



Rapport d'étude

Référence :

DRD.OL.11.107

Correspondant :

Olivier Lurdos – Kevin Lenc

Date d'émission :

01/09/2011

Objet :Approche numérique simplifiée de la déformation et de la température au cours du laminage
Développement de ADlam, version 1.5.**Demande :**

2A017 – Aval UKAD

Introduction

Depuis environ 1 an, le modèle ADlam permet d'évaluer rapidement l'évolution de la température de la barre au cours d'une séquence de laminage. Une étude de la validité du modèle a mis en évidence que l'auto-échauffement dû à la déformation est systématiquement sous-évalué par le modèle (stage de Kevin Lenc).

La formule originelle permettant de calculer la déformation, et donc la déformation a ainsi été améliorée et complexifiée en se basant sur des travaux bibliographiques. Cela a permis de mieux évaluer les auto-échauffements. De plus, la nouvelle version du modèle a été comparée aux résultats de simulations existantes sous LAM3 et FORGE pour évaluer l'erreur commise par ADlam.

Conclusion

La version 1.5 du modèle ADlam proposée inclut une nouvelle méthode de calcul de la déformation, donc de l'auto-échauffement. Le refroidissement a été validé par comparaison avec les résultats du logiciel FORGE pour les différentes géométries de type rond, carré angle abattu, ovale, tôle. L'auto-échauffement a été validé par comparaison de la déformation plastique cumulée au cours de 2 gammes de laminage (train à barre de Commentry et blooming Ancizes). La comparaison passe par passe sur la gamme Commentry en particulier a montré une meilleure prédiction de la déformation.

Pour terminer, le problème de sous-évaluation des auto-échauffements observé pour le cas du laminage du RA50YW a été grandement résolu dans ADlam 1.5 (voir figure 6).

Destinataires : Eric Georges, Laurent Vaillant de Guelis, Marc Decronsonniere, Mathieu Brunel, Kevin Lenc**Copies :** Christian Dumont, Raphaël Baret, Patrick Delaborde**Repère de classement :****Visa du responsable
d'étude :**



Référence :

DRD.OL.11.107

Correspondant :

Olivier Lurdos – Kevin Lenc

Date d'émission :

01/09/2011

Objet :

Approche numérique simplifiée de la déformation et de la température au cours du laminage
Développement de ADlam, version 1.5.

Demande :

2A017 – Aval UKAD

Introduction

Depuis environ 1 an, le modèle ADlam permet d'évaluer rapidement l'évolution de la température de la barre au cours d'une séquence de laminage. Une étude de la validité du modèle a mis en évidence que l'auto-échauffement dû à la déformation est systématiquement sous-évalué par le modèle (stage de Kevin Lenc).

La formule originelle permettant de calculer la déformation, et donc la déformation a ainsi été améliorée et complexifiée en se basant sur des travaux bibliographiques. Cela a permis de mieux évaluer les auto-échauffements. De plus, la nouvelle version du modèle a été comparée aux résultats de simulations existantes sous LAM3 et FORGE pour évaluer l'erreur commise par ADlam.

1 - Comparaison d'ADlam aux mesures expérimentales

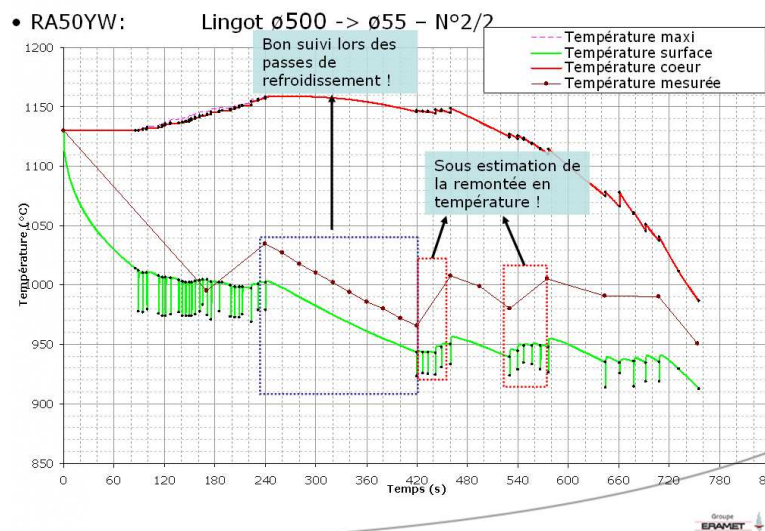


Figure 1 : extrait de la présentation intermédiaire du stage de Kevin Lenc du 31/05/2011. Modélisation ADlam (version 1.4) du laminage de rond de 500mm en rond de 55mm. Les phases de refroidissement sont correctement modélisées. En revanche, les phases de remontées en température sont sous-estimées.

Destinataires : Eric Georges, Laurent Vaillant de Guelis, Marc Decronsonniere, Mathieu Brunel, Kevin Lenc

Copies : Christian Dumont, Raphaël Baret, Patrick Delaborde

Repère de classement :

Visa du responsable d'étude :

La figure 1 représente une simulation ADlam (version 1.4) utilisant le même modèle détaillé dans le rapport DRD.OL.10.081 et des mesures expérimentales effectuées au pyromètre optique. Cette comparaison montre une bonne modélisation de la température dans les phases de refroidissement (p.ex. les courbes de refroidissement sont parallèles entre expérience et modèle entre 240 et 420s). En revanche, l'auto-échauffement semble clairement sous-estimé.

2 - Nouvelle formule de calcul de la déformation

Dans la version 1.4, l'auto-échauffement est calculé en utilisant le logarithme du rapport des sections pour évaluer la déformation plastique à cœur de la barre. Il se trouve qu'une étude (CESSID, 1985) a montré que cette formule est trop simple. En effet, elle n'est valable que dans le cas d'une section ronde restant ronde, et néglige ainsi les phénomènes de cisaillement présent pour des sections non-rondes (losange, carré, ovale, ...).

Différentes formules, basées sur la méthode des rectangles équivalents, ont ainsi été comparées pour déterminer une formule simple évaluant le mieux possible la déformation au cours d'une passe de laminage. La formule retenue est donc la suivante :

$$\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\ln \frac{h_1}{h_0}\right)^2 + \left(\ln \frac{L_1}{L_0}\right)^2 + \left(\ln \frac{S_0}{S_1}\right)^2}$$

où h_0 et h_1 sont les hauteurs initiale et finale, L_0 et L_1 sont les largeurs initiales et finales et S_0 et S_1 sont les surfaces des sections initiales et finales.

La figure 2 compare la nouvelle formule à l'ancienne, et représente aussi la valeur moyenne de la déformation (cœur, mi-rayon et périphérie) calculée par la modélisation éléments finis LAM3. Ce graphique montre clairement que l'ancienne formule sous-évaluait fortement la déformation. L'écart type est de 0,35 par rapport aux données LAM3. La nouvelle formule est plus centrée sur les données LAM3, bien qu'elle puisse surévaluer jusqu'au double de la déformation LAM3 pour la passe n°2 par exemple. L'écart type est néanmoins abaissé à 0,19.

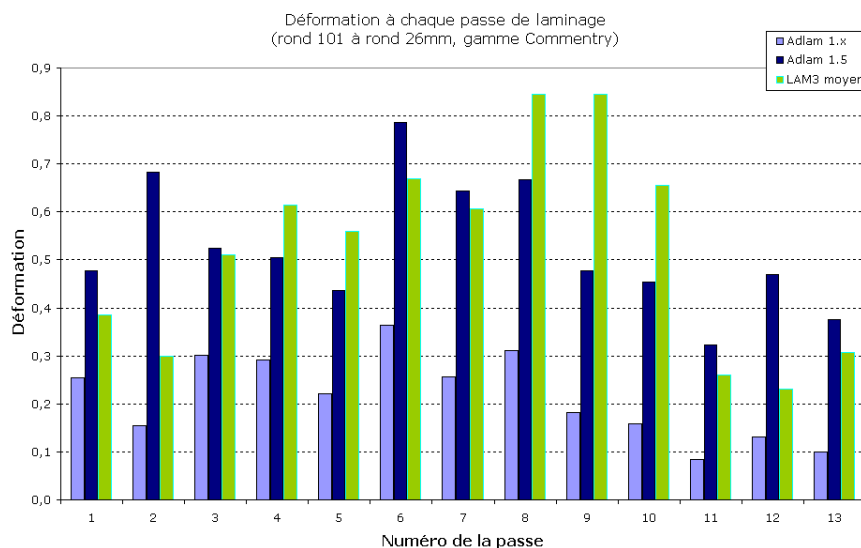


Figure 2 : Déformations calculées à chaque passe de la gamme de laminage Commentry du rond 101 au rond de 26mm. Formules ADlam 1.0, ADlam 1.5 et comparaison à la valeur moyenne de LAM3 (moyenne des déformations à cœur, mi-rayon et périphérie)

3 – Validation du modèle

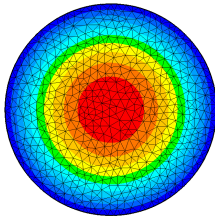
3.1 – validation du refroidissement

Les graphiques de la figure 3 ci-dessous comparent les refroidissements obtenus sous forge pour différentes géométries avec ceux obtenus avec ADlam 1.5. Le refroidissement du rond diamètre 10mm donne 2 courbes parfaitement identiques entre les deux modèles. ADlam a en effet été développé en considérant des sections circulaires équivalentes. Les cas des Carrés Angles Abattus (CAA) montrent des écarts inférieurs à 10°C au bout de 200s à cœur. Le cas des géométries ovales montrent un écart un peu plus important. ADlam surestime la température à cœur de 15 à 20°C maximum. Enfin, pour le cas d'une tôle, le modèle sous estime très légèrement cette température (écart de l'ordre de 5°C).

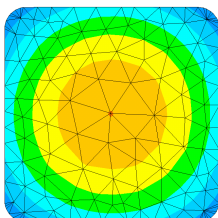
Ces cas tests permettent de valider les phases de refroidissement.

Géométrie de la section modélisée sous FORGE

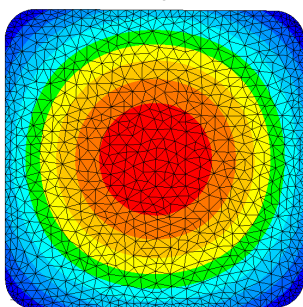
Barre diam. 10



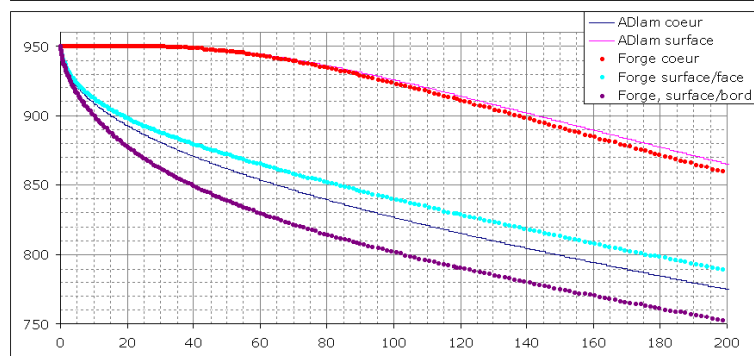
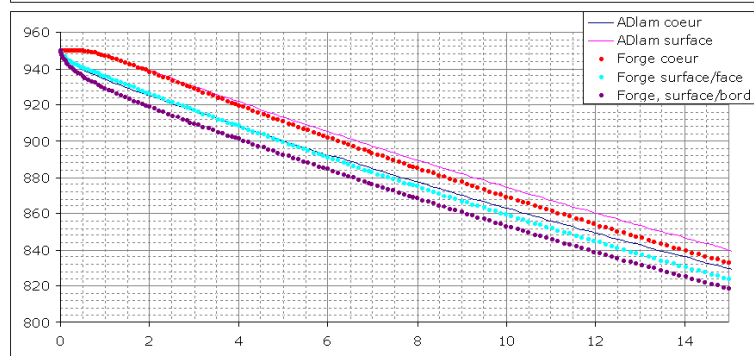
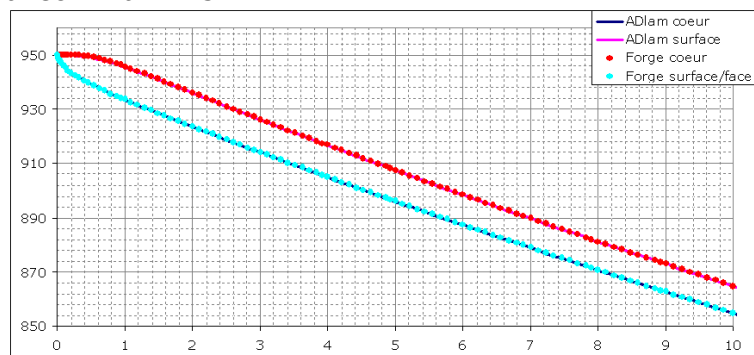
CAA 10/13.3



CAA 100/133.1



Comparaison de la température simulée avec FORGE et avec ADlam 1.5



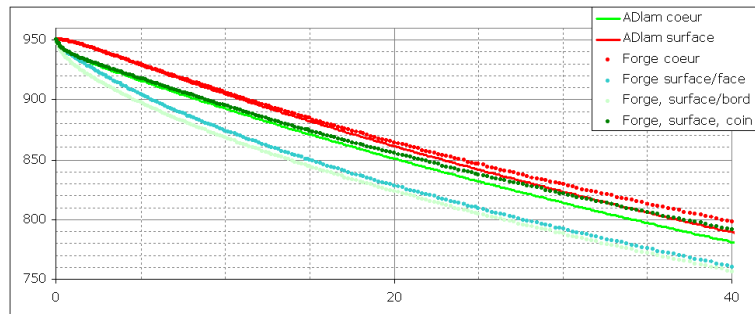
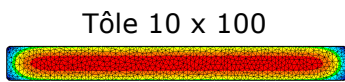
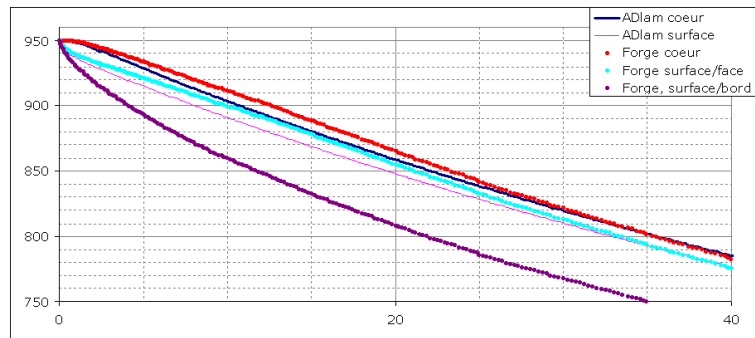
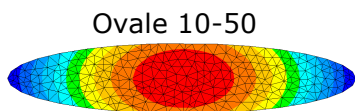
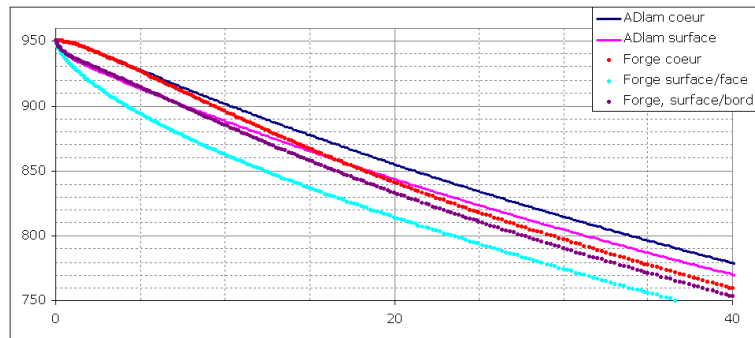
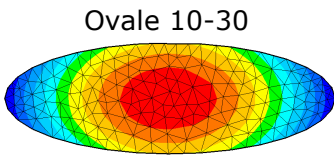
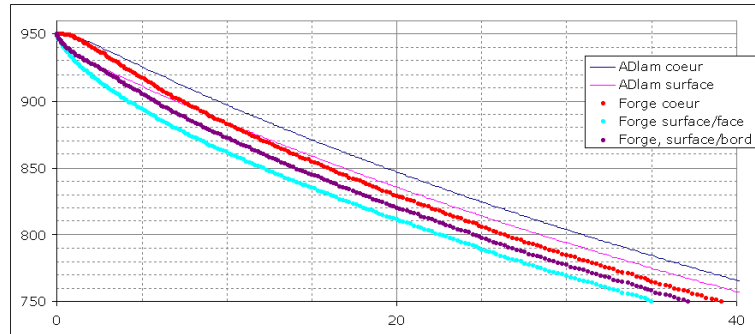
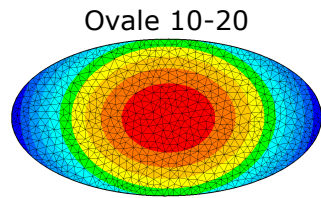
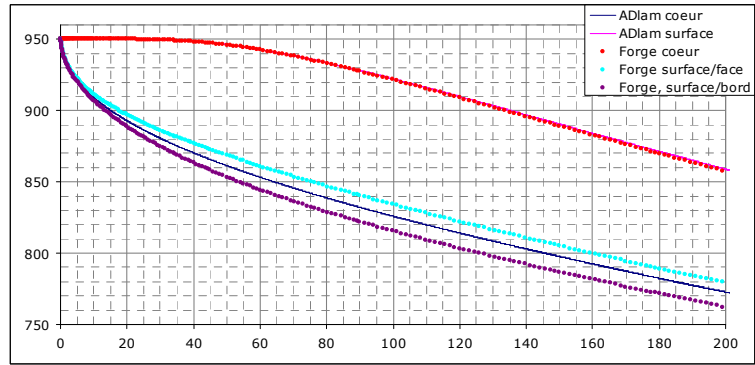
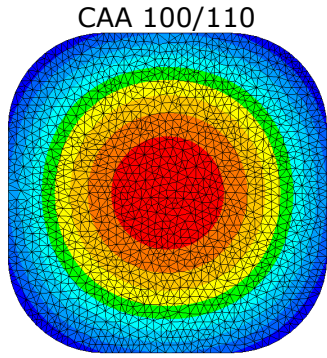


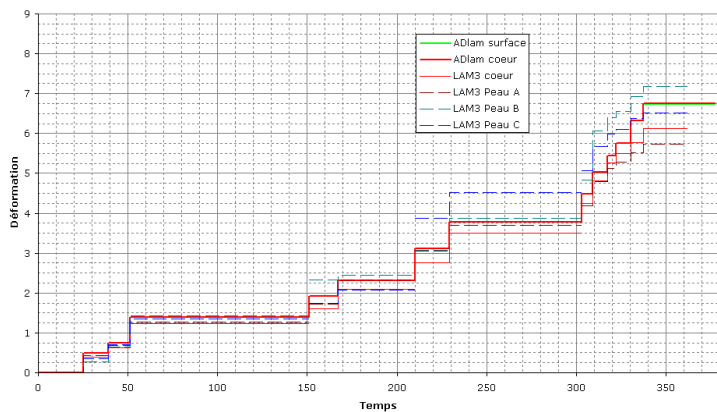
Figure 3 : Comparaison entre courbes de refroidissement simulées sous FORGE et résultat obtenu avec ADlam 1.5. Courbes température en °C / temps en s.

3.2 – validation des échauffements

Afin de valider la nouvelle formule permettant de calculer la déformation, les résultats ADlam ont été comparés à ceux de deux modélisations LAM3 : le laminage sur le train à barre de Commentry de rond de 101 à rond de 26mm et le laminage blooming de rond de 240 en rond de 101mm (figure 4 et 5).

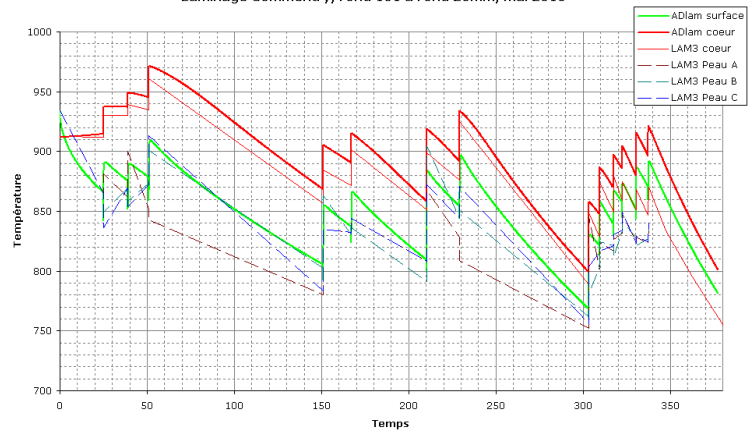
Les figures 4a et 5a comparent les déformations plastiques cumulées. La nouvelle formule surestime légèrement la déformation à cœur du produit pour les 2 séquences de laminage. En revanche, elle est une bonne valeur moyenne de la déformation en périphérie du produit. Cela se traduit sur les graphiques 4b et 5b par une légère surestimation de la température à cœur de la barre. Pour le laminage Commentry du rond de 26mm, ADlam surestime de 50°C la température en fin de gamme. Pour le laminage blooming, ADlam surestime d'environ 25°C. Les températures en surface de la barre sont quant-à elles bien évaluées.

Laminage Commentry, rond 101 à rond 26mm, mai 2010



(a)

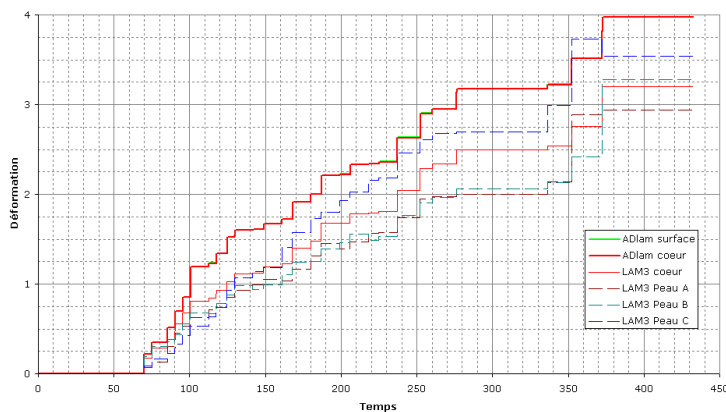
Laminage Commentry, rond 101 à rond 26mm, mai 2010



(b)

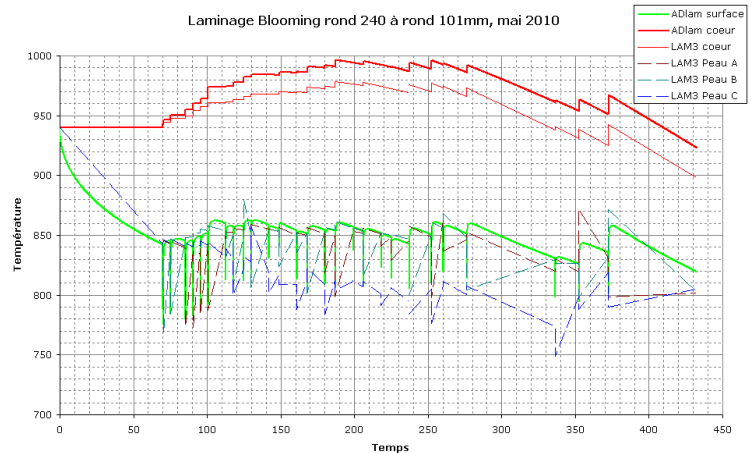
Figure 4 : Comparaison des températures et déformations entre LAM3 et ADlam 1.5.

Laminage Blooming rond 240 à rond 26mm, mai 2010



(a)

Laminage Blooming rond 240 à rond 101mm, mai 2010



(b)

Figure 5 : Comparaison des températures et déformations entre LAM3 et ADlam 1.5.

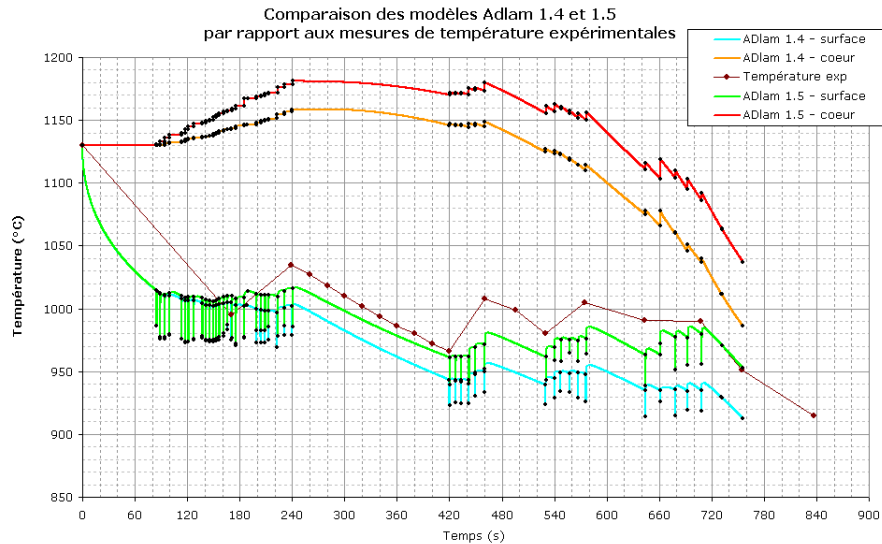


Figure 6 : Prédiction de la température de laminage du RA50YW avec ADlam 1.4 et 1.5. La sous-estimation des auto-échauffements est partiellement résolue avec ADlam 1.5.

Conclusion

La version 1.5 du modèle ADlam proposée inclut une nouvelle méthode de calcul de la déformation, donc de l'auto-échauffement. Le refroidissement a été validé par comparaison avec les résultats du logiciel FORGE pour les différentes géométries de type rond, carré angle abattu, ovale, tôle. L'auto-échauffement a été validé par comparaison de la déformation plastique cumulée au cours de 2 gammes de laminage (train à barre de Commentry et blooming Ancizes). La comparaison passe par passe sur la gamme Commentry en particulier a montré une meilleure prédiction de la déformation.

Pour terminer, le problème de sous-évaluation des auto-échauffements observé pour le cas du laminage du RA50YW a été grandement résolu dans ADlam 1.5 (voir figure 6).

Référence bibliographique

Rapport DRD.OL.10.081, Approche numérique simplifiée de la déformation et de la température au cours du laminage - Développement de ADlam, Olivier Lurdos, 06/06/2010.

CESSID, Centre d'Etudes Supérieures de la Sidérurgie Française, Calcul des efforts & des couples pour le laminage des produits longs – méthode des rectangles équivalents, M. de Vathaire, M.C. Estivalet, Sollac, CRP, Session laminage, 1985.

Annexes

Annexe 1, p.9 – liste des modifications et améliorations apportées à chacune des versions d'ADlam (1.0 à 1.5)

Annexe 2, p.10 – manuel d'utilisation d'ADlam

2011-07 - ADlam 1.5

Correction bug sur calcul du temps de laminage (stage Kevin Lenc)
Amélioration de la stabilité du programme, plus de scintillements (stage Kevin Lenc)
Amélioration du calcul de la déformation (stage Kevin Lenc, documents CESSID)
Application "ADlam-batch" permettant de lancer une étude paramétrique automatisée (lancement en série de calculs ADlam en fonction d'une matrice de paramètres donnée et récupération des paramètres clés choisis)
Ensemble de cas tests pour validation du modèle sur Ancizes, Commentry, Långshyttan, validation du refroidissement
Modification de la mise en données ADlam
Ajout des graphiques passe par passe

2011-03 - ADlam 1.41

Ajout du graphique avec position en abscisse en plus de celui avec le temps

2011-02 - ADlam 1.4

Amélioration de l'interface, ajout des graphiques allongement/corroyage/vitesse de déformation en fonction des passes de laminage
Amélioration des graphiques (affichage de la température en continu, et non plus point par point)
Jusqu'à dix configurations matériau possible

2011-01 - ADlam 1.3

Calcul du refroidissement de la peau au contact des cylindres de laminage en même temps que l'auto-échauffement (codage c++)

2010-11 - ADlam 1.2

Ajout de la configuration matériau pour le calcul passe par passe (possibilité d'utiliser des matériau/différence fini/environnement différents passe par passe)

2010-11 - ADlam 1.1

Calcul de l'auto-échauffement point par point avec utilisation de loi de comportement Hansel-Spittel ou loi puissance
Rédaction d'un manuel à destination des utilisateurs

2010-08 - ADlam 1.0

Prise en compte du rapport h/l pour résolution thermique

2010-07 - ADlam 0.8

Interface améliorée

2010-07 - ADlam 0.7

Implémentation de la résolution thermique par différences finies (codé en C++)
Auto-échauffement calculé avec contrainte moyenne pour toute la section (codé en Excel)

2010-03 - ADlam 0.1

Version Excel, température moyenne et unique pour chaque section de barre

Manuel d'utilisation d'ADlam, version 1.5

Septembre 2011

Olivier Lurdos

1. Renseigner les paramètres matériaux / lois de comportement et paramètres du calcul :

PARAMETRES MATERIAU											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
Paramètres matériau											
Emissivité	0,70	0,65									
Masse volumique	4300,0	4300,0									kg.m ⁻³
Chaleur massique	800,0	800,0									J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Conductivité thermique	17,00	17,00									J.s ⁻¹ .m ⁻¹ .K ⁻¹
Conditions aux limites / conditions initiales											
Température barre/air	50,00	50,00									°C
Echange thermique/air	10,00	10,00									J.s ⁻¹ .m ⁻² .K ⁻¹
Température barre/outil	50,00	50,00									°C
Echange thermique/outil	3000,00	3000,00									J.s ⁻¹ .m ⁻² .K ⁻¹
Effusivité outil	11763,00	11763,00									
Paramètres loi de comportement											
Loi :	<input type="checkbox"/> HS	<input type="checkbox"/> HS	<input checked="" type="checkbox"/> HS	<input checked="" type="checkbox"/> HS	<input checked="" type="checkbox"/> HS	<input checked="" type="checkbox"/> HS	<input checked="" type="checkbox"/> HS	<input checked="" type="checkbox"/> HS	<input checked="" type="checkbox"/> HS	<input checked="" type="checkbox"/> HS	
Hansel-Spittel	A	127371,0	127371,0								MPa
	m1	-0,0076	-0,0076								
	m2	-0,0817	-0,0817								
	m3	-0,2346	-0,2346								
	m4	-0,0193	-0,0193								
	m5	0,0000	0,0000								
	m6	0,0000	0,0000								
	m7	-0,2781	-0,2781								
	m8	0,0005	0,0005								
	m9	0,0000	0,0000								
ε _{SS} =	2,0000	4,0000									
Puissance	<input checked="" type="checkbox"/> Pow	<input checked="" type="checkbox"/> Pow	<input type="checkbox"/> Pow	<input type="checkbox"/> Pow	<input type="checkbox"/> Pow	<input type="checkbox"/> Pow	<input type="checkbox"/> Pow	<input type="checkbox"/> Pow	<input type="checkbox"/> Pow	<input type="checkbox"/> Pow	
	σ ₀	0,03327	1,50338								MPa
	n	0,0330	0,0109								
	m	0,1740	0,0348								kJ.mol ⁻¹
	Q	80,97	47,14								
Paramètres différences finies											
Pas de temps R	1,0E-01	5,0E-02									s
Pas de temps L	5,0E-04	5,0E-05									s
Pas de température max.	1,0	1,0									°C
Pas de temps de stockage R	1,0E-01	1,0E-01									s
Pas de temps de stockage L	5,0E-04	5,0E-04									s

Figure 1 : tableau renseignant jusqu'à 10 configurations différentes.

Il est possible de définir 10 "configurations" différentes (lettres A à J). Cela permet de passer d'une loi de comportement à une autre si, par exemple, la température change de domaine. Par exemple sur la figure 1, la loi de comportement A et la B ne correspondent pas aux mêmes intervalles de température. Il est possible d'utiliser une loi de Hansel-Spittel ou une loi puissance (type Norton-Hoff).

En ce qui concerne les paramètres "conditions aux limites / conditions initiales", le laminage se passe généralement dans un atelier où la barre circule à l'air libre. La température vue par la barre est choisie à 50°C et le coefficient d'échange thermique est de 10 J.s⁻¹.m⁻².K⁻¹. Il faut donc laisser ces paramètres aux valeurs renseignées sur la figure 1.

Les "paramètres différences finies" seront renseignés plus tard.

Note : il est possible de simuler un chauffage dans un four à atmosphère (transfert de la chaleur par conduction depuis l'atmosphère vers la barre). Dans ce cas, il faut renseigner la température de l'atmosphère du four dans la case "Température barre/air". Ce type de manipulation permet de simuler des évolutions de température sur produits forgés pendant leur remise au feu, ou bien d'évaluer la thermique pendant un "overshoot" (passage rapide dans un four de maintien à température plus élevée pour diminuer le gradient thermique lors du transfert du produit du four vers la forge ou la cage de laminage).

2. Etablir les conditions initiales de la barre :

Paramètres passes laminage et refroidissement								Paramètres cylindres laminage			Paramètres interpasses			
No.	Note	Type	Config. matériau	Surface section (mm ²)	h (mm)	L (mm)	Temps interp. (s)	Rotation deg	Diam. (mm)	RPM	Type	Distance intercege (m)	Speed (m/s)	Long. barre (m)
0	rond 101mm		A	8188,96	102,20	102,20					duo		1,0	2,0

Figure 2 : Première ligne du tableau renseignant la géométrie initiale de la billette.

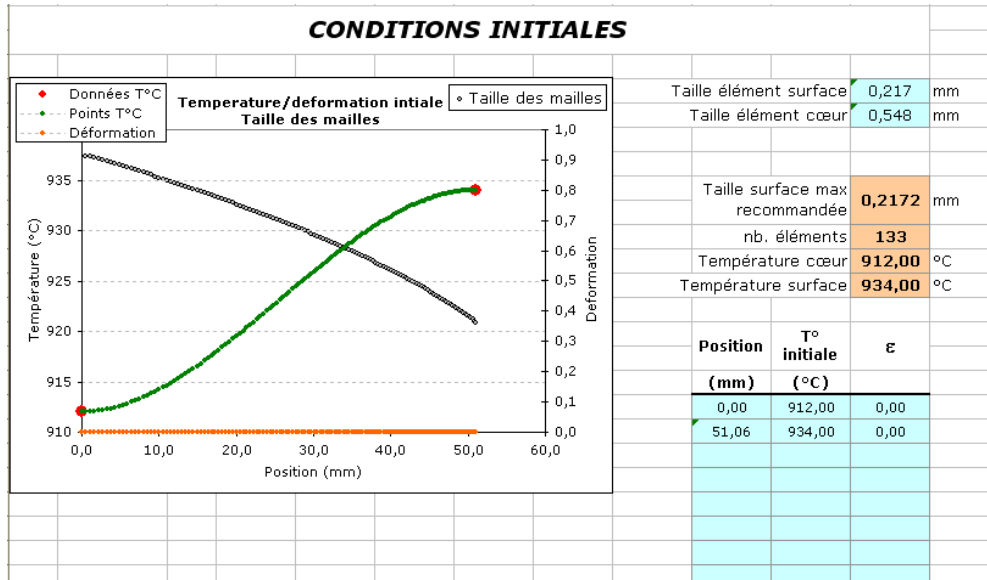


Figure 3 : tableau renseignant les conditions initiales.

Dans un premier temps, il faut renseigner la géométrie initiale de la barre (figure 2). Il faut pour cela renseigner la première ligne de la partie "Paramètres passes laminage et refroidissement", à avoir la surface, largeur et hauteur de la billette initiale (à titre d'exemple, on donnera le diamètre de la barre pour les hauteur et largeur si la section est ronde). Ces données permettront de calculer le rayon de la section circulaire équivalente (formule en annexe).

Ensuite, il faut renseigner la partie "conditions initiales". Le tableau "position / t°c initiale / ε" permet d'initialiser les température et déformation initiales en fonction de la position considérée. Il est possible de renseigner plusieurs points pour rentrer un profil de température non constant (par exemple, lors d'un chauffage par induction, la surface de la barre est plus chaude que son cœur). Dans l'exemple ci-dessus (figure 3), seuls deux points sont renseignés (cœur et surface). ADlam interpole les valeurs intermédiaires par une fonction spline.

Enfin, il faut renseigner la taille des éléments en surface et celles à cœur de la barre. ADlam propose par défaut une taille d'élément maximale en surface (ici 0.2172mm). Une taille supérieure en surface est susceptible de donner des résultats erronés. La taille des éléments à cœur peut être plus grande, puisque les échanges thermiques sont moins importants à cœur qu'en surface.

Note: la position 0 correspond au cœur du produit.

3. Renseigner les paramètres de chaque passe de laminage :

Il faut maintenant éditer le tableau principal intitulé « Paramètres passes laminage et refroidissement » (figure 4). Chaque ligne correspond soit à un refroidissement, soit à une passe de laminage. La première colonne (Note) est du texte libre. Elle permet par exemple de se repérer rapidement lorsqu'une gamme comporte beaucoup de passes. Attention, l'ensemble des données de ce tableau font référence à des diamètres de barre (et non rayon) ou côtés de section carré (et non 1/2 coté).

La première ligne (no 0) correspond à la géométrie initiale de la barre, déjà remplie. Dans le cas ci-dessus, il s'agit d'une barre de diamètre 102,2mm. La surface initiale est donc $\pi \times 102,2^2/4 \approx 8188,96\text{mm}^2$.

Paramètres passes laminage et refroidissement									Paramètres cylindres laminage			Paramètres interpasses		
No.	Note	Type	Config. matériau	Surface section	h	L	Temps interp.	Rotation	Diam.	RPM	Type	Distance intercage	Speed	Long. barre
				(mm ²)	(mm)	(mm)	(s)	deg	(mm)			(m)	(m/s)	(m)
0	rond 101mm	R	A	8188,96	102,20	102,20					duo		1,0	2,0
1		R					25,0							
2	pre-ov146	L		6350,60	74,82	112,13			542	82,0	duo		1,0	2,6
3		R					14,0							
4	ov146	L		5436,88	63,71	121,01							1,0	3,0
5		R					12,0	90,0						
6	car64	L		4021,44	81,38	80,61							1,0	4,1
7		R					100,0	-45,0						
8	ov104	L		3004,06	49,39	77,81							1,0	5,5
9		R					16,0	-90,0						
10	car50	L		2410,22	63,62	58,68							1,0	6,8

Figure 4 : tableau renseignant les paramètres nécessaires au calcul de chaque passe de laminage ou de refroidissement.

La 2^o colonne (Type) détermine si la ligne correspond à un laminage ou à un refroidissement de la barre :

- _ R ou r : passe de refroidissement
- _ L ou l : passe de laminage

3.1 Données à renseigner lors d'une passe de refroidissement :

Deux paramètres décrivent les refroidissements entre 2 cages de laminage. La durée du refroidissement (colonne H) et la rotation de la barre entre les 2 passes de laminage (colonne I). Si le paramètre rotation est vide (comme ici à la ligne n°1 du tableau), alors ADlam considère que la barre ne subit aucune rotation.

Un seul paramètre est nécessaire pour calculer une passe de refroidissement : sa durée, colonne I.

3.2 Données à renseigner lors d'une passe de laminage :

Il faut renseigner plusieurs paramètres pour modéliser la nouvelle forme après la passe de laminage. Dans le tableau précédent, nous allons prendre la ligne 2 (pre-ov146) comme exemple. Il s'agit de la passe de laminage de la barre initiale (rond de 102,2mm) dans la cage pré-ovale 146.

- Dans la colonne « Surface section », il faut renseigner la surface *après* la passe de laminage (On connaît déjà la surface avant laminage, ligne 0). Ici, on passe de 8011.85 à 6742.62 mm².



La nouvelle surface doit nécessairement être strictement inférieure à l'ancienne. Dans le cas contraire, ADlam buggera à l'exécution.

- Dans les colonnes « h » et « l », il faut renseigner les nouvelles hauteur et largeur du produit (après laminage, figure 5) :

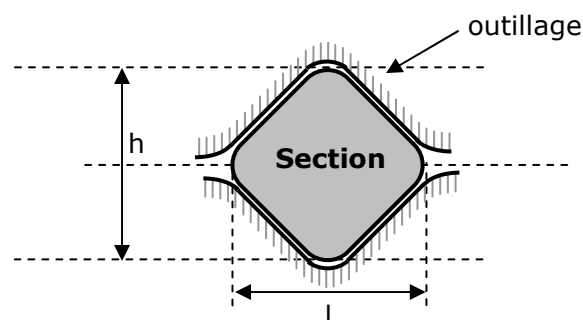


Figure 5 : Exemple de section de barre

Cette passe de laminage fait donc passer la billette initiale (rond de 102.2mm) à un pré-oval de largeur 74,82mm et de hauteur 112,13mm.



Dans le cas de d'une passe de laminage où les cylindres sont verticaux, les largeurs et hauteurs inversent leur positions respectives (figure 6) :

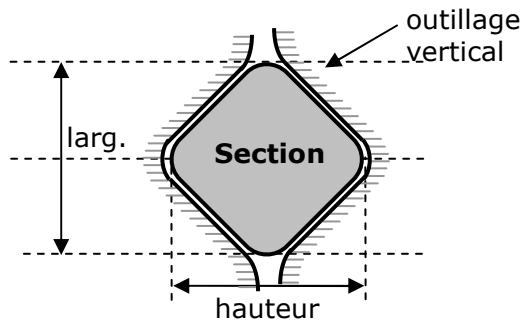


Figure 6 : Section de la barre APRES la passe de laminage pour le cas de cylindres verticaux

Une fois les données géométriques de la barre renseignées, il faut indiquer des paramètres concernant les cylindres de laminage (diamètre et rotation, colonnes J et K). Ceux-ci permettront de déterminer le temps de contact entre un point de la barre avec les cylindres (voir formule en annexe). La colonne L détermine le type d'installation de laminage (duo ou Kocks uniquement). Cette colonne est pour le moment facultative et n'a pas d'impact sur le calcul.

4. Paramètres de la résolution par différences finies :

Paramètres différences finies									
Pas de temps R	1,0E-01	5,0E-02							s
Pas de temps L	5,0E-04	5,0E-05							s
Pas de température max.	1,0	1,0							°C
Pas de temps de stockage R	1,0E-01	1,0E-01							s
Pas de temps de stockage L	5,0E-04	5,0E-04							s

Figure 7 : tableau renseignant les paramètres nécessaires au calcul de chaque passe de laminage

Il faut enfin déterminer les paramètres de différences finies. Le pas de temps R correspond au pas de temps utilisé pendant le refroidissement de la barre. Il doit être cohérent avec les temps d'interpasse utilisés. Le pas de temps L correspond au pas de temps utilisé pendant les phases de laminage.

Le pas de température max. peut être laissé à 1°C.

Enfin, les pas de stockage correspondent aux points sauvegardés pendant le calcul.

5. Paramètres "distance intercage" "vitesse" et "longueur de la barre"

Ces paramètres (colonnes N, O et P) sont très souvent utilisés pour calculer différents paramètres nécessaires au calcul ADIam. Ils ne sont toutefois pas influents à proprement parler sur le résultat du calcul. Seuls les paramètres renseignés dans les colonnes D à L sont "lues" par ADIam.

6. Exécution du programme :

Une fois le tableau rempli, on lance le calcul en cliquant sur le bouton « lancer le calcul ». Pendant l'exécution, il est possible d'aller voir le résultat en cours de calcul sur l'onglet « Graph_Tcoeur-Tsurface ».

Annexe

- Formule permettant de calculer le rayon de la section circulaire équivalente :

$$f = \frac{1}{2} [1 + \sin \pi(h/l - 1/2)]$$
$$R = (1 - f) \frac{h}{2} + f \sqrt{\frac{S}{\pi}}$$

où S, h, et l sont les surface, hauteur et largeur réelles de la section considérée.

- Durée du contact entre un point de la barre et le cylindre de laminage

$$t = \frac{60}{2\pi RPM} \arccos \left(1 - \frac{\Delta h}{2\Phi} \right)$$

où RPM est la vitesse de rotation, Φ le diamètre des cylindres et Δh la variation de hauteur de la barre.