

Modélisation mathématique de l'évolution de la topographie des surfaces peintes destinées au secteur automobile

Thibault Nion

Directeur de thèse:
Dominique Jeulin



Modélisation des surfaces peintes

2008-03-18

Modélisation mathématique de l'évolution de la topographie des surfaces peintes destinées au secteur automobile

Thibault Nion

Directeur de thèse

Dominique Jeulin



Le projet de thèse a été mené dans le cadre d'une collaboration entre l'école des mines (CMM) et ArcelorMittal R&D, sous la direction de Dominique Jeulin. Les laboratoires partenaires, du côté d'ArcelorMittal sont les laboratoires MCE et Auto représentés respectivement par Gabriel Fricout et Jean-Jacques Piezanowski.

Les aciers plats



- 58 milliards \$
- Métallurgie très complexe
- Importants traitements de surface
 - chimie pour le vieillissement
 - rugosité pour la mise en forme

2

Modélisation des surfaces peintes

2008-03-18

Contexte

Les aciers plats

Les aciers plats



- 58 milliards \$
- Métallurgie très complexe
- Importants traitements de surface
 - chimie pour le vieillissement
 - rugosité pour la mise en forme

1. Les aciers plats (dont ceux pour l'automobile) représentent une grosse part des ventes d'acier. Ce sont des produits à forte valeur ajoutée.
2. La composition du matériaux lui-même est l'objet d'une métallurgie avancée.
3. Les tôles subissent en plus des traitements de surfaces très complexes qui ont un rôle fonctionnel pour le vieillissement du matériaux (corrosion) ou son comportement mécanique (tribologie).

Peinture pour automobile



- 10% coût d'une voiture
- Impact environnemental
- Qualité du véhicule

3

Modélisation des surfaces peintes

2008-03-18

Contexte

Peinture pour automobile

Peinture pour automobile



- 10% coût d'une voiture
- Impact environnemental
- Qualité du véhicule

1. La peinture représente une part non négligeable du coût d'une voiture. Un coût que les industriel vont chercher à réduire.
2. Les rejets dus à l'application et à la simple présence (lors du recyclage des carcasses) de peinture ont un fort impact environnemental que l'on cherche aussi à réduire (directives UE)
3. La peinture reste avant tout l'un des tous premiers facteurs de qualité d'un véhicule. La couleur et le brillant d'une voiture sont l'une des premières choses que le client va remarquer chez le concessionnaire.

Peinture pour automobile

Industrie automobile

- Moins de peinture
- Meilleur aspect

⇒

Producteurs d'acier

Plus de contraintes sur les surfaces des aciers plats

4

Modélisation des surfaces peintes

Contexte

Peinture pour automobile

Peinture pour automobile

Industrie automobile

Moins de peinture

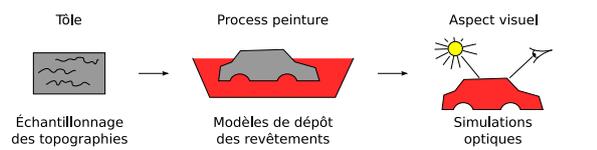
Meilleur aspect

Producteurs d'acier

Plus de contraintes sur les surfaces des aciers plats

1. L'industrie automobile veut utiliser moins de peinture tout en ayant des aspects peints finaux toujours croissants.
2. L'acier plat qui est sous la peinture, joue un rôle croissant dans l'aspect peint.

Le projet de thèse



5

Modélisation des surfaces peintes

Contexte

Le projet de thèse

Le projet de thèse



1. Le projet de thèse comporte trois grandes étapes : la caractérisation de la vérité terrain, l'utilisation de ces données pour construire des modèles de dépôt puis pour simuler les interactions entre les surfaces et la lumière.

Caractérisation des surfaces

Exploitation des données

Modélisation physique des dépôts

7

Modélisation des surfaces peintes

Caractérisation des surfaces

Caractérisation des surfaces

Section: Caractérisation des surfaces

Caractérisation des surfaces

Aspect peint et rugosité

8

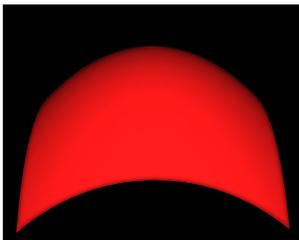
2008-03-18
Modélisation des surfaces peintes
└─ Caractérisation des surfaces
 └─ Aspect peint et rugosité
 └─ Caractérisation des surfaces

Caractérisation des surfaces

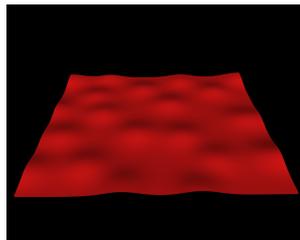
Aspect peint et rugosité

Sous-section: Aspect peint et rugosité

Aspect peint et géométrie de surface



Grandes déformations

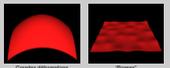


“Bosses”

9

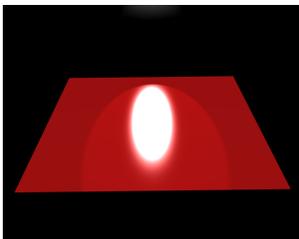
2008-03-18
Modélisation des surfaces peintes
└─ Caractérisation des surfaces
 └─ Aspect peint et rugosité
 └─ Aspect peint et géométrie de surface

Aspect peint et géométrie de surface

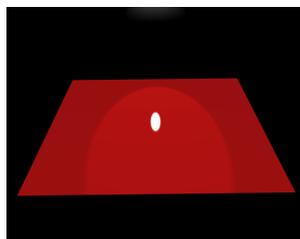


1. L'aspect peint est un problème très complexe où entrent en jeu de nombreux facteurs dont certains sont très subjectifs.
2. Un facteur bien identifié est la présence de déformations à la surface des objets.
3. Si la déformation est très grande elle peut faire partie du design général de l'objet (coin d'une carrosserie, etc)
4. Si la déformation est plus petite (10cm) alors c'est sans doute plutôt un défaut (chocs de graviers, etc)

Aspect peint et géométrie de surface



Surface rugueuse



Surface lisse

10

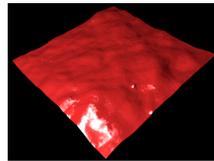
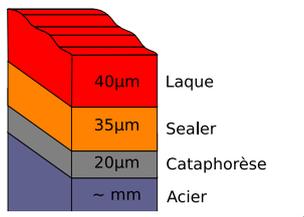
2008-03-18
Modélisation des surfaces peintes
└─ Caractérisation des surfaces
 └─ Aspect peint et rugosité
 └─ Aspect peint et géométrie de surface

Aspect peint et géométrie de surface

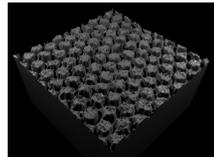


1. Pour des motifs de très petites tailles (1mm à qq microns) la présence des motifs est quasiment invisible.
2. En fait, leur influence dépend de l'éclairage. Les petits motifs déforment les reflets et créent des halos sur leurs bords.
3. Au cours du projet, notre intérêt s'est porté sur la détection et la prédiction de ce type de petits motifs et notamment sur le lien entre les motifs présents sur la tôle "nue" et ceux sur la tôle peinte.

La peinture sur les aciers plats



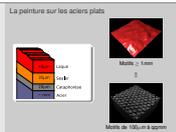
Motifs $\geq 1\text{ mm}$



Motifs de $100\mu\text{m}$ à $q\text{mm}$

11

2008-03-18
Modélisation des surfaces peintes
└─ Caractérisation des surfaces
└─ Aspect peint et rugosité
└─ La peinture sur les aciers plats



1. Tôles nues et peintes sont "séparées" par de nombreuses couches de matière.
2. Les motifs qu'on étudie classiquement à la surface des unes et des autres, semblent quasiment disjoints (au delà du mm dans un cas, en deçà dans l'autre).
3. Malgré tout, les experts arrivent à "deviner" quel type de motifs peut présenter la tôle nue en regardant une tôle peinte.

Caractérisation des surfaces

Campagne d'expériences

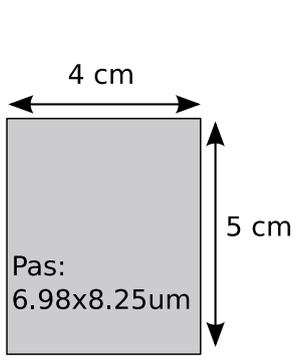
12

2008-03-18
Modélisation des surfaces peintes
└─ Caractérisation des surfaces
└─ Campagne d'expériences
└─ Caractérisation des surfaces



Sous-section: Campagne d'expériences

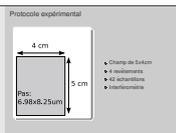
Protocole expérimental



- Champ de 5x4cm
- 4 revêtements
- 42 échantillons
- Interférométrie

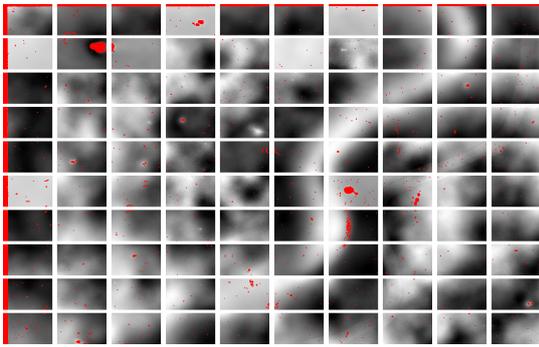
13

2008-03-18
Modélisation des surfaces peintes
└─ Caractérisation des surfaces
└─ Campagne d'expériences
└─ Protocole expérimental



1. Pour comprendre le lien entre les différentes surfaces (nues et revêtues), une campagne d'expérience exhaustive a été menée.
2. Les paramètres d'acquisition ont été définis de sorte à capturer les plus petits motifs ainsi que les plus grands.
3. Pour prendre en compte la variabilité des process et des surfaces, de nombreux échantillons ont été suivis au cours de toutes les étapes de revêtements.

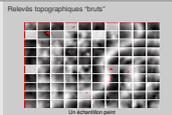
Relevés topographiques "bruts"



Un échantillon peint

14

2008-03-18
Modélisation des surfaces peintes
└─ Caractérisation des surfaces
└─ Campagne d'expériences
└─ Relevés topographiques "bruts"



1. L'acquisition se fait par morceaux et on obtient en sortie du microscope un ensemble de pavé qui, une fois rassemblés, composent la topographie entière.

Caractérisation des surfaces

Exploitation des données

Modélisation physique des dépôts

15

2008-03-18
Modélisation des surfaces peintes
└─ Exploitation des données

Exploitation des données

Section: Exploitation des données

Exploitation des données

Traitements logiciels

16

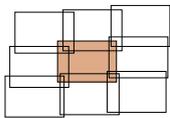
2008-03-18
Modélisation des surfaces peintes
└─ Exploitation des données
└─ Traitements logiciels
└─ Exploitation des données

Exploitation des données

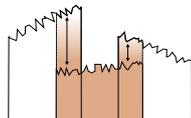
Traitements logiciels

Sous-section: Traitements logiciels

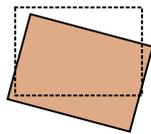
Chaîne de pré-traitement



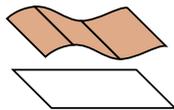
Recollement



Compensation de tilts



Calage (superposition)

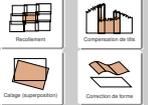


Correction de forme

17

2008-03-18
Modélisation des surfaces peintes
└─ Exploitation des données
 └─ Traitements logiciels
 └─ Chaîne de pré-traitement

Chaîne de pré-traitement



1. En théorie, les imagerie sont acquises sur une grille régulière avec un recouvrement donné. En pratique la superposition n'a rien de régulier et plusieurs acquisitions se sont déroulées "de biais", ce que nous avons corrigé.
2. D'un pavé à l'autre, les altitudes ne sont pas relevées par rapport au même référentiel, et, en plus, le plateau du microscope semble sujet aux tilts, ce qu'il a fallu aussi corriger pour obtenir des topographies cohérentes.
3. Une fois les imagerie reconstruites, il a fallu en changer l'orientation pour qu'elles soient toutes superposables.
4. Enfin nous avons proposé une solution originale au problème de la non-planéité des échantillons.

Exploitation des données

Correction de forme

18

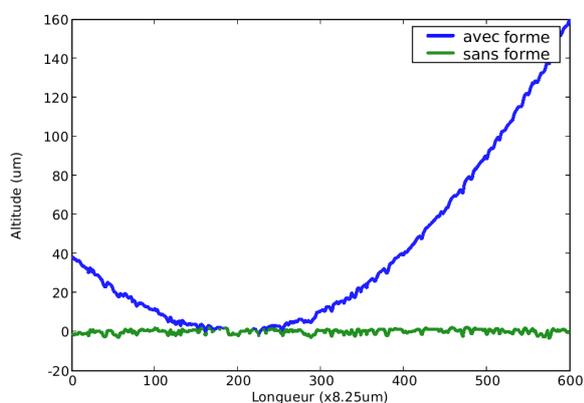
2008-03-18
Modélisation des surfaces peintes
└─ Exploitation des données
 └─ Correction de forme
 └─ Exploitation des données

Exploitation des données

Correction de forme

Sous-section: Correction de forme

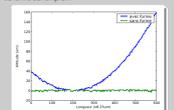
La forme sur un profil



19

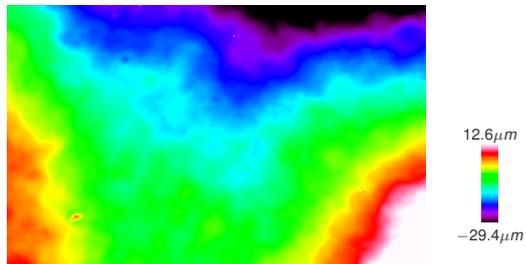
2008-03-18
Modélisation des surfaces peintes
└─ Exploitation des données
 └─ Correction de forme
 └─ La forme sur un profil

La forme sur un profil



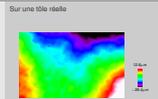
1. La forme crée des dérives de grandes échelles sur les altitudes mesurées.
2. En pratique, la correction se fait souvent par interpolations polynomiales (+/- raffinées).
3. Mais un utilisateurs doit toujours être là pour ajuster les paramètres "à l'oeil".

Sur une tôle réelle



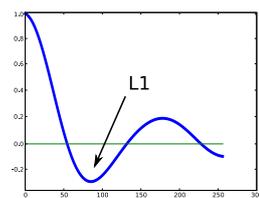
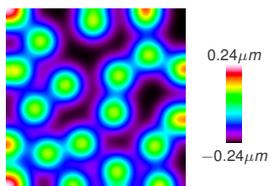
20

2008-03-18
 Modélisation des surfaces peintes
 └─ Exploitation des données
 └─ Correction de forme
 └─ Sur une tôle réelle



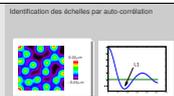
Sur un échantillon de tôle recouvert de sealer (ref P3E, rugosité aléatoire), on voit à première vue des motifs de très grandes échelles qui masquent les plus petits motifs qui nous intéressent.

Identification des échelles par auto-corrélation



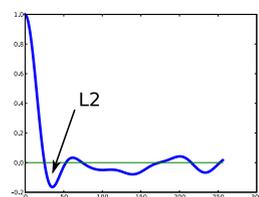
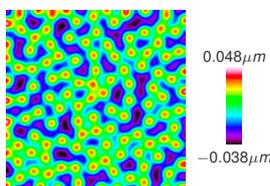
21

2008-03-18
 Modélisation des surfaces peintes
 └─ Exploitation des données
 └─ Correction de forme
 └─ Identification des échelles par auto-corrélation



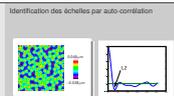
1. Sur une image simulée présentant des motifs de taille moyenne ("L1") on peut calculer la fonction d'auto-corrélation.
2. Celle-ci présente des caractéristiques (passage par un minimum négatif, changements de signe) qui donnent des indices sur la taille des motifs.

Identification des échelles par auto-corrélation



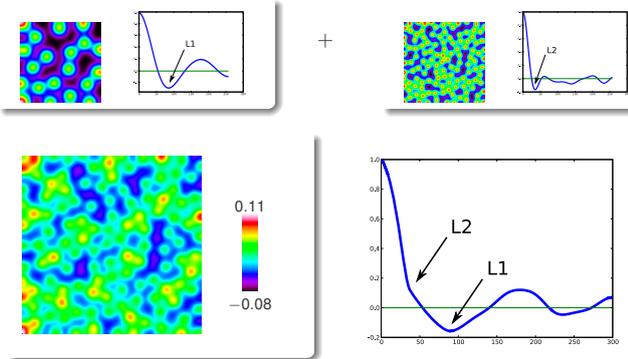
22

2008-03-18
 Modélisation des surfaces peintes
 └─ Exploitation des données
 └─ Correction de forme
 └─ Identification des échelles par auto-corrélation



1. Sur une surface présentant des motifs plus petits, on constate que la fonction d'auto-corrélation signale bien ces changements d'échelle.

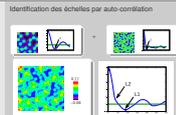
Identification des échelles par auto-corrélation



23

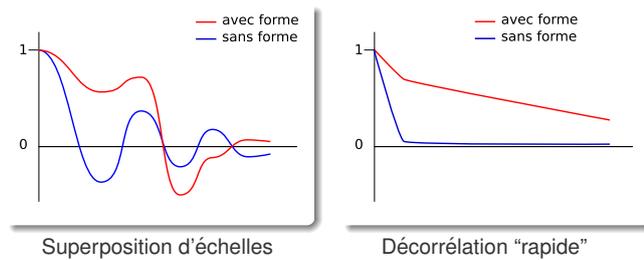
Modélisation des surfaces peintes

- └ Exploitation des données
- └ Correction de forme
- └ Identification des échelles par auto-corrélation



1. Lors qu'on compose une surface à partir d'autres surfaces présentant chacune des motifs d'échelles distinctes, on retrouve ces échelles sur la fonction de corrélation (présence de coudes et de minima)

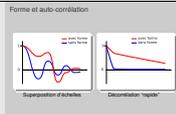
Forme et auto-corrélation



24

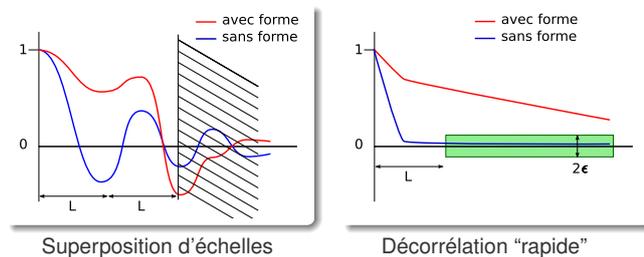
Modélisation des surfaces peintes

- └ Exploitation des données
- └ Correction de forme
- └ Forme et auto-corrélation



1. Pour résumer, de façon schématique : le cas général et un cas particulier des superposition entre petits motifs et motifs de tailles nettement plus grandes.
2. Cas général : les grands motifs vont imposer l'allure à grande échelle de la fonction d'auto-corrélation.
3. Cas particulier : lorsque les plus petites échelles sont de l'ordre du "pas d'échantillonnage" et que la seule échelle plus grande est celle de la forme, la correction de la forme revient à "décorrélérer le signal".

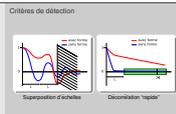
Critères de détection



25

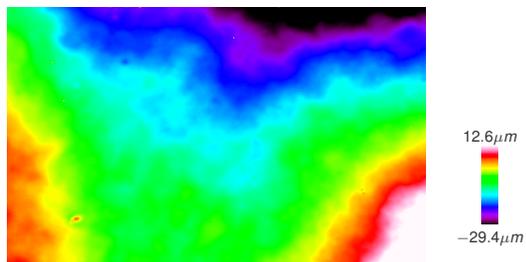
Modélisation des surfaces peintes

- └ Exploitation des données
- └ Correction de forme
- └ Critères de détection



1. Pour détecter la forme, on va chercher à détecter la présence de motifs plus grands qu'une certaine échelle seuil.
2. La présence de forme sur un échantillon est détectée par une fonction de corrélation indiquant des motifs de "grande" taille.
3. On peut aussi détecter l'absence de corrélation lorsque le signal semble entièrement décorréolé sauf pour un simili effet pépite.

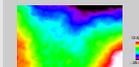
Exemple sur une tôle avec primaire



26

- 2008-03-18
- Modélisation des surfaces peintes
 - └ Exploitation des données
 - └ Correction de forme
 - └ Exemple sur une tôle avec primaire

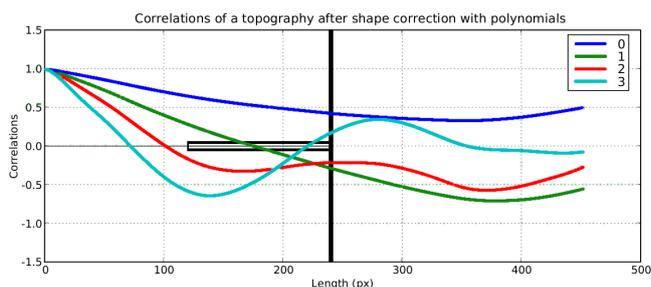
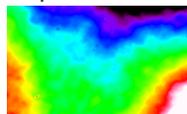
Exemple sur une tôle avec primaire



Sur un échantillon de tôle recouvert de sealer (ref P3E, rugosité aléatoire), on voit à première vue des motifs de très grandes échelles.

1. On devine vaguement les motifs des autres échelles inférieures à la limite entre les niveaux de couleur.

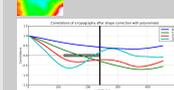
Exemple sur une tôle avec primaire



27

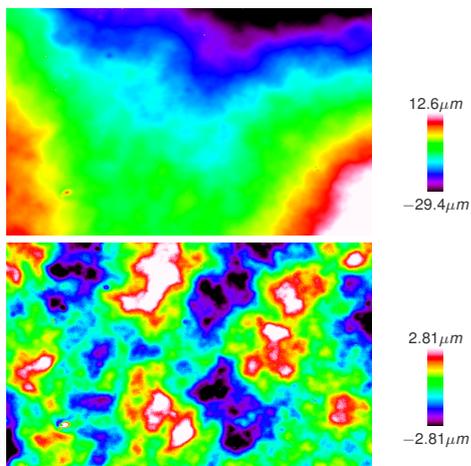
- 2008-03-18
- Modélisation des surfaces peintes
 - └ Exploitation des données
 - └ Correction de forme
 - └ Exemple sur une tôle avec primaire

Exemple sur une tôle avec primaire



1. Afin de corriger la forme, on teste des corrections par des polynômes de degrés croissants.
2. A chaque étape la correction est faite en 2D par un polynôme dont on fixe le degré *maximal*.
3. Lorsque l'on ne détecte plus de forme, on arrête "l'exploration" et on conserve le polynôme déjà trouvé.
4. La détection se fait bien sur un profil 1D (suivant la direction de laminage) de la fonction d'auto-corrélation, ce qui semble être déjà très efficace en pratique.

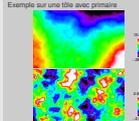
Exemple sur une tôle avec primaire



28

- 2008-03-18
- Modélisation des surfaces peintes
 - └ Exploitation des données
 - └ Correction de forme
 - └ Exemple sur une tôle avec primaire

Exemple sur une tôle avec primaire



1. On constate ici qu'il ne reste plus grand chose de la forme initiale.
2. On voit soudainement ressortir des motifs (effet de visualisation), et le dénivelé total est beaucoup plus faible.
3. On peut dès lors espérer avoir accès à une statistique "correcte" des motifs dont les échelles nous intéressent.

Exploitation des données

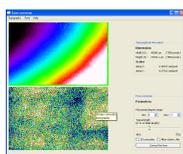
Premiers résultats

29



Sous-section: Premiers résultats

Bilan des traitement logiciels



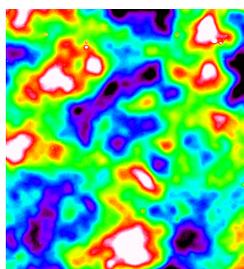
- 165 topographies entièrement restaurées
- défauts restants :
 - zones non mesurées
 - calage non parfait (+/- 5 pixels)
- une chaîne de traitement complète
- un outil de correction de forme

30



1. Une base de donnée très importante a été réunie et rendue exploitable
2. De nombreux outils ont été développés qui pourront resservir (et l'ont déjà fait) .

Observations



Surface laquée

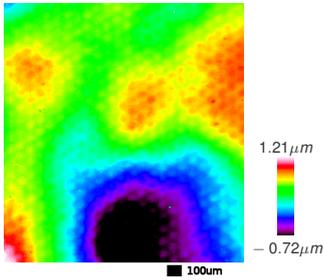
- Larges motifs mis en valeur
- Petits motifs atténués mais toujours visibles

31



1. Sur les topographies restaurées on observe déjà quelques caractéristiques intéressantes.
2. Les motifs larges (mm au cmm) sont amplifiés comme le suggère la littérature.
3. Les motifs les plus faibles de la tôle nue réapparaissent sur la tôle peinte ce qui est une surprise.
4. Ce sont autant de défis pour les modèles de dépôts.

Observations

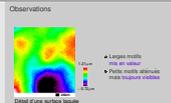


Détail d'une surface laquée

- Larges motifs mis en valeur
- Petits motifs atténués mais toujours visibles

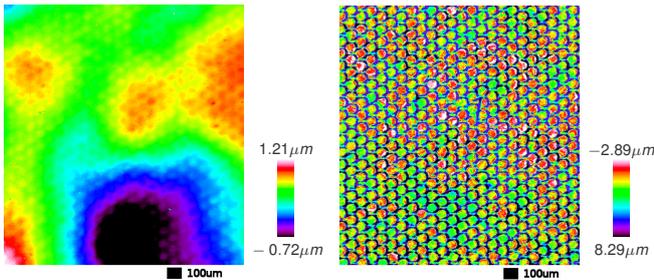
31

2008-03-18
Modélisation des surfaces peintes
└ Exploitation des données
└ Premiers résultats
└ Observations



1. Sur les topographies restaurées on observe déjà quelques caractéristiques intéressantes.
2. Les motifs larges (mm au cmm) sont amplifiés comme le suggère la littérature.
3. Les motifs les plus faibles de la tôle nue réapparaissent sur la tôle peinte ce qui est une surprise.
4. Ce sont autant de défis pour les modèles de dépôts.

Observations

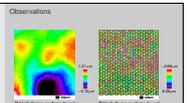


Détail d'une surface laquée

Détail d'une surface "nue"

31

2008-03-18
Modélisation des surfaces peintes
└ Exploitation des données
└ Premiers résultats
└ Observations



1. Sur les topographies restaurées on observe déjà quelques caractéristiques intéressantes.
2. Les motifs larges (mm au cmm) sont amplifiés comme le suggère la littérature.
3. Les motifs les plus faibles de la tôle nue réapparaissent sur la tôle peinte ce qui est une surprise.
4. Ce sont autant de défis pour les modèles de dépôts.

Caractérisation des surfaces

Exploitation des données

Modélisation physique des dépôts

32

2008-03-18
Modélisation des surfaces peintes
└ Modélisation physique des dépôts



Section: Modélisation physique des dépôts

Modélisation physique des dépôts

Quantification des échelles

33

2008-03-18

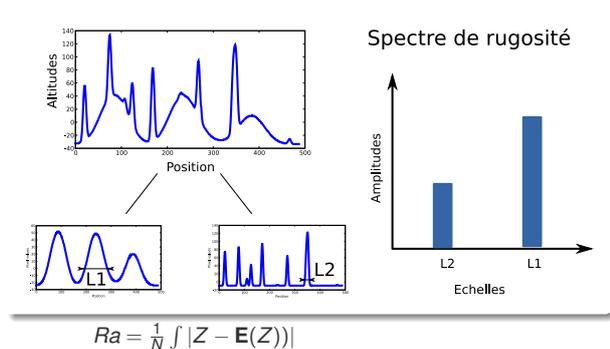
- Modélisation des surfaces peintes
 - Modélisation physique des dépôts
 - Quantification des échelles
 - Modélisation physique des dépôts

Modélisation physique des dépôts

Quantification des échelles

Sous-section: Quantification des échelles

Les spectres de rugosité

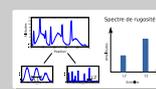


34

2008-03-18

- Modélisation des surfaces peintes
 - Modélisation physique des dépôts
 - Quantification des échelles
 - Les spectres de rugosité

Les spectres de rugosité



1. Pour pouvoir tester les modèles, il faut être capable de quantifier la présence des échelles de motifs.
2. Pour cela on utilise l'outil spectre de rugosité développé et introduit à ArcelorMittal par l'équipe d'Hassan Zahouani de Centrale Lyon.

Modélisation physique des dépôts

Modèles hydrodynamiques

35

2008-03-18

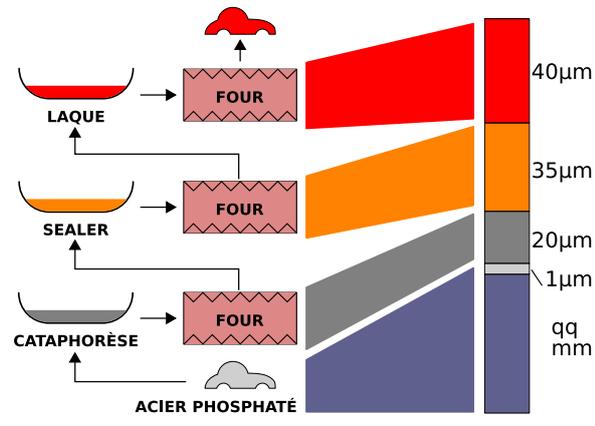
- Modélisation des surfaces peintes
 - Modélisation physique des dépôts
 - Modèles hydrodynamiques
 - Modélisation physique des dépôts

Modélisation physique des dépôts

Modèles hydrodynamiques

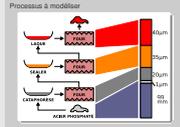
Sous-section: Modèles hydrodynamiques

Processus à modéliser



36

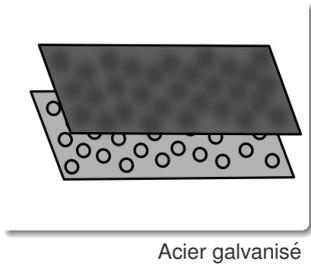
2008-03-18
Modélisation des surfaces peintes
└ Modélisation physique des dépôts
└ Modèles hydrodynamiques
└ Processus à modéliser



1. Le process de peinture est complexe et se fait par une succession de dépôts de fluide et de cuissons.
2. Les étapes modélisées sont le dépôt de cataphorèse et le dépôt de sealer.

Dépôt de cataphorèse

Cataphorèse



Acier galvanisé

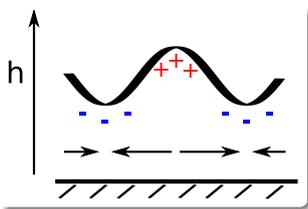
37

2008-03-18
Modélisation des surfaces peintes
└ Modélisation physique des dépôts
└ Modèles hydrodynamiques
└ Dépôt de cataphorèse



1. Le premier modèle se concentre sur l'étalement de la cataphorèse sur son substrat
2. La cataphorèse est déposée par électrodéposition

Tension de surface

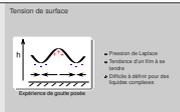


Expérience de goutte posée

- Pression de Laplace
- Tendance d'un film à se tendre
- Difficile à définir pour des liquides complexes

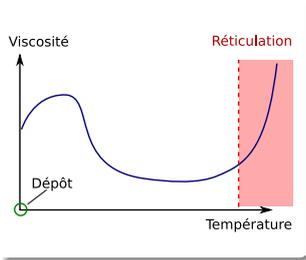
38

2008-03-18
Modélisation des surfaces peintes
└ Modélisation physique des dépôts
└ Modèles hydrodynamiques
└ Tension de surface



1. La tension de surface est un facteur déterminant dans l'étalement des fluides. Elle est intimement liée à la pression de Laplace.
2. Elle génère de hautes pressions sous les zones présentant de fortes courbures.
3. Les différences de pression tirent le film de sorte à aplanir les déformations initiales.
4. Elle est difficile à caractériser pour les liquides qui nous préoccupent.

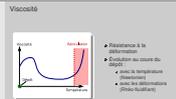
Viscosité



- Résistance à la déformation
- Évolution au cours du dépôt :
 - avec la température (Newtonien)
 - avec les déformations (Rhéo-fluidifiant)

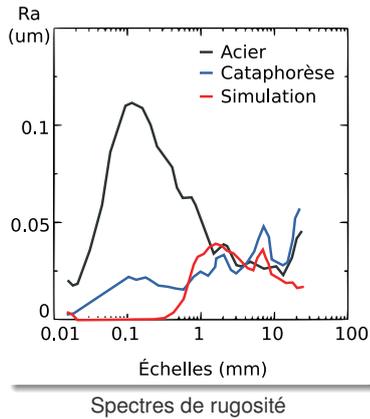
39

2008-03-18
 Modélisation des surfaces peintes
 └ Modélisation physique des dépôts
 └ Modèles hydrodynamiques
 └ Viscosité



1. La viscosité s'oppose à toute déformation et notamment celles dues aux tensions de surface.
2. Sa valeur change en fonction de la température.
3. Sa valeur peut aussi changer en fonction des contraintes (comportement rhéo-fluidifiant).

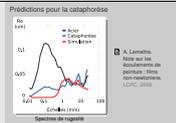
Prédictions pour la cataphorèse



A. Lemaître.
 Note sur les écoulements de peinture : films non-newtoniens.
 LCPC, 2006

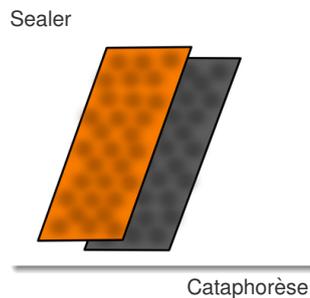
40

2008-03-18
 Modélisation des surfaces peintes
 └ Modélisation physique des dépôts
 └ Modèles hydrodynamiques
 └ Prédictions pour la cataphorèse



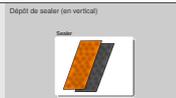
1. Le modèle proposé par A. Lemaître fait suite au modèle proposé en 2000 par J.P. Nauzin (et tiré de la littérature).
2. Il modélise correctement les motifs de grandes échelles.
3. Il prédit l'extinction des motifs les plus petits, ce qui contredit l'expérience.

Dépôt de sealer (en vertical)



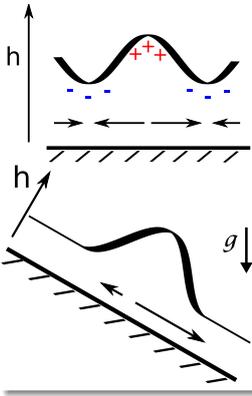
41

2008-03-18
 Modélisation des surfaces peintes
 └ Modélisation physique des dépôts
 └ Modèles hydrodynamiques
 └ Dépôt de sealer (en vertical)



1. Lorsque les liquides comme peinture et sealer sont appliqués sur des surfaces verticales (portières, ailes etc), de nouveaux phénomènes peuvent se produire.

Substrats inclinés

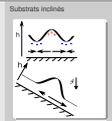


- Gravité
- Instabilités (?)

 P. Manneville.
 Étude de l'évolution
 d'un film fluide sur un
 support
 irrégulier, incliné et
 soumis à la gravité.
 LadHyX, 2006

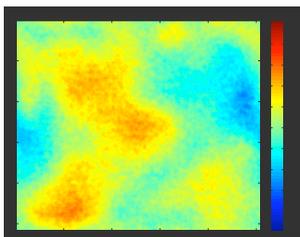
42

2008-03-18
 Modélisation des surfaces peintes
 └ Modélisation physique des dépôts
 └ Modèles hydrodynamiques
 └ Substrats inclinés

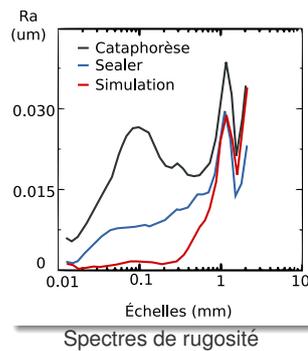


1. La gravité intervient et peut par endroit renforcer l'action de la tension de surface et par endroit s'y opposer.
2. Des écoulements et des motifs peuvent apparaître.
3. Une collaboration avec P. Manneville qui a beaucoup publié sur ce type de problème a été engagée.

Prédiction pour le sealer (vertical)



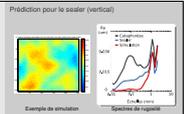
Exemple de simulation



Spectres de rugosité

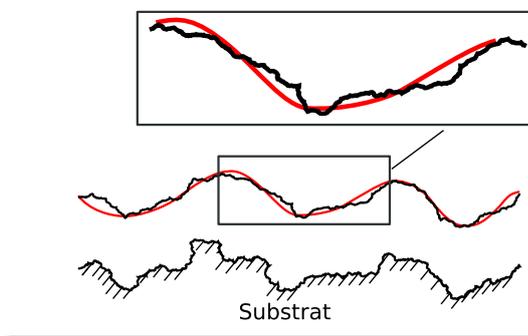
43

2008-03-18
 Modélisation des surfaces peintes
 └ Modélisation physique des dépôts
 └ Modèles hydrodynamiques
 └ Prédiction pour le sealer (vertical)



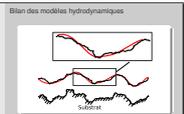
1. Le modèle proposé par P. Manneville est 2D.
2. Il prédit bien les grands motifs.
3. Il surestime l'atténuation des petits motifs.

Bilan des modèles hydrodynamiques



44

2008-03-18
 Modélisation des surfaces peintes
 └ Modélisation physique des dépôts
 └ Modèles hydrodynamiques
 └ Bilan des modèles hydrodynamiques



1. Tous les modèles hydrodynamiques prédisent bien la conservation des motifs de grandes échelles.
2. Pour les motifs de plus petites échelles ils se trompent en prédisant leur disparition.

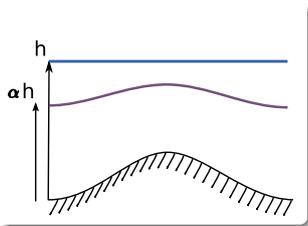
Modélisation physique des dépôts

Le comportement des matériaux

45

Sous-section: Le comportement des matériaux

Contraction du film

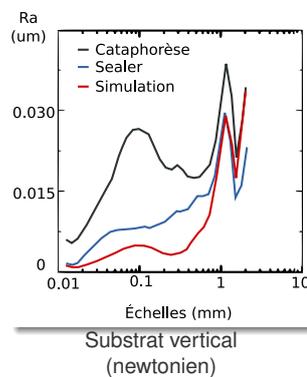
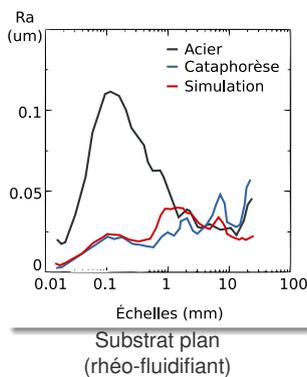


- Réticulation
- Transformation affine sur l'épaisseur du film
- Réapparition des motifs du substrat

46

1. Lors de la cuisson, se produit la réticulation où le film se durcit et se contracte.
2. A. Lemaître nous a proposé de prendre cela en compte.
3. Il s'agit d'une transformation affine sur l'épaisseur du film.

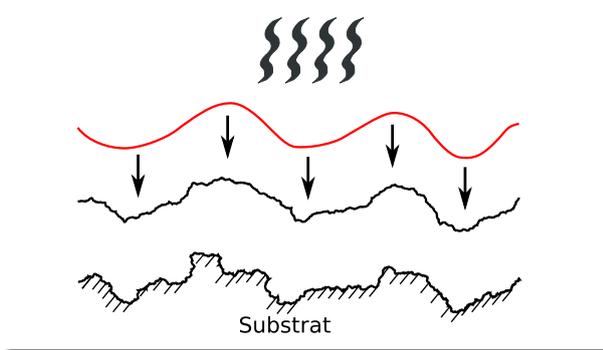
Correction des modèles



47

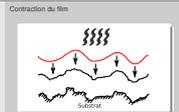
1. La contraction corrige très bien le modèle "horizontal"
2. La contraction corrige un peu le modèle "vertical"
3. De nombreux écarts à la réalité sont dus à une grande imprécision sur nos connaissances des paramètres physiques des fluides.

Contraction du film



48

2008-03-18
Modélisation des surfaces peintes
└─ Modélisation physique des dépôts
└─ Le comportement des matériaux
└─ Contraction du film



1. L'hydrodynamique a donc raison... dans un premier temps.
2. Pour décrire la surface finale il faut prendre en compte la réticulation qui fait réapparaître les motifs sous-jacents.

Bilan

- Vérité terrain
 - caractérisation correcte
 - outils logiciels réutilisables
- Évolution de la rugosité
 - Explications des motifs millimétriques ($500\mu m - 5mm$)
 - Pistes pour les motifs micrométriques ($50\mu m - 500\mu m$)
- Aspect peint
 - Travail exploratoire (lancer de rayon)
 - Pistes prometteuses (diffusion interne)

49

Perspectives

- Mesurer/modéliser les paramètres manquants
- Coupler écoulement, évaporation, réticulation
- Coordonner avec des modèles optiques

À terme

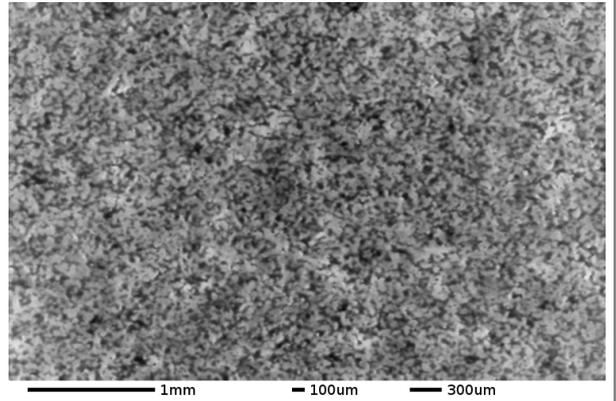
- Outils d'analyse et de modélisation de l'aspect peint
- Définition de nouveaux critères de qualité
- Conception de surfaces "idéales"

50

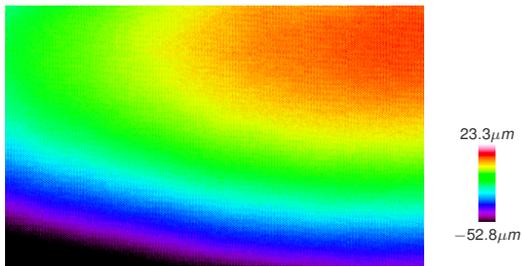
Merci !

Annexes

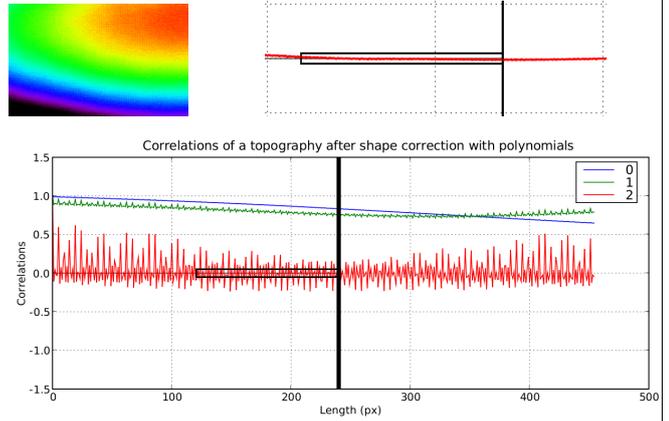
Les motifs sur les aciers plats



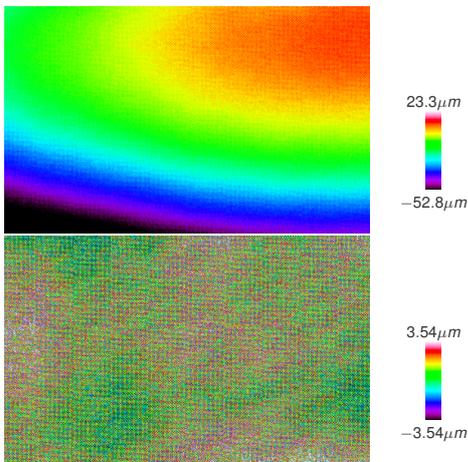
Exemple sur une tôle galvanisée



Exemple sur une tôle galvanisée



Exemple sur une tôle galvanisée



La forme d'un échantillon (zoom)

