



ERAMET
RESEARCH

38.10.032-JM

Trappes, le 14 septembre 2010

**ANALYSE STRUCTURALE DE TÔLES D'ALLIAGE TA6V LAMINEES A
COMMENTRY**

ETUDE N° 23300 / 2566

DISTRIBUTION :

AUBERT & DUVAL

ERASTEEL

P. DELABORDE

R. BARET

C. DUMONT

L. SANCHO

P. HERITIER

S. SELLA

L. VAILLANT de GUELIS

ERAMET RESEARCH

B. ANTOLOVICH

E. BAILLET

J-P. CESCUTTI

Documentation

Auteur : J. MONTAGNON	Approbateur : B. ANTOLOVICH

KEYWORDS : BRANCHE ALLIAGE ° ERASTEEL ° AUBERT&DUVAL ° TA6V ALLOY ° SHEETS ° ROLLING ROUTES ° STRUCTURE ° TEXTURE ° EBSD °

RÉSUMÉ-CONCLUSIONS :

INTRODUCTION :

L'usine d'ERASTEEL COMMENTRY dispose d'un laminoir à tôles type « feuille à feuille » qui procure une grande souplesse en termes de gammes de laminage. AUBERT&DUVAL envisage le développement du laminage de tôles d'alliages de titane sur cet outil, pour des applications aéronautiques qui réclament la mise en forme finale des tôles par la technologie dite SPF (Super Plastic Forming).

Une campagne d'essais de laminage de tôles d'alliage TA6V est en cours à COMMENTRY dans le cadre du programme de faisabilité « aval UKAD » de test des installations industrielles de la BRANCHE ALLIAGE. L'objectif technique est la fabrication de tôles d'épaisseur 1 mm répondant aux spécifications aéronautiques. La partie laminage à chaud a été réalisée en juillet, visant à obtenir des tôles semi-finies d'épaisseur 1,43 mm.

ERAMET RESEARCH (ER) a participé à la définition de trois gammes type qui diffèrent essentiellement soit par la température d'ébauchage des largets de départ, soit par l'introduction d'un changement de la direction de laminage entre le stade ébauche et le stade finition (dit laminage « croisé »).

La présente étude a pour objet l'analyse structurale de prélèvements de tôles semi-finies et d'ébauches de tôles à l'aide du MEB-FEG d'ERAMET RESEARCH. Elle comporte une analyse des structures granulaires et des textures à l'aide d'examen MEB-EBS.

CONCLUSIONS :

Cette étude exhaustive des ébauches et produits finis issus de trois gammes potentielles de laminage à chaud de tôles d'alliage TA6V amène les commentaires généraux suivants :

- Les grains de phase alpha primaire formés dès le premier chauffage à haute température des gammes alpha-beta sont étirés et conservés tout au long d'une séquence de laminage, même à la suite de très forts taux de déformation. Ils sont la cause de non-conformités en clientèle. Une façon progressive de les atténuer est de pratiquer des recuits séquentiels entre chaque chaude des gammes alpha-beta. Mais l'atteinte finale d'une distribution de taille de grain inférieure à 10 microns réclame beaucoup d'efforts. Les deux gammes alpha-beta testées à COMMENTRY lors de la campagne de faisabilité n'atteignent pas pleinement cet objectif.
- Une façon plus efficace d'atteindre une distribution granulaire fine et homogène est de commencer la séquence de transformation alpha-beta à partir d'une structure martensitique de trempe depuis beta. **La gamme mixte beta puis alpha-beta testée lors de la campagne de faisabilité permet d'atteindre l'objectif de distribution fine et homogène de taille de grain.** La contre partie, observée dans cette étude, est que les grains beta sont initialement très grossiers et conduisent, par un effet d'héritage structurale, à la formation d'une macro-texture, en bandes dans le cas de la transformation par laminage. Ces bandes alignées dans une seule direction, celle du laminage, donnent traditionnellement une forte anisotropie aux produits plats, ce qui est refusé par les clients.
- La technique du laminage « croisé », qui consiste à changer de 90° la direction de laminage pendant la fabrication d'un produit plat, a été testée dans l'une des deux gammes alpha-beta. A la texture héritée de la partie antérieure de la gamme, le laminage croisé superpose progressivement une nouvelle texture qui, pour un taux de réduction de section d'environ 50 à 60%, permet d'équilibrer la répartition des directions cristallographiques $\langle 0001 \rangle$ et $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ dans les deux directions longitudinale et travers-large de la tôle. **On peut en attendre une bonne isotropie des propriétés selon ces deux directions principales des tôles.**

- Sous l'aspect microstructural, les grains de phase alpha primaire conservent plus ou moins les orientations cristallographiques issues de la gamme antérieure, tandis que les grains « secondaires » issus de la décomposition de la matrice beta reformée lors du réchauffage s'orientent selon la composante de texture (0001) $\langle 10-10 \rangle$, qui est à 90° de la texture antérieure en cas de laminage croisé.
- Un effet de laminage croisé est observée dès l'étape initiale d'ébauchage en sens travers du larget de départ. Cet effet est encore observé après chauffage du larget dans le domaine beta.

Une première conclusion de ces examens est que le laminage croisé semble indispensable pour achever la transformation en « alpha-beta » de tôles dans lesquelles on recherche une isotropie des propriétés dans les directions longitudinale et travers-large.

Une deuxième conclusion serait qu'une fine structure aciculaire issue d'un réchauffage dans le domaine beta, puis transformation thermomécanique (ou non ?) dans ce même domaine, suivi d'une trempe est à même de favoriser une recristallisation à grains fins et de taille homogène lors du laminage de finition dans le domaine alpha-beta. On présuppose qu'un préchauffage dans le domaine beta pourrait se limiter à atteindre un court instant la température exacte du transus beta de l'alliage, de façon à limiter le grossissement des grains autant que faire se peut.

En conclusion finale, un panachage des gammes 1 (ébauchage en beta) et 3 (laminage croisé) peut permettre l'atteinte pleine des objectifs issus des cahiers des charges « Tôles minces pour mise en forme par SPF en vue d'applications aéronautiques ». On peut imaginer des variantes qui mettraient en œuvre le laminage croisé en alpha-beta de largets minces préalablement traités par trempe depuis le domaine beta.

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION	5
2. PRESENTATION DES GAMMES	5
3. ETUDE DES EBAUCHES ET DES TÔLES D'ALLIAGE TA6V	5
3.1. EXAMENS SUR PRODUITS ISSUS DE LA GAMME 2 :	6
3.1.1. Examens de l'ébauche épaisseur 6 mm :	6
3.1.2. Examens d'une tôle finie d'épaisseur 1,43 mm :	7
3.2. EXAMENS SUR PRODUITS ISSUS DE LA GAMME 3 DITE « CROISEE » :	7
3.2.1. Examens de l'ébauche épaisseur 2,5 mm :	7
3.2.2. Examens d'une tôle finie d'épaisseur 1,43 mm :	8
3.3. EXAMENS SUR PRODUITS ISSUS DE LA GAMME 1 « EBAUCHAGE BETA » :	8
3.3.1. Examens de l'ébauche épaisseur 8 mm :	9
3.3.2. Examens d'une tôle finie d'épaisseur 1,43 mm issue de la gamme 1 :	9
3.3.3. Examens d'une tôle finie d'épaisseur 1,43 mm issue de la gamme 1 bis :	9
4. DISCUSSION & CONCLUSIONS	10
5. ANNEXES	11
ANNEXE 1 : EXAMENS STRUCTURAUX MEB/EBSD DES TÔLES EBAUCHEES ET FINIES PAR LAMINAGE UNIDIRECTIONNEL EN « ALPHA + BETA »	12
ANNEXE 2 : EXAMENS STRUCTURAUX MEB/EBSD DES TÔLES EBAUCHEES ET FINIES PAR LAMINAGE CROISE EN « ALPHA + BETA »	20
ANNEXE 3 : EXAMENS STRUCTURAUX MEB/EBSD DES TÔLES EBAUCHEES EN « BETA » ET FINIES PAR LAMINAGE UNIDIRECTIONNEL EN « ALPHA+BETA »	28
ANNEXE 4 : RESUME DES CARACTERISTIQUES STRUCTURALES DES TÔLES	39
ANNEXE 5 : GAMMES DE FABRICATION DES TÔLES EXPERTISEES	41

1. INTRODUCTION

L'usine d'ERASTEEL COMMENTRY dispose d'un laminage à tôles type « feuille à feuille » qui procure une grande souplesse en termes de gammes de laminage. AUBERT&DUVAL envisage le développement du laminage de tôles d'alliages de titane sur cet outil, pour des applications aéronautiques qui réclament la mise en forme finale des tôles par la technologie dite SPF (Super Plastic Forming).

Une campagne d'essais de laminage de tôles d'alliage TA6V est en cours à COMMENTRY dans le cadre du programme de faisabilité « aval UKAD » de test des installations industrielles de la BRANCHE ALLIAGE. L'objectif technique est la fabrication de tôles d'épaisseur 1 mm répondant aux spécifications aéronautiques. La partie laminage à chaud a été réalisée en juillet, visant à obtenir des tôles semi-finies d'épaisseur 1,43 mm.

ERAMET RESEARCH (ER) a participé à la définition de trois gammes type qui diffèrent essentiellement soit par la température d'ébauchage des largets de départ, soit par l'introduction d'un changement de la direction de laminage entre le stade ébauche et le stade finition (dit laminage « croisé »).

La présente étude a pour objet l'analyse structurale de prélèvements de tôles semi-finies et d'ébauches de tôles à l'aide du MEB-FEG d'ERAMET RESEARCH. Elle comporte une analyse des structures granulaires et des textures à l'aide d'examen MEB-EBS.

2. PRESENTATION DES GAMMES

Plusieurs largets ont été fabriqués par AUBERT&DUVAL pour cette campagne : les largets ont été ébauchés dans le domaine alpha-beta sur le gros train des ANCIZES puis ont été fraisés afin d'obtenir un état de surface convenable et reproductible. Ces largets ont ensuite été laminés à chaud selon les trois gammes prédéfinies.

Les gammes de production des produits dont ER a réceptionné des échantillons pour examens sont présentées en Annexe 5. Une description sommaire de ces gammes est la suivante :

- Gamme 1 : Ebauchage en β à 1050°C, 2^{ème} chaude en $\alpha + \beta$ à 930°C, 3^{ème} chaude en co-laminage à 2 feuilles à 870°C
- Gamme 2 : Ebauchage en $\alpha + \beta$ à 970°C, 2^{ème} chaude en $\alpha + \beta$ à 930°C, 3^{ème} chaude en co-laminage à 2 feuilles à 870°C
- Gamme 3 : Ebauchage en $\alpha + \beta$ à 970°C, 2^{ème} chaude en $\alpha + \beta$ à 930°C (**laminage croisé**), 3^{ème} chaude en co-laminage à 3 feuilles à 870°C

Un traitement thermique final de 15 min à 870°C puis refroidissement lent sous cloche est appliqué après la dernière chaude.

Les largets, dont la structure est alignée selon leur direction longitudinale, sont ébauchés par laminage en sens transverse : l'ébauchage correspond donc à un laminage « croisé ».

Le laminage à chaud selon les diverses gammes s'est déroulé sans difficulté particulière. Les tôles ont un bel aspect de surface ; celles qui ont subi un traitement thermique intermédiaire sont recouvertes d'une fine couche de calamine qui semble peu adhérente.

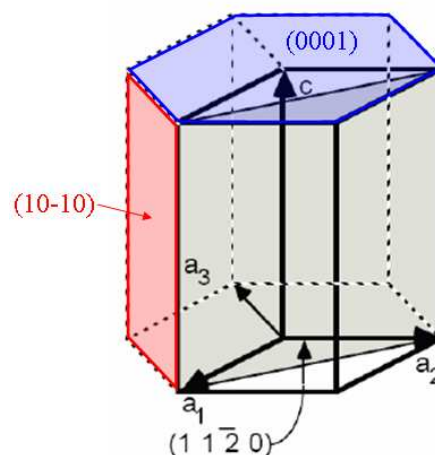
3. ETUDE DES EBAUCHES ET DES TÔLES D'ALLIAGE TA6V

L'examen en diffraction électronique à l'aide de la technique EBSD (Electron Back scattering Diffraction) permet d'atteindre des données structurales quantitatives telles que distribution de taille de

grain, taux de phase secondaire, taille de particules de phase secondaire, cartographies d'orientations cristallographiques, texture, ...

Les observations sont réalisées à cœur de chaque produit, sur des coupes longitudinales qui permettent de visualiser la structure en sens long. Des rotations de 90° des données de diffraction électronique dans l'espace d'Euler permettent d'atteindre les orientations cristallographiques de la phase alpha hexagonale par rapport au repère physique de l'échantillon.

Les distributions de taille de grain présentées dans ce rapport sont toutes pondérées par l'aire des grains. Le schéma ci-contre rappelle l'orientation des principales directions cristallographiques dans la structure hexagonale. Pour mémoire, la direction $\langle uvw \rangle$ est la normale au plan (uvw) . Dans tout ce rapport, les grains de phase alpha dite « primaire » sont ceux existants à la température de préchauffage avant transformation, tandis que les grains de phase alpha dits « secondaires » sont ceux issus de la décomposition de la fraction de phase beta à l'équilibre à cette même température.



3.1. EXAMENS SUR PRODUITS ISSUS DE LA GAMME 2 :

La gamme 2 est la gamme usuelle de finition des produits par transformation dans le domaine alpha-beta. Dans le cas présent, le laminage est purement unidirectionnel à partir du larget. Le synoptique de la gamme réalisée est présenté en Annexe 1a.

3.1.1. EXAMENS DE L'EBAUCHE EPAISSEUR 6 MM :

La réduction d'épaisseur à ce stade est de 89,5%.

La structure est composée de particules peu déformées de la phase alpha primaire, dont la taille moyenne est comprise entre 6 et 20 microns, enrobées dans une structure de grains alpha secondaires de taille moyenne 1,25 micron (cf. Annexes 1b et 1c). Les particules de phase alpha primaire sont peu déformées malgré le taux élevé de réduction d'épaisseur.

Les cartographies d'orientation et les figures de pôles discrétisés en Annexe 1d indiquent la formation d'une forte texturation :

- L'axe c (0001) de la maille hexagonale est en grande partie alignée selon la direction travers-large de l'ébauche. Une faible fraction de cet axe est aussi alignée selon la direction de laminage : ce sont essentiellement les particules de phase alpha primaire qui se trouvent dans ce cas d'orientation inhabituelle. L'explication de ce fait, redondant dans toute la présente étude, est assez simple : la direction de laminage des ébauches de tôles correspond à une direction transverse du larget initial, sur laquelle l'orientation $\langle 0001 \rangle$ des grains alpha primaire est alignée par hérédité de la texture du larget.
- De la même manière, comme le sens long du larget, sur lequel devait s'aligner préférentiellement la direction $\langle 10-10 \rangle$ et parfois la direction $\langle 11-20 \rangle$, est devenu le sens travers-large de l'ébauche de tôle, on retrouve des particules de phase alpha primaire ayant conservé cette hérédité de texture du larget dans le sens travers-large de l'ébauche. Néanmoins, l'ébauchage produit une très forte orientation de la direction $\langle 0001 \rangle$ des grains secondaires selon ce sens travers-large.
- La direction $\langle 11-20 \rangle$ est préférentiellement orientée selon le sens travers-court de la tôle (l'épaisseur), comme ce devait déjà être le cas dans le larget d'origine.

En résumé, les particules de phase alpha primaire conservent peu ou prou les orientations de la texture du larget, tandis que les grains secondaires acquièrent de nouvelles orientations, typiques de la texture rencontrée dans les produits plats : globalement, les grains secondaires voient leurs trois axes cristallographiques principaux $\langle 0001 \rangle$, $\langle 10-10 \rangle$ et $\langle 11-20 \rangle$ orientés selon les trois directions principales de l'ébauche, soit respectivement le sens travers-large, le sens long et le sens travers-court.

3.1.2. EXAMENS D'UNE TOLE FINIE D'ÉPAISSEUR 1,43 MM :

La réduction totale d'épaisseur entre ébauche et tôle, réalisée en deux chaudes à 930 puis 870 °C, est de 76%. Le co-laminage de finition à deux tôles à 870 °C met en œuvre un taux de 43%.

La structure granulaire est constituée de particules de phase alpha primaire, de grains fins secondaires et de plages à structure aciculaire fine peu résolue en diffraction électronique : ces dernières correspondent à des îlots de phase beta décomposés par transformation type martensitique lors du refroidissement rapide de la tôle mince (cf. Annexe 1c).

- Les particules de phase alpha primaire sont très déformées, de taille maximale 20 microns et de taille moyenne inférieure à 10 microns (cf. Annexe 1d).
- Les grains alpha secondaires ont une taille moyenne de 2 microns.

Par rapport à l'ébauche initiale, le laminage finition a resserré la distribution de taille de grain sans diminuer leur taille maximale.

Les enchaînements de recuits + passes de laminage ont atténués les textures observées dans l'ébauche : on retrouve un mixte des trois directions cristallographiques $\langle 0001 \rangle$, $\langle 10-10 \rangle$ et $\langle 11-20 \rangle$ de la structure hexagonale selon les trois directions de la tôle (cf. Annexe 1g). La texture dans la tôle finie apparaît donc moins marquée que dans l'ébauche, même si la direction $\langle 0001 \rangle$ est plutôt présente dans le plan de section de la tôle, tandis que la direction $\langle 10-10 \rangle$ est préférentiellement alignée selon le sens longitudinal. L'intensité maximale de la fonction de distribution FDOC est d'ailleurs notablement plus basse dans la tôle (15) que dans l'ébauche (25).

3.2. EXAMENS SUR PRODUITS ISSUS DE LA GAMME 3 DITE « CROISEE » :

Le « croisement » de la direction de laminage est pratiqué entre les deux opérations d'ébauchage, à la suite notamment d'un fort corroyage unidirectionnel (92,5%) en une chaude depuis le larget. Ce premier corroyage dans le domaine alpha-beta aboutit à une première ébauche d'épaisseur 4,2 mm, dont la structure doit s'apparenter à celle de l'ébauche d'épaisseur 6 mm décrite dans le paragraphe 3.1.1. Le synoptique de la gamme réalisée est présenté en Annexe 2a.

3.2.1. EXAMENS DE L'ÉBAUCHE ÉPAISSEUR 2,5 MM :

Cette ébauche est obtenue par laminage croisé depuis l'épaisseur 4,2 mm jusqu'à l'épaisseur 2,5 mm, soit un taux de réduction d'épaisseur de 40%. La température de réchauffage est de 930 °C, ce qui génère une recristallisation structurale de l'alliage TA6V.

La structure est composée de grains massifs résiduels de la phase alpha primaire, dont la taille maximale atteint 20 microns, enrobés dans une structure de grains alpha secondaires de taille moyenne centrée entre 3 et 5 microns (cf. Annexes 2b et 2c). La matrice comporte une proportion élevée de plages d'aspect aciculaire issues de la décomposition au refroidissement post-laminage de la matrice beta à l'équilibre à la température de laminage.

La structure granulaire offre un aspect relativement équiaxe dans le sens long de cette 2^{ème} ébauche : en fait, le sens long de la 2^{ème} ébauche correspond au sens travers de la 1^{ère} ébauche tandis que le taux d'allongement entre les deux est limité à 40% : le laminage croisé permet de limiter l'étirement continu des grains de phase alpha primaire.

Le laminage croisé a surtout permis de réduire fortement la texturation qui se forme lors du laminage de produits plats :

- Le sens travers-large de l'ébauche ne comporte qu'une modeste fraction de la direction <0001> alors que celle-ci a une forte propension à s'y aligner lors du laminage de produits plats en alliage TA6V (cf. Annexe 2d). En fait le sens travers-large comporte une forte fraction de la direction <10-10> qui s'aligne habituellement selon la direction de laminage : cette fraction de direction <10-10> est un héritage de la texture en sens long dans l'ébauche précédente d'épaisseur 4,2 mm. Le taux de réduction de 40% n'efface pas complètement la texture héritée de l'amont de la gamme de transformation.
- On retrouve une situation inversée en sens long de l'ébauche, où cohabitent de façon inhabituelle les directions <0001> et <10-10>, la première héritée de la gamme amont et la deuxième apportée par la dernière opération de laminage croisé.
- En revanche, la direction <11-20> est nettement alignée selon la direction travers-court (normale à la tôle). Ce type d'orientation de la structure en sens travers-court, rencontré dans les produits plats laminés, n'est logiquement pas influencé par le croisement des axes long / travers-large.

Les figures de pôles discrétisés (cf. Annexe 2d) sont complexes à décrire car elles rendent compte simultanément de deux textures superposées.

3.2.2. EXAMENS D'UNE TOLE FINIE D'ÉPAISSEUR 1,43 MM :

La réduction d'épaisseur entre ébauche et tôle, réalisée par co-laminage en une chaude à 870 °C, est de 43%.

Comme dans le cas de la tôle finie de la gamme précédente, la structure granulaire est constituée de particules de phase alpha primaire, de grains fins secondaires et de plages à structure aciculaire fine peu résolue en diffraction électronique (cf. annexe 2e).

- Les particules de phase alpha primaire commencent à s'allonger selon le sens long de la tôle. Leur taille maximale atteint 15 microns et leur taille moyenne est de l'ordre de 10 microns (cf. Annexe 2f).
- Les grains alpha secondaires ont une taille moyenne comprise entre 2 et 3 microns.

Le laminage finition a modérément resserré la distribution de taille de grain.

L'enchaînement de recuits et passe finale de laminage apporte une relativement bonne isotropie de texture à la tôle finie (cf. Annexe 2g). Le sens travers-large conserve une fraction conséquente de la direction <10-10> par hérédité depuis le laminage 1^{ère} ébauche. Le sens longitudinal acquiert une fraction importante de la direction <11-20> tandis que le sens travers-court est moins marqué par cette même direction <11-20> que dans le cas de l'ébauche précédente.

L'intensité maximale de la fonction de distribution FDOC est d'ailleurs notablement abaissée dans la tôle (11) par rapport à l'ébauche (25).

3.3. EXAMENS SUR PRODUITS ISSUS DE LA GAMME 1 « EBAUCHAGE BETA » :

La gamme 1 comporte un ébauchage par transformation dans le domaine haute température beta puis des passes de finition dans le domaine alpha-beta. Le synoptique de la gamme réalisée est présenté en

Annexe 3a. Le laminage dans le domaine beta a utilisé certaines capacités uniques du quarto de COMMENTRY, en particulier la possibilité de réduire le temps inter-passes à moins de 5 secondes et de réaliser une trempe eau immédiate après la dernière passe. L'objectif était de limiter le grossissement des grains issus d'une éventuelle recristallisation dynamique.

Dans le cas présent, le laminage est purement unidirectionnel à partir du larget. Le taux total de réduction d'épaisseur réservé en laminage alpha-beta est d'environ 80%. On distingue la gamme 1 qui comporte deux températures de réchauffage en alpha-beta (930 puis 870 °C) de la gamme 1 bis où les réchauffages sont conduits à la seule température de 870 °C.

3.3.1. EXAMENS DE L'EBAUCHE EPAISSEUR 8 MM :

La réduction d'épaisseur à ce stade est de 86%.

La structure est entièrement aciculaire comme l'illustre l'Annexe 3b. La taille des ex-grains beta est très grande et ne peut être cotée de façon réaliste à aucun des grandissements utilisés. Néanmoins, la structure aciculaire présente une relative finesse. Aucun grain de recristallisation n'est observé à ce stade.

La texture héritée de la transformation martensitique est déduite des relations définies entre les orientations cristallographiques des deux phases :

- directions : $\langle 111 \rangle_{\beta} // \langle 11\bar{2}0 \rangle_{\alpha}$.
- plans : $\{110\}_{\beta} // \{0001\}_{\alpha}$.

On retrouve des plages étendues de direction $\langle 11-20 \rangle$ et $\langle 0001 \rangle$ selon certaines directions particulières de l'ébauche, ce qui signifie que la phase beta prend des orientations préférentielles lors de sa déformation.

Très curieusement, les figures de pôles discrétisés (0001) et (11-20) de l'ébauche « beta », qui sont très spécifiques, ont un air de parenté avec celles des ébauches issues des deux autres gammes, comme si, là encore, il subsistait une hérédité structurale du larget initial malgré la recristallisation à très gros grains dans le domaine beta.

3.3.2. EXAMENS D'UNE TOLE FINIE D'EPAISSEUR 1,43 MM ISSUE DE LA GAMME 1 :

La structure granulaire est quasi totalement constituée de particules de grains fins secondaires de taille moyenne 2 microns (cf. annexes 3e et 3f). Il subsiste des grains « fantôme » de taille maximale 20 microns, mais ces grains sont fractionnés par des joints de désorientations inférieures à 5°.

La texture est caractérisée par son alignement en bandes qui recèlent chacune une multitude de petits grains (cf. annexe 3g). Ces bandes correspondent vraisemblablement chacune aux grains beta grossiers présents lors de l'ébauchage en phase beta.

L'intensité maximale de la fonction de distribution FDOC reste notablement élevée dans la tôle (25), en relation avec la texture en bandes d'orientation unique.

3.3.3. EXAMENS D'UNE TOLE FINIE D'EPAISSEUR 1,43 MM ISSUE DE LA GAMME 1 BIS :

La structure est très similaire d'aspect à celle de la gamme 1, mais la taille des grains est notablement affinée (taille moyenne de 1,75 micron) et paraît surtout plus homogène. La distribution pondérée par la surface est centrée sur 3 microns et la taille maximale de grain est de 10

microns. Un graphique en Annexe 4a résume les différentes distributions de taille de grain des tôles issues des 3 gammes testées.

La texture présente la même disposition en bandes d'orientation que la tôle issue de la gamme et une intensité maximale de la fonction de distribution FDOC relativement élevée (19).

4. DISCUSSION & CONCLUSIONS

Cette étude exhaustive des ébauches et produits finis issus de trois gammes potentielles de laminage à chaud de tôles d'alliage TA6V amène les commentaires généraux suivants :

- Les grains de phase alpha primaire formés dès le premier chauffage à haute température des gammes alpha-beta sont étirés et conservés tout au long d'une séquence de laminage, même à la suite de très forts taux de déformation. Ils sont la cause de non-conformités en clientèle. Une façon progressive de les atténuer est de pratiquer des recuits séquentiels entre chaque chaude des gammes alpha-beta. Mais l'atteinte finale d'une distribution de taille de grain inférieure à 10 microns réclame beaucoup d'efforts. Les deux gammes alpha-beta testées à COMMENTRY lors de la campagne de faisabilité n'atteignent pas pleinement cet objectif.
- Une façon plus efficace d'atteindre une distribution granulaire fine et homogène est de commencer la séquence de transformation alpha-beta à partir d'une structure martensitique de trempe depuis beta. **La gamme mixte beta puis alpha-beta testée lors de la campagne de faisabilité permet d'atteindre l'objectif de distribution fine et homogène de taille de grain.** La contre partie, observée dans cette étude, est que les grains beta sont initialement très grossiers et conduisent, par un effet d'héritage structurale, à la formation d'une macro-texture, en bandes dans le cas de la transformation par laminage. Ces bandes alignées dans une seule direction, celle du laminage, donnent traditionnellement une forte anisotropie aux produits plats, ce qui est refusé par les clients.
- La technique du laminage « croisé », qui consiste à changer de 90° la direction de laminage pendant la fabrication d'un produit plat, a été testée dans l'une des deux gammes alpha-beta. A la texture héritée de la partie antérieure de la gamme, le laminage croisé superpose progressivement une nouvelle texture qui, pour un taux de réduction de section d'environ 50 à 60%, permet d'équilibrer la répartition des directions cristallographiques <0001> et <10-10> dans les deux directions longitudinale et travers-large de la tôle. **On peut en attendre une bonne isotropie des propriétés selon ces deux directions principales des tôles.** Sous l'aspect microstructural, les grains de phase alpha primaire conservent plus ou moins les orientations cristallographiques issues de la gamme antérieure, tandis que les grains « secondaires » issus de la décomposition de la matrice beta reformée lors du réchauffage s'orientent selon la composante de texture (0001) <10-10>, qui est à 90° de la texture antérieure en cas de laminage croisé.
- Un effet de laminage croisé est observée dès l'étape initiale d'ébauchage en sens travers du larget de départ. Cet effet est encore observé après chauffage du larget dans le domaine beta.

Une première conclusion de ces examens est que le laminage croisé semble indispensable pour achever la transformation en « alpha-beta » de tôles dans lesquelles on recherche une isotropie des propriétés dans les directions longitudinale et travers-large.

Une deuxième conclusion serait qu'une fine structure aciculaire issue d'un réchauffage dans le domaine beta, puis transformation thermomécanique (ou non ?) dans ce même domaine, suivi d'une trempe est à même de favoriser une recristallisation à grains fins et de taille homogène lors du laminage de finition dans le domaine alpha-beta. On présume qu'un préchauffage dans le domaine beta pourrait se limiter à atteindre un court instant la température exacte du transus beta de l'alliage, de façon à limiter le grossissement des grains autant que faire se peut.

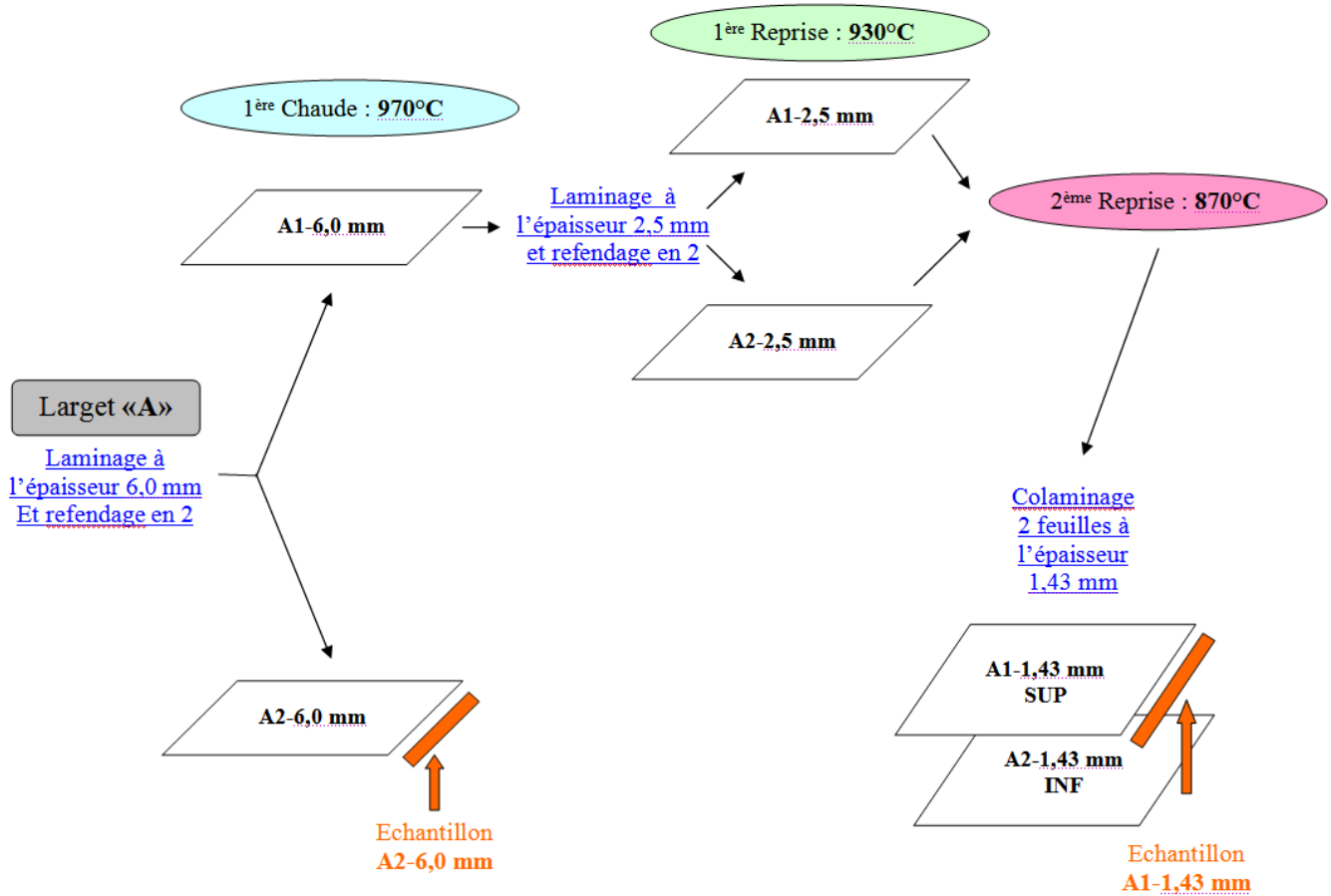
En conclusion finale, un panachage des gammes 1 (ébauchage en beta) et 3 (laminage croisé) peut permettre l'atteinte pleine des objectifs issus des cahiers des charges « Tôles minces pour mise en forme par SPF en vue d'applications aéronautiques ». On peut imaginer des variantes qui mettraient en œuvre le laminage croisé en alpha-beta de largets minces préalablement traités par trempe depuis le domaine beta.

5. ANNEXES

ANNEXE 1 : EXAMENS STRUCTURAUX MEB/EBSD DES TÔLES EBAUCHEES
ET FINIES PAR LAMINAGE UNIDIRECTIONNEL EN « ALPHA + BETA »

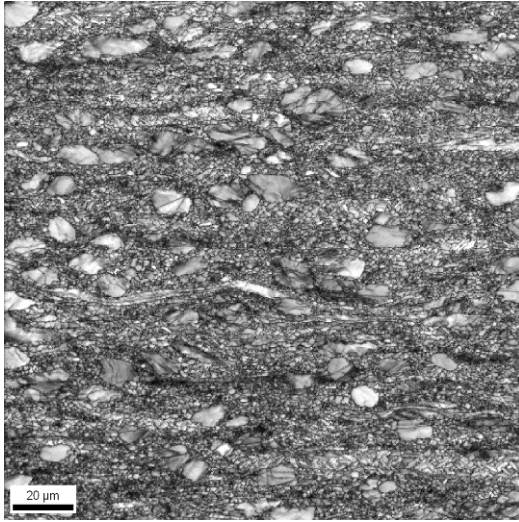
**Annexe 1a : Synoptique de la gamme de fabrication n° 2
(Préchauffage du larget à 970° C)**

(Format du larget initial repère 7 (A) : 705 x 290 x 57 mm)



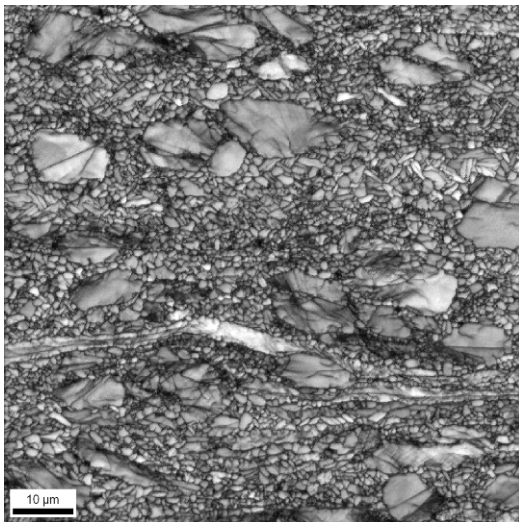
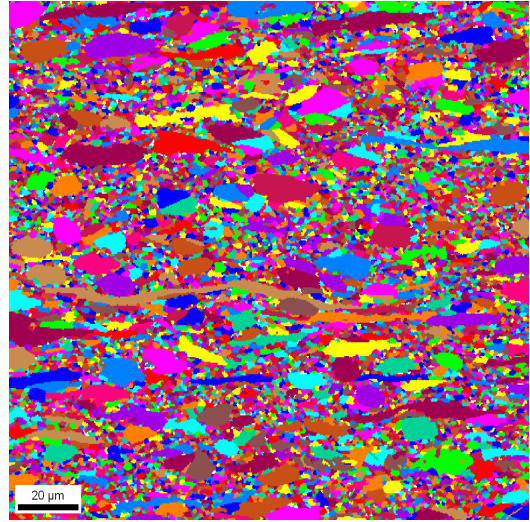
Annexe 1b : Examens MEB-EBSD à cœur de l'ébauche d'épaisseur 6 mm repérée A2-6 mm
Structure granulaire en coupe longitudinale

Indice de qualité de diffraction

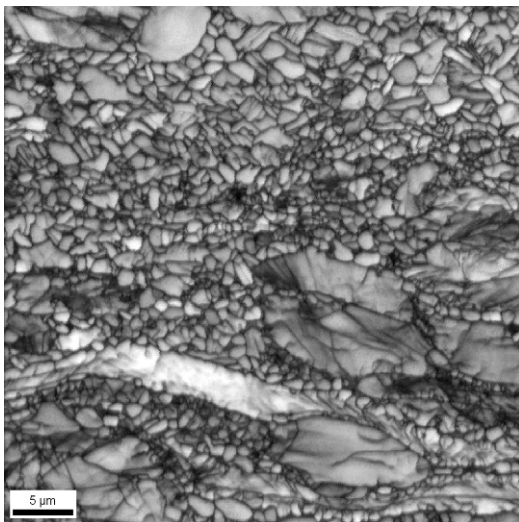
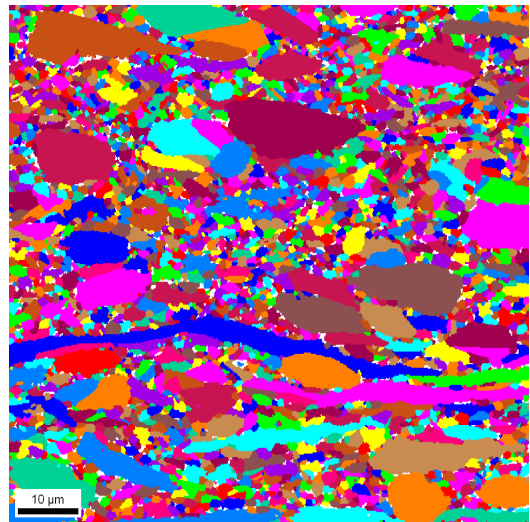


x 500

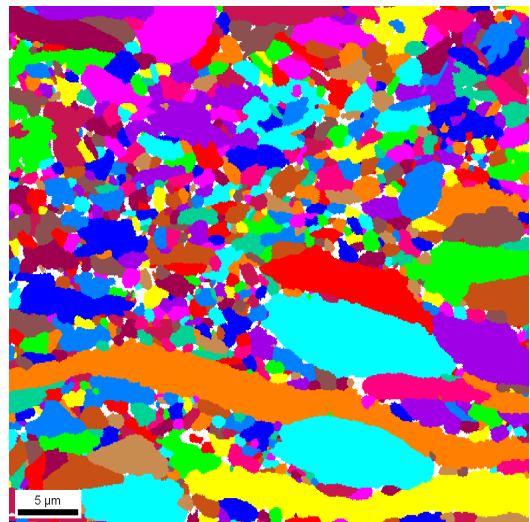
Structure granulaire



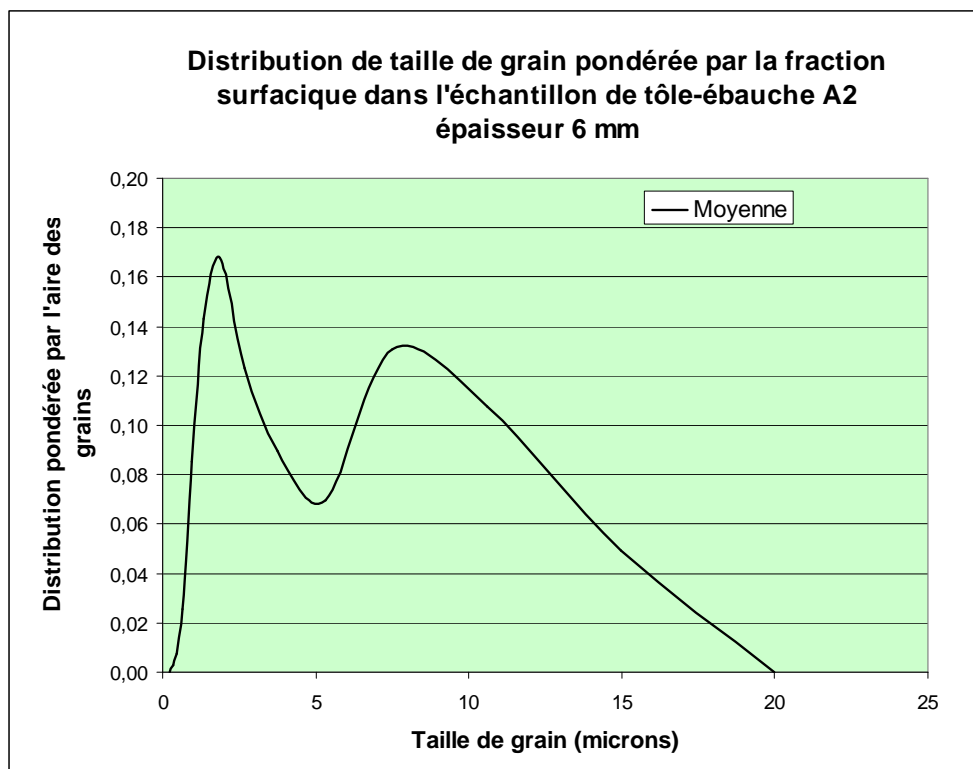
x 1000



x 2000

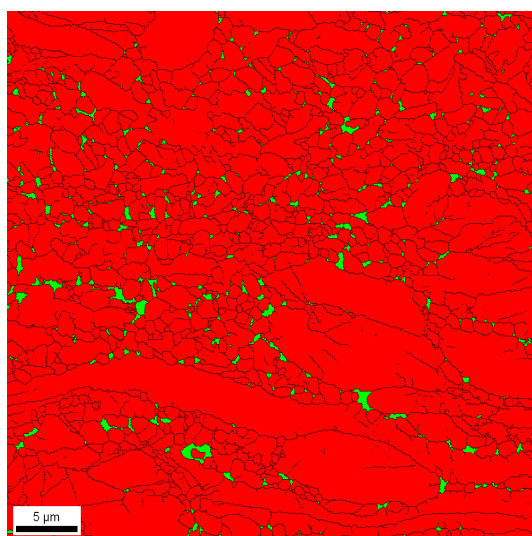


Annexe 1c : Examens MEB-EBSD à cœur de l'ébauche d'épaisseur 6 mm repérée A2-6 mm
Cotations de la structure granulaire, du taux de phase beta et de la FDOC en coupe longitudinale



Repère A2 : Taille moyenne des grains (microns)				
	x 500	x 1000	x 2000	Moyenne
Population	1,462	1,200	1,095	1,252
Aire	4,385	4,524	4,046	4,318

Grandissement	FDOC
500	25,982
1000	21,273
2000	32,608

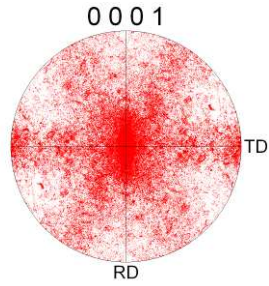
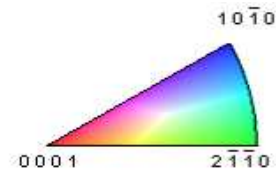
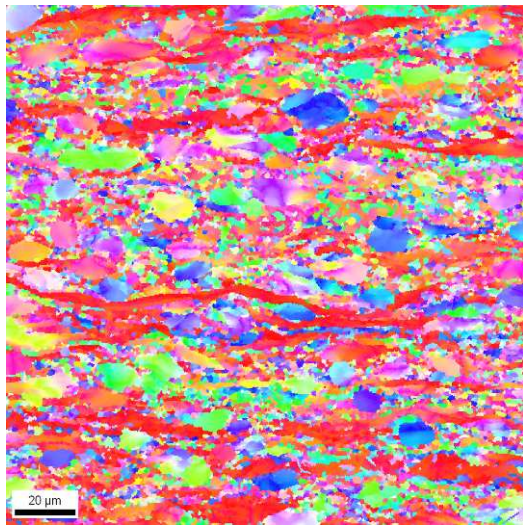


Phase	Total Fraction	Partition Fraction
Titanium Alpha	0.974	0.974
Titanium - Beta	0.026	0.026

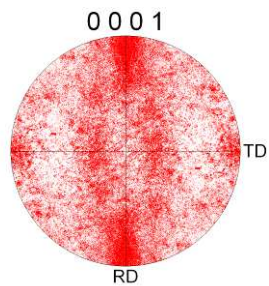
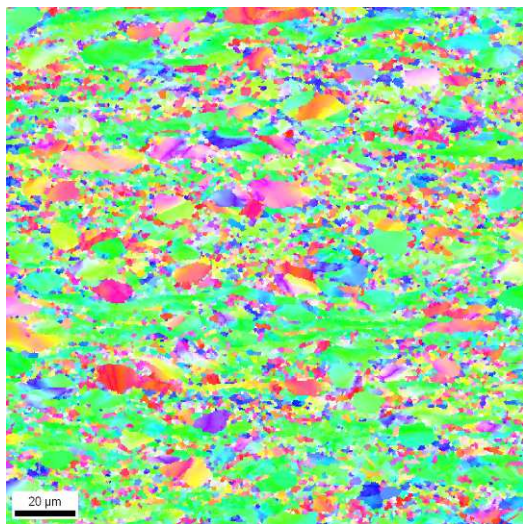
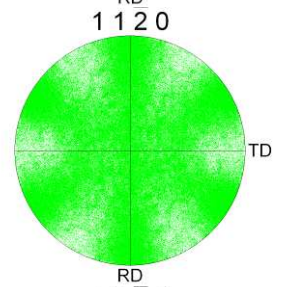
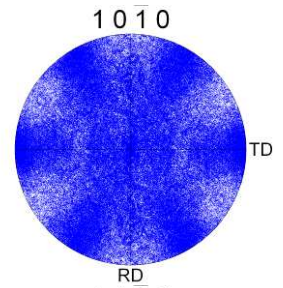
Boundaries: Rotation Angle					
	Min	Max	Fraction	Number	Length
—	5°	180°	0.766	59237	3.42 mm

Cartographie de phases (x 2000)

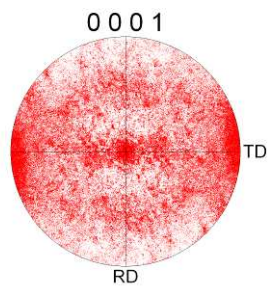
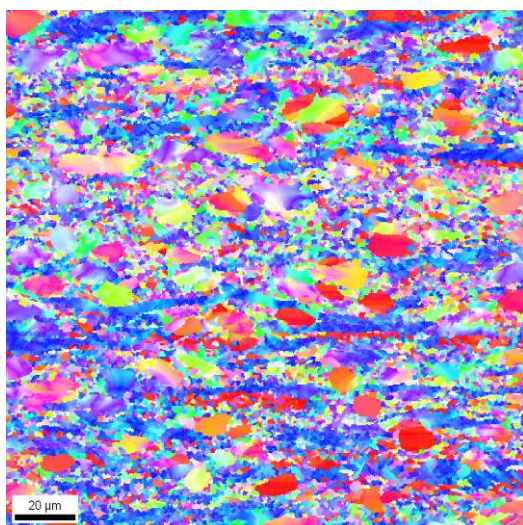
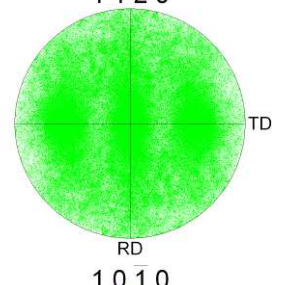
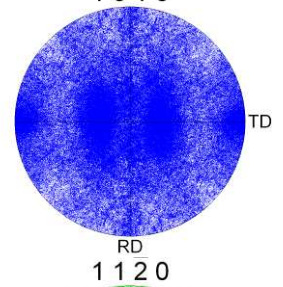
Annexe 1d : Examens MEB-EBSD à cœur de l'ébauche d'épaisseur 6 mm repérée A2-6 mm
Cartographies d'orientation et figures de pôles discrétisées de la phase alpha
 Grandissement x500 et code couleur :



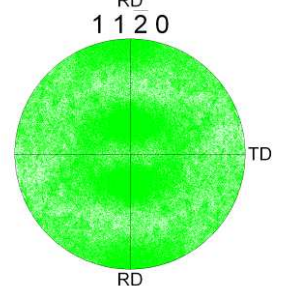
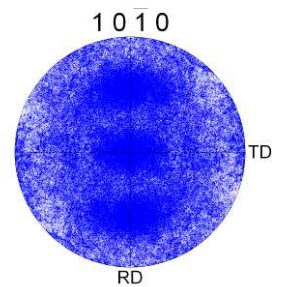
Direction travers-large



Direction normale à la tôle

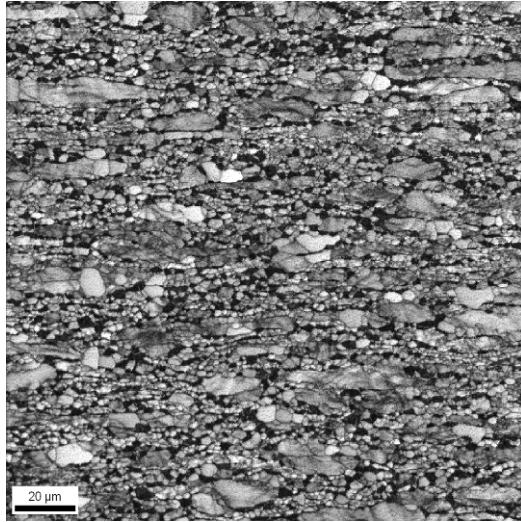


Direction longitudinale

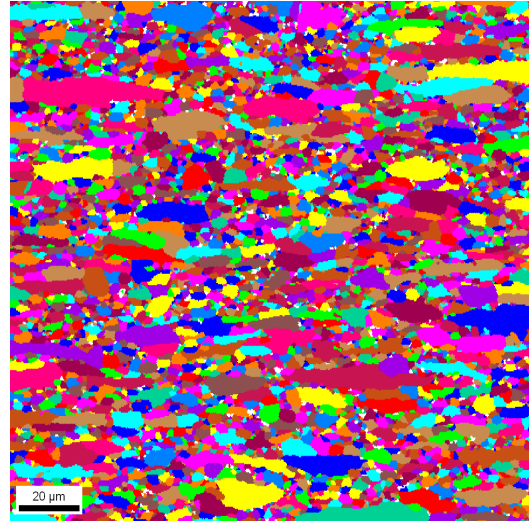


Annexe 1e : Examens MEB-EBSD à cœur de la tôle d'épaisseur 1,43 mm repérée A1-1,43 mm
Structure granulaire en coupe longitudinale

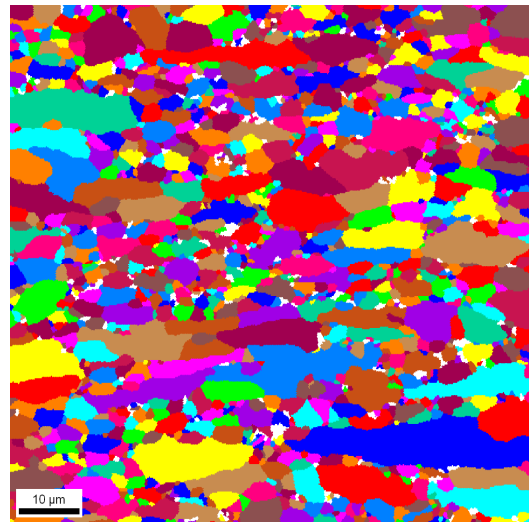
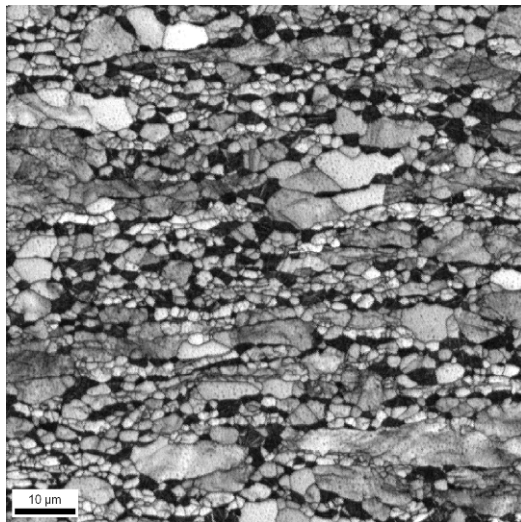
Indice de qualité de diffraction



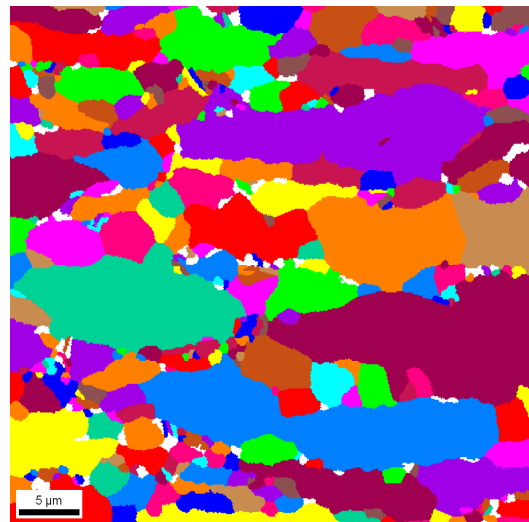
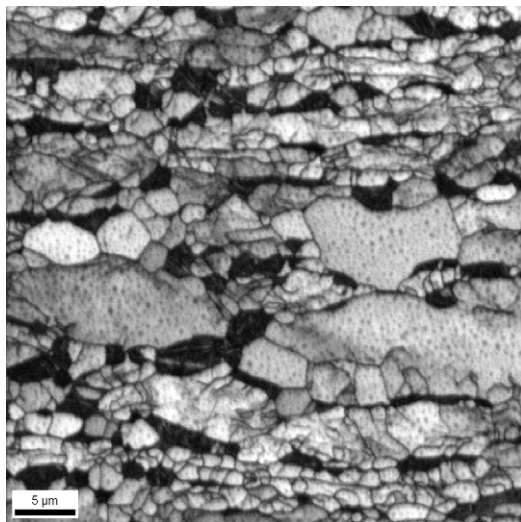
Structure granulaire



x 500

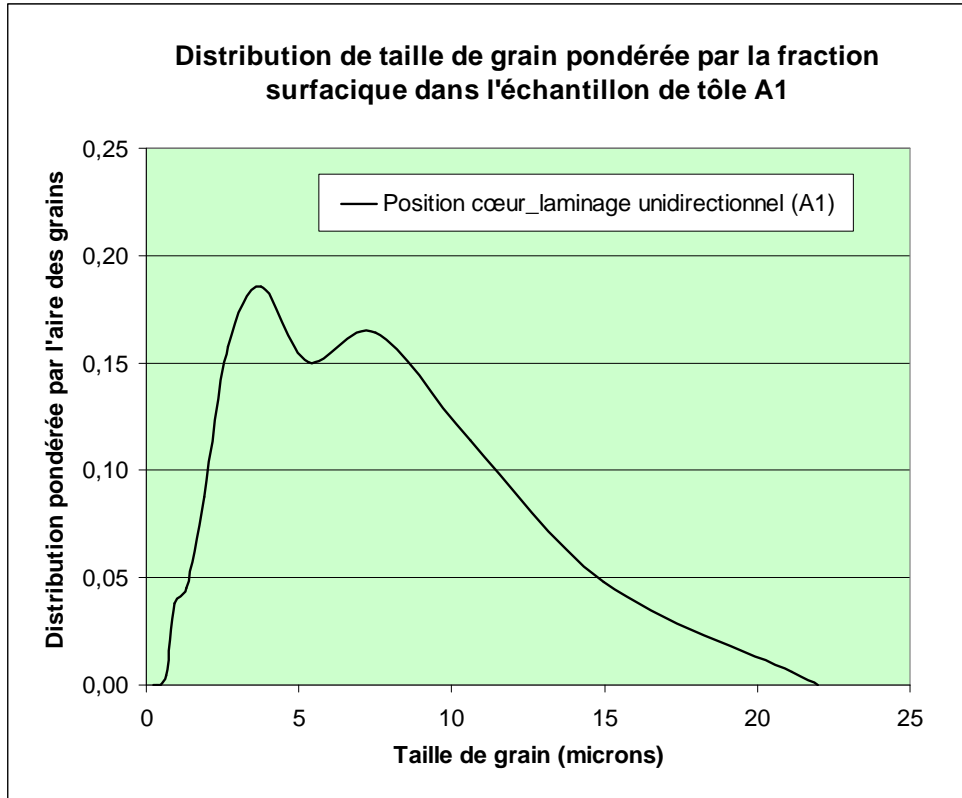


x 1000



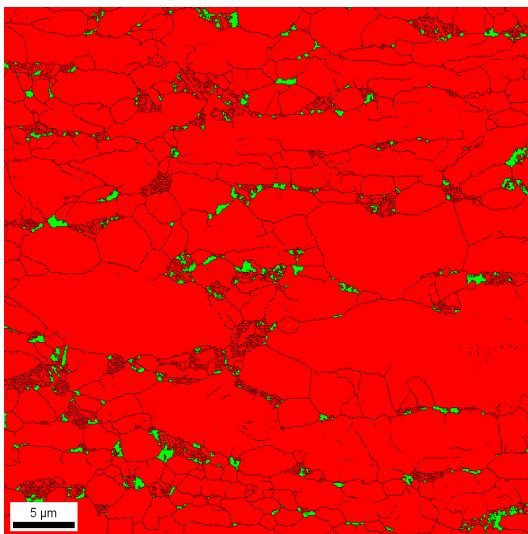
x 2000

**Annexe 1f : Examens MEB-EBSD à cœur de la tôle d'épaisseur 1,43 mm repérée A1-1,43 mm
Cotations de la structure granulaire, du taux de phase beta et de la FDOC en coupe longitudinale**



Repère A1 : Taille moyenne des grains (microns)				
	x 500	x 1000	x 2000	Moyenne
Population	2,102	2,028	1,825	1,985
Aire	5,628	5,311	6,488	5,809

Grandissement	FDOC
500	15,173
1000	20,653
2000	45,135

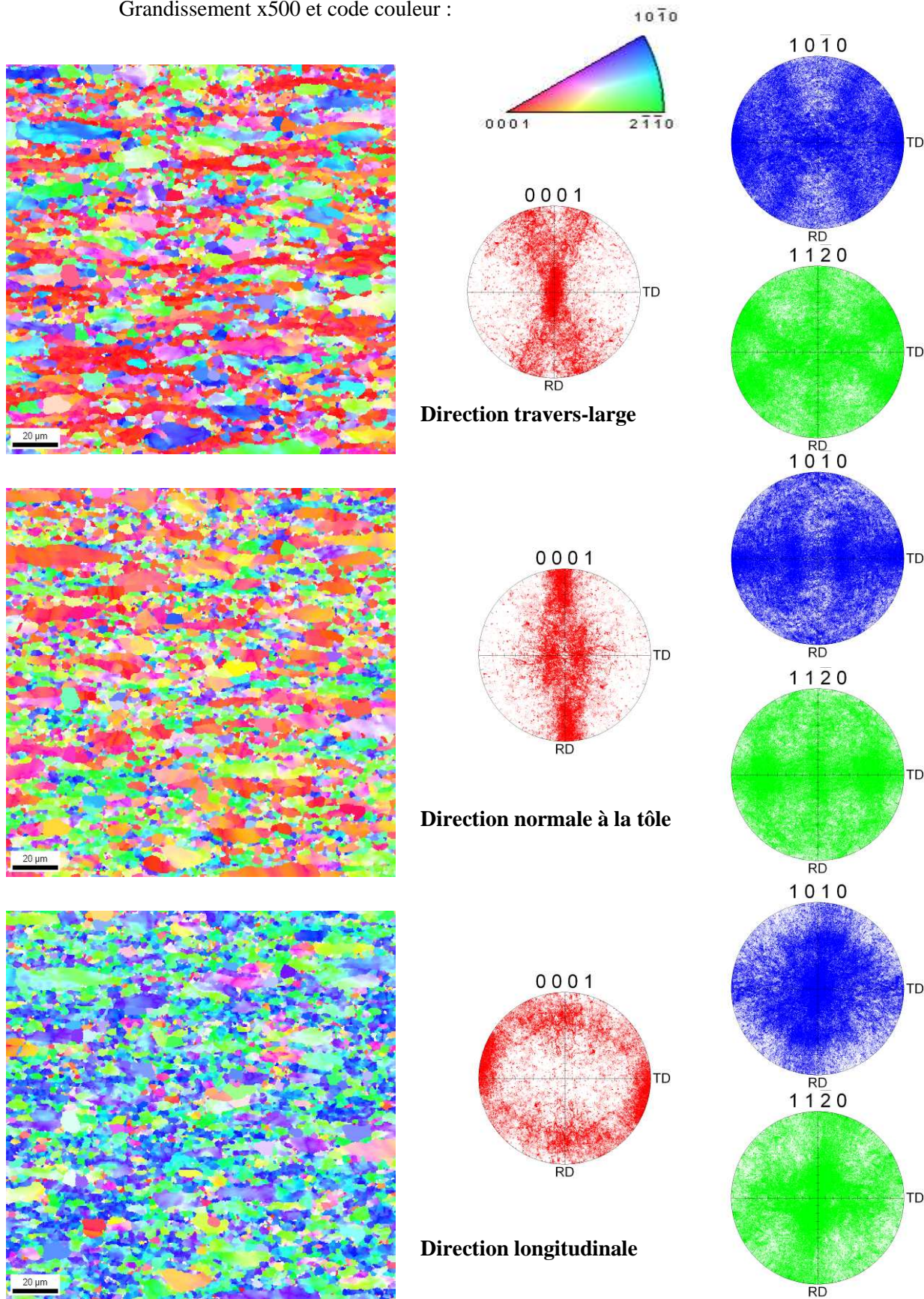


Phase	Total		Partition	
	Fraction	Fraction	Fraction	Fraction
Titanium Alpha	0.976	0.976	0.976	0.976
Titanium - Beta	0.024	0.024	0.024	0.024

Boundaries: Rotation Angle					
	Min	Max	Fraction	Number	Length
—	5°	180°	0.792	49777	2.87 mm

Cartographie de phases (x 2000)

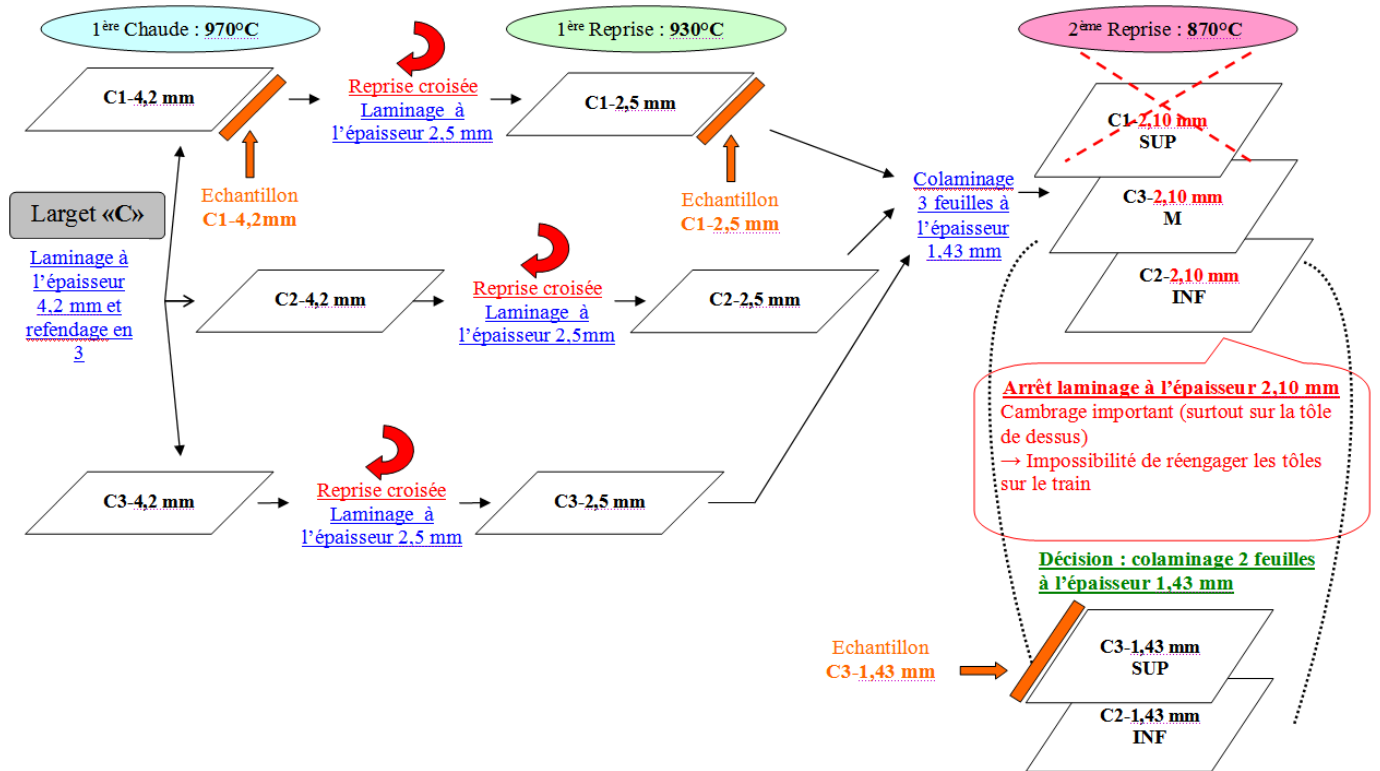
Annexe 1g : Examens MEB-EBSD à cœur de la tôle d'épaisseur 1,43 mm repérée A1-1,43 mm
Cartographies d'orientation et figures de pôles discrétisées de la phase alpha
 Grandissement x500 et code couleur :



ANNEXE 2 : EXAMENS STRUCTURAUX MEB/EBSD DES TÔLES EBAUCHEES
ET FINIES PAR LAMINAGE CROISE EN « ALPHA + BETA »

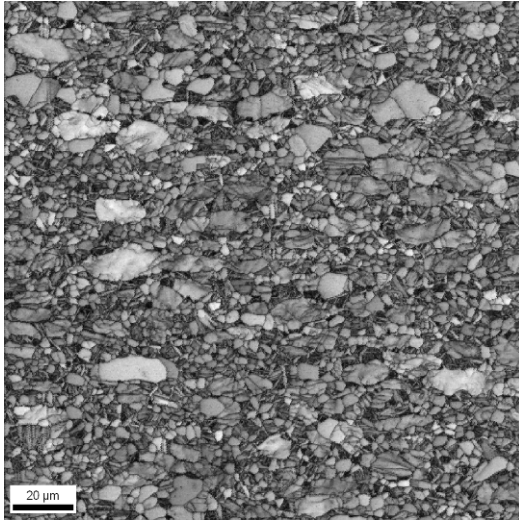
**Annexe 2a : Synoptique de la gamme de fabrication n° 3
(Préchauffage du larget à 970° C)**

(Format du larget initial repère 1A (C) : 703 x 290 x 57 mm)



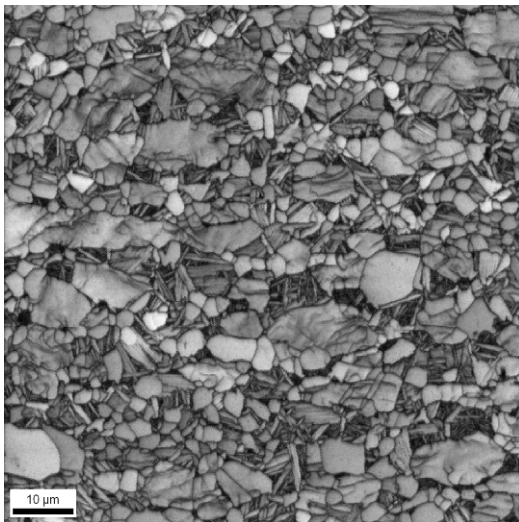
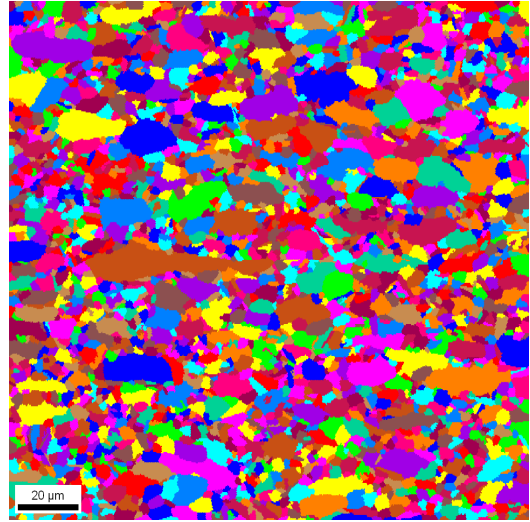
Annexe 2b : Examens MEB-EBSD à cœur de la tôle d'épaisseur 2,5 mm repérée C1-2,5 mm
Structure granulaire en coupe longitudinale

Indice de qualité de diffraction

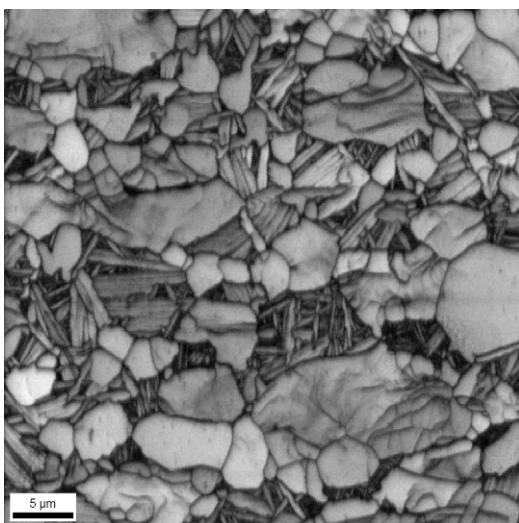
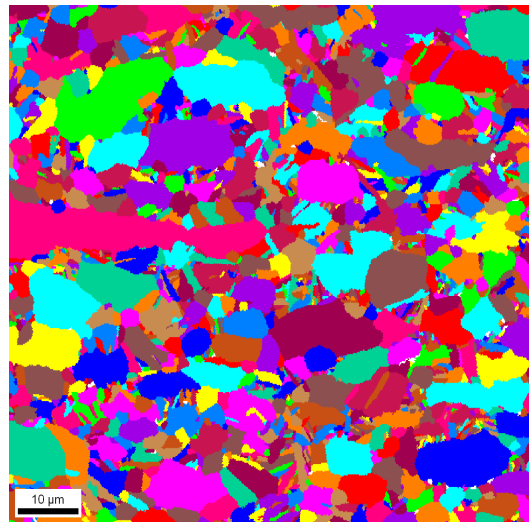


x 500

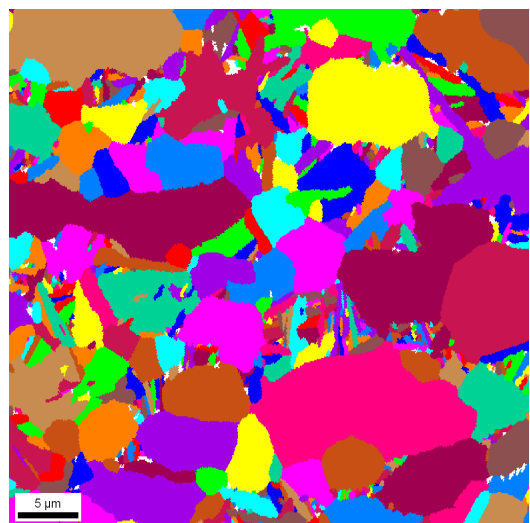
Structure granulaire



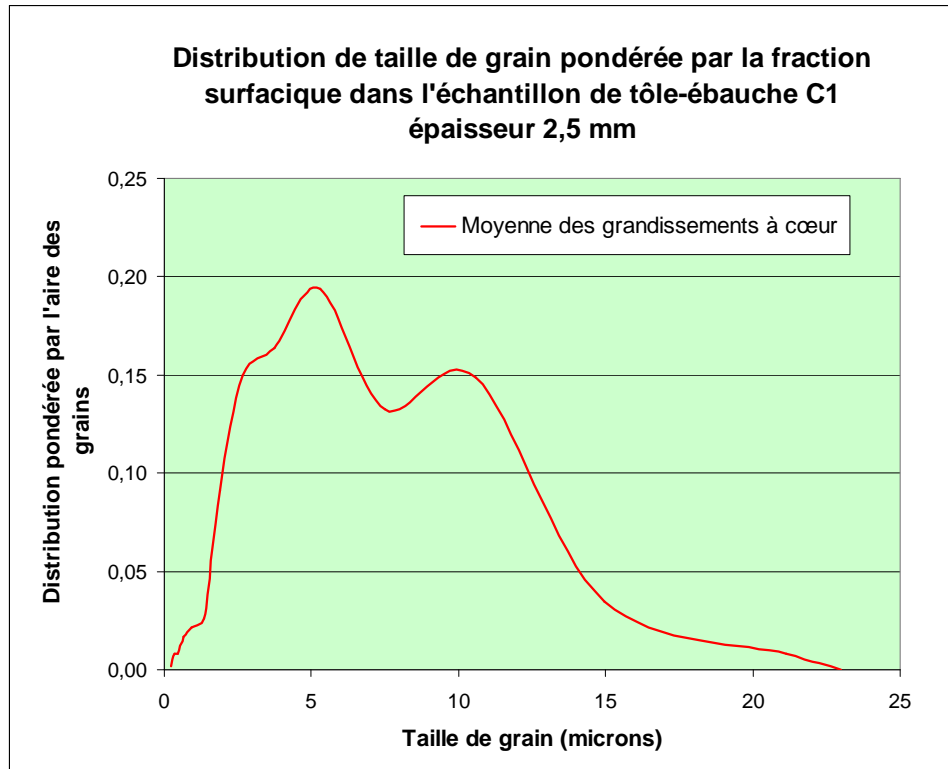
x 1000



x 2000

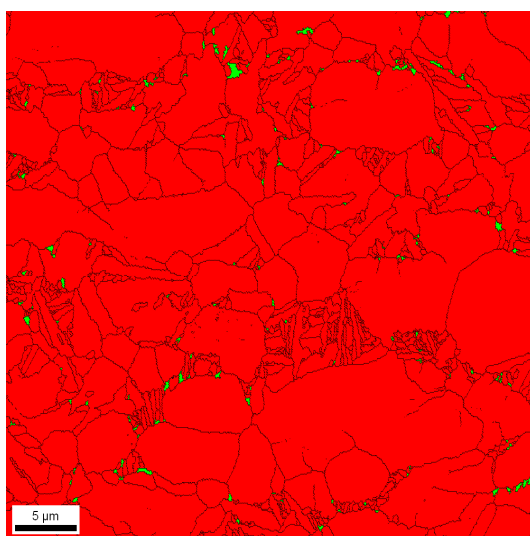


Annexe 2c : Examens MEB-EBSD à cœur de la tôle d'épaisseur 2,5 mm repérée C1-2,5 mm
Cotations de la structure granulaire, du taux de phase beta et de la FDOC en coupe longitudinale



Repère C1 : Taille moyenne des grains (microns)				
	x 500	x 1000	x 2000	Moyenne
Population	3,291	1,608	1,052	1,984
Aire	6,310	5,221	4,846	5,459

Grandissement	FDOC
500	24,385
1000	28,642
2000	26,346

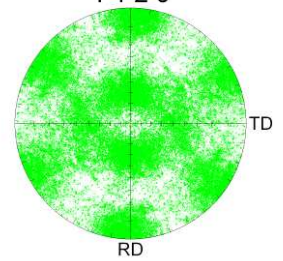
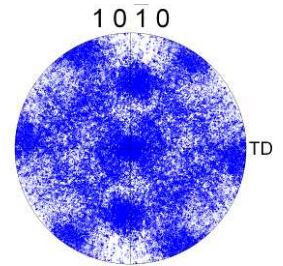
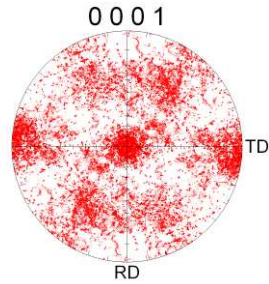
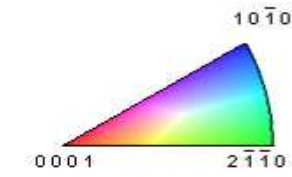
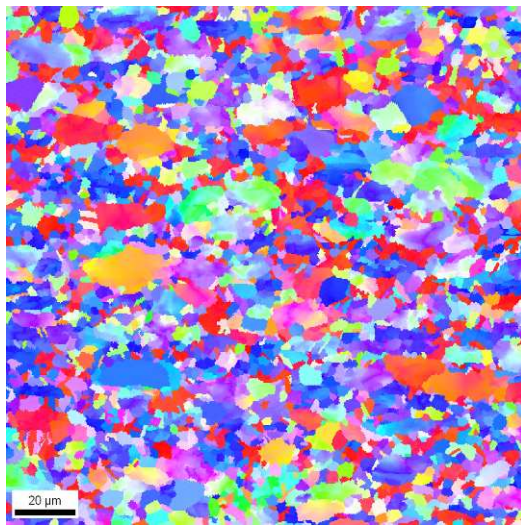


Phase	Total Fraction	Partition Fraction
Titanium Alpha	0.993	0.993
Titanium - Beta	0.007	0.007

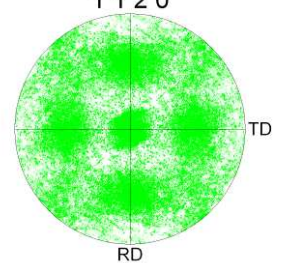
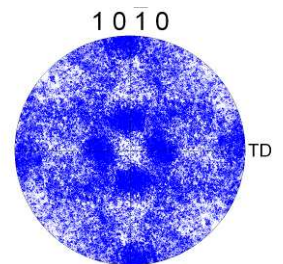
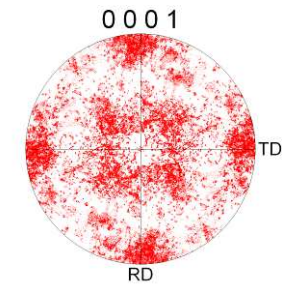
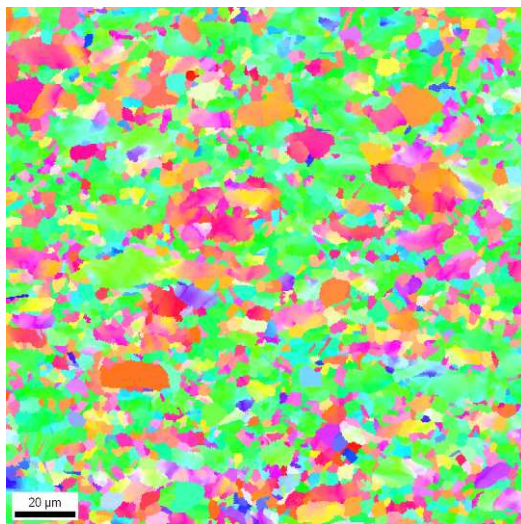
Boundaries: Rotation Angle					
	Min	Max	Fraction	Number	Length
—	5°	180°	0.892	41308	2.38 mm

Cartographie de phases (x 2000)

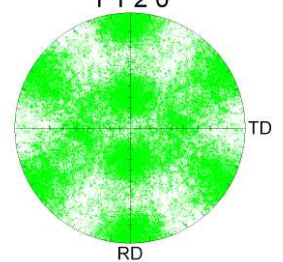
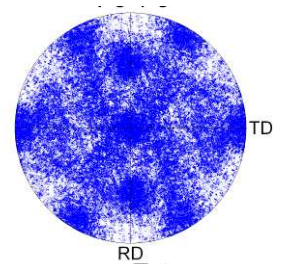
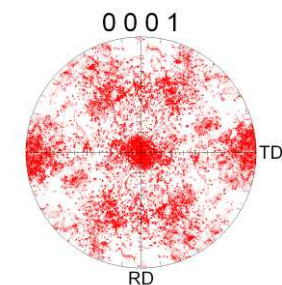
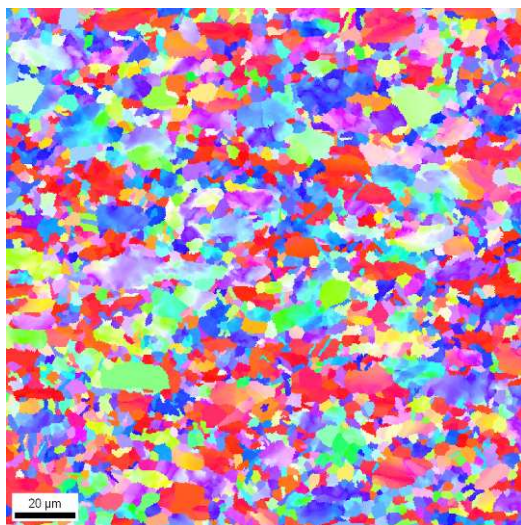
Annexe 2d : Examens MEB-EBSD à cœur de la tôle d'épaisseur 2,5 mm repérée C1-2,5 mm
Cartographies d'orientation et figures de pôles discrétisées de la phase alpha
 Grandissement x500 et code couleur :



Direction travers-large



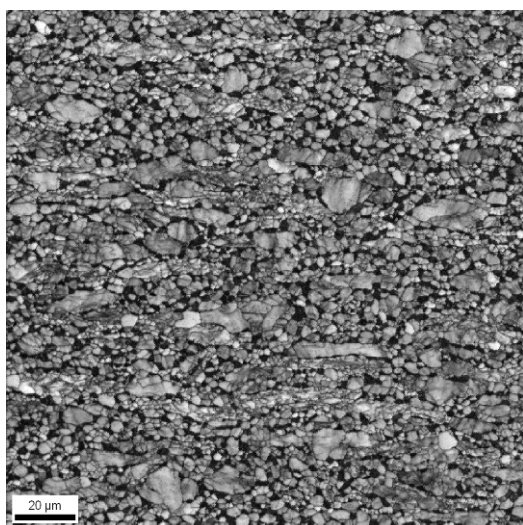
Direction normale à la tôle



Direction longitudinale

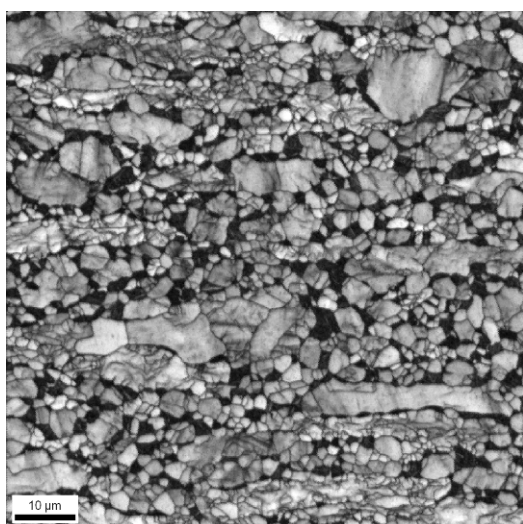
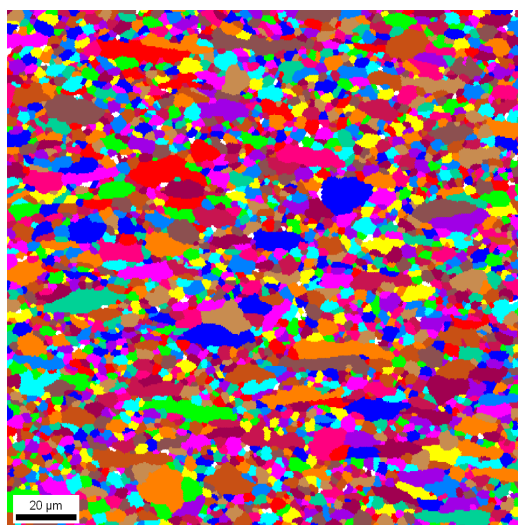
Annexe 2e : Examens MEB-EBSD à cœur de la tôle d'épaisseur 1,43 mm repérée C3-1,43 mm
Structure granulaire en coupe longitudinale

Indice de qualité de diffraction

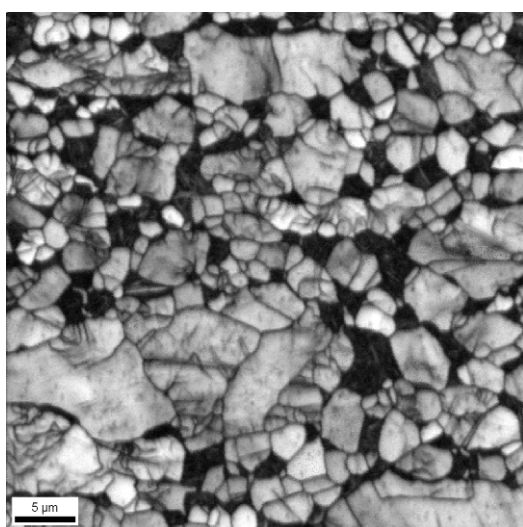
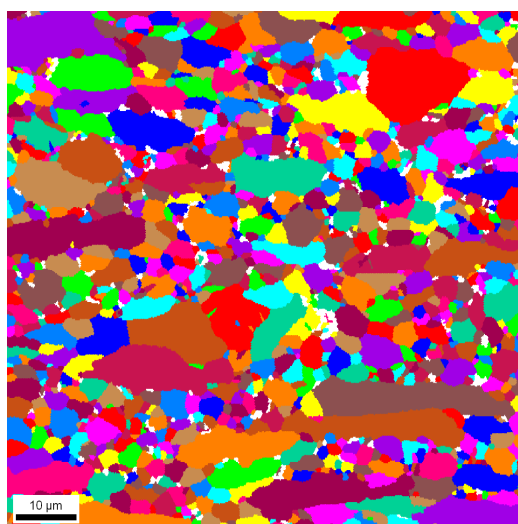


x 500

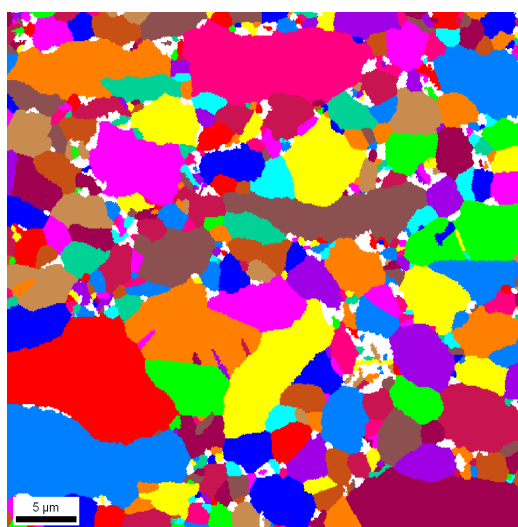
Structure granulaire



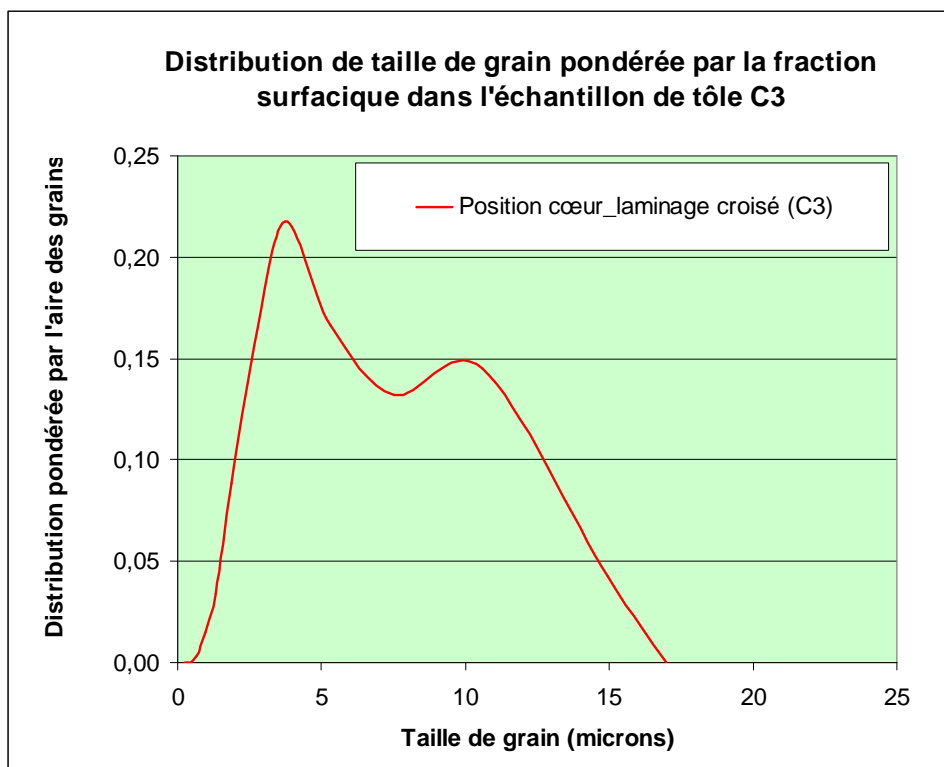
x 1000



x 2000

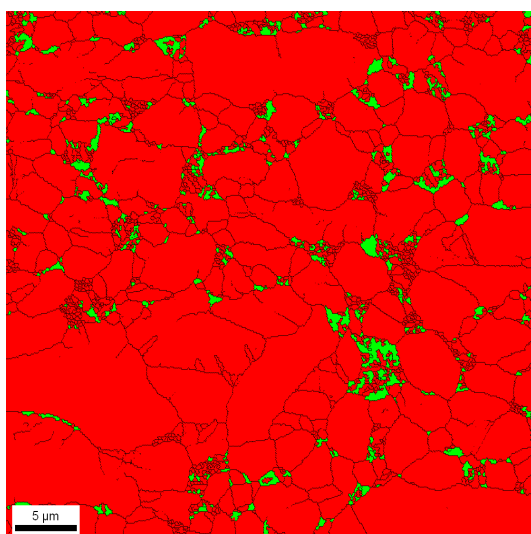


**Annexe 2f : Examens MEB-EBSD à cœur de la tôle d'épaisseur 1,43 mm repérée C3-1,43 mm
Cotations de la structure granulaire, du taux de phase beta et de la FDOC en coupe longitudinale**



Repère C3 : Taille moyenne des grains (microns)				
	x 500	x 1000	x 2000	Moyenne
Population	2,945	2,106	1,445	2,165
Aire	5,290	5,650	4,987	5,309

Grandissement	FDOC
500	10,941
1000	14,676
2000	21,304

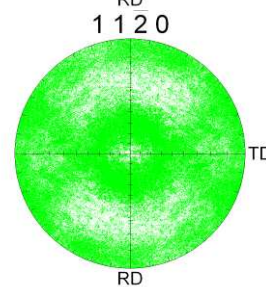
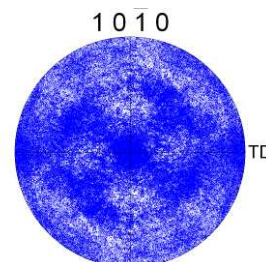
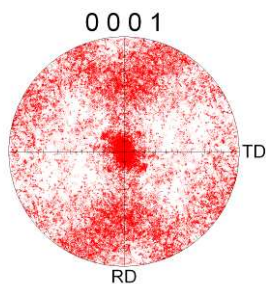
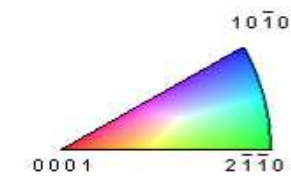
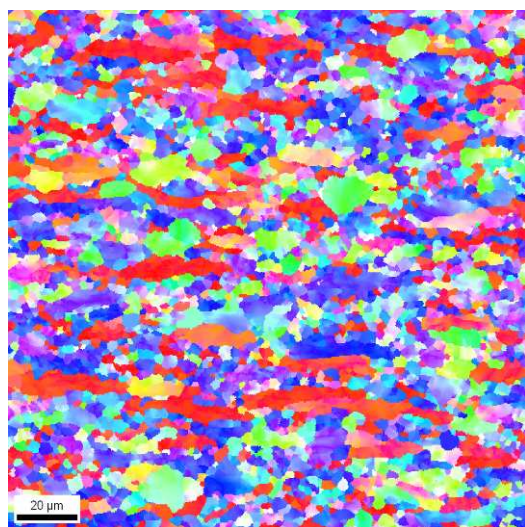


Phase	Total Fraction	Partition Fraction
Titanium Alpha	0.959	0.959
Titanium - Beta	0.041	0.041

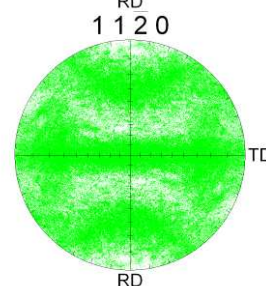
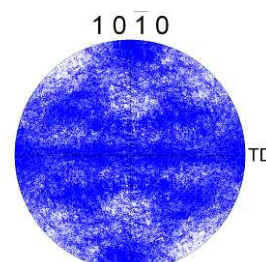
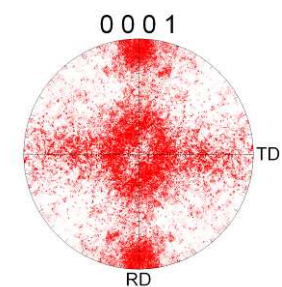
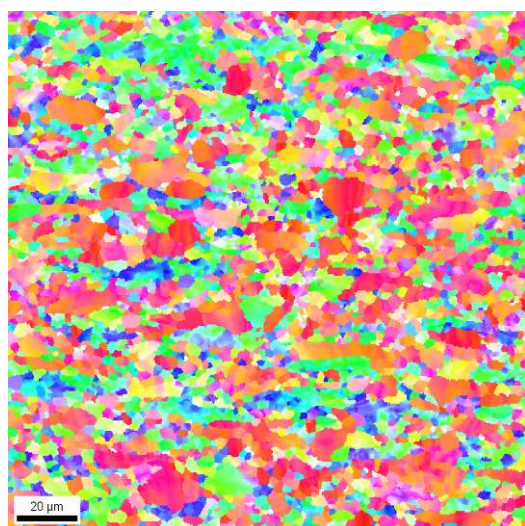
Boundaries: Rotation Angle					
	Min	Max	Fraction	Number	Length
—	5°	180°	0.831	47053	2.72 mm

Cartographie de phases (x 2000)

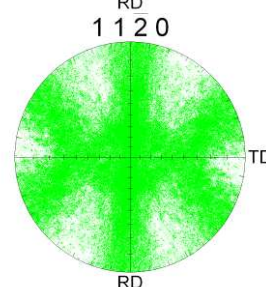
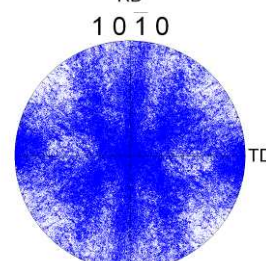
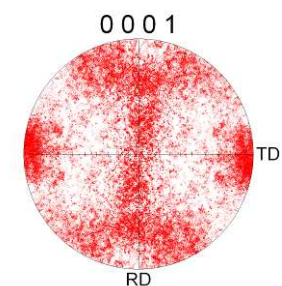
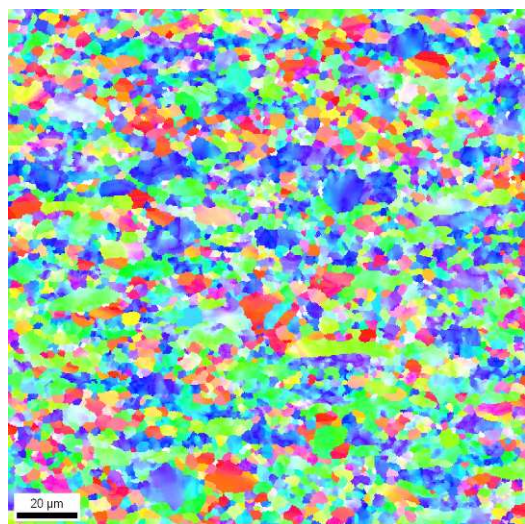
Annexe 2g : Examens MEB-EBSD à cœur de la tôle d'épaisseur 1,43 mm repérée C3-1,43 mm
Cartographies d'orientation et figures de pôles discrétisées de la phase alpha
 Grandissement x500 et code couleur :



Direction travers-large



Direction normale à la tôle

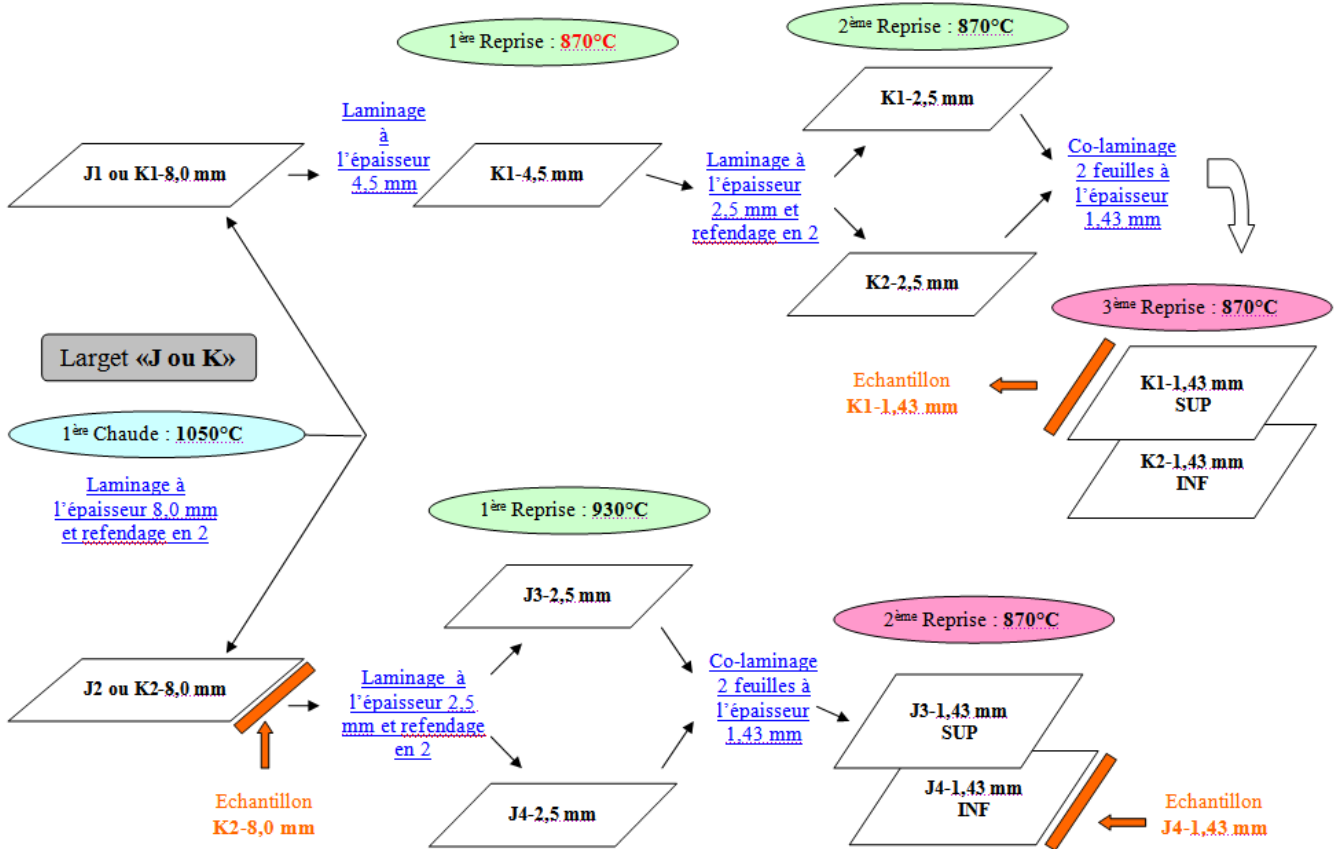


Direction longitudinale

ANNEXE 3 : EXAMENS STRUCTURAUX MEB/EBSD DES TÔLES EBAUCHEES
EN « BETA » ET FINIES PAR LAMINAGE UNIDIRECTIONNEL EN
« ALPHA+BETA »

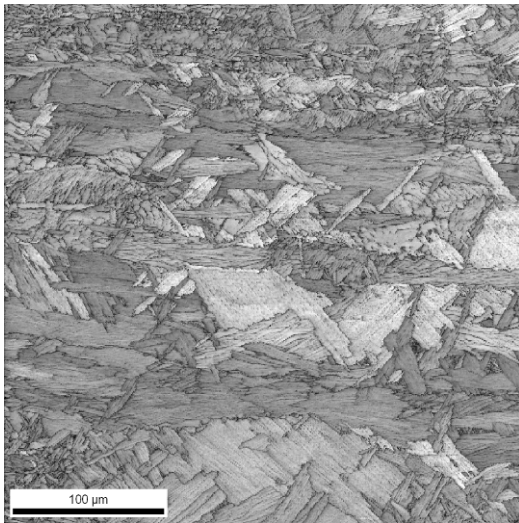
**Annexe 3a : Synoptique des gammes de fabrication n° 1 et 1 bis
(Préchauffage des largets à 1050° C)**

(Format initial des largets repérés 1.1 (J) et 2.2 (K) : 1075 x 310 x 61 mm)



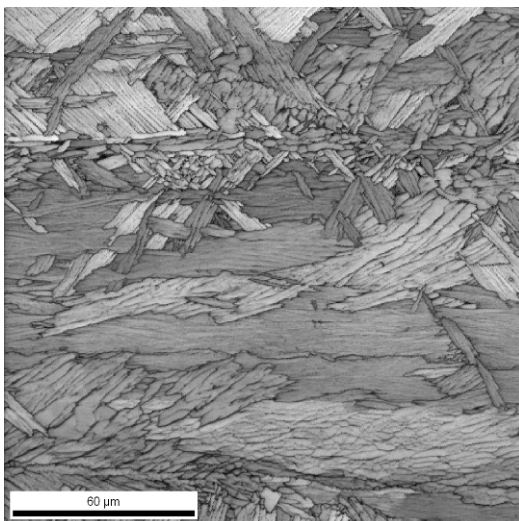
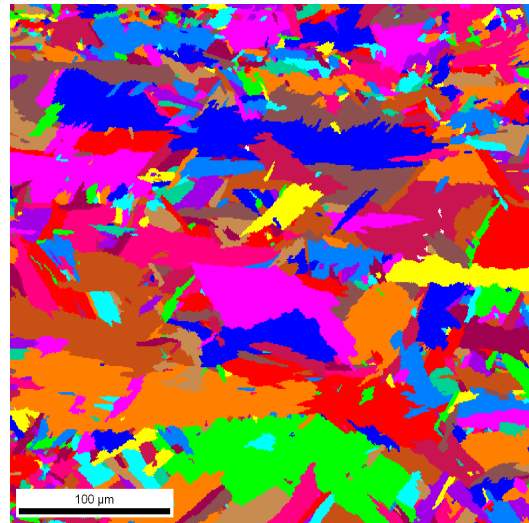
Annexe 3b : Examens MEB-EBSD à cœur de l'ébauche d'épaisseur 8 mm repérée K2-8 mm
Structure granulaire en coupe longitudinale

Indice de qualité de diffraction

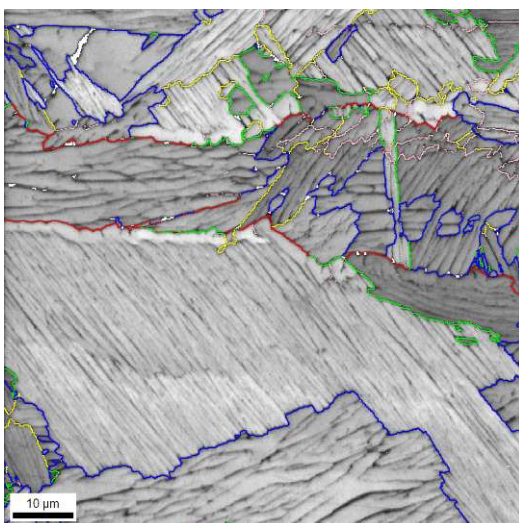
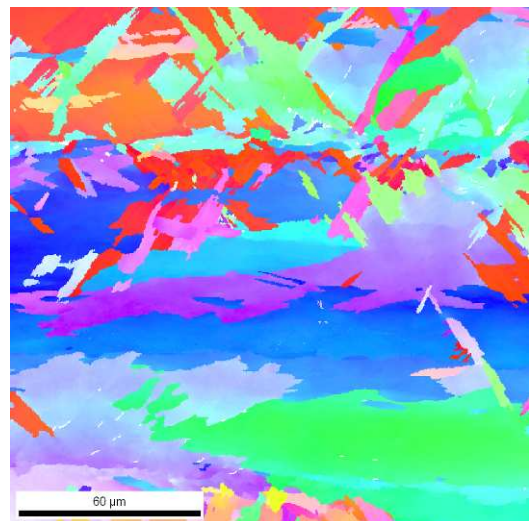


x 250

Structure granulaire



x 1000

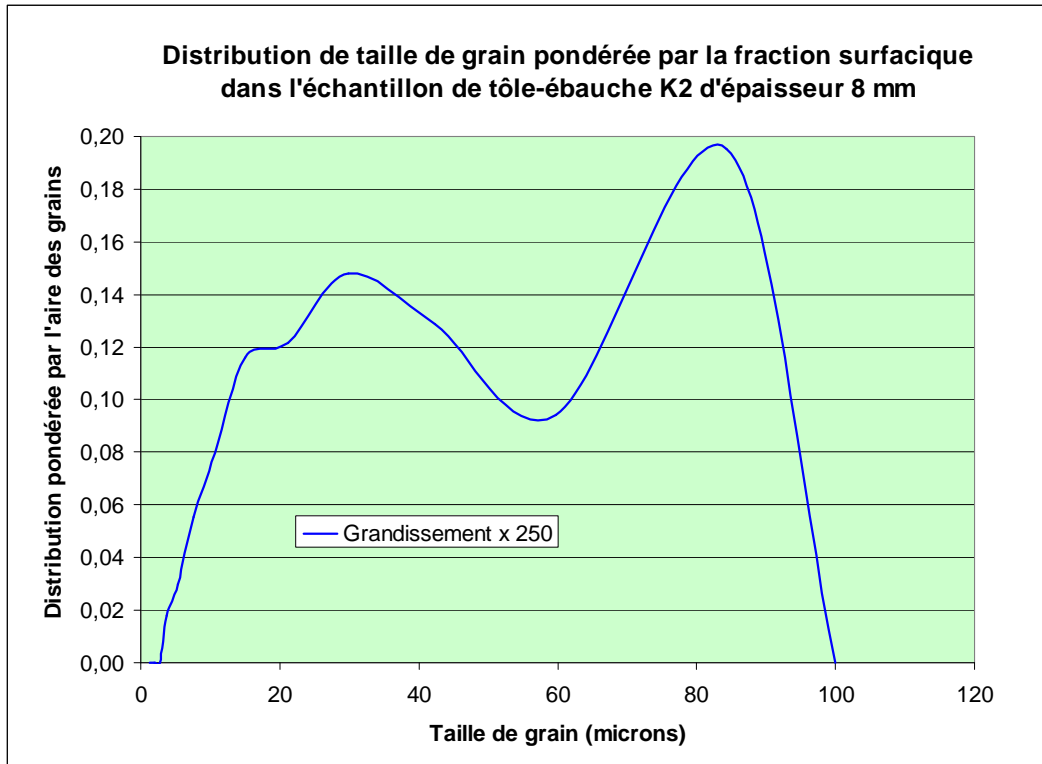


x 2000

Boundaries: Rotation Angle

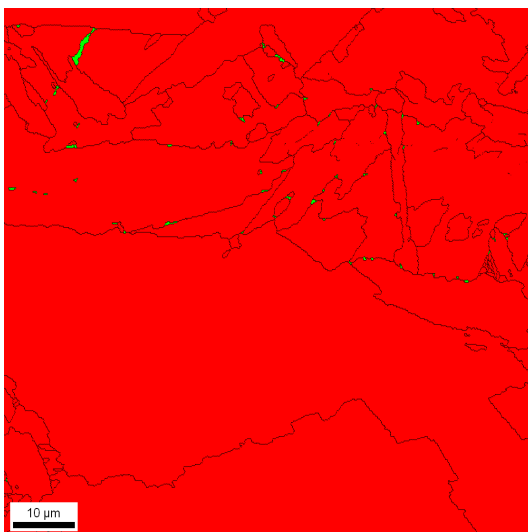
	Min	Max	Fraction	Number	Length
█	6°	100°	0.880	13716	1.58 mm
█	6°	12.5°	0.138	2153	248.61 microns
█	57°	65°	0.452	7047	813.72 microns
█	87°	93°	0.184	2864	330.71 microns
█	2°	6°	0.120	1868	215.70 microns

Annexe 3c : Examens MEB-EBSD à cœur de l'ébauche d'épaisseur 8 mm repérée K2-8 mm
Cotations de la structure granulaire, du taux de phase beta et de la FDOC en coupe longitudinale



Repère K2 : Taille moyenne des grains (microns)			
	x 250	x 500	x 1000
Population	7,921	/	/
Aire	37,439	/	/

Grandissement	FDOC
250	45,482
500	58,586
1000	171,434

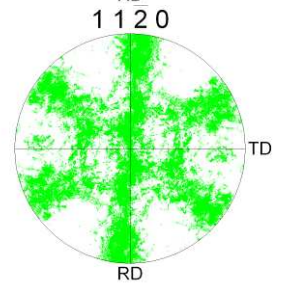
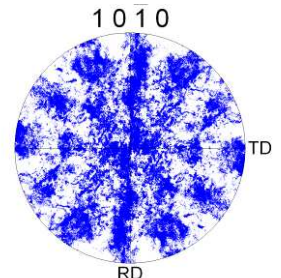
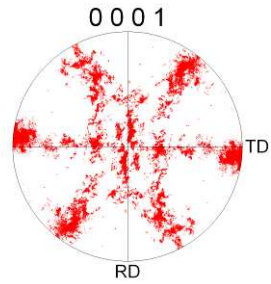
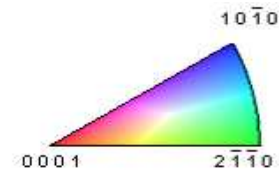
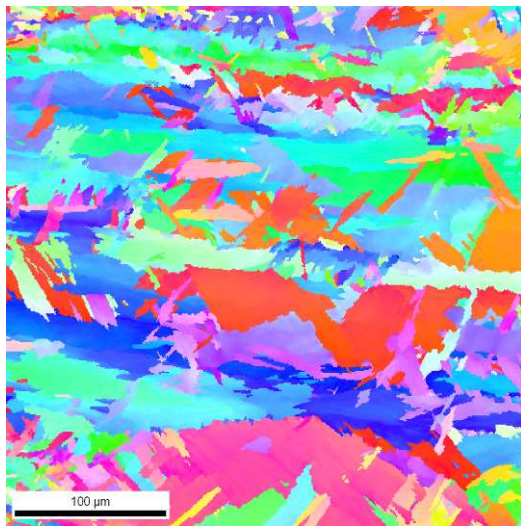


Phase	Total Fraction	Partition Fraction
Titanium Alpha	0.998	0.998
Titanium - Beta	0.002	0.002

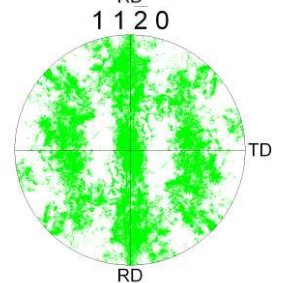
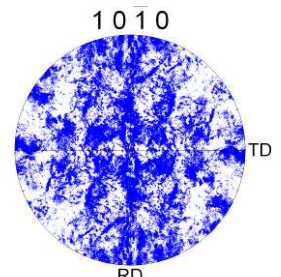
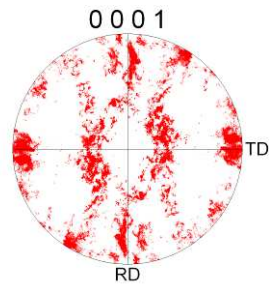
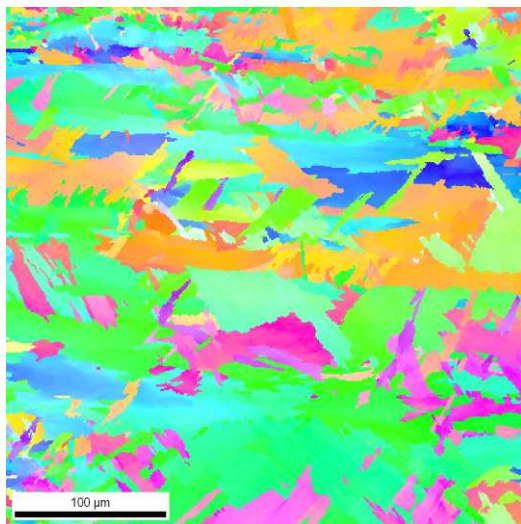
Boundaries: Rotation Angle					
	Min	Max	Fraction	Number	Length
—	5°	180°	0.904	15182	1.75 mm

Cartographie de phases (x 1000)

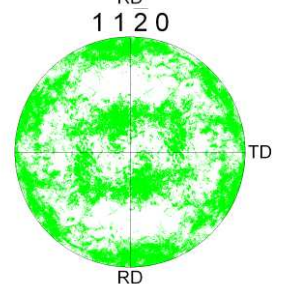
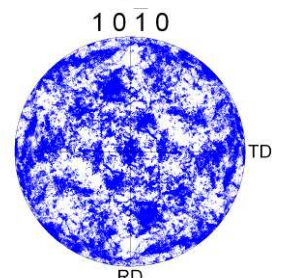
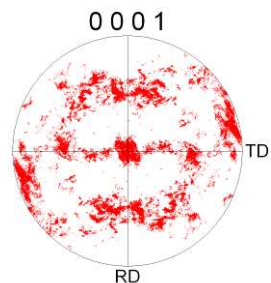
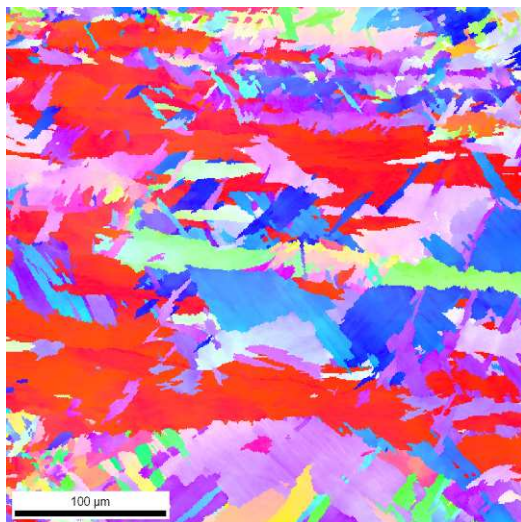
Annexe 3d : Examens MEB-EBSD à cœur de l'ébauche d'épaisseur 8 mm repérée K2-8 mm
Cartographies d'orientation et figures de pôles discrétisées de la phase alpha
 Grandissement x250 et code couleur :



Direction travers-large



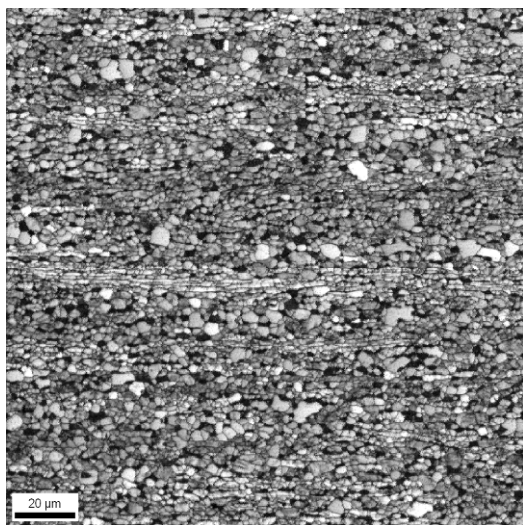
Direction normale à la tôle



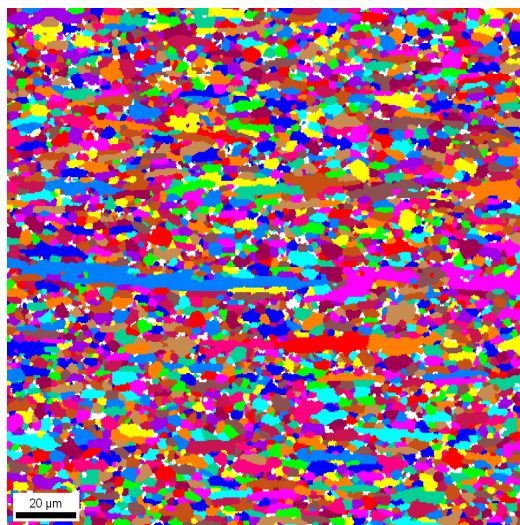
Direction longitudinale

Annexe 3e : Examens MEB-EBSD à cœur de la tôle d'épaisseur 1,43 mm repérée J4-1,43 mm
Structure granulaire en coupe longitudinale

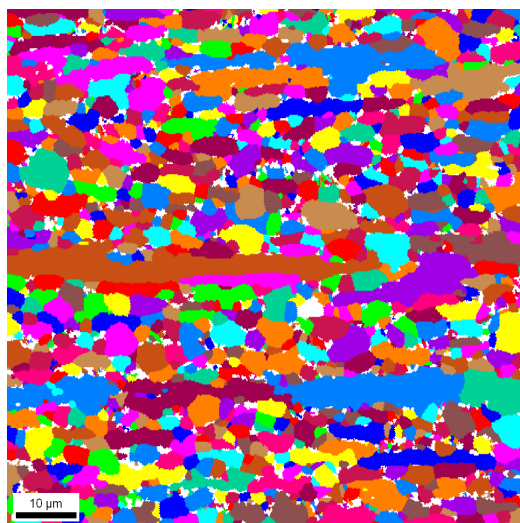
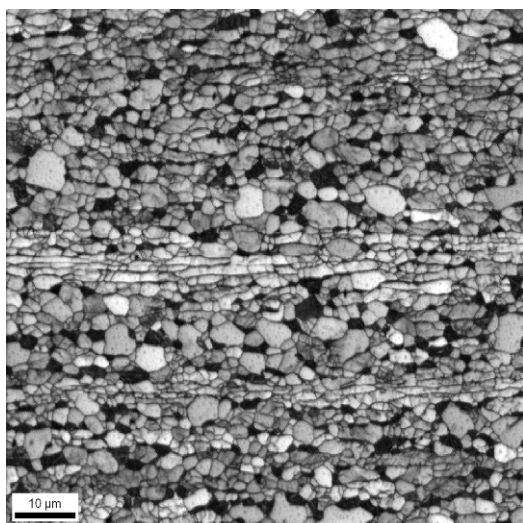
Indice de qualité de diffraction



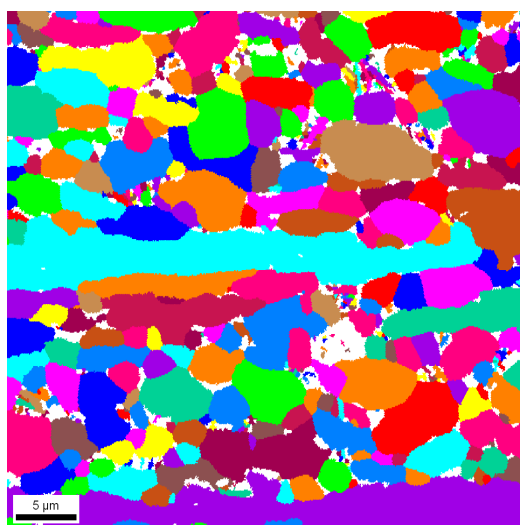
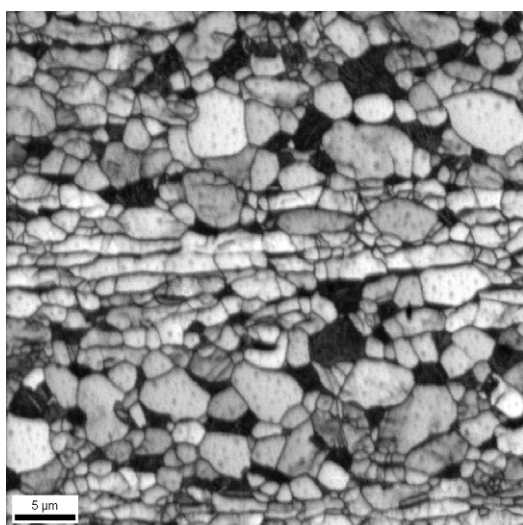
Structure granulaire



x 500

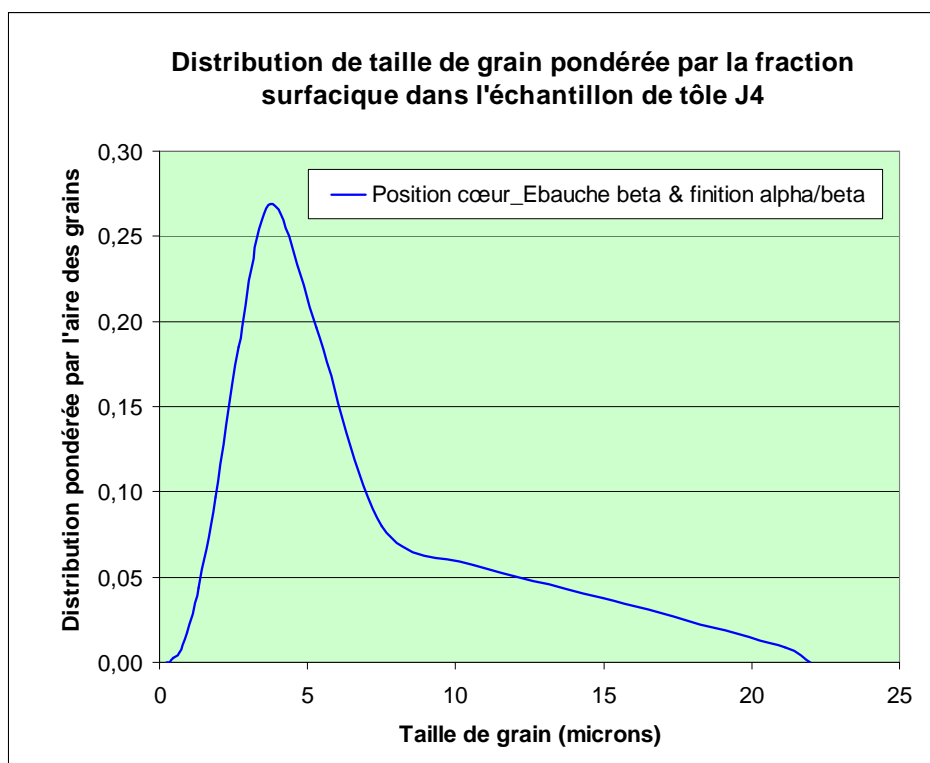


x 1000



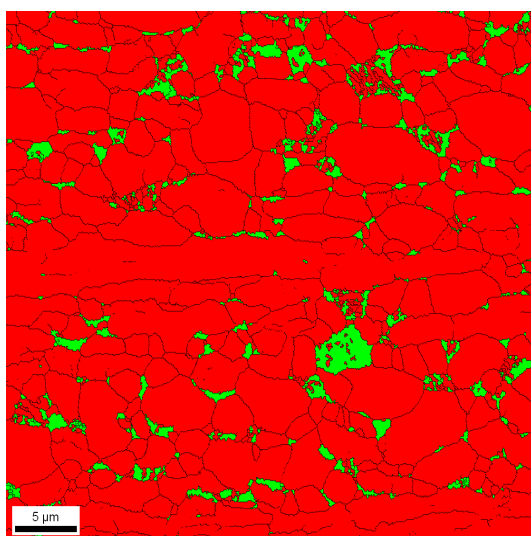
x 2000

Annexe 3f : Examens MEB-EBSD à cœur de la tôle d'épaisseur 1,43 mm repérée J4-1,43 mm
Cotations de la structure granulaire, du taux de phase beta et de la FDOC en coupe longitudinale



Repère J4 : Taille moyenne des grains (microns)				
	x 500	x 1000	x 2000	Moyenne
Population	2,477	1,928	1,402	1,936
Aire	4,658	4,897	5,075	4,877

Grandissement	FDOC
500	26,521
1000	36,246
2000	62,83

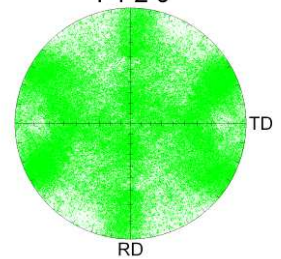
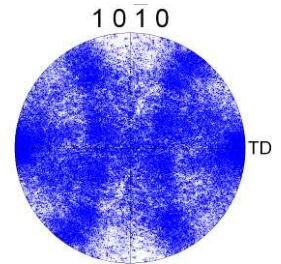
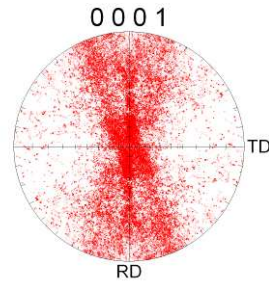
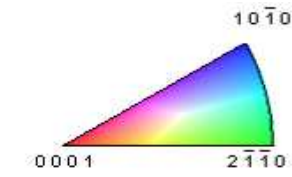
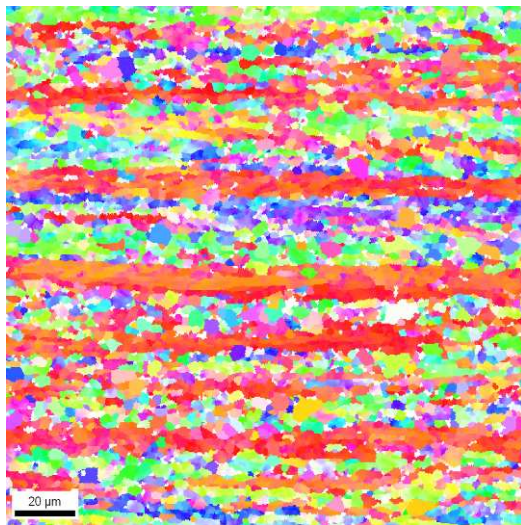


Phase	Total Fraction	Partition Fraction
Titanium Alpha	0.938	0.938
Titanium - Beta	0.062	0.062

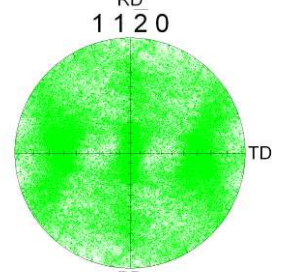
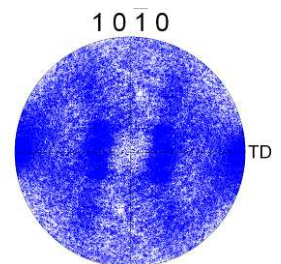
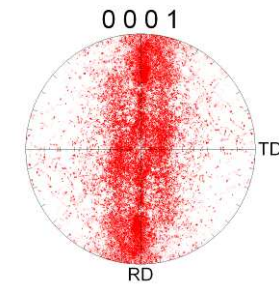
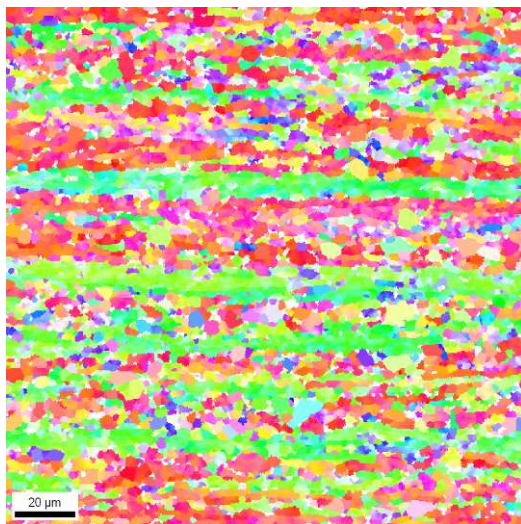
Boundaries: Rotation Angle					
	Min	Max	Fraction	Number	Length
—	5°	180°	0.841	44017	2.54 mm

Cartographie de phases (x 2000)

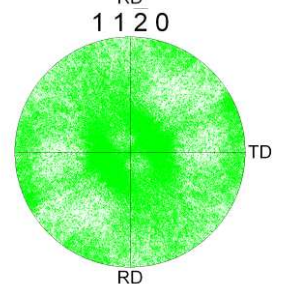
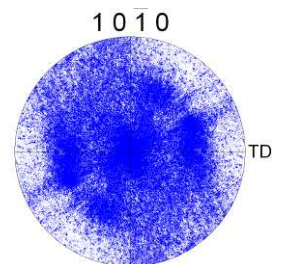
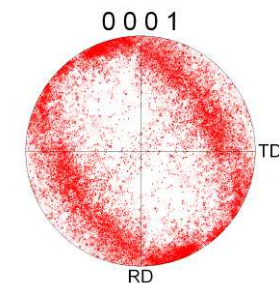
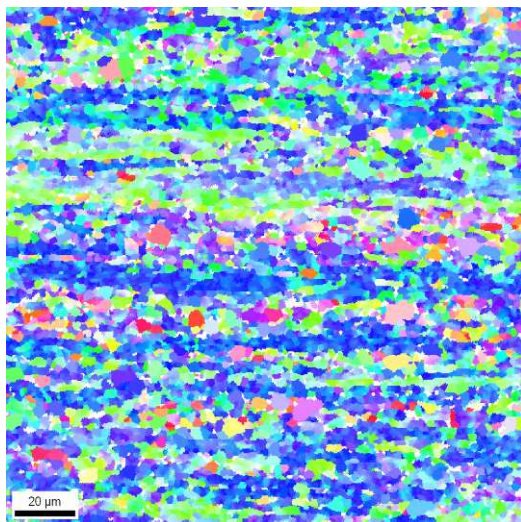
Annexe 3g : Examens MEB-EBSD à cœur de la tôle d'épaisseur 1,43 mm repérée J4-1,43 mm
Cartographies d'orientation et figures de pôles discrétisées de la phase alpha
 Grandissement x500 et code couleur :



Direction travers-large



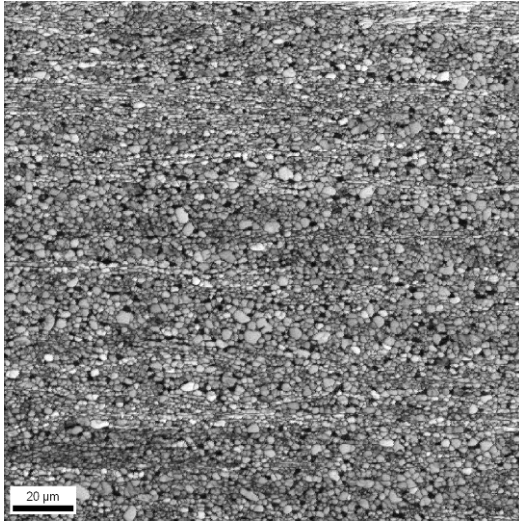
Direction normale à la tôle



Direction longitudinale

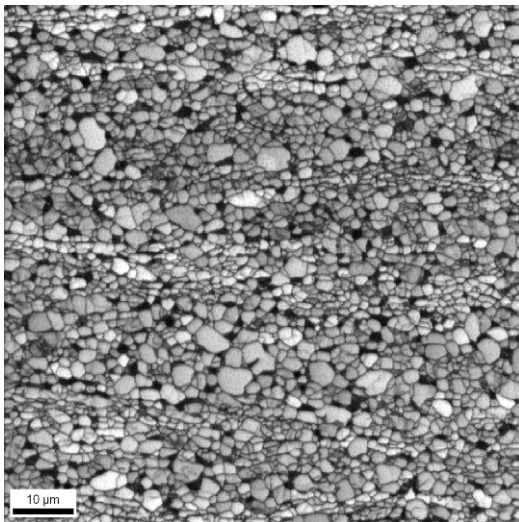
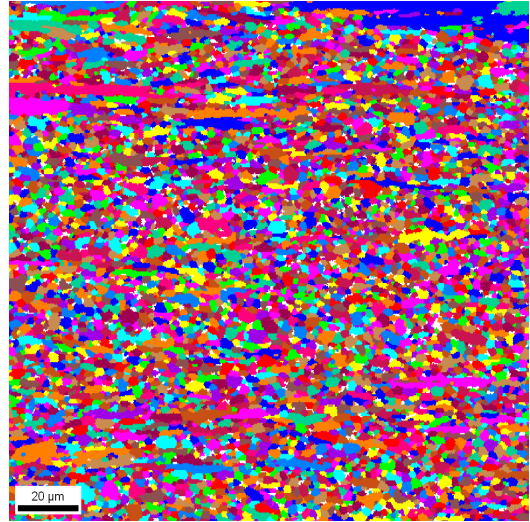
Annexe 3h : Examens MEB-EBSD à cœur de la tôle d'épaisseur 1,43 mm repérée K1-1,43 mm
Structure granulaire en coupe longitudinale

Indice de qualité de diffraction

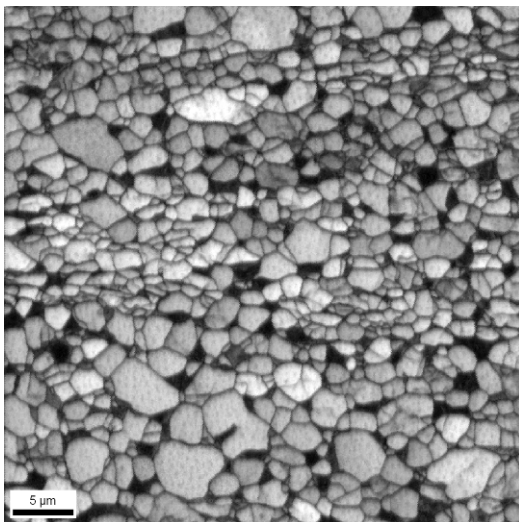
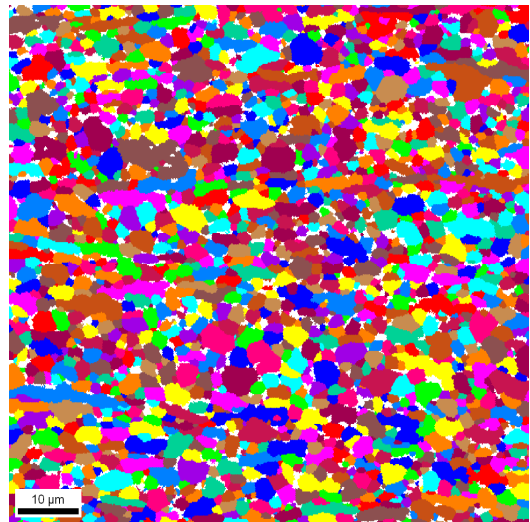


x 500

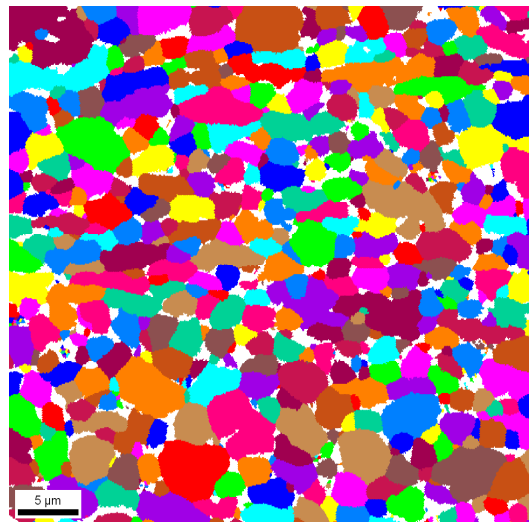
Structure granulaire



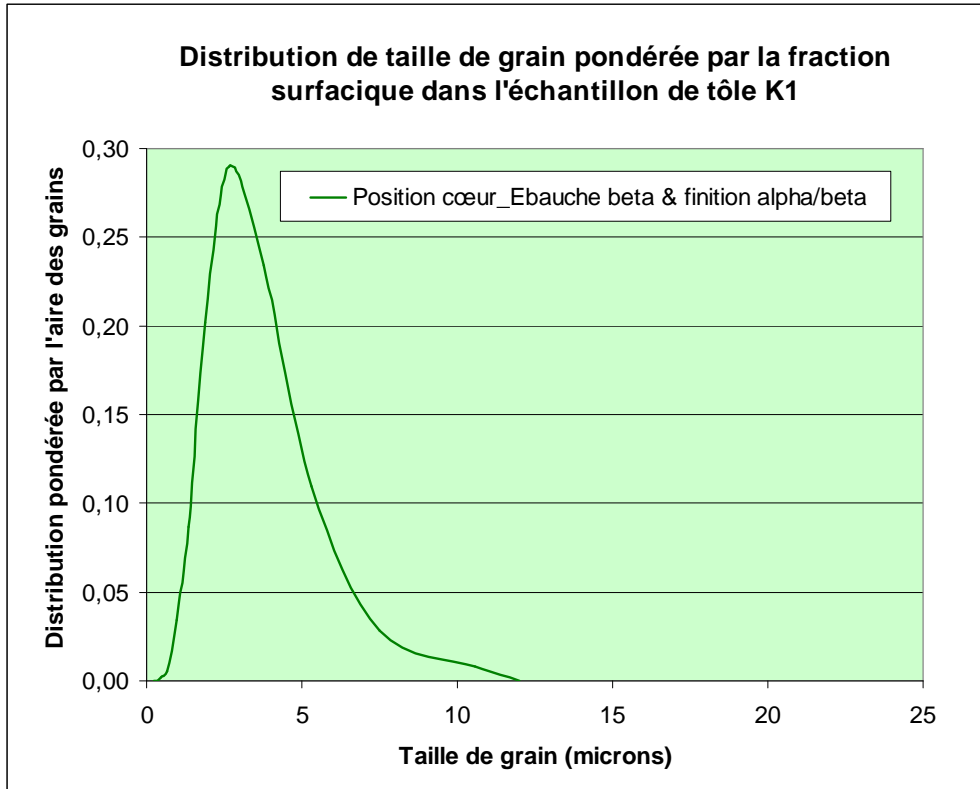
x 1000



x 2000

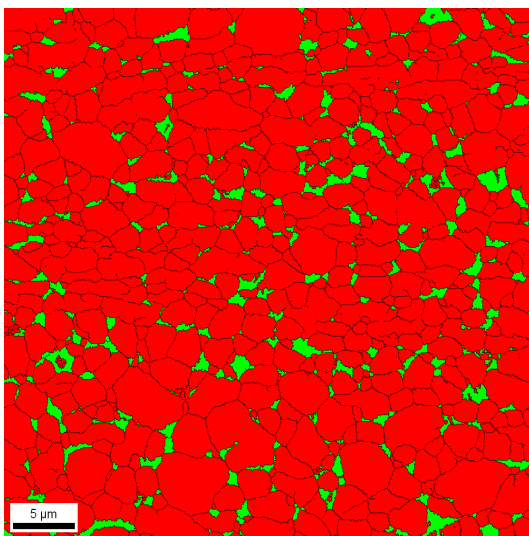


Annexe 3i : Examens MEB-EBSD à cœur de la tôle d'épaisseur 1,43 mm repérée K1-1,43 mm
Cotations de la structure granulaire, du taux de phase beta et de la FDOC en coupe longitudinale



Repère K1 : Taille moyenne des grains (microns)				
	x 500	x 1000	x 2000	Moyenne
Population	1,993	1,772	1,463	1,743
Aire	3,135	2,930	2,732	2,932

Grandissement	FDOC
500	18,758
1000	20,648
2000	26,657



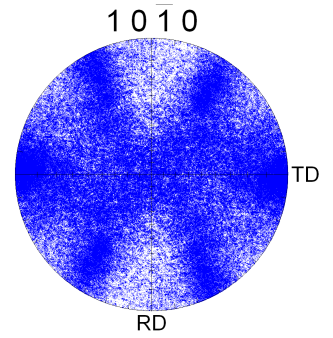
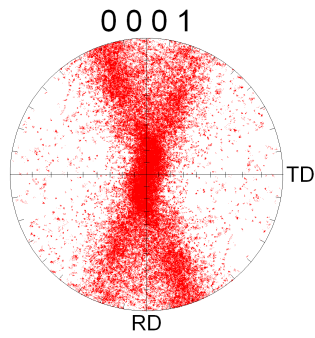
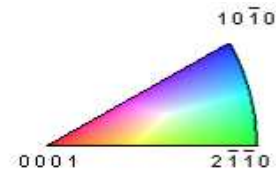
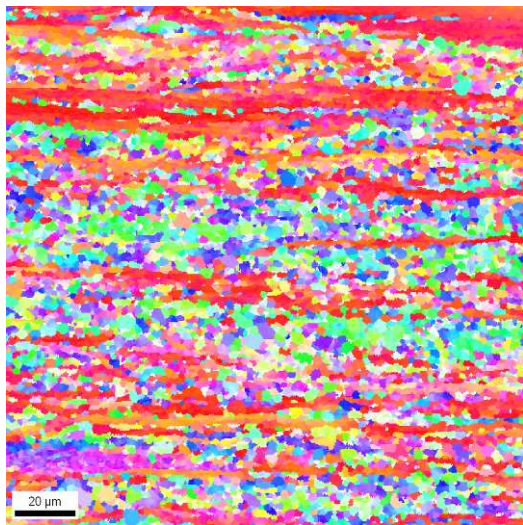
Phase	Total Fraction	Partition Fraction
Titanium Alpha	0.922	0.922
Titanium - Beta	0.078	0.078

Boundaries: Rotation Angle

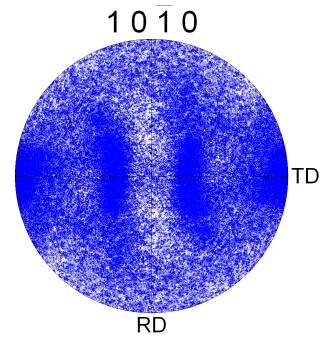
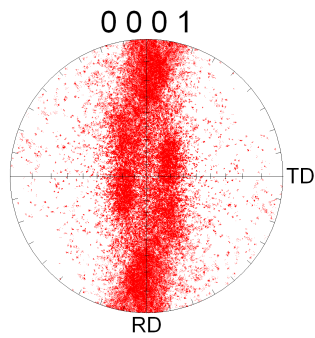
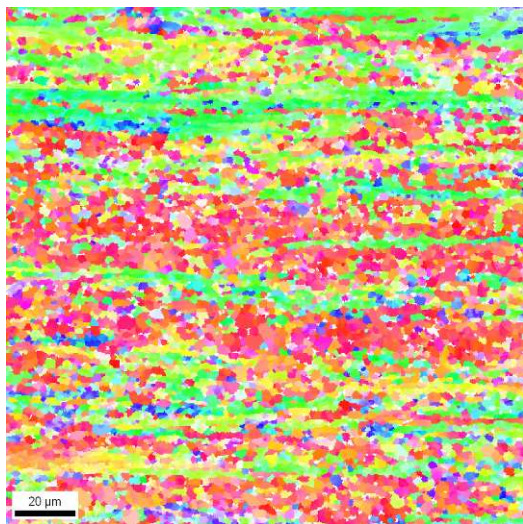
Min	Max	Fraction	Number	Length
5°	180°	0.876	49853	2.88 mm

Cartographie de phases (x 2000)

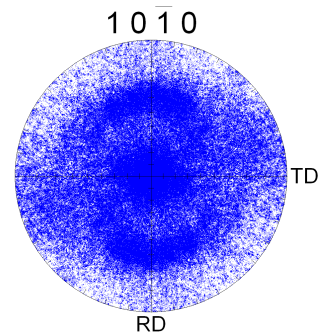
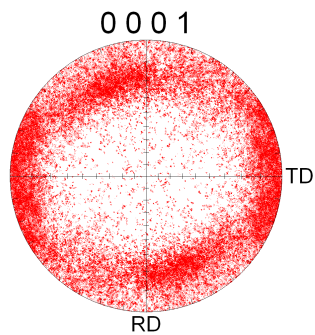
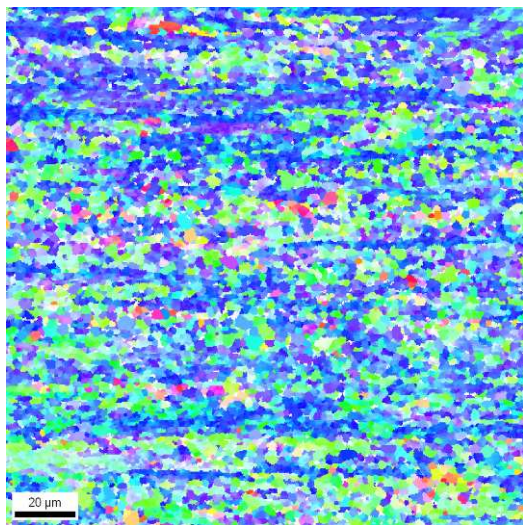
Annexe 3j : Examens MEB-EBSD à cœur de la tôle d'épaisseur 1,43 mm repérée K1-1,43 mm
Cartographies d'orientation et figures de pôles discrétisées de la phase alpha
 Grandissement x500 et code couleur :



Direction travers-large



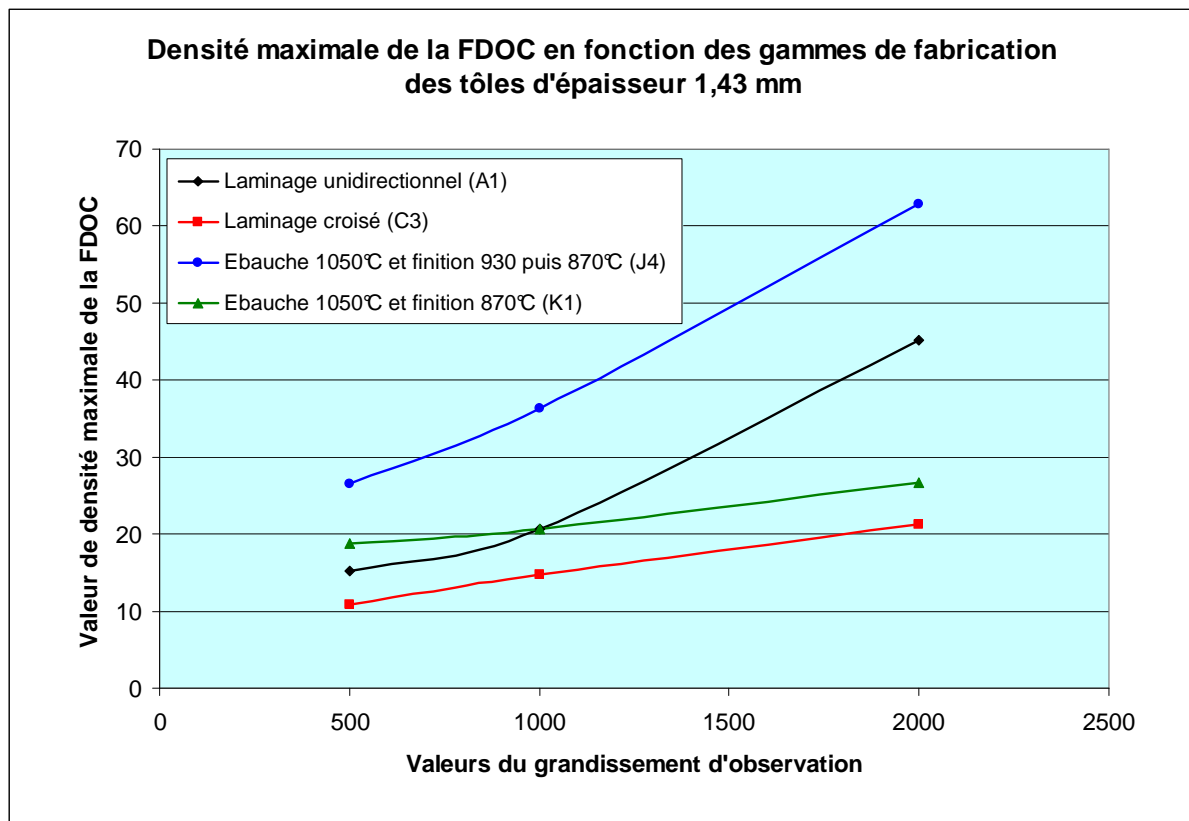
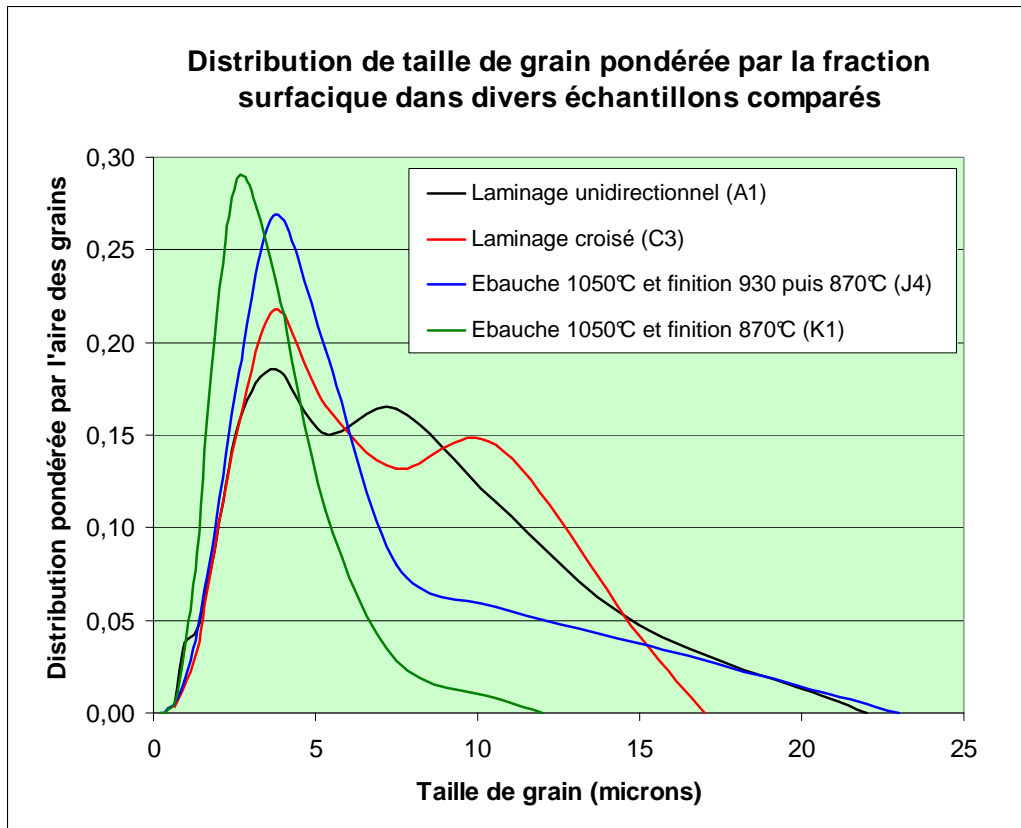
Direction normale à la tôle



Direction longitudinale

ANNEXE 4 : RESUME DES CARACTERISTIQUES STRUCTURALES DES TÔLES

Annexe 4a : Caractéristiques structurales comparées à cœur des tôles d'épaisseur 1,43 mm



ANNEXE 5 : GAMMES DE FABRICATION DES TÔLES EXPERTISEES

Annexe 5a : Gammes de fabrication des tôles et ébauches expertisées

Gamme 1 : Format du larget initial : 705 x 290 x 57 mm

- Chauffage à 1050°C sous atmosphère oxydante, laminage jusqu'à l'épaisseur 8 mm et trempe eau
- Réchauffage 2ème chaude à 930°C et laminage feuille à feuille jusqu'à l'épaisseur 2,5 mm
- Retour au four à 930°C / 15 min pour recuit de globularisation puis refroidissement air
- Réchauffage 3ème chaude à 870°C et co-laminage à 2 feuilles à l'épaisseur 1,43 mm
- Retour au four à 870°C / 15 min puis refroidissement lent sous cloche

Gamme 1 bis : Format du larget initial : 705 x 290 x 57 mm

- *Chauffage à 1050°C sous atmosphère oxydante, laminage jusqu'à l'épaisseur 8 mm et trempe eau*
- Réchauffage 2ème chaude à 870°C et laminage feuille à feuille jusqu'à l'épaisseur 4,5 mm
- Retour au four à 870°C / 15 min pour recuit de globularisation puis refroidissement air
- *Réchauffage 3ème chaude à 870°C et co-laminage à 2 feuilles à l'épaisseur 2,5 mm*
- *Retour au four à 870°C / 15 min pour recuit de globularisation puis refroidissement air*
- *Réchauffage 4ème chaude à 870°C et co-laminage à 2 feuilles à l'épaisseur 1,43 mm*
- *Retour au four à 870°C / 15 min puis refroidissement lent sous cloche*

Gamme 2 : Format du larget initial : 705 x 290 x 57 mm

- Chauffage à 970°C sous atmosphère oxydante et laminage jusqu'à l'épaisseur 6 mm
- Réchauffage 2ème à 930°C et laminage feuille à feuille jusqu'à l'épaisseur 2,5 mm
- Retour au four à 930°C / 15 min pour recuit de globularisation, puis refroidissement air
- Réchauffage 3ème chaude à 870°C et co-laminage à 2 feuilles à l'épaisseur 1,43 mm
- Retour au four à 870°C / 15 min puis refroidissement lent sous cloche

Gamme 3 : Format du larget initial : 1075 x 310 x 61 mm

- Chauffage à 970°C sous atmosphère oxydante et laminage jusqu'à l'épaisseur 4,2 mm
- Réchauffage 2ème chaude à 930°C et reprise **croisée** feuille à feuille jusqu'à l'épaisseur 2,5 mm
- Retour au four à 930°C / 15 min pour recuit de globularisation puis refroidissement air
- Réchauffage 3ème chaude à 870°C et co-laminage à 3 feuilles à l'épaisseur 1,43 mm
- Retour au four à 870°C / 15 min puis refroidissement lent sous cloche