolution à travers les capteurs positionnés dans le quart de section de la barre. Deux capteurs et deux cages sont sélectionnés afin d'expliquer l'évolution de la température lors du laminage. La Figure 99 et la Figure 100 présentent l'évolution de la température relevée respectivement par les capteurs 1 et 3 pour les cages 4 et 5. Le capteur 1 est placé au cœur de la barre tandis que le capteur 3 se situe en périphérie.

Sur la Figure 99 l'évolution de la température relevée par le capteur 1 est représentée par la courbe bleue. Que ce soit pour la cage 4 ou la cage 5 la courbe se découpe en trois parties distinctes. En effet le capteur est placé initialement dans la barre et ne subit aucune déformation ①. Dans la cage précédente des échanges par conduction se sont produits entre la surface de la barre et les cylindres. Dans la phase ① une faible chute de température est à noter à cause des échanges par conduction entre le cœur et la peau de la barre. Dans la phase ② la barre est déformée entre les cylindres. L'énergie de plastification entraîne une augmentation de la température au cœur de la barre malgré le contact avec les cylindres de laminage qui entraîne un refroidissement en peau ②. En sortie de laminage la surface de la barre est de nouveau soumise à des échanges par rayonnement et par convection avec l'environnement. De plus la surface de la barre étant plus froide du fait de son contact récent avec les cylindres des échanges par conduction entre le cœur et la peau explique cette chute de température ③.

La zone repérée en rouge représente la chute de température correspondant au convoyage de la barre entre les deux cages. Une simulation de refroidissement permet de prendre en compte le temps mis par la barre pour aller d'une cage à l'autre. Les phénomènes rencontrés en ce point dans la barre laminée lors de son passage dans la cage 4 sont valables pour les autres cages.

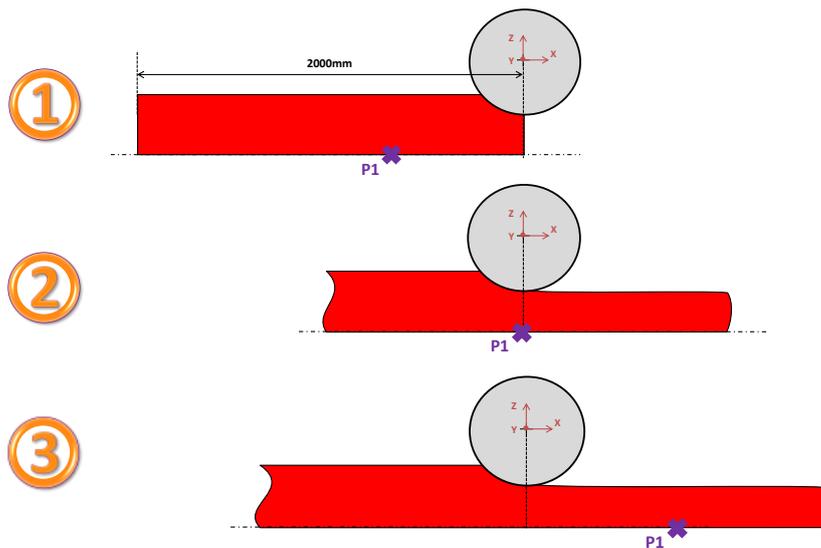
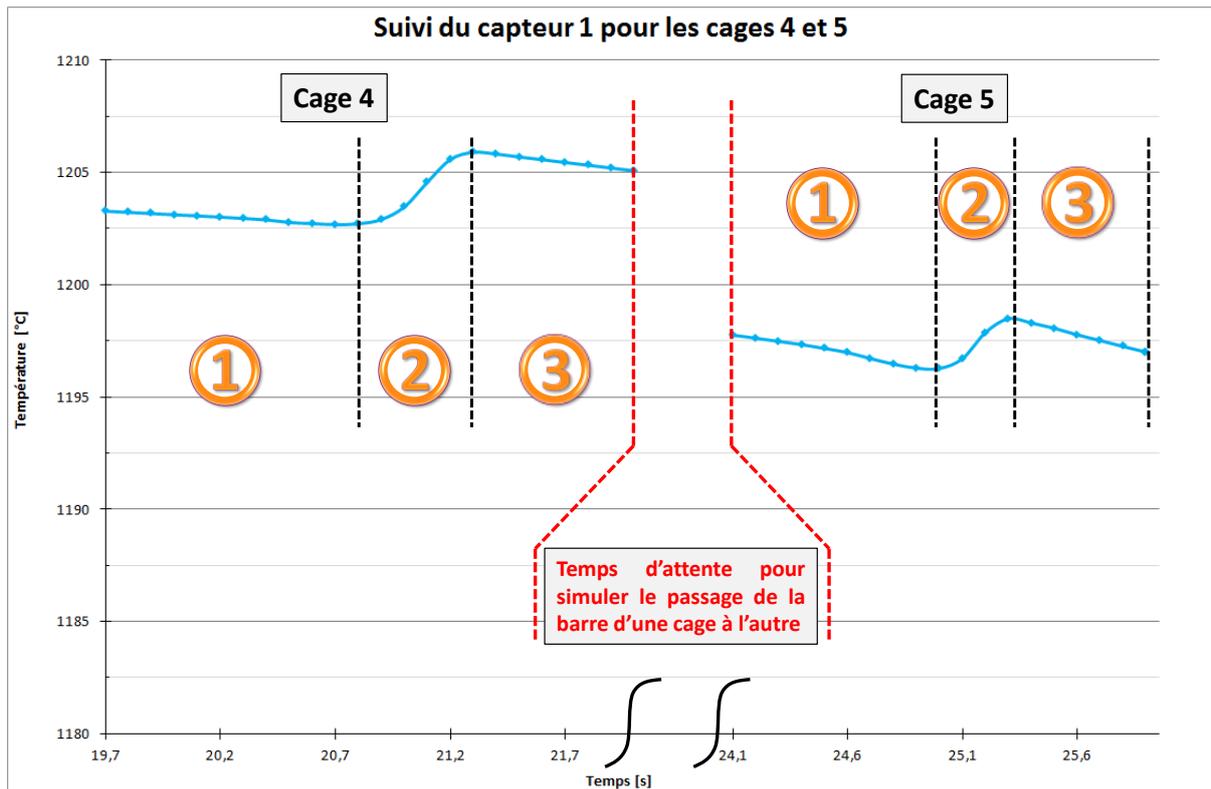


Figure 99 : Evolution de la température au cœur de la barre laminée pour les cages 4 et 5

La température relevée par le capteur 3 pour les cages 4 et 5 est représentée en vert sur la Figure 100. Les trois zones décrites précédemment sont également présentes dans le relevé de température de ce capteur. Contrairement au capteur 1, la température relevée par le capteur 3 tend à augmenter dans la phase ① car la peau est "réchauffée" par la chaleur venant du cœur de la barre. Lors du passage de la barre dans la cage 4 la température augmente légèrement due à l'énergie de la déformation plastique ②. Dans cette cage le capteur 3 ne se trouve pas à proximité des cylindres et donc il ne subit aucun échange par conduction.

Cependant lors du laminage dans la cage 5 la température diminue fortement ②. En effet, l'alternance des directions de mise en forme fait que le capteur 3 est proche de la zone de contact entre la barre et les cylindres ce qui entraîne une baisse de température due aux échanges par conduction. De par leur orientation les 3 et 5 rencontrent des phénomènes similaires alternés. En effet, à cause de l'alternance des directions de mise en forme les phénomènes rencontrés par le capteur 3 dans la cage n sont similaires à ceux rencontrés par le capteur 5 dans la cage n+1.

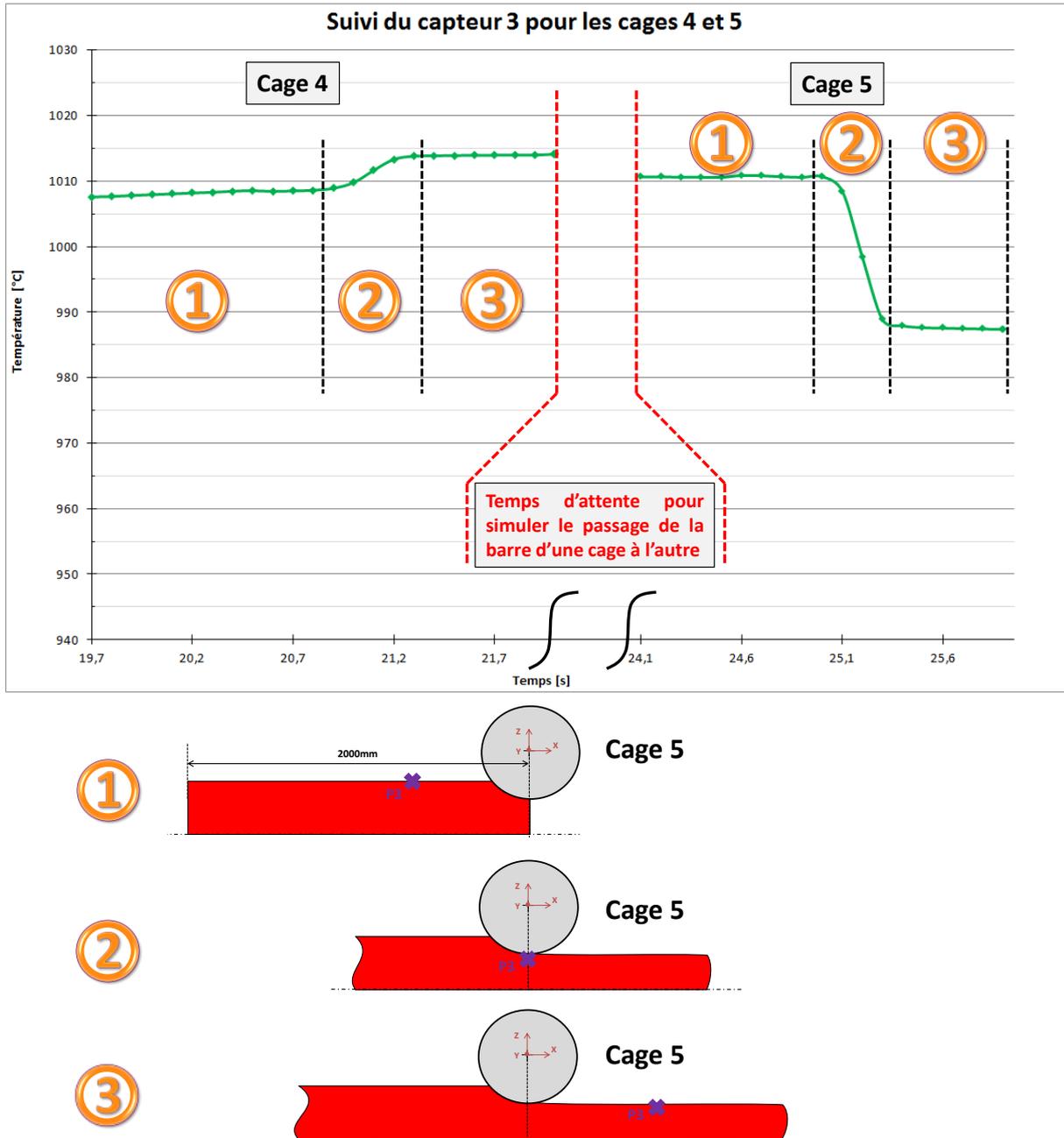


Figure 100 : Evolution de la température en peau de la barre laminée pour les cages 4 et 5

Les températures relevées par les capteurs 1 et 3 pour toutes les cages du laminoir sont présentées sur la Figure 101. Le suivi de la température par les capteurs 1 et 3 est représenté respectivement par les courbes de couleurs bleu et verte. A travers ce suivi, il est possible de visualiser une différence de température d'environ 200°C entre la peau et le cœur de la barre laminée à partir de la cage 4. Les paliers avec les chutes de température entourés en rouge représentent les temps inter-cages et inversement lorsque la barre est en prise entre les cylindres de laminage la température augmente à cause de l'énergie de la déformation plastique. Des échanges par conduction se produisent entre le cœur et la surface de la barre qui est refroidie au contact des cylindres. En effet le capteur 3 est soumis à de fortes variations de températures alternées une cage sur deux à cause de l'alternance des directions de mise en forme.

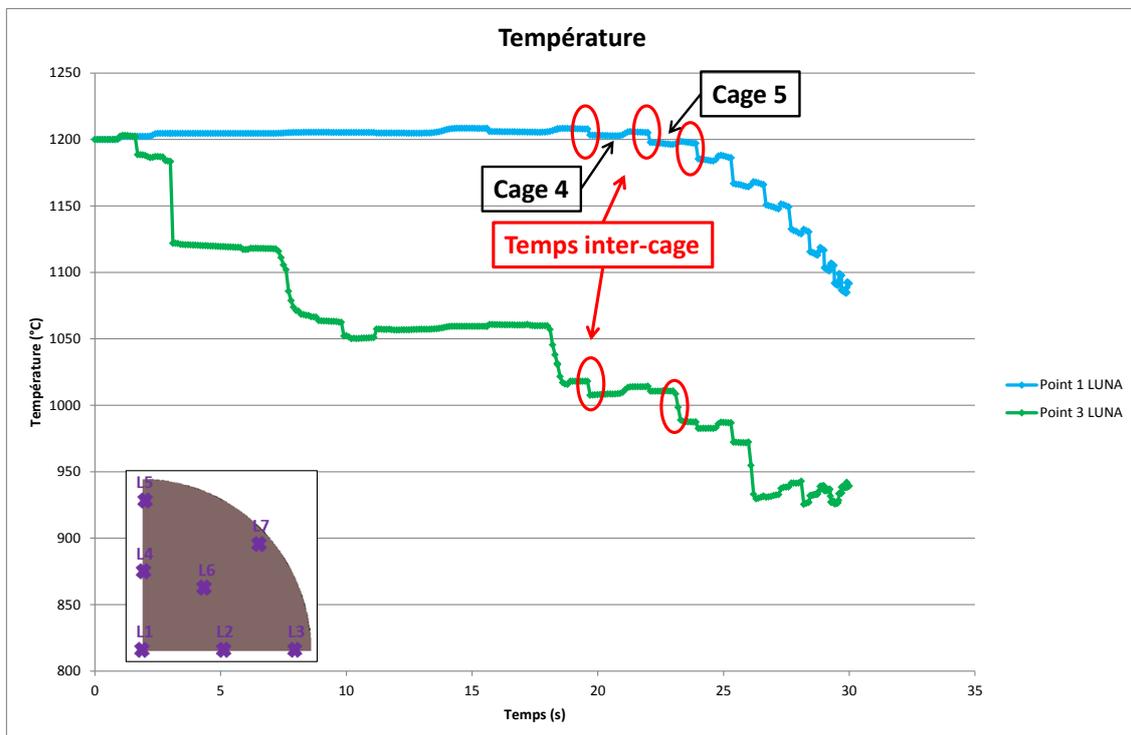


Figure 101 : Evolution de la température au cours du laminage relevée aux points 1 et 3

2.3.2 Evolution de la déformation

2.3.2.1 La déformation équivalente

Comme pour l'analyse de la température, les capteurs 1 et 3 sont sélectionnés pour comprendre les phénomènes se produisant lors du laminage dans les cages 4 et 5. L'évolution de la déformation équivalente est représentée par la courbe en bleue sur la Figure 102. Trois zones identiques à celles rencontrées lors de l'analyse de la température définissent le passage de la barre dans une cage de laminage. Dans la zone ①, la déformation de la barre correspond à celle subie dans la cage 3. La zone ② montre le chemin de déformation subi au cœur de la barre dans la cage 4. La barre arrive dans la cage 5 avec un état de déformation identique à

celui relevé à la sortie de la cage 4 ③. Lors du transfert d'une cage à l'autre la barre ne subit aucune déformation. La différence de déformation visible dans la zone de transfert vient de la stratégie de simulation retenue. Le modèle numérique étant découplé, le nœud sélectionné dans la simulation de la cage 5 est différent de celui retenu dans la simulation de la cage 4 à cause du remaillage et de l'étirement de la portion en régime établi de 300mm à 2m. Cependant les deux nœuds se trouvent dans une zone proche. A travers les trois étapes décrites, il est possible de suivre le chemin de la déformation équivalente subi dans la barre au cours du laminage.

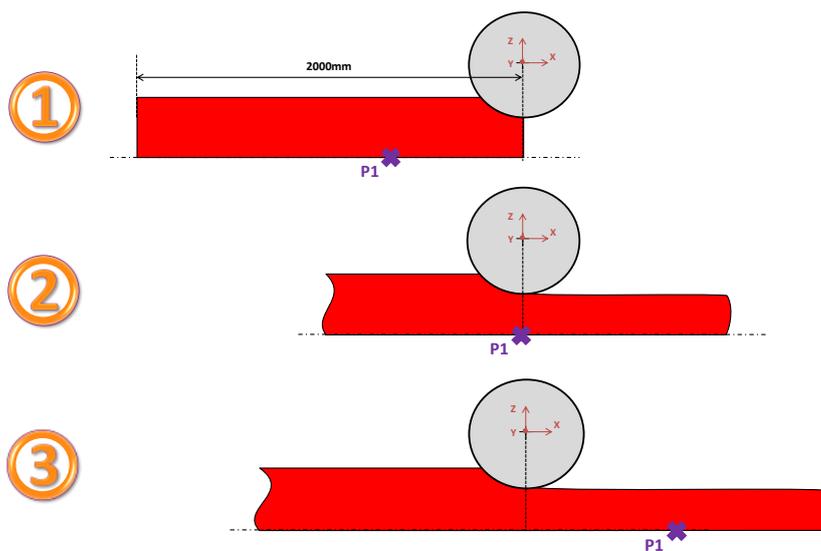
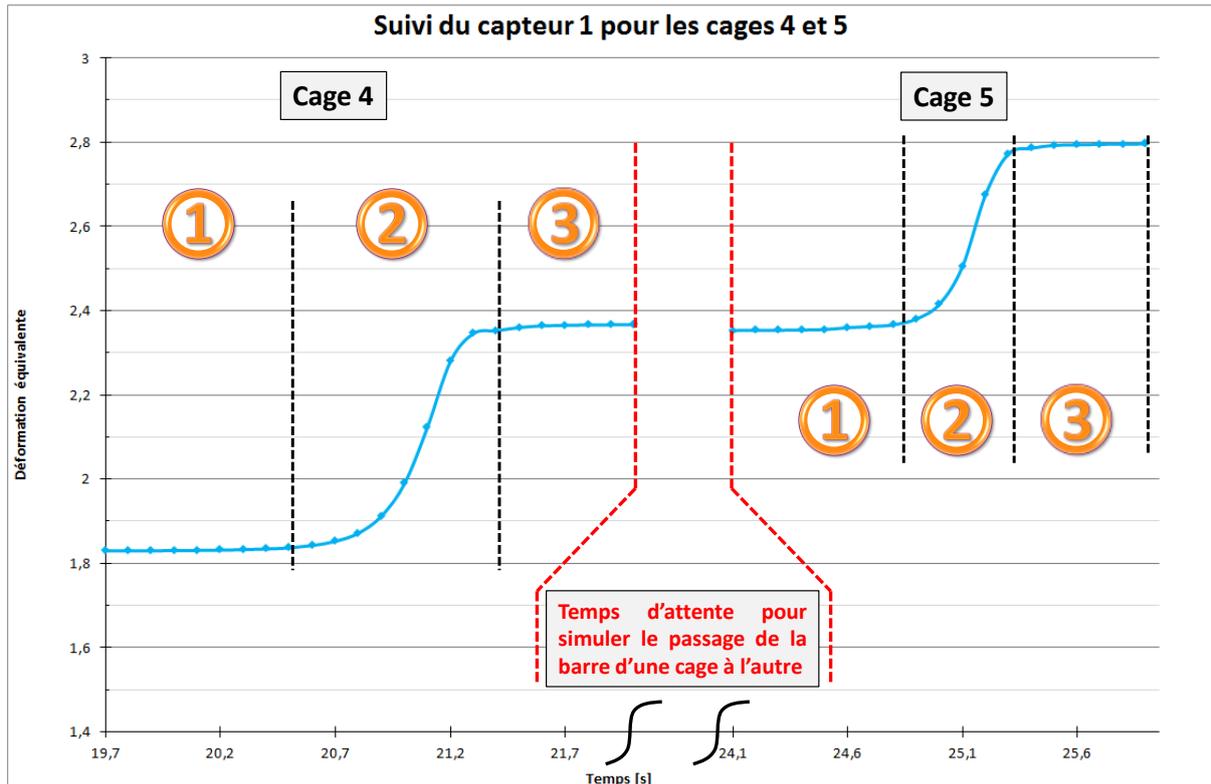


Figure 102 : Evolution de la déformation équivalente au cœur de la barre laminée pour les cages 4 et 5

La Figure 103 montre le chemin de la déformation équivalente relevée par le capteur 3. L'amplitude de déformation subie dans la barre pour les cages 4 et 5 est similaire mais ce n'est pas le cas pour le chemin de déformation. En effet, lors du laminage dans la cage 5 le capteur 3 se situe à proximité du cylindre de laminage ce qui explique le palier repéré en rouge présent dans la zone ②. La comparaison de la déformation équivalente relevée par les capteurs 1 et 3 montre qu'au centre de la barre la déformation est plus élevée d'environ 12% qu'en périphérie.

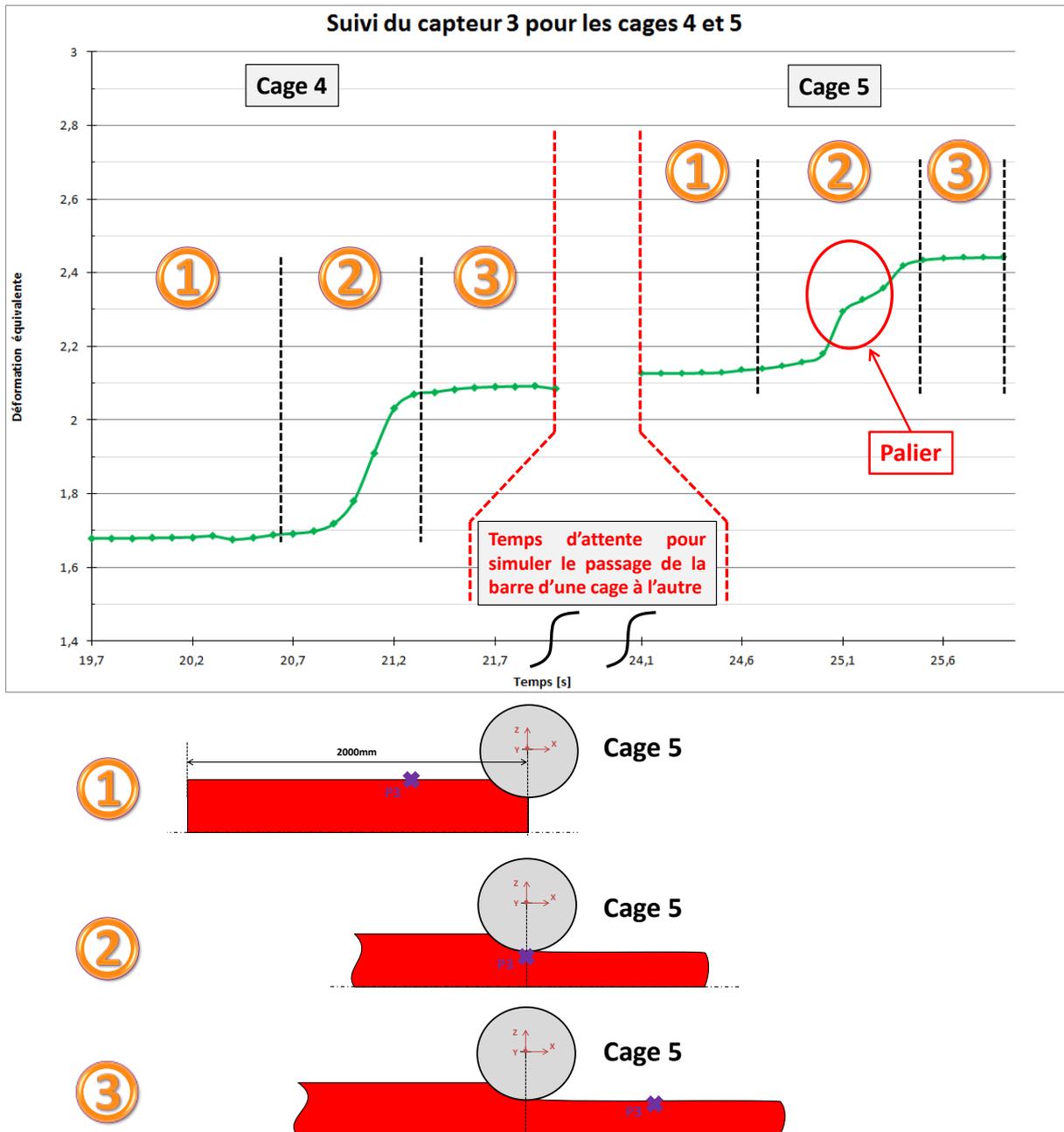


Figure 103 : Evolution de la déformation équivalente en peau de la barre laminée pour les cages 4 et 5

La Figure 104 permet de voir l'évolution de la déformation équivalente relevée par les sept capteurs au cours du laminage. En fin de laminage un écart de l'ordre de 3% est notable pour la déformation équivalente entre le cœur et la peau de la barre. Quelle que soit la position des points dans le quart de section de la barre, le niveau de déformation varie peu, malgré une différence de température d'environ 200°C entre le cœur et la peau du produit laminé.

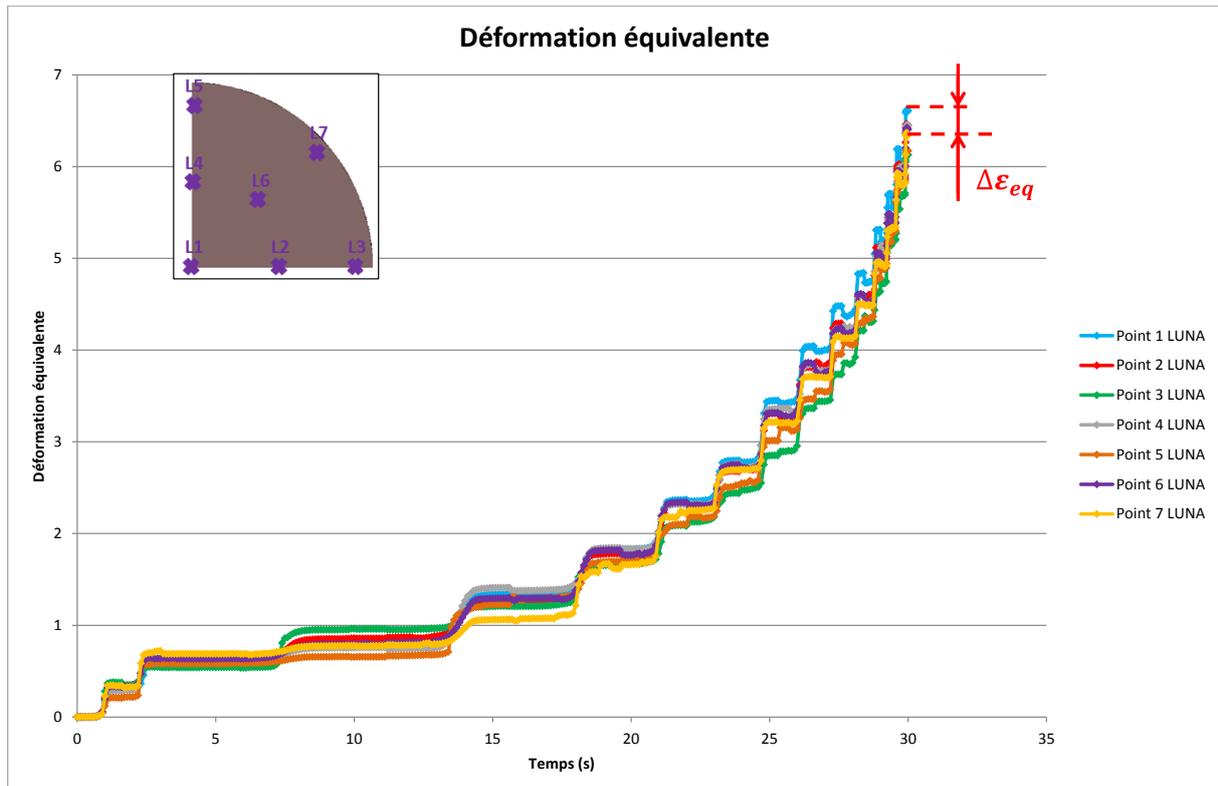


Figure 104 : Evolution de la déformation équivalente au cours du laminage relevée aux points 1 et 3

2.3.2.2 La déformation suivant la direction de laminage

L'évolution de la déformation longitudinale est tracée sur la Figure 105. De même que pour la déformation équivalente, la déformation suivant la direction de laminage évolue de la même manière qu'on se trouve en peau ou à cœur de la barre laminée. Ce qui veut dire que la barre s'allonge de façon homogène, bien qu'elle soit affectée par les effets de bord. Toutefois, en fin de laminage l'écart de la déformation longitudinale relevé entre le centre et la peau de la barre laminée équivaldrait à une variation de longueur de 1,8m. La stratégie de simulation employée ne permet pas de visualiser la différence de déformation en bout de barre car un tronçon en régime établi est prélevé après chaque passe de laminage. Le phénomène décrit en simulation est également présent sur les barres mise en forme industriellement. Cependant des cisailles volantes sont installées sur la ligne de production afin d'ébouter les barres et obtenir un produit sans défaut aux extrémités favorable à son engagement entre les cylindres.

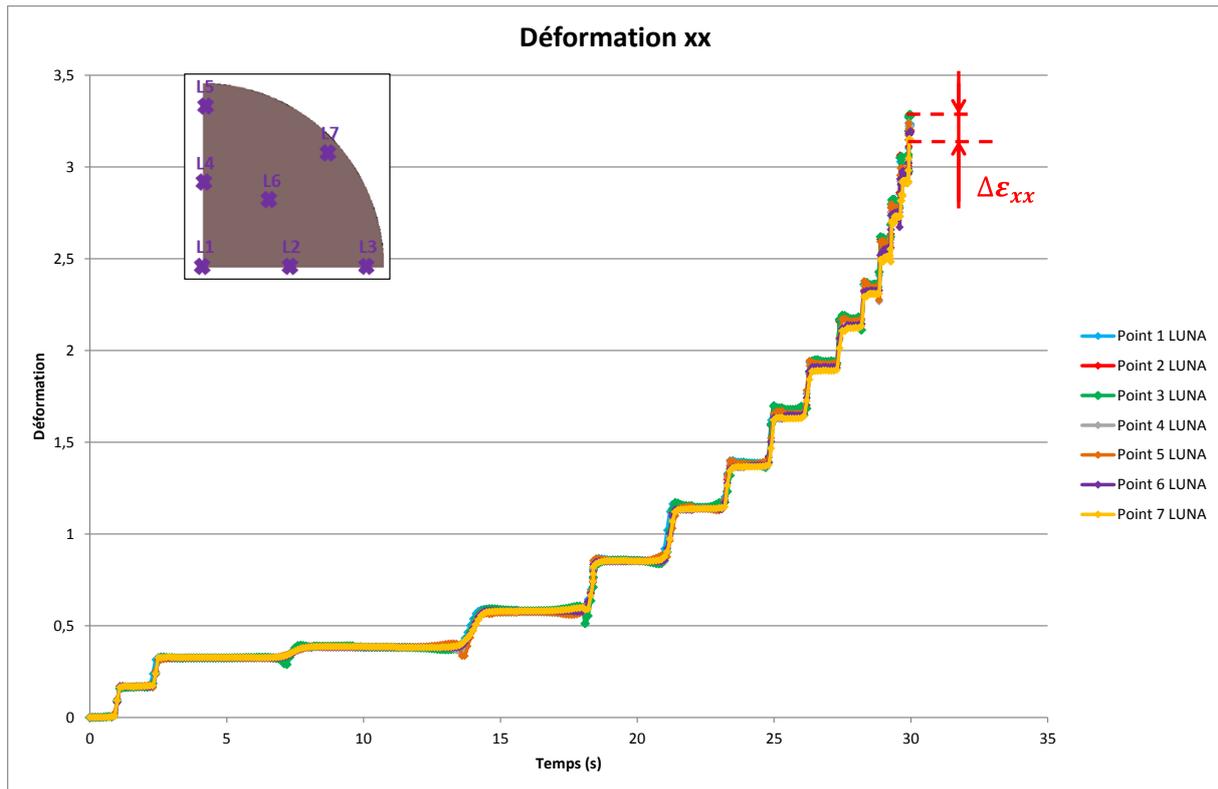


Figure 105 : Evolution de la déformation longitudinale au cours du laminage relevée aux points 1 et 3

2.3.2.3 Les amplitudes de déformations longitudinales

La déformation subie dans la barre laminée fait partie des paramètres influant sur le comportement des inclusions et des porosités. Le choix de suivre les amplitudes de déformation principale permet une comparaison future avec les amplitudes de déformations rencontrées dans l'essai de caractérisation qui sera mis en place.

La Figure 106 montre le chemin et l'amplitude de déformation longitudinale subie au cœur de la barre laminée dans la cage OA. Les amplitudes des déformations subies par chaque point ont été tracées pour toutes les cages de laminage. La méthode présentée est valable pour le suivi des déformations transverses suivant les directions Y et Z. Afin de ne pas rentrer dans un côté répétitif dans la présentation des résultats, nous allons seulement nous intéresser à trois points (Point 1, 2 et 3).

Les Figure 107, Figure 108, Figure 109 montrent les amplitudes de la déformation subie dans la barre pour chaque cage de laminage suivant la direction de laminage. Pour tous les points analysés les niveaux de déformation sont proches.

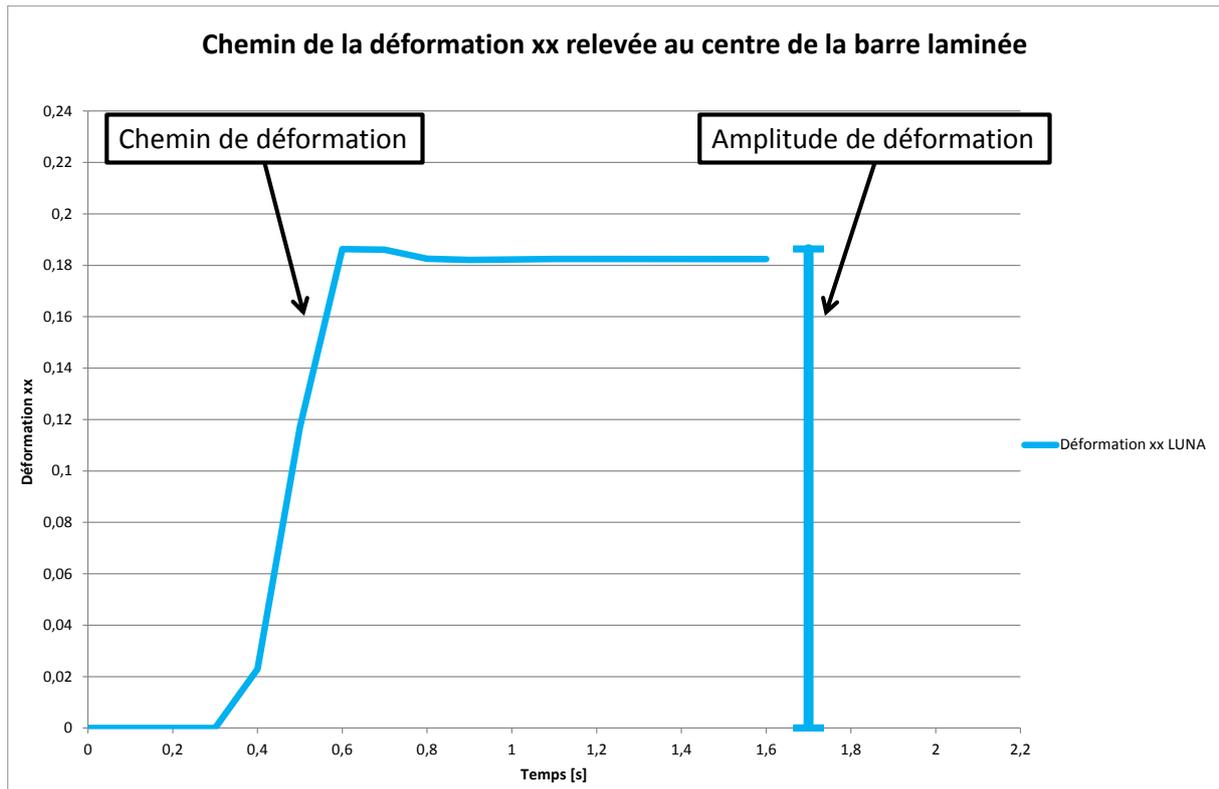


Figure 106 : Amplitude de déformation longitudinale relevée au cœur de la barre laminée lors du passage dans la cage OA

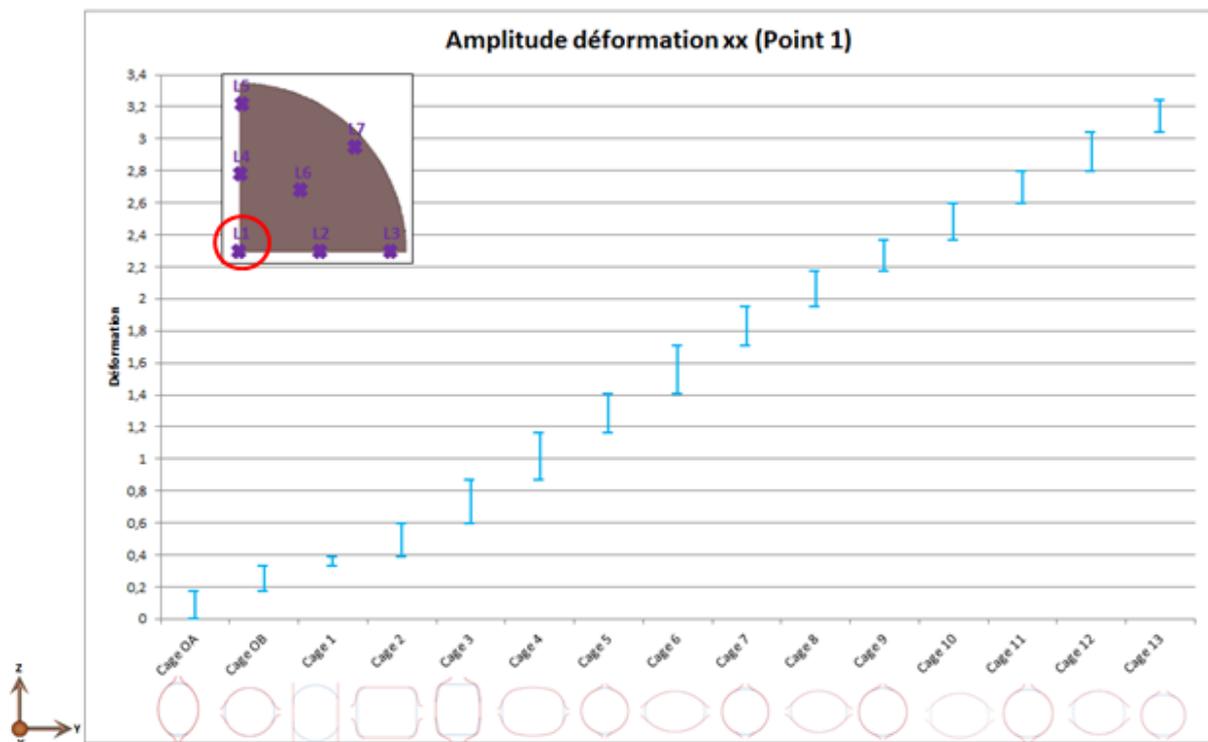


Figure 107 : Amplitude des déformations dans la direction de laminage relevées au point 1

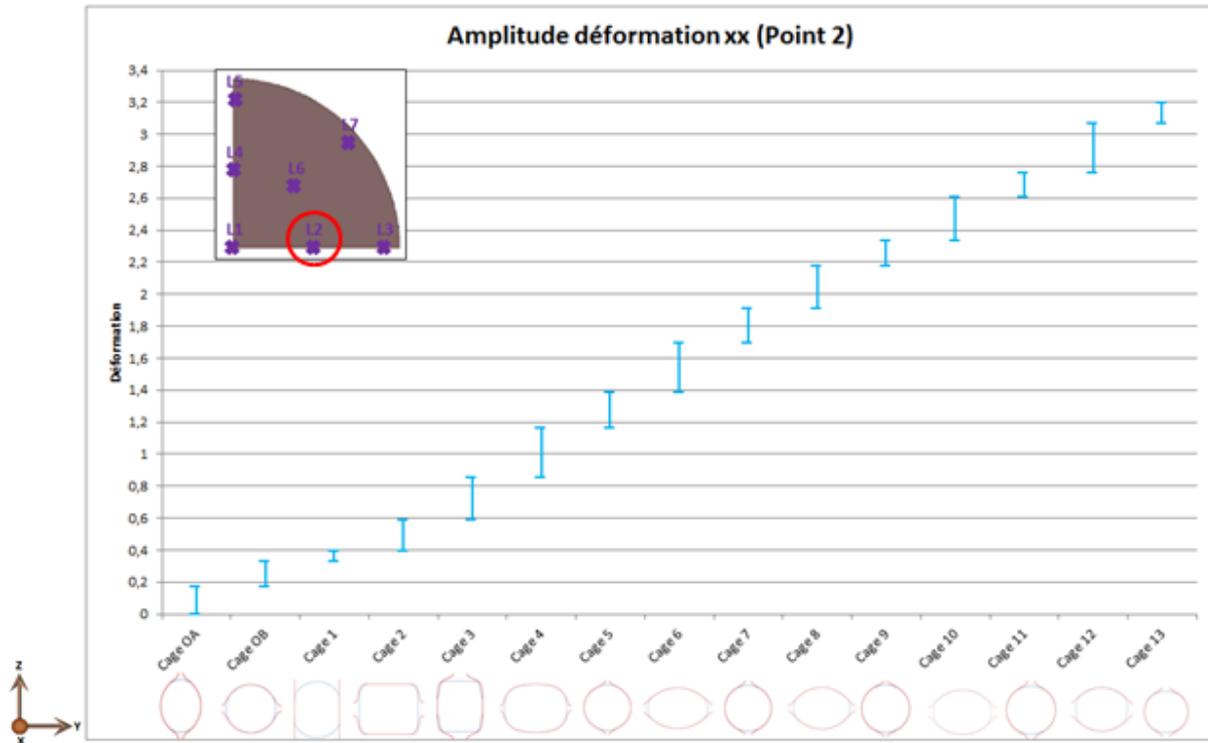


Figure 108 : Amplitude des déformations dans la direction de laminage relevées au point 2

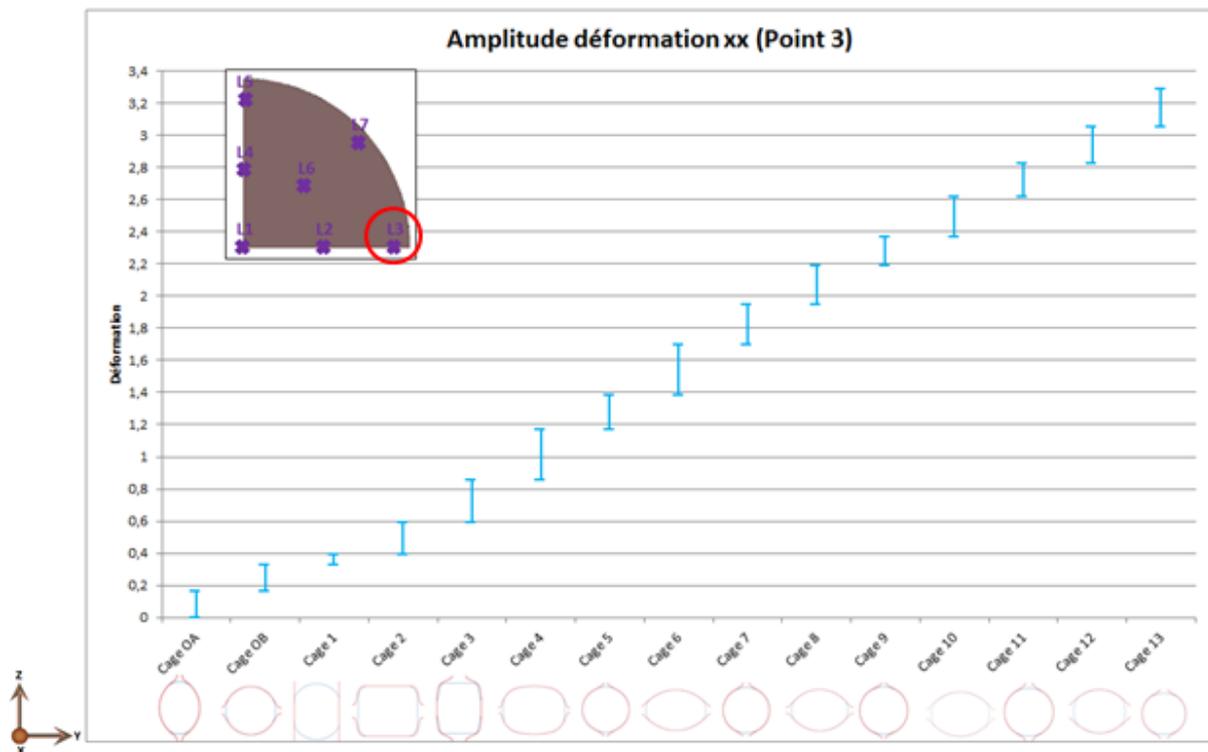


Figure 109 : Amplitude des déformations dans la direction de laminage relevées au point 3

2.3.2.4 Les amplitudes des déformations transverses

Dans le procédé de laminage de bloom, on retrouve une alternance des déformations transverses due à l'alternance (horizontal – vertical) de l'axe de rotation des cylindres. On retrouve également une alternance dans la gravure des cylindres avec une forme ovale – rond. Dans les figures présentées ci-dessous, on retrouve en rouge la déformation subie par la barre dans chaque cage suivant Y et en vert la déformation suivant Z.

Avant d'analyser les résultats, nous allons comprendre comment se lisent les graphiques suivants. Prenons l'exemple de la Figure 110, on voit que pour la cage OA la déformation engendrée par les cylindres se trouvent suivant la direction Y, d'où une déformation avec une valeur négative en rouge car la barre est sollicitée en compression. Tandis que dans la direction Z, la barre s'élargie et on retrouve une déformation avec une valeur qui croît. Lorsque la barre est laminée dans la cage OB, la direction principale de la déformation se trouve suivant Z (en vert). En repartant de la déformation subie dans la cage précédente, la barre subie de la compression. Dans la direction Y, la barre s'élargit d'où une valeur de la déformation qui augmente (en rouge). La lecture des graphiques est identique pour les cages suivantes. La méthode pour la lecture des futurs graphiques est présentée en Annexe 3.

Les Figure 110, Figure 111 et Figure 112 montrent les déformations subies par la barre pour les points 1, 2 et 3. En analysant les déformations transverses, il est possible de voir qu'à partir de la cage 3 la déformation engendrée au cœur du lopin est plus grande. L'explication peut venir de la transition de la géométrie des cylindres après la cage 3. En effet les cylindres des cages 1, 2 et 3 alternent des géométries de forme carrées tandis qu'à partir de la cage 4 les cylindres alternent une géométrie ovale-rond. Pour les points situés à cœur et à mi rayon, l'alternance des déformations se fait moins ressentir que pour les points situés en périphérie de la barre. En effet, pour le point 3 l'alternance des déformations est plus prononcée, ce qui veut dire qu'on déforme seulement dans la direction principale et très peu dans la seconde direction transverse. Les cercles repérés en noir sur la Figure 112 illustre ce phénomène d'alternance.

En réalité la géométrie de la barre après la cage OB est ronde avec un diamètre de 235mm. A travers les graphiques suivants il est possible de le vérifier car les courbes de déformations suivant Y et Z se rejoignent en un même point, ce qui veut dire qu'on a autant déformé dans les deux directions ($\epsilon_{yy} = \epsilon_{zz}$).

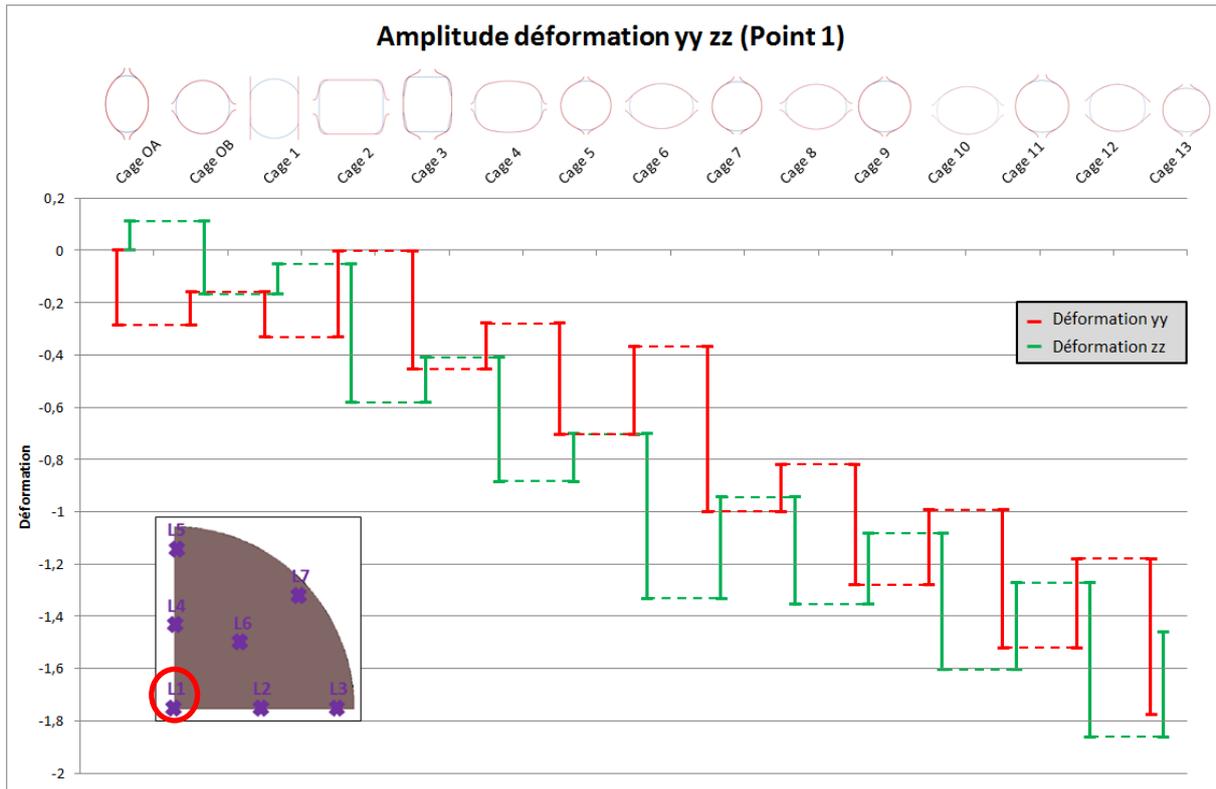


Figure 110 : Amplitude des déformations dans les directions transverse de laminage relevées au point 1

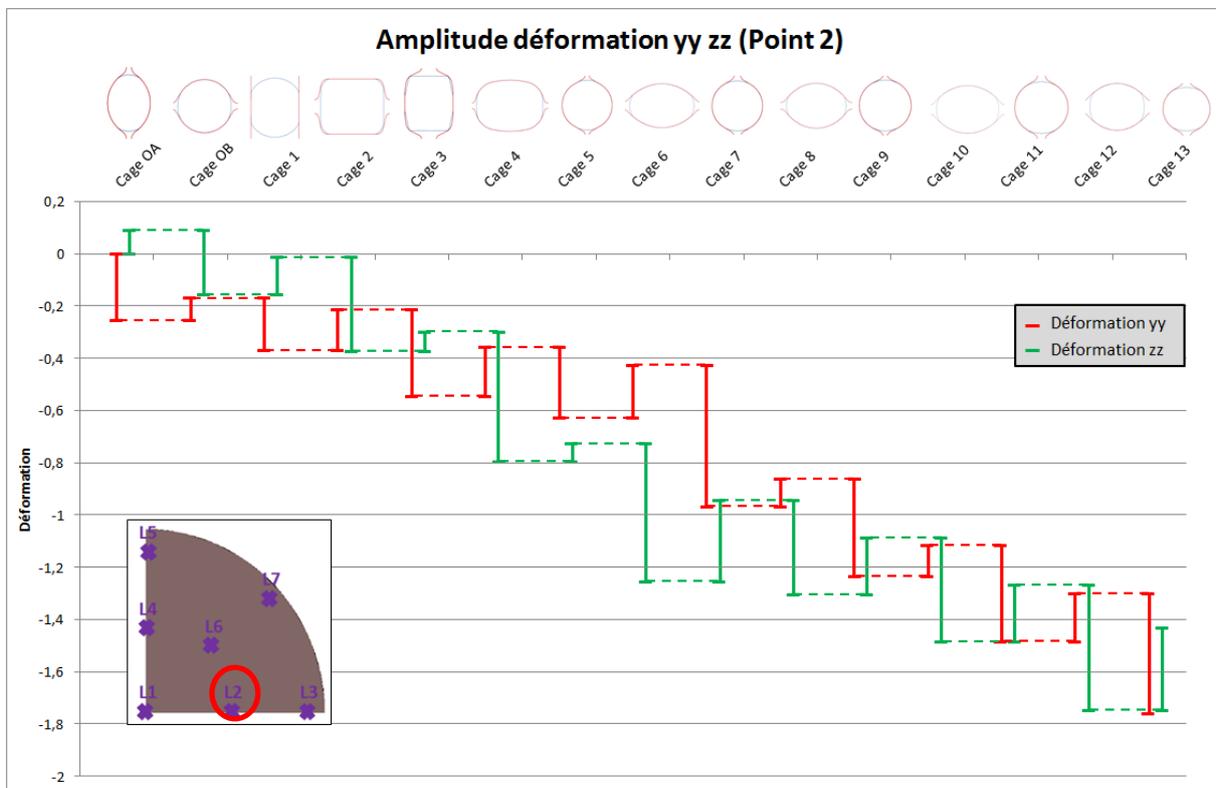


Figure 111 : Amplitude des déformations dans les directions transverse de laminage relevées au point 2

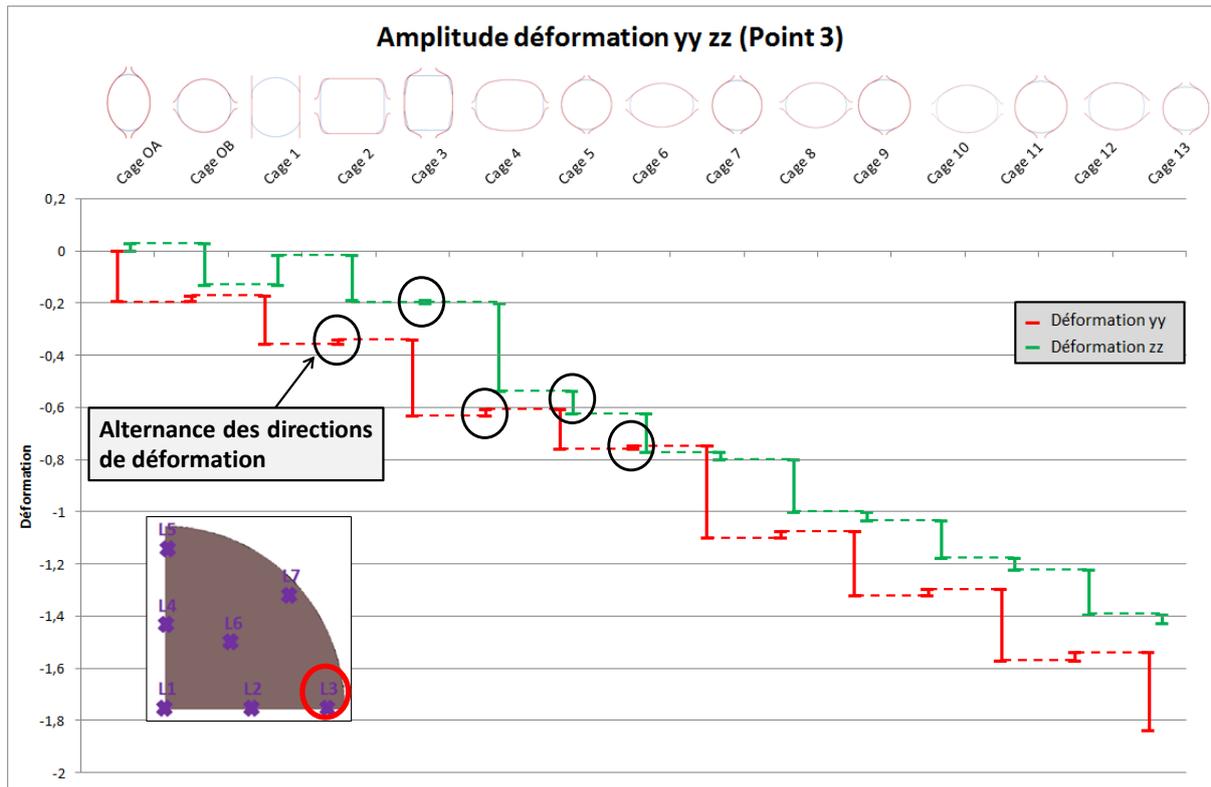


Figure 112 : Amplitude des déformations dans les directions transverse de laminage relevées au point 3

2.3.3 Evolution de la pression hydrostatique

La pression hydrostatique est un des paramètres influents sur le comportement des défauts internes dans les produits laminés. La Figure 113 montre le chemin de la pression hydrostatique subie au cœur de la barre lors du passage dans les cages 4 et 5. La phase ② correspond au passage de la barre entre les cylindres. Lors de cette phase un palier est visible pour les deux cages et un pic de la pression hydrostatique est atteint. La pression relevée est positive ce qui veut dire que le cœur de la barre est soumis à de la compression quelle que soit l'orientation de la direction de mise forme. Le niveau de la pression hydrostatique entre les deux cages est similaire.

La Figure 114 montre l'évolution de la pression hydrostatique relevée au point 3 lors du passage de la barre dans les cages 4 et 5. Contrairement au point 1, la pression relevée au point 3 est impactée par l'alternance de la direction de mise en forme. Lors du passage dans la cage 4 le point 3 ne se trouve pas à proximité de la zone en contact avec les cylindres et le niveau de la pression est faible. Tandis que dans la cage 5 le point 3 est proche de la zone laminée et la pression hydrostatique est positive ce qui signifie que la zone est soumise à de la compression. Par comparaison avec le point 1, lorsque le point 3 se trouve dans la zone proche des cylindres comme dans la cage 5, la pression hydrostatique relevée en peau est plus élevée qu'au cœur de la barre.

Pour la suite de notre étude le chemin de la pression hydrostatique n'est pas pris en

compte, seules les amplitudes sont analysées afin de pouvoir les comparer à celles subies dans le lopin lors de l'essai de caractérisation. Cependant la pression hydrostatique ne fera pas partie des critères de dimensionnement de l'essai, tout comme la vitesse de déformation.

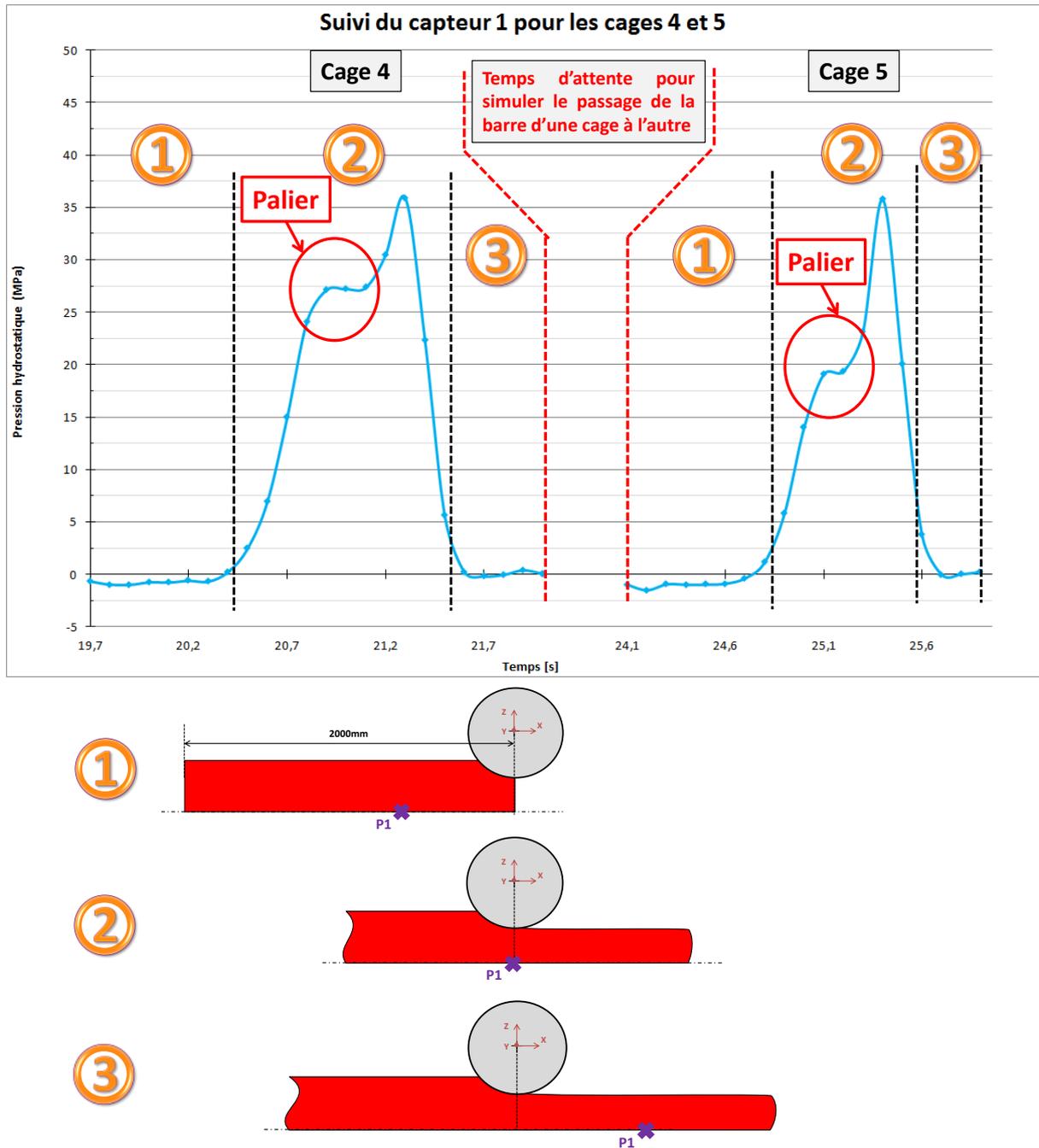


Figure 113 : Evolution de la pression hydrostatique au cœur de la barre laminée pour les cages 4 et 5

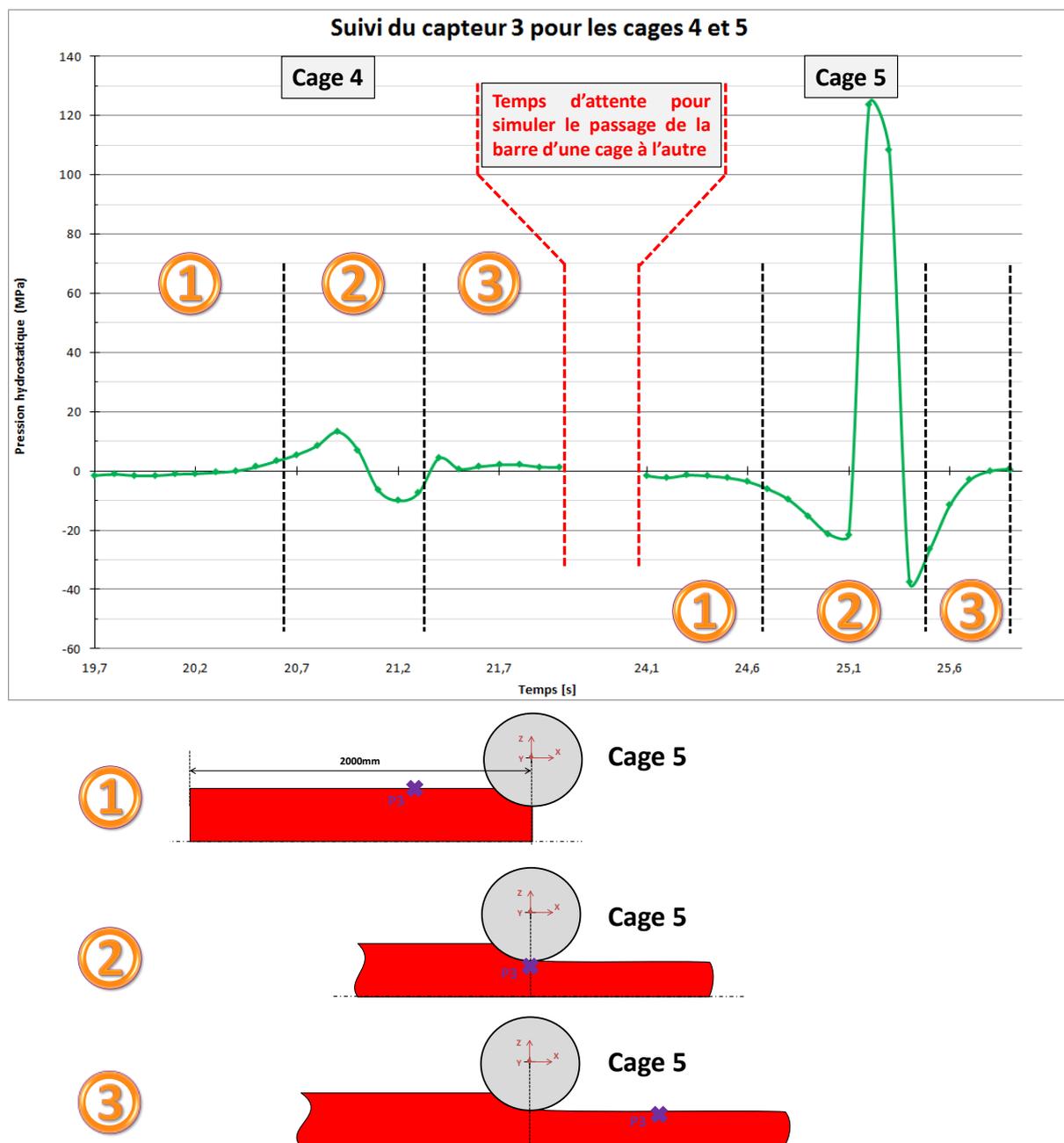


Figure 114 : Evolution de la pression hydrostatique en peau de la barre laminée pour les cages 4 et 5

Les Figure 115, Figure 116 et Figure 117 montrent les amplitudes de la pression hydrostatique pour toutes les cages du laminoir relevées respectivement par les capteurs 1, 2 et 3. La pression hydrostatique relevée par les capteurs placés au cœur et à mi rayon de la barre est positive ce qui veut dire que ces zones sont soumises à de la compression. Pour les deux zones considérées les niveaux de pression hydrostatique sont similaires. Cela n'est pas le cas pour la zone située en peau car il y a une alternance du niveau de la pression hydrostatique à cause de l'alternance des directions de mise en forme. Les constats pour les points analysés sont identiques quelle que soit la cage considérée. Il est notable que la pression augmente au

fur et à mesure du laminage, ce qui peut être lié au refroidissement de la barre.

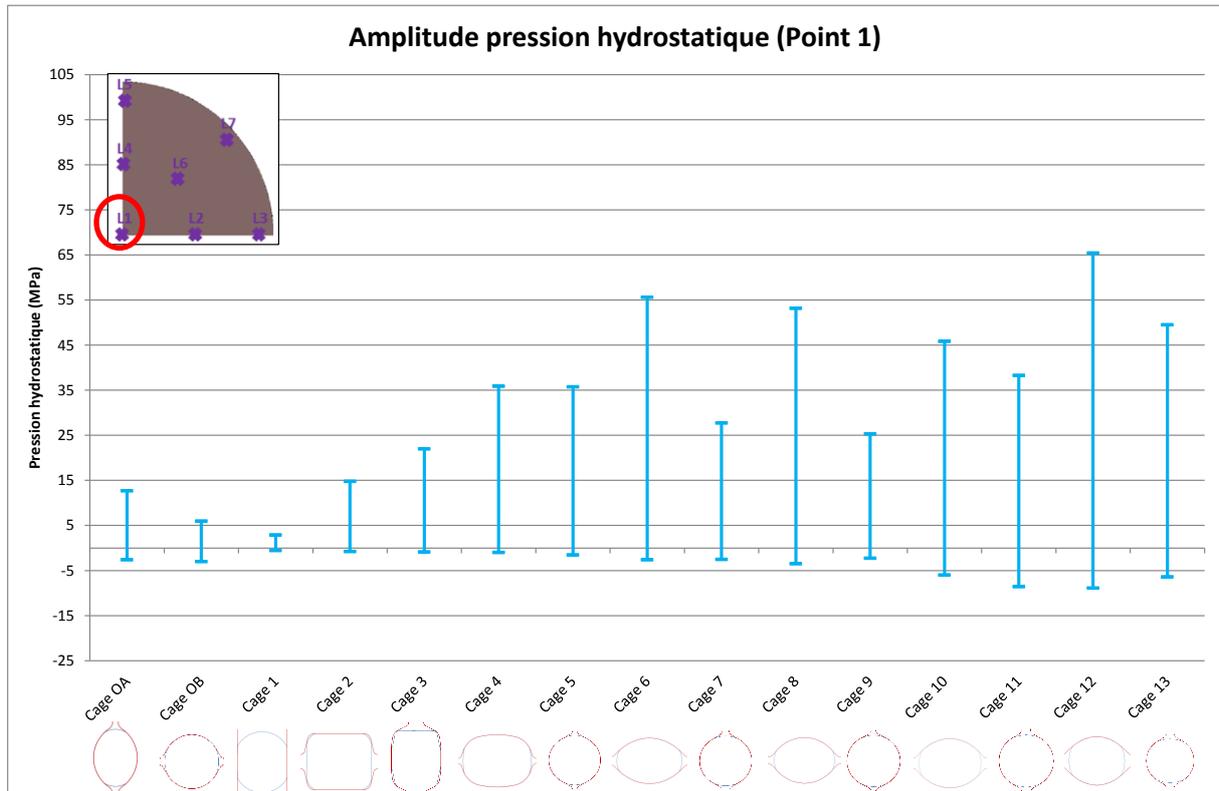


Figure 115 : Amplitude des pressions hydrostatiques relevées au point 1

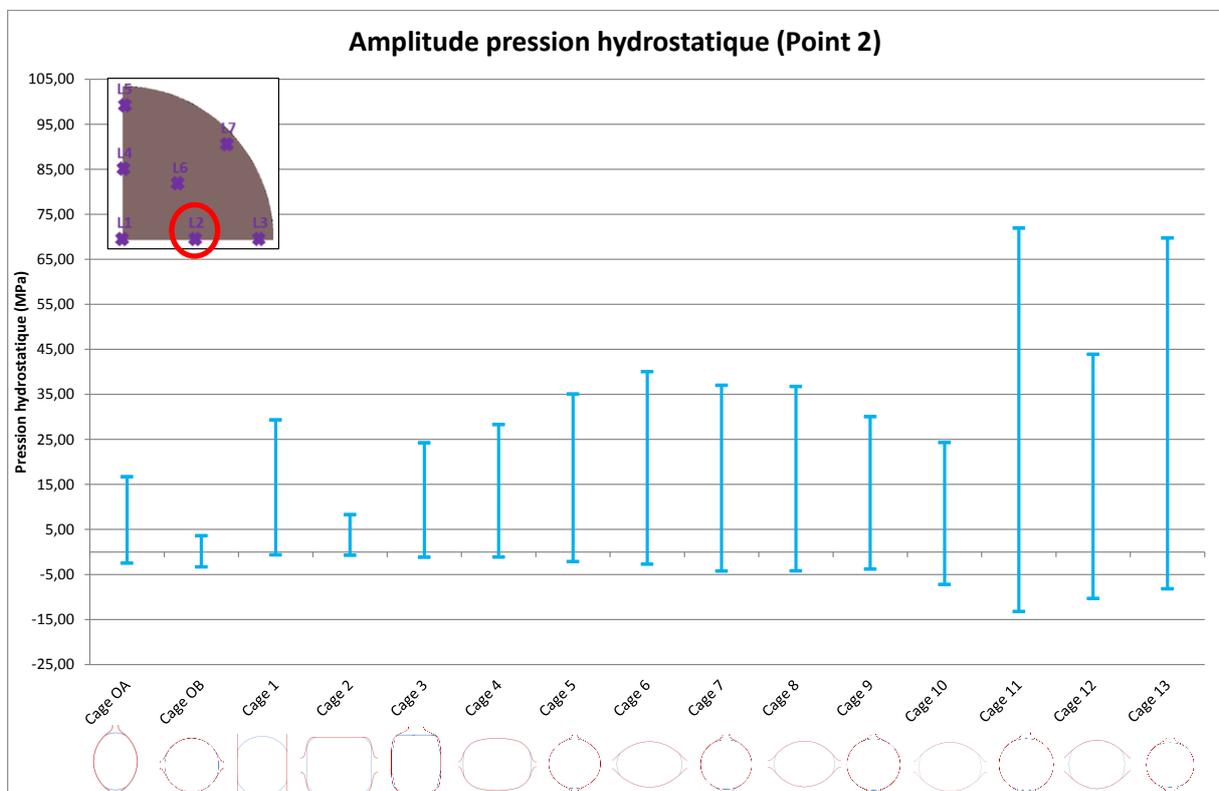


Figure 116 : Amplitude des pressions hydrostatiques relevées au point 2

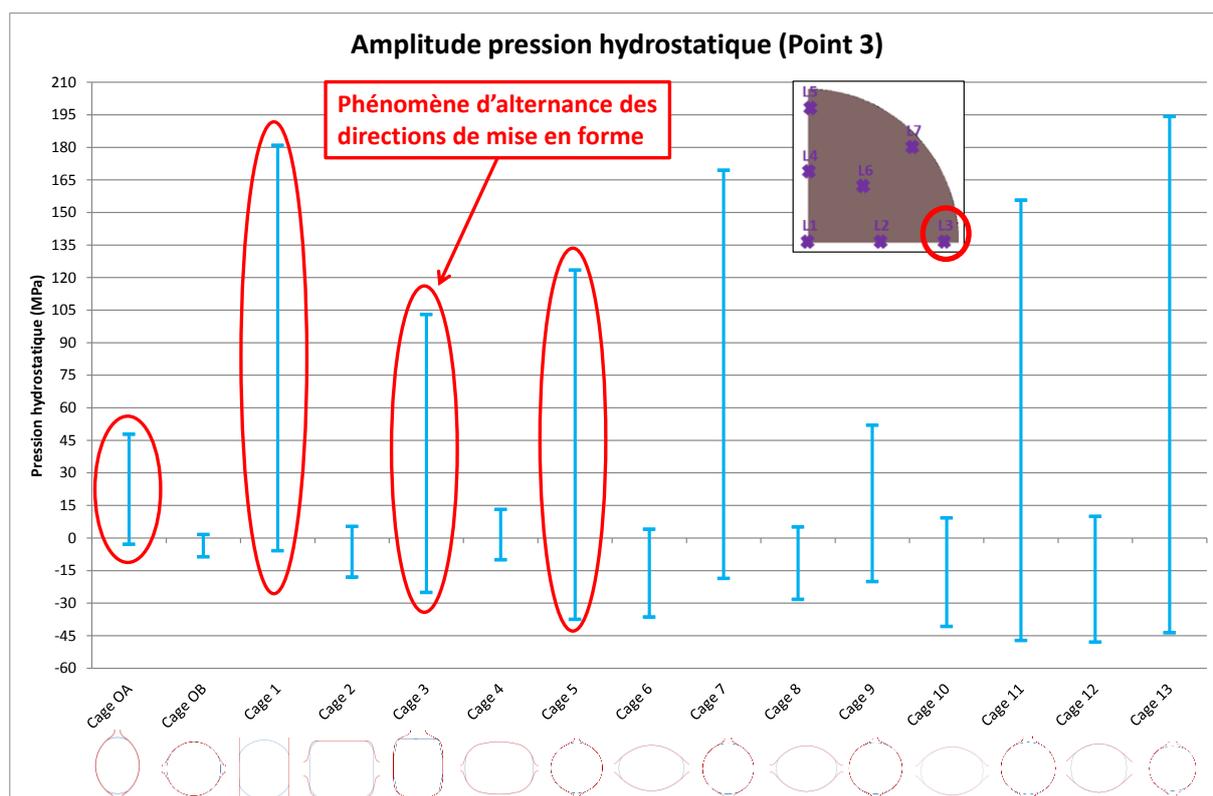


Figure 117 : Amplitude des pressions hydrostatiques relevées au point 3

2.3.4 Evolution de la vitesse de déformation

La vitesse de déformation est analysée car elle fait partie des paramètres influant sur le comportement des inclusions et des porosités. La Figure 118 montre l'évolution de la vitesse de déformation relevée au point 1 lors du laminage dans les cages 4 et 5. La vitesse de déformation maximale est atteinte lorsque le capteur se trouve entre les cylindres de laminage. Le niveau de la vitesse de déformation dans la barre pour les deux cages étudiées est similaire. Comme pour la pression hydrostatique, la vitesse de déformation au cœur de la barre n'est pas influencée de façon significative par l'alternance de la direction de la mise en forme ni par la géométrie des cylindres.

La Figure 119 montre l'évolution de la vitesse de déformation au point 3 lors du passage de la barre dans les cages 4 et 5. Le phénomène de l'alternance des directions de mise en forme se fait ressentir pour les vitesses de déformation relevées au point 3. Dans la cage 5 le point 3 est situé proche des cylindres de laminage et la vitesse de déformation relevée est plus élevée que celle enregistrée à la cage 4.

Pour les mêmes raisons qui sont évoquées précédemment seules les amplitudes des vitesses de déformation sont analysées.

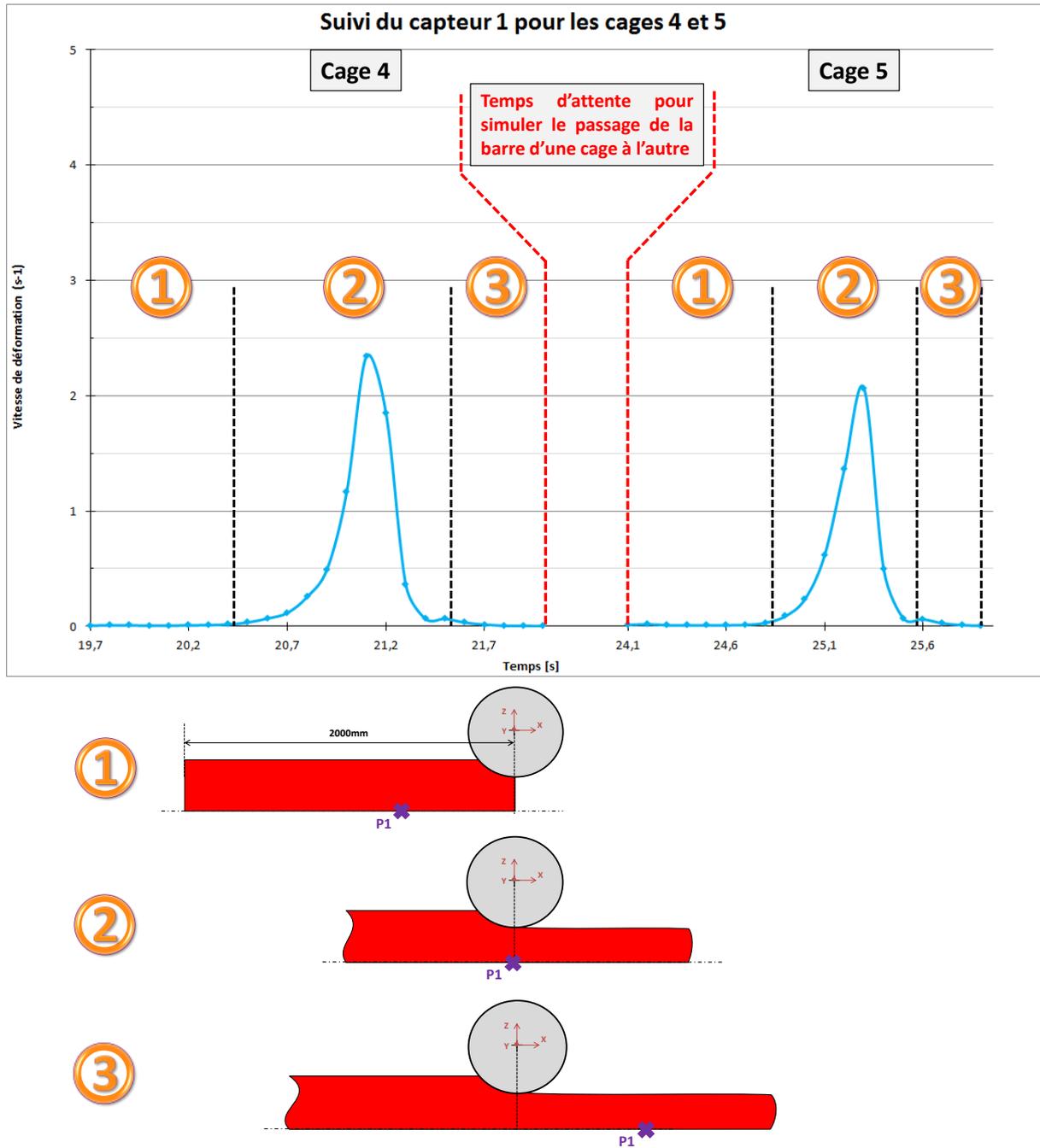


Figure 118 : Evolution de la vitesse de déformation au cœur de la barre laminée pour les cages 4 et 5

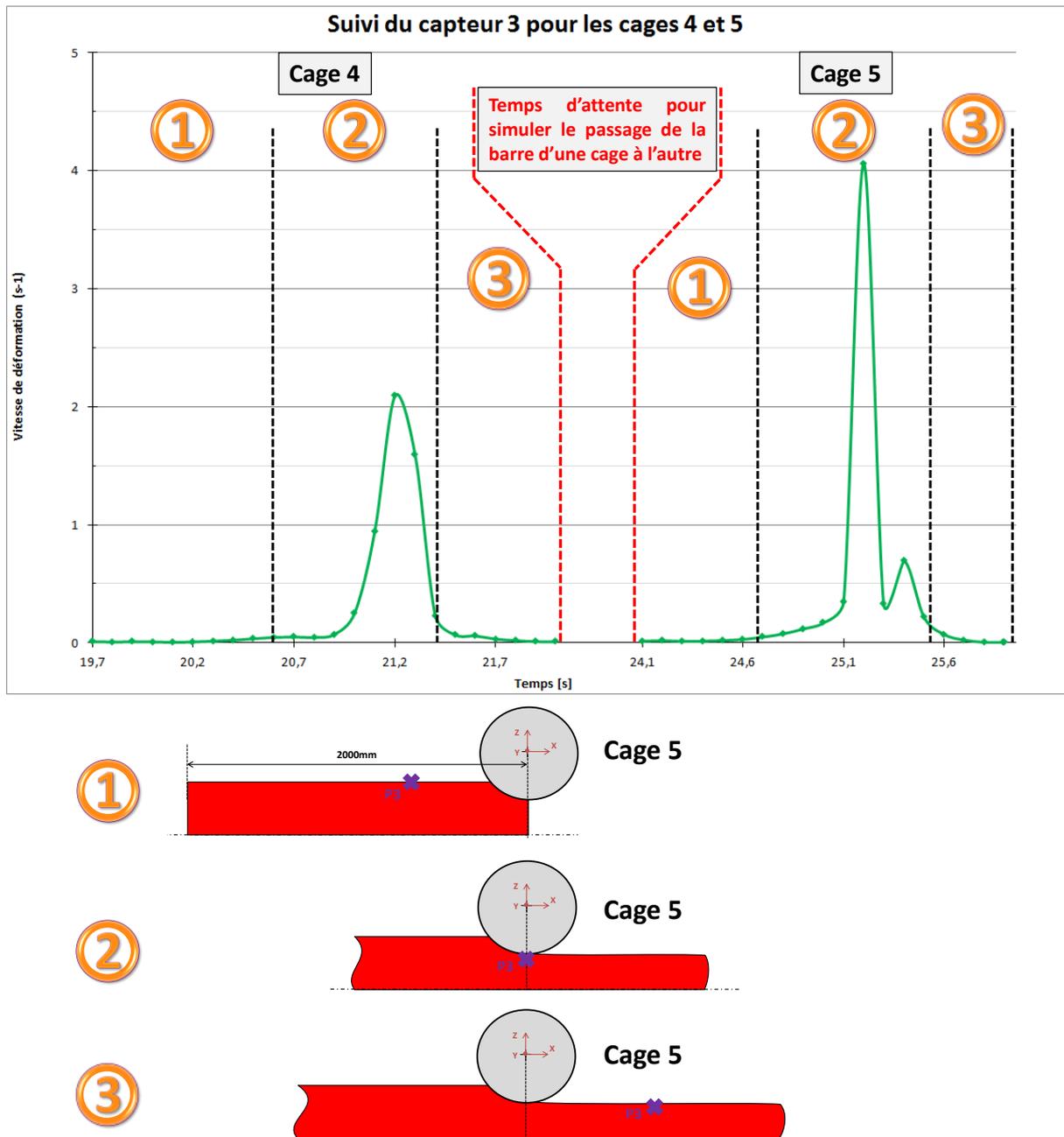


Figure 119 : Evolution de la vitesse de déformation en peau de la barre laminée pour les cages 4 et 5

Les amplitudes des vitesses de déformation relevées aux points 1, 2 et 3 lors du passage de la barre dans toutes les cages du laminoir sont présentées sur les Figure 120, Figure 121 et Figure 122. Pour les points 1 et 2 qui sont respectivement placés au cœur et à mi rayon de la barre les niveaux des vitesses de déformation sont similaires. Ces dernières gardent une valeur inférieure à $5s^{-1}$ jusqu'à la cage 9 et ne cesse d'augmenter par la suite pour atteindre une valeur maximale de $40s^{-1}$ à la cage 13. Contrairement aux points 1 et 2, les vitesses de déformation relevées au point 3 sont inférieures et un phénomène d'alternance repéré en rouge sur le graphique est notable notamment à partir de la cage 1.

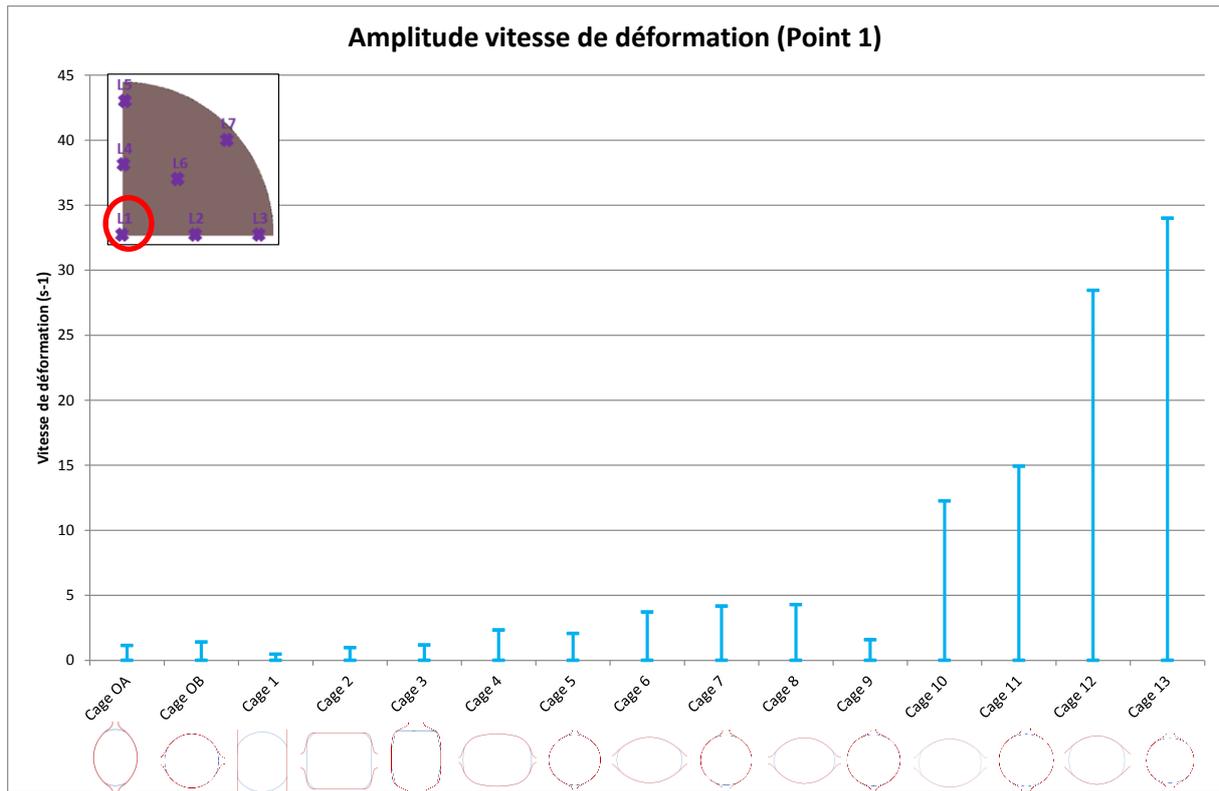


Figure 120 : Amplitude des vitesses de déformation relevées au point 1

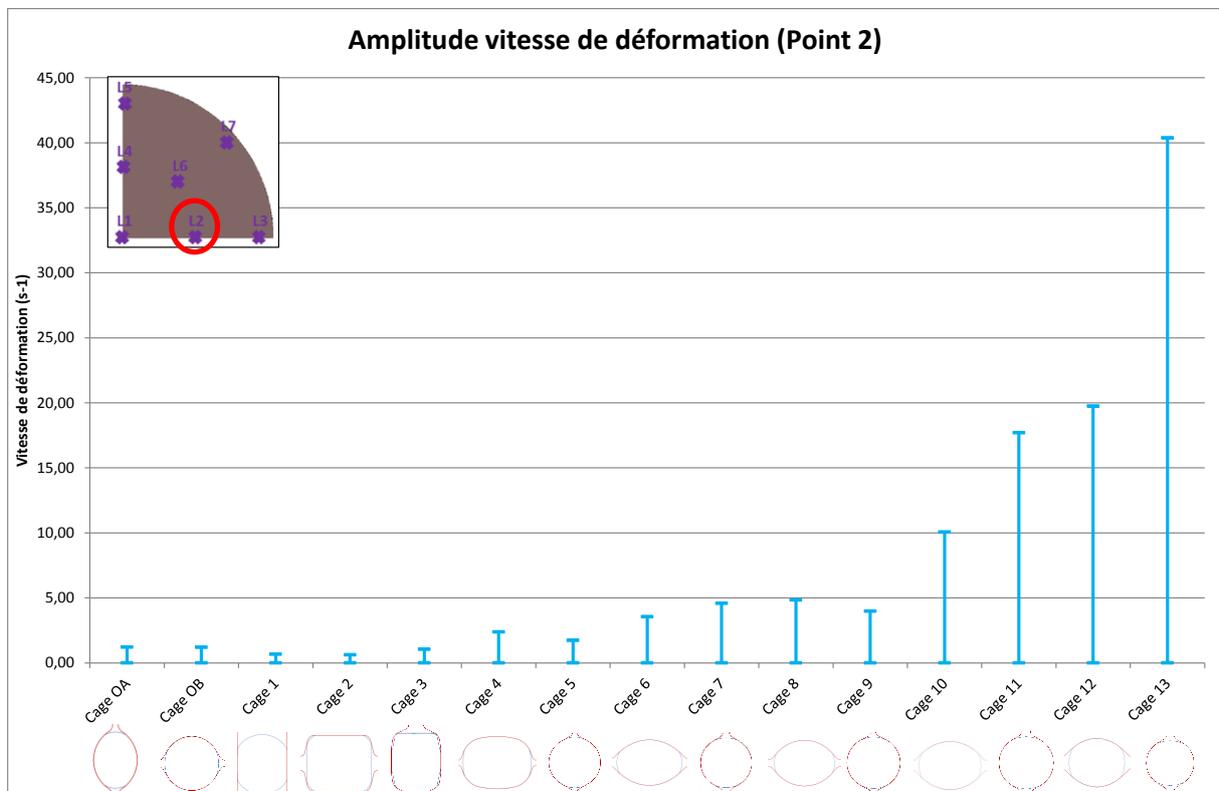


Figure 121 : Amplitude des vitesses de déformation relevées au point 2

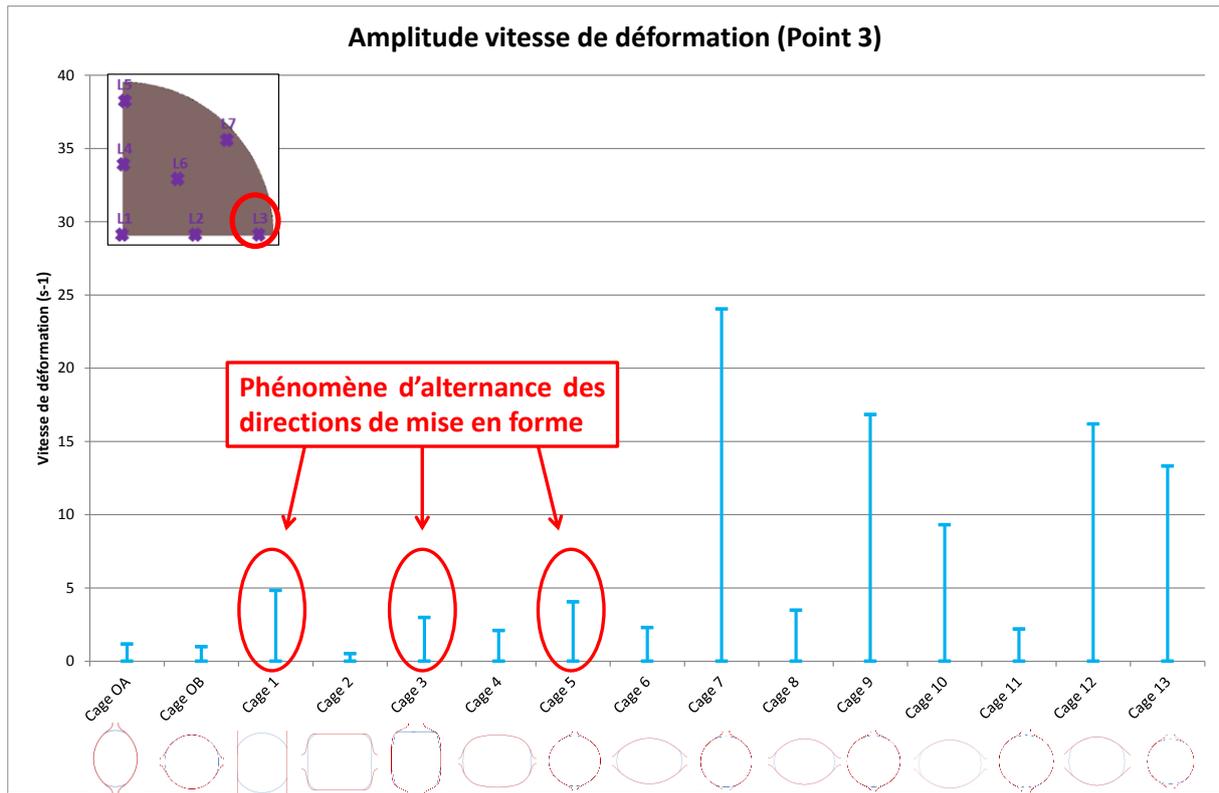


Figure 122 : Amplitude des vitesses de déformation relevées au point 3

Les sollicitations analysées précédemment sont celles ayant un rôle prépondérant sur le comportement des défauts internes comme les inclusions et les porosités. L'essai de forgeage qui sera mis en œuvre devra être représentatif des sollicitations rencontrées dans la barre laminée.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, la ligne de laminage industrielle LUNA a été modélisée et simulée. La stratégie adoptée consiste à simuler chaque cage de laminage séparément et à transférer les résultats de simulation de la cage précédente vers la cage suivante grâce à des opérations de transformation du maillage. Le modèle a été calé et éprouvé sur la base de résultats de mesure de température de surface et de couple de laminage effectuée sur la ligne industrielle. Une première campagne de mesure a permis de caler les paramètres du modèle alors qu'une seconde a permis de valider l'aspect prédictif du modèle calé.

Le modèle permet d'obtenir de bons résultats. Les tendances d'une cage à l'autre sont respectées et les niveaux de couple et de température obtenus sont en accord avec ceux mesurés. Toutefois, les couples des deux premières cages de laminage sont surévalués par la simulation. De la même façon, les températures sont sous-estimées, l'écart de température simulée n'allant pas dans le sens des écarts de couple constatés. Il est à noter que pour l'étude paramétrique, l'intervalle de variation des paramètres a été restreint aux valeurs couramment admises et mentionnées dans la littérature.

L'influence des tensions inter-cage a fait l'objet d'une étude particulière. Celle-ci n'est pas un paramètre de laminage mais compte tenu de la stratégie de simulation, elle est tout de même une entrée du modèle. Les résultats de simulation ont montré qu'il est possible de représenter la tension inter-cage dans le modèle par l'introduction d'un manipulateur en entrée et en sortie de laminage. L'introduction d'une tension inter-cage permet de réduire le couple de la cage précédente et d'augmenter celui de la cage suivante. L'introduction d'une tension inter-cage entre les deux premières cages de laminage ne permet pas d'améliorer de façon significative les résultats du modèle. Le fait que les tensions inter-cage soient une donnée d'entrée du modèle mais pas un paramètre du procédé fait qu'elles sont délicates à utiliser comme variable d'ajustement. En effet, lorsque la gamme de laminage va évoluer, les tensions vont évoluer également mais dans des proportions qu'on ne connaît pas a priori. Le modèle nécessiterait donc un calage avec des données expérimentales pour chaque gamme afin d'ajuster la valeur des tensions inter-cage. C'est la raison pour laquelle la tension inter-cage n'a pas été retenue comme paramètre du procédé pour le calage du modèle.

A partir du modèle obtenu, les grandeurs thermomécaniques (déformation, vitesse de déformation, température, pression hydrostatique) influant sur la propreté inclusionnaire et les porosités du matériau ont été caractérisées pour différents points de la section de la barre laminée. Il a été montré l'impact de l'alternance de la direction de déformation d'une cage à l'autre sur ces grandeurs. Le saut de ces grandeurs entre l'entrée et la sortie de chaque cage issues de la simulation serviront à spécifier le cahier des charges pour le choix et le dimensionnement de l'essai de caractérisation.

Le chapitre qui suit est dédié au choix et à la conception d'un test de caractérisation représentatif des conditions de laminage de la ligne LUNA.

Références bibliographiques

[DEV91] : DEVADAS C., & al., The thermal and metallurgical state of steel strip during hot rolling: Part I. Characterization of heat transfer, Metallurgical and Materials Transactions, Vol. 22, pp. 307-319, 1991.

[HAW16] : HAWRYLUK M., & JAKUBIK J., Analysis of forging defects for selected industrial die, Engineering Failure Analysis, Vol. 59, pp. 396-409, 2016.

[LI05] : LI X., & al., A coupling thermal mechanical and microstructural FE model for hot strip continuous rolling process and verification, Materials Science and Engineering, Vol. A 408, pp. 33-41, 2005.

[LUO01a] : LUO C., STÅHLBERG U., Deformation of inclusions during hot rolling of steels, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 114, pp. 87-97, 2001.

[NAL13] : NALAWADE R.S., & al., Simulation of hot rolling deformation at intermediate passes and its industrial validity, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 77, pp. 8-16, 2013.

[QIN13] : QINGQIANG H., & al., Thermo-mechanical modeling and simulation of microstructure evolution in multi-pass H-shape rolling, Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 76, pp. 13-20, 2013.

[SAB15] : SABY M., & al., A geometry-dependent model for void closure in hot metal forming, Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 105, pp. 63-78, 2015.

[SIL11] : SILVA M.L.N., & al., Damage evolution during cross wedge rolling of steel DIN 38MnSiV5, Procedia Engineering, Vol. 10, pp. 752-757, 2011.

[WAN96] : WANG A., & al., A study of pore closure and welding in hot rolling process, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 60, pp. 95-102, 1996.

[WAN15] : WANG B., & al., Analysis of the evolution behavior of voids during, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 221, pp. 121-127, 2015.

[YUA07] : YUAN S., & al., 3D FE Analysis of thermal behavior of billet in rod and wire hot continuous rolling process, Journal of Iron and Steel Research, Vol. 14, pp. 29-32, 2007.