

[Tapez un texte]

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة باجي مختار – عنابة -
Université de BADJI MOKHTAR –Annaba-
Faculté Science de L'ingénieur

Département de Métallurgie et Génie des Matériaux

MEMOIRE DE MAGISTER

OPTION : Mise en forme des métaux

Thème

**Contribution à l'amélioration d'un
modèle simple du laminage des tôles.**

DIRECTEUR DE MEMOIRE:

Dr. ZAAF Mohamed

présenté par :

Mr. SLIMANI kheireddine

DEVANT LE jury

Mr. BOUDEBANE .A	Président MCA	Université d'ANNABA
Mr. MEBAREK.A	Examineur MCA	Université d'ANNABA
Mr. LEMOUI.A	Examineur MCA	Université d'ANNABA
Mr. OUZINE.B	Examineur MCA	Université d'ANNABA
Mr. ZAAF.M	Directeur de mémoire MCA	Université d'ANNABA

Promotion : 2014/2015

[Tapez un texte]

Résumé :

Au cours du laminage tandem, le passage simultané de la tôle entre plusieurs cages successives ; pose un problème de régulation des tensions inter-cages. Les industriels ont tendance à supposer les tensions égales entre une cage et une autre, c'est-à-dire entre la sortie d'une cage et l'entrée de la cage suivante. Ce qui entraîne un problème de régulation des vitesses. En effet, cela donne en général des vitesses différentes entre l'entrée d'une passe et la sortie de la passe précédente. Ce qui peut conduire à des ondulations ou des tensions excessives susceptibles d'engendrer des ruptures des bandes.

Afin d'illustrer cette situation, nous proposons de reprendre les données tirés du site du laminoir tandem du complexe sidérurgique Arcelor-Mittal d'El Hadjar en Algérie. Ce laminoir tandem contient cinq cages.

L'objet de ce travail est d'arriver à déterminer pour chaque cas, la rectification à apporter pour obtenir des vitesses et des tensions égales entre la sortie de chaque cage et l'entrée de la cage qui la suit.

On a présenté d'abord le calcul pour trois cages de [P.MONTMITONET], après on a développé les calculs pour Cinq cages et définir la relation entre les vitesses et les tensions, afin de déduire une formule généralisé quelque soit le nombre de cage.

Afin de simplifié notre modèle de calcul, on a développé deux programme Matlab ;

- le premier : serre à faire les calculs de laminage(les vitesses, le plan neutre,...)
- le deuxième : pour faire les corrections des tensions afin d'obtenir des vitesse égales entre la sortie d'une cage et l'entrée de la cage suivante
- Les résultats montrent la convergence des vitesses après la correction des tensions, comme ça , éviter le risque de rupture ou d'ondulation de la bande laminée et les grandeurs pré calculés nous n'éloigne pas de la réalité.

[Tapez un texte]

Abstract:

In the tandem rolling, the simultaneous passage of the sheet between multiple cages poses a control problem of inter-stand tension. Manufacturers tend to ask the equal voltages between a cage and another, that is to say between the output of a cage and the input of the next cage. This causes a speed regulation problem. Indeed, this generally gives different speeds between the input and pass out of the previous pass. Which may lead to ripples or excessive tension may cause breakage of the strips.

To illustrate this situation, we propose to take the data from the tandem mill site steel complex Arcelor-Mittal El Hadjar Algeria. It contains five stand tandem mill.

The purpose of this work is to get to determine for each case, the correction to be made to obtain equal speeds and tensions between the output of each cage and the door of the cage that follows.

We first introduced the calculation for three cages [P.MONTMITONET], after the calculations have been developed for Cinque cages and define the relationship between the speed and tension, to derive a generalized formula irrespective of the number of cage .

To our simplified calculation model, two Matlab program was developed;

- the first: Greenhouse to the rolling calculation (speeds, the neutral plane,)
- the second: to make corrections tensions in order to obtain equal speed between the output of a cage and the input of the next cage
- The Results show the convergence speed after the correction of tension, like that, to avoid the risk of breakage or undulation of the rolled strip and pre calculated magnitudes we do not stray from reality.

ملخص :

في التصفيح المتداول جنباً إلى جنب، المرور المحاكي للسبيكة بين أقفاص متعددة يطرح مشكلة تنظيم التوتر بين السبائك. المصانع و في نفس الاتجاه تميل لطرح التوتر متساوي بين قفص وآخر، بمعنى بين خروج من القفص والدخول في القفص مما يسبب في تنظيم السرعات ، وهذا يعطي عموماً سرعات مختلفة بين دخول تمريرة وخروج تمريرة السابقة.

لتوضيح هذه الحالة، فإننا نقترح أن تحصل على البيانات من موقع التصفيح المتداول من شركة مجمع الصلب ارسيلور ميتال حجار الجزائر. يحتوي التصفيح المتداول على خمسة أقفاص والغرض من هذا العمل هو للوصول الى تحديد لكل حالة، والتصحيح ليتم الحصول على سرعات والتوترات متساوية بين مخرجات كل قفص وباب القفص الذي يلي.

, بعدها وضعنا الحسابات لخمسة أقفاص . وحددنا العلاقة بين السرعة والتوتر، لاشتقاق صيغة تعميم بصرف النظر عن عددا لأقفاص.

قدمنا أول حساب لمدة ثلاثة أقفاص [P.MONTMITONET]

و لتبسيط نموذج الحساب طورنا اثنين من برنامج ماتلاب

أول :القيام بحساب التصفيح (سرعات، المخطط محايدة،.....)

والثاني :لإجراء التصحيح التوترات من أجل الحصول على سرعة متساوية بين الخارج من القفص والداخل القفص المقبل.

أظهرت النتائج سرعة التقارب بعد التصحيح من التوتر، من هذا القبيل، لتجنب خطر الكسر أو تموج الشريط المدرفل واحتساب المتغيرات التقريبي لا تبتعد كثيراً عن الواقع.

Liste des figures		
Nº de figure	Titre	Page
CHAPITRE I		
I.1	Schéma représentatif de Principe du travail maximale de Hill.	5
I.2	Schéma représentatif de la plasticité standard.	5
I.3	Schéma simplifié du foyer de déformation.	9
I.4	Variation du coefficient d'égalesation et l'irrégularité d'épaisseur longitudinale relative de la bande en fonction de la réduction.	14
I.5	influence du coefficient de frottement sur le pouvoir correctif	15
I.6	Variation du coefficient d'égalesation en fonction la tension avant.	16
I.7	Evolution des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différents coefficients de frottement.	19
I.8	Evolution des gradients des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différents coefficients de frottement.	19
I.9	Evolution des contraintes de frottement le long de l'emprise pour différents coefficients de frottement.	20
I.10	Evolution des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différentes vitesses	20
I.11	Evolution des gradients des contraintes le long de l'emprise pour différentes vitesses.	21
I.12	Evolution des contraintes de frottements le long de l'emprise pour différentes vitesses.	21
I.13	Evolution des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différentes déformations.	22
I.14	Evolution des gradients des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différentes déformations.	23
I.15	Evolution des contraintes frottement le long de l'emprise pour différentes déformations.	23
I.16	Evolution des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différentes tension de sorties.	24
I.17	Evolution gradient des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différentes tension de sorties.	24
I.18	Evolution des contraintes de frottement le long de l'emprise pour différentes tension de sorties.	25

[Tapez un texte]

I.19	Evolution des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différentes tension ($T_e=T_s$ = variable).	25
I.20	Evolution gradient des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différentes tension ($T_e=T_s$ = variable).	26
I.21	Evolution des contraintes de frottement le long de l'emprise pour différentes tension ($T_e=T_s$ = variable).	26
I.22	Evolution des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différents coefficients de frottement.	27
I.23	Evolution des gradients des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différents coefficients de frottement.	27
I.24	Evolution des contraintes de frottement le long de l'emprise pour différents coefficients de frottement.	28
I.25	Evolution des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différentes vitesses.	28
I.26	Evolution gradient des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différentes vitesses.	29
I.27	Evolution des contraintes de frottement le long de l'emprise pour différentes vitesses.	29
I.28	Evolution des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différentes déformations.	30
I.26	Evolution gradient des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différentes déformations.	30
I.30	Evolution des contraintes de frottement le long de l'emprise pour différentes déformations.	31
I.31	Evolution des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différentes tension de sortie.	31
I.32	Evolution des gradients des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différentes tension de sortie.	32
I.33	Evolution des contraintes de frottement le long de l'emprise pour différentes tension de sortie.	32
I.34	Evolution des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différentes tension ($T_e=T_s$ = variable).	33
I.35	Evolution de gradient des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différentes tension ($T_e=T_s$ = variable).	33
I.36	Evolution des contraintes de frottement le long de l'emprise pour différentes tension ($T_e=T_s$ = variable).	34
I.37	Evolution des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différents coefficients de frottement.	35
I.38	Evolution des gradients des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différents coefficients de frottement	35
I.39	Evolution de gradient des contraintes de frottement le long de l'emprise pour différents coefficients de frottement.	36

[Tapez un texte]

I.40	Evolution des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différentes vitesses.	36
I.41	Evolution de gradient des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différentes vitesses.	37
I.42	Evolution des contraintes de frottement le long de l'emprise pour différentes vitesses.	37
I.43	Evolution des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différentes déformations	38
I.44	Evolution de gradient des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différentes déformations.	38
I.45	Evolution des contraintes de frottement le long de l'emprise pour différentes déformations.	39
I.46	Evolution des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différentes tension de sortie.	39
I.47	Evolution de gradient des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différentes tension de sortie.	40
I.48	Evolution des contraintes de frottement le long l'emprise pour différentes tension de sortie.	40
I.49	Evolution des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différentes tension ($T_e=T_s$ = variable).	41
I.50	Evolution de gradient des contraintes longitudinales le long de l'emprise pour différentes tension ($T_e=T_s$ = variable).	41
I.51	Evolution des contraintes de frottements le long de l'emprise pour différentes tension ($T_e=T_s$ = variable).	42
CHAPITRE II		
II.1	cage de laminage dispositions	45
II.2	laminage à froid tandem de Cinq-cages, configuration autonome	48
II.3	disposition typique d'une cage de laminage cuadro	48
II.4	moulin froid tandem de Cinq-support, configuration continue	49
II.5	interface typique entre le processus de marinage et le moulin froid tandem	51
II.6	secteur de morsure de petit pain	54
II.7	élément de bande dans la zone en plastique	57
CHAPITRE III		
III.1	Découplage des calculs multi cages. Condition cinématique et mécanique	63
III.2	Découplage des calculs pour 5cages	65
III.3	Algorithme de calcul	81

[Tapez un texte]

III.4	courbe de contrainte et déformation de la cage 1	83
III.5	resultats de la cages 1e	84
III.6	courbes de la cage 2	86
III.7	courbes de la cage 3	88
III.08	courbe de contrainte et déformation de la cage 4	89

N°	Titre	Page
Tableau. III.1	Les paramètres géométriques de laminage à froid	25
Tableau. III.2	Exigence de la norme NFEN10130 de composition chimique.	25
Tableau. III.3	propriétés mécaniques exigées par la norme NF EN 10130.	25
Tableau. III.4	tableau contraint à 0,2% de déformation.	34
Tableau. III.5	Composition chimique	35
Tableau. III.6	Détermination de la taille de grain.	39
Tableau. III.7	évolution de K et W par passe	40
Tableau. III.8	résultat de l'essai de la dureté.	40
Tableau. III.9	résultats des essais de tractions.	41
Tableau. III.10	les valeurs moyennes de n et A.	45

III.09	courbes de la cage5	91
III.10	Résultats du 2ème code matlab	93
III.11	Résultats final de la cage n°1	94
III.12	Résultats final de la cage n°2	95
III.13	Résultats final de la cage n°3	95
III.14	Résultats final de la cage n°4	96
III.15	Résultats final de la cage n°5	96

[Tapez un texte]

Liste des tableaux

N°	Titre	Page
Tableau. III.1	Les paramètres géométriques de laminage à froid	25
Tableau. III.2	Exigence de la norme NFEN10130 de composition chimique.	25
Tableau. III.3	propriétés mécaniques exigées par la norme NF EN 10130.	25
Tableau. III.4	tableau contraint à 0,2% de déformation.	34
Tableau. III.5	Composition chimique	35
Tableau. III.6	Détermination de la taille de grain.	39
Tableau. III.7	évolution de K et W par passe	40
Tableau. III.8	résultat de l'essai de la dureté.	40
Tableau. III.9	résultats des essais de tractions.	41
Tableau. III.10	les valeurs moyennes de n et A.	45

SOMMAIRE

	Page
Introduction Général	01
Chapitre I: Laminage tandem	
1.1 Introduction	02
1.2 Historique	02
1.3 Aperçu du processus	04
1.4 .1 avantages du laminage à froid tandem continu	06
1.5 motivations essentielles et moteurs	06
Conclusion	07
Chapitre II : Etude bibliographique	
Introduction	08
2.1.Déformation plastique et comportement des métaux	08
1.1. Aspect microscopique de la déformation plastique	09
1.2. Mécanisme de déformation dans les poly cristaux	09
2. Mecanique de la plasticité	09
2.1. Définition	09
2.2. Principe du travail maximale de HILL	10
2.3. Plasticité standard	10
2.4. Plasticité sans écrouissage	11
2.5. Plasticité avec écrouissage	11
2.5.1. Description de l'écrouissage	11
A. Critères de limites élastiques	12
B. Critère de Tresca	12
C. Critère de Von Misés	13
D. Critère de Hill	13
3. Présentation mécanique du laminage	15
3.1. Généralité sur laminage	15
3.1.1. Aspects liés au procédé :	15
A. aspects géométriques	
B .spects cinématiques	16
C.Aspects liés aux forces et aux contraintes	17
3.COUPLAGES ENTRE CAGE	24

Chapitre III : Méthode des tranches

3.1. Méthode des tranches	27
3.1.1. Frottement de Tresca	31
3.1.2. Frottement de Coulomb	32
3.2. Modèle Bland & Ford	33
3.3. Modèle de Sims	36
3.4. Applications numériques	38
-Cas 1	39
-Cas 2	42
3.5. Conclusion	51

Chapitre IV CALCUL ET MODELISATION

3.1. Introduction	52
3.2. Présentation Du problème	53
3.3.Calcul pour 5 cages	58
3.4.Relation entre la vitesse et la tension	67
3.4.1developpement mathématique	68
3.5.La formulegeneralisée	64
3.6.PROGRAMATION ET CALCUL (MATLAB)	69
3.6.1SCHEMA DE CALCUL	70
3.6.2 Schéma retenu	71
3.6.3 Application pour 5 cages	72
3.6.4 2ème code de calcul Matlab	82
3.6.5 Resultats	83
Conclusion	87
Conclusion general	88

[Tapez un texte]

Introduction générale

La prédiction de l'effort et du couple de laminage, des contraintes et des vitesses est indispensable pour conduire de façon optimale une opération industrielle comme celle de laminage. La connaissance préalable de ses grandeurs mécaniques permet la bonne mise au point d'un programme de laminage, de prévoir le bombé des cylindres, le cédage et une consommation optimal de l'énergie.

De grands progrès ont été réalisés ces dernières années dans la mise au point de codes de calculs permettant cela.

La méthode des éléments finis est aujourd'hui la plus utilisée, mais elle demeure lourde et demande un temps de calcul important, ce qui la rend désagréable et peu recommandable pour les industriels qui cherchent des modèles on-line pour piloter leurs opérations. Ce travail se veut une contribution répondant à cette dernière exigence.

Il est avéré que la méthode des tranches est celle qui répond le mieux à cette exigence pour le laminage à froid des tôles minces.

Nous avons donc commencé après une recherche bibliographique par mettre au point un modèle basé sur la méthode des tranches sous environnement MATLAB.

Après cela, nous avons introduit dans ce modèle la prise en compte de l'élasticité des cylindres. Une comparaison avec des résultats tirés de la bibliographie qui utilise la méthode des éléments finis ont confirmé la fiabilité de nos résultats.

Le laminage tandem pose un sérieux problème de régulation des tensions entre les cages. Très souvent, les industriels ont tendance à poser les tensions telles que la tension de sortie d'une cage en amont est égale à la tension d'entrée de la cage qui la suit. Cela engendre très souvent des vitesses différentes dans les sections considérées. L'objet essentiel de ce travail consiste à mettre au point un modèle qui calcule les rectifications de tensions à faire pour avoir des vitesses de sortie d'une cage i aux vitesses d'entrées de la cage $i+1$. Pour cela, on a démarré d'un calcul analytique déjà fait par P. Montmitonnet. Nous avons ensuite développé ce travail par une généralisation des résultats obtenus par ce dernier en utilisant un développement de Newton. Les résultats obtenus permettent la correction des tensions avec des vitesses acceptables.

Il en résulte un modèle sous environnement Matlab rapide d'exécution, fiable qu'on peut recommander pour les industriels.

[Tapez un texte]

1.1 Introduction :

Le laminage à froid au tandem des bandes métalliques est un processus multi-variable non linéaire et très complexe, dont le contrôle présente un défi majeur pour l'ingénierie.

La technologie actuelle pour le contrôle de ce processus se fonde généralement sur une structure développée au R-U tôt pendant les années 1970 par G.F. Bryant [1]. Dans cette technique les effets indésirables des interactions entre les nombreuses variables des processus sont partiellement atténués par la simple-entrée-simple-production (SISO) et les boucles d'avertissement simples-multi-input de la production (SIMO) fonctionnant sur des variables sélectionnées.

En plus, le problème global de contrôle est décomposé en plusieurs problèmes distincts en vue de fournir l'ajustement indépendant de la tension et de l'épaisseur de bande n'importe où dans le processus de laminage.

Comme étape pour arriver à ce besoin, l'objectif de cette partie travail est de présenter quelques approches utilisées pour le contrôle du processus à froid du laminage tandem des métaux. Ce travail couvre les aspects théoriques et appliqués, il nous éclairera sur les observations des diverses approches.

1.2 Historique

Les premiers pas du laminage tandem été apparus autour du quatorzième siècle où de très petits laminoirs ont été utilisés pour aplatir les métaux à froid tels que l'or, l'argent, ou les autres matériaux qui ont été utilisés dans les bijoux ou les travaux d'art [2].

En 1480 Leonardo da Vinci décrit dans ses notes des machines pour le laminage à froid des feuilles et des barres, mais il est probable que ces cages de laminage n'ont jamais été construites avant.

Durant la seconde moitié du seizième siècle, le laminage à froid du métal a commencé à prendre plus d'importance avec le début de son utilisation pour des applications diverses telles que les tuyaux.

Le 17ème siècle a vu naître le laminage à chaud des barres des matériaux ferreux dans l'ensemble de l'Europe et particulièrement en Allemagne, avec des applications un siècle plus tard en Angleterre et au Pays de Galles.

Ces laminoirs étaient de simples cages. C'est au 18ème siècle que le métal a été laminé dans des cages successives disposées comme un laminage tandem. D'abord pour le laminage à

[Tapez un texte]

chaud des fils machines en Angleterre en 1766. En 1798 un brevet a été publié pour le laminage tandem pour les produits métalliques plats et en feuilles.

La taille des laminoirs et de leurs produits laminés a augmenté de manière significative pendant le 19ème siècle avec l'arrivée de la Révolution Industrielle, qui a causé une augmentation énorme des demandes du fer et de l'acier.

La disposition à quatre a été présentée en 1872 en Angleterre et légèrement plus tôt en Allemagne pour le laminage des rails.

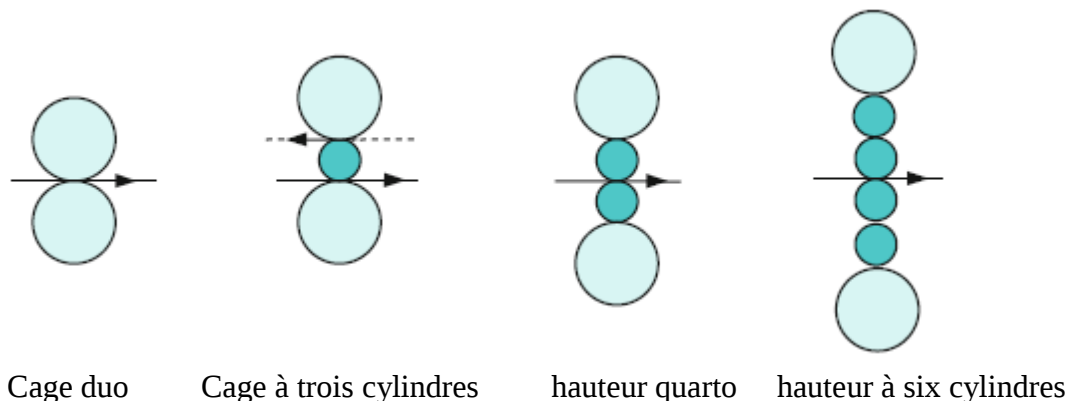


Figure I.1 : Différents types de Cages

La mise au point de cages trios (trois cylindres) avec un faible diamètre au cylindre du milieu a fourni la force d'entraînement pour le laminage à froid de l'acier comme un processus réussi. La commercialisation de ce type de laminoirs s'est produite en grande partie dans les Etats-Unis à Pittsburgh, Pennsylvanie par la Société américaine de fer et l'acier, qui plus tard a été acquise par Jones et Laughlin Steel Corporation.

Le premier laminoir quarto pour le laminage à froid de l'acier a été employé expérimentalement par Allegheny Ludlum Steel Corporation en 1923 [3].

Le laminage à froid tandem de la bande en acier était apparu en 1904 à l'ouest de Leechburg Steel Company et également près de Pittsburgh.

Cependant, les opérations de laminage tandem à froid avec tensions inter-cages a eu lieu vers 1915 à Superior Steel Company à Pittsburgh, et en 1926 a commencé à travailler dans Butler Usine de la Pennsylvanie d'American Rolling Company. Les années 1930 ont vu un avancement significatif dans les largeurs maximum de la bande laminée à froid ont atteint 890 millimètres pour arriver a pas moins de 2.290 millimètres en 1940.

Pendant la deuxième guerre mondiale, la plupart des laminoirs en service étaient constitués de cages quartos. Les années soixante ont vu la prédominance de laminoirs tandems formés de cinq à six cages.

[Tapez un texte]

Des avancées considérables en technologie de laminage ont été faites pendant les années 1970. Ils ont permis des tolérances dimensionnelles très serrées, une bonne qualité de surface et des vitesses de laminage très élevées, ce qui a engendré une grande productivité.

1.3 Aperçu du processus

Le laminage à froid tandem de la bande en acier est un processus qui permet de laminier simultanément une bobine de grande longueur dans plusieurs cages (voir figure suivante).

Il se produit après le laminage à chaud où les brames en acier sont chauffés dans un four. Après le laminage à chaud et avant le laminage à froid, la bande passe dans un bain d'acide pour éliminer les oxydes formés pendant le laminage à chaud.

Le processus de laminage à froid donne après une réduction supplémentaire une bande plus mince généralement inférieur ou égale à 1,25 millimètres.

La réduction de l'épaisseur est provoquée par un effort de compression très important entre le cylindre de travail et la tôle. Dans cette région le métal est en déformation plastique, et là glisse entre la bande et la surface du travail du cylindre.

L'énergie requis pour réaliser la réduction de l'épaisseur de bande cause une élévation de la température qui diminue sous l'effet de l'air entre les cages et du lubrifiant.

Pour bien piloter une opération de laminage, il est indispensable de contrôler les paramètres qui le gouvernent (dimensions, vitesses, tensions, couple et effort de laminage). Ce contrôle nécessite une instrumentation fiable que nous présentons ci-dessous [4,5].

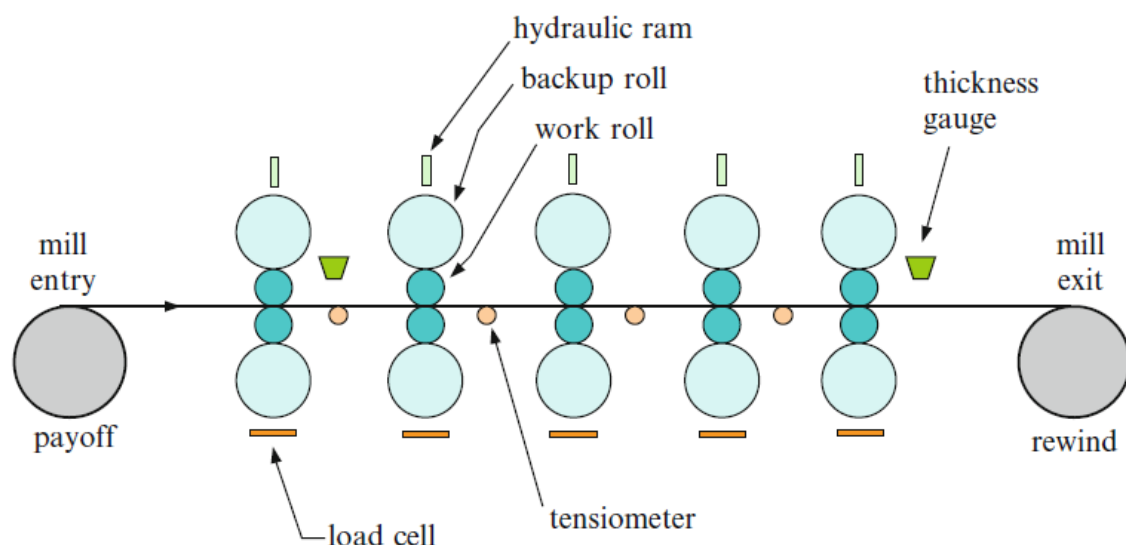


Fig. I,2 laminage à froid tandem de Cinq-cages, configuration autonome

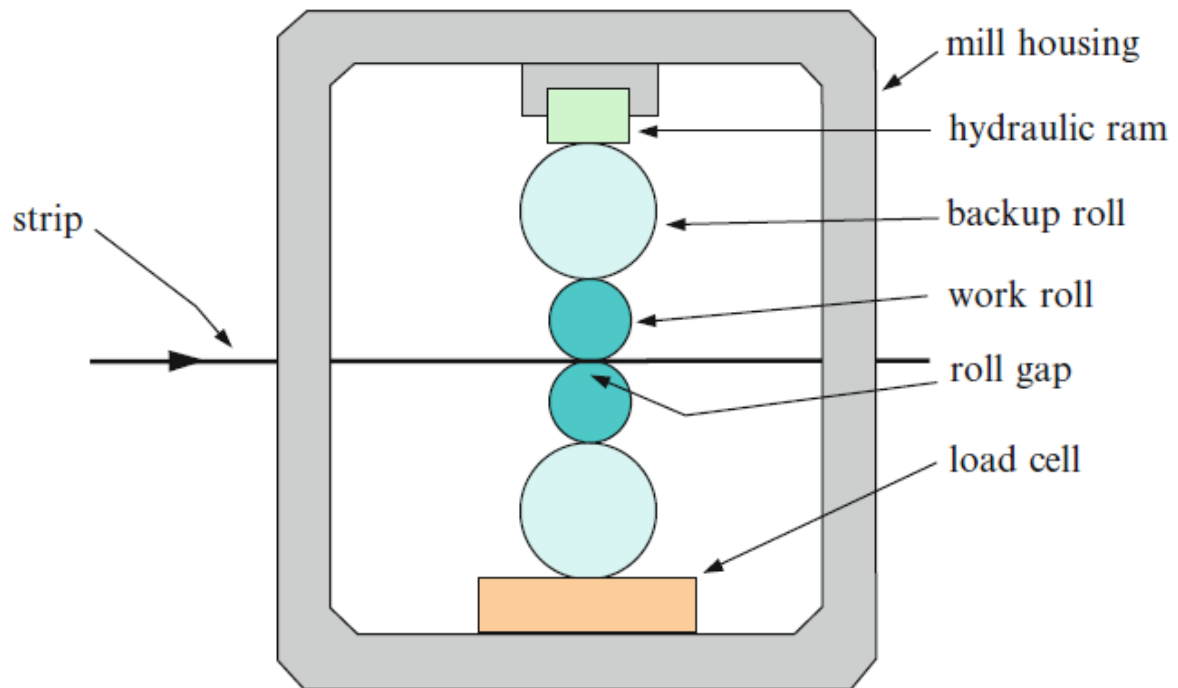


Fig. I,3 disposition typique d'une cage de laminage quarto

L'instrumentation du laminoir se compose généralement des sondes pour mesurer la force exercées sur les cylindres de travail, les forces de tensions inter cage, l'épaisseur de bande à la sortie de la première et dernier supports, les vitesses de petit tambour de travail, les forces exercées par le système hydraulique et la vitesse réelle de bande [5].

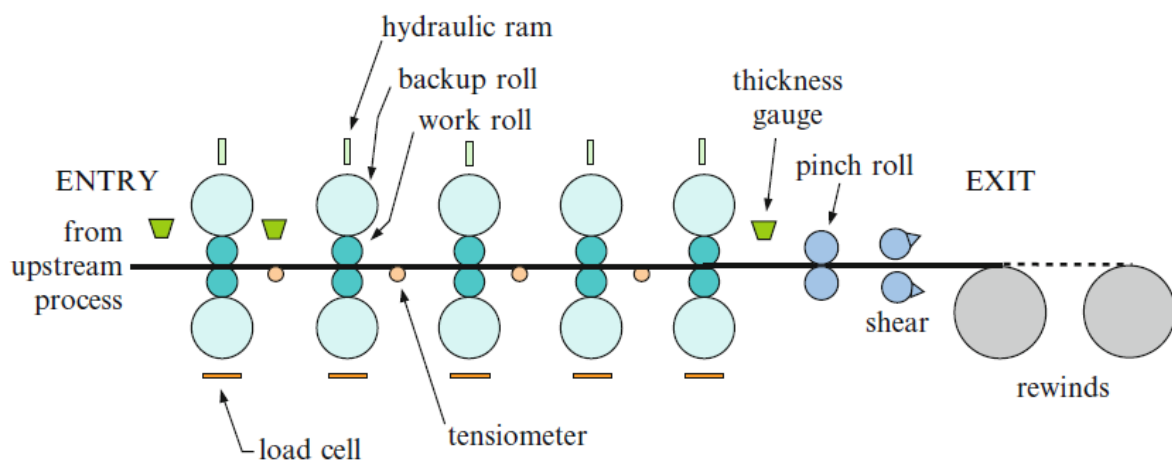


Fig. I,4 moulin froid tandem de Cinq-support, configuration continue

Après le laminage à froid, la bande subit un recuit pour reconstituer son formabilité qui a été réduite à cause de l'écrouissage après laminage.

1.4. Avantages du laminage à froid tandem continu

Le laminage au tandem a plusieurs avantages par rapport au processus réalisé dans une seule cage. Le plus significatif de ces derniers est l'augmentation de la productivité réalisée en raison de non interruption du procédé sans avoir à changer les bobines.

C'est pour cela que pratiquement toutes les nouvelles installations dans les vingt et unième siècle sont les tandems.

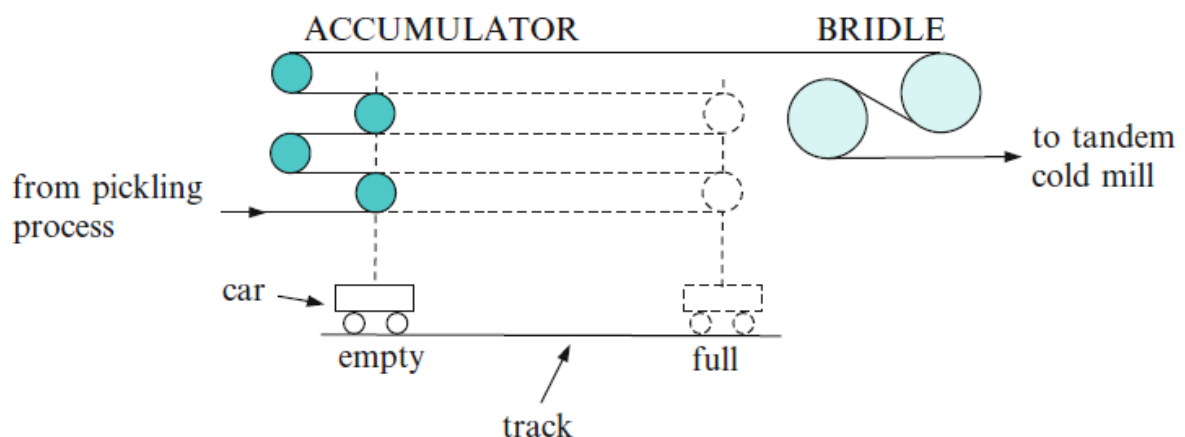
Le dispositif le plus utilisé généralement pour le stockage est l'accumulateur horizontal comme présenté dans la figure suivante.

1.5. Motivations essentielles et moteurs

Les laminoirs à froid tandem modernes sont actionnés par les machines à vitesse variables qui sont données par les moteurs synchrones ou les moteurs à induction [6].

Les commandes de ces moteurs sont en grande partie source impulsion-largeur-modulée de la tension (PWM) convertisseurs qui sont actionnés à partir d'un lien de C.C avec un embout avant actif.

Cette topologie particulière d'entraînement injecte les harmoniques très bas dans la puissance système de sorte que la déformation dans la tension et le courant soient réduits aux niveaux très bas sans besoin de filtres harmoniques.



FigureI.5 interface typique entre le processus de marinage et le moulin froid tandem

[Tapez un texte]

L'efficacité de la commande elle-même est tout à fait haut, presque tout à fait 99%.

Dans quelques conceptions d'entraînement l'opération est maintenue pendant certaines chutes de tension de réseau sans déclenchement.

1.6. Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de présenter un bref aperçu historique de l'utilisation des laminoirs tandems et leurs utilisations et fonctionnements.

Introduction

La maîtrise du laminage, comme tout procédé de mise en forme nécessite la connaissance des aspects aussi bien physique que mécanique. Comme on dit, la mise en forme a deux pieds. La physique et la mécanique de la plasticité.

Nous proposons donc de présenter dans ce chapitre d'abord une synthèse des aspects gouvernants la physique et la mécanique de la plasticité, suivis par une présentation d'une approche mécanique du laminage. La dernière partie abordera plus concrètement le sujet de notre travail, à savoir une synthèse bibliographique sur l'influence des paramètres technologiques du laminage notamment (les tensions et les vitesses) ainsi que les différents travaux qui ont abordé le problème de régulation des tensions.

2.1. Déformation plastique et comportement des métaux

2.1.1. Aspect microscopique de la déformation plastique

La déformation plastique d'un métal est provoquée par le déplacement irréversible de dislocation qui est émise et propagé par le déclenchement des sources de Frank et Read.

Pour commencer à déplacer une dislocation, il faut lui exercer une force telle que:

$$F = \tau \cdot b$$

τ : est le cisaillement dans un plan de glissement de dislocation.

b : est le vecteur de Burgers.

La déformation plastique dans un monocristal se produit quand la cession résolue dans le plan et la direction de glissement atteint une valeur critique, on peut aussi écrire :

$$F = b \cdot \tau_c = b_i \sigma_{ij} n_j$$

b_i : Les composantes de vecteur du Burgers.

σ_{ij} : Le tenseur de contrainte (du l'outil)

[Tapez un texte]

n_j : Les composantes de l'anormale au plan de glissement

Si : $\tau < \tau_c \Rightarrow$ domaine élastique,

Si : $\tau \geq \tau_c \Rightarrow$ déformation plastique.

Dans un monocristal, il existe plusieurs systèmes de glissement, c'est le système le plus dense qui sera actif en premier. [7]

2.1.2 Mécanisme de déformation dans les poly cristaux

En réalité, le comportement d'un poly cristal soumis à un champ de contrainte est fortement influence par l'interaction entre les grains de l'agrégat «poly cristal».

Dans un poly cristal, la déformation plastique commence dans les grains les plus favorablement orientés pour le glissement quand la contrainte atteinte une certaine valeur σ_i .

Mais la déformation plastique de ces grains isolés dans un solide qui reste élastique ne se développe pas librement, elle reste très limitée, donc il faut augmenter la contrainte (au dessus de σ_i)pour provoquer la déformation plastique de tous les grains. [8]

2.2.Mecanique de la plasticité

2.2.1.Définition

Un comportement est dit plastique si dans un processus irréversible les contraintes ne dépendent pas des vitesses.

En effet dans ce cadre, un comportement indépendant des vitesses sera défini par la condition

$$\sigma(\lambda \dot{\epsilon}) = \sigma(\dot{\epsilon}) \quad \forall \lambda \geq 0$$

Le cadre théorique de notre travail est donné par la plasticité standard basée sur le principe du travail maximal de Hill. [9, 10,11]

[Tapez un texte]

2.2.2.Principe du travail maximale de Hill

Compte tenu du second principe de la thermodynamique : $(\sigma - \sigma^*)\dot{\epsilon} \geq 0$

De cela découle :

1. $f(\sigma_{ij})$ convexe.
2. $\dot{\epsilon}_{ij} \perp f(\sigma_{ij})$

Une loi d'écoulement exprime une relation entre un tenseur des contraintes situé sur la surface seuil et une direction dans l'espace des vitesses de déformation. On écrira alors

$$\dot{\epsilon} = \lambda g(\sigma) \quad \forall \lambda \geq 0$$

On tire en particulier de cette inégalité $((\sigma - \sigma^*)\dot{\epsilon} \geq 0)$

- ✓ si σ est à l'intérieur de C alors $\dot{\epsilon}$ est nul ;
- ✓ si σ est sur la frontière de C en un point régulier (tangente continue), alors $\dot{\epsilon}$ est dirigé selon la normale extérieure à C ;
- ✓ si σ est sur un point anguleux de la frontière, alors $\dot{\epsilon}$ appartient au cône des normales (le cône limité par les normales aux différentes faces constituant le coin).

Ces résultats sont schématisés par la figure ci-dessous.

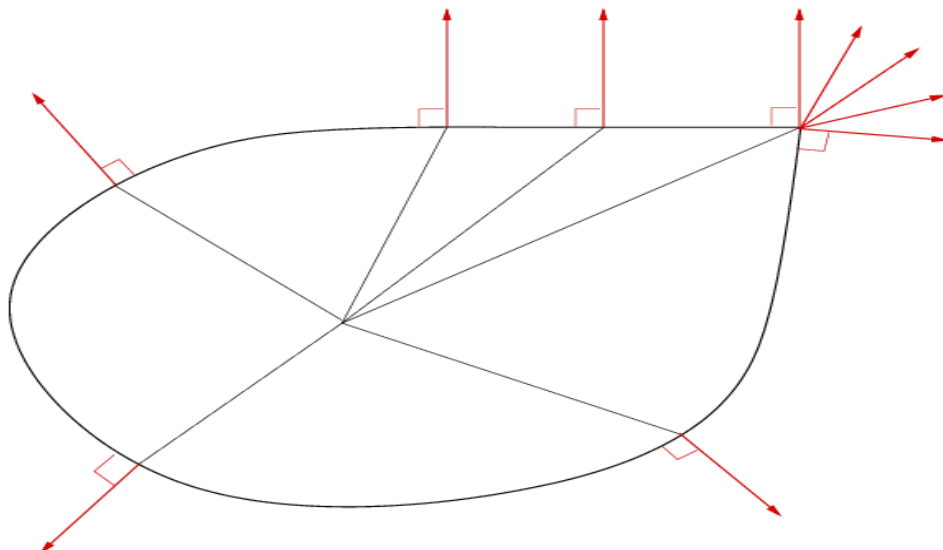


Figure 1 : Schéma représentatif de Principe du travail maximale de Hill.

[Tapez un texte]

2.2.3. Plasticité standard

Ce cadre est présenté dans ce qui suit :

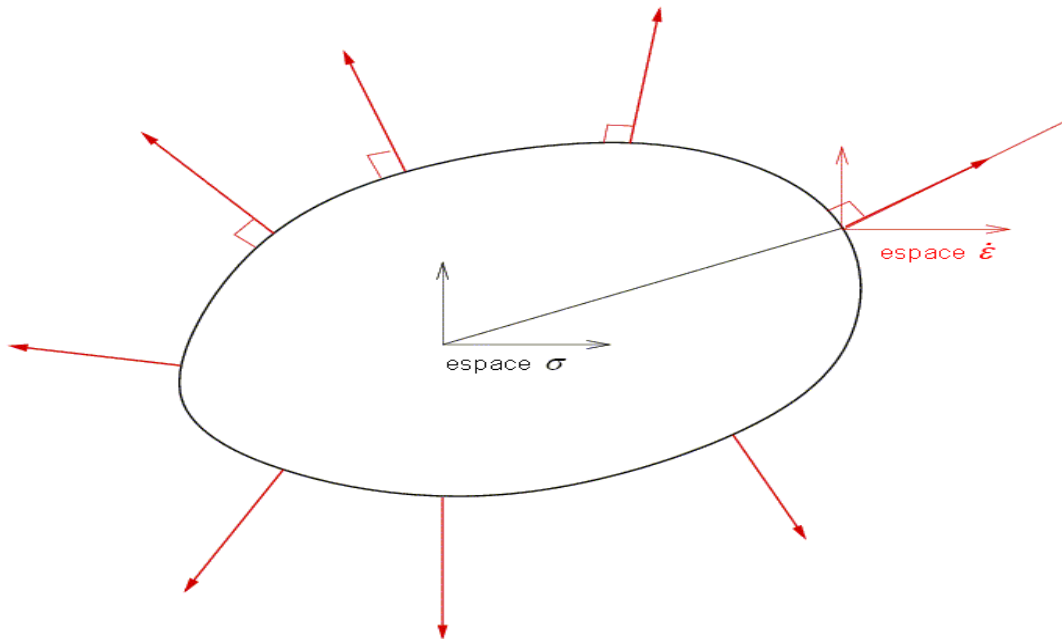


Figure 2 : Schéma représentatif de la plasticité standard. ε normal à ∂C

Ce cadre donne les relations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} f(\sigma_{ij}) \leq 0 \\ \dot{\varepsilon}_{ij} = 0 \text{ si } f(\sigma_{ij}) < 0 \\ \dot{\varepsilon}_{ij} = \lambda \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} \text{ si } f(\sigma_{ij}) = 0 (\lambda \geq 0) \end{array} \right.$$

2.2.4. Plasticité sans écrouissage

$$\sigma(\varepsilon) = \text{Const}$$

$$f(\sigma_{ij}) \leq 0$$

2.2.5. Plasticité avec écrouissage

2.2.5.1 Description de l'écrouissage

C'est une dilatation de la fonction seuil. On introduit donc une variable d'écroutissage α et on écrit :

$$f(\sigma_{ij}, \alpha) \leq 0 \quad \alpha : \text{Variable d'écrouissage}$$

2.2.5.2 . Plasticité avec écrouissage isotrope :

[Tapez un texte]

Un écrouissage est dit isotrope si la dilatation de la fonction seuil dans l'espace des contraintes est homothétique. Cela nous permet d'écrire :

$$f(X) = f(\sigma_{ij}, R(p)) = f(\sigma_{ij}) - R(p) \leq 0$$

Dans ce cas, $f(\sigma_{ij})$ sera une contrainte équivalente, $f(\sigma_{ij}) = \bar{\sigma}$ et $R(p)$ sera la fonction d'écrouissage, $R(p) = \sigma_0(\bar{\epsilon})$, $\sigma_0(\bar{\epsilon})$ sera la loi d'écrouissage identifiée expérimentalement.

$$\left\{ \begin{array}{l} f(\sigma_{ij}) \leq 0 \\ \dot{\epsilon}_{ij} = 0 \text{ si } f(\sigma_{ij}) < 0 \\ \dot{\epsilon}_{ij} = \lambda \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} \text{ si } f(\sigma_{ij}) = 0 (\lambda \geq 0), \quad \lambda = \dot{p} = \dot{\bar{\epsilon}} \end{array} \right.$$

Pour identifier un comportement plastique, il faut connaître la fonction seuil, la loi d'écrouissage et une loi d'évolution.

La fonction seuil passe par l'écriture des critères de plasticité, ils sont aussi appelés critères de limite élastiques.

2.3. Critères de limites élastiques

Ces critères donnent la fin du domaine élastique et le passage au domaine irréversible des déformations.

Dans le cas le plus simple, c'est-à-dire donné par l'essai de traction simple il se réduit à :

$$|\sigma| - \sigma_e < 0 \text{ où } \sigma_e \text{ est la contrainte limite dans le domaine élastique.}$$

Cependant dans le cas général, cette dernière écriture ne suffit pas, on introduit donc la notion de critère de limite élastique qui dans le cadre général s'écrit : $f(\sigma_{ij}) < 0$ où $f(\sigma_{ij})$ est une fonction qui limite le domaine élastique dans l'espace des contraintes.

$f(\sigma_{ij}) = f(\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{32}, \sigma_{21}, \sigma_{11}, \sigma_{13}) = f(I_1, J_2, J_3)$. I_1 : est le premier invariant du tenseur des contraintes. $I_1 = \text{trace}(\sigma_{ij})$ donc responsable du changement de volume. J_2 et J_3 sont les invariants du tenseur déviateur.

[Tapez un texte]

Au cas où la pression hydrostatique (aussi élevée soit elle) ne permet pas un changement de volume (cas des métaux), on peut négliger I_1 et donc poser : $f(\sigma_{ij}) = f(J_2, J_3) < 0$.

Si J_3 n'intervient pas, alors $f(\sigma_{ij}) = f(J_2) < 0$ et on obtient une surface seuil de révolution autour de l'axe hydrostatique.

2.3.1 Critère de Tresca

Hypothèses :

- ✓ Matériau isotrope.
- ✓ Effet Baushinger négligé.
- ✓ Insensibilité à la pression hydrostatique : $f(\sigma_{ij}) = f(S_{ij})$

Ce critère s'écrit:

$$\sigma_{i\max} - \sigma_{i\min} \leq \sigma_0, \quad i = 1, 2, 3,$$

C'est-à-dire pour $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ le critère s'écrit $\sigma_1 - \sigma_3 \leq \sigma_0$, $\sigma_0 = 2\tau_{\max}$

Autrement dit, on doit vérifier que la contrainte tangentielle maximale ne dépasse pas un seuil K qui est une constante qui dépend du matériau.

2.3.2 Critère de Von Mises

Mêmes hypothèses que pour le critère de Tresca, le critère de Von Mises s'écrit :

$$\frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} < \frac{\sigma_e^2}{3} \quad \text{Où} \quad \frac{\sigma_e^2}{3} = K, \quad \text{autrement} \quad \sqrt{3J_2} < \sigma_e$$

Il existe deux interprétations du critère de Von Mises, la première physique et la seconde géométrique.

En calculant l'énergie de distorsion ($W_{dist} = \frac{1}{4\mu} S_{ij} S_{ij} < W_{lim}$) c'est-à-dire que l'énergie de distorsion ne doit pas dépasser un certain seuil.

En traction simple, le calcul donne $W_{dist} = \sigma^2 / 3\mu$,

[Tapez un texte]

Ce qui donne en fin de calcul $\frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} < \frac{\sigma_e^2}{3}$.

D'un point de vue géométrique, si on se place dans l'espace des contraintes principales et on calcule les contraintes normale et tangentielle octaédrique on obtient :

$$\sigma_n^{oct} = \frac{1}{3} I_1, \quad \tau_{oct} = \frac{1}{9} \left\{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right\} = -\frac{2}{3} J_2$$

Dans ce cas, on dira que le critère de Von Misés exprime que la contrainte tangentielle octaédrique ne doit pas dépasser un seuil.

L'écriture finale et simplifiée de ce critère sera donc :

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2)} - \sigma_e \leq 0$$

La présentation géométrique du critère de Von Misés dans l'espace des contraintes principales donne un cylindre à base circulaire tandis que le critère de Tresca donne un hexagone. Dans les deux cas, l'axe est donné par la direction normale octaédrique.

2.3.3. Critère de Hill

C'est une généralisation du critère de Von Misés pour prendre en compte l'anisotropie. Dans le cas orthotrope (trois direction privilégiés), il se présente suit :

$$f(\sigma_{ij}) - \sigma_e \leq 0$$

$$f(\sigma_{ij}) = \sqrt{H_{ijkl} \sigma_{kl} \sigma_{ij}} = \sqrt{F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + 2L\sigma_{12}^2 + 2M\sigma_{23}^2 + 2N\sigma_{31}^2}$$

H_{ijkl} : est le tenseur d'anisotropie de Hill.

2.3.4. Autres critères

Il existe aussi d'autres critères de plasticité. La prise en compte des aspects microstructuraux et de la nature des systèmes de glissements activés (à l'échelle physique de la plasticité) conduit souvent à remettre en cause la nature quadratique des critères de plasticité, on aboutit ainsi à des critères non quadratiques [6] de la forme suivante :

[Tapez un texte]

$$f(\sigma_{ij}) = \sqrt[m]{F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^m + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^m + H(\sigma_{22} - \sigma_{33})^m} \quad \text{Où } m \text{ est appelé coefficient de forme.}$$

La prise en compte de la variation de volume passe par l'écriture de critères sensibles à la pression hydrostatique, ces critères sont souvent utilisés en métallurgie des poudres ou en mécanique des sols [12]. Les plus usités sont les critères de Drucker-Pragers et de Mohr-Coulomb.

2.3.5.Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté les concepts et outils de base pour modéliser tout comportement plastique dans le cadre classique donné par la plasticité standard. Les travaux de recherche ont montré que ce cadre suffit largement pour modéliser le comportement plastique des métaux [13].

En effet, pour cela, nous avons besoin d'identifier la fonction seuil et donc les coefficients d'anisotropie si le matériau laminé est anisotrope, d'une loi d'évolution qui donne un rapport entre les déformations égale à un rapport entre les vitesses de déformations, et une loi d'écrouissage à identifier expérimentalement.

2.4.Présentation mécanique du laminage

2.4.1 Généralité sur laminage :

Le laminage est un procédé de mise en forme par déformation plastique dans lequel les outils au contact du produit en cours de déformation sont des solides de révolution. Ils sont animés d'un mouvement de rotation autour d'axes fixes dans lesquels le produit laminé est entraîné par frottement, ce qui permet de diminuer son épaisseur.

Nous pouvons ainsi diviser les aspects gouvernants ce procédé en trois. Le premier concerne les aspects liés au procédé lui-même, c'est-à-dire à la géométrie de la partie déformée, à sa cinématique ainsi qu'à la nature des forces et des contraintes mises en jeu au cours du laminage. Le second concerne les aspects liés au comportement du matériau laminé, c'est-à-dire aussi bien les phénomènes métallurgiques qui s'y déroulent qu'à leurs traductions à l'échelle macro et leurs formulations mathématiques par le langage de la mécanique des milieux continus. La troisième est liée au frottement métal cylindres et aux phénomènes qui s'y déroulent.

2.4.2 Aspects liés au procédé :

2.4.2.1. Aspects géométriques :

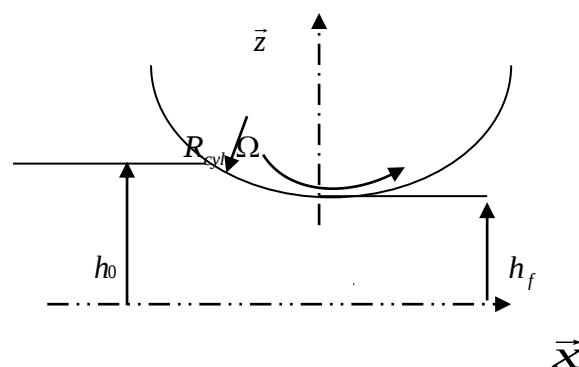


Figure .II.3 : Schéma simplifié du foyer de déformation.

Le foyer de déformation en laminage est caractérisé géométriquement par:

Les hauteurs d'entrée (h_0) et de sortie (h_f)

[Tapez un texte]

Le rayon du cylindre de travail R_{cyl}

Le plan neutre désigné par l'angle neutre γ_n : Il coïncide avec la section où vitesse linéaire des cylindres de travail est égale à la vitesse du métal, autrement dit à la section où la vitesse de glissement v_g est nulle. Il est évident aussi que la contrainte de frottement est nulle au point neutre[14,15].

2.4.2.2.Aspects cinématiques

Le laminage implique à priori un mouvement des particules du métal suivant les trois directions de l'espace, ce qui donne un vecteur vitesse du type. $\vec{v} = \vec{v}(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$.

$$\vec{v} = \begin{cases} \vec{v}_x \\ \vec{v}_y \\ \vec{v}_z \end{cases}$$

En outre, si on considère le cisaillement suivant toutes les directions, le tenseur des vitesses de déformations s'écrit :

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_{11} & \dot{\epsilon}_{12} & \dot{\epsilon}_{13} \\ \dot{\epsilon}_{21} & \dot{\epsilon}_{22} & \dot{\epsilon}_{23} \\ \dot{\epsilon}_{31} & \dot{\epsilon}_{32} & \dot{\epsilon}_{33} \end{bmatrix}$$

En négligeant les cisaillements, en considérant l'élargissement nul du fait que la largeur de la tôle est très supérieure à la hauteur moyenne et compte tenu du comportement plastique incompressible du laminé, ce tenseur s'écrit :

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \begin{bmatrix} -\dot{\epsilon}_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\epsilon}_3 \end{bmatrix}$$

Le matériau laminé étant incompressible (volume constant), on peut donc écrire $\dot{\epsilon}_1 = -\dot{\epsilon}_3$ où

$$\dot{\epsilon}_1 = \frac{\partial v_1}{\partial x}. \quad v_1 : \text{est la vitesse horizontale du laminé.}$$

$$v_1 = v_g + v_{cyl}, \quad v_{cyl} = \Omega R_{cyl} \quad \text{où } \Omega \text{ est la vitesse angulaire du cylindre de travail.}$$

v_g : Vitesse de glissement.

2.4.2.3. Aspects liés aux forces et aux contraintes

Le tenseur des contraintes se présente à priori de la façon suivante

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

La prise en compte des six composantes du tenseur des contraintes est encore très lourde pour le calcul, cependant il s'avère que les différentes composantes de cisaillement sont négligeables par rapport aux contraintes longitudinales (en utilisant une loi d'évolution où les vitesses de déformations en cisaillement sont nulles donne des contraintes de cisaillement nulles). Ce qui nous permet d'écrire le tenseur des contraintes comme suit :

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix}$$

Notons que dernier tenseur est valable pour le matériau laminé, La prise en compte du contact métal-cylindre donne une contrainte de scission. Cette dernière ne sera pas prise en compte dans la formulation de la loi de comportement mais doit être prise en compte dans l'écriture des équations à résoudre au cadre du laminage.

En plus des trois composantes du tenseur des contraintes, nous avons aussi la contrainte de scission τ qui résulte comme dit ci-dessus du frottement métal-cylindre.

Nous avons donc quatre contraintes $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \tau)$ à connaître pour maîtriser le procédé. Le problème demeure encore très lourd si nous devons considérer leurs variations suivant les trois directions de l'espace. Compte tenu des rapports dimensionnels $b \gg h$, il se trouve que les variations de ces contraintes suivant les directions transversales et normales sont très faibles par rapport à la direction longitudinale de laminage ($\frac{\partial \sigma}{\partial x} \gg \frac{\partial \sigma}{\partial y}$ et $\frac{\partial \sigma}{\partial x} \gg \frac{\partial \sigma}{\partial z}$), ce qui

simplifie considérablement le problème. Ce qui revient à conclure que les variations des contraintes et des vitesses n'ont lieu que pour la direction longitudinale, et par conséquent le modèle de calcul monodimensionnel suffira.

Il est à noter aussi que le frottement joue un rôle primordial au cours du laminage puisqu'il conditionne son déroulement. Comme on dit, pas de frottement, pas de laminage.

[Tapez un texte]

La condition d'engagement du métal est dictée par la condition $\mu \geq \tan \alpha$, où μ est le coefficient de frottement de Coulomb et α l'angle de laminage. [17]

2.4.3 . lois de comportements

2.4. 3.1.Cadre et formalisme général

Le modèle que nous avons utilisé est le modèle classique utilisé pour la description du laminage, il correspond dans ce cas à la plasticité associée de Von Misés.

Elles font intervenir la fonction seuil $f(\sigma_{ij})$, le potentiel plastique $g(\sigma_{ij})$ qui coïncidera avec la fonction seuil dans ce cas (plasticité associée) et la loi d'écrouissage $R(p)$ où p est la variable d'écrouissage isotrope ($\lambda = \dot{p}$)

La base théorique a été déjà présentée dans la section 2 de ce chapitre. Nous présentons dans ce qui suit son application au laminage.

2.4. 3.2.Formulation de la loi de comportement au cadre étudié

Le tenseur des contraintes et de déformation des tôles mince ayant une grande largeur (comme c'est le cas du laminage à froid) se présente comme suit :

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix}, \quad \varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} -\varepsilon_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{bmatrix}$$

La condition de déformation plane nous amène suite à l'utilisation d'une loi d'évolution à calculer la contrainte équivalente de Von –Misés comme suit :

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{3}}{2} |\sigma_1 - \sigma_3|.$$

De même la plasticité de Von-Misés permet d'écrire dans ce cas la déformation équivalente

comme suit : $\bar{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} |\varepsilon_3|.$

[Tapez un texte]

En posant $\frac{\sqrt{3}}{2} = C_0$, on pourra formuler la loi de comportement général comme suit :

$$C_0 |\sigma_1 - \sigma_3| = f\left(\frac{1}{C_0} |\varepsilon_3|\right) g\left(\frac{1}{C_0} |\dot{\varepsilon}_3|\right) = \sigma_0$$

C_0 est un coefficient qui dépend de l'anisotropie du matériau étudié, dans le cas de Von-

Misés, $C_0 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot f\left(\frac{1}{C_0} |\varepsilon_3|\right)$ est la fonction seuil et $g\left(\frac{1}{C_0} |\dot{\varepsilon}_3|\right)$ est une fonction qui dépendra

de la sensibilité du comportement du laminé aux vitesses, en général il est égale à un en plasticité (laminage à froid).

2.4.4. Lois d'écrouissage

La prise en compte de l'écrouissage est essentielle pour une modélisation fiable du comportement des matériaux en plasticité. Nous présentons les modèles les plus usités actuellement en mise en forme.

2.4.4.1. Modèle d'Hollomon : Elle est aussi appelée loi puissance.

Cette loi est très simple et convient pour les aciers doux ou mi- durs, ainsi que pour les métaux ou alliages a faible limite d'élasticité, par contre, elle ne constitue qu'une approximation grossière pour les alliages a haute résistance .[18]

$$\bar{\sigma} = A \bar{\varepsilon}^n$$

A est la valeur de la contrainte d'écoulement pour une déformation totale égale a 1 et n le coefficient d'écrouissage. Il représente la faculté du matériau à se déformer plastiquement avant striction.

2.4.4.2 .Modèle de Ludwick :

Ce modèle donne de bonnes prédictions pour les aciers alliés, les aciers à haute résistance, les aciers austénitiques et les alliages d'aluminium. Elle est formulée comme suit : $\bar{\sigma} = \sigma_0 + A \bar{\varepsilon}^n$

σ_0 : La limite élastique, en pratique on prend souvent la contrainte à 0,2% de déformation.

[Tapez un texte]

2.4.4.3.Modèle de Swift :

Il s'écrit : $\bar{\sigma} = A(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon})^n$

Ce modèle convient mieux pour les aciers à haute limite d'élasticité.

Cette loi revient à translater de ε_0 la courbe de la loi puissance parallèlement à L'axe ε [11, 12,13,14,15].

Discussion

Du fait qu'il donne les meilleures prédictions pour les aciers ordinaires, nous concluons que le modèle d'Hollomon convient mieux pour notre travail.

2.4.4.4.Formulation finale de la loi de comportement :

Elle se résume à l'écriture du critère de plasticité. Cela consiste à calculer la contrainte équivalente en fonction de la déformation équivalente.

Le cadre de Von-misés combiné à la loi d'écrouissage d'Hollomon pour le laminage des bandes minces donne la relation suivante :

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{3}}{2} |\sigma_1 - \sigma_3| = A \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{n+1} |\varepsilon_3|^n, \quad \varepsilon_3 = \ln \left(\frac{h}{h_0} \right)$$

2.4.5.Aspects liés à la loi de frottement

Par définition, on appelle loi de frottement, toute relation permettant de calculer le vecteur contrainte tangentielle en fonction des paramètres de contact [16, 17, 18].

$$\tau = \tau(X, Y, Z, W, t)$$

[Tapez un texte]

X : Variables thermomécaniques, contraintes normales, vitesses de glissement, température.

Y : Rhéologie de l'outil et de la pièce déformée, module de Young, coefficient de poisson, contrainte d'écoulement.

Z : Etat de surface, rugosité, composition chimique, énergie de surface...

W : Dans le cas d'un contact lubrifié, propriétés du lubrifiant, son mode d'alimentation, ses additifs, etc....

t : Temps.

En vérité, il n'existe pas de lois de frottement permettant de prendre en considération de façon rigoureuse tous ces paramètres. Il s'agira dans la réalité d'utiliser des modèles tenant compte des paramètres jugés essentiels que l'on intégrera. Ces modèles feront intervenir des constantes adimensionnelles appelés coefficient de frottement qui est déterminé expérimentalement [17]. Il traduit l'influence des paramètres cachés, c'est à dire ceux qui ne sont pas explicitement intégrés à la loi.

Une loi de frottement peut être isotrope ou anisotrope. Pour notre part, nous travaillerons dans le premier cadre, c'est à dire que la contrainte tangentielle et la vitesse de glissement ont les mêmes directions .

En mise en forme, on peut utiliser plusieurs modèles de frottement selon la nature et la complexité des phénomènes mises en jeu.

Nous présentons dans ce qui suit les modèles les plus usités que nous implantons dans notre programme de calcul. On distingue trois grandes classes de modèles. Les modèles plastiques, viscoplastiques et régularisés.

2.4.5.1 Modèles de frottements plastiques :

Ils découlent des lois de comportement plastiques. Ainsi, on retrouve les mêmes hypothèses et donc les mêmes conséquences par rapport à la sensibilité de la réponse vis-à-vis des vitesses. C'est-à-dire que la contraintes de frottement ne dépendra pas des vitesses en termes de module, mais seront fonction des vitesses pour la direction et le sens.

A. LOI DE COULOMB

C'est la transcription surfacique du modèle rhéologique de Coulomb. Elle se caractérise par l'intervention de la contrainte normale σ_n [17].

[Tapez un texte]

$$\begin{cases} \text{Si } \tau < \mu \sigma_n \rightarrow v_g = 0 \\ \text{Si } \tau = \mu \sigma_n \rightarrow \exists \lambda \text{ tel que } v_g = -\lambda \tau \\ \tau > \mu \sigma_n : \text{impossible} \end{cases}$$

μ est un coefficient qui permet de prendre en considération l'influence des paramètres cachés.

Lors de l'application de cette loi, deux choix sont possibles :

a. $\tau = \mu \sigma_n$

b. $\tau = \min \left\{ \mu \sigma_n, \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \right\}$

Les deux choix sont cohérents et souvent utilisés, nous utiliserons pour notre part la deuxième du fait qu'elle est plus ouverte dans les modèles numériques. La prise en compte de la vitesse de glissement nous amène à adopter l'écriture suivante:

$$\tau = -\min \left\{ \mu \sigma_n, \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \right\} \frac{\bar{v}_g}{|\bar{v}_g|}$$

B. LOI DE TRESCA:

C'est une loi qui dérive directement des lois de plasticité de Tresca et de Von-Misés [17].

$$\tau = -m \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \frac{\bar{v}_g}{|\bar{v}_g|}, \quad 0 \leq m \leq 0.85 [17]$$

$$\begin{cases} \text{Si } \tau = 0 \rightarrow v_g = 0 \\ \text{Si } \tau = \mp m \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \rightarrow \exists \lambda \text{ tel que } v_g = -\lambda \tau \\ \tau > m \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \text{ impossible} \end{cases}$$

Un élément fondamental commun à ces deux précédentes lois est qu'ils sont tirés de critères de plasticité et donc présentent la notion de seuil et de critère. Ce qui caractérise les lois de type plastique.

Afin d'éliminer la notion de domaine interdit ($\tau > \tau_c$), on passe aux lois viscoplastiques.

2.4.5.2. Modèles de frottements viscoplastiques :

Sur la base des lois de comportement viscoplastiques qui éliminent la notion de domaine interdit (la contrainte est d'autant plus forte que la vitesse de déformation est grande), a été construit son homologue en terme de comportement de surface. Cela donne une loi de

[Tapez un texte]

frottement viscoplastique [16, 17]. La loi viscoplastique la plus usitée en mise en forme est celle de Norton Hoff.

Elle est fondée sur une analogie avec la loi puissance de fluage.

$$\tau = -\alpha \cdot v_g^p$$

Il existe une forme particulière de cette loi qui est donnée par sa linéarisation, c'est le cas visqueux newtonien qui donne $\tau = -\alpha \cdot v_g$.

On peut aussi écrire la loi viscoplastique de la façon suivante : $\tau = \tau_c \left(\frac{v_g}{v_{ref}} \right)^p$

Où v_{ref} est une vitesse de référence. Pour le cas du laminage, on peut la prendre égale à la vitesse des cylindres de travail. τ_c est calculée par la loi de Coulomb ou de Tresca.

μ, α et p dépendent des paramètres cachés que sont la température, la rugosité, les lubrifiants [17] etc....

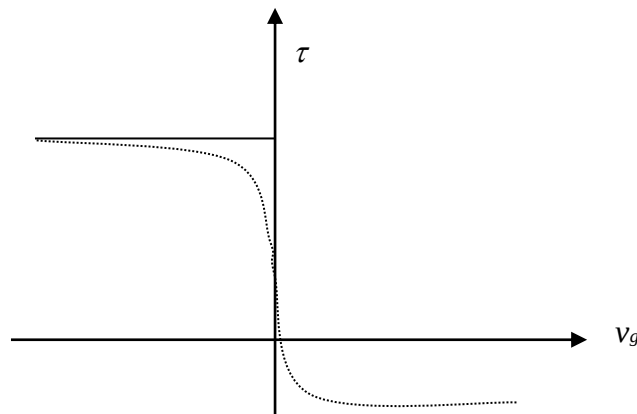


Figure 02 : Contrainte de frottement en fonction de la vitesse de glissement

- Frottement plastique
- Frottement viscoplastique

2.4 .5.3.Modèles régularisés :

[Tapez un texte]

Les lois de frottement sec (Coulomb et Tresca) donnent une discontinuité au point neutre. Pour lever cette difficulté, on remplace la relation $\tau(v_g)$ par un lissage continu. Cela donne une relation de type $\tau = \tau_c f(v_g)$ où $f(v_g)$ est une fonction continue et dérivable en tout point. Notons que cette démarche est purement numérique (artifice numérique) et qu'elle est dénuée de sens physique, ce qui n'est pas le cas des lois viscoplastiques. La littérature donne plusieurs propositions pour cette régularisation [18].

Proposition de Kobayashi:

$$\tau = \tau_c \arctg\left(\frac{v_g}{K}\right)$$

τ_c est calculé dans le cadre d'un modèle de frottement sec.

K est une constante physique déterminée expérimentalement.

Proposition de Gratacos:

$$\tau = \tau_c \frac{v_g}{\sqrt{v_g^2 + K^2}} \frac{\sigma_n}{\sqrt{\sigma_n^2 + K'^2}}$$

Où $K' \rightarrow 1$ si $\sigma_n \gg K'$, ce modèle est une extension au modèle de Kobayashi.

Il répond à l'observation expérimentale [17] qui conclut que pour de faibles contraintes normales, l'influence de σ_n sur τ ne peut être négligé. $\tau_c = m \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}$.

Les modèles de frottement que nous venons de présenter seront programmés dans une unité à part. Son architecture permettra de l'utiliser dans différents programmes traitant les problèmes de mise en forme. Pour notre part, le caractère ouvert du programme principal facilitera l'implantation du modèle de frottement choisit.

Notons par ailleurs que le frottement est utilisé comme paramètre d'ajustement.

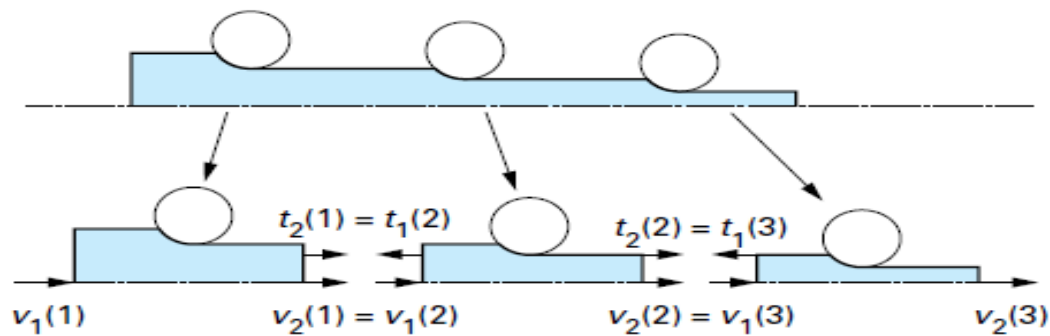
La critique principale que nous pouvons porter à ces modèles est la non prise en compte explicite de la lubrification.

2.5.Couplage entre cages

Lors d'un laminage tandem (c'est-à-dire que le produit est en prise simultanément dans plusieurs cages), des tensions se créent inévitablement entre les cages, du fait du différentiel de vitesse.

[Tapez un texte]

Remarquons qu'il faut toujours éviter la mise en compression des inters cages ou la tôle plierait, mais aussi une traction excessive qui la strictionnerait. On a d'autre part besoin de connaître ces tensions inter cages (non réglée) pour calculer les efforts et couples de chaque cage, M. Pierre Montmitonet à donner une méthode de détermination de ces tensions [26].



Fifigure III.1.-Découplage des calculs multi cages. Condition cinématique et mécanique

La figure n°1 expose le problème sous sa forme la plus simple : trois cages en interaction ; la nature du produit importe peu. Le calcul de chaque cage fait intervenir, comme des condition aux limites, des tractions imposées, supposées homogènes sur les sections d'entrée et de sortie, soit $t_1(i)$ et $t_2(i)$ [$i=1,2,3$]. Evidement $t_2(i) = t_1(i+1)$ pour $i=1$ ou 2 .

La méthode des tranches peut donner le point neutre de chaque cage ce que donne l'accès aux vitesses $v_1(i)$ et $v_2(i)$. On doit bien entendu, d'un point de vue physique, respecter les condition : $v_2(i) = v_1(i+1)$ pour $i=1$ ou 2(1)

On initialise un calcul itératif avec des valeurs arbitraire des $t_1(i)$ et $t_2(i)$,

Comme ce ne sont certainement pas les bonnes, la condition (1) ne sera pas respectée et il nous faut calculer les corrections Δt à appliquer pour l'obtenir à une précision demandée près. Prenons l'inter cage (1-2) par exemple, et supposons obtenues, à un certain stade, des approximations $v_2(1)$ [fonction de $t_1(1)$ et $t_2(1)$] et $v_1(2)$ [fonction de $t_1(2)$ et $t_2(2)$] .Linéarisons par une méthode de newton, en écrivant que :

[Tapez un texte]

$$\begin{aligned}
 v_2(1) + \Delta v_2(1) &= v_2(1) + \frac{\partial v_2(1)}{\partial t_1(1)} \Delta t_1(1) + \frac{\partial v_2(1)}{\partial t_2(1)} \Delta t_2(1) \\
 &= v_1(2) + \frac{\partial v_1(2)}{\partial t_1(2)} \Delta t_1(2) + \frac{\partial v_1(2)}{\partial t_2(2)} \Delta t_2(2) \\
 &= v_1(2) + \Delta v_1(2)
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} v_2(1) + \Delta v_2(1) &= v_2(1) + \frac{\partial v_2(1)}{\partial t_1(1)} \Delta t_1(1) + \frac{\partial v_2(1)}{\partial t_2(1)} \Delta t_2(1) \\ &= v_1(2) + \frac{\partial v_1(2)}{\partial t_1(2)} \Delta t_1(2) + \frac{\partial v_1(2)}{\partial t_2(2)} \Delta t_2(2) \\ &= v_1(2) + \Delta v_1(2) \end{aligned}} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

Ce qui compte tenu de $\Delta t_2(1) = \Delta t_1(2)$ et du fait que $t_1(1)$ et $t_2(3)$ sont en général imposées, donc $\Delta t_1(1) = \Delta t_2(3) = 0$, donne :

$$\left(\frac{\partial v_2(1)}{\partial t_2(1)} - \frac{\partial v_1(2)}{\partial t_1(2)} \right) \Delta t_2(1) - \frac{\partial v_1(2)}{\partial t_2(2)} \Delta t_2(2) = V_1(2) - V_2(1) \dots\dots\dots (3)$$

Et pour l'intercage (2-3) :

$$\frac{\partial v_2(2)}{\partial t_1(2)} \Delta t_1(2) + \left(\frac{\partial v_2(2)}{\partial t_2(2)} - \frac{\partial v_1(3)}{\partial t_1(3)} \right) \Delta t_2(2) = V_1(3) - V_2(2) \dots\dots\dots (4)$$

La forme matricielle $\Delta \underline{t} = \underline{M}^{-1} \cdot \Delta \underline{V}$

$$\begin{pmatrix} \Delta t_2(1) \\ \Delta t_2(2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial v_2(1)}{\partial t_2(1)} - \frac{\partial v_1(2)}{\partial t_1(2)} & \frac{\partial v_1(2)}{\partial t_2(2)} \\ \frac{\partial v_2(2)}{\partial t_1(2)} & \frac{\partial v_2(2)}{\partial t_2(2)} - \frac{\partial v_1(3)}{\partial t_1(3)} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} V_1(2) - V_2(1) \\ V_1(3) - V_2(2) \end{pmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

2.6. Conclusion

Cette étude bibliographique nous a permis d'étudier les bases de la plasticité, aussi bien physique que mécanique et son application au laminage des tôlés.

Il en ressort que pour modéliser le laminage, nous devons étudier avec soin trois aspects.

[Tapez un texte]

Le premier concerne la présentation mécanique du problème étudié en fonction des dimensions du laminé afin de poser le tenseur des contraintes des déformations ainsi que les équations d'équilibre sans risque d'erreurs conséquentes.

Le second concerne la loi de comportement et sa formulation au cadre de laminage.

Le troisième concerne la loi de frottement. Comme cette dernière est très compliquée à écrire de façon rigoureuse, le choix du modèle se fait intuitivement sur la base des aspects physiques gouvernants le frottement et jugés essentiels. Comme très souvent en mise en forme, le frottement sera utilisé comme paramètre d'ajustement de nos résultats.

A la fin on a présenté le modèle de pierre Montmitonet qui montre le calcul tension –vitesse dans un laminoir tandem de trois cages, notre contribution est présentée dans le dernier chapitre.

[Tapez un texte]

CONCLUSION

Les travaux présentés dans ce mémoire portent essentiellement sur l'amélioration des modèles simplifiés classiques du laminage.

Pour cet objectif, nous avons construit des modèles simplifiés semi-analytiques qui prennent en compte les déformations plastiques des tôles avec écrouissage, les déformations élastiques des cylindres et la régulation des tensions entre les cages.

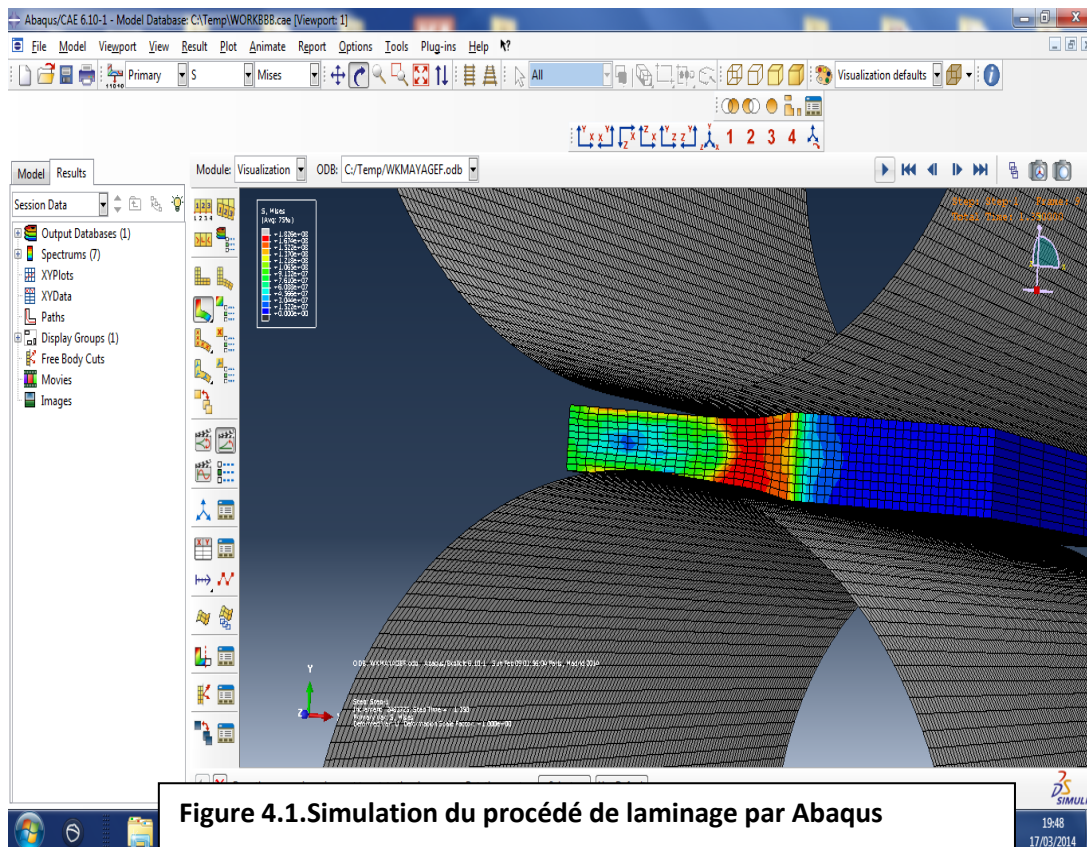
Après une description succincte de l'historique et des progrès réalisés dans le laminage continu ou laminage tandem, nous avons introduit les notions de base de la théorie de la plasticité et son application au processus de laminage.

L'application de la méthode des tranches combinée à la prise en compte de l'élasticité des cylindres nous a permis de mettre au point un modèle simple, rapide d'exécution et ouvert aux progrès réalisés en mise en forme tant dans les lois de comportements volumiques que surfaciques. La comparaison des résultats de notre modèle avec LAM3 ont confirmé sa fiabilité.

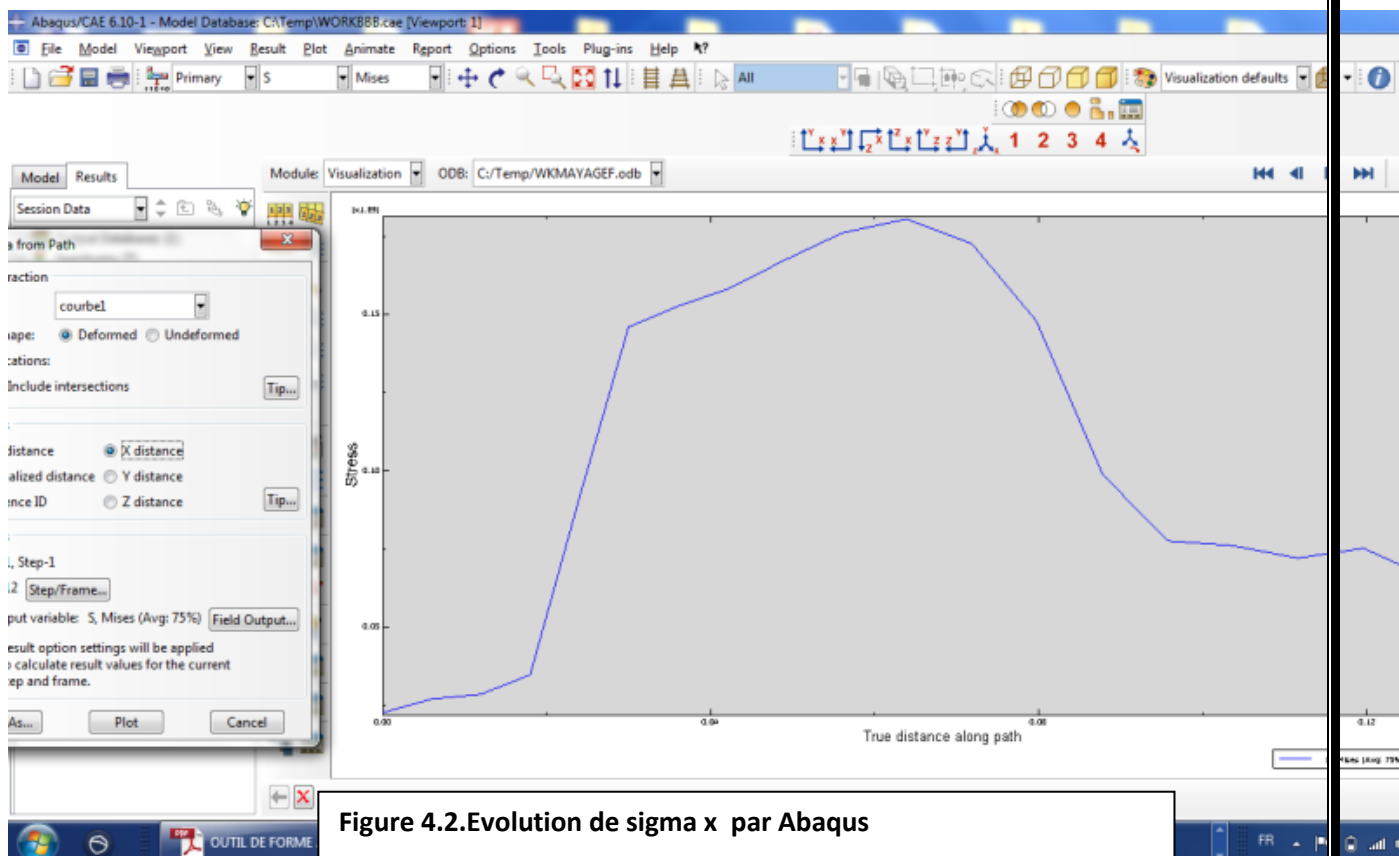
Nous avons aussi mis au point un modèle qui permet de rectifier les tensions inter-cages pour obtenir des vitesses de sorties pour chaque cage égales aux vitesses d'entrées de la cage suivante. Ce modèle s'appuie sur les développements déjà faits par P.Montmitonnet pour trois cages. Notre contribution a consisté à généraliser ses résultats. Nous obtenons ainsi un modèle utilisable quelque-soit pour le nombre de cage. Ce modèle utilise un développement de Newton sous environnement Matlab.

Il en résulte un code fiable que nous pouvons recommander aux industriels.

[Tapez un texte]

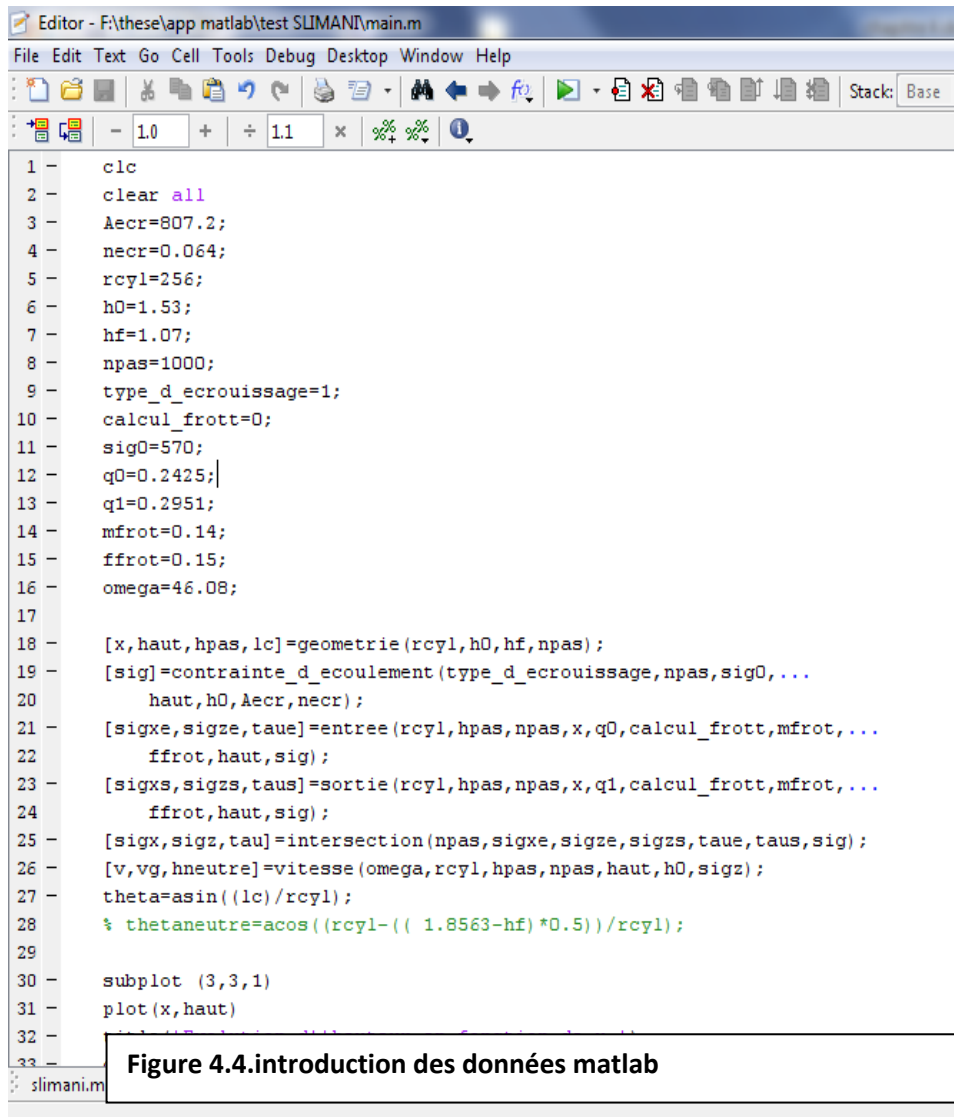


Variation de la contrainte de vonmises selon X ($\partial\sigma/\partial x$)





[Tapez un texte]



The image shows a MATLAB editor window titled 'Editor - F:\these\app matlab\test SLIMANI\main.m'. The window contains a script with 33 lines of MATLAB code. The code defines various parameters and calls several functions. A text box with the caption 'Figure 4.4.introduction des données matlab' is overlaid on the bottom right of the code area.

```
1 - clc
2 - clear all
3 - Aecr=807.2;
4 - necr=0.064;
5 - rcyl=256;
6 - h0=1.53;
7 - hf=1.07;
8 - npas=1000;
9 - type_d_ecrouissage=1;
10 - calcul_frott=0;
11 - sig0=570;
12 - q0=0.2425;
13 - q1=0.2951;
14 - mfrot=0.14;
15 - ffrot=0.15;
16 - omega=46.08;
17
18 - [x,haut,hpas,lc]=geometrie(rcyl,h0,hf,npas);
19 - [sig]=contrainte_d_ecoulement(type_d_ecrouissage,npas,sig0,...
20     haut,h0,Aecr,necr);
21 - [sigxe,sigze,taue]=entree(rcyl,hpas,npas,x,q0,calcul_frott,mfrot,...
22     ffrot,haut,sig);
23 - [sigxs,sigzs,taus]=sortie(rcyl,hpas,npas,x,q1,calcul_frott,mfrot,...
24     ffrot,haut,sig);
25 - [sigx,sigz,tau]=intersection(npas,sigxe,sigze,sigzs,taue,taus,sig);
26 - [v,vg,hneutre]=vitesse(omega,rcyl,hpas,npas,haut,h0,sigz);
27 - theta=asin((lc)/rcyl);
28 - % thetaneutre=acos((rcyl-((1.8563-hf)*0.5))/rcyl);
29
30 - subplot(3,3,1)
31 - plot(x,haut)
32 -
33 -
```

slimani.m

Figure 4.4.introduction des données matlab

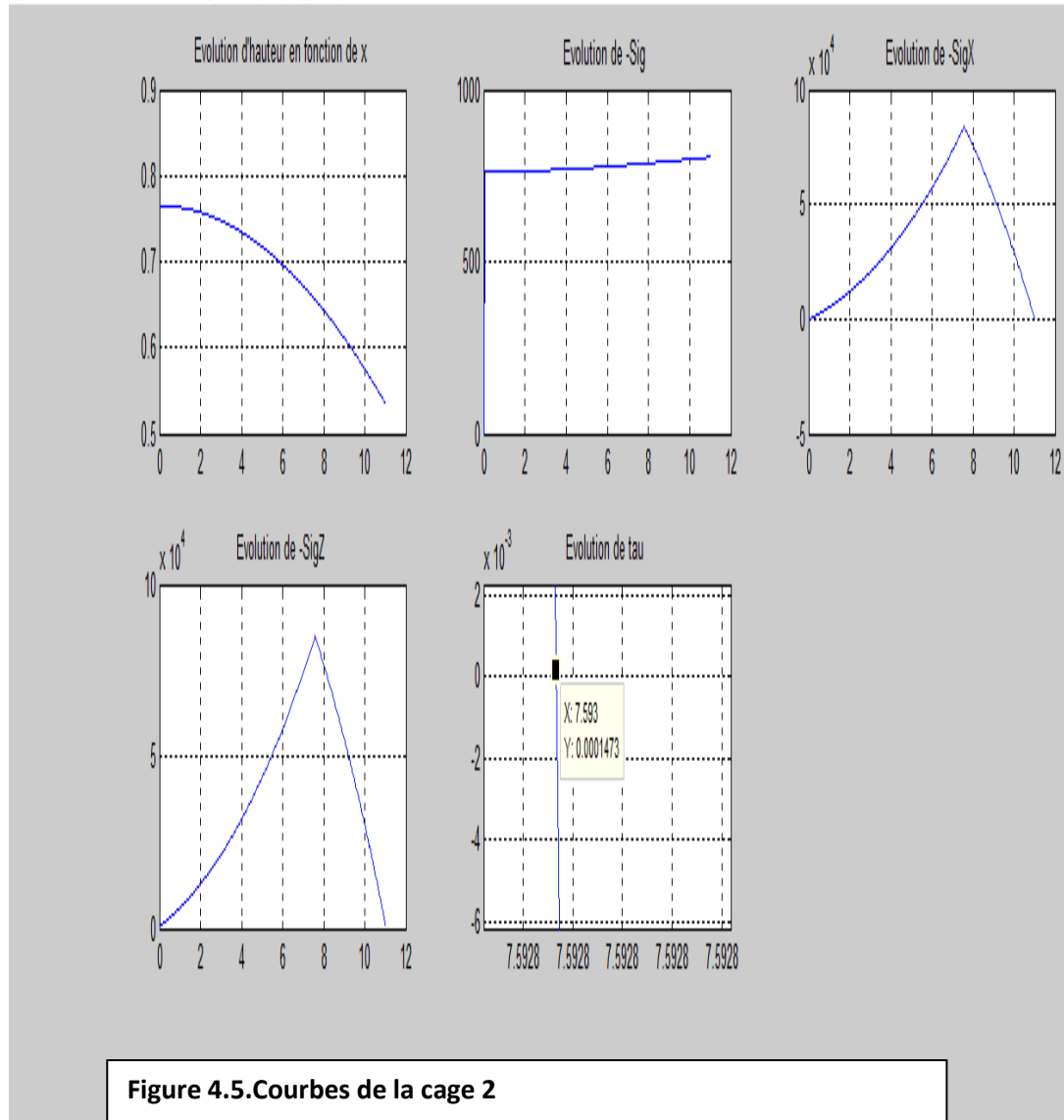
[Tapez un texte]

Figure 1

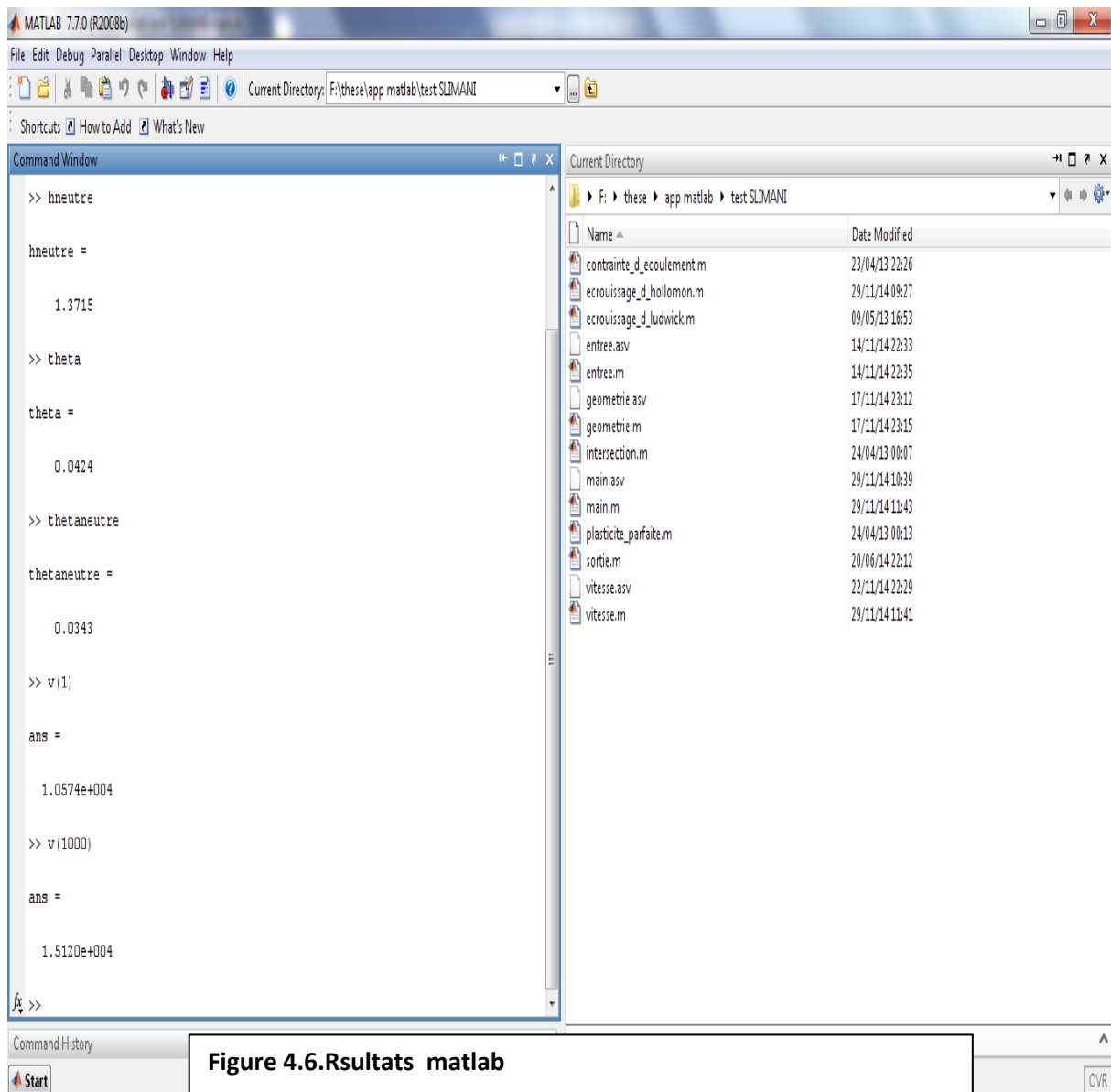
File Edit View Insert Tools Desktop Window Help



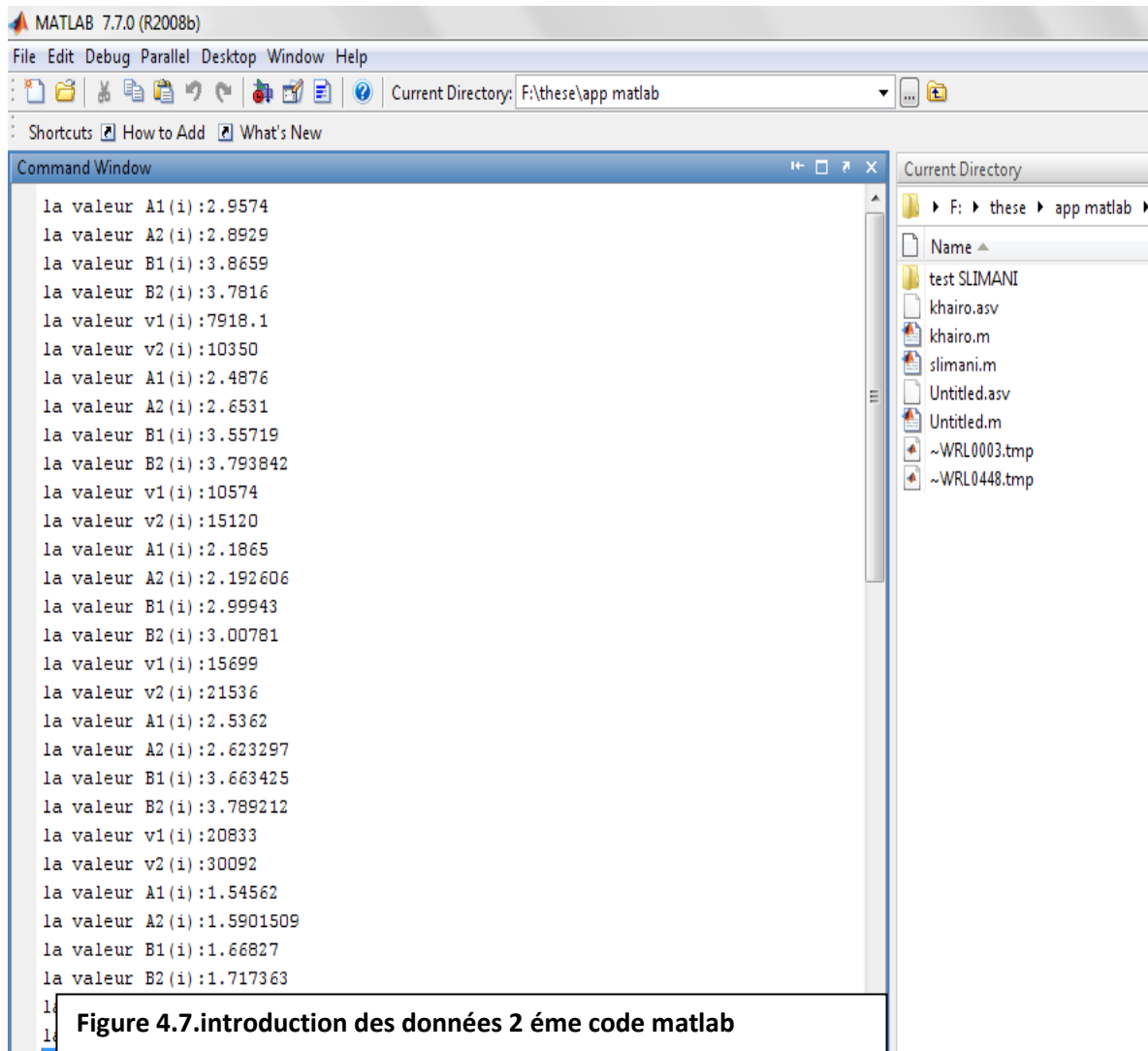
Note new toolbar buttons: [data brushing](#) & [linked plots](#) [Play video](#)



[Tapez un texte]



[Tapez un texte]



[Tapez un texte]



The image shows a MATLAB Editor window titled "Editor - F:\these\app matlab\test SLIMANI\main.m*". The window has a menu bar (File, Edit, Text, Go, Cell, Tools, Debug, Desktop, Window, Help) and a toolbar with various icons. Below the toolbar is a numeric keypad with values 1.0, 1.1, and mathematical symbols. The main area contains a script with 33 lines of code. The script defines several variables and calls several functions. The functions are: geometrie, contrainte_d_ecoulement, entree, sortie, intersection, and vitesse. The script also includes a subplot and a plot command. The title of the plot is "Evolution d'hauteur en fonction de x". The script ends with a comment "grid on".

```
1 - clc
2 - clear all
3 - Aecr=663;
4 - necr=0.125;
5 - rcyl=281;
6 - h0=2;
7 - hf=1.53;
8 - npas=1000;
9 - type_d_ecrouissage=1;
10 - calcul_frott=0;
11 - sig0=387.15;
12 - q0=0.37;
13 - q1=0.35;
14 - mfrot=0.15;
15 - ffrot=0.15;
16 - omega=30.36;
17
18 - [x,haut,hpas,lc]=geometrie(rcyl,h0,hf,npas);
19 - [sig]=contrainte_d_ecoulement(type_d_ecrouissage,npas,sig0,...
20     haut,h0,Aecr,necr);
21 - [sigxe,sigze,taue]=entree(rcyl,hpas,npas,x,q0,calcul_frott,mfrot,...
22     ffrot,haut,sig);
23 - [sigxs,sigzs,taus]=sortie(rcyl,hpas,npas,x,q1,calcul_frott,mfrot,...
24     ffrot,haut,sig);
25 - [sigx,sigz,tau]=intersection(npas,sigxe,sigze,sigzs,taue,taus,sig);
26 - [v,vg,hneutre]=vitesse(omega,rcyl,hpas,npas,haut,h0,sigz);
27 - theta=asin((lc)/rcyl);
28 - % thetaneutre=acos((rcyl-((0.4812-hf)*0.5))/rcyl);
29
30 - subplot(3,3,1)
31 - plot(x,haut)
32 - title('Evolution d'hauteur en fonction de x ')
33 - grid on
```

The taskbar at the bottom shows several open files: slimani.m, khairo.m, entree.m, vitesse.m, main.m* (active), Untitled.m, intersection.m, and contrainte_d_ecoulement.m.

Editor - F:\these\app matlab\test SLIMANI\main.m

File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help

Stack: Base

1 - clc
 2 - clear all
 3 - Aecr=807.2;
 4 - necr=0.064;
 5 - rcyl=256;
 6 - h0=1.53;
 7 - hf=1.07;
 8 - npas=1000;
 9 - type_d_ecrouissage=1;
 10 - calcul_frott=0;
 11 - sig0=570;
 12 - q0=0.2425;
 13 - q1=0.2951;
 14 - mfrot=0.14;
 15 - ffrot=0.15;
 16 - omega=46.08;
 17
 18 - [x,haut,hpas,lc]=geometrie(rcyl,h0,hf,npas);
 19 - [sig]=contrainte_d_ecoulement(type_d_ecrouissage,npas,sig0,...
 20 - haut,h0,Aecr,necr);
 21 - [sigxe,sigze,taue]=entree(rcyl,hpas,npas,x,q0,calcul_frott,mfrot,...
 22 - ffrot,haut,sig);
 23 - [sigxs,sigzs,taus]=sortie(rcyl,hpas,npas,x,q1,calcul_frott,mfrot,...
 24 - ffrot,haut,sig);
 25 - [sigx,sigz,tau]=intersection(npas,sigxe,sigze,sigzs,taue,taus,sig);
 26 - [v,vg,hneutre]=vitesse(omega,rcyl,hpas,npas,haut,h0,sigz);
 27 - theta=asin((lc)/rcyl);
 28 - % thetaneutre=acos((rcyl-((1.8563-hf)*0.5))/rcyl);
 29
 30 - subplot(3,3,1)
 31 - plot(x,haut)
 32 - title('Evolution d''hauteur en fonction de x')
 33 - grid on

slimani.m x khairo.m x entree.m x vitesse.m x main.m x Untitled.m x intersection.m x contrain

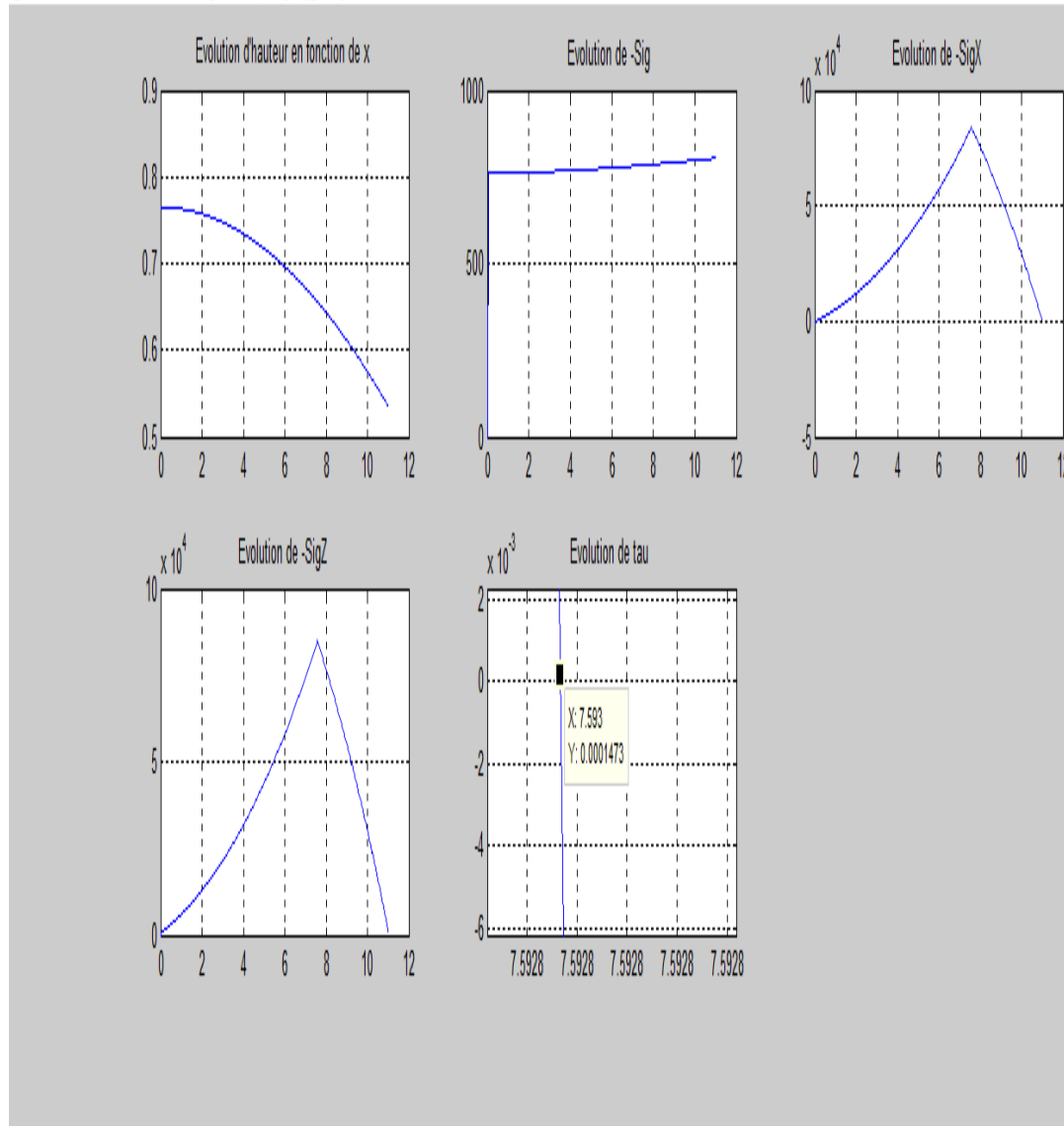
[Tapez un texte]

Figure 1

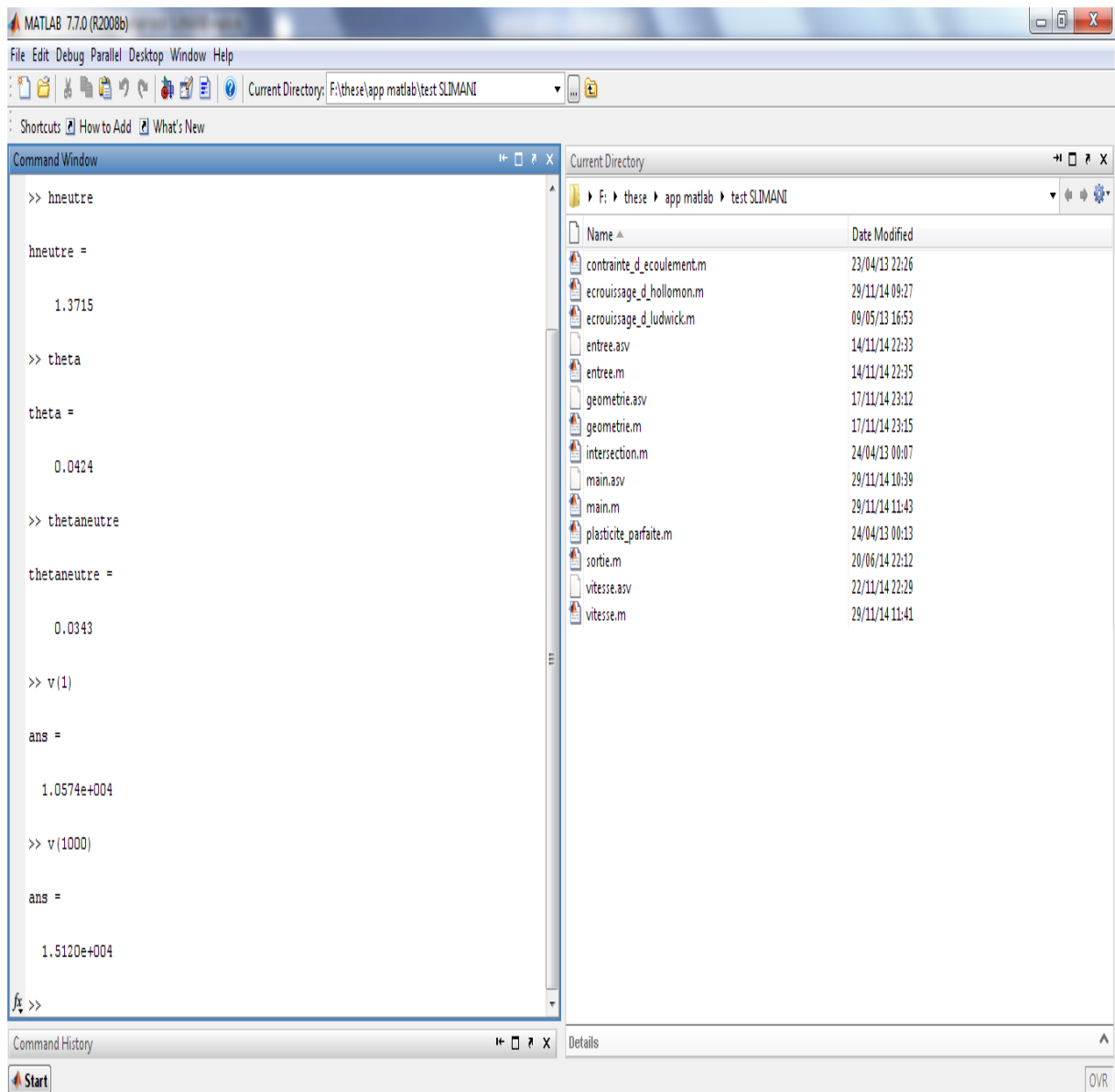
File Edit View Insert Tools Desktop Window Help



Note new toolbar buttons: [data brushing](#) & [linked plots](#) [Play video](#)



[Tapez un texte]



The screenshot shows a MATLAB editor window with the following script content:

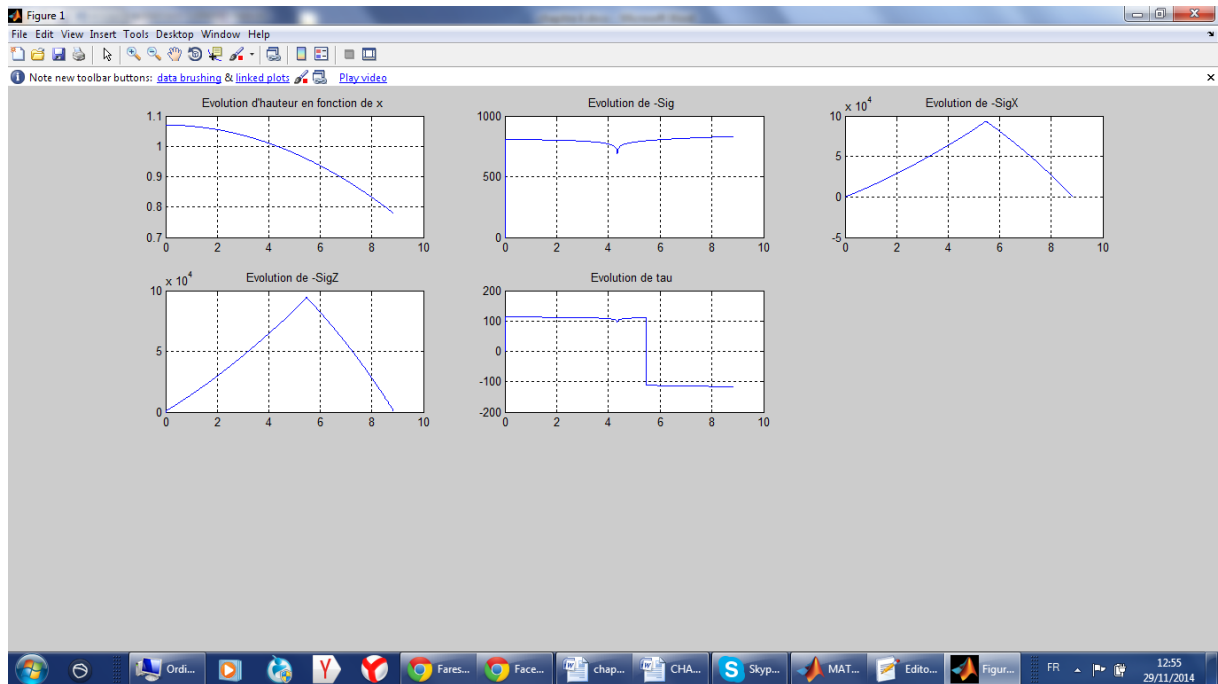
```

1 - clc
2 - clear all
3 - Aecr=843.2;
4 - necr=0.024;
5 - rcyl=270;
6 - h0=1.07;
7 - hf=0.78;
8 - npas=1000;
9 - type_d_ecrouissage=1;
10 - calcul_frott=0;
11 - sig0=720;
12 - q0=0.2371;
13 - q1=0.2396;
14 - mfrot=0.14;
15 - ffrot=0.15;
16 - omega=64.87;
17
18 - [x,haut,hpas,lc]=geometrie(rcyl,h0,hf,npas);
19 - [sig]=contrainte_d_ecoulement(type_d_ecrouissage,npas,sig0,...
20 -     haut,h0,Aecr,necr);
21 - [sigxe,sigze,taue]=entree(rcyl,hpas,npas,x,q0,calcul_frott,mfrot,...
22 -     ffrot,haut,sig);
23 - [sigxs,sigzs,taus]=sortie(rcyl,hpas,npas,x,q1,calcul_frott,mfrot,...
24 -     ffrot,haut,sig);
25 - [sigx,sigz,tau]=intersection(npas,sigxe,sigze,sigzs,taue,taus,sig);
26 - [v,vg,hneutre]=vitesse(omega,rcyl,hpas,npas,haut,h0,sigz);
27 - theta=asin((lc)/rcyl);
28 - thetaneutre=acos((rcyl-((0.9591-hf)*0.5))/rcyl);
29
30 - subplot(3,3,1)
31 - plot(x,haut)
32 - title('Evolution d''hauteur en fonction de x ')
33 - grid on

```

The window title is "Editor - F:\these\app matlab\test SLIMANT\main.m". The toolbar includes standard MATLAB editing tools. The status bar at the bottom shows the current file "main.m" and other open files: "slimani.m", "khairou.m", "entree.m", "vitesse.m", "Untitled.m", "intersection.m", and "contrain".

[Tapez un texte]



MATLAB 7.7.0 (R2008b) Command Window and Current Directory window.

Command Window:

```
>> hneutre  
  
hneutre =  
  
    0.9591  
  
>> theta  
  
theta =  
  
    0.0328  
  
>> thetaneutre  
  
thetaneutre =  
  
    0.0258  
  
>> v(1)  
  
ans =  
  
    1.5699e+004  
  
>> v(1000)  
  
ans =  
  
    2.1536e+004
```

Current Directory: F:\these\app matlab\test SLIMANI

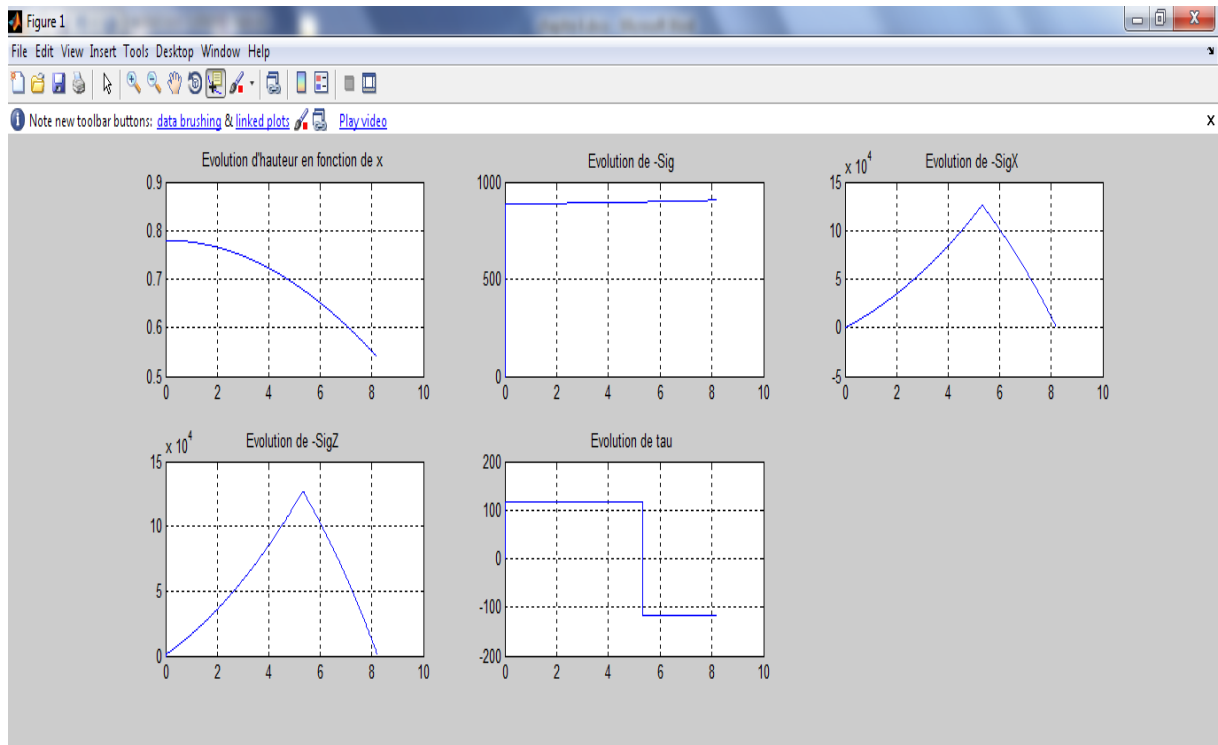
Name	Date Modified
contrainte_d_ecoulement.m	23/04/13 22:26
ecrouissage_d_hollomon.m	29/11/14 09:27
ecrouissage_d_ludwick.m	09/05/13 16:53
entree.asv	14/11/14 22:33
entree.m	14/11/14 22:35
geometrie.asv	17/11/14 23:12
geometrie.m	17/11/14 23:15
intersection.m	24/04/13 00:07
main.asv	29/11/14 12:49
main.m	29/11/14 12:53
plasticite_parfaite.m	24/04/13 00:13
sortie.m	20/06/14 22:12
vitesse.asv	22/11/14 22:29
vitesse.m	29/11/14 12:52

```

1 - clc
2 - clear all
3 - Aecr=894.5;
4 - necr=0.022;
5 - rcyl=281;
6 - h0=0.78;
7 - hf=0.54;
8 - npas=1000;
9 - type_d_ecrouissage=1;
10 - calcul_frott=0;
11 - sig0=756;
12 - q0=0.2282;
13 - q1=0.2590;
14 - mfrot=0.13;
15 - ffrot=0.15;
16 - omega=85.18;
17
18 - [x,haut,hpas,lc]=geometrie(rcyl,h0,hf,npas);
19 - [sig]=contrainte_d_ecoulement(type_d_ecrouissage,npas,sig0,...
20     haut,h0,Aecr,necr);
21 - [sigxe,sigze,taue]=entree(rcyl,hpas,npas,x,q0,calcul_frott,mfrot,...
22     ffrot,haut,sig);
23 - [sigxs,sigzs,taus]=sortie(rcyl,hpas,npas,x,q1,calcul_frott,mfrot,...
24     ffrot,haut,sig);
25 - [sigx,sigz,tau]=intersection(npas,sigxe,sigze,sigzs,taue,taus,sig);
26 - [v,vg,hneutre]=vitesse(omega,rcyl,hpas,npas,haut,h0,sig);
27 - theta=asin(lc/rcyl);
28 - thetaneutre=acos((rcyl-((0.6789-hf)*0.5))/rcyl);
29
30 - subplot(3,3,1)
31 - plot(x,haut)
32 - title('Evolution d\'hauteur en fonction de x ')
33 - grid on

```

[Tapez un texte]



MATLAB 7.7.0 (R2008b)

File Edit Debug Parallel Desktop Window Help

Current Directory: F:\these\app matlab\test SLIMANI

Shortcuts: [How to Add](#) [What's New](#)

Command Window

```
>> hneutre  
  
hneutre =  
  
    0.6789  
  
>> theta  
  
theta =  
  
    0.0292  
  
>> thetaneutre  
  
thetaneutre =  
  
    0.0222  
  
>> v(1)  
  
ans =  
  
    2.0833e+004  
  
>> v(1000)  
  
ans =  
  
    3.0092e+004  
  
fx >>
```

Current Directory

F:\these\app matlab\test SLIMANI

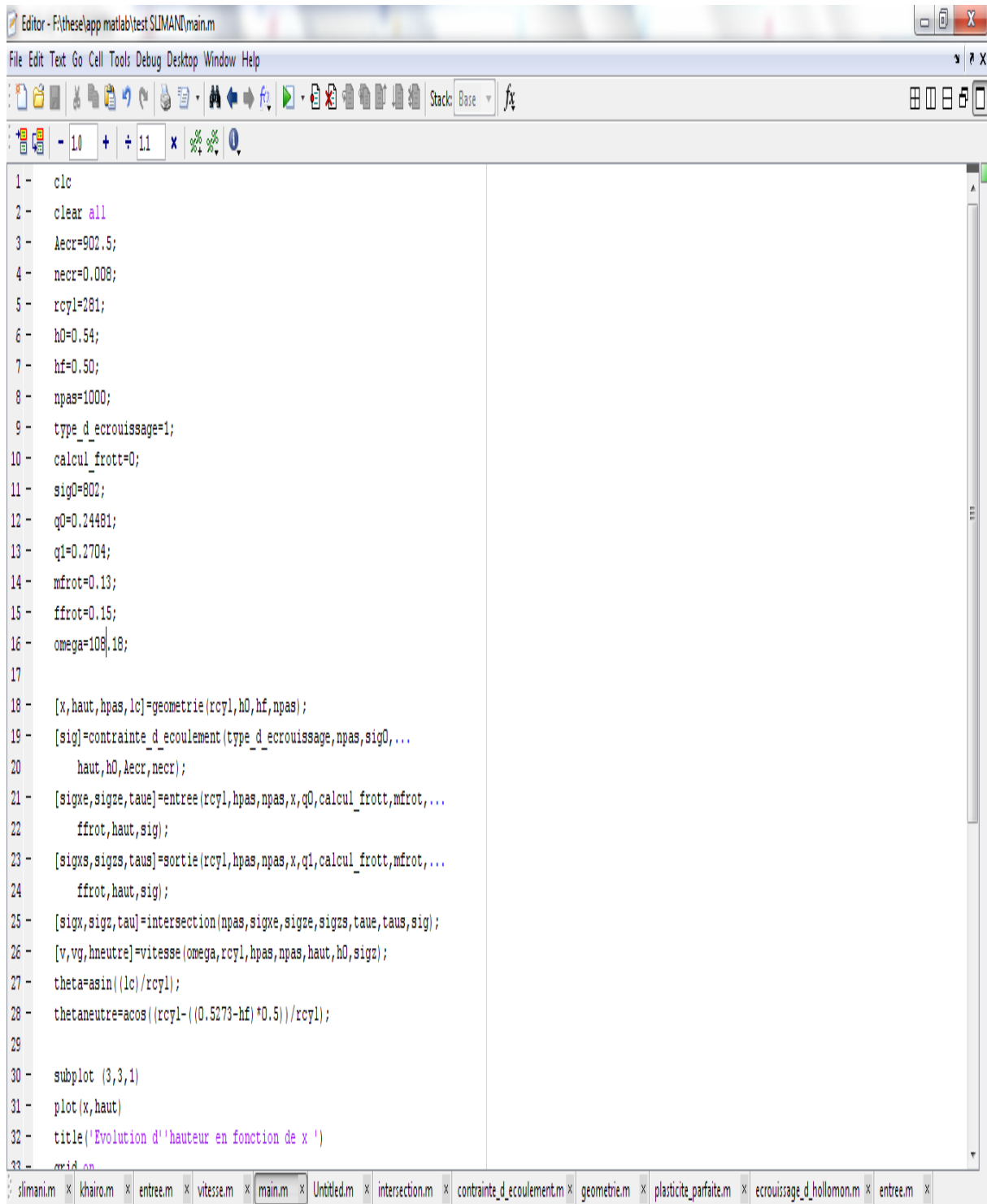
Name	Date Modified
contrainte_d_ecoulement.m	23/04/13 22:26
ecrouissage_d_hollomon.m	29/11/14 09:27
ecrouissage_d_ludwick.m	09/05/13 16:53
entree.asv	14/11/14 22:33
entree.m	14/11/14 22:35
geometrie.asv	17/11/14 23:12
geometrie.m	17/11/14 23:15
intersection.m	24/04/13 00:07
main.asv	29/11/14 13:29
main.m	29/11/14 13:34
plasticite_parfaite.m	24/04/13 00:13
sortie.m	20/06/14 22:12
vitesse.asv	22/11/14 22:29
vitesse.m	29/11/14 13:32

Command History

Start

OVR

[Tapez un texte]

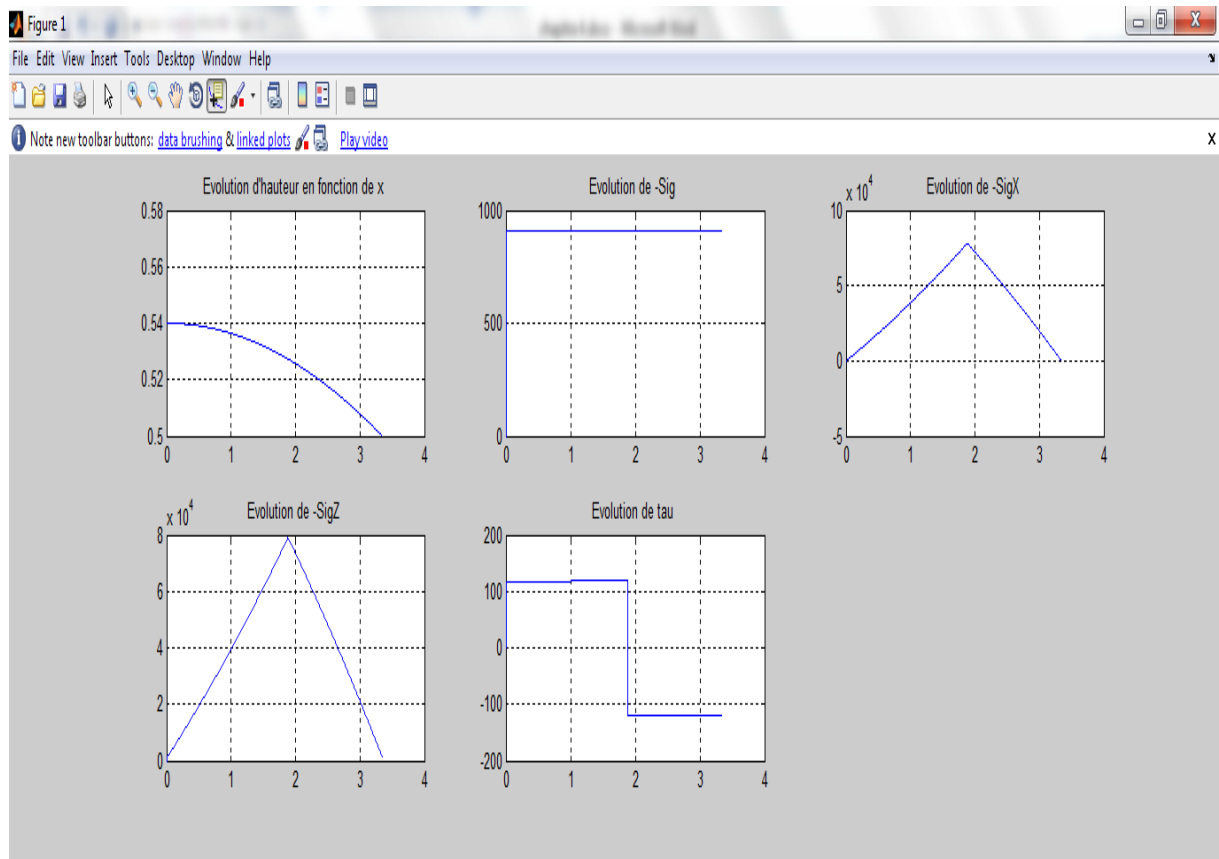


```
Editor - F:\these\app matlab\test SLIMANI\main.m
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
[Icons] Stack: Base fx
- 1.0 + 1.1 x % % % % 0

1 - clc
2 - clear all
3 - Aecr=902.5;
4 - necr=0.008;
5 - rcyl=281;
6 - h0=0.54;
7 - hf=0.50;
8 - npas=1000;
9 - type_d_ecrouissage=1;
10 - calcul_frott=0;
11 - sig0=802;
12 - q0=0.24481;
13 - q1=0.2704;
14 - mfrot=0.13;
15 - ffrot=0.15;
16 - omega=108.18;
17
18 - [x,haut,hpas,lc]=geometrie(rcyl,h0,hf,npas);
19 - [sig]=contrainte_d_ecoulement(type_d_ecrouissage,npas,sig0,...
20     haut,h0,Aecr,necr);
21 - [sigxe,sigze,taue]=entree(rcyl,hpas,npas,x,q0,calcul_frott,mfrot,...
22     ffrot,haut,sig);
23 - [sigxs,sigzs,taus]=sortie(rcyl,hpas,npas,x,q1,calcul_frott,mfrot,...
24     ffrot,haut,sig);
25 - [sigx,sigz,tau]=intersection(npas,sigxe,sigze,sigzs,taue,taus,sig);
26 - [v,vg,hneutre]=vitesse(omega,rcyl,hpas,npas,haut,h0,sigz);
27 - theta=asin((lc)/rcyl);
28 - thetanentre=acos((rcyl-((0.5273-hf)*0.5))/rcyl);
29
30 - subplot(3,3,1)
31 - plot(x,haut)
32 - title('Evolution d''hauteur en fonction de x ')
33 - axis on

slimani.m x khairo.m x entree.m x vitesse.m x main.m x Untitled.m x intersection.m x contrainte_d_ecoulement.m x geometrie.m x plasticite_parfaite.m x ecrouissage_d_hollomon.m x entree.m x
```

[Tapez un texte]



[Tapez un texte]

The image shows the MATLAB 7.7.0 (R2008b) interface. The top menu bar includes File, Edit, Debug, Parallel, Desktop, Window, and Help. The toolbar contains icons for file operations and debugging. The Command Window on the left displays the following commands and outputs:

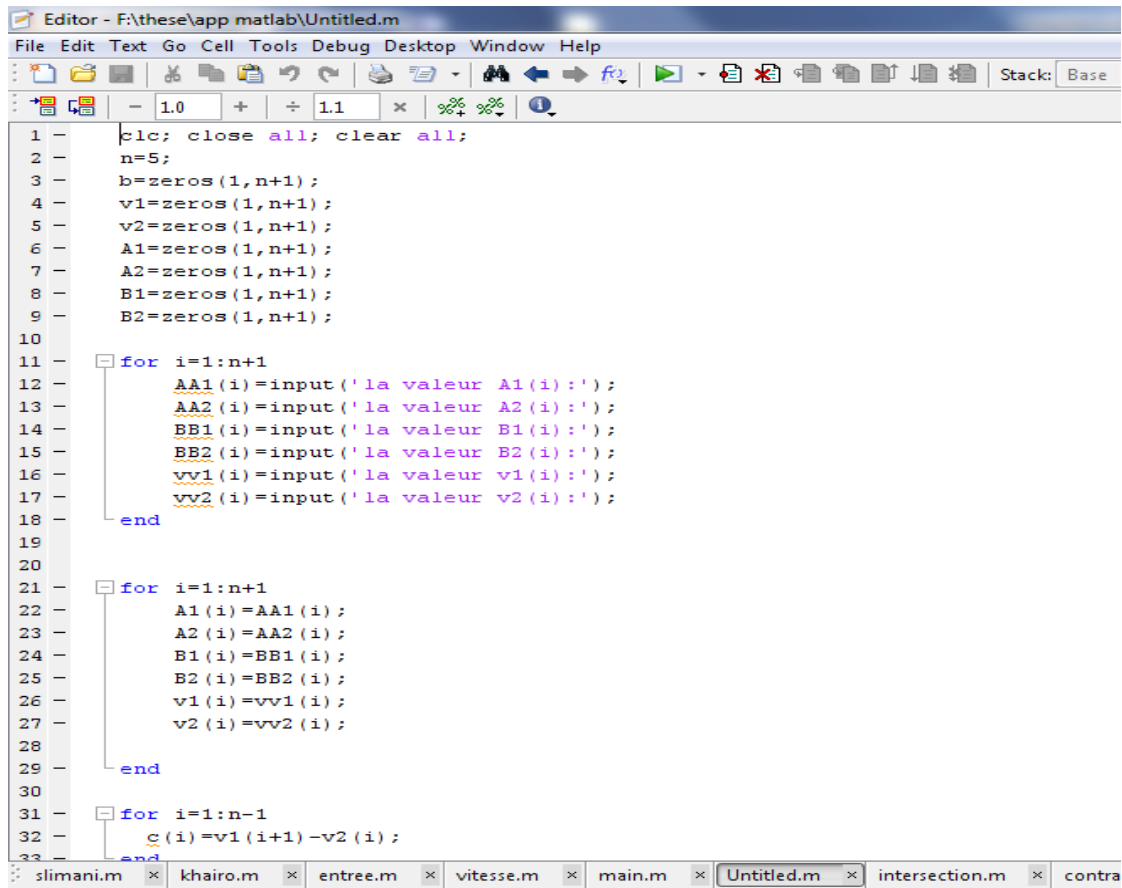
```
>> hneutre  
  
hneutre =  
  
    0.5273  
  
>> theta  
  
theta =  
  
    0.0119  
  
>> thetaneutre  
  
thetaneutre =  
  
    0.0099  
  
>> v(1)  
  
ans =  
  
    2.9686e+004  
  
>> v(1000)  
  
ans =  
  
    3.2061e+004
```

The Current Directory window on the right shows the path F:\these\app matlab\test SLIMANI. It contains a table of files and their modification dates:

Name	Date Modified
contrainte_d_ecoulement.m	23/04/13 22:26
ecrouissage_d_hollomon.m	29/11/14 09:27
ecrouissage_d_ludwick.m	09/05/13 16:53
entree.asv	14/11/14 22:33
entree.m	14/11/14 22:35
geometrie.asv	17/11/14 23:12
geometrie.m	17/11/14 23:15
intersection.m	24/04/13 00:07
main.asv	29/11/14 14:09
main.m	29/11/14 14:18
plasticite_parfaite.m	24/04/13 00:13
sortie.m	20/06/14 22:12
vitesse.asv	22/11/14 22:29
vitesse.m	29/11/14 14:14

The Command History window at the bottom left shows the commands entered. The Details window at the bottom right is currently empty.

[Tapez un texte]

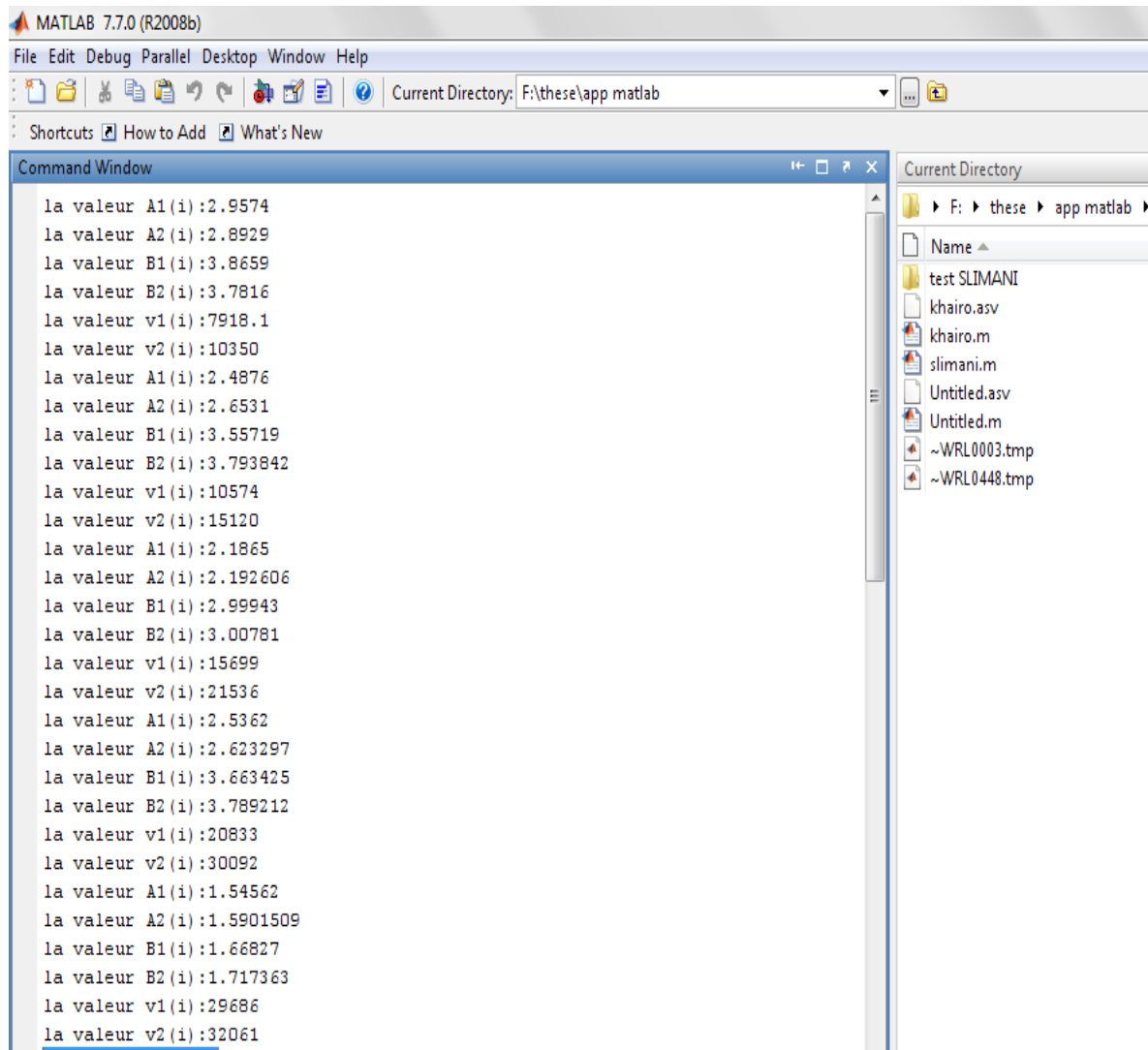


The image shows a MATLAB Editor window titled "Editor - F:\these\app matlab\Untitled.m". The window has a menu bar (File, Edit, Text, Go, Cell, Tools, Debug, Desktop, Window, Help) and a toolbar with various icons. Below the toolbar is a numeric keypad with values 1.0, 1.1, and symbols for multiplication, division, and percentage. The main area contains a MATLAB script with line numbers 1 to 33. The script initializes variables, uses loops to take input for matrix elements, and performs a calculation. The taskbar at the bottom shows several open files: slimani.m, khairo.m, entree.m, vitesse.m, main.m, Untitled.m, intersection.m, and contra.

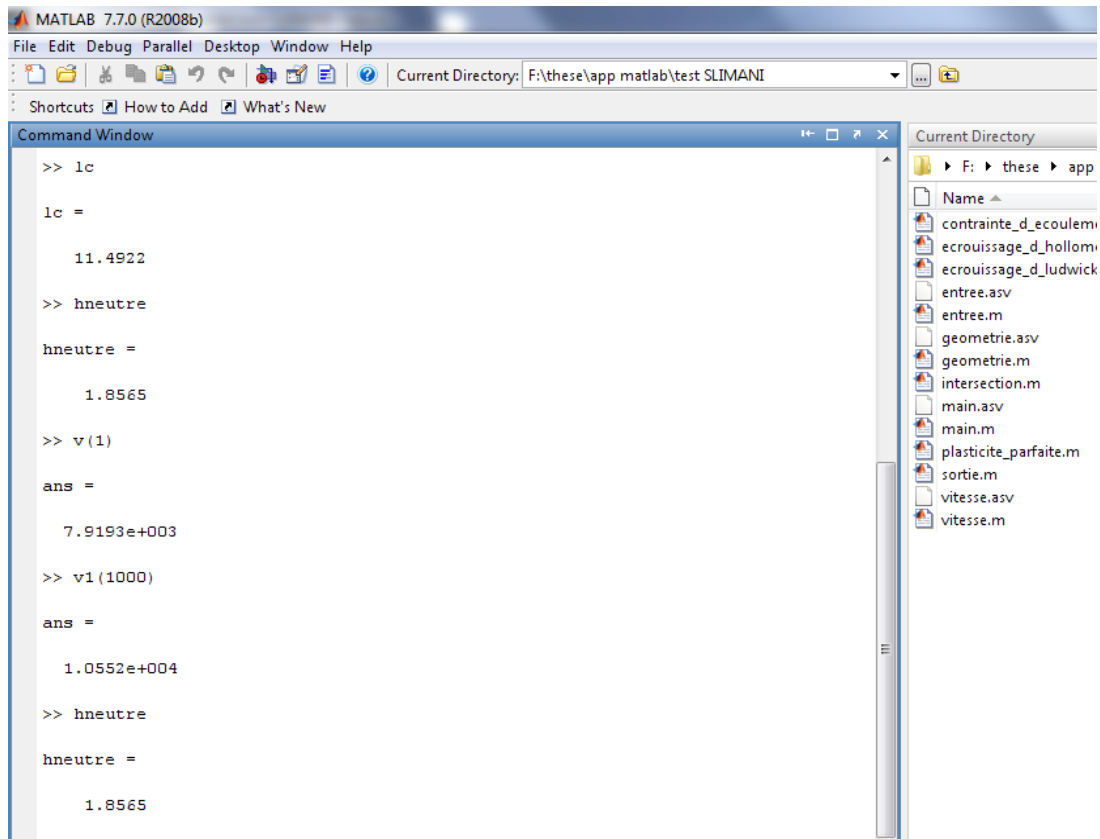
```
1 - clc; close all; clear all;
2 - n=5;
3 - b=zeros(1,n+1);
4 - v1=zeros(1,n+1);
5 - v2=zeros(1,n+1);
6 - A1=zeros(1,n+1);
7 - A2=zeros(1,n+1);
8 - B1=zeros(1,n+1);
9 - B2=zeros(1,n+1);
10
11 - for i=1:n+1
12 -     AA1(i)=input('la valeur A1(i):');
13 -     AA2(i)=input('la valeur A2(i):');
14 -     BB1(i)=input('la valeur B1(i):');
15 -     BB2(i)=input('la valeur B2(i):');
16 -     vv1(i)=input('la valeur v1(i):');
17 -     vv2(i)=input('la valeur v2(i):');
18 - end
19
20
21 - for i=1:n+1
22 -     A1(i)=AA1(i);
23 -     A2(i)=AA2(i);
24 -     B1(i)=BB1(i);
25 -     B2(i)=BB2(i);
26 -     v1(i)=vv1(i);
27 -     v2(i)=vv2(i);
28 - end
29
30
31 - for i=1:n-1
32 -     c(i)=v1(i+1)-v2(i);
33 - end
```

slimani.m x khairo.m x entree.m x vitesse.m x main.m x Untitled.m x intersection.m x contra

[Tapez un texte]



[Tapez un texte]

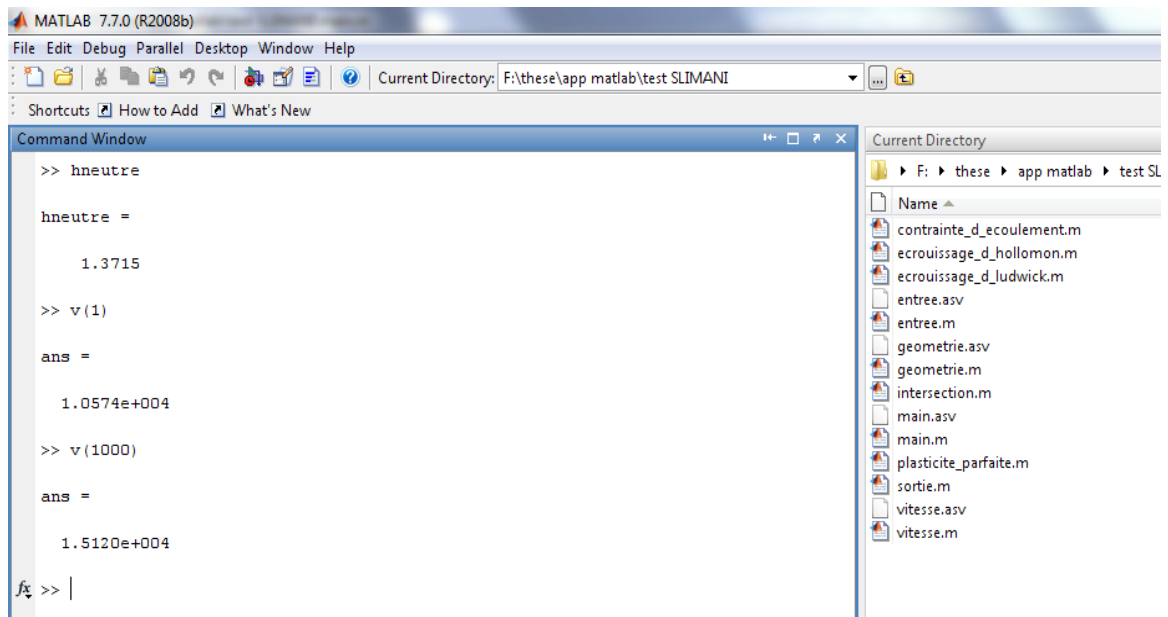


The screenshot shows the MATLAB 7.7.0 (R2008b) interface. The Command Window on the left contains the following commands and outputs:

```
>> lc  
  
lc =  
  
    11.4922  
  
>> hneutre  
  
hneutre =  
  
    1.8565  
  
>> v(1)  
  
ans =  
  
    7.9193e+003  
  
>> v1(1000)  
  
ans =  
  
    1.0552e+004  
  
>> hneutre  
  
hneutre =  
  
    1.8565
```

The Current Directory browser on the right shows the path F:\these\app matlab\test SLIMANI and lists the following files:

- contrainte_d_ecoulem
- ecrouissage_d_hollom
- ecrouissage_d_ludwick
- entree.asv
- entree.m
- geometrie.asv
- geometrie.m
- intersection.m
- main.asv
- main.m
- plasticite_parfaite.m
- sortie.m
- vitesse.asv
- vitesse.m



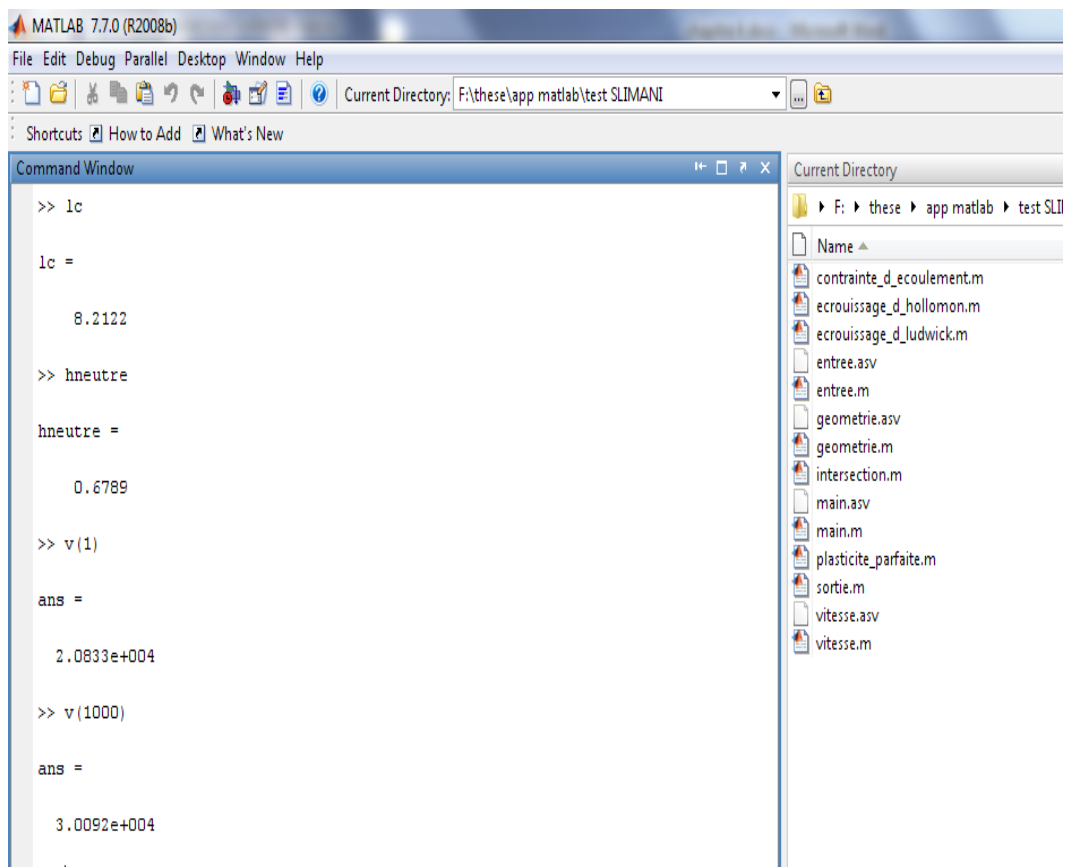
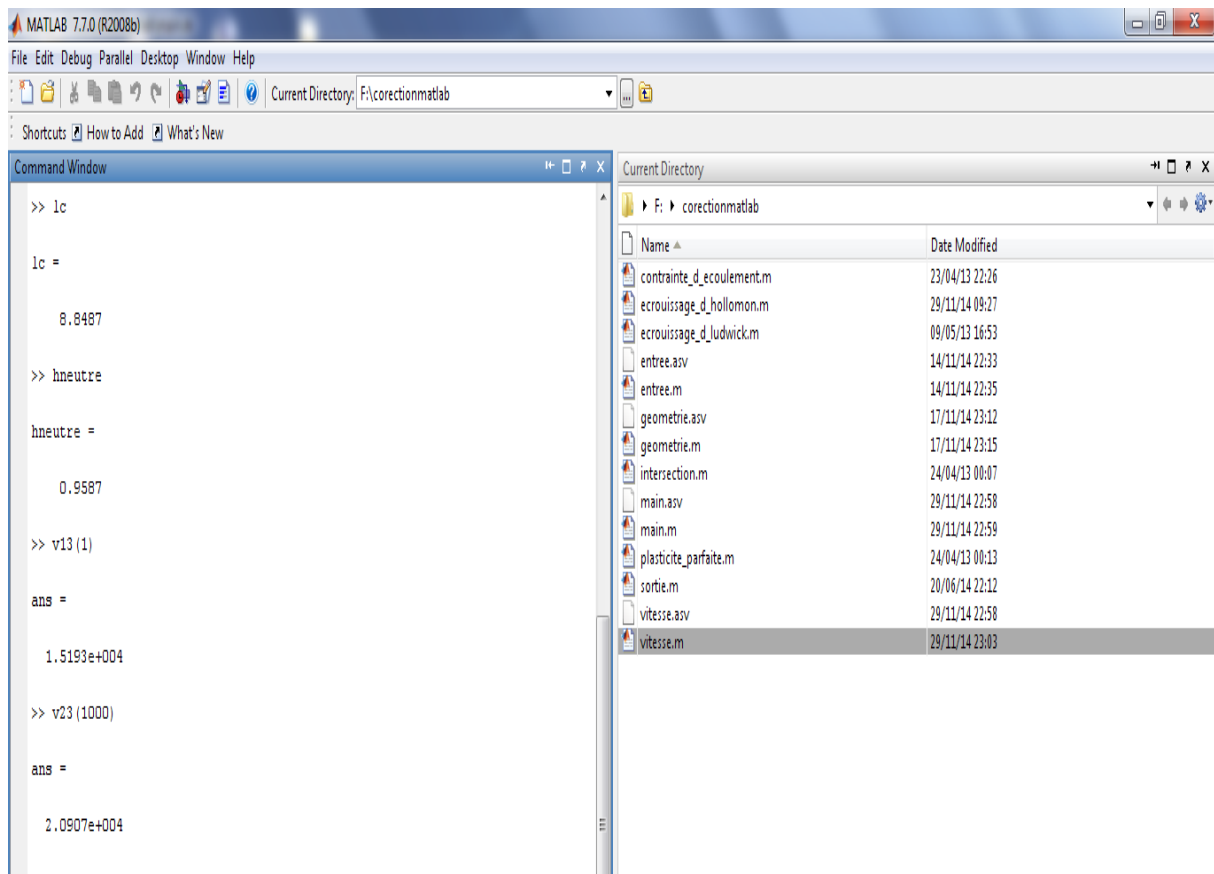
The screenshot shows the MATLAB 7.7.0 (R2008b) interface. The Command Window on the left contains the following commands and outputs:

```
>> hneutre  
  
hneutre =  
  
    1.3715  
  
>> v(1)  
  
ans =  
  
    1.0574e+004  
  
>> v(1000)  
  
ans =  
  
    1.5120e+004  
  
fx >> |
```

The Current Directory browser on the right shows the path F:\these\app matlab\test SL and lists the following files:

- contrainte_d_ecoulement.m
- ecrouissage_d_hollomon.m
- ecrouissage_d_ludwick.m
- entree.asv
- entree.m
- geometrie.asv
- geometrie.m
- intersection.m
- main.asv
- main.m
- plasticite_parfaite.m
- sortie.m
- vitesse.asv
- vitesse.m

[Tapez un texte]



[Tapez un texte]

CONCLUSION

Les travaux présentés dans ce mémoire portent essentiellement sur l'amélioration des modèles simplifiés classiques du laminage.

Pour cet objectif, nous avons construit des modèles simplifiés semi-analytiques qui prennent en compte les déformations plastiques des tôles avec écrouissage, les déformations élastiques des cylindres et la régulation des tensions entre les cages.

Après une description succincte de l'historique et des progrès réalisés dans le laminage continu ou laminage tandem, nous avons introduit les notions de base de la théorie de la plasticité et son application au processus de laminage.

L'application de la méthode des tranches combinée à la prise en compte de l'élasticité des cylindres nous a permis de mettre au point un modèle simple, rapide d'exécution et ouvert aux progrès réalisés en mise en forme tant dans les lois de comportements volumiques que surfaciques. La comparaison des résultats de notre modèle avec LAM3 ont confirmé sa fiabilité.

Nous avons aussi mis au point un modèle qui permet de rectifier les tensions inter-cages pour obtenir des vitesses de sorties pour chaque cage égales aux vitesses d'entrées de la cage suivante. Ce modèle s'appuie sur les développements déjà faits par P.Montmitonnet pour trois cages. Notre contribution a consisté à généraliser ses résultats. Nous obtenons ainsi un modèle utilisable quelque-soit pour le nombre de cage. Ce modèle utilise un développement de Newton sous environnement Matlab.

Il en résulte un code fiable que nous pouvons recommander aux industriels.

[Tapez un texte]

Références bibliographiques

[Tapez un texte]

Références bibliographique

- [1] P .Montmitonnet. Technique de l'ingénieur. M616. Paris 2000.

- [2] P Daigners. La méthode des tranches. Mise en forme des métaux et alliages. Université d'été de Métallurgie physique de Villars-sur-Ollon, p245-246. Septembre 1975.

- [3] V. Poloukhoin. Simulation mathématique sur ordinateur des laminoirs à tôles. p 16-46 1976.

- [4] F Sidoroff. Cours de M-M-C, Ecole centrale de Lyon. 1984.

- [5] J Oudin. Approches expérimentales et numériques des conditions de contact et de frottement. Physique et mécanique de la mise en forme, p 404 -298. Ecole d'été d'Oléron. 1990.

- [6] P Montmitonnet. Lois de frottement et déformation plastique. Matériaux et techniques, N° 1-2-3, p 08-29. 1993.

- [7] F Sidoroff. Cours de comportement et endommagement des matériaux. Ecole centrale de Lyon. 1984.

- [8] A Dogui.A. F Sidoroff, Large strain formulation of anisotropic elasto-plasticity for metal forming, Comp.Meth. for Predicting Material processing defects, ed. M.Predeleanu, Elsevier, 1987, pp81-85,93-97.

[Tapez un texte]

[9] A Dogui. Plasticité anisotrope en grandes déformations. Thèse de doctorat d'état sciences. Ecole centrale de Lyon. 1989.

[10] F Sidoroff, Modèles phénoménologiques, Physique et mécanique de la mise en forme, école d'été d'oléron, 1990, pp 297-307.

[11] A Khalfallah, Identification des lois de comportement élastoplastiques par essais inhomogènes et Simulations numérique, thèse de doctorat soutenue à la faculté des sciences de Tunis, en février 2004.

[12] A Znaidi , Identification des lois de comportement élastoplastiques, thèse de doctorat soutenue à la faculté des sciences de Tunis, février 2004.

[13] A Khalfallah , Anisotropic parameter identification using inhomogeneous tensile test, European journal of Mechanics A/Solids 21 p 927 et 935. (2002)

[14] MANUAL Arcelor Mittal.

[15] Benlahrech Toufik, Etude théorique et expérimentale sur l'évolution de la qualité d'un acier FePO4 - destiné pour l'emboutissage profond à Arcelor Mittal Annaba.; thème d'ingénieur, Université Annaba, 2008.

[16] CHEHAOUI Walid, formulation & identification de la loi de comportement du C11B au laminage à froid, thème d'ingénieur, Université Annaba, 1998.

[17] Dr Ahmed Boutbicha, Métallurgie physique, publication de l'université Badji Mokhtar – Annaba 2007-2008 .

[18] JEAN-PAUL BAILON ; JEAN-MARIE DORLOT, Des Matériaux ,Troisième édition, polytechnique 2000-2001, p 124-138.

[19] Huy LE DANG Modélisation simplifiée des processus de laminage 2014

[20] Abd al majid wazwaz- Partial Differential Equations and Solitary Waves Theory 2010
springer

[21]. Bryant GF. L'automation des moulins tandem. Londres : L'institut de sidérurgique ; 1973.

[Tapez un texte]

[22]. Carlton AJ, et autres automation du moulin froid tandem en acier de LTV Hennepin. Acier Eng. de fer. 1992 ; 69(6) : 17-28.

[23]. Duval P, parcs JC, technologie de Fellus G. Latest AGC installée au froid de support de Cleveland 5 de LTV moulin. Acier Eng. 1991 de fer ; 69(11) : 46-51.

[24]. Geddes EJM, Postlewaite I. Improvements de la qualité du produit en tandem laminant à froid employant contrôle multivariable robuste. Technol. 1998 ; 6(2) : 257-69.

[25]. Hoshino I, et autres contrôle multivariable basé sur observateur du moulin tandem froid en aluminium. Automatica. 1988 ; 24(6) : 741-54.

[26]. Plan horizontal de Roberts. L'histoire du roulement. Dans : Laminage à froid de l'acier. New York : Marcel Dekker ; 1978.

[27] Solving frontier Problems of Physics: The Decomposition Method “George adomion”

[28] Anouar HALLOUMI . Modélisation mécanique et thermique du procédé de laminage asymétrique, soutenue à Saint-Etienne, le 17/01/2011