



HAL
open science

Le phénomène d'érosion de surface sur avion

Florent Audoin

► **To cite this version:**

Florent Audoin. Le phénomène d'érosion de surface sur avion. Génie mécanique [physics.class-ph]. 2011. dumas-01108517

HAL Id: dumas-01108517

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01108517>

Submitted on 22 Jan 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

CENTRE REGIONAL ASSOCIE DE TOULOUSE

MEMOIRE

Présenté en vue d'obtenir

Le DIPLOME d'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : MECANIQUE

OPTION : AERODYNAMIQUE

par

AUDOIN Florent

LE PHENOMENE D'EROSION DE SURFACE SUR AVION

Soutenu le (13 Juillet 2011)

JURY : Fabien DEZITTER : ingénieur Airbus
Claire LAURENT : chercheur ONERA
Gérard LAVERGNE : professeur ISAE
Alain STRZELECKI : chercheur ONERA

PRESIDENT : Francesco GRASSO: Professeur responsable de la chaire aérodynamique au
CNAM

Remerciement

La nature du sujet, qui a été traité durant ce stage, mettant en avant deux spécialités : la physique des matériaux et l'aérodynamique m'a permis de rentrer en contact avec de nombreuses personnes.

Je tiens à remercier plus particulièrement :

- Jérôme BOSC et Pascal LARRIEU, responsables d'équipes au sein d'EDGAM, pour m'avoir accueilli durant cette période,
- Fabien DEZITTER, mon responsable de stage pour ses précieux conseils et son expérience qui m'ont guidé tout au long de mon stage,
- Oliver ROHR, EADS Innovation Works, pour avoir partagé ses connaissances sur les essais érosion à l'eau et au sable.

Je remercie également mon département des Matériaux et Procédés de m'avoir permis de faire ce stage dans de bonnes conditions.

Glossaire

- VTP : « Vertical Tail Plane » en anglais ou dérive en français
- HTP: « Horizontal Tail Plane » en anglais appelé aussi PHR : « Plan Horizontal Réglable » en français
- nacelle : Structure autour du moteur
- ductile : capacité d'un matériau à se déformer plastiquement sans se rompre.
- fragile : la rupture survient en fin de déformation élastique
- Primaire: Il s'agit de la sous couche avant application de la finition aux couleurs de la compagnie
- We: Nombre de Weber
- We_c : Nombre de Weber critique
- K : Paramètre d'éclaboussure
- T^* : Nombre sans dimension lié à la température de Leidenfrost et la température d'ébullition
- T_e : Température d'ébullition
- T_F : Température de Leidenfrost
- Oh : Nombre d'Ohnesorge
- R : Paramètre de rugosité
- Φ ou d : Diamètre de la particule
- N_D : Nombre de goutte par unite de volume
- I : Intensité pluviométrique (mm/h)
- ρ : masse volumique (kg/m^3)
- ρ_s : masse volumique de la goutte (Kg/m^3)
- ρ_1 : densité du matériau
- ρ_2 : densité de la particule
- μ_w : viscosité dynamique ($kg.m^{-1}.s^{-1}$)
- r : Rayon de la goutte (m)
- g : Accélération de la pesanteur (m/s^2)
- K : coefficient de résistance à l'entraînement de l'air
- V ou U : vitesse de la particule

- σ_w : Tension de surface (kg.s^{-2})
- β : coefficient de captation
- E ou Iv : Taux d'érosion (mg/kg ou mm^3/kg) avec $E=Iv= aV^m$
- a : constante résumant les propriétés de la particule
- m : exposant compris entre 2 et 3 suivant le matériau
- HV : Dureté vickers : Résistance qui oppose une surface à un corps plus dur
- Distribution monodispersé = distribution selon un seul diamètre de goutte
- dm : Perte de masse du substrat
- Cp : Coefficient de pression avec $-Cp = \frac{p_0 - p}{\frac{1}{2} \times \rho_0 \times V_0^2}$
- Fd : Force de traînée (N)
- Cd : Coefficient de traînée
- Vr : Vitesse relative de la goutte par rapport à l'air
- Fg : force de pesanteur (N)
- F : Poussée d'Archimède (N)
- Mg : Masse de la goutte
- m_i : densité de flux massique d'eau impactant localement
- m_∞ : densité de flux massique rencontré à l'infini amont
- M : Nombre de Mach
- LWC : Liquid Water Content (kg.m^{-3})
- $\delta 0$: contrainte de cisaillement
- es : densité spécifique d'énergie de cisaillement
- E1 : module d'Young du matériau
- E2 : module d'Young de l'érodant
- $\mu 1$: coefficient de Poisson du matériau
- $\mu 2$: coefficient de Poisson de l'érodant
- θ : angle d'impact de la particule sur la surface
- NACA: National Advisory Committee for Aeronautics
- Ps : Pression statique
- Ts : Température statique
- Un : vitesse normale à la paroi
- Ut : vitesse tangentielle à la paroi

- c : corde du profil
- x/c : abscisse du profil par rapport à la corde
- y/c : ordonnée du profil par rapport à la corde
- S/SP : abscisse curviligne par rapport au point de stagnation (ou point d'arrêt)
- $scurv$: abscisse curviligne du profil
- M_n : nombre de mach en normal
- κ : rapport $I_{V_{max}} / I_{V_{90^\circ}}$
- IW : Innovation Works, laboratoires du groupe EADS

Sommaire

I) Introduction :	10
I) L'étude bibliographique :	11
1) L'érosion	11
a) Introduction :	11
b) Définition:	11
c) Localisation des zones érosion sur avion:	13
d) Conclusion :	15
2) L'érosion à l'eau:	16
a) Le phénomène physique :	16
b) Caractérisation de l'impact d'une goutte d'eau :	20
c) Caractéristiques de la chute de pluie :	22
d) Conclusion	29
3) L'érosion par particule solide:	30
a) Définition :	30
b) Comportement général de l'érosion solide :	30
c) Paramètres influençant l'érosion solide :	31
d) Conditions particulières liées à l'avion :	37
e) Conclusion :	37
4) Les essais en laboratoire:	38
a) Essais érosions à l'eau :	38
b) Essais érosions au sable :	43
c) Conclusion sur la partie essais en laboratoire	45
5) Simulation numérique	46
a) Introduction :	46
b) Prédiction de l'impact d'une particule :	46
c) Conclusion :	47
6) Conclusion :	48
II) Méthodes et outils :	49
1) Généralité :	49
a) Définition et caractérisation des particules	49

b)	Evaluation de la réponse du matériau _____	50
c)	Calcul du champ aérodynamique et des trajectoires de gouttes _____	51
2)	Le module du Champ aérodynamique : _____	53
3)	Le module trajectoire des gouttes et coefficient de captation : _____	54
a)	Bilan des forces appliquées : _____	54
b)	Calcul des trajectoires de gouttes : _____	56
c)	Le coefficient de captation _____	57
d)	Modification ONICE2D pour l'érosion : _____	58
e)	Conclusion _____	58
4)	Le modèle d'érosion : _____	59
a)	Approche selon Beckmann and Gotzmann: _____	59
b)	Approche $Iv=a.U^m$: _____	62
c)	Autres approches : _____	69
d)	Conclusion : _____	71
III)	Application préliminaires sur un profil NACA0012 : _____	72
1)	Le profil NACA0012 : _____	72
2)	Simulation impact avec ONICE2D : _____	73
a)	Le cas décollage: _____	73
b)	Le cas croisière : _____	79
c)	Conclusion : _____	85
3)	Application du modèle érosion: _____	86
a)	Le cas décollage : _____	86
b)	Comparatif avec les essais expérimentaux réalisés à IW Ottobrunn : _____	88
c)	Conclusion : _____	91
IV)	Application sur le profil du HTP A320 _____	92
1)	Le profil du HTP: _____	92
a)	Le profil du HTP selon une coupe longitudinale : _____	93
b)	Profil HTP normal : _____	94
2)	Simulation impact avec ONICE2D : _____	96
a)	Le cas décollage: _____	96
b)	Analyse : _____	100

c) Conclusion :	100
3) Application au modèle érosion:	101
a) Un exemple : Le cas décollage :	101
b) Conclusion :	106
V) Conclusions et perspectives	107
VI) Annexes	109
1) Caractéristiques de l'eau :	109
2) Le code ONICE2D	116
3) Le modèle d'érosion	124
4) Résultats ONICE 2D sur le profil HTP	127
a) Sur le profil en Normal	127
b) Sur le profil en Streamwise :	135
VII) Références	143
VIII) Figures et Tableaux:	144
IX) Résumé	147

I) Introduction :

Afin de transporter toujours plus de passager et pour des besoins de rentabilité, les compagnies aériennes font décoller et voler leurs avions quelque soit les conditions climatiques tel que orage, tempête, pluie, givre....Ces conditions, parfois inhabituelles, s'accompagnent de sable, grêle, gouttes d'eau givrantes, etc. Ces impacts peuvent provoquer des dommages tels que l'érosion des surfaces, la perte de puissance des moteurs et une dégradation des performances avion.

Le phénomène sur lequel je vais me consacrer durant le stage est l'érosion de surface. Un phénomène d'usure, par impact de particules solide ou liquide, qui provoque une perte progressive de matière du matériau. Ces impacts peuvent entraîner une diminution des propriétés mécaniques propre au matériau mais aussi des performances de l'avion via la dégradation de l'état de surface et l'augmentation de la traînée de frottement. Ce phénomène met en avant deux spécialités : la physique des matériaux et l'aérodynamique. Il est donc important de mettre en place une étude multidisciplinaire.

Ce mémoire se décompose en 4 parties.

Une première partie bibliographique sur les différents mécanismes d'érosion suivant le type de particule et les moyens existants pour les simuler.

Puis une seconde partie qui traite des méthodes et outils pour modéliser les phénomènes physiques liés à l'érosion à partir des données de l'étude bibliographique. Avec pour objectifs de:

- Développer un modèle d'érosion,
- Implémenter ce modèle dans la chaine d'accrétion bidimensionnelle ONICE2D développée par l'ONERA et utilisée pour la prédiction des formes de givre par AIRBUS.

La troisième partie sera consacrée à l'application du modèle érosion sur :

- Un profil étalon, le NACA0012,
- Un profil dont on connaît le comportement en service, le HTP de l'A320.

Et enfin, la dernière partie qui rassemblera une conclusion sur ces 10 mois de stage, ainsi que les perspectives pour améliorer le modèle.

D) L'étude bibliographique :

1) L'érosion

a) Introduction :

Par phénomène d'érosion, il faut en fait comprendre phénomène d'usure érosive.

En effet, l'érosion est un des mécanismes d'usure au même titre que :

- L'usure adhésive,
- L'usure par frottement,
- L'usure abrasive.

Dans notre cas d'étude sur les surfaces extérieures des avions, nous rencontrons le plus souvent de l'usure érosive. C'est pourquoi, dans la suite du document, nous étudierons uniquement ce type d'usure.

b) Définition:

L'érosion est définie comme une perte progressive de matière du matériau due à des interactions mécaniques entre la surface et des particules liquides ou solides.

Les principales particules impactant la surface d'un avion sont :

- l'eau,
- le sable, poussières, cendres (cas extrême observé en avril 2010 en Europe)
- la glace.

La perte de matière se fait par le biais de 4 mécanismes d'impact :

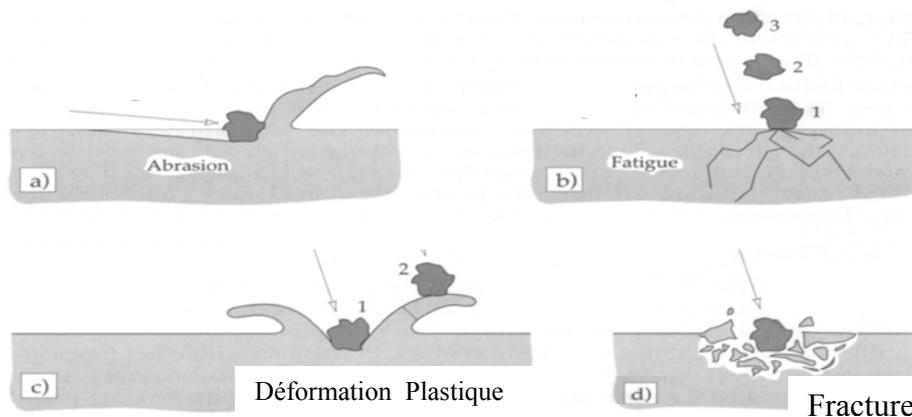


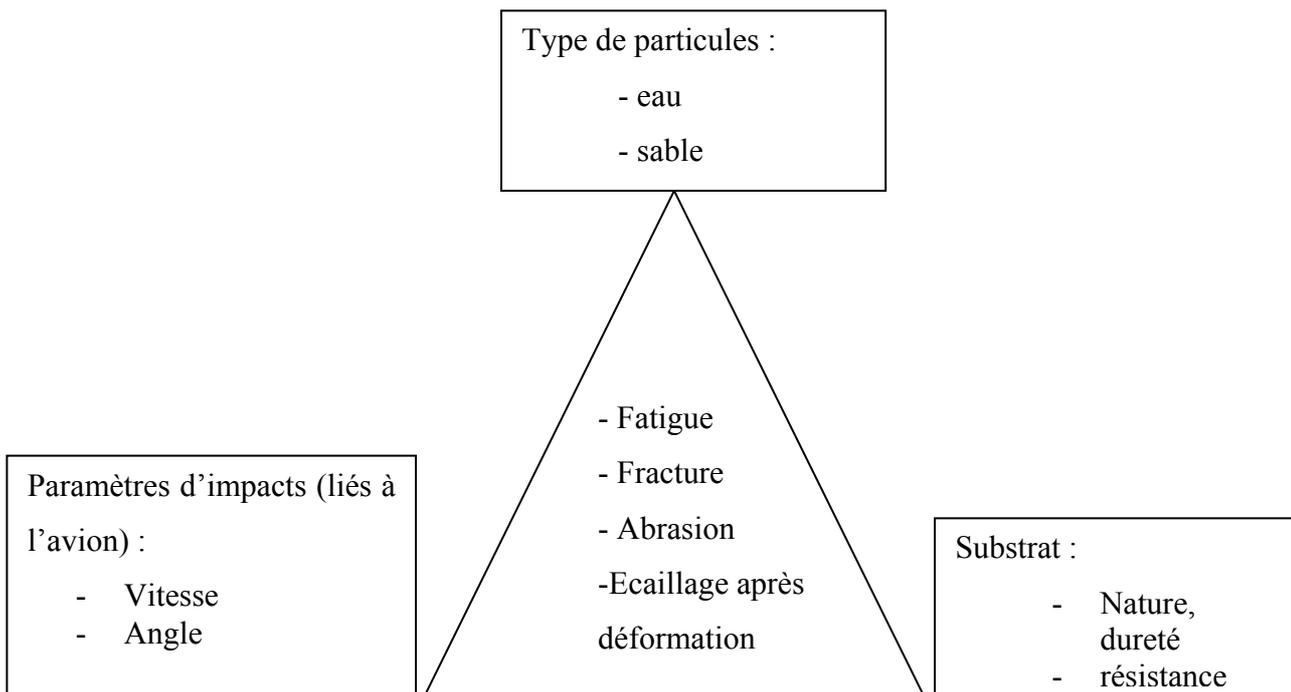
Figure 1 : Interactions mécaniques entre la surface et une particule

Sur la *figure 1*, nous observons 4 types d'interactions mécaniques.

Ces mécanismes d'impact dépendent de plusieurs critères :

- La nature du substrat :
 - o Ductile,
 - o Cassant, fragile,
- La vitesse d'impact
- L'angle d'impact
- Le type de particule :
 - o Matière (eau, sable, glace)
 - o Taille,
 - o Forme (rond, anguleux...).

Schéma explicatif résumant le principe d'érosion avec ses différents facteurs :



Le retour d'expérience des avions en service ne nous permet pas d'établir de liens entre le type d'érosion et le défaut engendré. La plupart du temps, les défauts d'usure érosive sont dus à une combinaison de facteurs. Par exemple : impact de glace combiné avec l'eau.

Ainsi, afin de bien comprendre les effets de chaque facteur sur l'érosion et ses mécanismes, nous allons les étudier séparément.

Le retour en service nous permet, tout de même, de localiser les zones soumises à l'érosion.

c) Localisation des zones érosion sur avion:

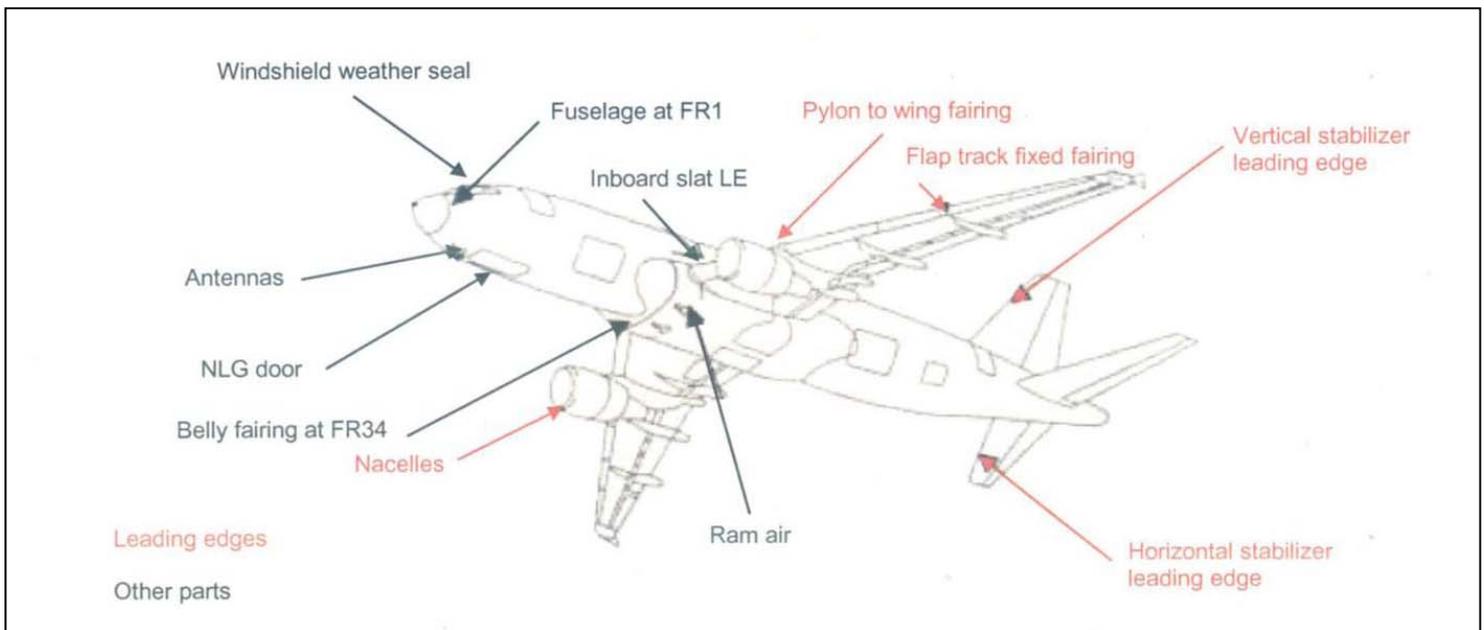


Figure 2 : Parties de l'avion soumis à l'érosion

Sur avion, l'usure érosive est localisée principalement sur les bords d'attaques notés en rouge sur la *figure 2* tels que les nacelles, le VTP, HTP, la voilure.... mais pas seulement, comme montré en noir sur la figure. Il suffit d'une surépaisseur sur un profil pour être soumis à l'érosion.

Les photos suivantes montrent différents types de dommages observés fréquemment sur avion.

- Sur les bords d'attaque voilure :

La peinture extérieure a été enlevée et le primaire (sous couche de peinture nécessaire pour la protection contre la corrosion) est exposé (voir *figure 3*).

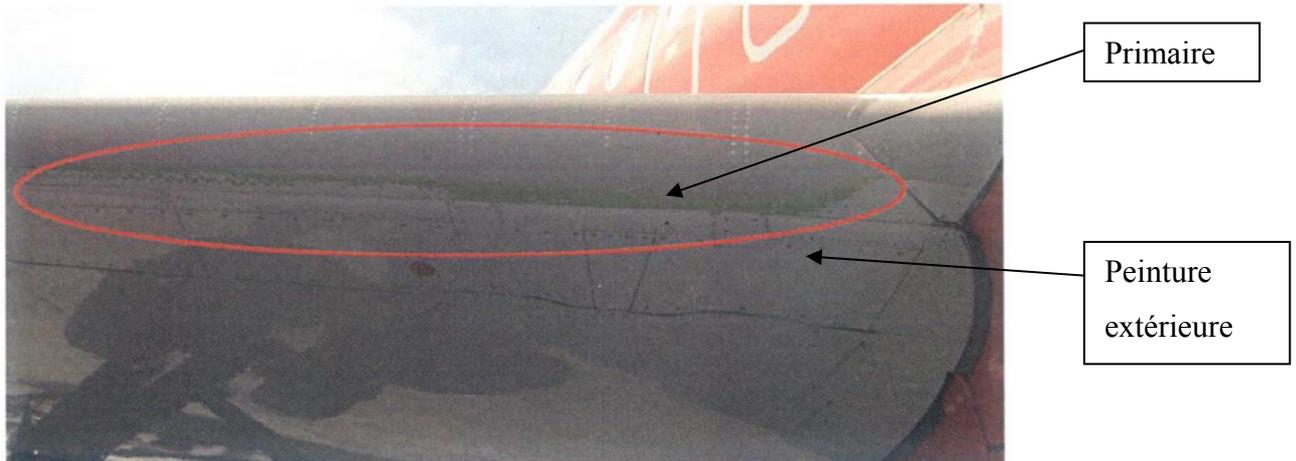


Figure 3 : Bord d'attaque voilure côté droit

- Sur la dérive appelée aussi VTP :

La peinture extérieure a été enlevée. La peinture antistatique appliquée sur le substrat composite est apparente (voir *figure 4*).

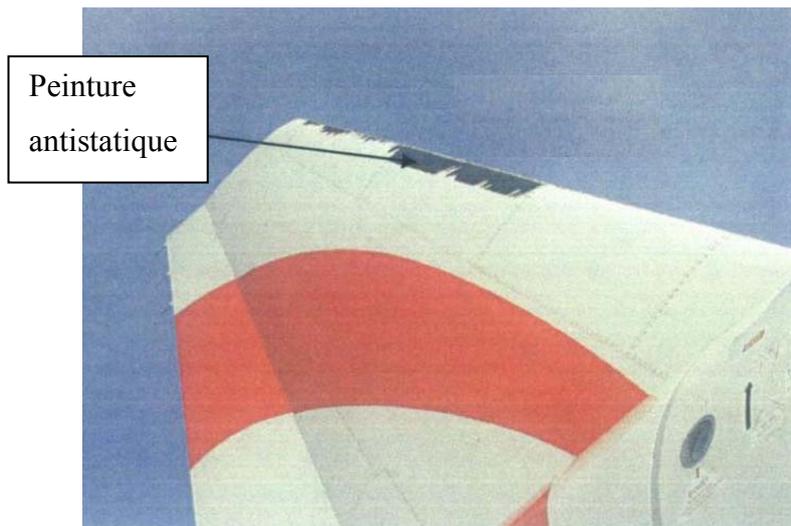
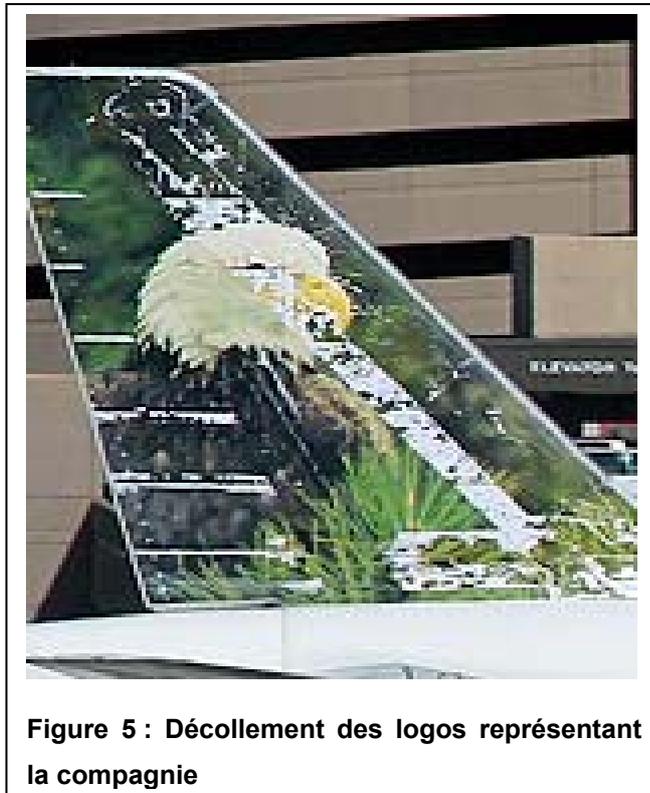


Figure 4 : Bord d'attaque dérive

Autre exemple,



d) Conclusion :

L'érosion peut entraîner :

- Une perte de matière qui peut fragiliser la structure,
- Une augmentation de la traînée due à une hausse de la rugosité,
- De la corrosion par enlèvement de la protection sur les surfaces de l'avion,
- Une perte d'esthétisme pouvant entraîner une mauvaise image de marque pour les compagnies.

2) L'érosion à l'eau:

Déom et al [1]: « Avec l'augmentation de la vitesse des avions et le fait qu'ils doivent même pouvoir voler dans des conditions d'averses violentes, les problèmes environnementaux tels que l'érosion à la pluie deviennent importants. Des spécifications précises sont maintenant nécessaires dans la conception des matériaux. »

« Depuis 1965, la vitesse des avions et des missiles augmente rapidement, ce qui amplifie considérablement le risque d'érosion. De plus, les nouveaux équipements, tels que le radome, sont plus sensibles qu'avant aux changements d'épaisseur dus à l'érosion. »

Ces extraits soulignent l'importance de comprendre ce phénomène. Les contraintes environnementales sont prises en compte dès la phase de conception. Il est donc nécessaire d'inclure ces mécanismes complexes d'interaction entre la goutte et la paroi lors du design des pièces afin d'optimiser la structure (durée de vie, gain de masse...).

a) Le phénomène physique :

Lorsqu'une goutte impacte une surface des phénomènes divers et complexes peuvent se produire. L'aspect de la goutte : sa taille, sa vitesse, son angle d'impact, sa nature doit être pris en compte au même titre que la nature de la surface impactée (rugosité, température de surface, ...).

Trois principaux régimes d'interactions sont identifiés :

– Le rebond :

Le film d'air retenu entre la goutte et la surface peut entraîner une faible perte d'énergie et la goutte rebondit. Sur une surface sèche et à haute température ($\gg T_e$), un film de vapeur empêche la goutte de mouiller la surface et un rebond est observé.



Avec:

- $We = 7$
- $K = 45$
- $T^* = 1.58$

Les expressions de ces nombres sans dimensions se trouvent en Annexes

**Figure 6 : Interaction pour un éthyle-alcool,
 $Oh = 1.74 \times 10^{-2}$ - Garcia Rosa et al [5]**

– La déposition :

En augmentant encore la vitesse d'impact, la goutte s'étale sur la surface pour former un film. Son énergie cinétique est ensuite dispersée, due à sa viscosité, et transformée en énergie de surface.



Avec:

- $We = 80$
- $K = 404$
- $T^* = 0.09$

Figure 7 : Interaction observée pour un éthyle-alcool, $Oh = 1.74 \times 10^{-2}$ - Garcia Rosa et al [5]

– L'éclaboussure :

Finalement, la dissipation visqueuse ne peut pas dissiper plus longtemps l'énergie cinétique, et la tension de surface ne peut plus maintenir la cohésion des gouttes. La goutte s'éclate alors en petites gouttes dont certaines peuvent être éjectées de la surface.

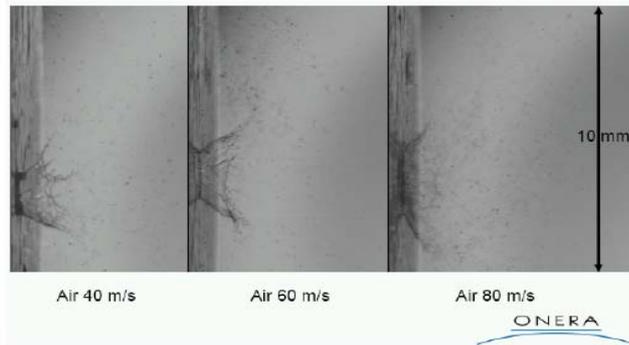


Figure 8 : Eclaboussure de gouttes, projet ECLIPPS - Dezitter [2]

Remarque :

La masse d'eau éjectée est inférieure à la masse d'eau projetée.
Plus la vitesse augmente, plus la masse d'eau éjectée augmente.

Le phénomène d'éclaboussure est d'avantage décrit dans les rapports de *Yarin et Weiss* [6] *Mundo et Al* [3] [4] ainsi que *Cossali* [7].

Ces différents régimes peuvent être représentés dans un diagramme K-T*

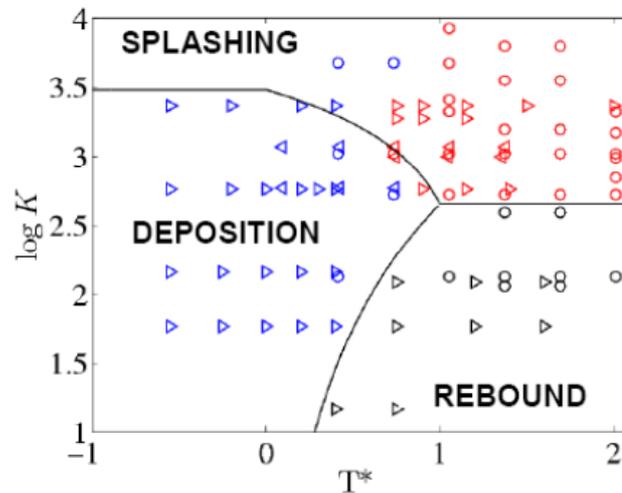


Figure 9 : Diagramme log K – T* dans des conditions expérimentales - Garcia Rosa et al [5]

– L'angle d'impact θ :

Il s'agit de l'angle entre la trajectoire de la goutte et la tangente à la surface au point d'impact. Cet angle est aussi appelé angle d'attaque.

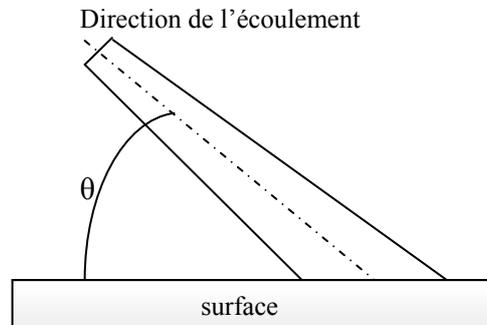


Figure 10 : Angle d'impact entre la direction de l'écoulement et la surface

Remarque :

Mundo et Al [3] [4] ont montré que le phénomène d'éclaboussure était presque indépendant de l'angle d'impact lorsqu'il était compris entre $35^\circ < \theta < 86^\circ$ dès que la composante de la vitesse normale était utilisée pour calculer les nombres sans dimension tel que We , Re ...

– La rugosité de la surface :

Elle va jouer sur différents paramètres tel que la mouillabilité et le paramètre K .

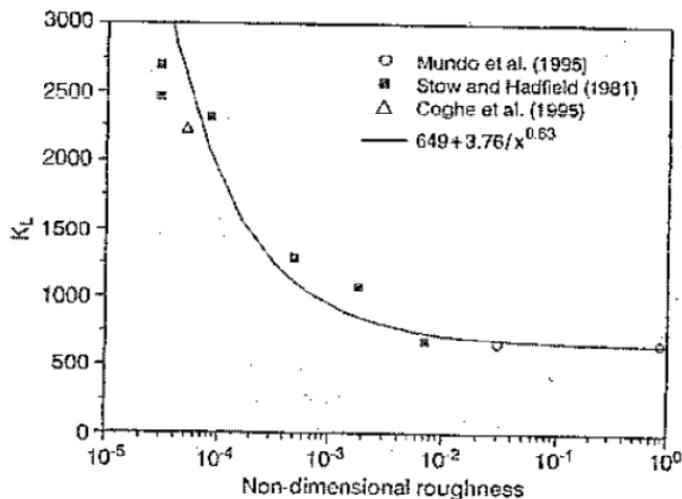


Figure 11 : Limite entre éclaboussure et dépôt en fonction de la rugosité impactant la surface - Cossali [7]

Les effets :

Lorsque $\frac{R}{\phi} \ll 1$: Le seuil de la phase d'éclaboussure est affecté, et, le phénomène se produit plus tôt.

Lorsque $\frac{R}{\phi} \approx 1$: Nous avons un comportement asymptotique et la phase d'éclaboussure n'est plus affectée.

b) Caractérisation de l'impact d'une goutte d'eau :

- Présentation :

L'impact d'une goutte d'eau à haute vitesse sur une surface solide peut causer des dommages matériels. Ces derniers sont dus à la propagation d'ondes qui sont générées dans le matériau. Ces ondes peuvent prendre 3 directions :

- Longitudinale
- Transversale
- superficielle (onde Rayleigh)

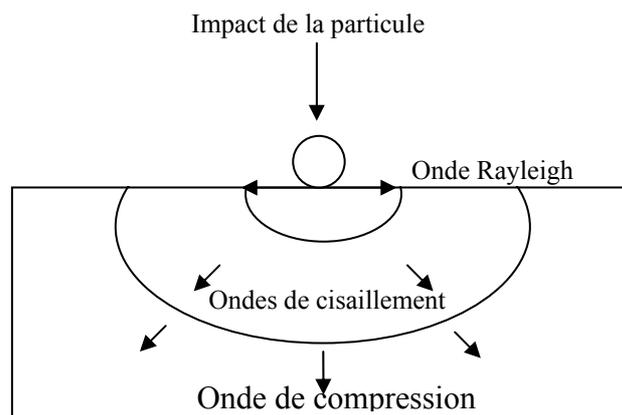


Figure 12 : Schéma des contraintes générées par l'impact de particule d'eau -B.G.Mellor [8]

Immédiatement après l'impact, la zone de contact liquide-solide se déplace vers l'extérieur à très grande vitesse (figure 13). Cette vitesse tangentielle dépend de la vitesse normale et du rayon de goutte.

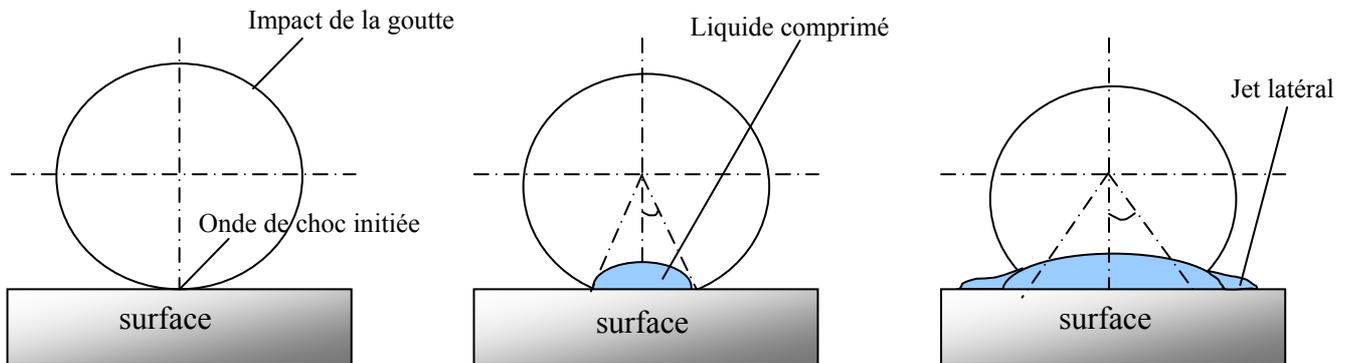


Figure 13 : Usure érosive suite à l'impact d'une goutte d'eau

L'érosion à l'eau crée donc de la fatigue due aux contraintes (élastiques et plastiques) qui sont générées à l'impact plus des défauts de surfaces avec le jet latéral.

Remarque :

La vitesse du jet latéral est plus grande que la vitesse à l'impact.

– Conclusion :

Nous venons de voir l'interaction goutte d'eau / paroi et les effets que cela génère sur la surface. Ces phénomènes dépendent du diamètre des gouttes, de la vitesse d'impact et du nombre. Ces caractéristiques vont être définies dans le paragraphe suivant.

c) Caractéristiques de la chute de pluie :

Selon *Adler* [9] « Pour connaître de façon significative les conditions d'essai, il est important de connaître le nombre de gouttes qui peut impacter l'avion durant son vol dans des conditions météorologiques précises. »

Les spécifications en vol sont donc caractérisées par une intensité, une durée et une distribution de diamètre de goutte.

– La distribution:

Des études expérimentales citées notamment par *Déom et al* [1] conduisent à admettre que les dimensions des gouttes de pluie dans l'espace se distribuent suivant une loi proposée par Marshall & Palmer (1948) :

$$N_D = N_0 e^{-\Lambda D} \quad \text{Et} \quad \Lambda = a.I^{-0.21}$$

Avec :

- N_D le nombre de gouttes par unité de volume et intervalle de diamètre δd
- D : le diamètre (mm)
- N_0 : valeur de N_D pour $D=0$
- I l'intensité (mm.h^{-1})

Suivant le type d'application et le type de pluie, les valeurs des paramètres (N_0 , a) peuvent varier.

Par exemple, pour le cas de *F.Bultot et A.Coppens* [11] – Pour trois types de précipitations :

Tableau 1 : Valeurs des paramètres N_0 et λ suivant le type de pluie - *F.Bultot et A.Coppens* [11]

Type de pluie	N_0 (m^{-4})	λ (m^{-1})
Bruine	6×10^7	$11.4 \times 10^3 I^{-0.21}$
Pluie étendue	1.4×10^7	$8.2 \times 10^3 I^{-0.21}$
Averse de caractère convectif	2.8×10^6	$6.0 \times 10^3 I^{-0.21}$

Pour les applications de *Deom et al* [1] :

$$N_D = 8000 \cdot e^{-4.1 \cdot (d/I^{0.21})}$$

Avec :

- N_D le nombre de gouttes par unité de volume et intervalle de diamètre δd
- d : le diamètre des gouttes sphériques (mm)
- I l'intensité ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

Le produit $N_D \cdot \delta d$ est donc le nombre de gouttes pour un volume de 1 m^3 d'air avec un diamètre compris entre d et $d + \delta d$. La figure 14 montre la distribution des gouttes pour des intensités données.

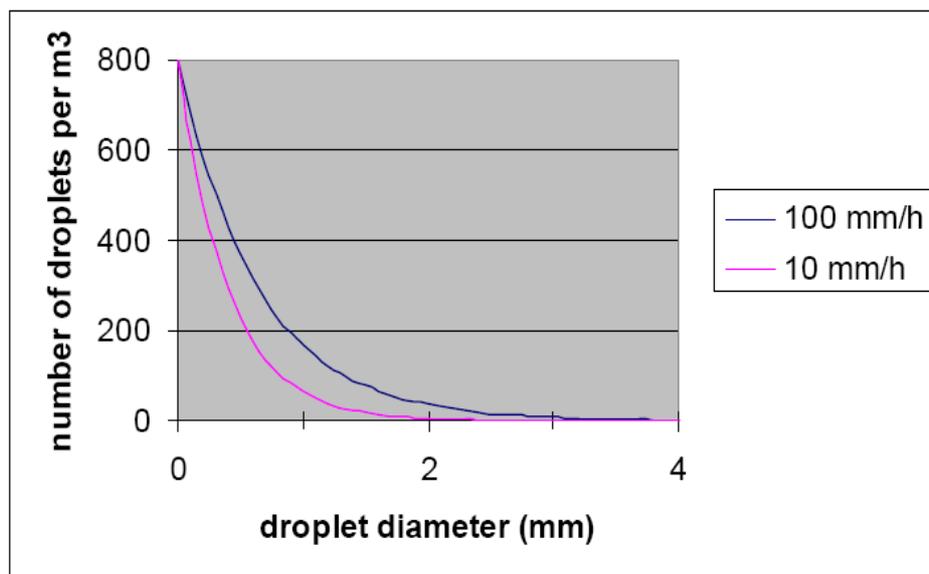


Figure 14 : Comparaison de la distribution des gouttes pour des intensités de 100mm/h et 10mm/h selon la loi de Marshall & Palmer – *Deom et al.* [1]

A partir de cette même équation, nous pouvons comparer le volume rempli par les gouttes à différents diamètres pour des intensités fixées (voir figure 15).

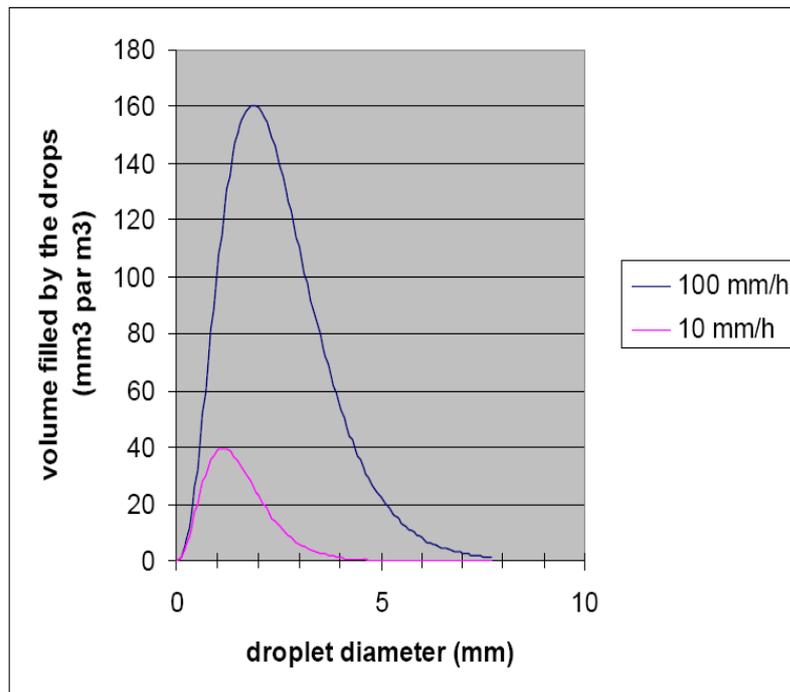


Figure 15 : Comparaison du volume rempli par les gouttes à différents diamètres pour les deux intensités – *Deom et al.* [1]

La formule de Marshall & Palmer donne pour chaque diamètre le nombre de goutte contenu dans 1 m³ de pluie.

Par conséquent, si l'on connaît la surface impactée, la vitesse V_g de la particule en mouvement et le temps d'exposition t , alors on peut calculer le nombre de gouttes N_{dr} pour chaque diamètre.

$$N_{dr} = N_d * S * V_g * t$$

Le tableau 2 montre un exemple de calcul du nombre de gouttes en fonction du diamètre pour $I=100\text{mm/h}$, $V_g=300\text{m/s}$, $t=10\text{s}$ et $D_i=10\text{mm}$ (diamètre de la surface impactée) - *Deom et al.* [1]

Tableau 2 : Distribution des gouttes + calcul du nombre de goutte

d_{\min}	d_{\max}	Number of droplets / m^3	Volume filled by the drops (mm^3 per m^3)	actual Number of drops
0,00	0,25	2000	2	471
0,25	0,50	1355	37	319
0,50	0,75	917	117	216
0,75	1,00	621	218	146
1,00	1,25	421	314	99
1,25	1,50	285	388	67
1,50	1,75	193	433	45
1,75	2,00	131	451	31
2,00	2,25	89	445	21
2,25	2,50	60	420	14
2,50	2,75	41	384	9,6
2,75	3,00	28	342	6,5
3,00	3,25	19	297	4,4
3,25	3,50	13	254	3,0
3,50	3,75	9	213	2,0
3,75	4,00	6	176	1,4
4,00	4,25	4	144	0,9
4,25	4,50	3	116	0,6
4,50	4,75	2	93	0,4
4,75	5,00	1	74	0,3
5,00	5,25	1	58	0,2
5,25	5,50	1	45	0,1
5,50	5,75	0	35	0,1
5,75	6,00	0	27	0,1
6,00	6,25	0	21	0,0
6,25	6,50	0	16	0,0
6,50	6,75	0	12	0,0
Total			5122	1459

– L'intensité pluviométrique:

La pluviométrie est définie comme étant le taux à partir duquel tombe la précipitation. Bien que la valeur de cette intensité puisse être considérée comme un taux instantané, en pratique il s'agit d'une moyenne prise sur une période d'une minute ou plus. Elle est exprimée en mm (voir figure 16).

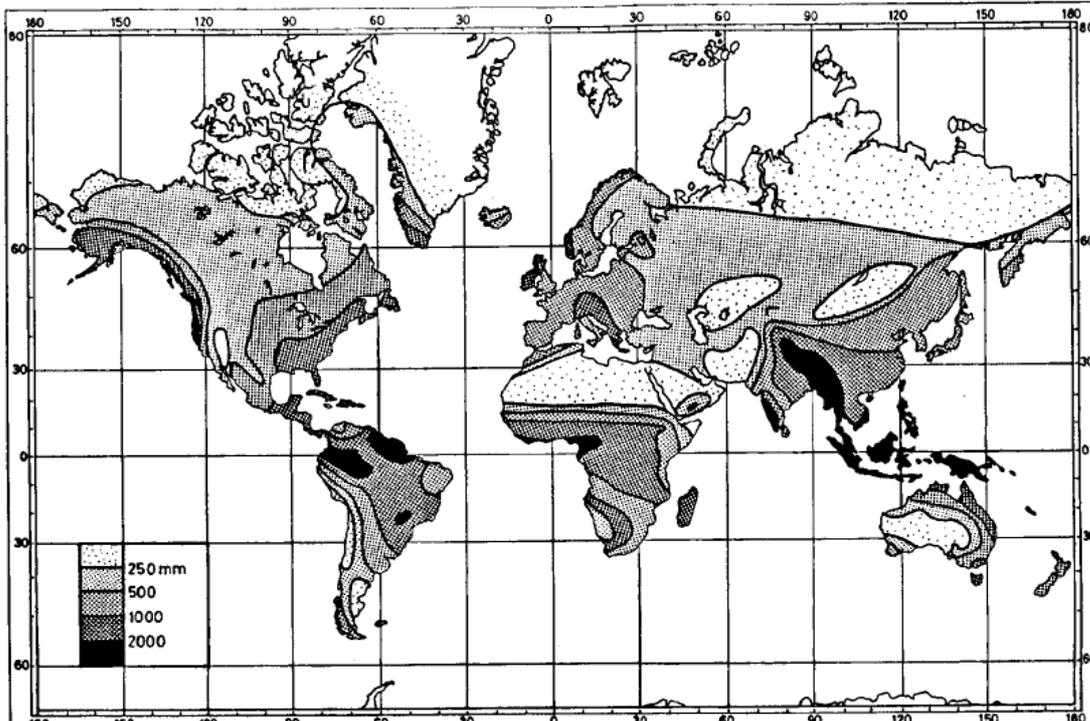


Figure 16 : Pluviométrie moyenne annuelle (mm) à travers le monde – DEF STAN 00 35
(part4/3) [12]

On peut constater que les zones les plus humides se trouvent au niveau des tropiques. Dans les zones tempérées, les fortes pluies se situent sur les régions côtières.

Remarques :

La pluviométrie est fortement variable que se soit dans le temps ou dans l'espace. La valeur est particulière à la zone observée. A une distance assez proche, elle peut varier d'un facteur deux ou plus, surtout dans les zones avec du relief. Il faut donc interpréter ces valeurs avec précaution.

L'intensité pluviométrique est la pluviométrie évaluée sur une échelle de temps appropriée. Cette intensité s'exprime en mm/h.

– Vitesse terminale de chute d'une goutte de pluie :

La vitesse terminale de chute d'une goutte de pluie résulte de l'équilibre entre la force gravitationnelle et la résistance de l'air.

Si l'on assimile la goutte de pluie à une sphère rigide et indéformable, alors sa vitesse terminale a pour expression :

$$V = \left(\frac{4 \cdot g \cdot \rho_s}{3 \cdot \rho \cdot K} * r \right)^{1/2}$$

Avec :

- ρ_s : la masse volumique (kg.m^{-3}) de la goutte
- ρ : la masse volumique de l'air
- r : le rayon de la goutte (m)
- g : accélération de la pesanteur (m.s^{-2})
- K : coefficient de résistance à l'entraînement de l'air avec
- $0.24 < K < 0.48$ - *Mason* (1957)

Cette relation ne donne qu'une valeur approximative de la vitesse terminale de chute du fait des hypothèses. En fait, les gouttes de pluie se déforment par les forces aérodynamiques et vibrent à tel point qu'elles se brisent, se disloquent fréquemment lorsqu'elles sont grosses. C'est pourquoi leur rayon n'excède pas 2.5mm.

Le tableau 3 suivant donne les valeurs de la vitesse terminale en fonction du diamètre des gouttes. Ces valeurs sont déduites avec une valeur de $K= 0.36$.

Tableau 3 : vitesse terminale des gouttes de pluie de divers rayons - *Bultot & Coppens* [11]

Rayon des gouttes (mm)	Vitesse terminale (m s^{-1})
0.25	2.75
0.50	3.89
0.75	4.77
1.00	5.50
1.50	6.74
2.00	7.78
2.50	8.70
2.75	9.12

Remarque :

Ces vitesses restent faibles et sont donc négligeables par rapport à la vitesse de l'avion.

– Distorsion des gouttes d'eau :

La distorsion se manifeste par un changement de forme de la goutte, passage d'une forme sphérique à une forme elliptique. L'observation de ce phénomène dépend de la tension de surface (σ_m en Kg/s^2).

H.Li et Al [13] décrivent le phénomène de distorsion comme étant plus important avec des gouttes de grand diamètre car la tension de surface est moins dominante pour maintenir sa forme face au produit: pression aérodynamique et diamètre.

On appelle grosses gouttes celles qui ont un diamètre d'environ $475\mu\text{m}$.

La distorsion affecte la vitesse de la goutte ainsi que sa trajectoire (angle d'impact) due à l'augmentation de la traînée.

H.Li et Al [13] présentent différents modèles de coefficient de traînée, pour des gouttes déformées, basés sur ceux pour des gouttes sphériques. Jusqu'à aujourd'hui, il n'existe pas de modèle universel, surtout dans le cas de grosses gouttes. C'est pourquoi, dans un premier temps, nous supposons des gouttes parfaitement sphériques pour nos cas d'érosion.

– La dislocation ou breakup :

Lorsqu'une goutte commence à se disloquer, se disperser en plusieurs petites gouttes, on parle de breakup.

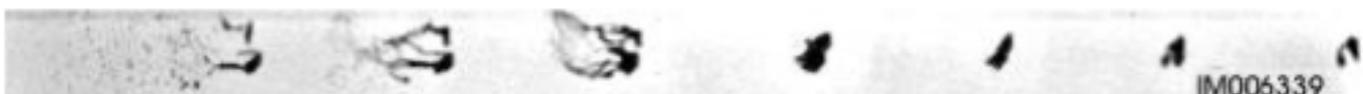


Figure 17 : Processus de dislocation - *H.Li et Al* [13]

Cette dislocation de gouttelettes peut affecter le coefficient de captation d'eau β autour d'un profil comme le montre la figure ci-dessous.

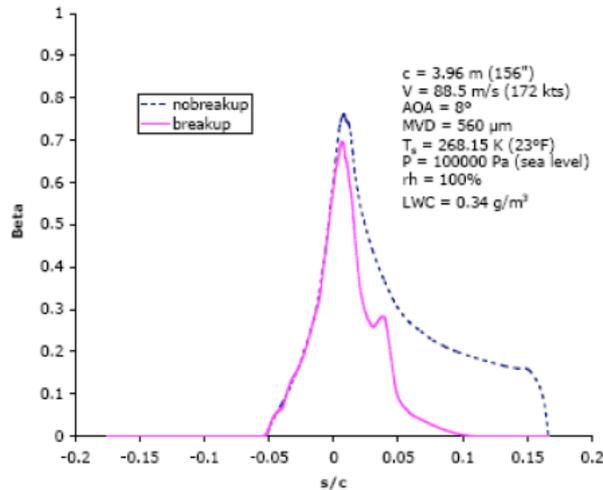


Figure 18 : Influence du break-up sur l'efficacité de la captation d'eau - *H.Li et Al* [13]

L'un des critères de breakup les plus répandus est basé sur le nombre de Weber. La valeur critique à laquelle le break-up se produit varie dans la littérature. D'autres modèles existent pour définir ces conditions critiques de breakup comme expliqué dans *H.Li et Al* [13]-.

Celui retenu dans ce même rapport [13] n'a pas été validé explicitement mais testé en parallèle d'un modèle d'éclaboussure pour le calcul du critère de captation β .

$$We = \frac{\rho_w V_n^2 d}{\sigma_w} > 13$$

d) Conclusion

Nous venons de voir les mécanismes de l'érosion à l'eau, ses interactions avec la surface ainsi que les caractéristiques propres aux gouttes d'eau. Concernant la partie modélisation, étant donné la complexité des phénomènes, nous considérerons dans un premier temps une goutte parfaitement sphérique laissant de côté les effets de distorsion et de break-up. Dans un deuxième temps, suivant les résultats obtenus, et si nécessaire, nous intégrerons ces phénomènes pour simuler le cas réel.

3) L'érosion par particule solide:

a) Définition :

Selon l'ASTM G40-05 [14] l'érosion par particule solide est définie comme la perte progressive de matière due à une exposition continue à l'impact.

Le terme particule solide couvre les particules de diamètre compris entre 5 et 850 μ m. Les dommages causés par la grêle ou les roches (supérieur à 2mm) ne sont pas pris en compte.

Il existe deux types d'usure par particule solide :

- Usure abrasive : Elle est causée par le glissement d'une particule dure sur une surface ou entre deux surfaces.
- Usure érosive : Elle est associée à l'impact d'une particule solide transportée par un fluide avec une vitesse de déplacement significative sur une autre surface métallique ou non.

Dans notre étude, nous nous consacrerons uniquement à l'usure érosive.

b) Comportement général de l'érosion solide :

L'érosion entraîne une perte de matière qui peut être exprimée en terme de changement de volume ou de perte de masse. Le plus souvent, c'est la perte de masse qui est prise en compte pour caractériser l'érosion solide. En effet, la mesure de masse est facile à effectuer et plus précise.

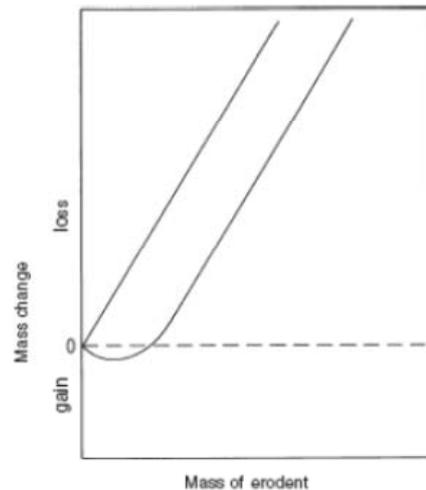


Figure 19 : Evolution de la perte de masse en fonction de la masse totale de particule impactant – *I.M.Hutchins et Al* [15]

Sur cette courbe, on constate que la perte de masse du substrat est liée au temps d'exposition. Plus le temps d'exposition est long, plus la perte de masse est importante. Parfois, il peut y avoir une période d'incubation caractérisée par un gain de masse. Cette incubation est typique des matériaux dits malléables, ductiles où les particules érodantes sont scellées sur la surface.

En plus de la perte de masse, l'impact d'une particule solide peut entraîner une augmentation de la traînée par un changement de l'état de surface (la rugosité).

c) Paramètres influençant l'érosion solide :

Le taux d'érosion dépend principalement des paramètres suivants :

- La vitesse relative des particules,
- L'angle d'impact,
- Le type de particule :
 - o Matière,
 - o Taille,
 - o Forme,

- La concentration des particules
- La nature du substrat
- La température ambiante
- La vitesse des particules:

La variable la plus importante sur le taux d'érosion est la vitesse des particules. Il existe une relation entre la perte de masse ou taux d'érosion et la vitesse des particules :

$$E = -\frac{dm}{dt} = aV^n$$

Avec :

- E : le taux d'érosion (mg/kg)
- m : la perte de masse du substrat
- a : une constante résumant tous les autres paramètres comme les propriétés de la particule
- V : la vitesse de la particule
- n : est un exposant compris entre 2 et 3 avec une valeur médiane de 2.4 pour un matériau ductile - *I.M.Hutchins et Al* [15]

La figure ci-dessous montre l'influence de la vitesse sur le taux d'érosion pour trois matériaux distincts.

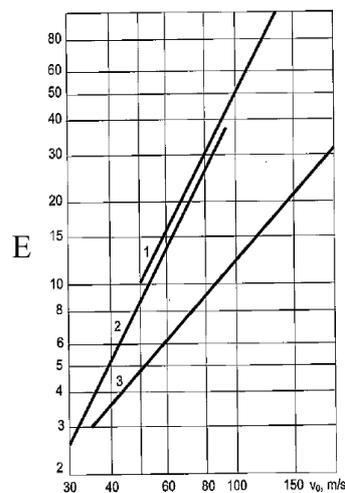


Figure 20 : Influence de la vitesse des particules sur le taux d'érosion – *I.Kleis et Al* [19]

Remarque :

Dans l'atmosphère, il n'y a pas qu'un type de grain (diamètre, forme...). Dans ce cas, le taux d'érosion se calcule de la façon suivante :

$$E = E_1 \times I_1 + E_2 \times I_2 + \dots + E_n \times I_n$$

Avec :

- $E_1 \dots E_n$: le taux d'érosion correspondant à chaque type de grains
- $I_1 \dots I_n$: Le pourcentage de chaque composant dans le milieu.

- L'influence de l'angle d'impact :

Nous avons défini précédemment l'angle d'impact d'une goutte d'eau (voir page 18). Il s'agit de la même définition dans le cas de particules solides

L'angle d'impact est un paramètre influant de l'érosion mais il dépend aussi du type de matériau ductile ou fragile (expressions voir glossaire)

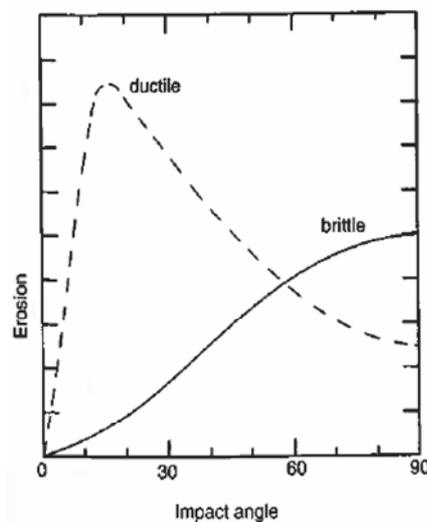


Figure 21 : Evolution de la perte de l'érosion (défini comme la perte de masse par unité de masse) en fonction de l'angle d'impact – I.M.Hutchins et Al [15]

Des exemples de valeurs de a et n suivant l'angle d'impact pour différents matériaux se trouvent en *Annexes*.

- Type de particule :
 - o Matière :

La matière de la particule est un facteur important comme illustré sur la figure 22. Celle-ci montre le taux d'érosion en fonction de la vitesse d'impact et de la matière pour un même diamètre compris entre $125\mu\text{m}$ et $150\mu\text{m}$ pour un impact normal.

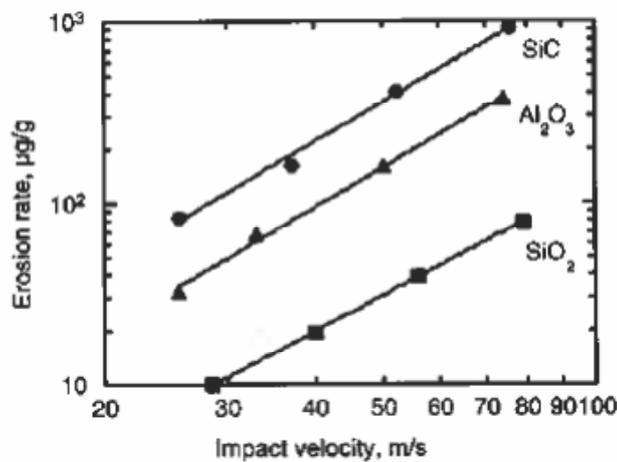


Figure 22 : influence de la matière sur le taux d'érosion – *I.M.Hutchins et Al* [15]

Dans l'atmosphère, nous trouvons essentiellement du sable ou poussière dont le constituant principal est le quartz (SiO_2) qui a une dureté Vickers $\text{HV}=131$.

Tableau 4 : Comparatif de dureté Vickers HV – valeurs tirées d'*I.Kleis et Al* [19]

Matière	Dureté Vickers HV
Aluminium : Al	24
Zinc : Zn	35
Fer: Fe	120
Titane: Ti	160
Molybdène	248

On constate à travers ce tableau que le sable est plus dur que l'aluminium ou le fer, par exemple. Ce qui peut expliquer les dégâts occasionnés sur ces substrats par l'érosion au sable.

○ La forme :

La forme des particules influence aussi le taux d'érosion du matériau. Une particule avec une dureté assez faible mais avec une forme très anguleuse et des bords affûtés peut entraîner plus d'arrachement de matière. La forme des particules n'influence pas seulement l'enlèvement de matière mais aussi le mécanisme d'érosion (voir II.1.b)).

Par exemple, la déformation plastique se produit essentiellement pour des grains « ronds » alors que la fracture ou l'abrasion se produit quant à elle pour des grains anguleux.

○ Taille : distribution des particules solides :

L'appellation particule est valable pour des diamètres compris entre 5 et 850µm mais dans cet intervalle, nous trouvons des particules de sable et de la poussière.

- Sable : entre 150µm et 850µm
- Poussière < 150µm

Tableau 5 : Distribution des particules pour les équipements militaires – W.F.Adler[17]

Taille des particules (µm)	Masse en pourcentage
850 and larger	1 +/- 0.05
590-850	1.7 +/- 0.5
420-520	14.8 +/- 1.0
297-420	37.0 +/- 1.0
210-297	28.6 +/-1.0
149-210	12.7 +/- 1.0
<149	5.2 +/- 1.0

○ La concentration des particules :

Exemple de concentration dans certaines conditions. Lorsque l'on veut simuler l'érosion au sable, c'est le cas le plus défavorable qui est pris en compte soit 2.2g/m³

Tableau 6 : Concentration des particules– MIL STD-810G [18]

Conditions	Concentration des particules
Conditions naturelles	0.177g/m ³
Mouvements de camions dans la zone	1.1g/m ³
Autour d'un hélicoptère en mouvement	2.2g/m ³

– Influence de la température :

Nous savons que les propriétés des matériaux ainsi que les performances peuvent varier en fonction de la température. En sachant cela, il est nécessaire de regarder l'impact de la température sur l'érosion.

Différentes études, dont celle de Suur [19] ont montré une relation entre le taux d'érosion et la température.

Le graphique suivant (figure 23), montre l'interaction entre le taux d'érosion et la température pour un angle d'impact de 45°, V=48m/s, grains sable entre 04-06mm et Sur différents matériaux 1-acier ST3, 2-Acier U8A, 3-acier R9, 4-fonte, 5-acier 9ChS

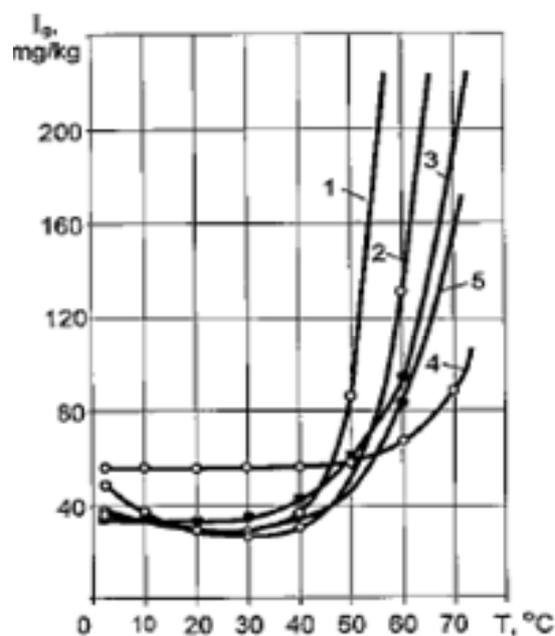


Figure 23 : Dépendance du taux d'érosion en fonction de la température – I.Kleis et Al [19]

d) Conditions particulières liées à l'avion :

W.F Adler [17] a identifié 3 scénarios différents d'érosion par particules solides que peut rencontrer un avion.

L'avion est sur la piste en attente :

- Vitesse du vent : 30m/s
- Les petites particules (poussières) se déplacent plus vite que les grosses

En phase de décollage et atterrissage :

- Vitesse des particules = vitesse du vent + vitesse de l'avion $\approx 92\text{m/s}$
- Toutes les particules ont la même vitesse

En vol :

- Vitesse des particules élevées due à la vitesse de vol $\approx 225\text{m/s}$
- Temps d'exposition long
- Seulement des petites particules $<10\mu\text{m}$

Le scénario le plus contraignant selon *W.F Adler* [17] est la phase de décollage et d'atterrissage car les grosses particules à vitesse modérée sont plus érosives que les petites particules à grande vitesse.

e) Conclusion :

Nous avons défini les phénomènes d'érosion à l'eau et au sable avec les cas les plus défavorables ainsi que les paramètres clefs et ceux sur lesquels ils influent.

Maintenant, nous pouvons essayer de modéliser ces phénomènes pour comparer différents matériaux et ainsi choisir le plus approprié lors de la phase de conception.

Pour cela, nous avons à notre disposition des moyens d'essais en laboratoire et des modèles numériques, que nous allons voir par la suite.

4) Les essais en laboratoire:

En service, un avion est soumis simultanément à l'érosion à l'eau et aux particules solides. Il est très difficile et coûteux d'effectuer des essais en vol pour caractériser la résistance à l'érosion d'un matériau ou d'un système. Une des raisons principales est de pouvoir caractériser l'environnement autour de l'avion (distribution des gouttes d'eau, concentration en eau en particules solides.....). C'est pourquoi, les essais en laboratoire sont utilisés pour estimer le comportement des matériaux.

Pour évaluer le comportement des matériaux à l'érosion, il existe des bancs d'essai qui simulent l'érosion à l'eau et au sable séparément.

Ces essais en laboratoire sont effectués pour plusieurs raisons :

- Fournir des données d'usure du matériau dans des conditions spécifiques,
- Examiner la validité des modèles théoriques,
- Etudier les mécanismes d'usure.

Néanmoins, il est très difficile de dire si le matériau répond bien ou non aux exigences d'érosion. C'est surtout un moyen de comparaison entre échantillons.

a) Essais érosions à l'eau :

Il existe différents types de bancs d'essais mais seulement deux principes :

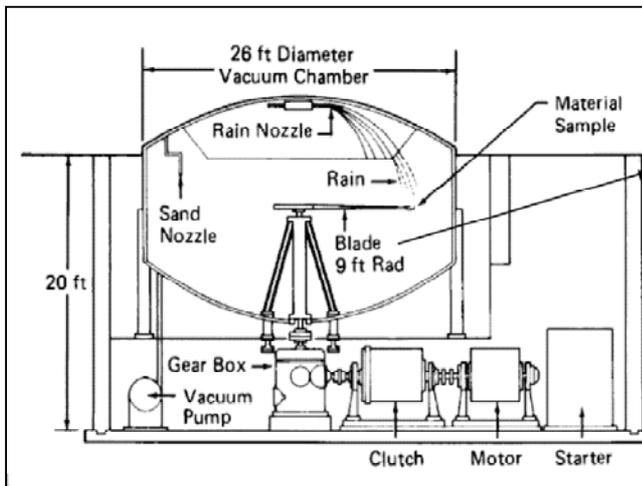
- L'échantillon fixé en bout de pale sur un axe en rotation, est accéléré à une vitesse donnée et traverse une pluie calibrée,
- Les particules sont accélérées et impactent la surface à une vitesse connue.

– Bancs avec un axe de rotation :

AIRBUS ainsi qu'EUROCOPTER utilisent ce principe pour caractériser ses matériaux à l'érosion.

La méthode d'essai est décrite dans *l'Airbus Industrie Test Method : AITM 1-0027* [20] méthode B

Schéma de principe et paramètres du banc d'essai pour la méthode B :



- vitesse de rotation : 225m/s
- angle d'impact : 90°
- intensité équivalente : 20mm/h
- débit d'eau : 4l/min à la pression de 1.8 bar
- diamètre de goutte : 1.2mm avec une distribution gaussienne

Figure 24 : Banc d'essai pour l'érosion à l'eau à Eurocopter (France – Marignane)

Il existe d'autres sites où l'on retrouve le même type de bancs d'essais comme à :

- Air Systems Sector, DERA Farnborough (UK),
- SAAB Military Aircraft (Suède),
- University of Dayton Research Institute (USA).

Remarque:

Ce moyen d'essai permet de tester, en même temps, plusieurs échantillons à des vitesses différentes suivant la position sur le bras.

- Bancs d'essai avec échantillon fixe :

Il en existe deux grandes familles :

- Par un simple impact appelé plus communément : SIJA « Single Impact Jet Apparatus »

Par exemple utilisé à l'université de Cambridge.

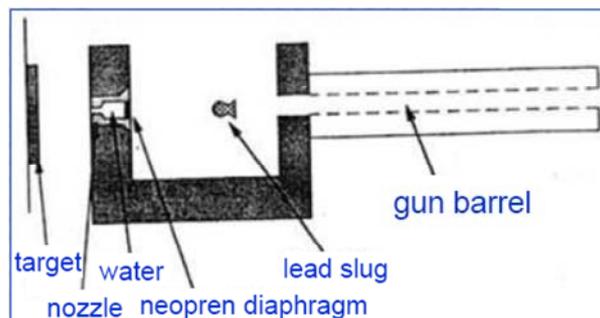


Figure 25 : Schéma de principe du banc d'essai SIJA utilisé à Cambridge –UK

- Par multi-impact ou MIJA « Multiple Impact Jet Apparatus »

Il faut savoir que les bancs du type MIJA sont une évolution des bancs SIJA et permettent une meilleure reproductibilité des vitesses d'impacts.

Exemple d'un banc de type multi jets :

Il s'agit d'un jet d'eau à grande vitesse qui est coupé par un disque percé en rotation.

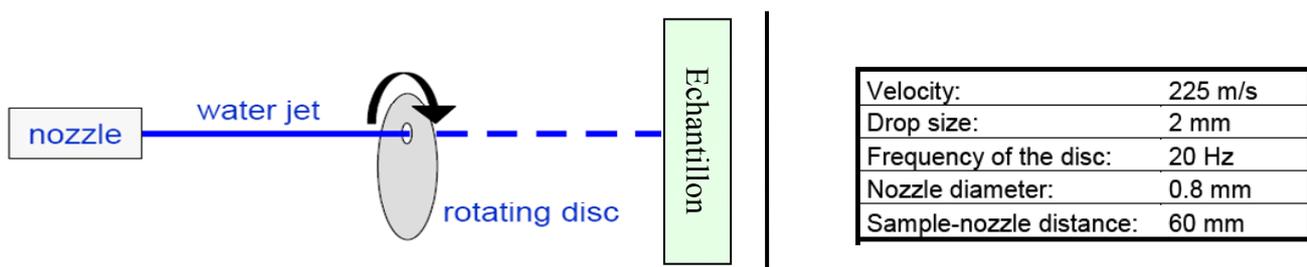


Figure 26 : Schéma de principe et paramètres du banc d'essai de type MIJA utilisé à EADS IW
OttoBrunn -Allemagne

- Reproduction des conditions réelles en laboratoire :

Si l'on veut simuler une pluie réelle selon la distribution de Marshall & Palmer (voir 2.5.1), il faut effectuer des essais successifs avec différents diamètres de gouttes.

Cela peut être vite fastidieux.

Deom *et al.* [1] ont montré qu'il y a une relation entre le diamètre des gouttes et la vitesse pour une même dégradation :

$$\frac{V_{d_2}}{V_{d_1}} = \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

et une relation qui lie pour un diamètre donné le nombre d'impact nécessaire pour obtenir la même dégradation à une vitesse donnée, soit :

$$N_{V_2} = N_{V_1} \times \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^n$$

Avec n qui peut varier entre 3 et 15 selon la nature du matériau.

On peut donc compléter le *tableau 2* en ajoutant une colonne donnant la vitesse équivalente pour un diamètre de 2mm par exemple et une seconde avec le nombre de gouttes de 2 mm équivalent pour une même dégradation.

Tableau 7 : comparaison de la distribution des gouttes pour une pluie naturelle à une intensité de $I=100\text{mm/hr}$, $V=300\text{m/s}$, $t=10\text{s}$ avec l'estimation de l'érosion équivalent

d_{\min}	d_{\max}	Number of droplets / m^3	Volume filled by the drops (mm^3 per m^3)	actual Number of drops	equivalent 2 mm droplet velocity (m/s)	Number of 2 mm droplets
0,00	0,25	2000	2	471	1	0
0,25	0,50	1355	37	319	150	2
0,50	0,75	917	117	216	189	9
0,75	1,00	621	218	146	216	15
1,00	1,25	421	314	99	238	20
1,25	1,50	285	388	67	256	22
1,50	1,75	193	433	45	273	23
1,75	2,00	131	451	31	287	23
2,00	2,25	89	445	21	300	21
2,25	2,50	60	420	14	312	19
2,50	2,75	41	384	9,6	323	16
2,75	3,00	28	342	6,5	334	14
3,00	3,25	19	297	4,4	343	11
3,25	3,50	13	254	3,0	353	9
3,50	3,75	9	213	2,0	362	7
3,75	4,00	6	176	1,4	370	6
4,00	4,25	4	144	0,9	378	5
4,25	4,50	3	116	0,6	386	4
4,50	4,75	2	93	0,4	393	3
4,75	5,00	1	74	0,3	400	2
5,00	5,25	1	58	0,2	407	2
5,25	5,50	1	45	0,1	414	1
5,50	5,75	0	35	0,1	420	1
5,75	6,00	0	27	0,1	427	1
6,00	6,25	0	21	0,0	433	1
6,25	6,50	0	16	0,0	439	0
6,50	6,75	0	12	0,0	444	0
Total			5122	1459		235

D'après ce tableau :

- 235 impacts de gouttes de diamètre 2mm à une vitesse $V=300\text{m/s}$ entraînent la même dégradation que 1459 impacts de gouttes selon la loi de distribution de Marshall & Palmer.
- De même, 319 impacts de gouttes de 0.5mm à 300m/s sont équivalents à 319 impacts de gouttes de 2mm à 150m/s.

- Conclusion :

Nous venons de voir que les essais en laboratoire peuvent simuler de l'érosion à l'eau à l'aide de formules empiriques tout en gardant un seul diamètre ainsi qu'une seule vitesse d'impact. L'estimation de l'érosion équivalente permet, aussi, de gagner du temps pour évaluer ou comparer un produit avec un autre ou une référence.

Ces moyens d'essai peuvent donc être utilisés comme des enceintes de vieillissements accélérés à l'érosion.

b) Essais érosions au sable :

Tout comme pour les bancs d'essai à l'eau, il existe 2 principes pour simuler l'érosion par particules solides.

- Déplacement des particules :
 - o A travers un conduit : « gas-blast method »
 - o Par effet centrifuge : « centrifugal accelerator »
 - o Dans une soufflerie
- L'échantillon est fixé en bout de pale d'un axe en rotation et traverse un nuage de particule

- Schémas de principes :

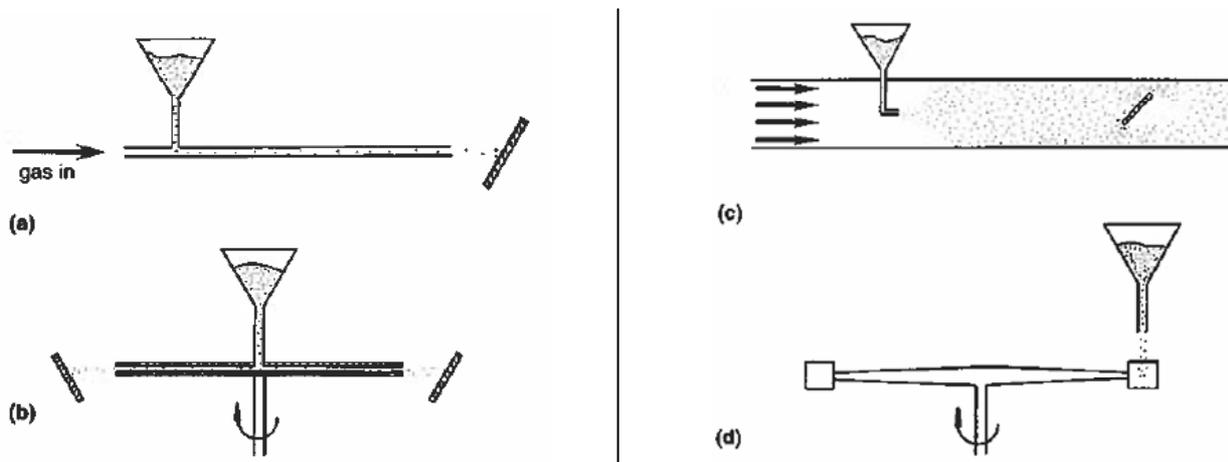


Figure 27 : Schéma regroupant les 4 méthodes par déplacement de particules, (a) gas-blast, (b) accélération centrifuge, (c) soufflerie, (d) rotation autour d'un axe - I.M.Hutchins et Al [15]

La plupart des bancs d'essais d'érosion au sable sont de type (a). C'est pourquoi dans la suite du document, nous nous consacrerons uniquement à ce principe.

– Les paramètres :

Nous avons vu (au 1.3.c) qu'il faut maîtriser :

- Les grains (taille, forme)
- La vitesse
- L'angle d'impact

○ Les grains :

Selon les exigences de [12], les matériaux choisis comme érodant sont des grains de silice (SiO_2) de diamètre compris entre 150 et 850 μm .

Les études de *O.Rohr et Al* [16] ainsi que *I.Kleis et Al* [19] ont rapporté que le taux d'usure augmentait en fonction du diamètre des grains jusqu'à une taille critique.

Cette valeur dépend des conditions d'essais et est souvent observée entre 100 μm et 200 μm . Au-dessus de cette valeur, le taux d'usure n'augmente que très faiblement par rapport au diamètre des particules.

Il existe des fiches produits pour sélectionner les grains selon notre besoin et nos exigences (*Exemple en Annexes*)

○ La vitesse :

Les particules de silice sont introduites dans le flux et accélérées le long du tube avant impact sur la surface de l'échantillon.

La vitesse des particules en sortie dépend de :

- la géométrie du tube (longueur, rugosité...),
- la différence de pression (entrée/sortie),
- la densité des particules et de la taille.

La géométrie du tube :

	Tube long: T_l	Tube court: T_c
Avantages	- $V_{\text{particules}} \approx V_{\text{écoulement}}$ - L'effet de la taille et de la densité des particules sont négligeables	- pour une même pression P : $V_{T_c} > V_{T_l}$
Inconvénients	- la rugosité affecte la vitesse des particules	- $V_{\text{particules}} < V_{\text{écoulement}}$

- La différence de pression :

Des investigations ont été réalisées par *I.M.Hutchins et Al* [15] sur l'influence de la pression, taille et densité des particules sur la vitesse de sortie. Il en résulte une équation empirique valable pour un tube cylindrique de diamètre 5mm et une longueur de 308mm.

$$V^2 = \frac{k \times p}{d^{0.57} \times \rho^{1.08}}$$

Avec :

- V= vitesse de la particule (m/s)
- p= différence de pression (entrée /sortie) (Kpa)
- d= diamètre de la particule (μm)
- ρ = densité de la particule (g/cm^3)
- k= 7900

- Angle d'impact :

Nous avons vu (au chapitre II.3.c)) qu'il est important de faire varier l'angle entre 20° et 90° afin de prendre en considération les cas les plus défavorables pour les différents types de matériaux. Le moyen le plus utilisé et le moins coûteux, pour faire varier l'angle, est de monter l'échantillon sur un support qui peut pivoter. (*Exemple d'un banc d'essai voir en annexe*)

c) Conclusion sur la partie essais en laboratoire

Il existe donc des moyens d'essais capables de reproduire les phénomènes d'érosion que l'on retrouve en vol.

Par des lois empiriques, il est possible d'estimer les taux d'usure des matériaux avec des paramètres différents, qui divergent de ceux trouvés dans l'atmosphère.

Il est donc facile de réaliser des essais d'érosion à l'eau comme au sable si le but est de comparer les différents matériaux entre eux. Il est par contre beaucoup plus difficile d'effectuer un vieillissement accéléré et d'estimer le temps correspondant en service, et, donc de donner selon les exigences une durée de vie du produit.

5) Simulation numérique

a) Introduction :

Nous venons de voir que les données érosion, obtenues suite à des essais en laboratoire, sont difficilement exploitables pour estimer la durée de vie d'une pièce. En complément de ces essais, nous pouvons utiliser des modèles de calcul qui vont simuler l'érosion.

b) Prédiction de l'impact d'une particule :

Afin de développer une modélisation numérique viable, *W.F.Adler* [17] propose une approche par prédiction avec un modèle dit « semi-empirique » qui est basé d'une part sur la caractérisation du substrat impacté à l'aide d'essais réalisés en laboratoire et d'autre part sur la modélisation de l'impact des particules.

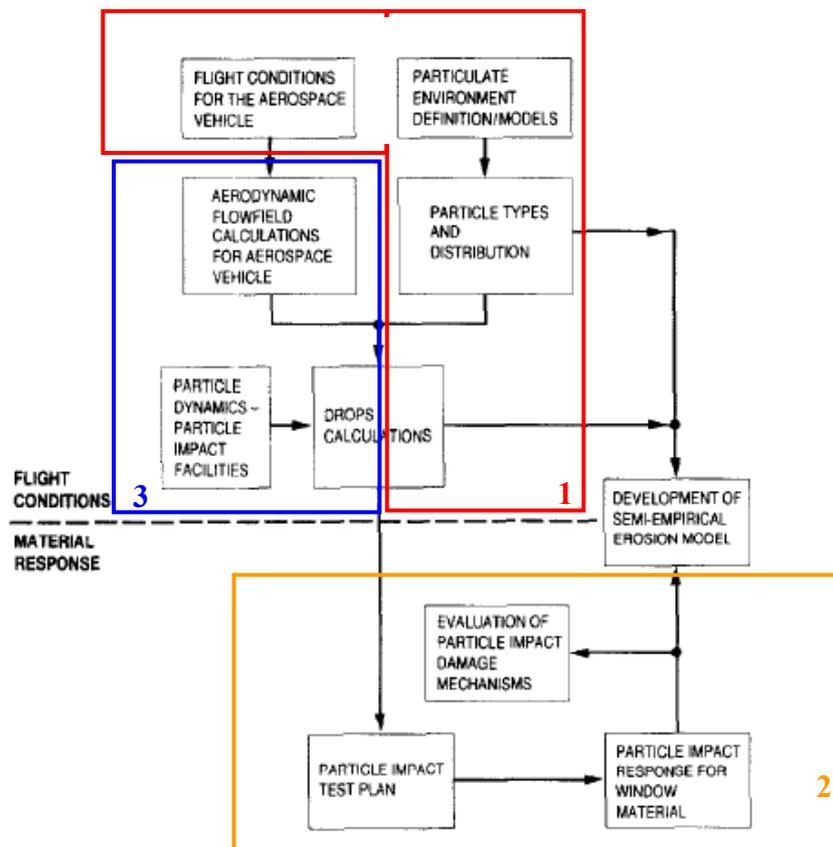


Figure 28 : Structure générale pour prédire les dégâts dus à l'impact d'une particule basé sur les essais en laboratoire - *W.F.Adler* [17].

L'hypothèse principale est le fait que le problème d'érosion par l'impact de particules puisse être divisé en trois modules indépendants (*voir figure 28*):

- Définition et caractérisation des particules et de l'environnement (bloc 1),
- Calcul du champ aérodynamique et des trajectoires des particules (bloc 3),
- Evaluation de la réponse du matériau (bloc 2).

Selon *W.F.Adler* [17], chaque module peut être modifié sans affecter les deux autres.

Cette approche permet de simplifier la modélisation des dommages causés par l'impact de particules.

- Le bloc 1 :

Les données nécessaires pour remplir ce module se trouvent dans les parties **2** et **3** de ce rapport, suivant le type de particule que l'on souhaite prendre pour simuler l'impact.

- Le bloc 3 :

Il s'agit du module sur le champ aérodynamique, données d'entrées pour simuler la trajectoire des particules et l'impact sur la surface. A ce sujet, il existe différents outils numériques dans l'étude de l'érosion, comme évoqué par *W.F.Adler* [9] ou pour des applications tel que le givrage comme expliqué dans le rapport de *F.Dezitter* [2].

- Le bloc 2 :

Les données nécessaires pour ce module sont dépendantes des essais réalisés en laboratoires ou des abaques qui peuvent exister suite des essais comme expliqué précédemment.

c) Conclusion :

Il existe donc des moyens numériques pour caractériser l'érosion. Maintenant, il faut voir si ces modèles utilisés dans le cadre de la recherche sont applicables au monde industriel et à ses exigences.

6) Conclusion :

A travers cette étude bibliographique et les différents rapports auxquels elle se rapporte, nous avons défini l'**érosion** et ses mécanismes que se soit pour une particule liquide (eau) ou solide (sable).

Nous avons ensuite caractérisé les différents paramètres entrant en jeu dans l'interaction particule / paroi et les différentes valeurs à prendre en compte pour les cas les plus défavorables que se soit pour la particule (diamètre, concentration...) ou pour la paroi avec le calcul du taux d'érosion ou perte de masse.

Après cette phase de caractérisation, nous nous sommes concentrés sur la simulation de ce phénomène et les différents moyens mis en œuvre.

Aujourd'hui, nous avons pu répondre à certaines questions concernant ce phénomène environnemental qu'est l'érosion mais, il reste en suspens la partie simulation numérique et modèles de calcul.

C'est sur ce module nécessaire dans la prédiction d'érosion que l'étude va se poursuivre afin de répondre à différentes questions telles que :

- A partir de l'existant, peut-on mieux comprendre les phénomènes physiques mis en jeu ?
- Ces modèles utilisés dans le cadre de la recherche sont-ils représentatif du besoin industriel, et, peuvent-ils prendre en compte les exigences nécessaires à la conception de pièces ?

II) Méthodes et outils :

1) Généralité :

Lors de l'étude bibliographique (*voir chapitre 1*), l'érosion a été définie comme étant un phénomène d'usure, par impacts de particules solide ou liquide, qui provoque une perte progressive de matière du matériau.

Après avoir caractérisé les différents paramètres entrant en jeu dans l'interaction particule/paroi et les différentes grandeurs à prendre en compte pour la particule (diamètre, concentration, vitesse...) ou pour la surface (type de matériau, angle d'impact...), les efforts se sont focalisés sur les moyens à mettre en œuvre pour modéliser l'érosion tant sur le plan expérimental que numérique.

L'architecture, qui va servir de référence pour prédire les dégâts dus à l'impact d'une particule durant la poursuite du stage, est celle proposée par *W.F Adler[17]* (*voir figure 28*) avec les 3 modules indépendants qui vont être présentés plus précisément.

a) Définition et caractérisation des particules

L'érosion et ses mécanismes ont été définis que se soit pour une particule liquide (eau) ou solide (sable) avec :

- La particule d'eau

Etant donnée la complexité des phénomènes entrant en jeu lors de l'impact d'une goutte d'eau sur une surface, les hypothèses suivantes sont retenues:

- La goutte d'eau est parfaitement sphérique,
- Les phénomènes de distorsion, break-up sont négligés,
- Seul l'impact sera pris en compte (pas d'effet de rebond, éclaboussure ou déposition),
- Vitesse en croisière soit Mach 0.72,
- Distribution monodispersé avec $\Phi = 2\text{mm}$.

- La particule solide

W.F Adler [17] a identifié 3 scénarios différents d'érosion par particules solides que peut rencontrer un avion. Il a été décidé de prendre le cas du décollage, cas le plus défavorable pour la simulation, avec :

- Vitesse décollage soit Mach 0.25,
- La particule de sable est parfaitement sphérique,
- Distribution monodispersé avec $\Phi = 220\mu\text{m}$.

b) Evaluation de la réponse du matériau

Dans l'étude bibliographique, nous avons vu que les données nécessaires, pour évaluer la réponse du matériau, étaient basées sur des essais réalisés en laboratoires ou des abaques disponible dans la littérature.

Cette partie sera développée, plus en détail, dans le paragraphe 4 de ce chapitre sur le modèle d'érosion.

Rappel de l'étude bibliographique : l'érosion est définie comme une perte progressive de matière du matériau. Cette dégradation peut s'exprimer par une perte de masse ou de volume dans le temps (*voir figure 29*).

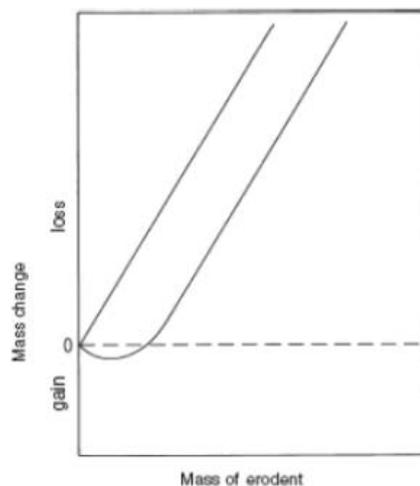


Figure 29 : Evolution de la perte de masse en fonction de la masse totale de particule impactant – I.M.Hutchins et Al [15]

Cette perte qui est appelée aussi taux d'érosion peut s'exprimer par l'équation suivante selon *I.M.Hutchins et Al* [15]:

$$E = -\frac{dm}{dt} = aV^m$$

Avec :

- E : le taux d'érosion (mg/kg ou mm³/kg)
- dm : la perte de masse du substrat
- a : une constante résumant tous les autres paramètres comme les propriétés de la particule
- V : la vitesse de la particule (m/s)
- m : est un exposant compris entre 2 et 3 suivant le matériau
- t : le temps (s)

A partir de cette relation et des différents essais en laboratoire disponible dans la littérature (voir paragraphe II-4), il sera possible d'estimer le comportement du matériau soumis à l'érosion suivant la vitesse, l'angle d'impact, le type de particule...

c) Calcul du champ aérodynamique et des trajectoires de gouttes

A ce sujet, il existe différents outils numériques pour l'étude de l'érosion, comme évoqué par *W.F.Adler* [9] ou pour des applications tel que le givrage, qui disposent des fonctionnalités que l'on recherche, comme expliqué dans le rapport de *F.Dezitter* [2]. Le choix s'est porté sur le code d'accrétion ONICE2D développé par l'ONERA.

ONICE2D est une chaîne de calcul bidimensionnel 2D développée par l'ONERA afin de modéliser l'accrétion de la glace. Il est utilisé comme outil officiel par AIRBUS pour la prédiction des formes de givre que se soit pour les programmes en développement ou pour la certification depuis l'A380.

La figure 30 représente cette chaîne avec les calculs successifs :

- Du champ aérodynamique autour du profil,
- Des trajectoires de goutte d'eau permettant de caractériser la goutte d'eau captée sur le profil (coefficient de captation β),
- De la couche limite pour évaluer le transfert de chaleur convectif,
- D'un bilan thermodynamique à la paroi et calcul de la forme de givre.

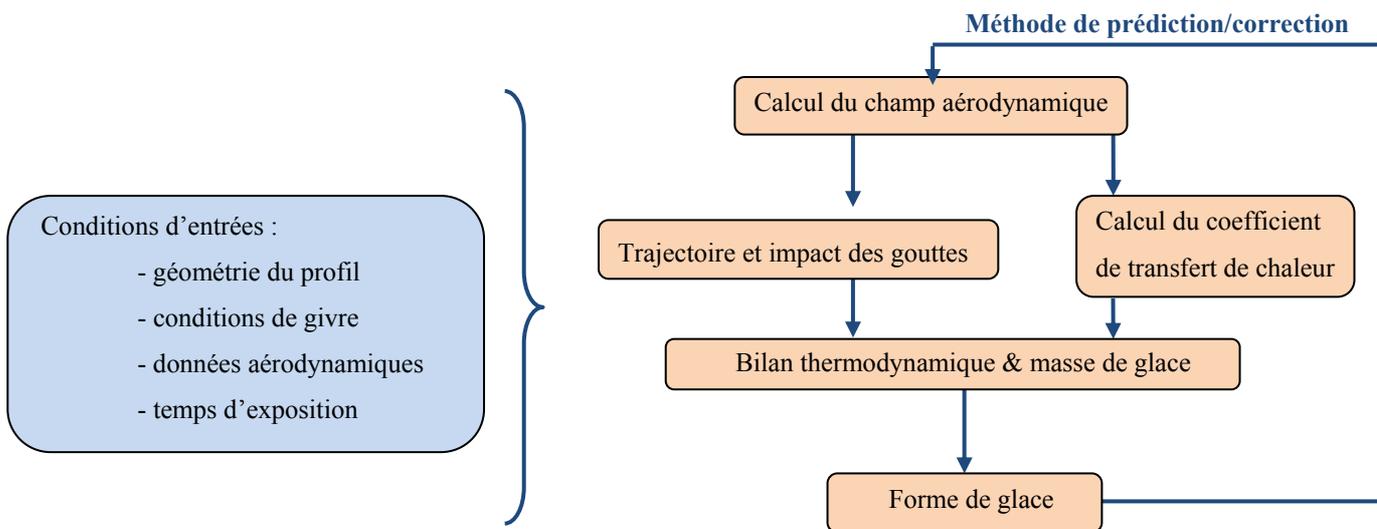


Figure 30 : Synthèse de la chaîne de calcul ONICE2D avec la méthode de prédiction/correction

Remarque :

La forme de givre obtenue après chaque itération entraîne une modification de l'écoulement externe. Ainsi, à chaque nouvelle itération, le calcul de l'écoulement aérodynamique autour du corps considéré est nécessaire.

La méthode prédicteur/correcteur développée par l'ONERA permet d'éviter de recalculer trop souvent l'écoulement aérodynamique. Il s'agit de calculer les paramètres tel que le coefficient de pression C_p ou le coefficient de captation d'abord sur le corps lisse (β_{lisse}) puis sur le corps givré ($\beta_{\text{givré}}$). On effectue alors un nouveau calcul en faisant varier linéairement le coefficient de captation β entre les deux valeurs β_{lisse} et $\beta_{\text{givré}}$ en fonction du temps (sur la durée de givrage).

– Conclusion :

Ce code de calcul ONICE2D a été développé pour prévoir les formes de givre. Il regroupe toutes les fonctionnalités recherchées pour l'étude sur l'érosion avec les modules sur:

- Du champ aérodynamique
- Des trajectoires de goutte et des coefficients de captation

Ce sont ces 2 modules que seront présentés par la suite. Les autres modules ainsi que les données d'entrées associées sont présentées *succinctement* en annexes.

2) Le module du Champ aérodynamique :

Ce module va me permettre de :

- Générer le maillage topologie en « C » (*voir figure 31*)
- Calculer le champ aérodynamique par la résolution des équations de potentiel complet.

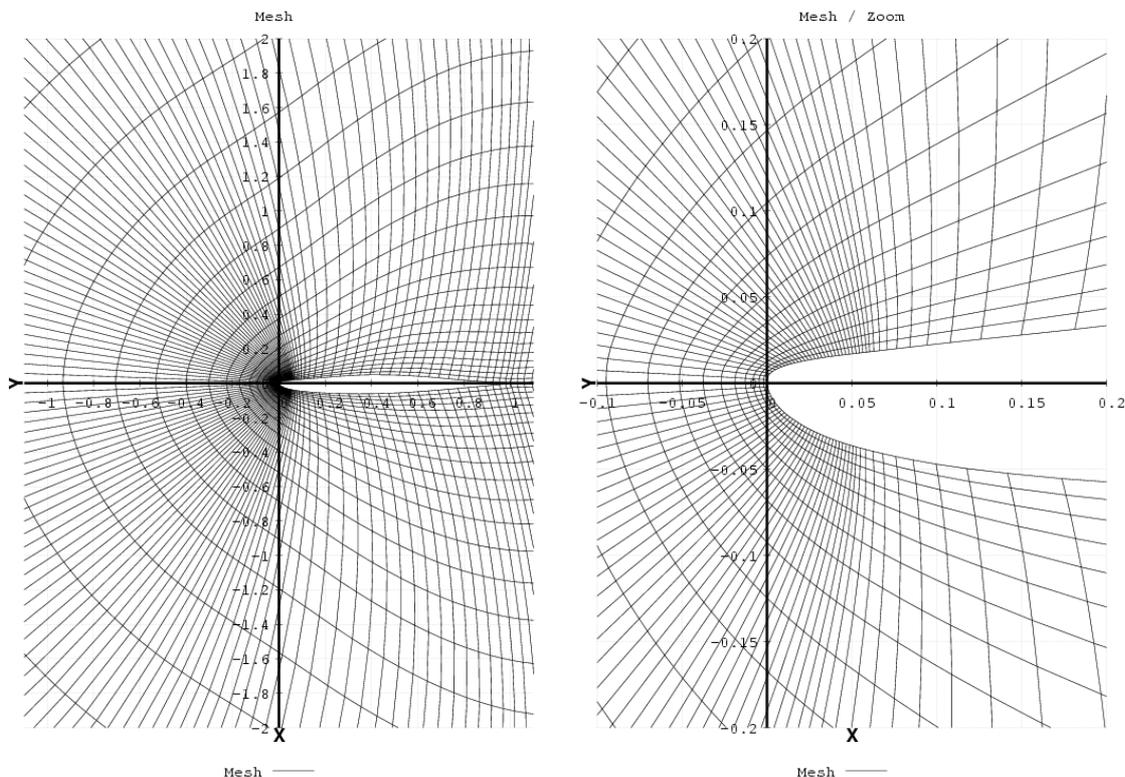


Figure 31 : Maillage topologie en « C » autour d'un profil HTP A320

Remarque :

L'équation du potentiel complet est résolue par une méthode d'élément fini conservative. Le code prend en compte les effets de compressibilité mais pas les effets de viscosité. De plus, il ne peut pas déterminer et calculer un décollement de la couche limite.

3) Le module trajectoire des gouttes et coefficient de captation :

Pour estimer la quantité d'eau captée par le profil, le coefficient de captation doit être calculé. Pour avoir accès à ce calcul, il est nécessaire au préalable de calculer les trajectoires des particules d'eau. Pour cela, ONICE2D utilise une approche Lagrangienne.

a) Bilan des forces appliquées :

Les gouttes d'eau suivent des trajectoires qui ne coïncident pas avec les lignes de courant de l'écoulement. Elles sont moins déviées que l'air et heurtent de ce fait l'avion. Les positions extrêmes des derniers impacts définissent les points limites de captation.

Les forces qui déterminent la trajectoire d'une goutte sont les suivantes :

- Force de traînée

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot S \cdot V_r^2 \cdot C_d$$

$$S = \frac{\pi \cdot d_g^2}{4}$$

S : surface du maître couple de la goutte

C_d : coefficient de traînée

d_g : diamètre de la goutte

V_r : vitesse relative de la goutte par rapport à l'air

- Force de pesanteur

$$F_g = \rho_g \cdot \frac{\pi \cdot d_g^3}{6} \cdot g$$

ρ_g : masse volumique de la goutte

g : accélération de la pesanteur

- Poussée d'Archimède

$$F = \frac{\pi \cdot d_g^3}{6} \rho_g \cdot g$$

Remarque :

On ne considère en général que la traînée. Les autres forces étant négligeables (rapport 1000) par rapport à cette dernière.

Cependant dans le cas de particules avec $\Phi > 50 \mu\text{m}$ (que l'on retrouve dans le cas de l'érosion), les forces de gravité et d'Archimède doivent être prises en compte.

Si l'on considère le cas le plus simple, avec $\Phi < 50 \mu\text{m}$, alors l'équation de la quantité de mouvement peut s'écrire :

$$F_d = M_g \cdot \gamma \rightarrow$$

M_g : Masse de la goutte

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot S \cdot V_r^2 \cdot C_d$$

$$\Rightarrow \gamma = \frac{\frac{3}{4} \cdot \rho_{air} \cdot C_d \cdot V_r^2}{\rho_g \cdot d_g}$$

Le coefficient de traînée est fonction du nombre de Reynolds Re_g relatif à la dimension caractéristique de la goutte :

$$Re_g = \frac{d_g \cdot \rho_{air} \cdot V_r}{\mu_{air}}$$

b) Calcul des trajectoires de gouttes :

– Hypothèses :

- Les gouttes sont sphériques et de diamètre identique et constant.
- Le nombre de gouttes par unité de volume est suffisamment faible pour que l'écoulement et les caractéristiques de l'air soient identiques à ce qu'ils seraient en l'absence de gouttes.
- La traînée aérodynamique est souvent la seule force prise en compte.

– Approche Lagrangienne

Les équations régissant les forces appliquées à la goutte sont résolues dans le repère local lié à celle-ci.

En **2D**, on obtient la figure 32 suivante:

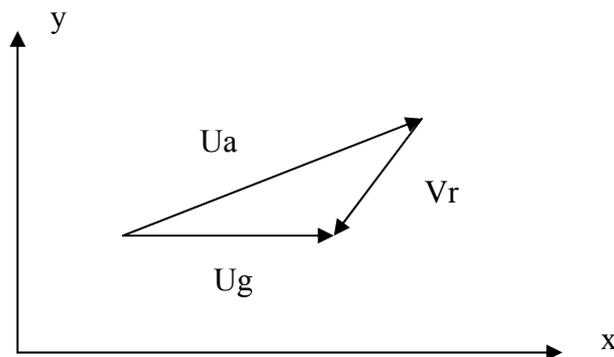


Figure 32 : Vitesse relative de la particule par rapport à l'écoulement

$$V_r = \sqrt{(U_{ax} - U_{gx})^2 + (U_{ay} - U_{gy})^2}$$

Avec :

U_{ax} et U_{ay} les vitesses de l'air suivant x et y

U_{gx} et U_{gy} les vitesses de la goutte suivant x et y

– Calcul des trajectoires

La méthode de calcul est une méthode pas à pas.

Connaissant la vitesse et la position de la goutte à l'instant t , on en déduit la force de traînée et donc la vitesse et la position de la goutte à l'instant $t+\Delta t$ par intégration de l'accélération γ .

c) Le coefficient de captation

– Définition :

Le coefficient local de captation β est le rapport de la densité de flux massique d'eau impactant localement (\dot{m}_i) et la densité de flux massique (\dot{m}_∞) à l'infini amont dans un plan perpendiculaire à la direction de déplacement du profil.

On a : $\dot{m}_i = \beta \dot{m}_\infty$

Avec: $\dot{m}_\infty = U_\infty \times LWC$

- LWC Liquid Water Content ($kg.m^{-3}$)

- U_∞ : Vitesse infini amont ($m.s^{-1}$)

– Calcul :

En écrivant la conservation de la masse pour des gouttes comprises entre 2 trajectoires infiniment proches, il vient : $\dot{m}_i \cdot ds = \dot{m}_\infty \cdot dy_0$

C'est à dire, $\beta = dy_0/ds$.

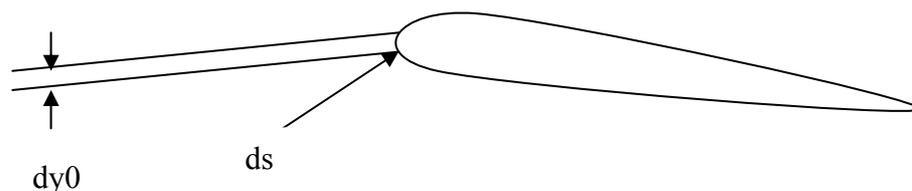


Figure 33 : Schéma du coefficient de captation β

d) Modification ONICE2D pour l'érosion :

Les sorties du code ONICE2D ont été modifiées pour afficher les variables U_n , U_t , U et l'angle d'impact θ , voir figure 34. Le calcul de ces paramètres nécessaires pour le modèle érosion se trouve en Annexe 3.

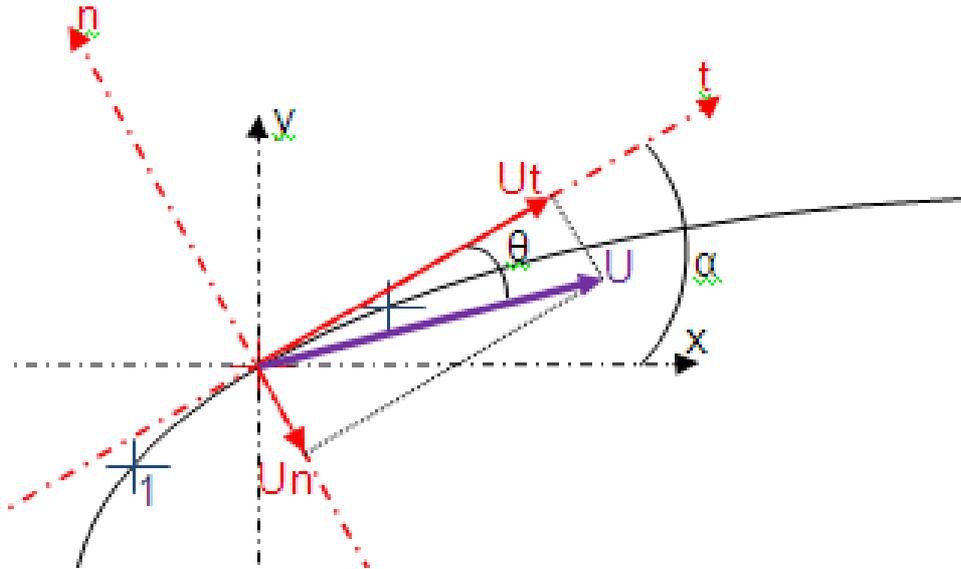


Figure 34 : Représentation des vitesses U_n , U_t et θ

e) Conclusion

Après avoir présenté, suivant la structure générale (voir figure 28) les différentes étapes de la méthodologie proposée par W.F Adler [17], je me suis concentré sur le code ONICE2D et plus particulièrement sur les modules, nécessaires pour simuler l'impact des particules, calculant :

- Le champ aérodynamique,
- Les trajectoires des particules et les coefficients de captation.

A partir des résultats issus de la littérature et présenté dans l'étude bibliographique, un modèle empirique va être établi pour essayer d'estimer le comportement du matériau à ces impacts.

4) Le modèle d'érosion :

Dans l'étude bibliographique, l'érosion a été définie comme une perte progressive de matière du matériau qui peut s'exprimer par une perte de masse ou une perte de volume dans le temps.

Ce phénomène est aussi présenté comme étant complexe, impliquant un grand nombre de paramètres (type de particule, angle d'impact, vitesse, matériau...).

Pourtant selon *I.Kleis et Al [19]*, il est possible de simuler l'érosion au sable par mise en équation des phénomènes physiques. L'approche de Beckmann & Gotzmann associant la perte de volume aux forces de cisaillement semble la plus prometteuse.

a) Approche selon Beckmann and Gotzmann:

– Le taux d'érosion selon Beckmann & Gotzmann:

Selon Beckmann & Gotzmann, dans le phénomène d'érosion le volume de matière enlevé est proportionnel au travail des forces de cisaillement en surface.

Cette théorie suppose que :

- Les particules sont parfaitement sphérique, homogènes, déformable élastiquement et sont irrotationnelle.
- La vitesse des particules immédiatement avant impact V_0 est constante quelque soit l'angle d'impact α
- La dureté H_2 de la particule $> 1.6 H_1$ dureté du substrat

Le taux d'usure s'exprime par:

$$Iv = \frac{3}{4 \times \pi \times \rho_2} \times \frac{\tau_0}{e_s} \times (J_I + J_{II})$$

Où :

$$J_I = \left(\frac{5}{3} + \pi\right) \cdot \sqrt{2} \cdot \left(\frac{h_p}{R}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{2 \times \rho_s}{3 \times H_1}\right) \cdot V_0^2 \cdot \cos^2 \alpha$$

$$J_2 = 0.85 \left(\frac{h_p}{R}\right)^2$$

$$\tau_0 = \frac{1}{3} \times L \times \rho_1 \times \ln \left(\frac{T_m}{T}\right)$$

Avec :

- J1 : usure causée par la composante tangentielle de la vitesse
- J2 : usure causée par la composante normale
- δ_0/e_s : ratio sans dimension avec δ_0 : effort de cisaillement et e_s : densité spécifique d'énergie de cisaillement.
- L : chaleur latente de fusion de la matière
- T_m : température de fusion de la matière en K
- T : température ambiante en K
- H_1 : dureté du matériau (h_2 dureté de la particule)
- R : rayon de la particule
- ρ_1 : densité du matériau
- ρ_2 : densité de la particule

h_p : profondeur de la marque produite par la particule érodante

$$h_p = R \times \sqrt{\left[v_0^2 \sin^2 \alpha - \frac{4E'}{5\pi\rho_2} \cdot \left(\frac{H_1}{E'}\right)^5 \right] \frac{2\rho_2}{3H_1}}$$

Dans cette équation, on retrouve :

E' : module réduit d'élasticité

$$E' = \left[\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right]^{-1}$$

Avec :

- E_1 : module d'Young du matériau
- E_2 : module d'Young de l'érodant
- μ_1 : coefficient de Poisson du matériau
- μ_2 : coefficient de Poisson de l'érodant

- Les coefficients de corrections

Selon *I.Kleis et Al [19]*, la théorie de Beckmann et Gatzmann s'avère la plus prometteuse mais des corrections sont tout de même nécessaires pour caractériser le comportement des différents matériaux à l'érosion et se rapprocher des résultats expérimentaux.

Voici certain de ces coefficients :

k : coefficient correctif :

$$k = k_R \times k_\varphi$$

Avec

- k_R : prend en compte la forme de l'érodant et la différence par rapport à une sphère Exemple : sable : 1.3 -1.6

k_φ : prend en considération la quantité de matière impactant (g/cm^2)

$$k_\varphi = 2 \cdot \varphi^{-3}$$

Dans notre cas d'étude, les quantités de matière $\varphi < 10\text{g}/\text{cm}^2 \rightarrow k_\varphi = 1$

k_d : coefficient correctif pour prendre en compte le diamètre de l'érodant

$$k_d = \frac{d}{120} \quad \text{si } 0 < d < 120\mu\text{m}$$

Avec :

$$k_d = 1 \quad \text{si } d > 120\mu\text{m}$$

k_h : coefficient pour prendre en compte le rapport de dureté

$$k_h = \frac{(H_2 - H_1)}{0.6 H_1} \quad \text{si } H_1 < H_2 < 1.6 H_1$$

$$k_h = 1 \quad \text{si } H_2 > 1.6 H_1$$

– Conclusion :

Selon *I.Kleis et Al [19]*, l'approche de Beckmann & Gotzmann associant la perte de volume aux forces de cisaillement semble la plus prometteuse.

Cependant, elle s'avère complexe à mettre en œuvre et requiert la connaissance d'un grand nombre de paramètres pas forcément disponible dans la littérature pour les matériaux Airbus.

C'est pourquoi l'approche simplifiée $E=Iv=a.U^m$ sera préférée dans la suite de l'étude.

b) Approche $Iv=a.U^m$:

On a vu que l'équation $E=Iv=a.U^m$ est tirée d'essais en laboratoire avec des valeurs empiriques pour les coefficients **a** et **m** qui dépendent de :

- la nature de la particule (sable, eau...), sa forme, sa dureté...
- la vitesse d'impact (plus exactement un intervalle de vitesse)
- l'angle d'impact
- la matière impactée

Exemple d'abaque pour les valeurs de a et m :

Le tableau ci-dessous donne les valeurs pour a et m suivant l'angle d'impact pour une vitesse comprise entre 30-80m/s et des grains de sable compris entre 0.5-0.8mm.

Tableau 8 : Valeurs du coefficient a et exposant m suivant l'angle d'impact pour différents matériaux – I.Kleis et Al [5]

Metal	$\alpha = 20^\circ$		$\alpha = 45^\circ$		$\alpha = 90^\circ$	
	a	m	a	m	a	m
Lead	4.8×10^{-3}	2.7	5.5×10^{-3}	2.5	2.5×10^{-2}	2.0
Tin	1.3×10^{-3}	2.7	4.8×10^{-4}	3.1	6.4×10^{-6}	4.0
Zinc	2.4×10^{-4}	2.8	1.6×10^{-5}	3.5	2.2×10^{-5}	3.2
Aluminium	1.7×10^{-4}	3.1	4.1×10^{-4}	2.8		
Cadmium	1.5×10^{-3}	2.6	2.1×10^{-4}	3.1	1.2×10^{-4}	3.0
Copper	2.2×10^{-4}	2.8	1.9×10^{-4}	2.8	6.6×10^{-5}	2.9
Nickel	1.6×10^{-4}	2.7	3.5×10^{-4}	2.6	1.3×10^{-4}	2.7
Pure iron	2.3×10^{-5}	3.2	4.1×10^{-4}	2.6	4.4×10^{-5}	3.0
Cobalt	2.8×10^{-5}	2.9	7.6×10^{-5}	2.9	8.1×10^{-4}	2.4
Titan	4.1×10^{-5}	2.9	1.5×10^{-5}	3.4	7.0×10^{-5}	3.0
Molybdenum	8.4×10^{-5}	2.5	7.4×10^{-5}	2.9	4.3×10^{-5}	2.9
Niobium	5.5×10^{-5}	2.7	9.1×10^{-5}	2.8	2.0×10^{-4}	2.5
Tungsten	5.5×10^{-6}	3.1	1.3×10^{-5}	3.1	3.2×10^{-6}	3.4

Dans la littérature, nous trouvons ce type d'abaque pour différents substrats avec la plupart du temps les même angles d'impact (20°; 45°; 90°) suivant un intervalle de vitesse et une référence de particule érodente.

En prenant en compte ce tableau et les différents paramètres figés, on obtient les relations:

- $a=f(\theta)$
- $m=f(\theta)$

Des essais de corrélations permettant de mettre « directement » en relation a et m en fonction de θ et ainsi balayer tout le domaine angulaire ont été expérimentés.

Pour cela, le cas du Titane avec les valeurs tirées du tableau précédent a été retenu:

	20°	45°	90°
a	4.1×10^{-5}	1.5×10^{-5}	7.0×10^{-5}
m	2.9	3.4	3.0

Remarque :

Il existe une infinité d'alliage de titane. Pour mettre en équation a et m , le type de matériau n'est pas important mais la procédure oui. Par contre, il ne faut pas perdre de vue que chaque titane a ses caractéristiques propres et que celui utilisé ici est différent de celui appliqué sur les bords d'attaques d'un avion.

- Mise en équation de $a=f(\theta)$ et $m=f(\theta)$:

Pour mettre en équation ces deux relations, différentes courbes de tendance vont être comparées. N'ayant que 3 points, il sera difficile d'avoir des interpolations fines. Par la suite, si le modèle semble prometteur, il faudra lancer des essais en laboratoire afin d'affiner les résultats.

Comparatif pour $a=f(\theta)$ et $m=f(\theta)$:

Sur les figures 35 et 36 page suivante, les coefficients a et m ont été exprimés en fonction de l'angle d'impact θ par :

- Une interpolation d'ordre 1
- Une interpolation d'ordre 2 (polynôme)

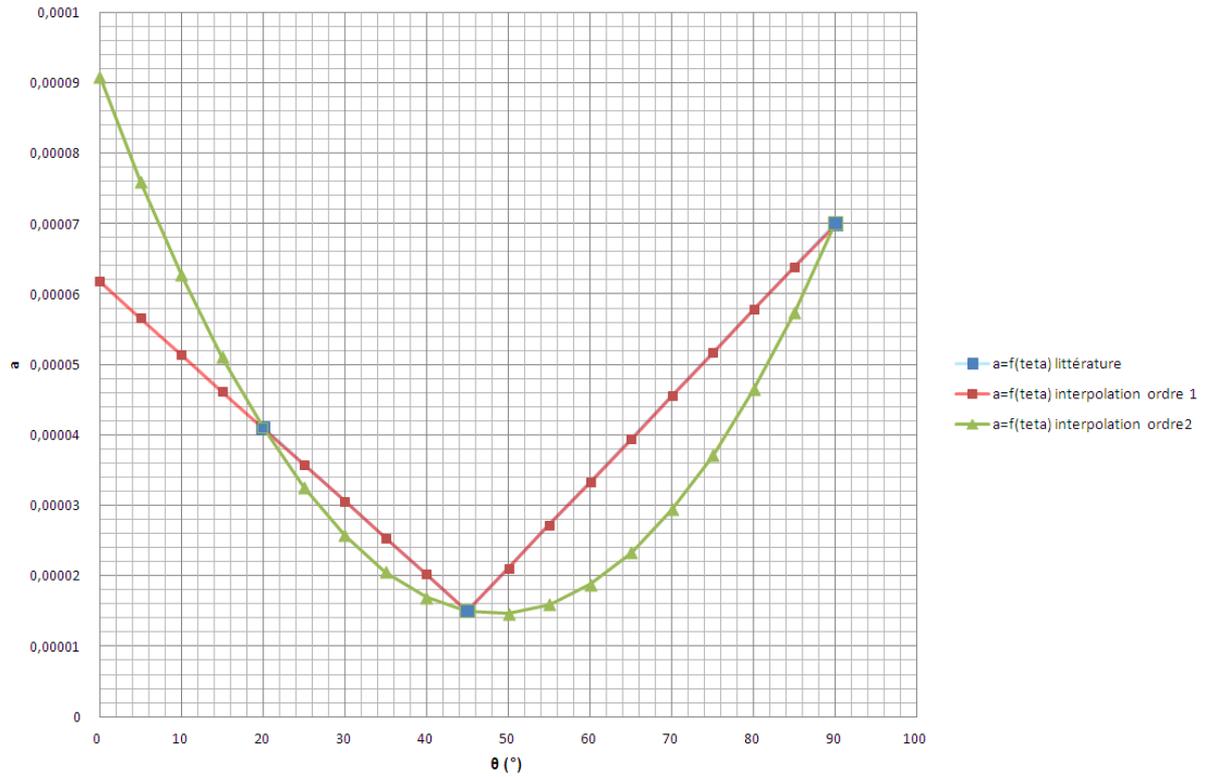


Figure 35 : Mise en équation de $a=f(\theta)$ suivant différentes courbes de tendance

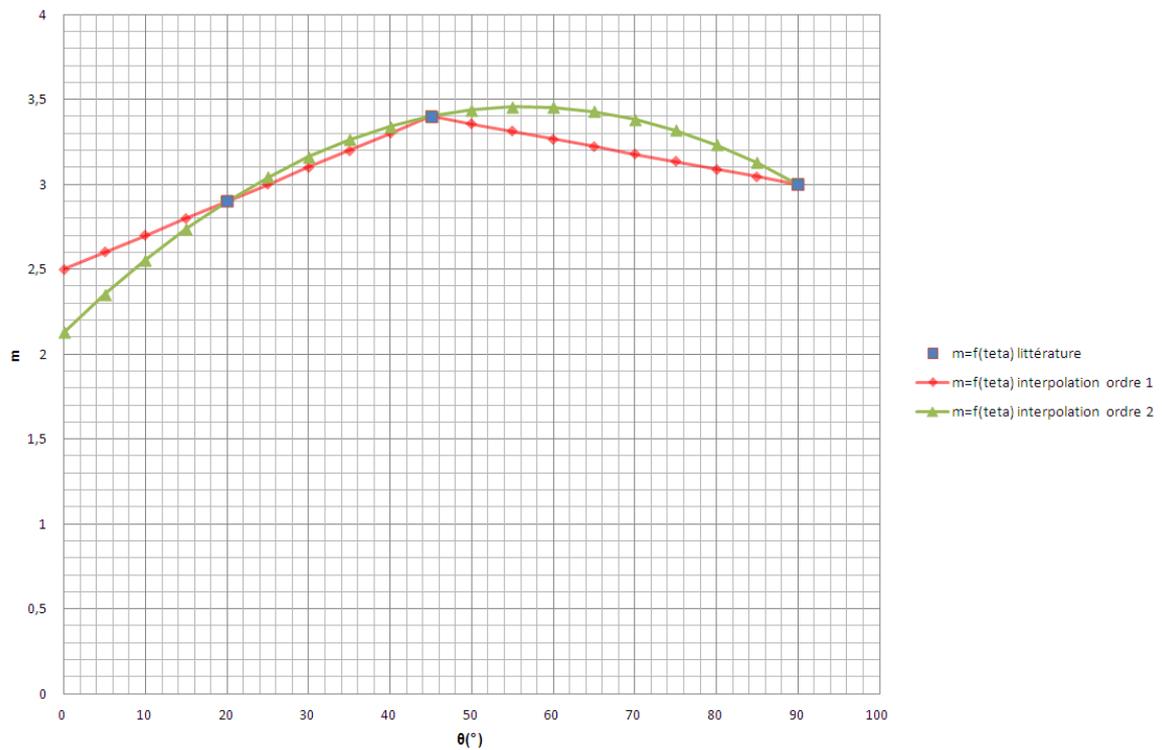


Figure 36 : Mise en équation de $m=f(\theta)$ suivant différentes courbes de tendance

En visualisant les courbes $a=f(\theta)$ et $m=f(\theta)$, on constate que les variables a et m , suivant la méthode d'interpolation, n'ont pas le même comportement pour des angles θ faibles ($< 20^\circ$).

Le calcul du taux d'érosion va permettre de vérifier la pertinence des interpolations. Pour cela, on prendra une vitesse de 80m/s, proche de la vitesse au décollage et qui correspond à la vitesse maximale dans la plage donnée par l'abaque.

- Comparatif des taux d'érosion I_v :

La figure 37 représente le taux d'érosion en fonction de l'angle d'impact θ avec une vitesse $U= 80$ m/s.

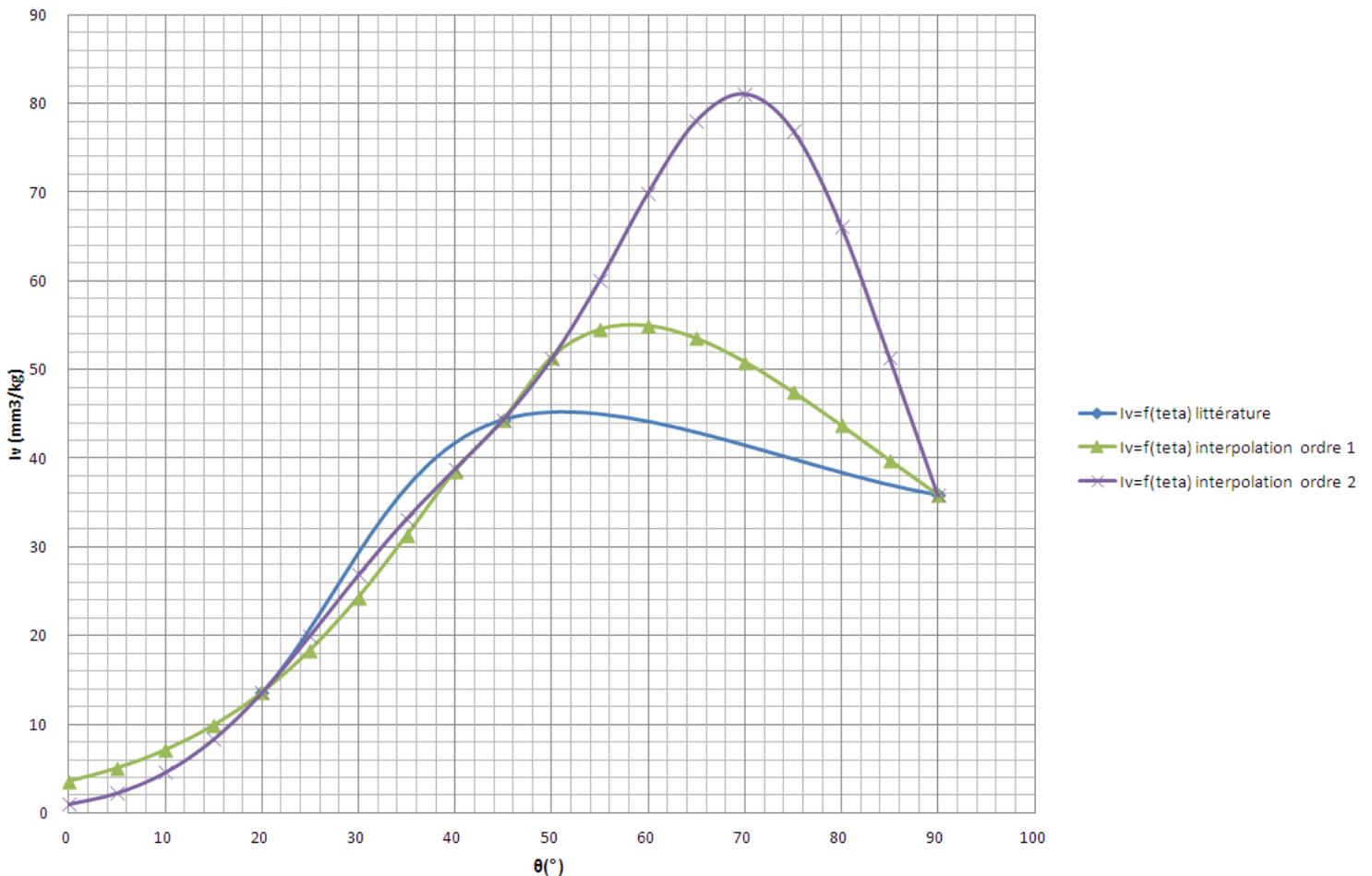


Figure 37 : Mise en équation de $I_v=f(\theta)$

Analyse :

Pour comparer ces différentes courbes, il est nécessaire de connaître au préalable le comportement de ce titane soumis à l'érosion à une vitesse de 80m/s et avec des grains de sable.

Le tableau 9 est issu de « *solid particle erosion, I.Kleis et Al [19]* » qui donne pour différents matériaux l'angle d'impact pour un taux d'usure maximal ainsi qu'un ratio κ (rapport entre le taux d'usure maximale et celui pour $\theta=90^\circ$).

Tableau 9 : Position du taux d'usure maximum et ratio κ pour une vitesse d'impact de 80m/s

Metal	Pb	Sn	Cd	Al	Zn	Cu	Ni	Fe	Ti	Nb	Co	Mo	W
HV	4.5	11	20	24	35	86	97	120	160	171	196	248	496
α_{max} quartz sand	20°	50°	20°	20°	45°	30°	40°	40°	60°	45°	75°	50°	75°
Ratio κ	3.5	1.5	3.1	4.1	2.8	2.4	1.8	1.7	1.2	1.7	1.2	1.3	1.04
α_{max} glass grit	20°	40°	15°	20°	20°	20°	30°	30°	40°	40°	60°	30°	75°
Ratio κ	2.3	1.5	2.0	2.7	1.8	1.6	1.5	1.6	1.2	1.4	1.3	1.4	1.4

On constate que pour le titane, le taux d'usure maximum est pour $\theta=60^\circ$ et avec un ratio $\kappa=1.2$. Ces valeurs vont être comparées avec celles obtenues par interpolation.

Nous obtenons :

Tableau 10 : Tableau comparatif du taux d'érosion suivant différentes méthodes d'interpolation

	θ (pour I_v max)	$I_{v_{max}}$	$I_{v_{90^\circ}}$	ratio κ
Données issues du tableau 9	45°	44.319	35.84	1.24
Interpolation ordre 1	60°	54.908	35.84	1.53
Interpolation ordre 2	70°	81.021	35.84	2.26

Analyse :

- L'angle d'impact θ

Selon le tableau (*en figure 9*), l'angle d'impact le plus défavorable pour le titane est de 60° . Seule l'interpolation d'ordre 1 permet de retrouver cette valeur.

Afin d'être représentatif lors de la simulation numérique, il est très important d'avoir les taux d'érosion maxi correspondant bien à l'angle d'impact le plus défavorable.

- Le ratio κ

Pour les méthodes d'interpolation, nous avons des ratios $\kappa > \kappa_{\text{tableau}}$. Sachant que la valeur du taux d'érosion pour l'angle de 90° est la même, on a donc une surestimation du taux d'usure.

Conclusion :

L'expression du taux d'érosion par la méthode d'interpolation d'ordre 1 semble la plus précise. Elle permet de mettre en évidence l'angle d'impact le plus défavorable $\theta=60^\circ$ pour le cas du titane.

Remarque :

Cette équation fait référence à la vitesse de la particule U au moment de l'impact.

Comme présenté dans l'étude bibliographique (*voir chapitre II*), dans l'interaction goutte/ paroi (éclaboussure, rebond, etc) les nombres sans dimensions caractérisant ces phénomènes sont basés sur la composante normale U_n de la vitesse. Il peut donc être intéressant de représenter le taux d'érosion par l'équation : $I_v = a_n \cdot U_n^{mn}$.

D'autre part, il a été énoncé que la perte de matière pouvait être liée aux contraintes de cisaillements (*voir approche Beckmann & Gotzmann*). La prise en compte de la composante tangentielle U_t peut donc être nécessaire.

On peut alors exprimer le taux d'érosion par : $I_v = a_n \cdot U_n^{mn} + a_t \cdot U_t^{mt}$

Ces expressions vont être comparées et opposées aux résultats obtenus précédemment.

c) Autres approches :

La figure 38 représente différentes expressions du taux d'érosion I_v en fonction de l'angle d'impact θ .

La vitesse $U = 80$ m/s et les composantes U_n et U_t seront calculées pour chaque angle d'impact avec :

- $U_n = U \cdot \sin \theta$ et $I_v = a_n \cdot U_n^{m_n}$ avec $a_n = 7.0 \times 10^{-5}$ et $m_n = 3$ (valeurs du tableau 8)
- $U_t = U \cdot \cos \theta$ et $I_v = a_n \cdot U_n^{m_n} + a_t \cdot U_t^{m_t}$ avec $a_n = 6.18 \times 10^{-5}$ et $m_n = 2.5$ (valeurs issues interpolation ordre 1)

Comparatif taux d'érosion I_v suivant les composante de la vitesse (U_n, U_t)

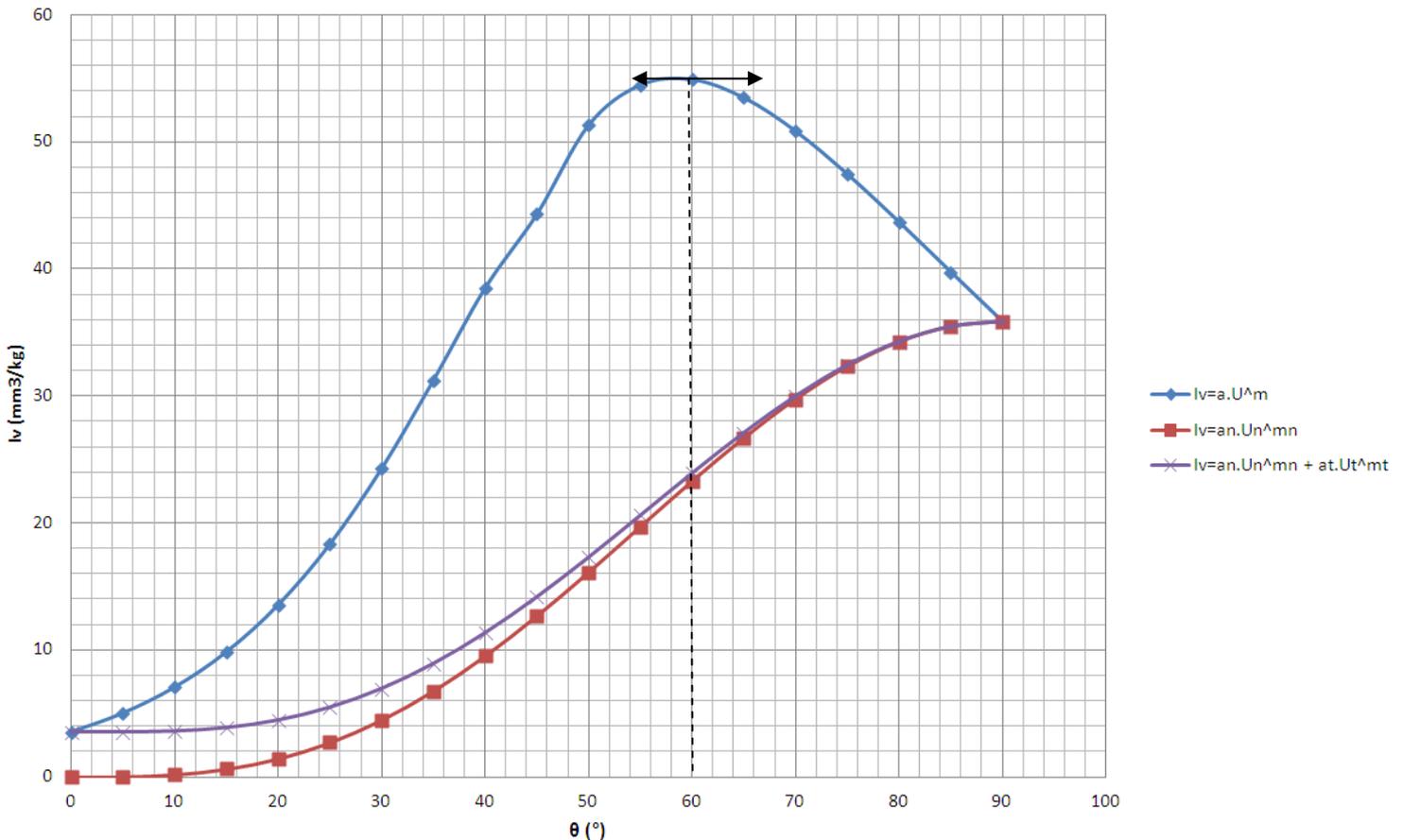


Figure 38 : Mise en équation de $I_v = f(\theta, U)$

Analyse :

L'angle d'impact le plus défavorable pour le titane est 60° .

Sur les 3 expressions, seule l'équation prenant en compte la vitesse U permet de retrouver le comportement du titane.

Remarque :

La différence entre les courbes d'expression $Iv = a_n \cdot U_n^{mn} + a_t \cdot U_t^{mt}$ et celle d'expression $Iv = a_n \cdot U_n^{mn}$ est la prise en compte de la composante tangentielle. Pourtant, on constate que le comportement est proche. Dans notre cas d'étude, la composante tangentielle est donc négligeable.

Conclusion :

Afin d'être représentatif lors de la simulation numérique, il est très important d'avoir la correspondance : cas le plus défavorable \leftrightarrow l'angle d'impact le plus défavorable. Pour cette raison, les expressions du taux d'érosion prenant en compte les composantes des vitesses (U_n , U_t) ne peuvent pas être considérées.

L'expression selon le modèle $Iv = a \cdot U^m$ semble donc la plus précise. Elle permet de mettre en évidence l'angle d'impact le plus défavorable. En revanche, il ne faut pas perdre de vue que le taux d'érosion est surestimé.

d) Conclusion :

Dans l'étude bibliographique, nous avons vu que l'érosion est un phénomène complexe due au grand nombre de paramètres entrant en jeu.

L'approche de Beckmann & Gotzmann associant la perte de volume aux forces de cisaillement est difficile de mise en œuvre.

Pour ces raisons, il a été décidé de s'appuyer sur un modèle érosion simplifié se basant sur des essais en laboratoire.

Afin d'affiner les résultats, nous avons :

- exprimé le taux d'érosion sur titane en fonction de :
 - o l'angle d'impact θ par les relations $a = f(\theta)$ et $m = f(\theta)$
 - o des composantes de la vitesse U_n, U_t
- comparé les résultats avec le comportement du titane observé en laboratoire.

Cela a permis de valider un modèle érosion simple : $Iv = a \cdot U^m$ qui va être utilisé pour les évaluations sur le NACA0012 dans un premier temps puis sur le profil du HTP d'un A320.

III) Application préliminaires sur un profil NACA0012 :

1) Le profil NACA0012 :

Dans un premier temps, un profil de type NACA0012 (*National Advisory Committee for Aeronautics*) a été testé pour évaluer le comportement du modèle d'érosion.

Il s'agit d'un profil symétrique qui sert d'étalon pour les calculs numériques et expérimentaux.

La figure 39 représente le profil NACA0012 dans le repère (X,Y) sur la corde C.

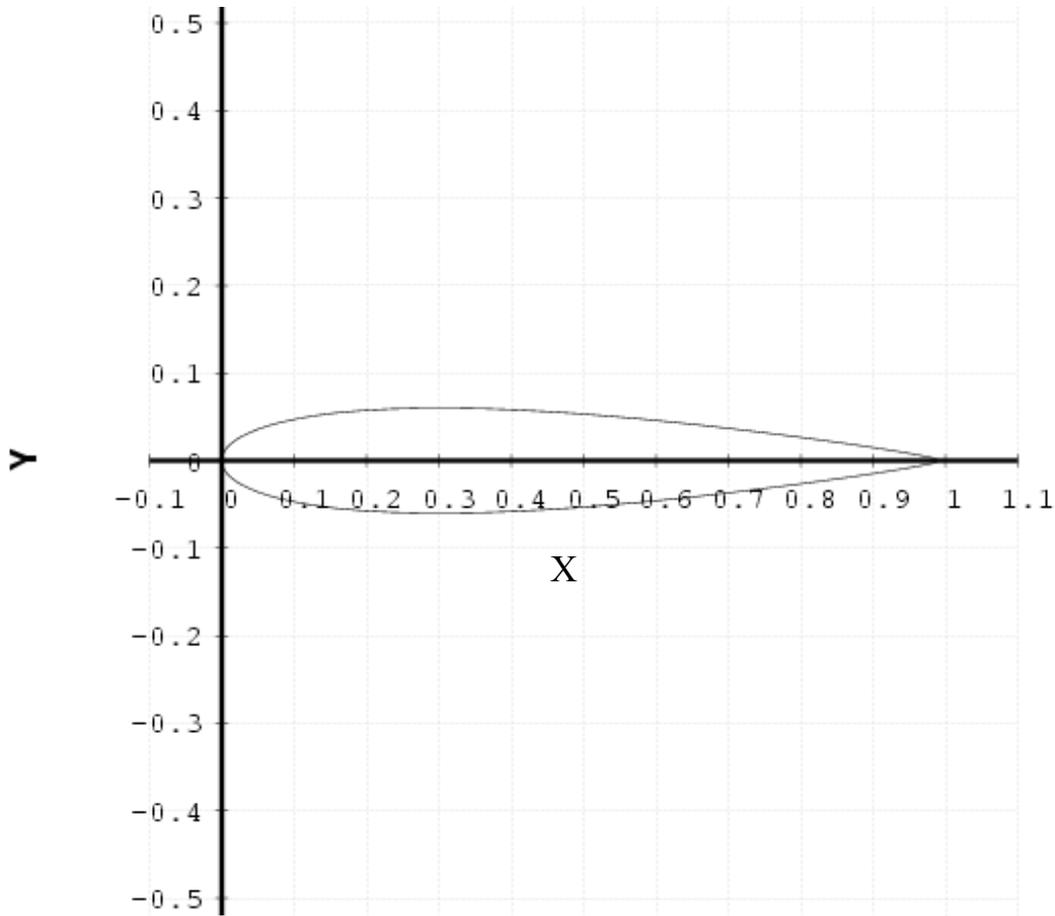


Figure 39 : profil NACA0012 extrait suivant le fichier prof.dat

2) Simulation impact avec ONICE2D :

Afin de pouvoir comparer avec les retours d'expériences sur la flotte des Single Aisle, nous avons pris comme données d'entrées les cas décollages et croisières d'un airbus A320.

a) Le cas décollage:

Même si au décollage, nous observons essentiellement de l'érosion au sable (voir bibliographie), nous avons tout de même simulé le cas décollage avec l'impact de particules d'eau pour évaluer les effets du diamètre de goutte.

- Les données d'entrées :

- Angle d'incidence : 9°
- Mach = 0.25
- $P_s = 955$ hPa (altitude 500m)
- $T_s = 285.15$ K
- Diamètre particules de sable : $\Phi = 220 \mu\text{m}$ (voir bibliographie)
- Diamètre particules d'eau : $\Phi = 2\text{mm}$ (voir bibliographie)

Une loi de distribution monodispersé a été choisie.

- Visualisation : cas décollage avec des particules de sable.

La figure 40 représente les trajectoires de particules de sable $\Phi=220\mu\text{m}$ autour du profil, la vitesse U ainsi que l'angle d'impact θ en fonction du rapport S/SP (abscisse curviligne référencée par rapport au point d'arrêt) et enfin le coefficient de captation β en fonction de ce même rapport.

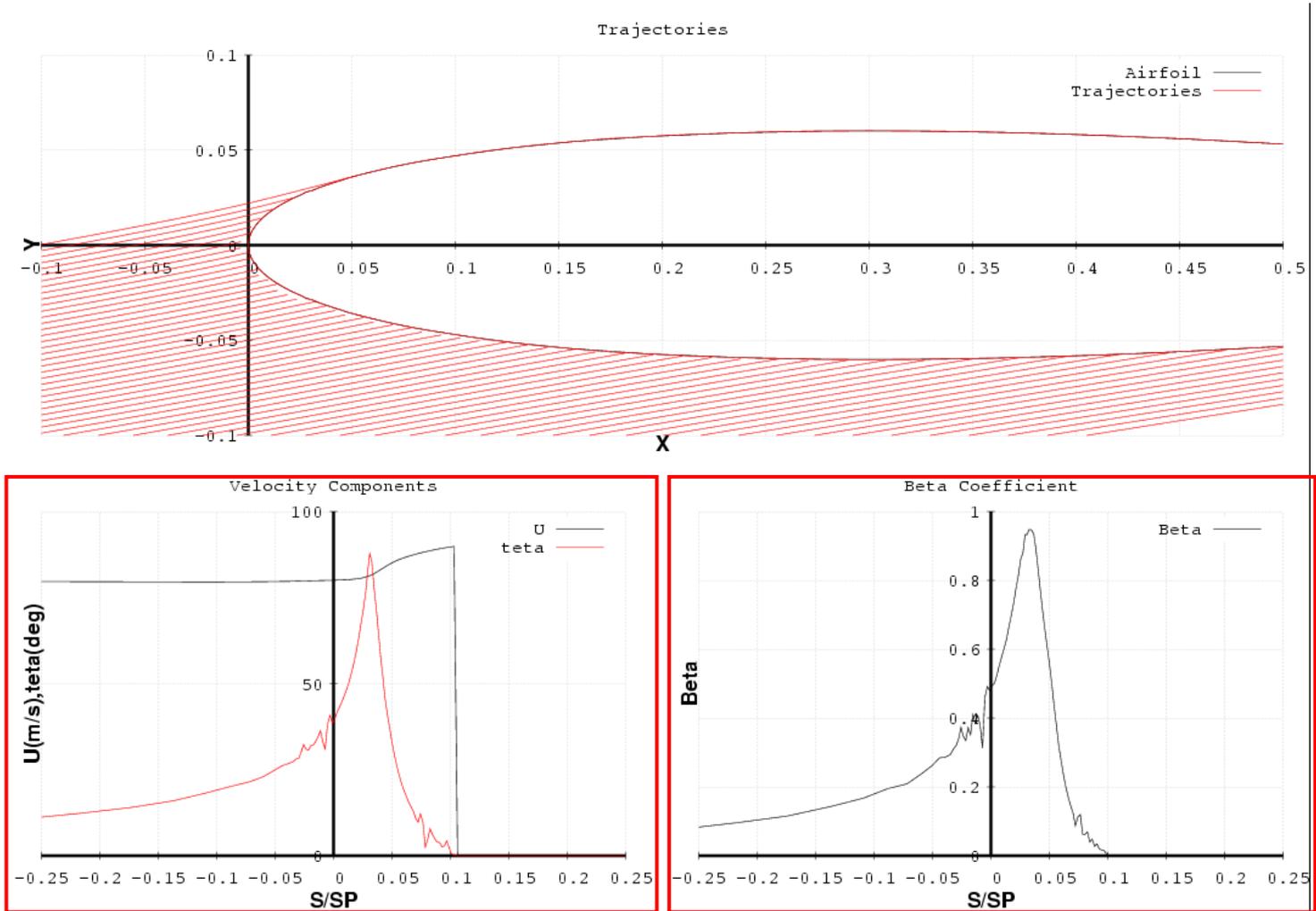


Figure 40 : cas décollage avec $M=0.25$; $\Phi_{\text{particule}}=220\mu\text{m}$; $\text{inc}=9^\circ$

Pour analyser cette figure, il est nécessaire de positionner le point d'arrêt dans le repère X, Y . Pour cela, nous allons tracer le coefficient de pression $-C_p$ en fonction de l'abscisse X (voir figure 41).

Rappel : $-C_p = \frac{p_0 - p}{\frac{1}{2} \times \rho_0 \times V_0^2}$

Avec :

- P_0 : Pression à l'infini amont (bar)
- P : Pression statique au point du profil (bar)
- ρ_0 : Masse volumique à l'infini amont (kg/m³)
- V_0 : vitesse à l'infini amont (m/s)

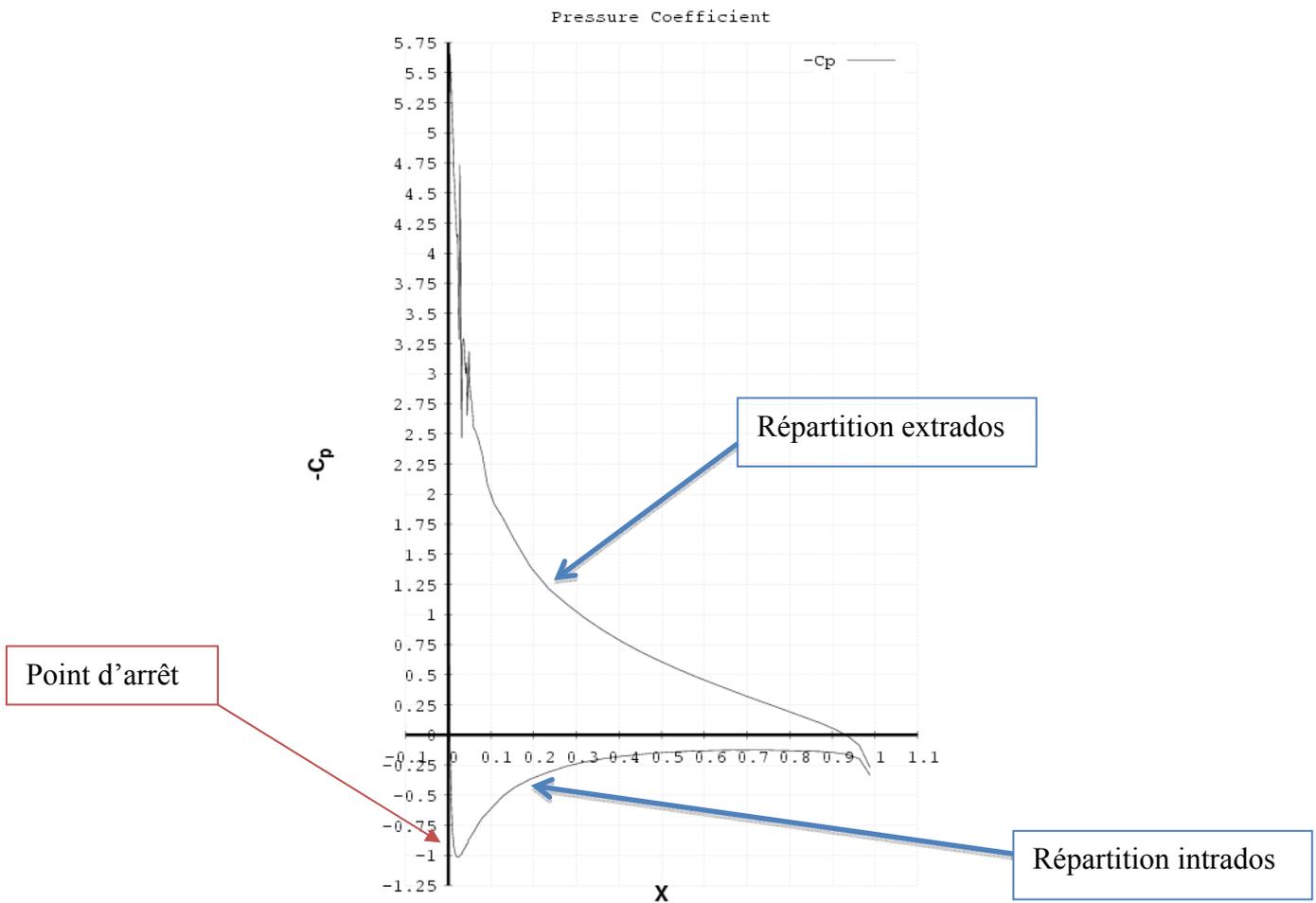


Figure 41 : Représentation du coefficient $-C_p$ en fonction de l'abscisse X dans le cas décollage avec $M=0.25$; $\Phi_{particule}=220\mu\text{m}$; $inc=9^\circ$

– Visualisation cas décollage avec des particules d'eau :

La figure 42 représente les trajectoires de particules d'eau $\Phi=2000\mu\text{m}$, la vitesse U ainsi que l'angle d'impact θ en fonction du rapport S/SP et enfin le coefficient de captation β en fonction de ce même rapport.

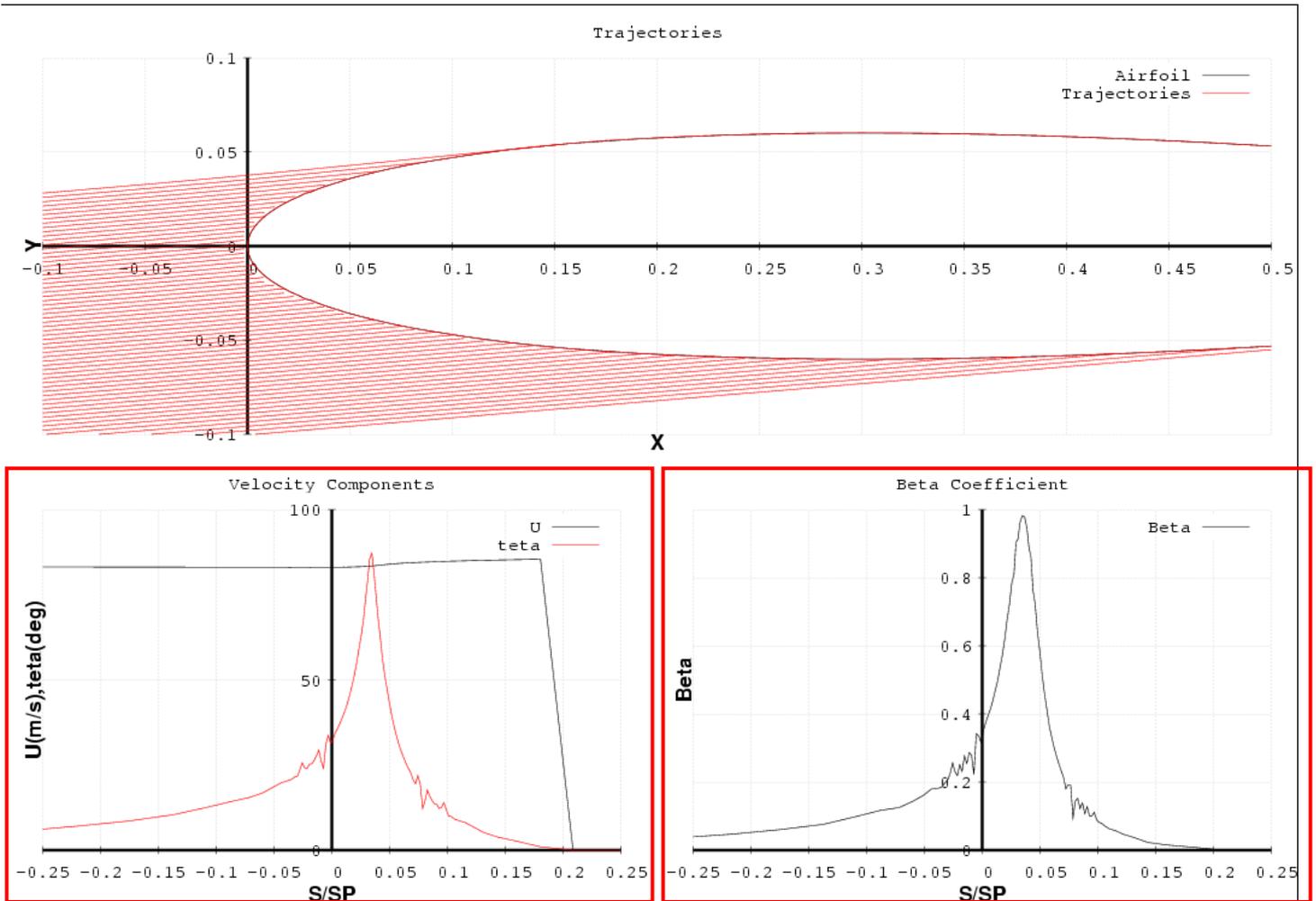


Figure 42: cas décollage avec $M=0.25$; Φ particule= $2000\mu\text{m}$; $inc=9^\circ$

La figure 43 représente le coefficient de pression $-C_p$ en fonction de l'abscisse X (par rapport à la corde).

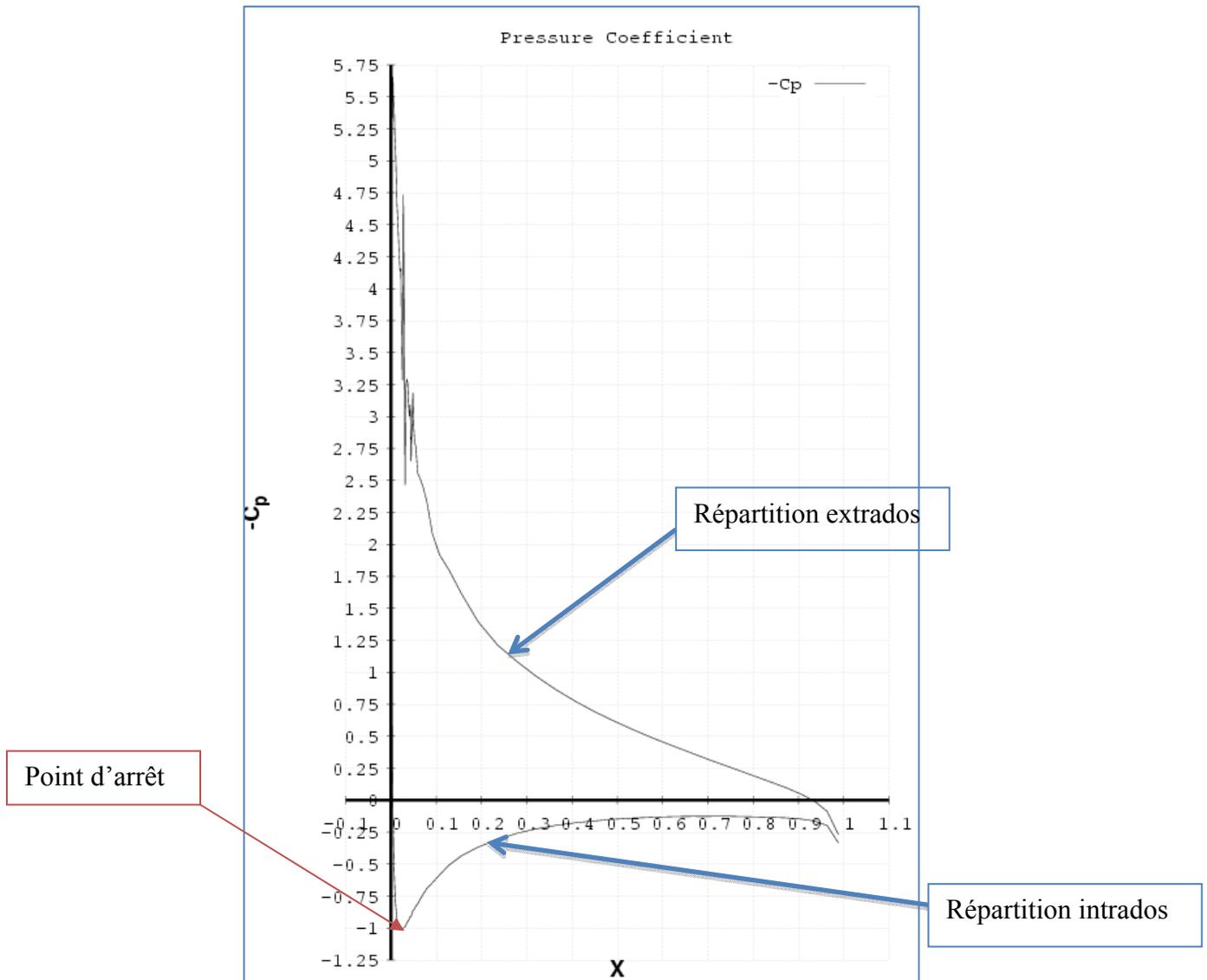


Figure 43 : Représentation du coefficient $-C_p$ en fonction de l'abscisse X dans le cas décollage avec $M=0.25$; $\Phi_{particule}=2000\mu m$; $inc=9^\circ$

Analyse :

$$-C_p = \frac{p_0 - p}{\frac{1}{2} \times \rho_0 \times V_0^2} = \frac{|V|^2}{V_0^2} - 1. \text{ Au point d'arrêt, } V=0 \text{ donc } -C_p = -1.$$

Sur les courbes 39 et 41 correspondant à nos deux cas d'étude, le point d'arrêt se trouve donc à une abscisse $X=0,03$ sur la partie intrados.

Si l'on regarde les courbes des vitesses (figure 40 et 42), on observe une augmentation de la vitesse après le point d'arrêt sur la partie extrados. Cette observation se retrouve sur les courbes 41 et 43, où nous avons $-C_p > 0$ sur l'extrados ce qui se traduit par une vitesse $V > V_0$.

Les particules de sable et les gouttes d'eau sont des particules de grand diamètre ($>50\mu\text{m}$), elles ne sont pas perturbées par le champ aérodynamique. Elles suivent des trajectoires quasi balistiques.

L'écart observé entre les figures 38 et 40 est dû au diamètre des particules (goutte d'eau, grain de sable). Les paramètres θ , U , β permettent donc de visualiser l'effet du diamètre.

Remarque :

Des oscillations numériques vues sur le champ aérodynamique se retrouvent sur les variables θ et β .

b) Le cas croisière :

Il s'agit du cas le plus défavorable. Ceci est dû au paramètre vitesse qui est, comme mentionné dans la partie bibliographique, le paramètre le plus influent en ce qui concerne l'érosion.

En altitude, nous trouvons essentiellement des particules d'eau sous forme liquide. Dans l'étude, seul le moment du 1^{er} impact a été considéré en négligeant les phénomènes physiques présentés dans l'étude bibliographique.

- Les données d'entrées :

- Angle d'incidence : 3.5°
- Mach = 0.72
- $P_s = 265$ hPa (altitude 10000m)
- $T_s = 223.15$ K
- Diamètre particules de sable : $\Phi = 220 \mu\text{m}$ (voir bibliographie)
- Diamètre particules d'eau : $\Phi = 2\text{mm}$ (voir bibliographie)

Pour cette étude, une loi de distribution monodispersé sera à nouveau utilisée.

– Visualisation : cas croisière avec des particules de sable :

La figure 44 représente les trajectoires de particules de sable $\Phi=220\mu\text{m}$ autour du profil, la vitesse U ainsi que l'angle d'impact θ en fonction du rapport S/SP (abscisse curviligne sur point d'arrêt) et enfin le coefficient de captation β en fonction de ce même rapport.

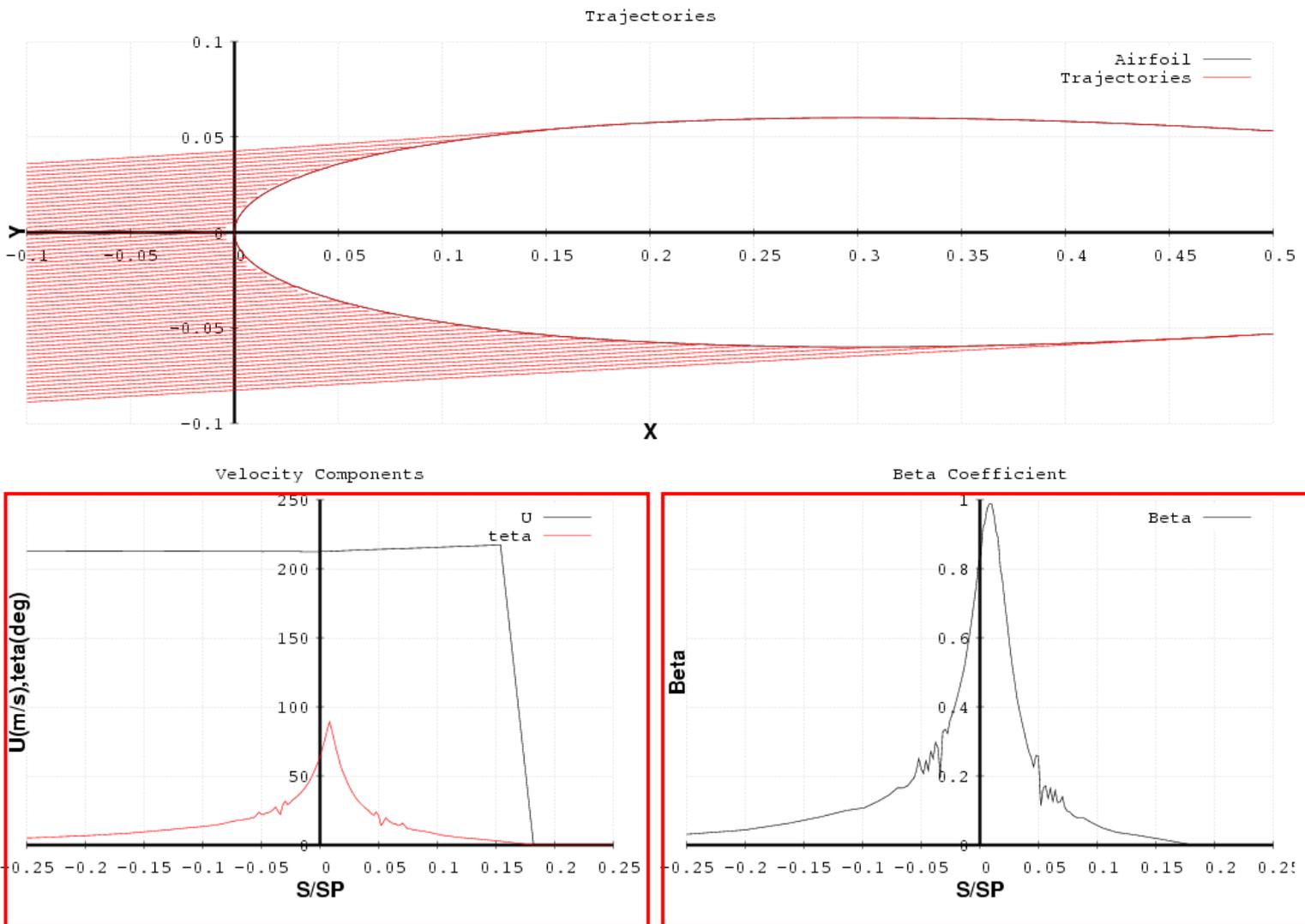


Figure 44: cas croisière avec $M=0.72$; $\Phi_{\text{particule}}=220\mu\text{m}$; $\text{inc}=3.5^\circ$

La figure 45 représente le coefficient de pression $-C_p$ en fonction de l'abscisse X (par rapport à la corde).

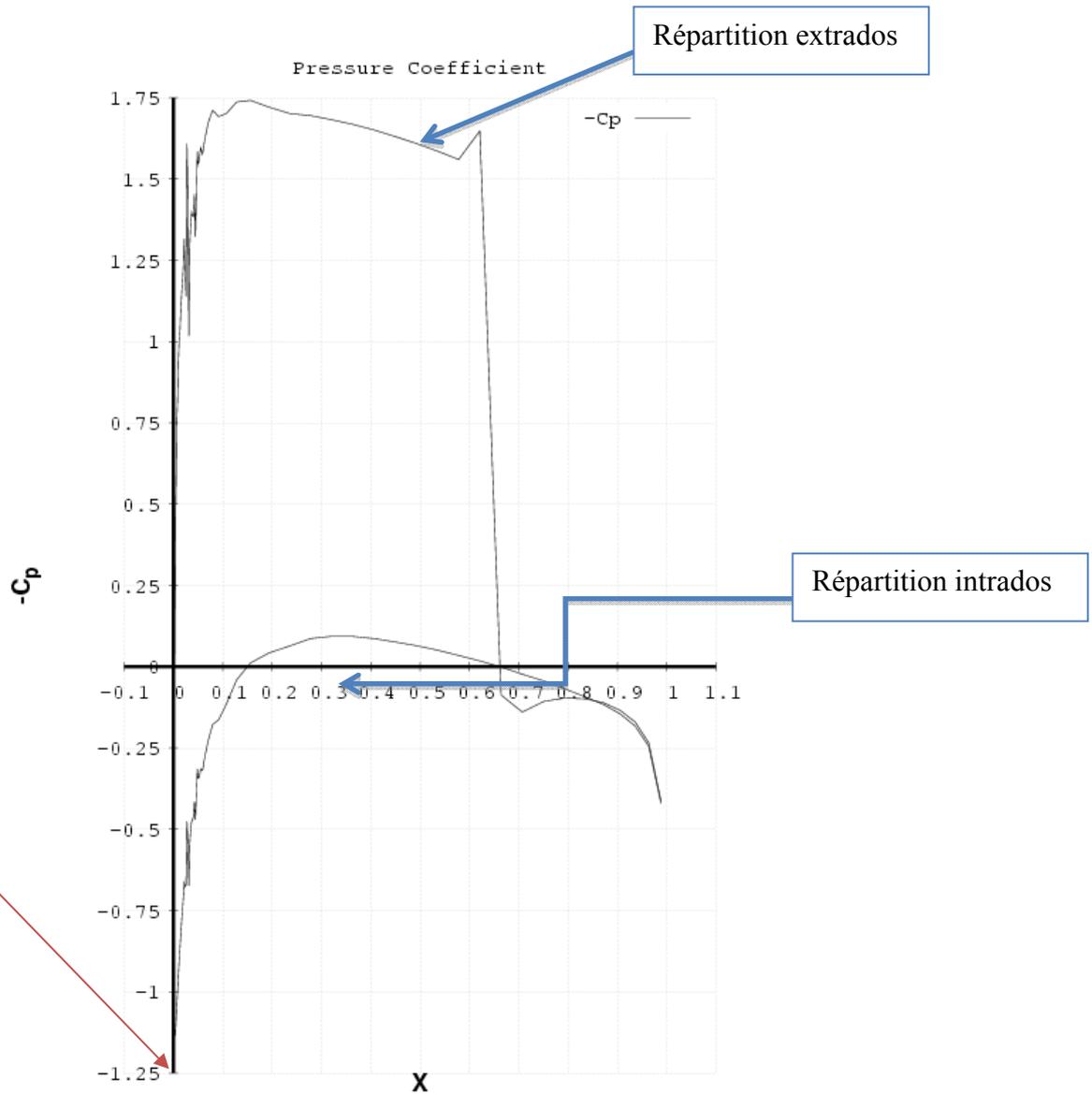


Figure 45 : Représentation du coefficient $-C_p$ en fonction de l'abscisse X dans le cas croisière avec $M=0.72$; $\Phi_{particule}=220\mu\text{m}$; $\text{inc}=3.5^\circ$

– Visualisation : cas croisière avec des particules d'eau :

La figure 46 représente les trajectoires de particules d'eau $\Phi=2000\mu\text{m}$ autour du profil, la vitesse U ainsi que l'angle d'impact θ en fonction du rapport S/SP et enfin le coefficient de captation β en fonction de ce même rapport.

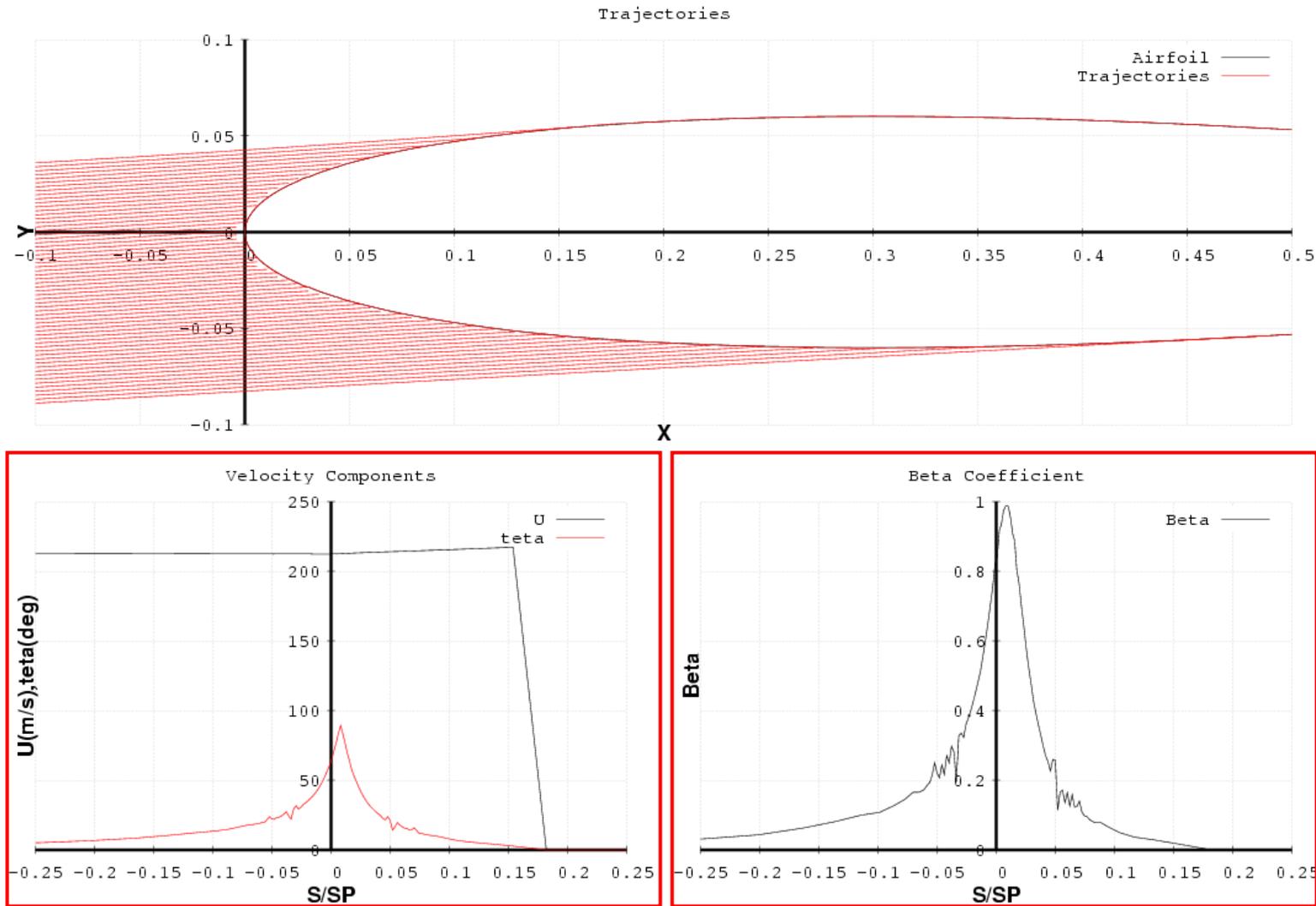


Figure 46: cas croisière avec $M=0.72$; Φ particule= $2000\mu\text{m}$; $inc=3.5^\circ$

La figure 47 représente le coefficient de pression $-C_p$ en fonction de l'abscisse X (par rapport à la corde).

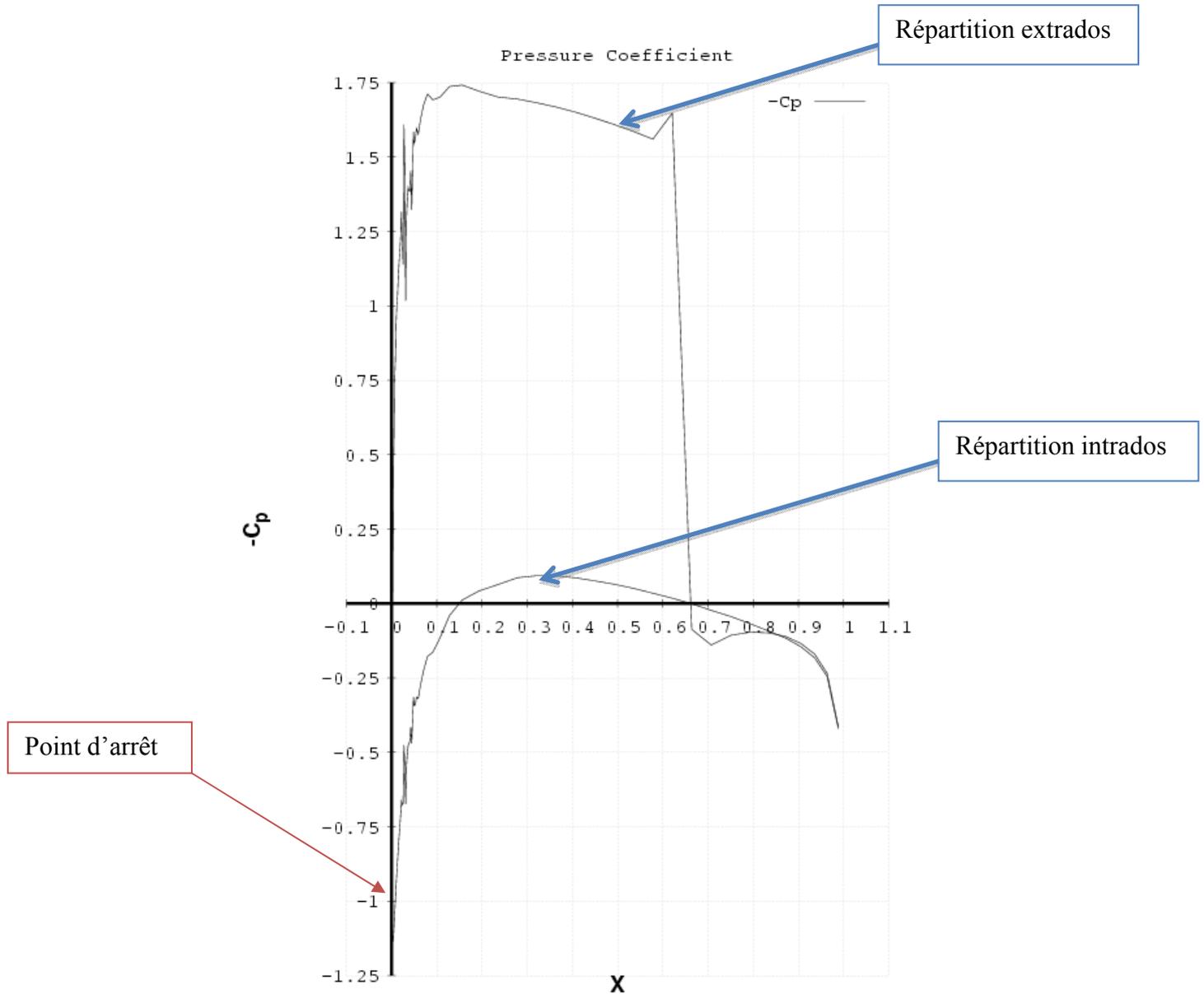


Figure 47 : Représentation du coefficient $-C_p$ en fonction de l'abscisse X dans le cas croisière avec $M=0.72$; Φ particule=2000 μ m ; inc=3.5°

Analyse :

En croisière l'angle d'incidence est plus faible qu'au décollage. Cela se traduit par un rapprochement du point d'arrêt vers le bord d'attaque du profil, ce que l'on observe sur les figures 45 et 47.

Dans ce cas d'étude, la vitesse augmente fortement et l'on constate que cela diminue l'action du diamètre des particules. En effet, les courbes de θ , U , β (issues des figures 42 et 44) ne varient quasiment pas avec le changement de particules.

Remarque :

Si l'on reprend les hypothèses :

- Les particules parfaitement sphériques (eau, sable)
- Pas d'effet de dislocation pour la particule d'eau
- Les phénomènes physiques après l'impact négligés (rebond, ...)

On constate qu'elles tendent vers une standardisation de la particule avec pour seul variable le diamètre.

Or dans la réalité, ces hypothèses ne sont pas du tout satisfaisantes. Par exemple, il est nécessaire de regarder, pour la particule d'eau, l'effet de dislocation par le calcul du Weber (rappel dislocation si $We > 13$ voir II.2.b).

Ce nombre dépend de la vitesse. Donc plus la vitesse va augmenter plus les particules auront tendances à se disloquer.

Dans le cas d'étude en croisière, les hypothèses émises sont donc moins sure encore.

c) Conclusion :

Cette évaluation préliminaire a permis de comparer les différents cas décollages, croisières avec des particules d'eau ou de sable.

La simulation de l'impact avec ONICE2D a mis en avant les 3 paramètres (U , θ et β) qui sont nécessaire pour le modèle érosion. L'analyse de ces variables a montré l'action du diamètre pour le cas décollage et l'importance de la vitesse que se soit au décollage ou en croisière.

Elle a permis aussi de montrer les limites des hypothèses émises pour simplifier le phénomène d'érosion, surtout dans le cas croisière avec la non répercussion du changement de diamètre sur les différents paramètres.

Pour cette raison, dans la suite du mémoire, les cas en croisière ne seront plus étudiés.

A partir de ces données (θ , U , β) le taux d'érosion autour du profil peut être maintenant examiné.

3) Application du modèle érosion:

Dans le chapitre précédent, il a été établi que l'expression du taux d'érosion sous la forme $Iv = a.U^m$ avec l'interpolation d'ordre 1 était la plus représentative.

Cette conclusion s'est basée sur le comportement du titane issu de la littérature « solid particle erosion, I.Kleis et Al [19].

Le même matériau va donc être utilisé comme substrat pour le calcul du taux d'érosion.

a) Le cas décollement :

Pour ce cas, seules les valeurs obtenues suite à l'impact de particules de sable ont été prise en compte vu que c'est ce type de particule que l'on trouve essentiellement au décollement.

Sur la figure 48, on trouve différentes courbes exprimant le taux d'érosion Iv en fonction de l'abscisse curviligne (s_{curv}).

- $Iv = f(\theta ; U)$: Il s'agit du calcul du taux d'érosion en fonction de l'angle d'impact et de la vitesse en chaque point. Un zoning a été utilisé pour définir les valeurs de a et de m à prendre en compte, cela de façon arbitraire.
 - o Pour $0 < \theta < 32^\circ$, les valeurs de a et m pour le cas 20°
 - o Pour $33^\circ < \theta < 70^\circ$, les valeurs pour le cas 45°
 - o Pour $71^\circ < \theta < 90^\circ$, les valeurs pour le cas 90°
- $Iv = f(\theta ; U_n \text{ ou } U_t \text{ ou } U_{45})$: C'est la même méthode mais en n'utilisant que la composante dominante pour chaque zone.
- $Iv = f(\theta ; U)$ par interpolation : Calcul de a et m en chaque point.

Remarque : La vitesse U_t a été considérée pour les angles faibles $< 32^\circ$.

Comparaison des méthodes pour le calcul du taux d'érosion Iv

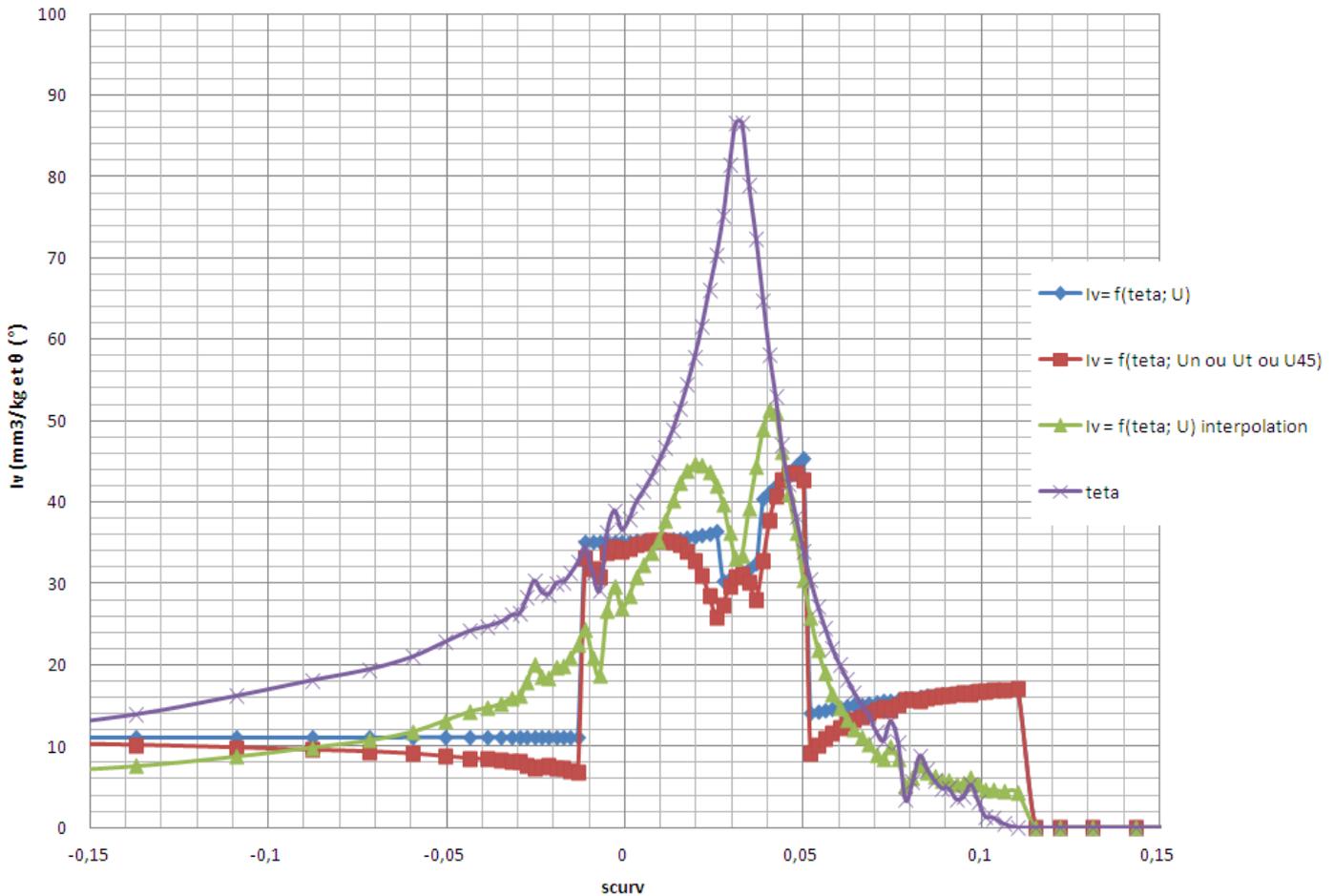


Figure 48 : Calcul du taux d'érosion sur le profil NACA0012 pour le cas titane ; $M=0,25$; $inc=9^\circ$; Φ particules= $220\mu m$

Analyse :

La courbe $Iv = f(\theta ; U)$ sert de repère. Elle donne les différents niveaux d'érosion pour les 3 angles d'impacts connus (20° ; 45° ; 90°).

Justement, on constate que les 3 valeurs d'Iv se comportent comme des asymptotes pour la courbe $Iv = f(\theta ; U_{n \text{ ou } U_t \text{ ou } U_{45}})$. Ce qui permet de dire que la composante « dominante » seule, suivant le zoning, permet d'établir de façon assez précise le taux d'érosion.

Enfin, la courbe $Iv = f(\theta ; U)$ par interpolation coupe celle de référence pour les angles d'impact connus $\theta=20^\circ$; 45° ; 90° et passe par un maximum pour $\theta=60^\circ$. Ce même angle pour lequel le titane est le plus érodé.

Elle semble donc caractériser correctement le comportement du matériau.

Conclusion :

Pour ce cas d'étude, on constate que le modèle érosion défini donne satisfaction. A partir des paramètres représentatifs (U , θ) extraits avec ONICE2D et des données sur le titane issues de la littérature, il est possible de représenter le taux d'érosion afin de définir la/les zones à protéger.

Afin de juger de la cohérence du modèle, les résultats obtenus vont être comparés à des résultats expérimentaux réalisés au laboratoire EADS Innovation Works (IW) à Ottobrunn en Allemagne.

b) Comparatif avec les essais expérimentaux réalisés à IW Ottobrunn :

Dans le cadre d'un projet recherche, le laboratoire IW à Ottobrunn a travaillé sur des méthodes d'essais pour simuler l'érosion (*bancs présentés dans le chapitre II.4*).

La figure suivante présente la perte de masse (en mg) ou érosion du titane TiAl6V4 en fonction de la quantité de masse projetée (en g) et de l'angle d'impact, réalisé sur un banc d'essai au sable le PLINT TE68 (*présenté en Annexes*).

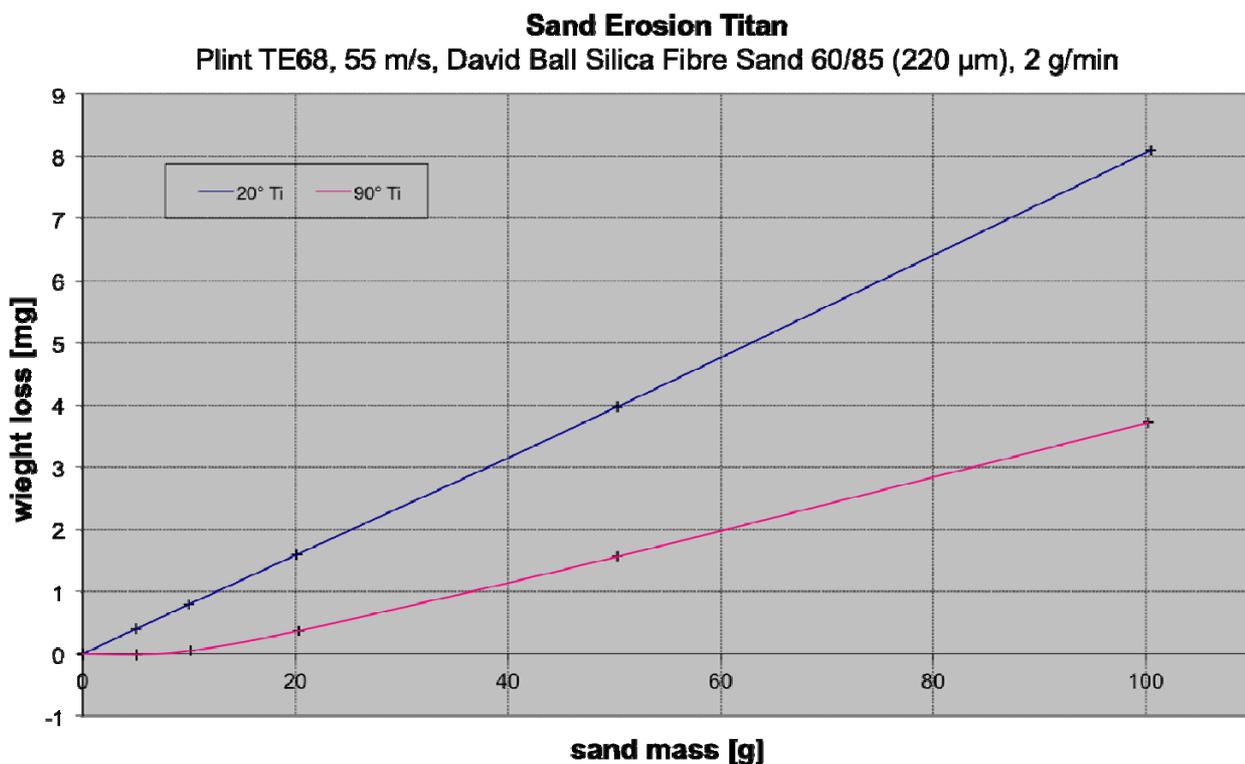


Figure 49 : Erosion au sable d'un Titane – $V=55$ m/s – Φ particule : 220 μ m

Le comportement linéaire, observé sur la figure 29 et caractéristique de l'érosion au sable, est retrouvé

Pour évaluer le modèle érosion, il est nécessaire d'effectuer un nouveau calcul en intégrant la nouvelle vitesse $V=55\text{m/s}$.

La figure 50 représente le taux d'érosion ($Iv=a.U^m$) ainsi que l'angle d'impact θ en fonction de l'abscisse curviligne avec le substrat en titane (*issu de [19]*)

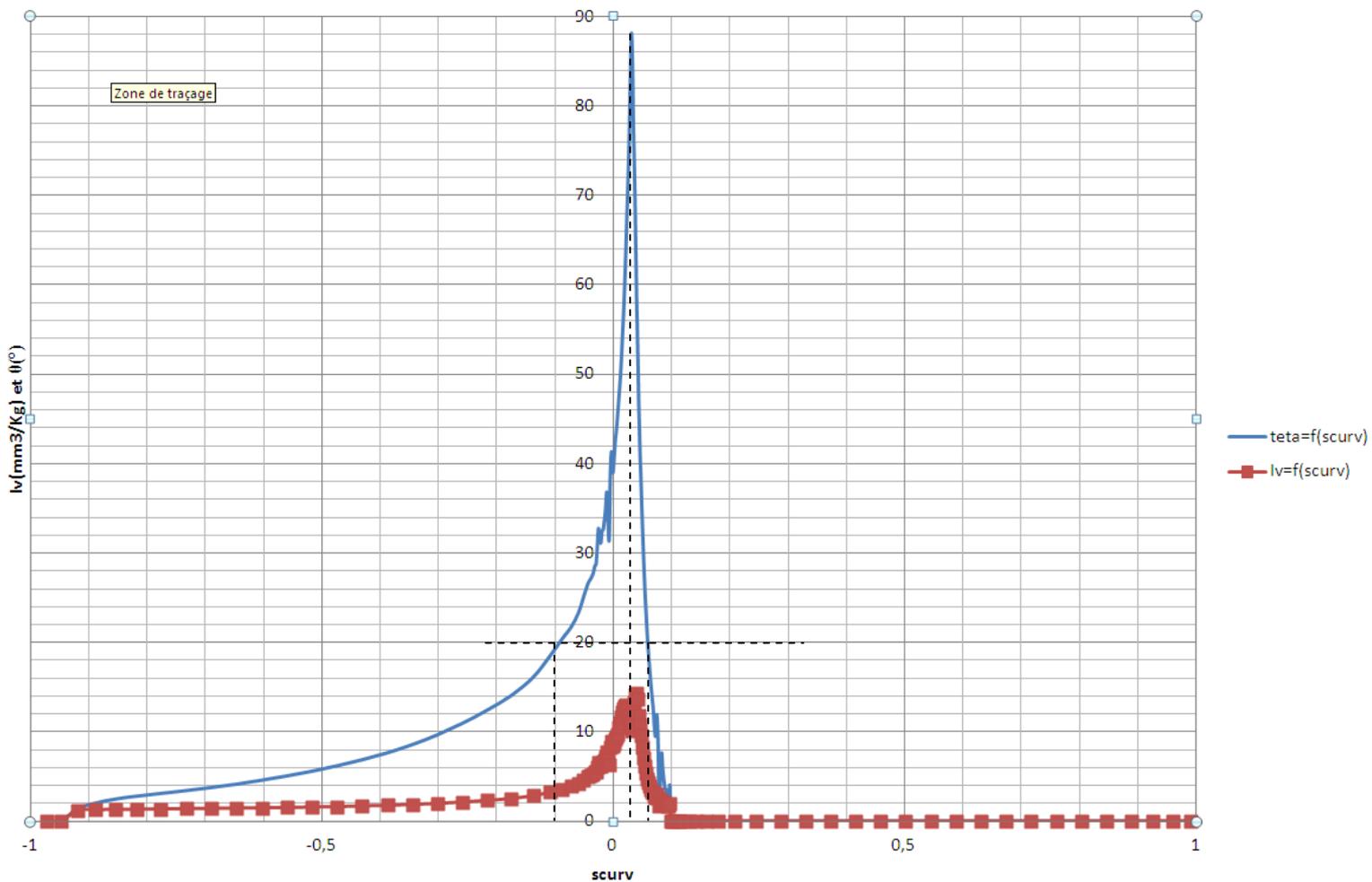


Figure 50 : Cas décollage sur le profil NACA001; $M=0.16$; Φ particule : $220 \mu\text{m}$; $\text{inc}=9^\circ$

Analyse :

Afin de comparer avec les résultats obtenus par IW, il est nécessaire de représenter les taux d'érosion (perte de masse) pour les mêmes angles d'impacts, 20° et 90°.

Dans le cas décollage sur le profil NACA, nous obtenons :

- $I_v = 10.18 \text{ mm}^3/\text{Kg}$ pour $\theta = 90^\circ$
- $I_v = 4 \text{ mm}^3/\text{Kg}$ pour $\theta = 20^\circ$

Sur la figure 47, pour 20 g d'érodent, la perte de masse est de :

- 0.37 mg pour $\theta = 90^\circ$
- 1.6 mg pour $\theta = 20^\circ$

Comparatif :

Vu que le comportement des courbes, figure 49, il est possible de rapporter la perte de masse en mm^3/Kg sachant que $\rho_{\text{titane}} = 4.51 \text{ mg}/\text{mm}^3$

Ce qui donne :

- $I_v = (0.37 * 10^3) / (20 * 4.51) = 4.1 \text{ mm}^3/\text{Kg}$ pour $\theta = 90^\circ$
- $I_v = (1.6 * 10^3) / (20 * 4.51) = 17.7 \text{ mm}^3/\text{Kg}$ pour $\theta = 20^\circ$

Conclusion :

Avant même de convertir les valeurs obtenues à Ottobraun, on s'aperçoit que la perte de masse est plus importante à 20° qu'à 90°, ce qui ne correspond pas aux résultats obtenus via les données issues de la littérature.

Comme indiqué dans le paragraphe II.4.b, il existe une infinité de titane. Celui employé pour l'essai à Ottobrunn est le TiAl6V4 utilisé dans l'aéronautique pour protéger les bords d'attaques alors que celui de la littérature est un titane standard, peut-être pur (non mentionné dans [19]). Il est donc impossible de comparer les caractéristiques des matériaux. Pourtant, cette différence de substrat peut tout à fait expliquer le décalage observé.

Pour valider ce modèle, il est donc nécessaire de définir les composantes a et m de la relation $I_v = a.U^m$ avec le TiAl6V4. Pour cela, il est nécessaire d'effectuer des essais en laboratoire en faisant varier la vitesse et les angles d'impacts (*matrice d'essai voir annexes*).

c) Conclusion :

Lors de cette étude préliminaire sur un profil symétrique utilisé comme étalon, les capacités du code ONICE2D pour simuler l'impact des particules solides ou liquides et extraire les différents paramètres influents de l'érosion ont pu être contrôlées.

La précision du code de calcul permet d'analyser de façon pertinente l'influence du diamètre des particules, de l'angle d'incidence ainsi que de la vitesse. Il permet donc de comparer, simuler les différents cas observés en service.

Le calcul du taux d'érosion, suivant différentes méthodes, a permis de mettre en avant la méthode simplifiée $I_v = a \cdot U^m$. Cette mise en équation du taux d'érosion donne des résultats satisfaisants.

En revanche, on a vu que l'on ne pouvait pas comparer des résultats si l'on n'avait pas strictement le même substrat. Il est donc nécessaire de définir les valeurs de a et m pour les substrats utilisés en aéronautique tel que le TiAl6V4 en effectuant des essais en laboratoire.

Maintenant que le modèle semble fiable, l'étude sur le profil HTP de l'Airbus A320 pour estimer les zones à « risque » selon le taux d'érosion peut être lancé.

Par contre comme expliqué précédemment, vu les résultats obtenus lors de l'étude préliminaire dans le cas croisière et les hypothèses prises, seul le cas décollage sera considéré dans l'évaluation sur le HTP.

IV) Application sur le profil du HTP A320

Les problèmes d'érosion observés sur les bords d'attaques des empennages des Single Aisles sont à l'origine de l'intérêt, du département Matériaux, d'investiguer sur ce phénomène.

Par le retour d'expérience de compagnies partenaires ainsi que par le programme, nous savons que l'empennage horizontal est soumis à l'érosion au sable et à l'eau.

Il s'agit même d'une des pièces les plus contraintes dues à la hauteur de la pièce ainsi que la distance par rapport aux roues.

1) Le profil du HTP:

La figure 51 représente le HTP de l'A320 avec la structure protectrice du bord d'attaque.

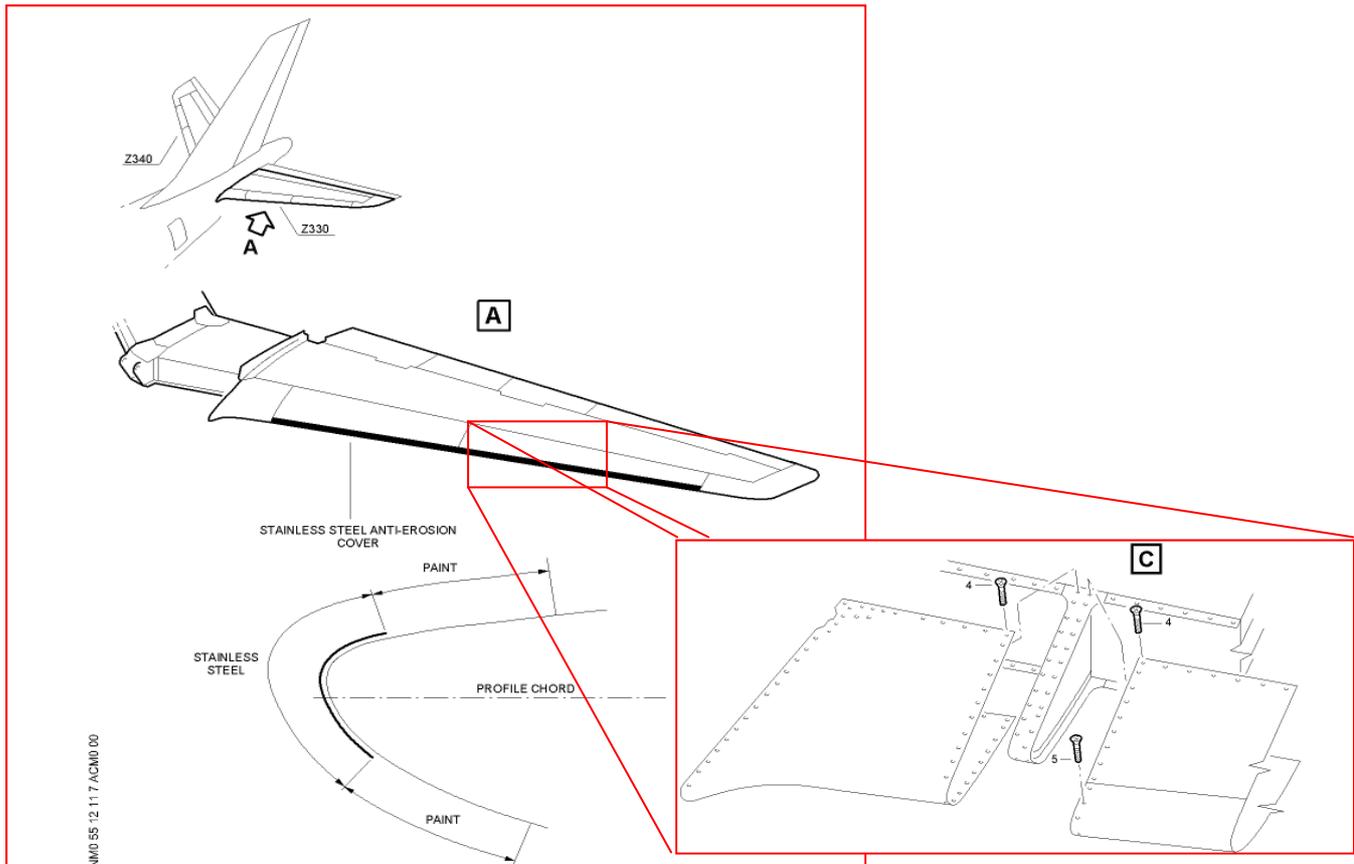
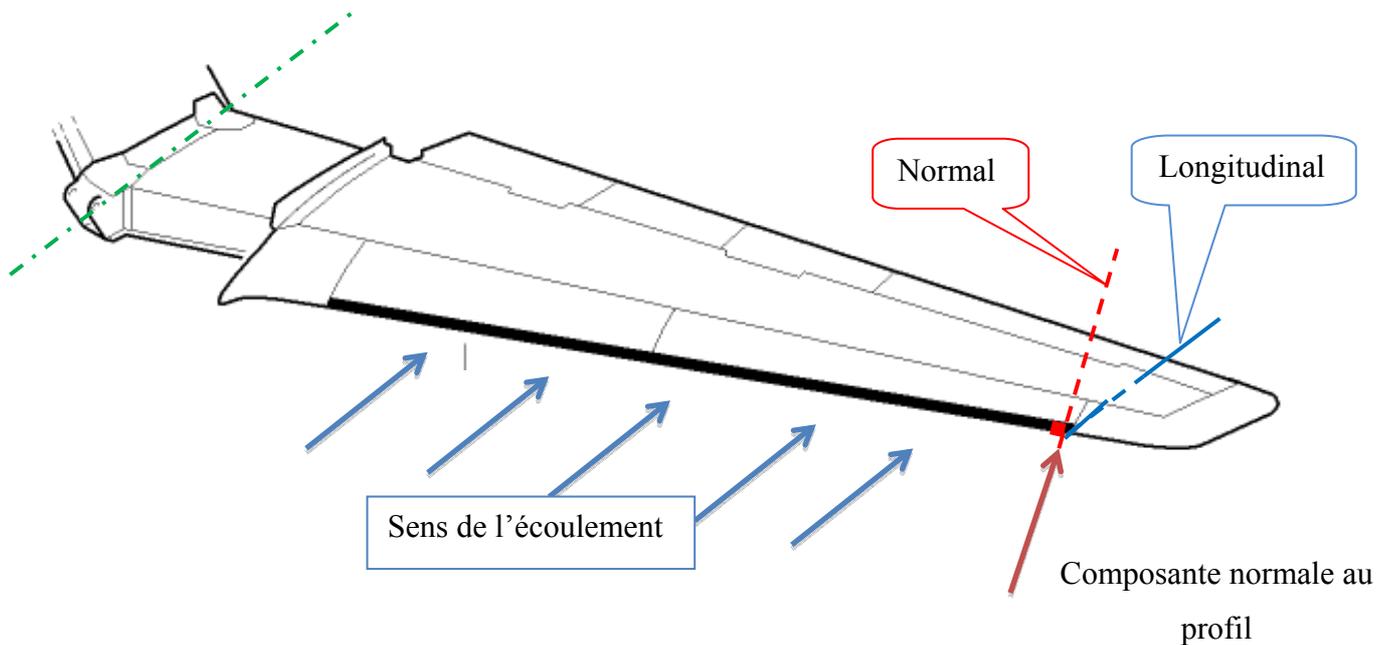


Figure 51 : L'empennage horizontal ou HTP d'un A320

Le profil varie selon le repère référent. Deux profils sont souvent employés selon :

- une coupe longitudinale (streamwise)
- une coupe normale

Représentation :



a) **Le profil du HTP selon une coupe longitudinale :**

Comme expliqué en introduction de ce paragraphe, il est souhaitable d'utiliser un profil représentatif de l'érosion au sable, à l'eau et dont on connaît le comportement en service. Une demande d'un profil HTP d'un A320 a été faite.

Le fichier reçu est un profil selon un axe longitudinal (ou streamwise) avec les données tel que la longueur de la corde ainsi que les coordonnées du bord de fuite. Ces coordonnées permettent de « fermer » le profil (*voir figure 52*).

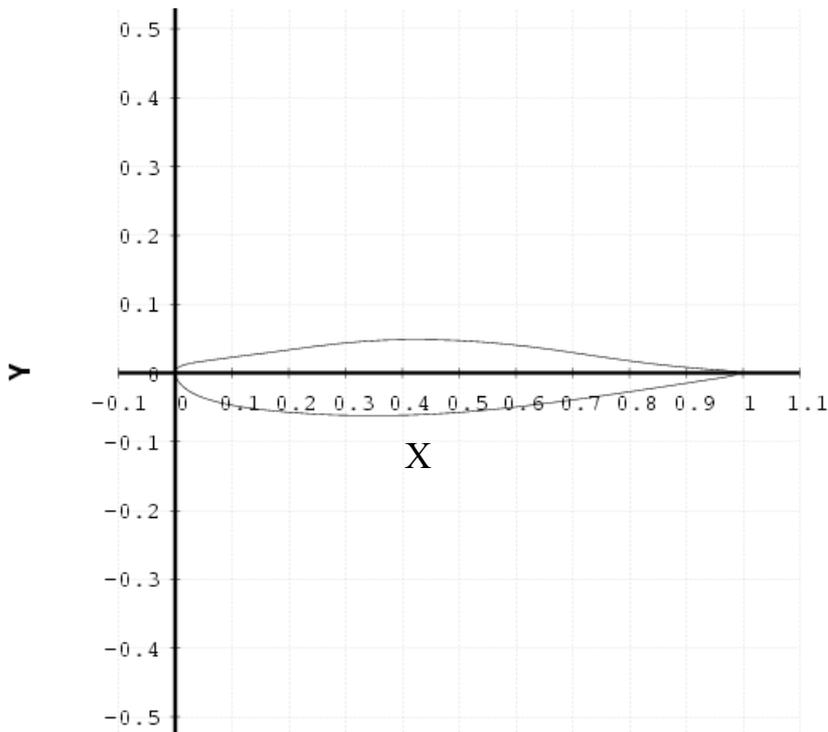


Figure 52 : Profil HTP A320 en streamwise

b) Profil HTP normal :

Il s'agit d'un profil perpendiculaire au bord d'attaque. Cette coupe permet d'avoir les dimensions réelles du profil.

Il est donc nécessaire d'

- Passage d'un profil longitudinal à un profil normal :

Données du profil longitudinal :

$X=x/c$

$Z=z/c$

Φ_b = angle de balayage du bord de fuite

Φ_a = angle de balayage du bord d'attaque

M_0 : mach infini amont

C_0 : corde du profil



$M_n = M_0 \cdot \cos \Phi_a$

$C_n = C_0 \cdot \cos \Phi_a$



Données du profil normal :

$X'=X$

$Z'=Z/\cos \Phi_X$

Avec : $Tg \Phi_X = tg \Phi_a + x/c (tg \Phi_b - tg \Phi_a)$

Avec :

- $\Phi_a = 32.1699^\circ$

- $\Phi_b = 12.8542^\circ$

La figure 53 représente les profils du HTP en streamwise et en normal.

Passage du profil streamwise au profil normal



Figure 54 : Profil HTP en streamwise et normal

Remarque :

Lors d'étude de cas, il est préférable de prendre un profil en normal. C'est suivant ce profil que l'on obtient les résultats les plus représentatifs. C'est donc ce profil qui va être considéré dans la suite du mémoire.

2) Simulation impact avec ONICE2D :

De la même façon que pour le profil NACA0012, le cas d'étude de la phase de décollage d'un A320 a été pris en considération.

Afin de déterminer une cartographie globale des impacts, l'ensemble de la plage de fonctionnement du HTP va être prise en compte, soit : $-12^\circ < \alpha < +12^\circ$.

L'étude va donc se porter sur :

- le décollage avec les 3 cas suivant: $\alpha = -12^\circ$; $+12^\circ$ et 0°
- particules de sable
- profil du HTP en normal

Les courbes résultats pour les cas autres cas (particules d'eau, phase croisière, profil en longitudinal) se trouveront en annexe.

a) Le cas décollage:

Lors de la présentation du profil du HTP, j'ai présenté le passage du cas en longitudinal (streamwise) et le cas normal.

- Données d'entrées :

Profil HTP longitudinal		Profil HTP normal	
Incidence aéro,	$-12^\circ ; 0^\circ ; +12^\circ$	Incidence aéro,	$-12^\circ ; 0^\circ ; +12^\circ$
mach	$M0 = 0.25$	mach	$Mn = 0.212$
Ps	955hPa	Ps	955hPa
Ts	285.15K	Ts	285.15K
Φ particule sable	$\Phi = 220\mu\text{m}$	Φ particule sable	$\Phi = 220\mu\text{m}$
Φ particule d'eau	$\Phi = 2\text{mm}$	Φ particule d'eau	$\Phi = 2\text{mm}$
distribution	$K=1$ monodispersé	distribution	$K=1$ monodispersé
corde	$C0 = 2.70066$	corde	$Cn = 2.286036$

Calcul de Mn et Cn :

Nous avons vu dans le paragraphe précédent que le passage d'un repère longitudinal à un repère normal se fait avec :

$$Mn = M0 \cdot \cos \Phi_a \quad \rightarrow \quad Mn = 0.25 \cdot \cos (32.1699^\circ) \quad \rightarrow \quad \mathbf{Mn = 0.212}$$

$$Cn = C0 \cdot \cos \Phi_a \quad \rightarrow \quad Cn = 2.70066 \cdot \cos (32.1699^\circ) \quad \rightarrow \quad \mathbf{Cn = 2.286036}$$

- Cas pour un angle $\alpha = -12^\circ$

La figure 55 est un extrait de la figure 82 se trouvant en annexes. Sur cette courbe, nous retrouvons en abscisse, le rapport S/SP du profil HTP (normal) et en ordonnée la vitesse U (en m/s) ainsi que l'angle d'impact θ (en degré) d'un côté et de l'autre en ordonnée le coefficient de captation β .

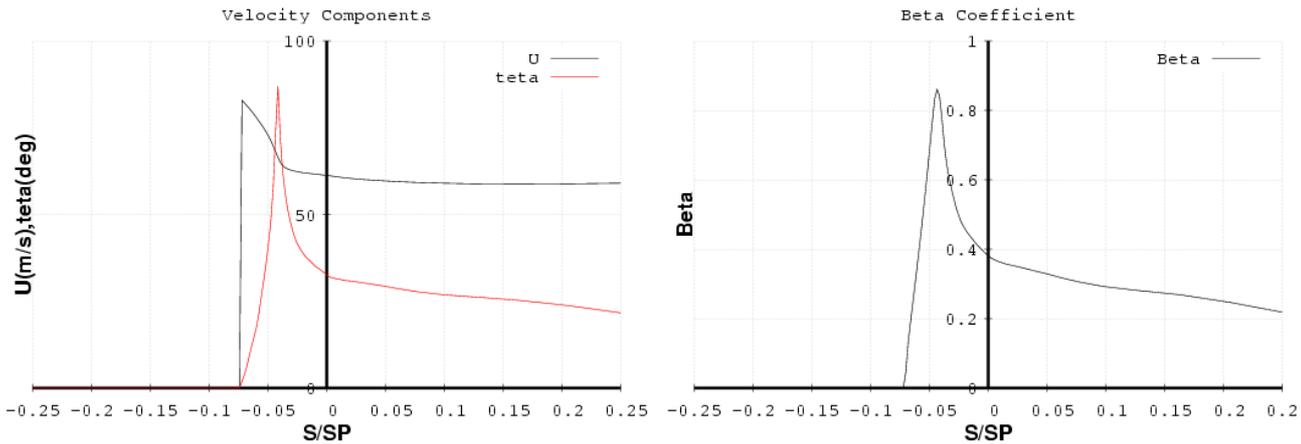


Figure 55 : Cas décollage profil normal avec $Mn=0.212$; Φ particule= $220\mu m$; $\alpha=-12^\circ$

La figure 56 représente le coefficient de pression $-C_p$ en fonction de l'abscisse X (par rapport à la corde).

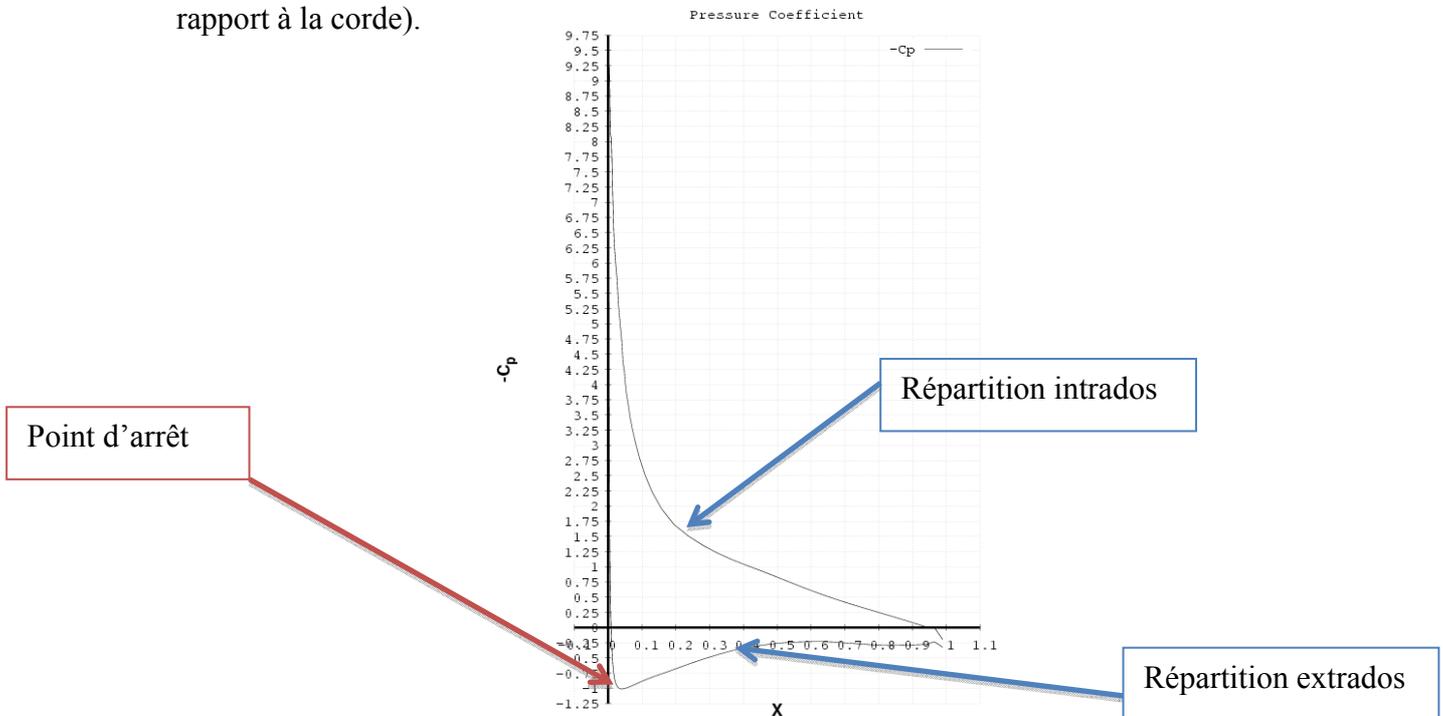


Figure 56 : Coefficient $-C_p$ en fonction de l'abscisse X avec $Mn=0.212$; Φ particule= $220\mu m$; $\alpha=-12^\circ$

- Cas pour un angle de $\alpha=+12^\circ$

La figure 57 est un extrait de la figure 84 se trouvant en annexes. Sur cette courbe, nous retrouvons en abscisse, le rapport S/SP du profil HTP (normal) et en ordonnée la vitesse U (en m/s) ainsi que l'angle d'impact θ (en degré) d'un côté et de l'autre en ordonnée le coefficient de captation β .

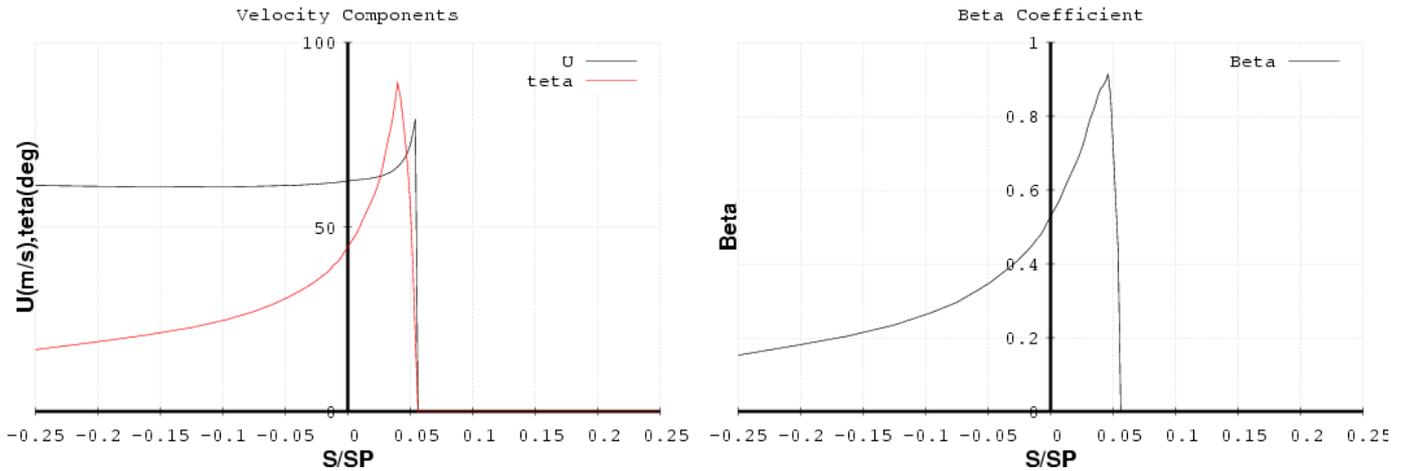


Figure 57 : cas décollage profil normal avec $Mn=0.212$; Φ particule= $220\mu m$; $\alpha=+12^\circ$

La figure 58 représente le coefficient de pression $-C_p$ en fonction de l'abscisse X (par rapport à la corde).

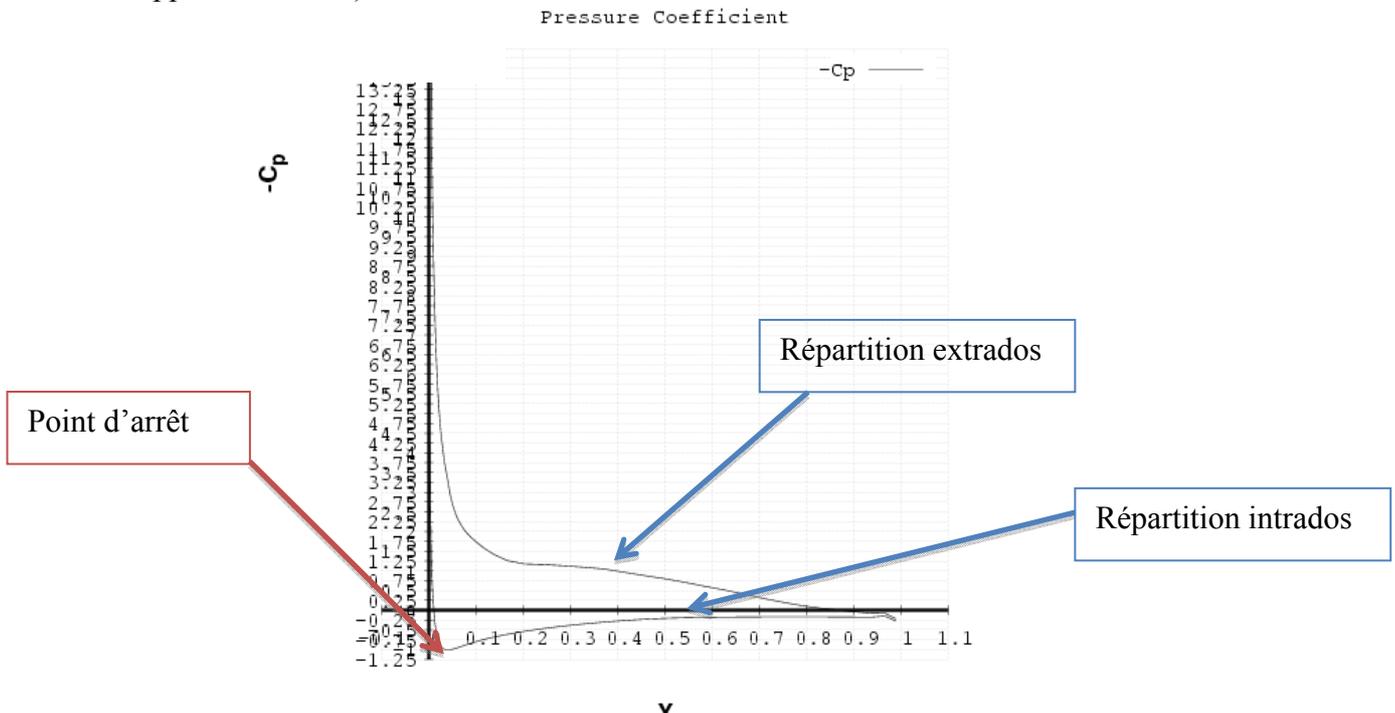


Figure 58 : Coefficient $-C_p$ en fonction de l'abscisse X avec $Mn=0.212$; Φ particule= $220\mu m$; $\alpha=+12^\circ$

- Cas pour un angle de $\alpha=0^\circ$

La figure 60 est un extrait de la figure 86 se trouvant en annexes. Sur cette courbe, nous retrouvons en abscisse, le rapport S/SP du profil HTP (normal) et en ordonnée la vitesse U (en m/s) ainsi que l'angle d'impact θ (en degré) d'un côté et de l'autre en ordonnée le coefficient de captation β .

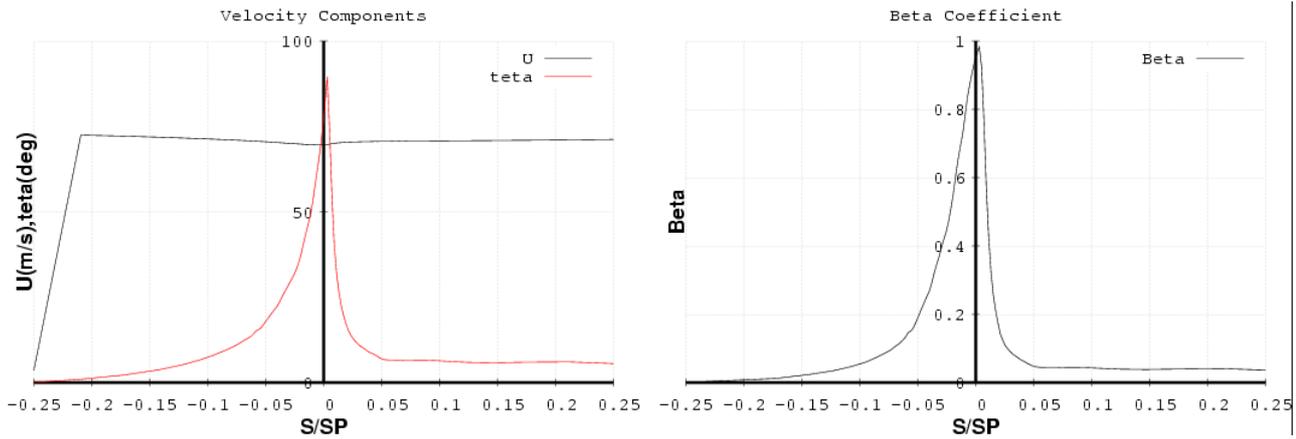


Figure 60 : cas décollage profil normal avec $Mn=0.212$; Φ particule= $220\mu m$; $\alpha=0^\circ$

La figure 61 représente le coefficient de pression $-C_p$ en fonction de l'abscisse X (par rapport à la corde).

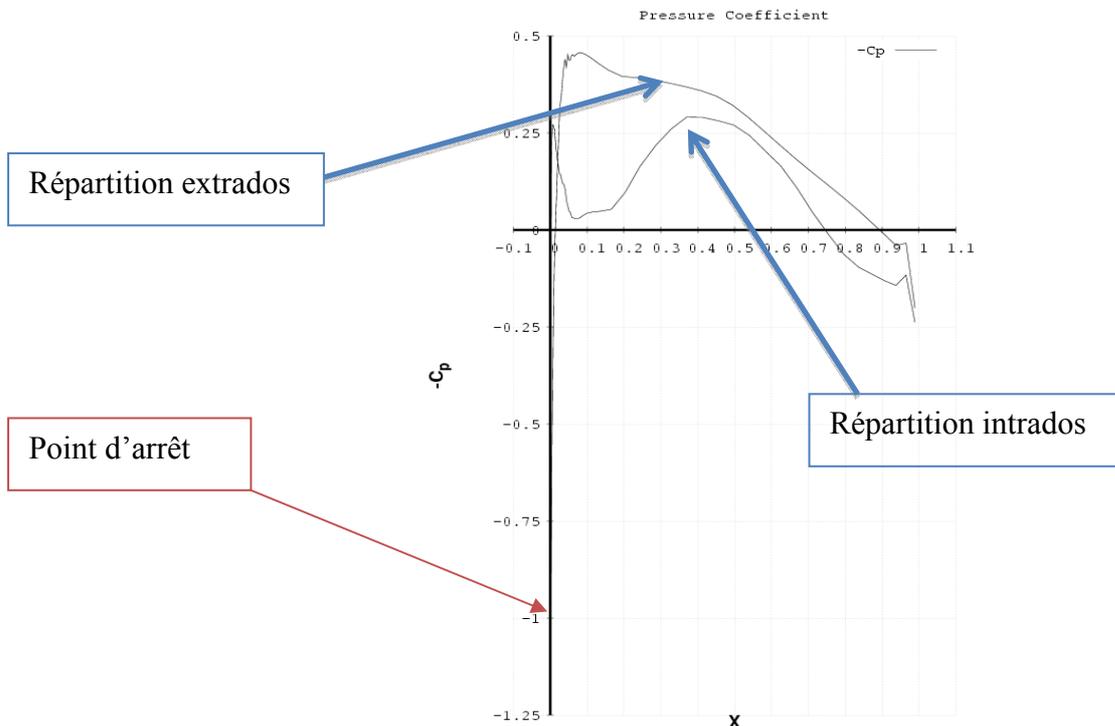


Figure 61 : Coefficient $-C_p$ en fonction de l'abscisse X avec $Mn=0.212$; Φ particule= $220\mu m$; $inc=0^\circ$

b) Analyse :

L'étude du cas $\alpha=-12^\circ$ est quasiment la même que celle pour $\alpha=+12^\circ$ à la différence près où dans un, les impacts sont sur l'extrados et dans l'autre sur l'intrados.

Au niveau de la position du point d'arrêt, visualisé sur les courbes 56 et 58, la symétrie se retrouve. Dans le 1^{er} cas il se trouve à une abscisse $X=0,04$ côté extrados et dans l'autre à $X=0,04$ côté intrados.

Pour les courbes issues des figures 55 et 57, le léger écart observé, surtout pour celle du coefficient de captation β , peut s'expliquer par l'action de la force de pesanteur et de la poussée d'Archimède.

Pour le cas $\alpha=0^\circ$, nous observons un point d'arrêt sur le bord d'attaque. C'est à cette même position que l'on retrouve la captation maximale ainsi qu'un angle d'impact normal à la paroi.

c) Conclusion :

L'étude de la phase décollage dans la plage de fonctionnement du HTP a permis la modélisation des cas extrêmes $\alpha=-12^\circ$ et $\alpha=+12^\circ$.

L'influence et les variations des différents paramètres principaux entrant en jeu dans le phénomène d'érosion ont pu être évalués.

A partir du modèle érosion défini, la perte de masse autour du profil va pouvoir être déterminé suivant le substrat à considérer.

3) Application au modèle érosion:

Dans l'étude préliminaire sur le profil NACA0012, il a été établi que le calcul du taux d'érosion par la méthode simplifiée $Iv=a.U^m$ donnait des résultats probants et représentatifs de ceux observés en laboratoire.

Dans cette partie, la même méthode va être utilisée pour calculer le taux d'érosion autour du profil HTP en normal suivant les différents angles (-12° ; 0° ; $+12^\circ$) permettant d'établir une cartographie des zones à risque.

Comme dans le chapitre précédent, le substrat sera en titane [19].

a) Un exemple : Le cas décollage :

Pour ne pas surcharger la figure 62 qui représente le taux d'érosion en fonction de l'abscisse curviligne, seul les particules solides ont été prises en compte.

Evolution du taux d'érosion Iv et l'angle d'impact θ suivant le profil

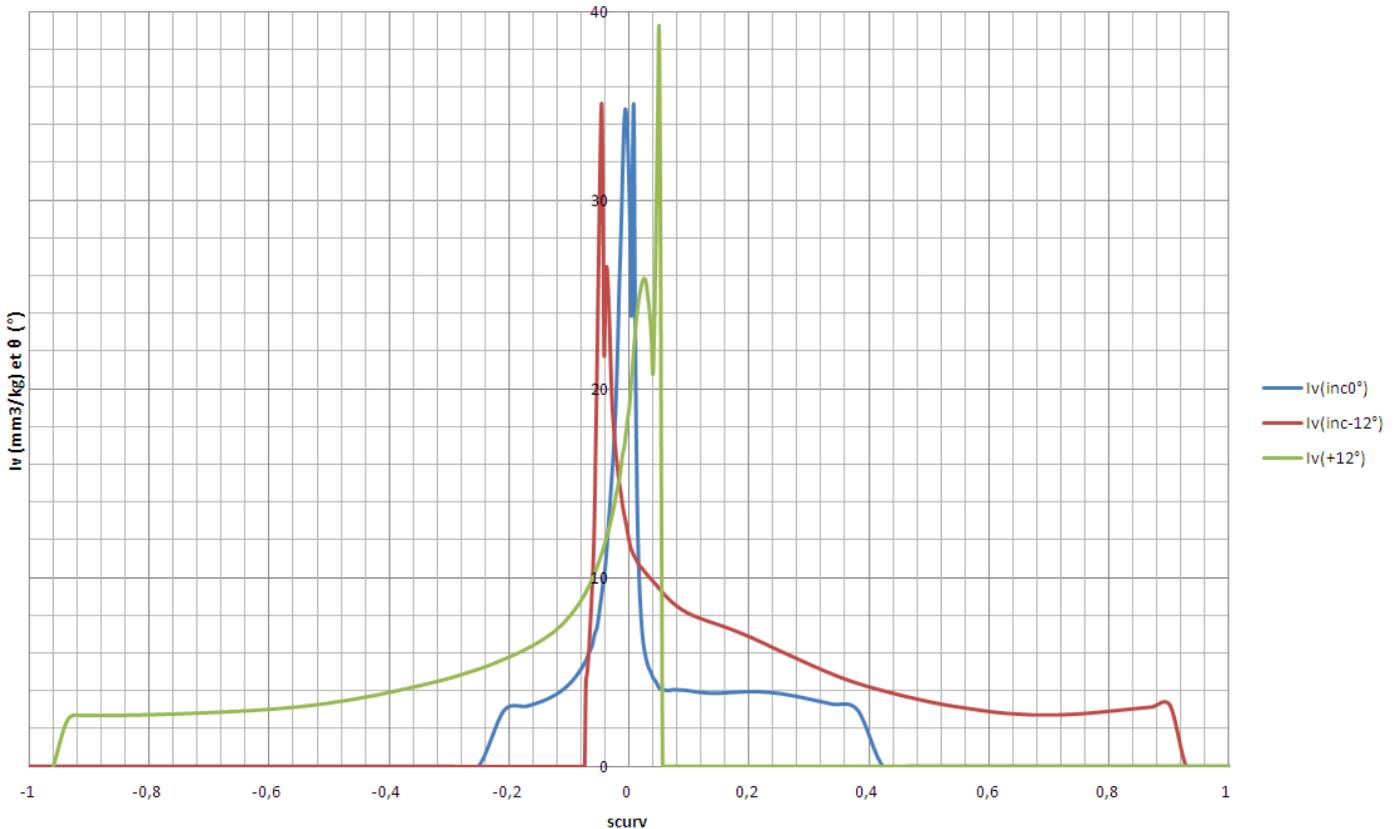


Figure 62 : Calcul du taux d'érosion sur le profil HTP pour le Titane ; décollage ; $Mn=0,21$; Φ particules= $220\mu m$

Analyse :

Si l'on regarde les 3 courbes, de façon macroscopique, représentant le taux d'érosion sur le profil normal, on s'aperçoit que le phénomène d'érosion se produit sur la totalité de la corde (-1 ; 1) et que le taux d'érosion reste constant sur une grande surface.

Si l'on est capable de définir une valeur pour lequel le taux d'érosion est acceptable, alors une zone à protéger pourra être délimité.

Sur cette figure 62, on retrouve les deux pics caractéristiques des angles d'impact autour de 60° pour le titane pour chaque angle (α) de la plage d'utilisation. De plus, on constate que le taux d'érosion est maximal pour un angle $\alpha = +12^\circ$.

Pour comprendre ce résultat, il est nécessaire d'évaluer la vitesse U en fonction de θ pour les différents angles du profil (voir figure 63).

- Evaluation de la vitesse U en fonction de θ pour les différents angles du profil

U en fonction de l'angle d'impact θ suivant la plage de fonctionnement du HTP

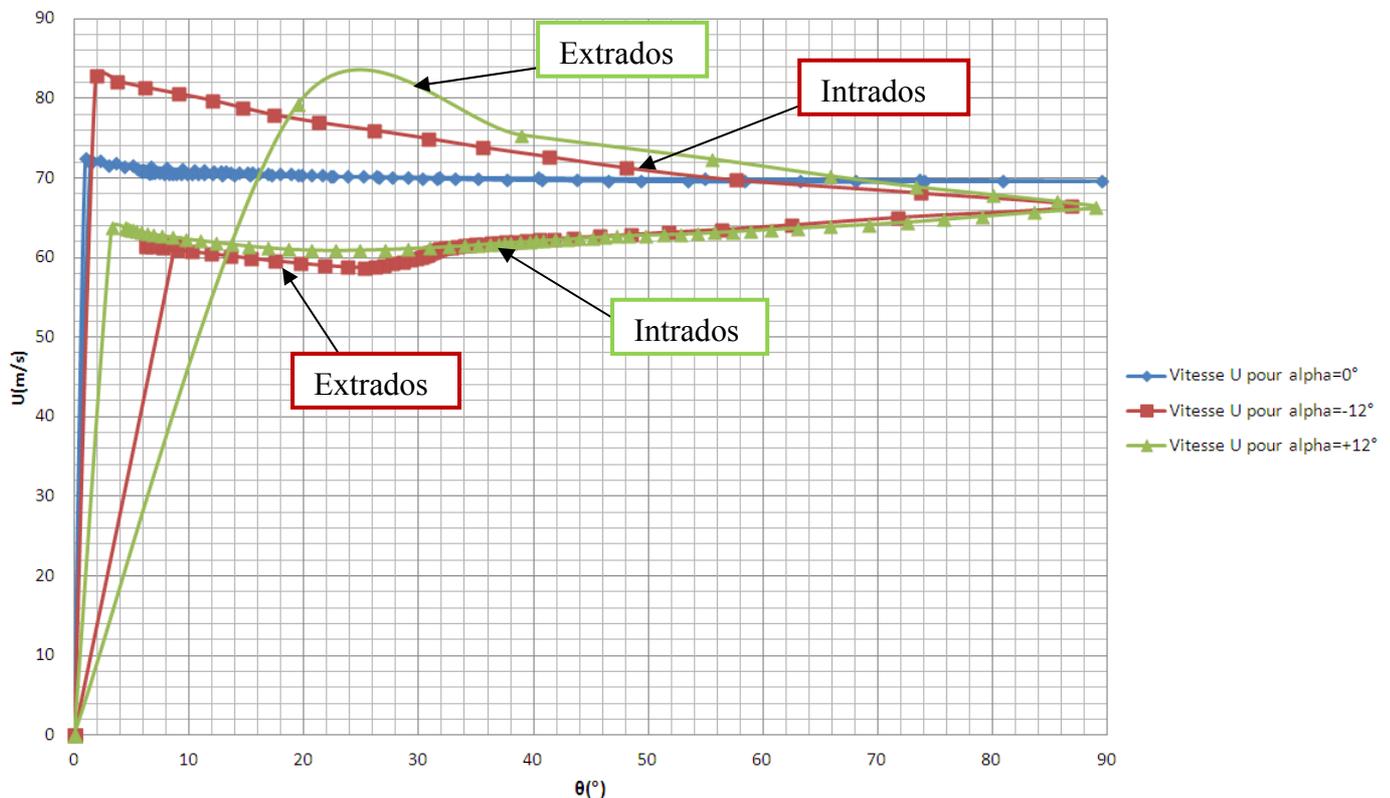


Figure 63 : Représentation de la vitesse d'impact U en fonction de l'angle d'impact θ

Si l'on prend la courbe $U=f(\theta)$ pour l'angle $\alpha=0^\circ$ comme référence, on peut voir que

- $U_{\alpha=+12} > U_{\alpha=0}$ pour $15^\circ < \theta < 65^\circ$ sur l'extrados
- $U_{\alpha=-12} > U_{\alpha=0}$ pour $5^\circ < \theta < 58^\circ$ sur l'intrados

Sachant que l'érosion la plus importante pour le titane se trouve pour des impacts autour de 60° , on comprend pourquoi sur le profil, nous obtenons :

$$Iv_{\max \alpha=+12} > Iv_{\max \alpha=0} = Iv_{\max \alpha=-12}$$

Il est donc nécessaire de prendre en compte toute la plage de fonctionnement, soit entre -12° et $+12^\circ$ pour modéliser l'érosion sur le profil.

Lors du chapitre précédent, il a été établi la relation entre l'angle d'impact θ et le coefficient de captation β . Celle-ci va être présentée dans le paragraphe suivant pour les différents angles de fonctionnement du HTP.

- Evolution de l'angle d'impact θ et du coefficient de captation β

La figure 64 représente l'angle d'impact θ et le coefficient de captation β en fonction de l'abscisse curviligne.

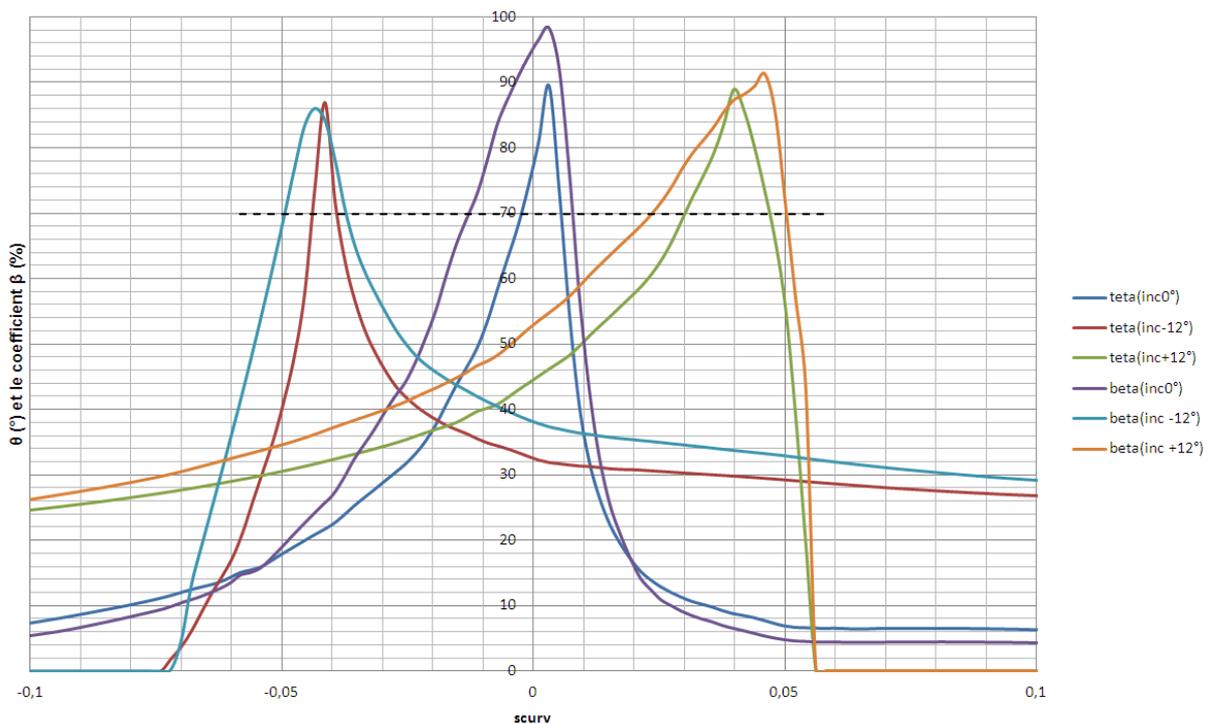


Figure 64 : Evolution de l'angle d'impact θ et le coefficient β pour le cas: décollage ; Mn=0,21 ; profil HTP normal ; Φ particule =220 μ m

On constate tout d'abord que l'angle d'impact θ suit bien le même comportement que le coefficient β .

Ce qui se traduit par :

- Si $\theta \nearrow$ alors $\beta \nearrow$

On remarque que la captation est maximale pour des angles d'impact compris entre 70° et 90° suivant l'angle d'incidence (voir droite en pointillé).

Cela se traduit par une première exigence, avec la nécessité d'avoir un matériau résistant pour des angles d'impacts proche de 90° vu le nombre de particule qui vont endommager la surface dans le temps.

- Si $\theta \searrow$ alors $\beta \searrow$

Ces zones vont être peu impactées et par des angles faibles. Cela nécessite donc l'application d'autres matériaux en surface.

En phase de décollage et suivant la plage d'utilisation du HTP, il faut donc un matériau très résistant pour des angles d'impacts $>70^\circ$ sur 4,5% de la corde extradados et intrados.

Suite à l'analyse de la figure 64, il peut être intéressant de revenir sur le calcul du taux d'érosion en fonction de l'abscisse curviligne pour un matériau répondant aux critères ci-dessus tel que le titane et y intégrer la courbe de l'angle d'impact θ .

- Evolution du taux d'érosion et de l'angle d'impact θ .

La figure 65 représente le taux d'érosion (en mm^3/kg) et l'angle d'impact θ ($^\circ$) en fonction de l'abscisse curviligne pour le cas du titane.

Evolution du taux d'érosion I_v et l'angle d'impact θ suivant le profil

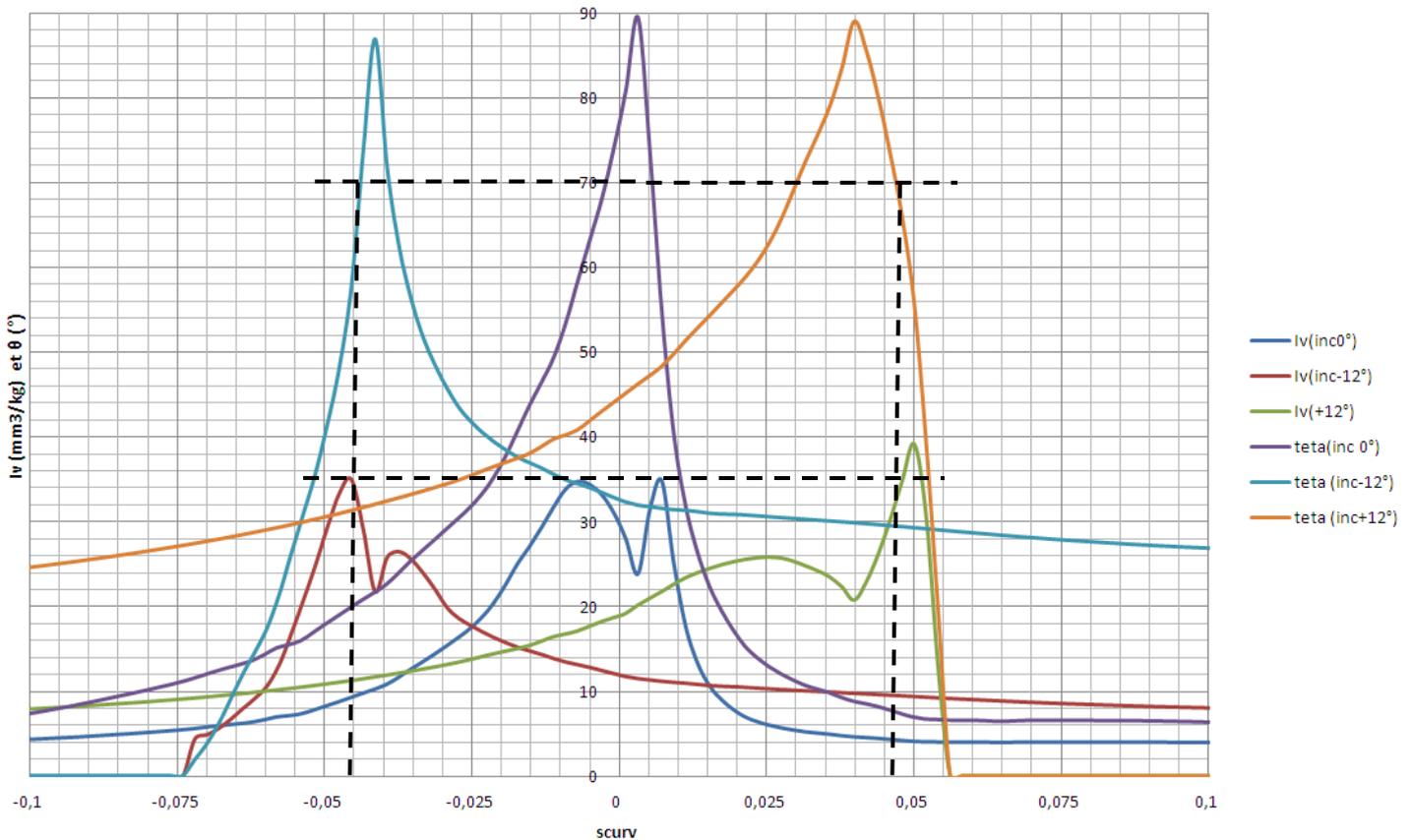


Figure 65 : Evolution du taux d'érosion pour le cas : décollage ; $M_n=0,21$; profil HTP normal ; Φ particule $=220\mu\text{m}$

Sur cette figure est tracée la droite $\theta=70^\circ$ qui sert de repère.

La zone qui couvre 4,5% de la corde et qu'il est nécessaire de protéger est mentionnée.

Si l'on reporte les points sur les courbes des taux d'érosion pour le cas du titane, on trouve: $I_{v_{\max}} = 35 \text{ mm}^3/\text{kg}$.

b) Conclusion :

Dans cette application, il a été démontré l'intérêt des différents paramètres (θ ; β ; U) extraits du code ONICE2D pour exprimer le phénomène d'érosion.

A partir d'une exigence définie arbitrairement $\theta > 70^\circ$, il a été possible de délimiter la zone à protéger et d'établir le taux d'érosion à ne pas dépasser (dans notre cas $I_v=35$ mm³/Kg).

Cette contrainte peut être mise sur l'angle d'impact ou plus simplement sur la valeur de taux d'érosion à ne pas franchir.

C'est cette valeur qu'il est nécessaire d'intégrer dans le cahier des charges pour déterminer le matériau approprié à chaque zone.

Aujourd'hui, cette exigence n'existe pas. Pour l'évaluer, il est nécessaire d'effectuer d'autres essais en laboratoire, de les comparer avec les observations faites sur des avions en service et ainsi affiner le modèle.

V) Conclusions et perspectives

D'un point de vue technique, on a pu voir que l'érosion était un phénomène complexe, dépendant de nombreux paramètres. A partir de ce constat, il a été décidé de se baser sur une approche par prédiction avec un modèle semi empirique (*voir figure 28*). Il s'agit d'associer des résultats expérimentaux à une simulation numérique de l'impact de particule.

Durant les premières études de cas, des hypothèses ont été émises afin de modéliser l'érosion. Elles ont permis par exemple de simplifier le phénomène physique en ne prenant en compte que le moment de l'impact. Mais aussi, de considérer les données issues de la littérature (*tableaux 8 et 9*) comme étant représentatives des conditions observées en vol (décollage/ croisière).

Le code ONICE2D modifié pour extraire les paramètres tel que les composantes de la vitesse (U , U_n/U_t) et l'angle d'impact θ a permis de calculer le taux d'érosion en chaque point du profil.

Les résultats obtenus sont prometteurs. On a vu que le calcul du taux d'érosion par la méthode $I_v = a \cdot U^m$ présente une corrélation avec les essais en laboratoire.

Elle a permis d'identifier les zones à risque suivant le matériau appliqué.

Cependant, les nombreuses hypothèses prises en compte telle que l'impact d'un grain de sable \approx goutte d'eau, amène à garder de la retenue (surtout dans le cas croisière).

Maintenant que l'on appréhende mieux le moyen de simuler, modéliser ce phénomène, il est nécessaire de développer la partie prédiction et réponse du matériau en effectuant des essais en laboratoire sur les matériaux utilisés par Airbus.

C'est dans cette perspective que le département des matériaux et procédés travaille en étroite collaboration avec le centre de recherche Innovation Works à Ottobrunn sur la corrélation entre les résultats en laboratoire avec ceux observés en service.

Par le biais de ce projet recherche, des essais sur les matériaux utilisés contre l'érosion (le titane TiA6V4 et l'acier 15-5PH) sont envisagés.

(Un exemple de matrice d'essai se trouve en Annexes)

Ces essais vont permettre de définir précisément les valeurs a et m pour différents angles d'impact et vitesse de particule. Ainsi, on sera à même de créer un fichier, mis à jour suite à différentes campagnes d'essai, pour affiner notre modèle d'érosion.

A terme, le code ONICE2D avec un module dédié pourrait être utilisé pour la prédiction d'érosion.

D'un point de vue plus personnel, ce stage m'a permis de travailler sur un sujet associant les matériaux et l'aérodynamique. Ainsi, j'ai pu approfondir mes connaissances dans les deux domaines. Mettre en relation mon travail actuel avec mes études en aérodynamique étant à l'origine du choix du sujet.

Ce thème non étudié au sein d'AIRBUS m'a obligé à prendre du recul sur les résultats obtenus, à avoir l'esprit critique sur les hypothèses prises afin de toujours garder en tête l'application industrielle.

Enfin, le fait de savoir que le travail que j'effectuais aurait des applications concrètes dans mon futur fut pour moi source de motivation.

VI) Annexes

1) Caractéristiques de l'eau :

Afin de comprendre le mécanisme d'interaction entre la goutte et la paroi, nous avons besoin tout d'abord de définir la goutte d'eau avec ses caractéristiques.

a. Viscosité dynamique :

μ_w est la viscosité dynamique qui est égale à $1.75 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ à $T=0^\circ\text{C}$

La loi de Sutherland peut être utilisée pour évaluer la viscosité dynamique de l'eau en fonction de la température.

$$\mu_w = a \cdot 10^{\frac{b}{T-c}} \quad \text{Avec } a=2.414 \cdot 10^{-5}, b=247.8\text{K}, c=140\text{K}$$

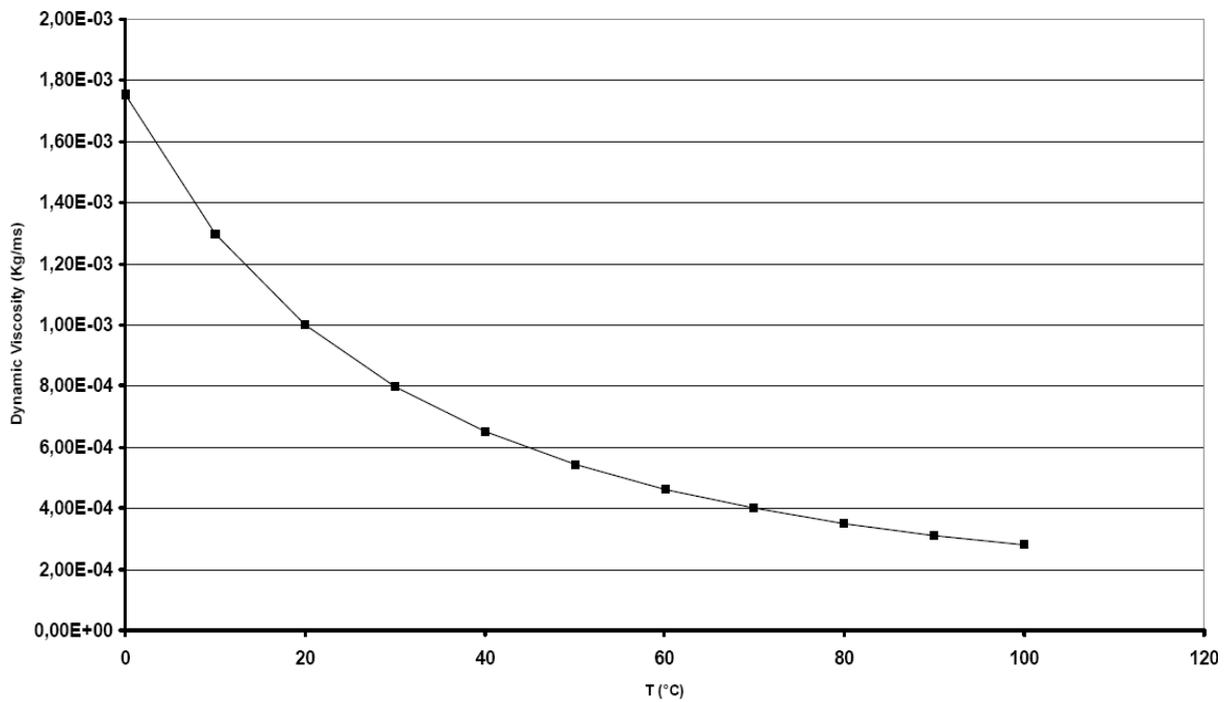


Figure 66 : viscosité dynamique de l'eau en fonction de la température – Dezitter [2]

b. Tension de surface :

σ_w est la tension de surface de l'eau qui est égale à $0.07564 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-2}$ à $T=0^\circ\text{C}$

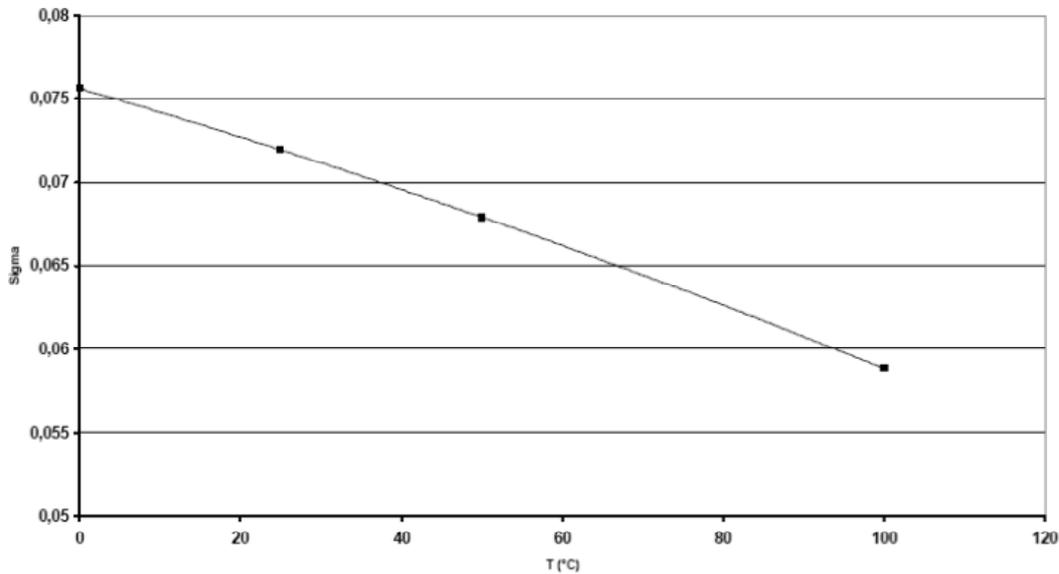


Figure 67 : tension de surface en fonction de la température – Dezitter [2]

1. Nombres sans dimension :

Maintenant que nous avons caractérisé la goutte d'eau, il nous faut définir les différents nombres sans dimension qui vont décrire précisément l'interaction goutte/paroi.

a. Nombre de Weber :

Le nombre de Weber est connu pour être représentatif du régime d'impact. Il correspond au rapport des forces d'inertie et de la tension de surface.

$$We = \frac{\rho_w V_n^2 d}{\sigma_w}$$

Avec :

- ρ_w : la densité de l'eau = $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- V_n : la vitesse normale de goutte ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
- d : le diamètre de goutte (m)
- σ_w : la tension de surface ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$)

b. Nombre de Reynolds :

La dissipation visqueuse joue aussi un rôle important quand la goutte impacte une surface en atténuant les instabilités de surface, et, est représentée par le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho_w V_n d}{\mu_w}$$

Avec :

- ρ_w : la densité de l'eau = 1000 kg.m⁻³
- V_n : la vitesse de goutte (m.s⁻¹)
- d : le diamètre de goutte (m)
- μ_w : la viscosité dynamique (kg .m⁻¹.s⁻¹)

c. Température sans dimension T*:

L'influence de la température de surface est représentée par le nombre sans dimension suivant basé sur la température d'ébullition et la température de Leidenfrost.

$$T^* = \frac{T_{surface} - T_E}{T_L - T_E}$$

Avec :

- $T_{surface}$: la température de surface (K)
- T_E : la température d'ébullition (K)
- T_L : la température de Leidenfrost (K)

Remarque :

T_E et T_F dépendent de la pression statique. Donc, T^* dépend aussi de la pression statique.

d. Nombre d'OHNESORGE :

Il permet de caractériser la déformation des gouttes. Il est utilisé dans les études expérimentales. Il s'agit du rapport entre les forces visqueuses avec la tension superficielle et les forces d'inertie.

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\mu_w}{\sqrt{\rho_w \cdot \sigma_w} d}$$

Avec :

- We : le nombre de Weber
- Re : le nombre de Reynolds

e. Le paramètre d'éclaboussure K :

Les limites entre les différents régimes sont habituellement représentées par un seul nombre sans dimension : le paramètre K.

Il est fonction du nombre de Weber et du nombre de Reynolds.

$$K = We \cdot Oh^{-\beta}$$

Avec :

- We : le nombre de Weber
- Oh : le nombre d'Ohnesorge
- $\beta = 2/5$ (Cossali [7])

Remarque :

Dans la littérature, différentes valeurs sont données au paramètre β . Cette valeur est en accord avec différents modèles donc celui de *Mundo et Al* [3] [4], *Cossali* [7], ainsi que *García Rosa et al* [5].

2. Le phénomène de distorsion des gouttes d'eau :

Nous avons vu précédemment (2.3.4) l'analyse de la distorsion faite par *H.Li et Al* [13]. D'un autre côté, *W.F.Adler* [10] présente les larges gouttes comme étant moins affectées par l'interaction avec l'écoulement.

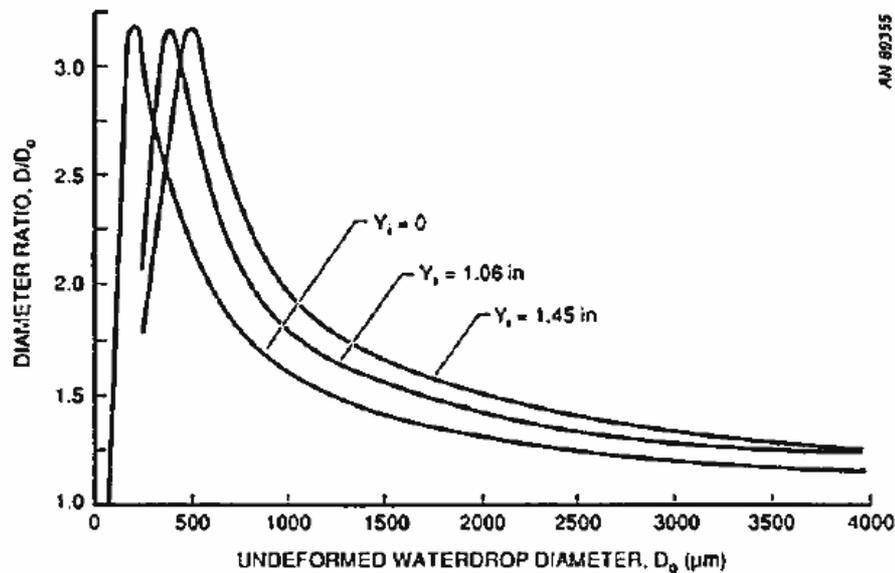


Figure 68 : Distorsion d'une goutte d'eau à Mach 4 à différentes positions– *W.F.Adler* [10]

Dans son étude, il expose que les gouttes de diamètre $\geq 2\text{mm}$ ne sont plus affectées par l'effet de distorsion.

En sachant que ce phénomène est intimement lié au Weber et au diamètre de goutte, il est difficile de comprendre cette *figure 18*. C'est pourquoi, elle se trouve en annexe.

3. Influence de l'angle d'impact :

Le tableau ci-dessous donne les valeurs pour a et n suivant l'angle pour une vitesse d'impact comprise entre 30-50m/s et des tailles de grains compris entre 0.5-0.8mm.

Metal	$\alpha = 20^\circ$		$\alpha = 45^\circ$		$\alpha = 90^\circ$	
	a	m	a	m	a	m
Lead	4.8×10^{-3}	2.7	5.5×10^{-3}	2.5	2.5×10^{-2}	2.0
Tin	1.3×10^{-3}	2.7	4.8×10^{-4}	3.1	6.4×10^{-6}	4.0
Zinc	2.4×10^{-4}	2.8	1.6×10^{-5}	3.5	2.2×10^{-5}	3.2
Aluminium	1.7×10^{-4}	3.1	4.1×10^{-4}	2.8		
Cadmium	1.5×10^{-3}	2.6	2.1×10^{-4}	3.1	1.2×10^{-4}	3.0
Copper	2.2×10^{-4}	2.8	1.9×10^{-4}	2.8	6.6×10^{-5}	2.9
Nickel	1.6×10^{-4}	2.7	3.5×10^{-4}	2.6	1.3×10^{-4}	2.7
Pure iron	2.3×10^{-5}	3.2	4.1×10^{-4}	2.6	4.4×10^{-5}	3.0
Cobalt	2.8×10^{-5}	2.9	7.6×10^{-5}	2.9	8.1×10^{-4}	2.4
Titan	4.1×10^{-5}	2.9	1.5×10^{-5}	3.4	7.0×10^{-5}	3.0
Molybdenum	8.4×10^{-5}	2.5	7.4×10^{-5}	2.9	4.3×10^{-5}	2.9
Niobium	5.5×10^{-5}	2.7	9.1×10^{-5}	2.8	2.0×10^{-4}	2.5
Tungsten	5.5×10^{-6}	3.1	1.3×10^{-5}	3.1	3.2×10^{-6}	3.4

Figure 69 : Valeurs du coefficient a et exposant m suivant l'angle d'impact pour différents matériaux – I.Kleis et Al [191]

4. Essai érosion au sable :

a. Exemple d'une fiche produit:

On y trouve un rapide descriptif ainsi que les différents paramètres qui caractérisent le grain.

Description:	Quartz silica sand for man-made fibres. Used in filtering hot, molten prepun textile filament. Washed, dried and graded, non-staining, closely graded, hard quartz material. Lower Greensand extraction, free from clay, silt or organic matter.
Grade:	60/85
Particle size:	250 μm max 10% retained 180 μm max 10% passing
Shape:	semi-rounded to sub angular
Colour:	Silver-grey to off white

Figure 70 : Fiche produit du matériau érodant, fournisseur : David Bell - O.Rohr et Al [16]

Photographie des grains décrits figure 32 à l'aide d'un Microscope Electronique à Balayage (MEB) :

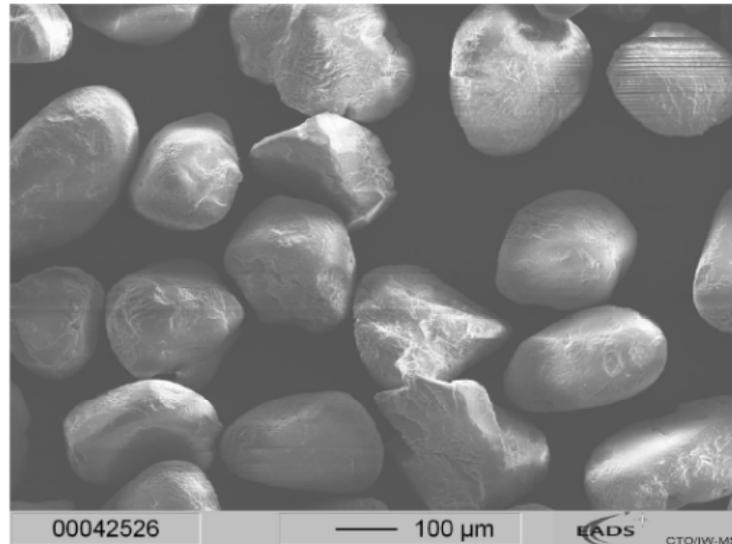


Figure 71 : Image au MEB des grains de silice, grade 60/85, David Bell- *O.Rohr et Al* [16]

b. Exemple d'un banc d'essai utilisé pour simuler l'érosion au sable :

- Schéma de principe :

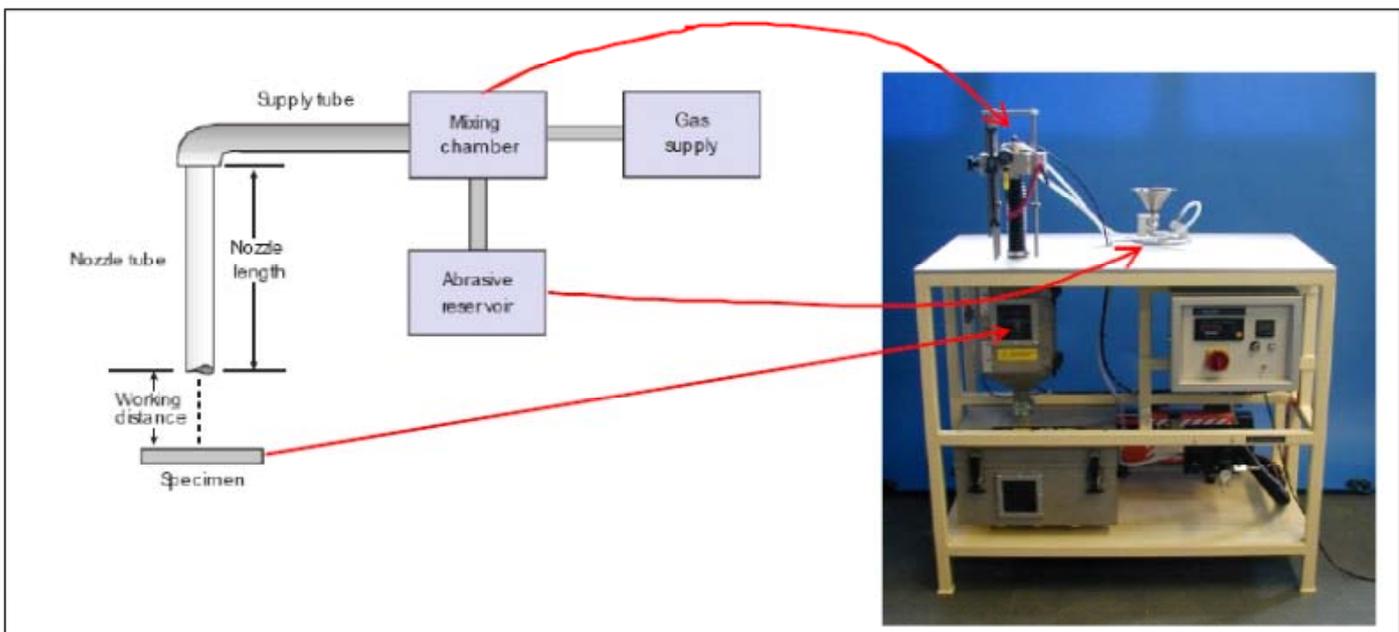


Figure 72 : Schéma et photo du banc d'essai du Plint TE 68- *O.Rohr et Al* [16]

- Paramètres :

Parameter	Value
Particle velocity:	55 m/s
Nozzle-sample distance:	20 mm
Particle feed rate:	2 g/min
Erodent mass:	5 g
Type of erodent:	Rounded silica sand, grid size 60/85, mean diameter approx. 220 μ m
Impact angle	20° & 90°
Sample size:	20 mm x 40 mm

Figure 73 : Récapitulatif des paramètres d'essais du Plint TE 68 - *O.Rohr et Al* [16]

2) Le code ONICE2D

I. Présentation :

ONICE2D est le code officiel pour simuler l'accrétion de glace utilisé par le département EGA.

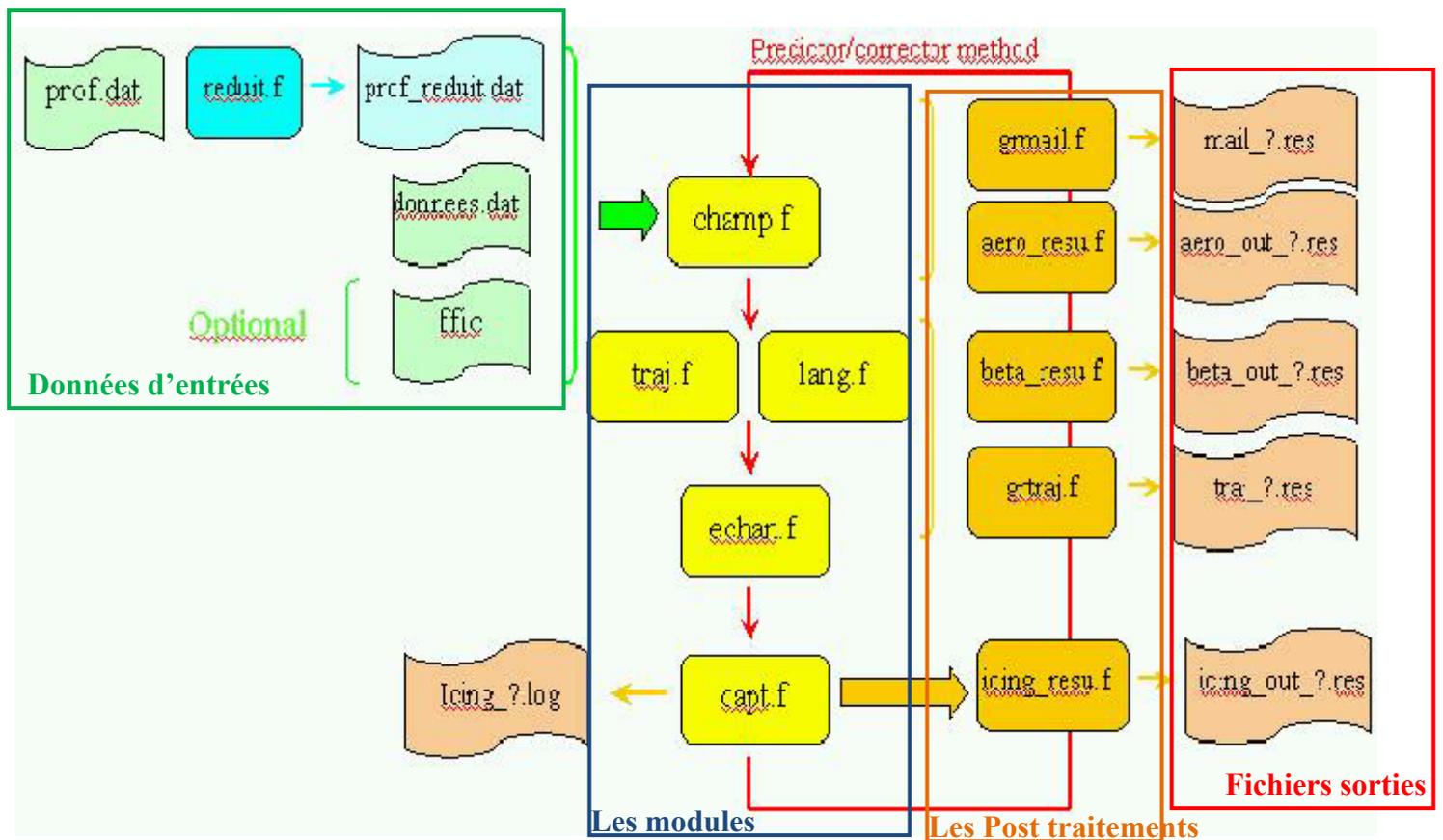


Figure 74 : diagramme complet et détaillé du processus

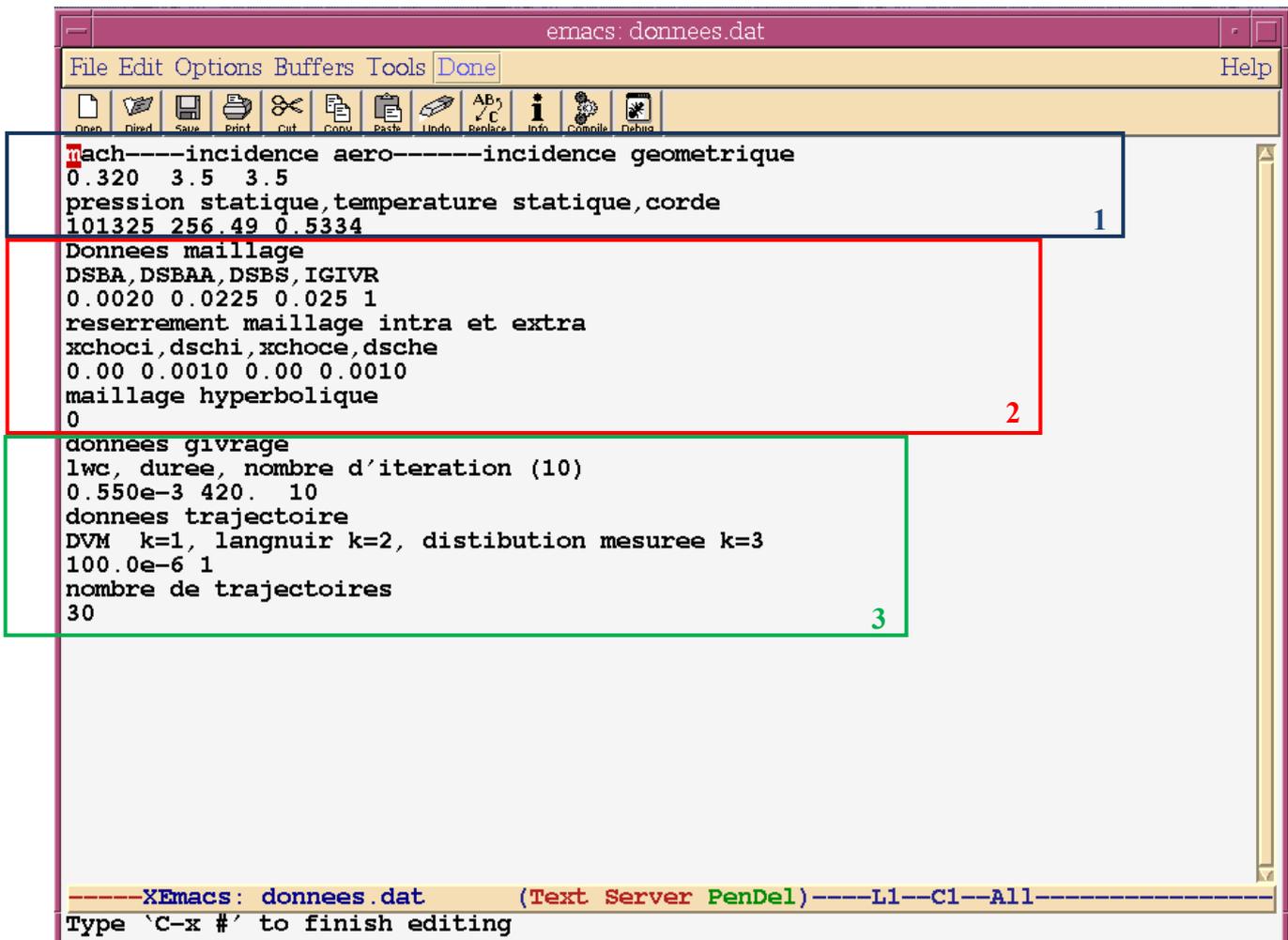
Je vais présenter rapidement les différents blocs avec dans l'ordre les données d'entrées et les différents modules non définis dans le corps du texte :

- Echan.f
- Capt.f

II. Les données d'entrées

1. Le fichier : données.dat :

Ce fichier se divise en 3 blocs et contient les conditions aérodynamiques (en 1), les données pour le maillage (en 2) et les conditions de givrage (en 3).



```

-----incidence aero-----incidence geometrique
0.320 3.5 3.5
pression statique,temperature statique,corde
101325 256.49 0.5334
1
Donnees maillage
DSBA,DSBAA,DSBS,IGIVR
0.0020 0.0225 0.025 1
reserrement maillage intra et extra
xchoci,dschi,xchoce,dsche
0.00 0.0010 0.00 0.0010
maillage hyperbolique
0
2
donnees givrage
lwc, duree, nombre d'iteration (10)
0.550e-3 420. 10
donnees trajectoire
DVM k=1, languir k=2, distribution mesuree k=3
100.0e-6 1
nombre de trajectoires
30
3
-----XEmacs: donnees.dat (Text Server PenDel)-----L1--C1--All-----
Type `C-x #' to finish editing

```

Figure 75 : Extrait du fichier données.dat

a. Le bloc 1 : les données aérodynamiques

Dans cette partie, nous trouvons les conditions de vol avec les différents paramètres influents tel que la vitesse (mach) l'angle d'incidence ainsi que la pression et température statique.

b. Le bloc 2 : Les données pour le maillage

Comme son nom l'indique, il s'agit des données du maillage. Ces données n'ont jamais été modifiées durant le stage. Nous avons principalement joué sur les données des deux autres blocks.

c. Le bloc 3 : Les données givrage

Cette partie concerne la particule. Il s'agit donc d'un block important pour la simulation de l'érosion. Nous y trouvons la concentration, le temps d'exposition, le diamètre des particules, le type de distribution et le nombre de trajectoires.

2. Prof.dat :

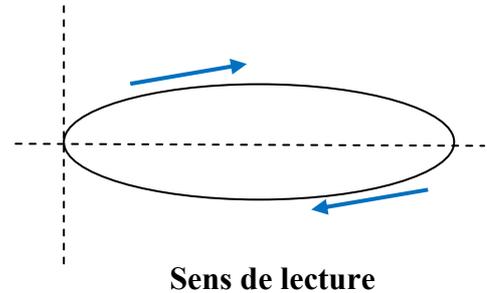
Ce fichier contient les coordonnées en (X, Y) du profil étudié. L'unité est sans dimension. Il s'agit en fait de coordonnées en (X/Corde, Y/Corde). On commence par le bord de fuite intrados, on passe par le bord d'attaque et l'on finit au bord de fuite extrados. En abscisse, nous avons donc : $X/C=1 \rightarrow X/C=0$ (bord d'attaque) $\rightarrow X/C=1$

Exemple d'un profil avec le bon formalisme.

```

File Edit Options Buffers Tools IDLWAVE Debug Done
Open Direct Save Print Cut Copy Paste Undo Redo Info Compile Debug
215 108
1. 0000000000000000 0. 0000000000000000E+000
0. 9900000000000000 -1. 8666666666666670E-003
0. 9800000000000000 -3. 6000000000000000E-003
0. 9700000000000000 -5. 2333333333333300E-003
0. 9500000000000000 -8. 2666666666666670E-003
0. 9250000000000000 -1. 1700000000000000E-002
0. 9000000000000000 -1. 4900000000000000E-002
0. 8750000000000000 -1. 7966666666666670E-002
0. 8500000000000000 -2. 0900000000000000E-002
0. 8250000000000000 -2. 3733333333333300E-002
0. 8000000000000000 -2. 6500000000000000E-002
0. 7750000000000000 -2. 9233333333333300E-002
0. 7500000000000000 -3. 1866666666666670E-002
0. 7250000000000000 -3. 4400000000000000E-002
0. 7000000000000000 -3. 6900000000000000E-002
0. 6750000000000000 -3. 9266666666666670E-002
0. 6500000000000000 -4. 1600000000000000E-002
0. 6250000000000000 -4. 3800000000000000E-002
0. 6000000000000000 -4. 5900000000000000E-002
0. 5750000000000000 -4. 7900000000000000E-002
0. 5500000000000000 -4. 9800000000000000E-002
0. 5250000000000000 -5. 1566666666666670E-002
0. 5000000000000000 -5. 3200000000000000E-002
0. 4750000000000000 -5. 4700000000000000E-002
0. 4500000000000000 -5. 6066666666666670E-002
0. 4250000000000000 -5. 7233333333333300E-002
0. 4000000000000000 -5. 8266666666666670E-002
0. 3750000000000000 -5. 9100000000000000E-002
0. 3500000000000000 -5. 9700000000000000E-002
0. 3250000000000000 -6. 0100000000000000E-002
0. 3000000000000000 -6. 0233333333333300E-002
0. 2750000000000000 -6. 0066666666666670E-002
0. 2500000000000000 -5. 9600000000000000E-002
0. 2250000000000000 -5. 8800000000000000E-002
0. 2000000000000000 -5. 7566666666666670E-002
0. 1750000000000000 -5. 5866666666666670E-002
0. 172699609714286 -5. 592562457142860E-002
0. 162705085904762 -5. 507764104761910E-002
0. 153023772285714 -5. 416318838095240E-002
0. 1500000000000000 -5. 3633333333333300E-002
0. 1436586900000000 -5. 318830942857140E-002
0. 134612860476190 -5. 215199695238100E-002
0. 125889305047619 -5. 106029361904760E-002
0. 1250000000000000 -5. 0733333333333300E-002
0. 117488023523810 -4. 991319942857140E-002
XEmacs: airfoi1.pro (IDLWAVE Server PenDel Font)

```



```

3. 7666666666666670E-004 -2. 9333333333333300E-003
2. 819898095238090E-004 -2. 993120190476190E-003
2. 5000000000000000E-004 -2. 3666666666666670E-003
1. 4502333333333300E-004 -2. 147150857142860E-003
1. 2500000000000000E-004 -1. 6333333333333300E-003
6. 042638095238090E-005 -1. 397863714285710E-003
1. 712085714285710E-005 -7. 613724761904760E-004
3. 021323809523810E-006 -2. 699045714285710E-004
0. 0000000000000000E+000 0. 0000000000000000E+000
3. 021323809523810E-006 2. 699045714285710E-004
1. 712085714285710E-005 7. 613724761904760E-004
6. 042638095238090E-005 1. 397863714285710E-003
1. 2500000000000000E-004 1. 6333333333333300E-003
1. 4502333333333300E-004 2. 147150857142860E-003
2. 5000000000000000E-004 2. 3666666666666670E-003
2. 819898095238090E-004 2. 993120190476190E-003
3. 7666666666666670E-004 2. 9333333333333300E-003

```

Intrados

Extrados

Figure 76: Extrait du fichier prof.dat à la séparation intrados/extrados

Figure 77 : Extrait du fichier prof.dat

Remarque :

La première ligne du fichier nous donne le nombre de points ainsi que la position du bord d'attaque.

III. Les modules :

Cette chaîne de calcul a été développée pour déterminer la forme des dépôts de givre suivant des conditions définies.

A chaque calcul est associé un module (voir *figure 2*) :

- Champ.f : il s'agit d'un module pour générer le maillage 2D et calculer le champ aérodynamique,
- Traj.f & lang.f : module pour calculer les trajectoires des gouttes en 2D selon une méthode lagrangienne, et les coefficients de captation
- Echan.f : module pour calculer la couche limite en 2D
- Capt.f : module pour le bilan thermodynamique 2D et l'accrétion de glace.

Les 2 premiers modules ont été présentés dans le chapitre II « Méthodes et outils ».

Je vais donc m'attarder sur les 2 autres modules du code ONICE2D.

1. Le module : echan.f :

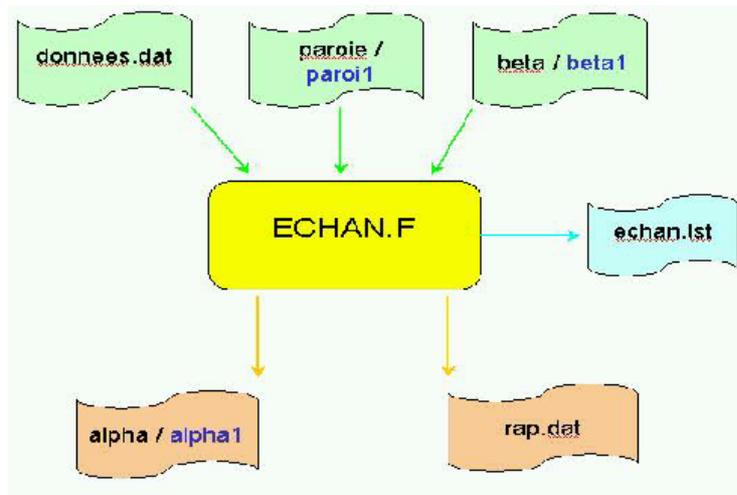


Figure 78 : Entrée et sortie du module

Ce module permet de calculer le coefficient d'échange convectif externe h qui est un paramètre important dans la modélisation.

La détermination de ce coefficient se fait par le calcul de la couche limite, calcul qui prend en compte l'effet de la glace sur la position de la transition laminaire/turbulent.

En 2D et dans le cas d'un profil givré, la position de la transition est déduite de la valeur du nombre de Reynolds relatif à la rugosité :

$$R_{ks} = \frac{Ue ks}{\nu}$$

Avec :

- Ue est la valeur de la vitesse à l'extérieur de la couche limite,
- ks est la valeur de la rugosité en « équivalent grain de sable »,
- ν est la viscosité cinématique.

Quand la valeur du nombre de Reynolds devient supérieure à 600, la couche limite est supposée turbulente.

2. Le module : capt.f :

d. Présentation :

Le module capt.f calcule l'accrétion de glace ainsi que l'équilibre thermodynamique en 2D.

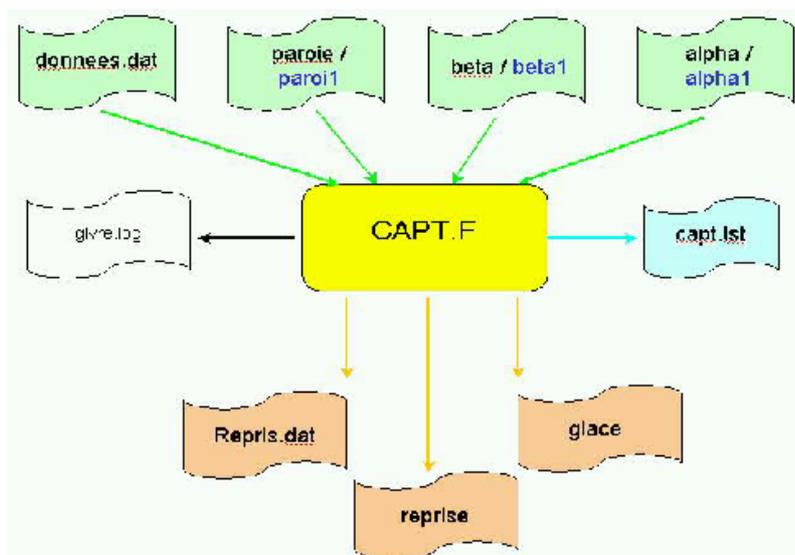


Figure 79 : Entrée et sortie du module CAPT.f

e. Bilan thermique et thermodynamique :

On fait comme hypothèses que :

- Les pertes par rayonnement sont négligeables (valide si $LWC > 0.1 \text{ g.m}^{-3}$)
- Les transformations sont instantanées,
- La température est uniforme sur chaque élément du maillage.
- Le bilan thermodynamique à la **paroi** résulte des phénomènes physiques suivants :
- Transformation en énergie thermique de l'énergie cinétique de l'eau impactant,
- Transformation thermodynamique de l'eau impactant,
- Transformation thermodynamique de l'eau qui ruisselle,
- Echanges convectifs et évaporation ou sublimation.

f. Accrétion de glace :

Dans le cas 2D, la forme de givre est simulée en ajoutant une épaisseur de givre d_{glace} constante sur chaque élément du maillage. Cette épaisseur dépend de la masse de glace qui a gelé durant la période considérée et est définie comme suit :

$$d_{\text{glace}} = \frac{\dot{m}_g \Delta t}{\rho_g S}$$

Avec :

\dot{m}_g : Densité surfacique de flux massique de glace ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)

Δt : Durée givrage (s)

ρ_g : Masse volumique de la glace (kg.m^{-3})

S : Surface (m^2)

d_{glace} : Epaisseur de glace (m)

Les nouvelles coordonnées sont alors obtenues grâce à la relation :

$$x_i = x_i + d_{\text{glace}} \cdot \hat{x}_i$$

avec :

x_i : coordonnées du centre de la maille dans la direction i

\hat{x}_i : i^{eme} composante du vecteur normal à la maille

3. Conclusion :

Entre le corps de texte et les annexes, les différents modules ont été présentés et s'enchaînent successivement pour permettre le calcul du dépôt de glace à chaque itération.

3) Le modèle d'érosion

I. Les paramètres représentatifs de l'érosion :

A partir de la bibliographie (voir annexe I), j'ai extrait les paramètres influents à la paroi:

- U_n : la vitesse normale
- U_t : la vitesse tangentielle
- U : la vitesse totale
- θ : l'angle d'impact à la paroi

Ce sont ces données tirées du calcul des trajectoires de gouttes qui vont influencer le comportement du matériau impacté. Je vais donc intégrer ces données dans le module traj.f

A partir de la figure 79 (voir page suivante), il est possible d'extraire:

- L'angle α : angle entre le repère cartésien (x,y) et mon repère local (t,n)

$$\text{Avec } \alpha = \tan^{-1}\left(\frac{Y(i+1)-Y(i-1)}{X(i+1)-X(i-1)}\right)$$

- U_{gt} : Vitesse tangentielle

$$\text{Avec } U_{gt} = U_{tx} + U_{ty} = U_x \times \cos(\alpha) + U_y \times \sin(\alpha)$$

- U_{gn} : Vitesse normale

$$\text{Avec } U_{gn} = U_{nx} + U_{ny} = -U_x \times \sin(\alpha) + U_y \times \cos(\alpha)$$

- U : Vitesse totale

$$\text{Avec } U = \sqrt{(U_{gn}^2 + U_{gt}^2)}$$

- θ : angle d'impact au point i considéré

$$\text{Avec } \theta = \tan^{-1}\left(\frac{U_{gn}}{U_{gt}}\right)$$

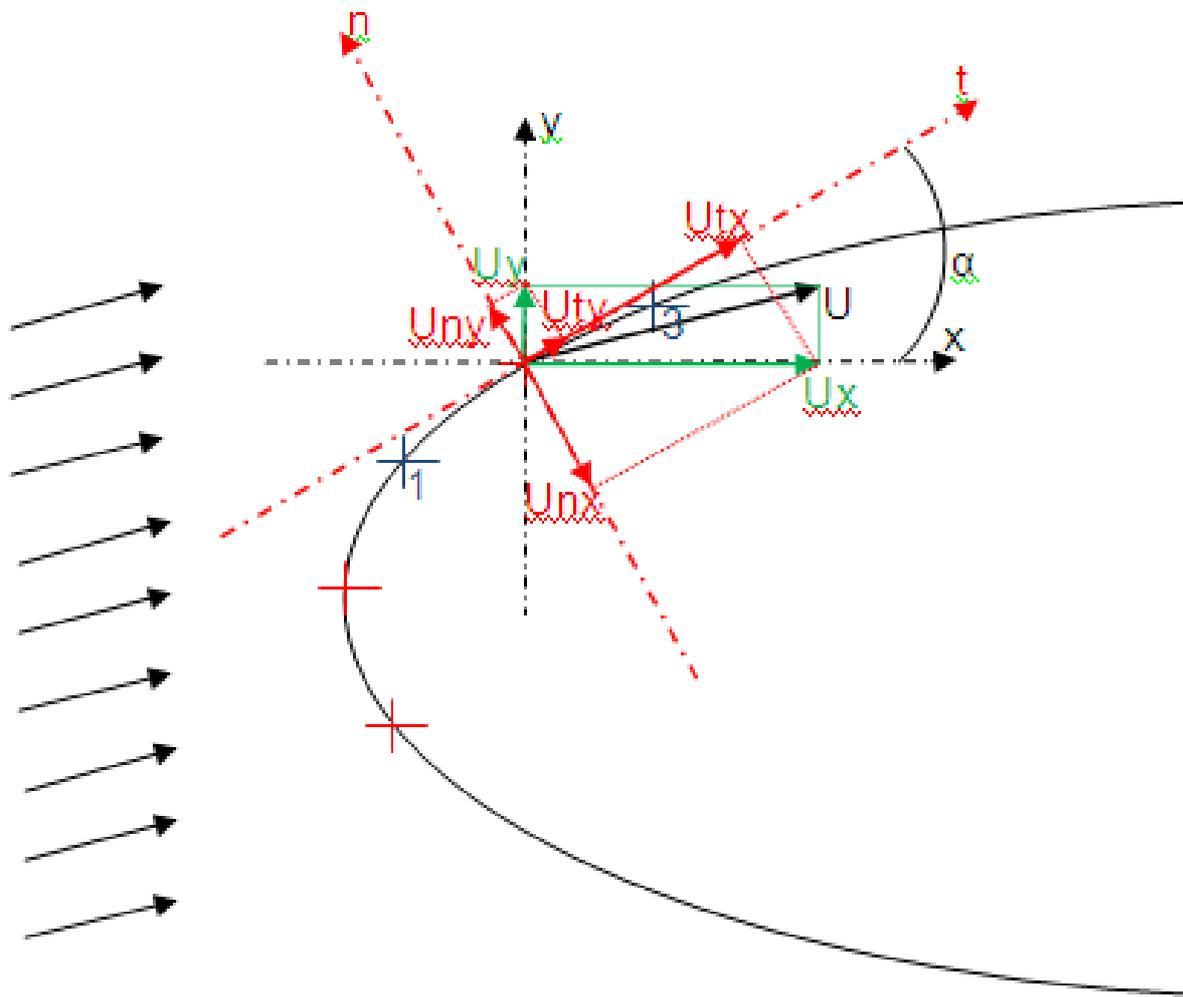


Figure 80 : Expression de U_n , U_t , θ

II. Matrice d'essai proposée pour affiner le modèle d'érosion :

Lors de l'étude sur le modèle d'érosion, il a été mis en avant l'importance d'effectuer des essais sur les substrats utilisés par Airbus afin d'être représentatif du comportement en service des matériaux appliqués sur nos avions.

C'est pour cette raison qu'un devis pour des essais a été lancé au près d'un laboratoire de recherche partenaire : Innovation Works à Ottaubraun.

1	Specimen No.	Material	Specimen size [mm]	Erodent material	Particel velocity [m/s]	Impact angle [°]	Sand mass [g]
2	TiAl6V4	Ti	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	55	20	20, 40, 60, 80, 100
3	TiAl6V4	Ti	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	55	20	20, 40, 60, 80, 100
4	TiAl6V4	Ti	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	55	20	20, 40, 60, 80, 100
5	TiAl6V4	Ti	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	55	45	20, 40, 60, 80, 100
6	TiAl6V4	Ti	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	55	45	20, 40, 60, 80, 100
7	TiAl6V4	Ti	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	55	45	20, 40, 60, 80, 100
8	TiAl6V4	Ti	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	55	60	20, 40, 60, 80, 100
9	TiAl6V4	Ti	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	55	60	20, 40, 60, 80, 100
10	TiAl6V4	Ti	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	55	60	20, 40, 60, 80, 100
11	TiAl6V4	Ti	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	55	90	20, 40, 60, 80, 100
12	TiAl6V4	Ti	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	55	90	20, 40, 60, 80, 100
13	TiAl6V4	Ti	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	55	90	20, 40, 60, 80, 100
14	TiAl6V4	Ti	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	80	20	20, 40, 60, 80, 100
15	TiAl6V4	Ti	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	80	20	20, 40, 60, 80, 100
16	TiAl6V4	Ti	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	80	20	20, 40, 60, 80, 100
17	TiAl6V4	Ti	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	80	45	20, 40, 60, 80, 100
18	TiAl6V4	Ti	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	80	45	20, 40, 60, 80, 100
19	TiAl6V4	Ti	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	80	45	20, 40, 60, 80, 100
20	TiAl6V4	Ti	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	80	60	20, 40, 60, 80, 100
21	TiAl6V4	Ti	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	80	60	20, 40, 60, 80, 100
22	TiAl6V4	Ti	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	80	60	20, 40, 60, 80, 100
23	TiAl6V4	Ti	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	80	90	20, 40, 60, 80, 100
24	TiAl6V4	Ti	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	80	90	20, 40, 60, 80, 100
25	TiAl6V4	Ti	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	80	90	20, 40, 60, 80, 100
26	15-5PH	Steel	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	55	20	20, 40, 60, 80, 100
27	15-5PH	Steel	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	55	20	20, 40, 60, 80, 100
28	15-5PH	Steel	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	55	20	20, 40, 60, 80, 100
29	15-5PH	Steel	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	55	45	20, 40, 60, 80, 100
30	15-5PH	Steel	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	55	45	20, 40, 60, 80, 100
31	15-5PH	Steel	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	55	45	20, 40, 60, 80, 100
32	15-5PH	Steel	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	55	60	20, 40, 60, 80, 100
33	15-5PH	Steel	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	55	60	20, 40, 60, 80, 100
34	15-5PH	Steel	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	55	60	20, 40, 60, 80, 100
35	15-5PH	Steel	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	55	90	20, 40, 60, 80, 100
36	15-5PH	Steel	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	55	90	20, 40, 60, 80, 100
37	15-5PH	Steel	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	55	90	20, 40, 60, 80, 100
38	15-5PH	Steel	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	80	20	20, 40, 60, 80, 100
39	15-5PH	Steel	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	80	20	20, 40, 60, 80, 100
40	15-5PH	Steel	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	80	20	20, 40, 60, 80, 100
41	15-5PH	Steel	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	80	45	20, 40, 60, 80, 100
42	15-5PH	Steel	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	80	45	20, 40, 60, 80, 100
43	15-5PH	Steel	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	80	45	20, 40, 60, 80, 100
44	15-5PH	Steel	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	80	60	20, 40, 60, 80, 100
45	15-5PH	Steel	50 x 50 x 1-2	Silica 220 µm	80	60	20, 40, 60, 80, 100

Figure 81 : Matrice d'essai proposée à IW pour affiner le modèle d'érosion

4) Résultats ONICE 2D sur le profil HTP

a) Sur le profil en Normal

Le cas décollage

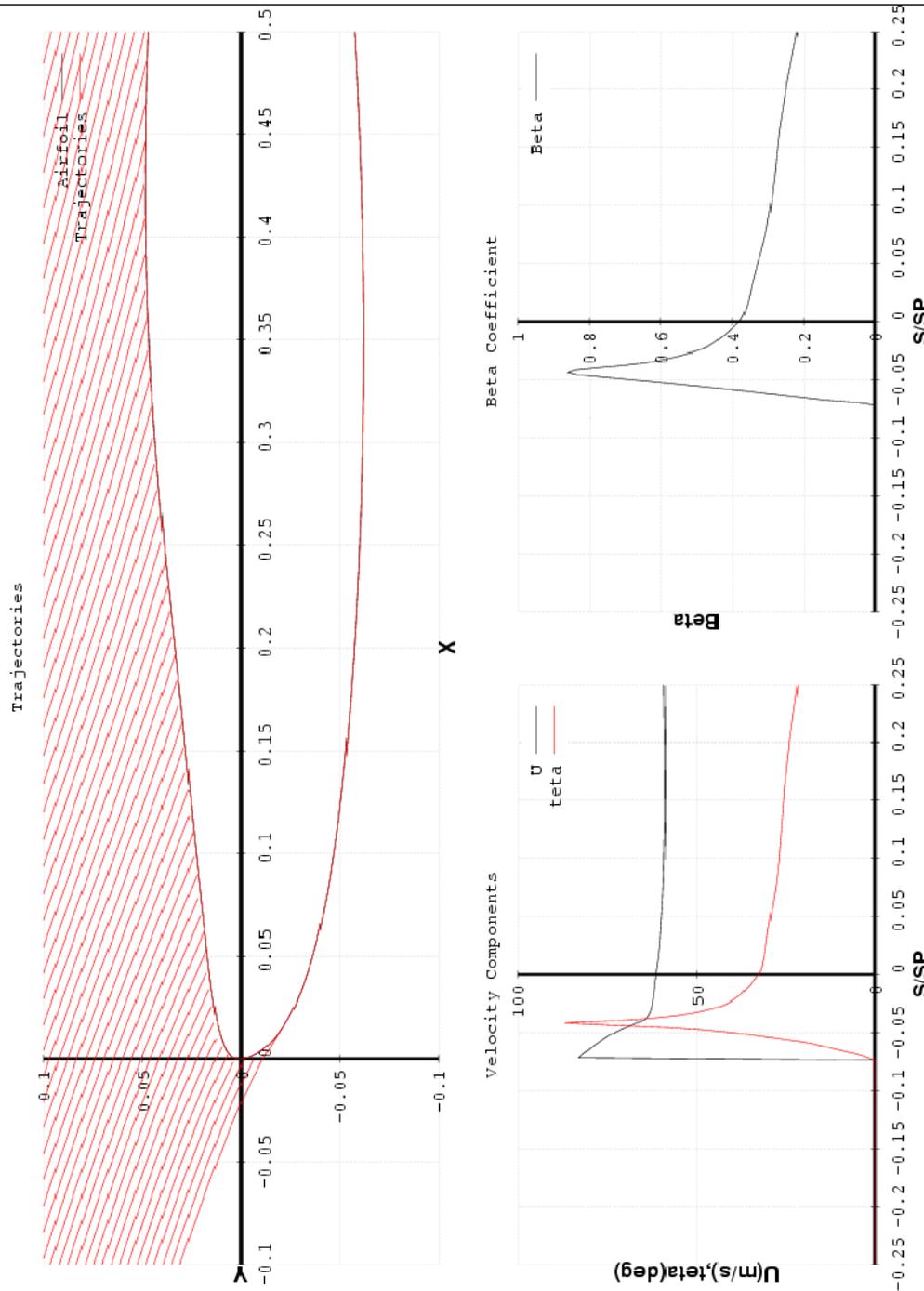


Figure 82 : Cas décollage profil normal avec $Mn=0.212$; Φ particule= $220\mu m$; $\alpha=-12^\circ$

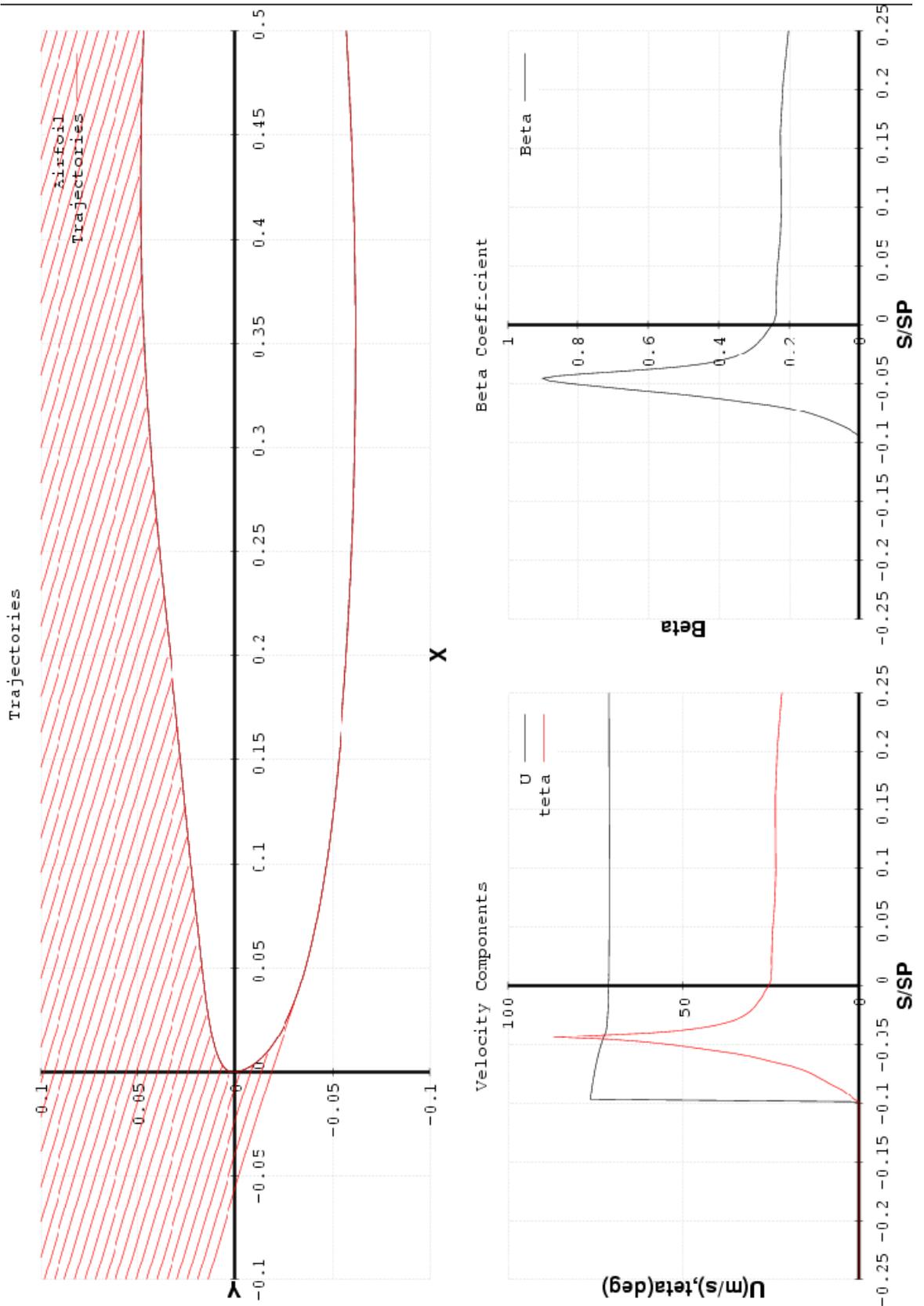


Figure 83 : Cas décollage profil normal avec $Mn=0.212$; Φ particule= $2000\mu m$; $\alpha=-12^\circ$

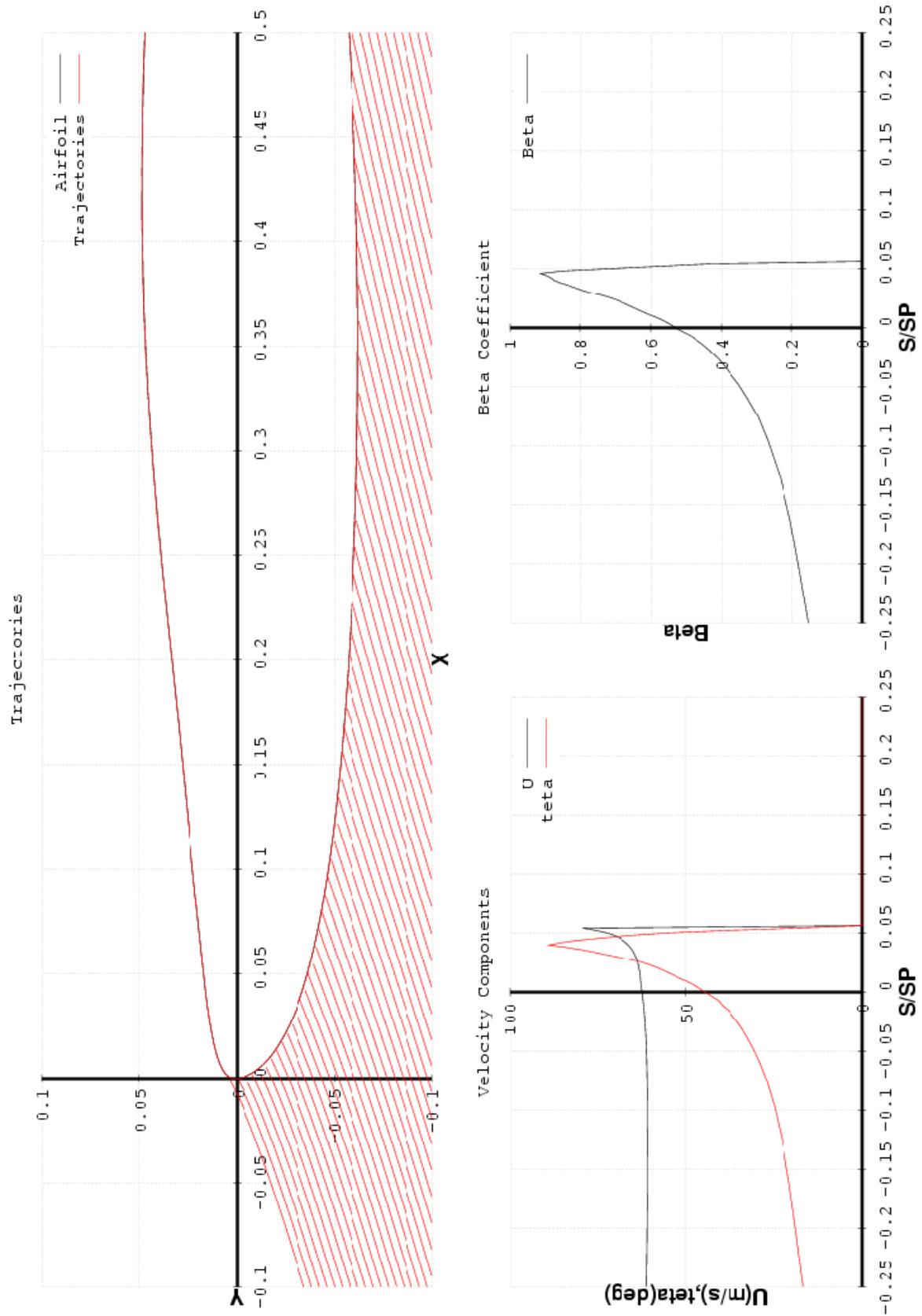


Figure 84 : Cas décollage profil normal avec $Mn=0.212$; Φ particule= $220\mu m$; $\alpha=+12^\circ$

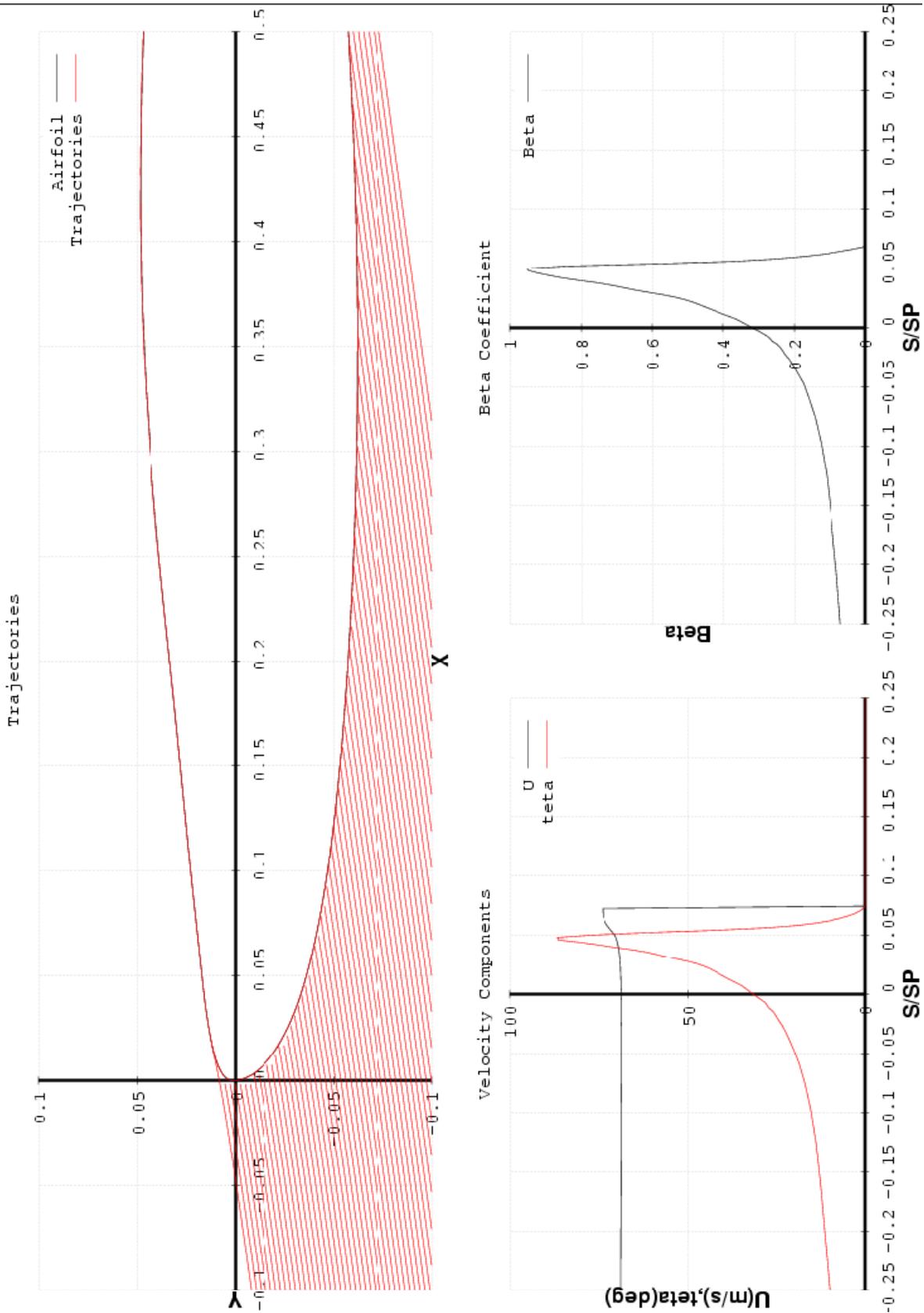


Figure 85 : Cas décollage profil normal avec $Mn=0.212$; Φ particule= $2000\mu m$; $\alpha=+12^\circ$

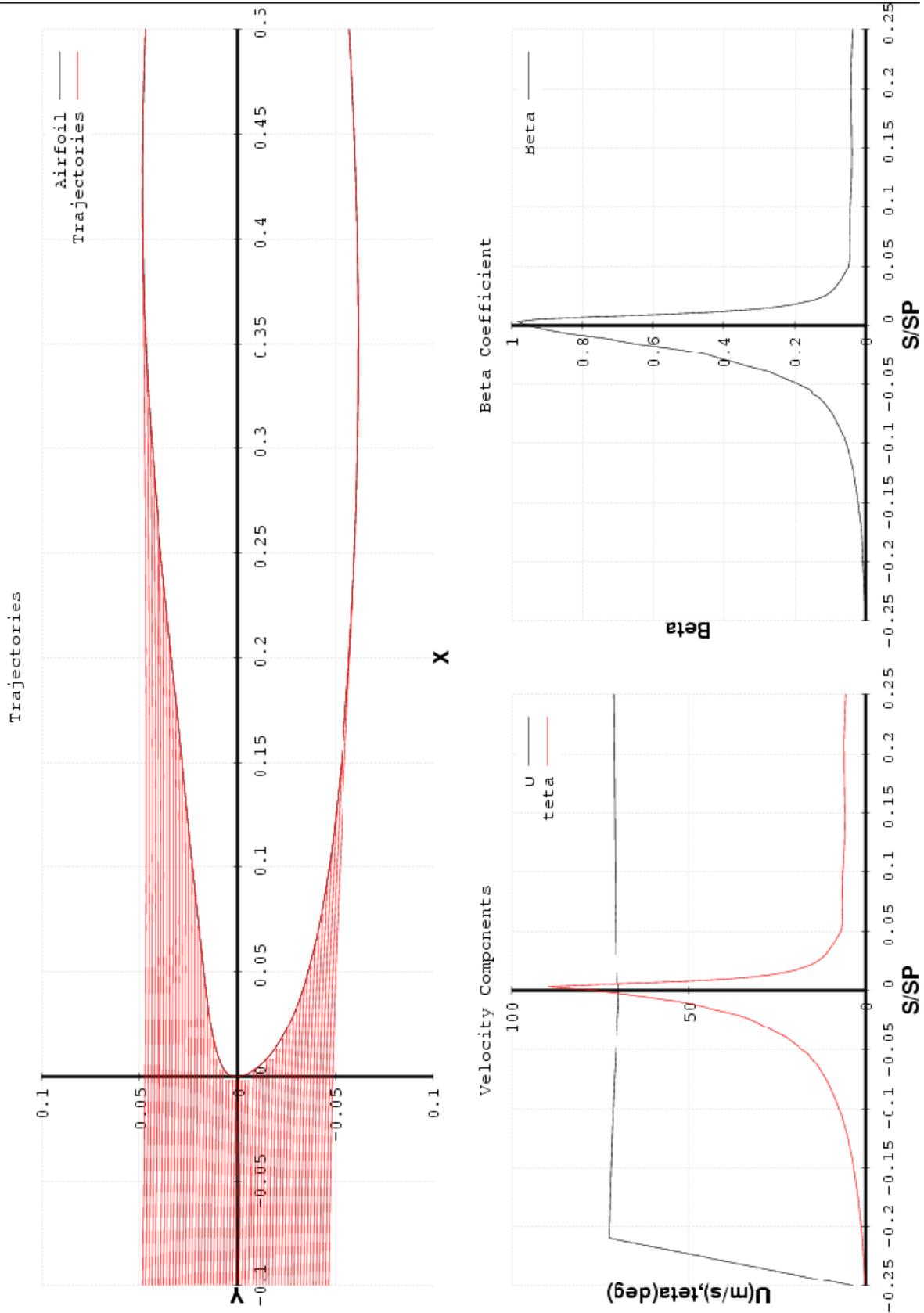


Figure 86 : Cas décollage profil normal avec $Mn=0.212$; Φ particule= $220\mu m$; $\alpha=0^\circ$

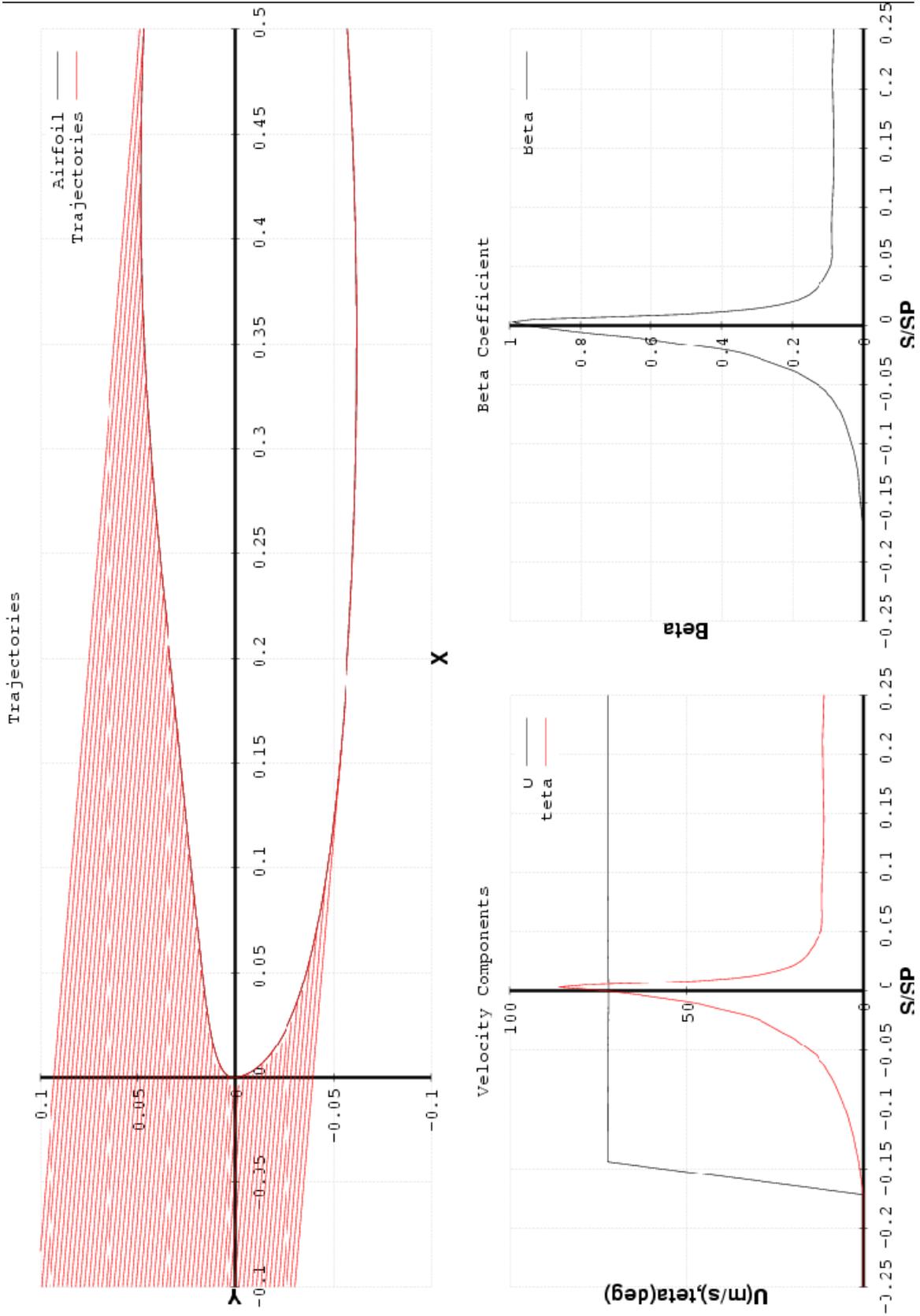


Figure 87 : Cas décollage profil normal avec $Mn=0.212$; Φ particule= $2000\mu m$; $\alpha=0^\circ$

Cas croisière :

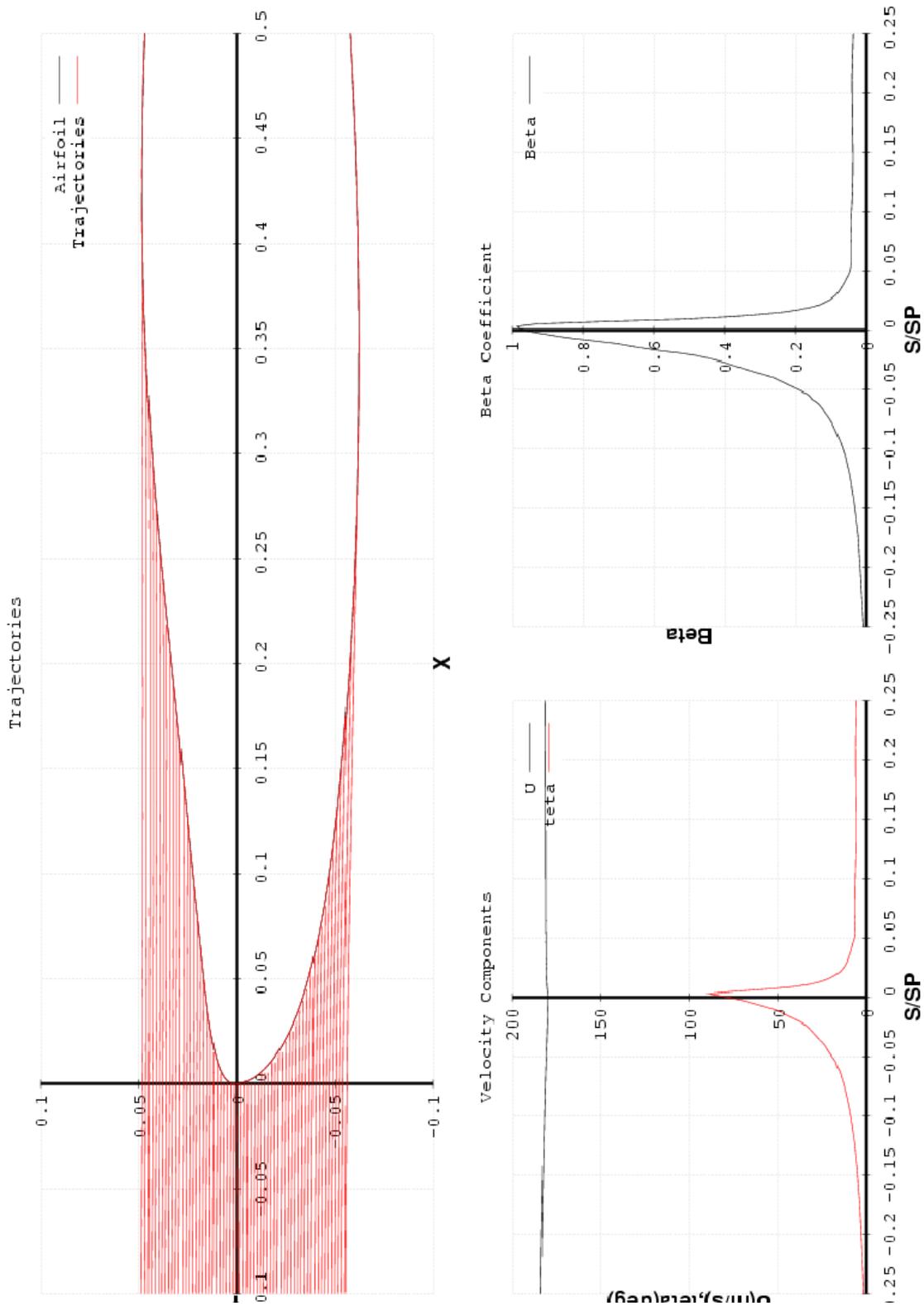


Figure 88 : Cas croisière profil normal avec $Mn=0.609$; Φ particule= $220\mu m$; $\alpha=0^\circ$

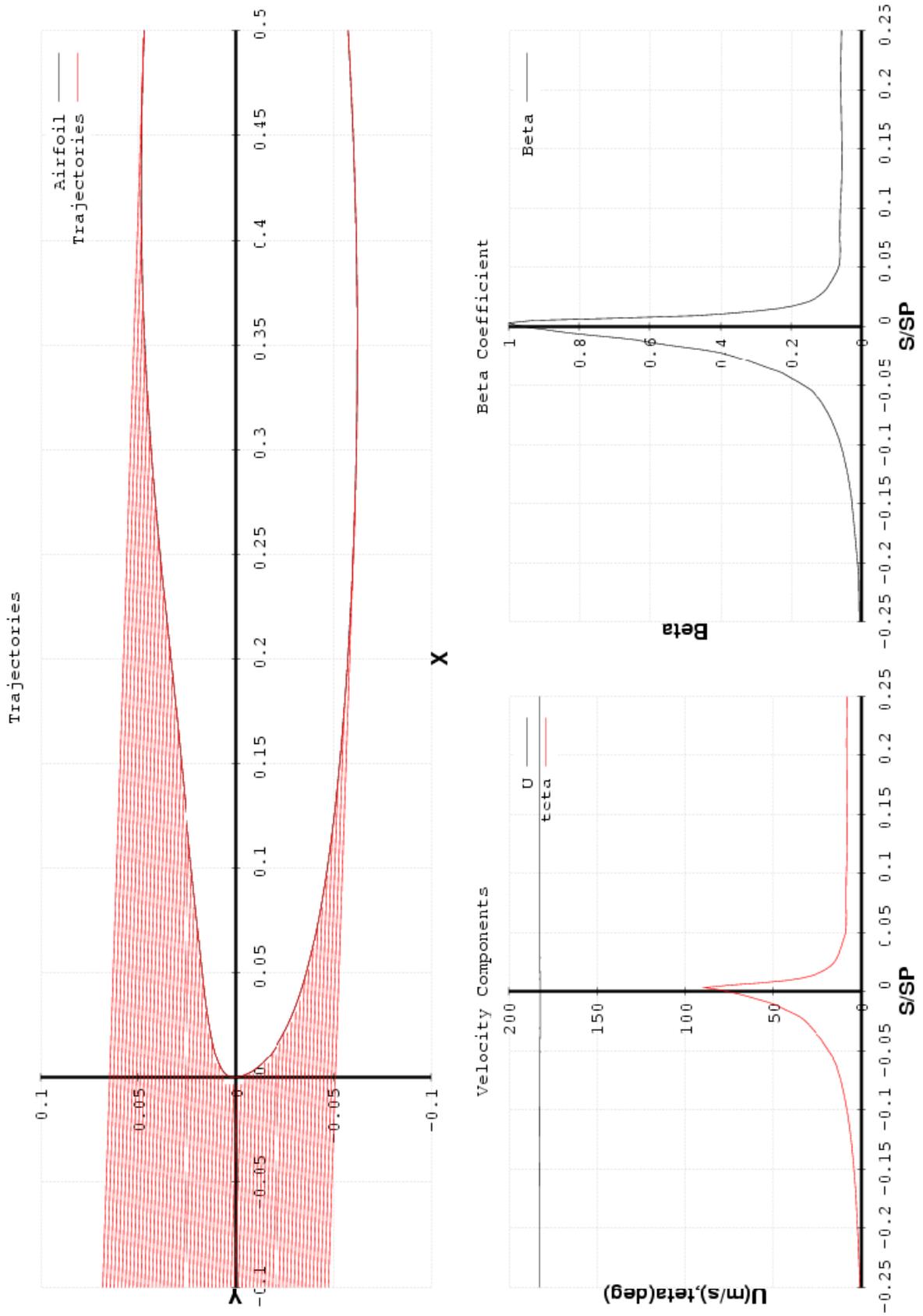


Figure 89 : Cas croisière profil normal avec $Mn=0.609$; Φ particule= $2000\mu m$; $\alpha=0^\circ$

b) Sur le profil en Streamwise :

Le cas décollage

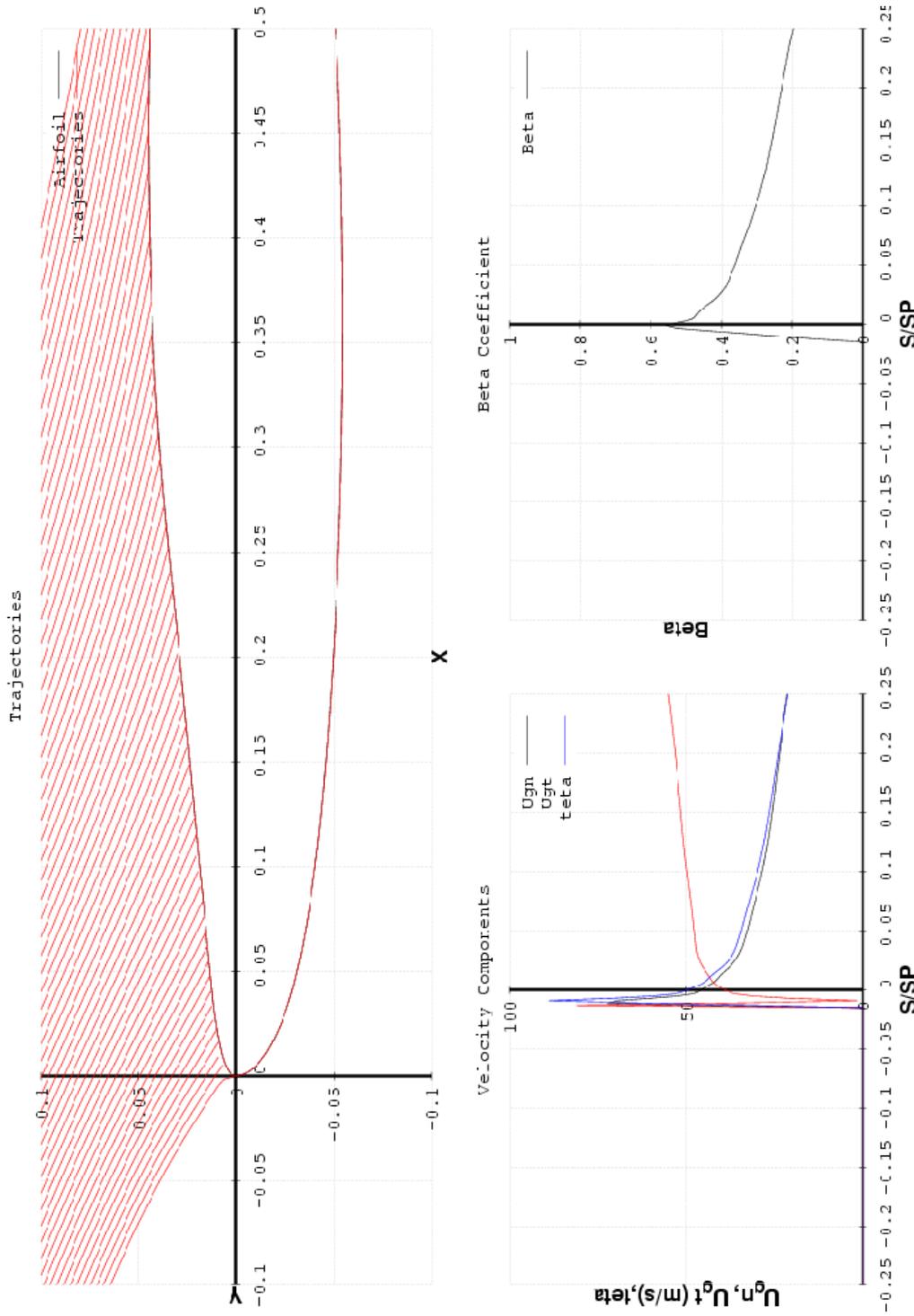


Figure 90 : Cas décollage profil streamwise avec $M=0.25$; Φ particule= $220\mu m$; $\alpha=-12^\circ$

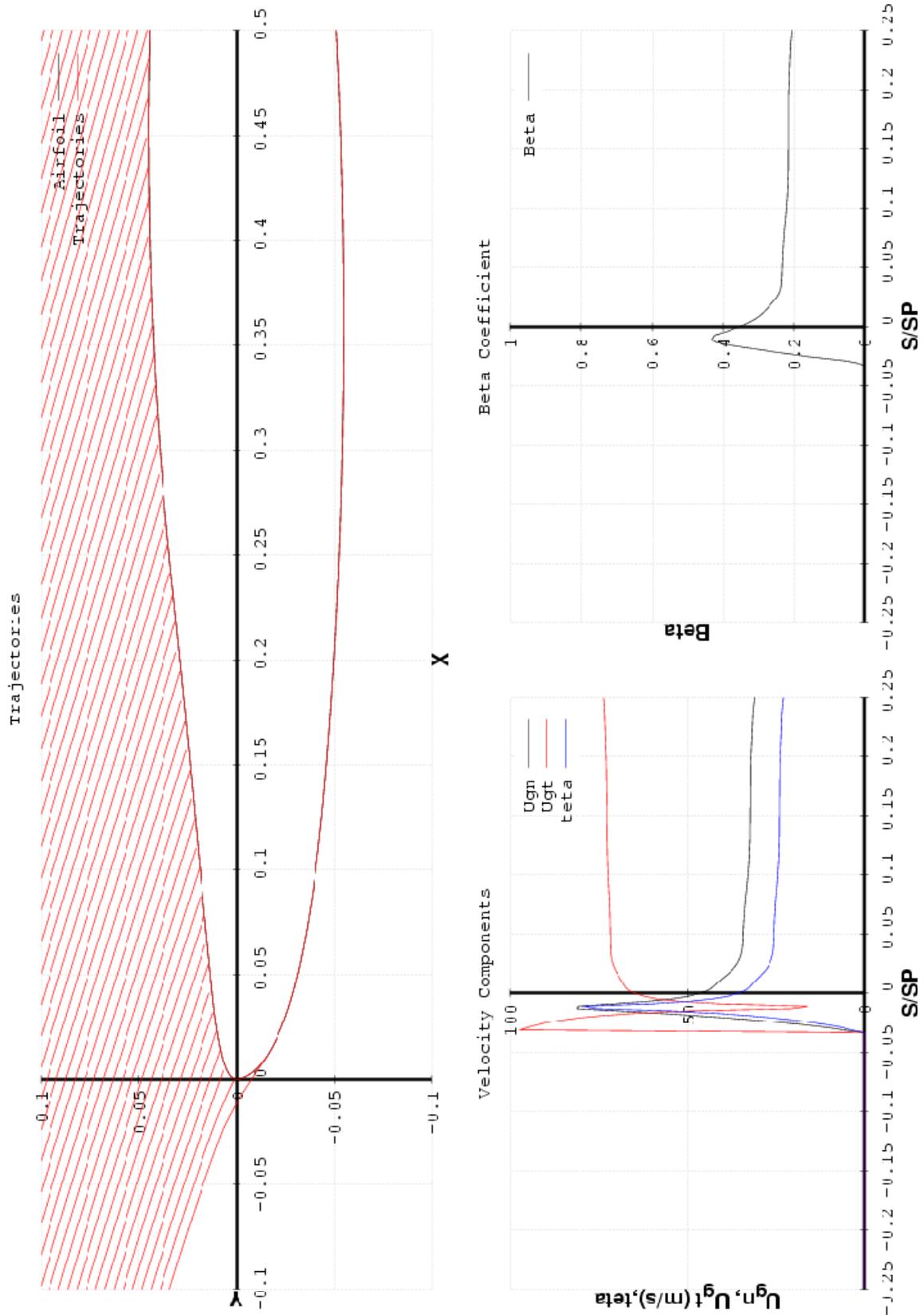


Figure 91 : Cas décollage profil streamwise avec $M=0.25$; Φ particule= $2000\mu m$; $\alpha=-12^\circ$

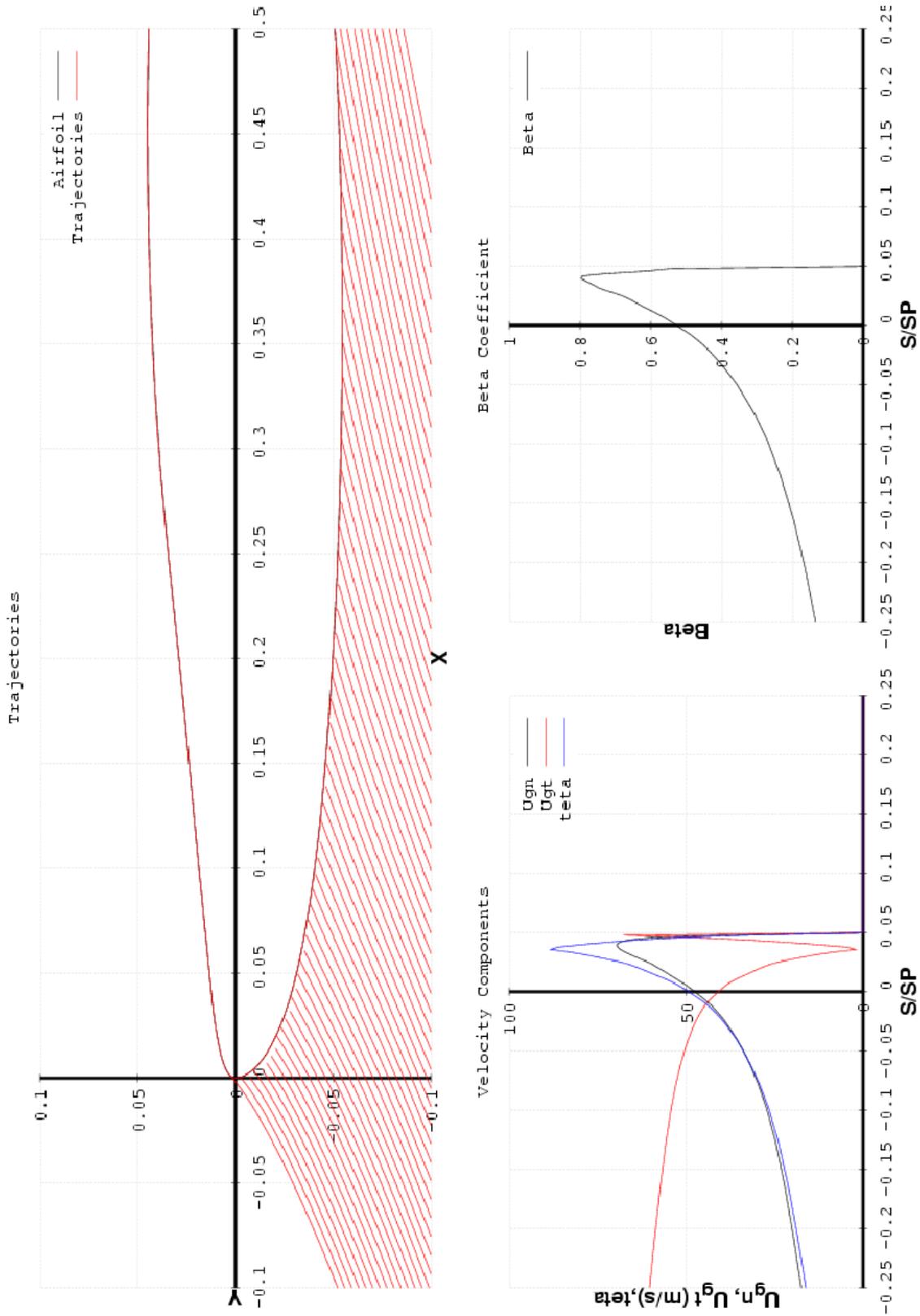


Figure 92 : Cas décollage profil streamwise avec $M=0.25$; Φ particule= $220\mu m$; $\alpha=+12^\circ$

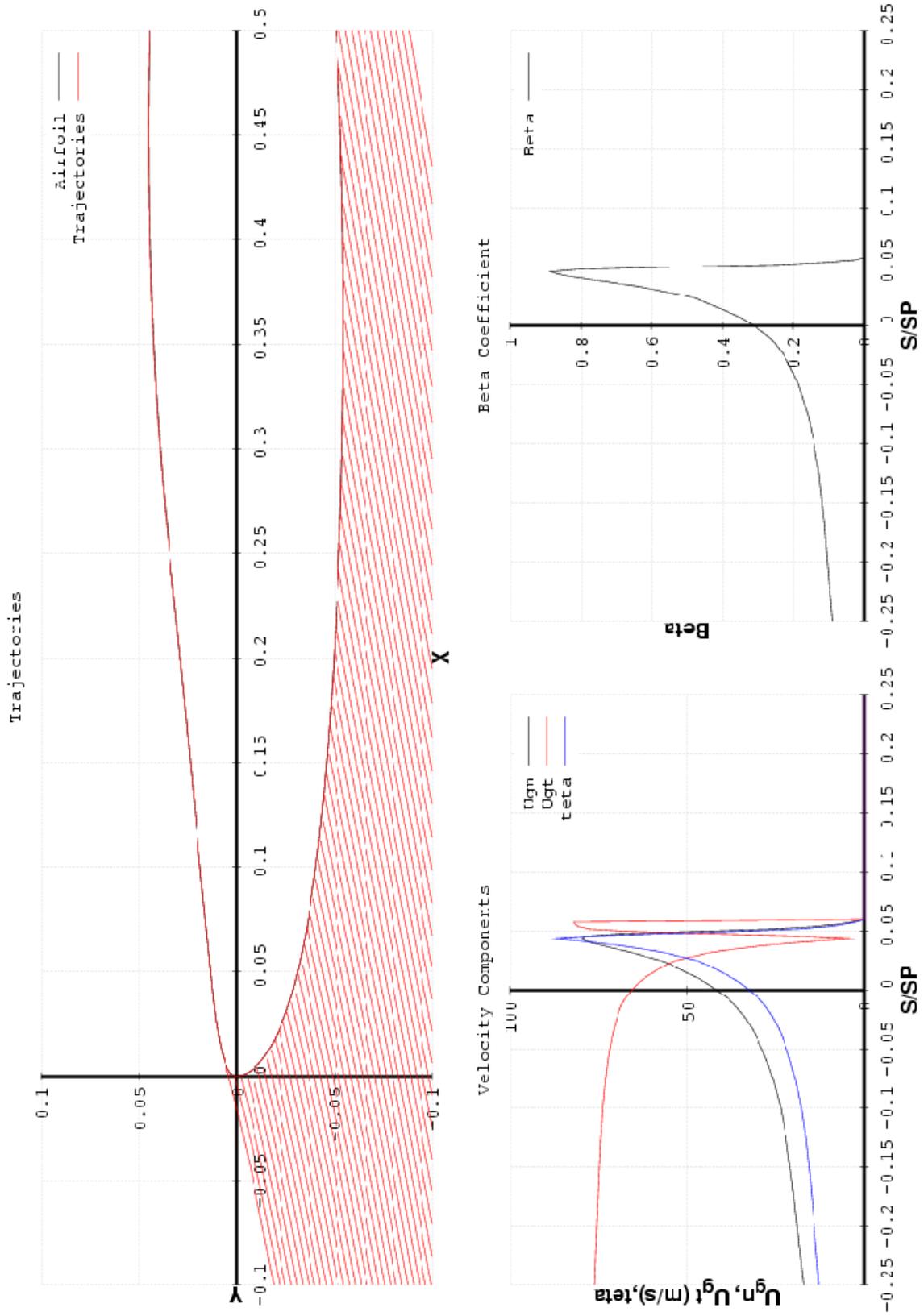


Figure 93 : Cas décollage profil streamwise avec $M=0.25$; Φ particule= $2000\mu\text{m}$; $\alpha=+12^\circ$

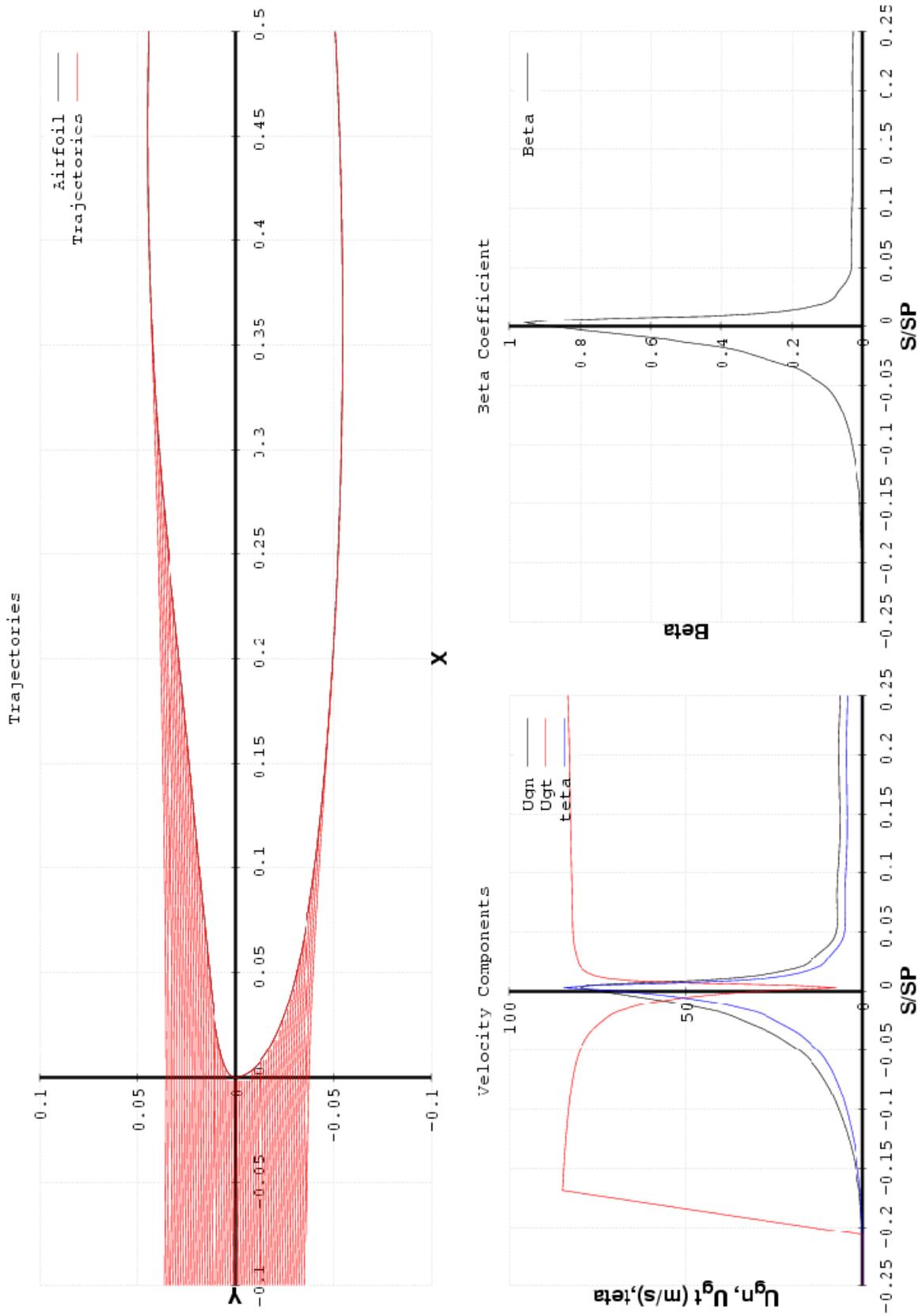


Figure 94 : Cas décollage profil streamwise avec $M=0.25$; Φ particule= $220\mu m$; $\alpha=0^\circ$

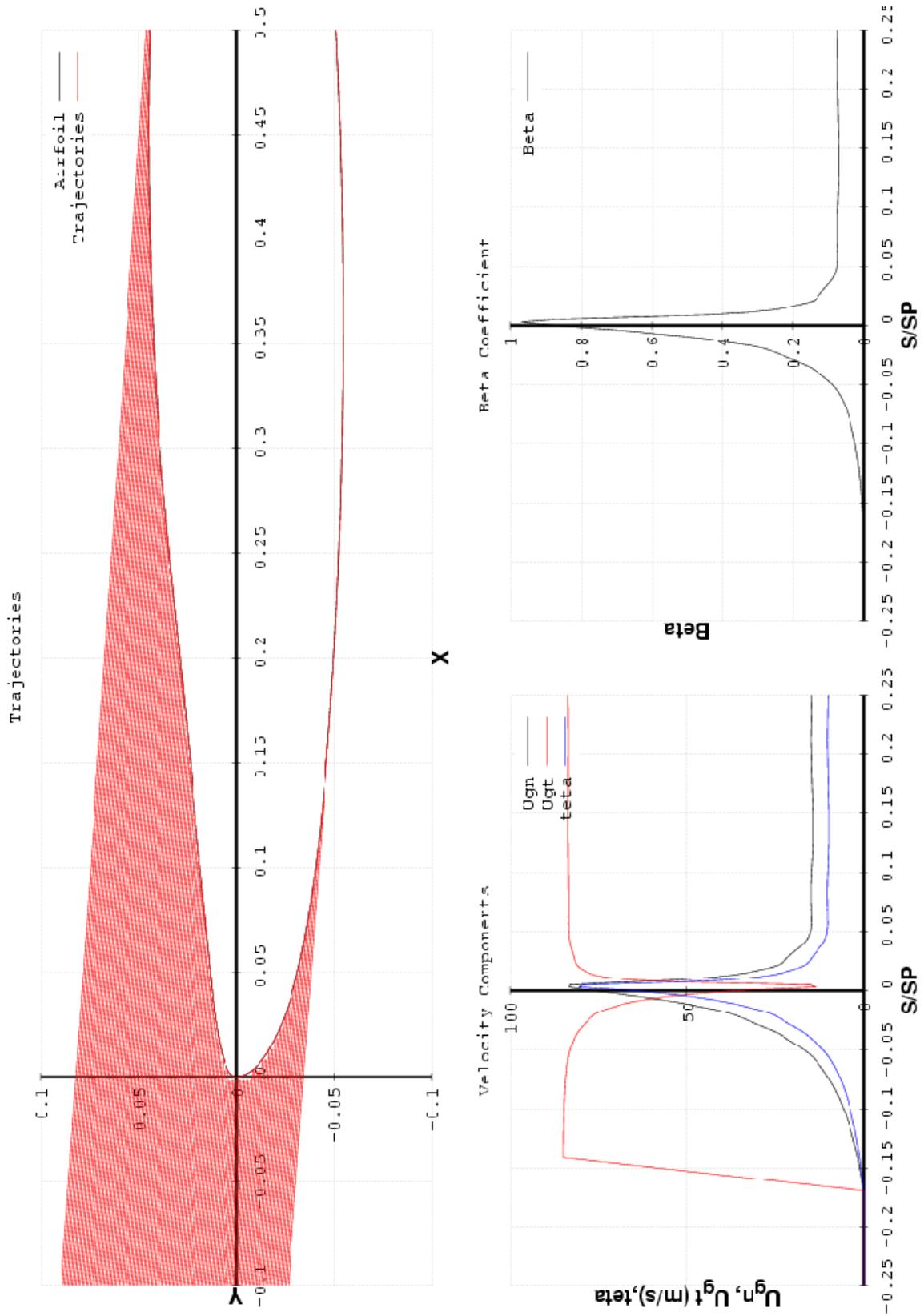


Figure 95 : Cas décollage profil streamwise avec $M=0.25$; Φ particule= $2000\mu\text{m}$; $\alpha=0^\circ$

Le cas croisière :

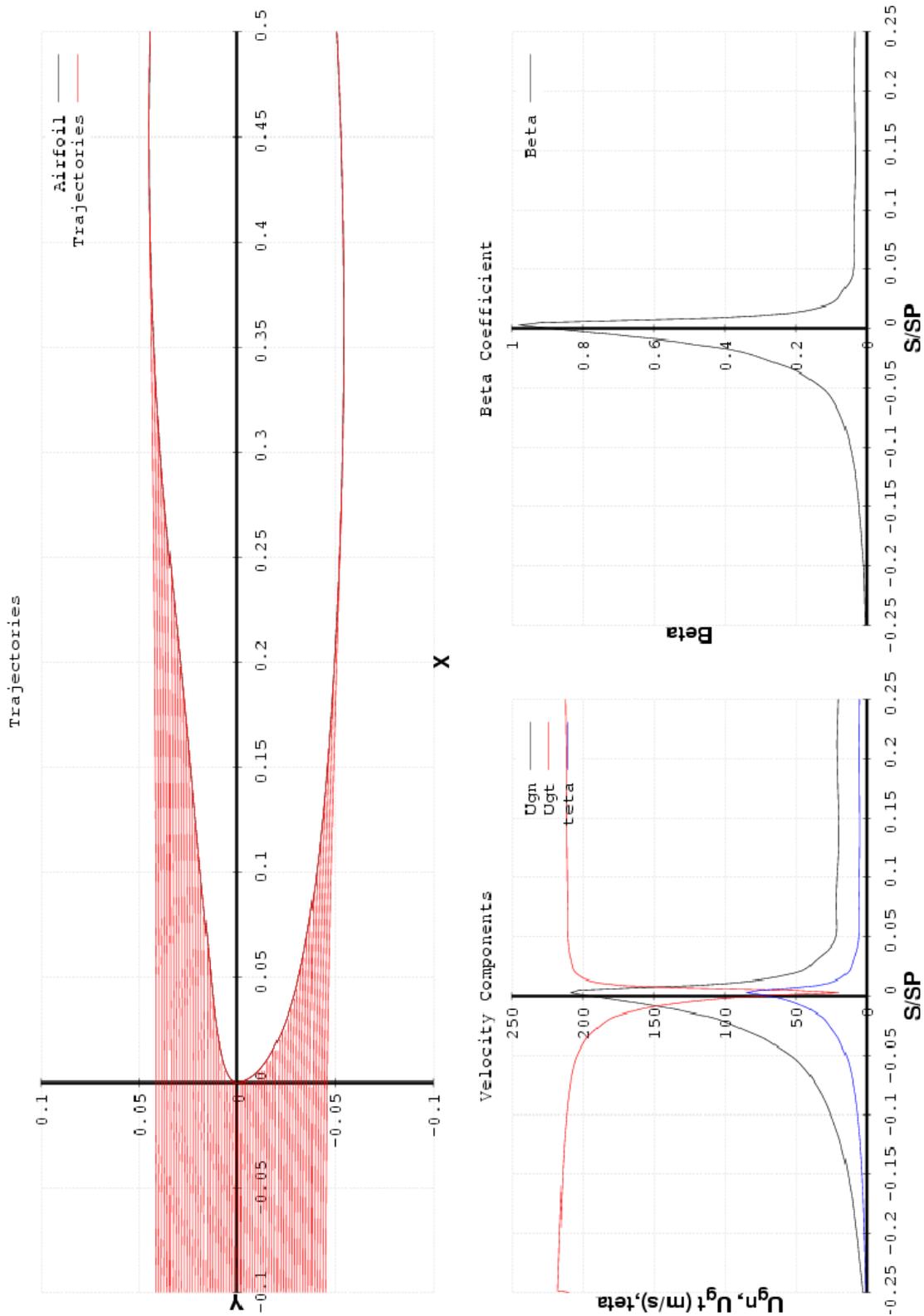


Figure 96 : Cas croisière profil streamwise avec $M=0.72$; Φ particule= $220\mu\text{m}$; $\alpha=0^\circ$

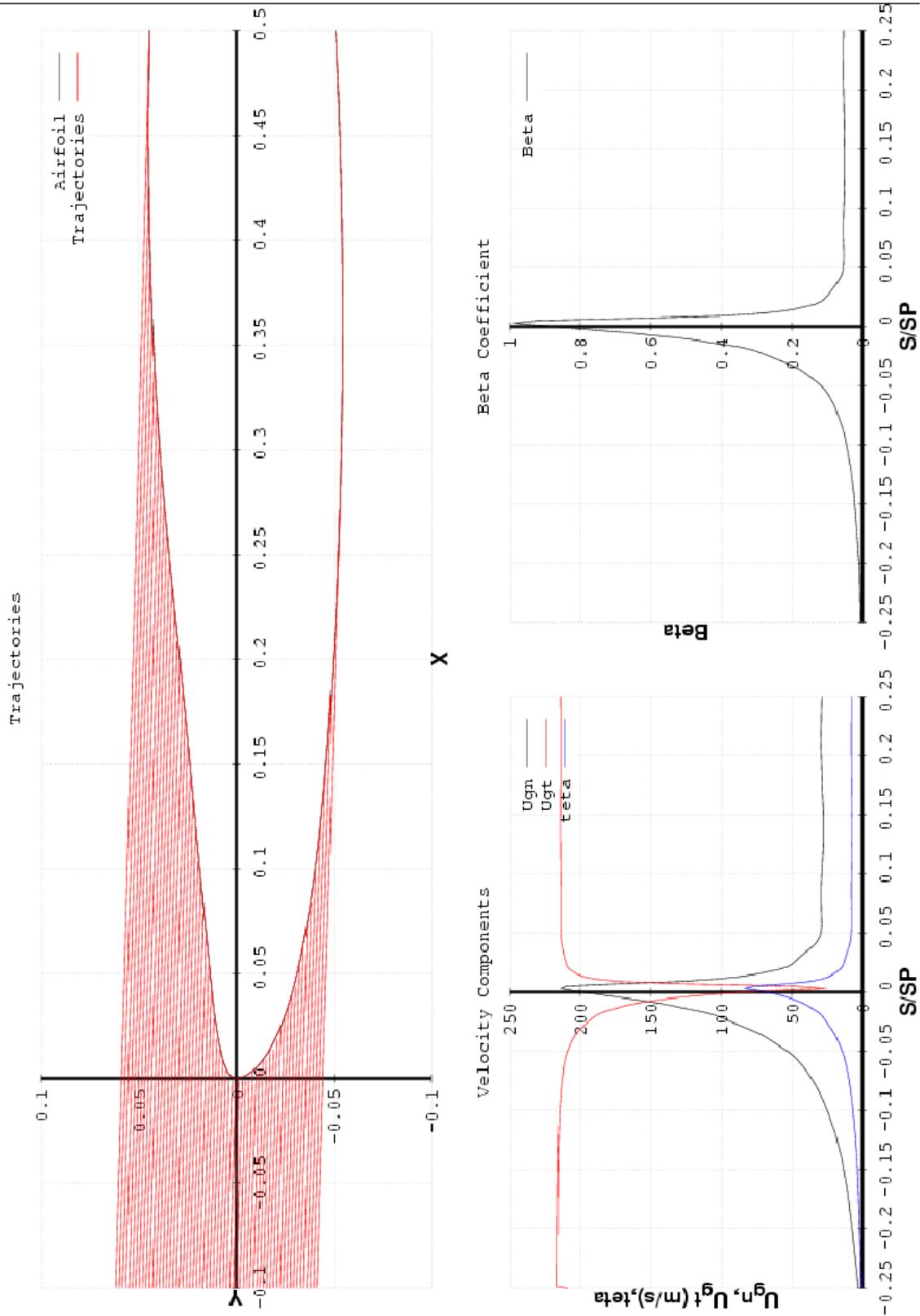


Figure 97 : Cas croisière profil streamwise avec $M=0.72$; Φ particule= $2000\mu\text{m}$; $\alpha=0^\circ$

VII) Références

1. A.Deom, R.Gouyon, C.Berne, "Rain erosion resistance characterizations – Link between on-ground experiments and in flight specifications", 2003,
2. F.Dezitter, "SLD – Splashing and bouncing Modeling & Assessment", 2009
3. C.Mundo, C.Tropea, M.Sommerfeld, "Droplet Wall Collisions: Experimental Studies of the deformation and break-up Process", Int.J Multiphase Flow, v. 21.N0.2, pp.151-173, 1995
4. C.Mundo, C.Tropea, M.Sommerfeld, "Numerical and Experimental Investigation of Spray Characteristics in the Vicinity of a Rigid Wall", Exp. Thermal and fl. Sci., 15, pp.228-237, 1997
5. N.G. Garcia, P. Villedieu, J. Dewitte, G. Lavergne, "A new droplet-wall interaction model", ICLASS06-167
6. A.L.Yarin, D.A Weiss, "Impact of drops on solid surfaces: self-similar capillarity waves, and splashing as a new type of kinematic discontinuity", J.fluid Mechanics, 283,141-773,1995
7. G.E.Cossali, G.Brunello, A.Coghe, M.Marengo, "Impact of a single drop on a liquid film: Experimental Analysis and comparison with Empirical Models", Italian Conf on Thermoofluid Dyn, July 1999
8. B.G.Mellor, "Surface coating for protection against wear", ISBN 13:978-1-85573-767-9
9. W.F.Adler, "Development of design data for rain impact damage in infrared transmitting windows and radomes", 1987
10. W.F.Adler, D.J.Mihora "Infrared-transmitting window survivability in hydrometeor environment", 1992
11. F.Bultot, A.Coppens, « Puissance d'une averse », 1985
12. Defence standard, "Environmental handbook for defense materiel – Part 4: Natural environment", 00-35 issue 3, 1999
13. H.Li, I.Roisman, C.Tropea, "Physics of supercooled large drops (SLD) – Literature review", 2009
14. ASTM-G40-05, "Standard Terminology Relating to wear and Erosion"
15. I.M.Hutchings, "Solid Particle Erosive Wear Testing", University of Cambridge
16. O.Rohr, Dr.D.Raps, Dr.F.Gammel, "Aerodynamic Efficient Surfaces; Evaluation of Solid Particle Erosion", CTO/IW-MS-2009-128
17. W.F.Adler, "Particulate impact damage predictions", Wear 186-1867, 1995
18. MIL-STD-810G, "Method 510.5: Sand and dust", 2008
19. I.Kleis, P.Kulu, "Solid particle erosion, occurrence, prediction and control", 2008
20. AITM 1-0027, "Airbus Industry Test Method: Rain testing of organic coating for the determination of the resistance to erosion", 1997

VIII) Figures et Tableaux:

Figure 1 : Interactions mécaniques entre la surface et une particule	11
Figure 2 : Parties de l'avion soumis à l'érosion	13
Figure 3 : Bord d'attaque voilure côté droit	14
Figure 4 : Bord d'attaque dérive.....	14
Figure 5 : Décollement des logos représentant la compagnie.....	15
Figure 6 : Interaction pour un éthyle-alcool, $Oh=1.74 \times 10^{-2}$ - <i>Garcia Rosa et al</i> [5].....	17
Figure 7 : Interaction observée pour un éthyle-alcool, $Oh = 1.74 \times 10^{-2}$ - <i>Garcia Rosa et al</i> [5].....	17
Figure 8 : Eclaboussure de gouttes, projet ECLIPPS - <i>Dezitter</i> [2]	18
Figure 9 : Diagramme log K – T* dans des conditions expérimentales - <i>Garcia Rosa et al</i> [5]	18
Figure 10 : Angle d'impact entre la direction de l'écoulement et la surface	19
Figure 11 : Limite entre éclaboussure et dépôt en fonction de la rugosité impactant la surface - <i>Cossali</i> [7].....	19
Figure 12 : Schéma des contraintes générées par l'impact de particule d'eau - <i>B.G.Mellor</i> [8].....	20
Figure 13 : Usure érosive suite à l'impact d'une goutte d'eau	21
Figure 14 : Comparaison de la distribution des gouttes pour des intensités de 100mm/h et 10mm/h selon la loi de Marshall & Palmer – <i>Deom et al.</i> [1].....	23
Figure 15 : Comparaison du volume rempli par les gouttes à différents diamètres pour les deux intensités – <i>Deom et al.</i> [1]	24
Figure 16 : Pluviométrie moyenne annuelle (mm) à travers le monde – <i>DEF STAN 00 35 (part4/3)</i> [12]	26
Figure 17 : Processus de dislocation - <i>H.Li et Al</i> [13]	28
Figure 18 : Influence du break-up sur l'efficacité de la captation d'eau - <i>H.Li et Al</i> [13].....	29
Figure 19 : Evolution de la perte de masse en fonction de la masse totale de particule impactant – <i>I.M.Hutchins et Al</i> [15]	31
Figure 20 : Influence de la vitesse des particules sur le taux d'érosion – <i>I.Kleis et Al</i> [19]	32
Figure 21 : Evolution de la perte de l'érosion (défini comme la perte de masse par unité de masse) en fonction de l'angle d'impact – <i>I.M.Hutchins et Al</i> [15]	33
Figure 22 : influence de la matière sur le taux d'érosion – <i>I.M.Hutchins et Al</i> [15].....	34
Figure 23 : Dépendance du taux d'érosion en fonction de la température – <i>I.Kleis et Al</i> [19]	36
Figure 24 : Banc d'essai pour l'érosion à l'eau à Eurocopter (France – Marignane).....	39
Figure 25 : Schéma de principe du banc d'essai SIJA utilisé à Cambridge –UK.....	40
Figure 26 : Schéma de principe et paramètres du banc d'essai de type MIJA utilisé à EADS IW Ottobrunn -Allemagne	40
Figure 27 : Schéma regroupant les 4 méthodes par déplacement de particules, (a) gas-blast, (b) accélération centrifuge, (c) soufflerie, (d) rotation autour d'un axe - <i>I.M.Hutchins et Al</i> [15]	43
Figure 28 : Structure générale pour prédire les dégâts dus à l'impact d'une particule basé sur les essais en laboratoire - <i>W.F.Adler</i> [17].....	46
Figure 29 : Evolution de la perte de masse en fonction de la masse totale de particule impactant – <i>I.M.Hutchins et Al</i> [15]	50
Figure 30 : Synoptique de la chaîne de calcul ONICE2D avec la méthode de prédiction/correction	52
Figure 31 : Maillage topologie en « C » autour d'un profil HTP A320	53
Figure 32 : Vitesse relative de la particule par rapport à l'écoulement	56
Figure 33 : Schéma du coefficient de captation β	57
Figure 34 : Représentation des vitesses U_n , U_t et θ	58
Figure 35 : Mise en équation de $a=f(\theta)$ suivant différentes courbes de tendance.....	65
Figure 36 : Mise en équation de $m=f(\theta)$ suivant différentes courbes de tendance.....	65
Figure 37 : Mise en équation de $I_v=f(\theta)$	66
Figure 38 : Mise en équation de $I_v=f(\theta, U)$	69
Figure 39 : profil NACA0012 extrait suivant le fichier prof.dat	72
Figure 40 : cas décollage avec $M=0.25$; $\Phi_{particule}=220\mu m$; $inc=9^\circ$	74
Figure 41 : Représentation du coefficient $-C_p$ en fonction de l'abscisse X dans le cas décollage avec $M=0.25$; $\Phi_{particule}=220\mu m$; $inc=9^\circ$	75
Figure 42 : cas décollage avec $M=0.25$; $\Phi_{particule}=2000\mu m$; $inc=9^\circ$	76

Figure 43 : Représentation du coefficient $-C_p$ en fonction de l'abscisse X dans le cas décollage avec $M=0.25$; $\Phi_{particule}=2000\mu m$; $inc=9^\circ$	77
Figure 44: cas croisière avec $M=0.72$; $\Phi_{particule}=220\mu m$; $inc=3.5^\circ$	80
Figure 45 : Représentation du coefficient $-C_p$ en fonction de l'abscisse X dans le cas croisière avec $M=0.72$; $\Phi_{particule}=220\mu m$; $inc=3.5^\circ$	81
Figure 46: cas croisière avec $M=0.72$; $\Phi_{particule}=2000\mu m$; $inc=3.5^\circ$	82
Figure 47 : Représentation du coefficient $-C_p$ en fonction de l'abscisse X dans le cas croisière avec $M=0.72$; $\Phi_{particule}=2000\mu m$; $inc=3.5^\circ$	83
Figure 48 : Calcul du taux d'érosion sur le profil NACA0012 pour le cas titane ; $M=0,25$; $inc=9^\circ$; $\Phi_{particules}=220\mu m$	87
Figure 49 : Erosion au sable d'un Titane – $V=55$ m/s – $\Phi_{particule} : 220 \mu m$	88
Figure 50 : Cas décollage sur le profil NACA001 ; $M=0.16$; $\Phi_{particule} : 220 \mu m$; $inc=9^\circ$	89
Figure 51 : L'empennage horizontal ou HTP d'un A320	92
Figure 52 : Profil HTP A320 en streamwise	94
Figure 54 : Profil HTP streamwise et normal	95
Figure 53 : Profil HTP en streamwise et normal	95
Figure 55 : Cas décollage profil normal avec $Mn=0.212$; $\Phi_{particule}=220\mu m$; $\alpha=-12^\circ$	97
Figure 56 : Coefficient $-C_p$ en fonction de l'abscisse X avec $Mn=0.212$; $\Phi_{particule}=220\mu m$; $inc=-12^\circ$	97
Figure 57 : cas décollage profil normal avec $Mn=0.212$; $\Phi_{particule}=220\mu m$; $\alpha=+12^\circ$	98
Figure 58 : Coefficient $-C_p$ en fonction de l'abscisse X avec $Mn=0.212$; $\Phi_{particule}=220\mu m$; $inc=+12^\circ$	98
Figure 59 : cas décollage profil normal avec $Mn=0.212$; $\Phi_{particule}=220\mu m$; $\alpha=0^\circ$	99
Figure 60 : cas décollage profil normal avec $Mn=0.212$; $\Phi_{particule}=220\mu m$; $\alpha=0^\circ$	99
Figure 61 : Coefficient $-C_p$ en fonction de l'abscisse X avec $Mn=0.212$; $\Phi_{particule}=220\mu m$; $inc=0^\circ$	99
Figure 62 : Calcul du taux d'érosion sur le profil HTP pour le Titane ; cas décollage ; $\Phi_{particules}=220\mu m$	101
Figure 63 : Représentation de la vitesse d'impact U en fonction de l'angle d'impact θ	102
Figure 64 : Evolution de l'angle d'impact θ et le coefficient β pour le cas: décollage ; $Mn=0,21$; profil HTP normal ; $\Phi_{particule} =220\mu m$	103
Figure 65 : Evolution du taux d'érosion pour le cas : décollage ; $Mn=0,21$; profil HTP normal ; $\Phi_{particule} =220\mu m$	105
Figure 66 : viscosité dynamique de l'eau en fonction de la température – <i>Dezitter [2]</i>	109
Figure 67 : tension de surface en fonction de la température – <i>Dezitter [2]</i>	110
Figure 68 : Distorsion d'une goutte d'eau à Mach 4 à différentes positions– <i>W.F.Adler [10]</i>	112
Figure 69 : Valeurs du coefficient a et exposant m suivant l'angle d'impact pour différents matériaux – <i>I.Kleis et Al [19]</i>	113
Figure 70 : Fiche produit du matériau érodant, fournisseur : David Bell - <i>O.Rohr et Al [16]</i>	113
Figure 71 : Image au MEB des grains de silice, grade 60/85, David Bell- <i>O.Rohr et Al [16]</i>	114
Figure 72 : Schéma et photo du banc d'essai du Plint TE 68- <i>O.Rohr et Al [16]</i>	114
Figure 73 : Récapitulatif des paramètres d'essais du Plint TE 68 - <i>O.Rohr et Al [16]</i>	115
Figure 74 : diagramme complet et détaillé du processus	116
Figure 75 : Extrait du fichier données.dat	117
Figure 76: Extrait du fichier prof.dat à la séparation intrados/extrados	119
Figure 77 : Extrait du fichier prof.dat	119
Figure 78 : Entrée et sortie du module	120
Figure 79 : Entrée et sortie du module CAPT.f	121
Figure 80 : Expression de U_n , U_t , θ	125
Figure 81 : Matrice d'essai proposée à IW pour affiner le modèle d'érosion	126
Figure 82 : Cas décollage profil normal avec $Mn=0.212$; $\Phi_{particule}=220\mu m$; $\alpha=-12^\circ$	127
Figure 83 : Cas décollage profil normal avec $Mn=0.212$; $\Phi_{particule}=2000\mu m$; $\alpha=-12^\circ$	128
Figure 84 : Cas décollage profil normal avec $Mn=0.212$; $\Phi_{particule}=220\mu m$; $\alpha=+12^\circ$	129
Figure 85 : Cas décollage profil normal avec $Mn=0.212$; $\Phi_{particule}=2000\mu m$; $\alpha=+12^\circ$	130
Figure 86 : Cas décollage profil normal avec $Mn=0.212$; $\Phi_{particule}=220\mu m$; $\alpha=0^\circ$	131
Figure 87 : Cas décollage profil normal avec $Mn=0.212$; $\Phi_{particule}=2000\mu m$; $\alpha=0^\circ$	132
Figure 88 : Cas croisière profil normal avec $Mn=0.609$; $\Phi_{particule}=220\mu m$; $\alpha=0^\circ$	133

Figure 89 : Cas croisière profil normal avec $Mn=0.609$; Φ particule= $2000\mu m$; $\alpha=0^\circ$ 134
 Figure 90 : Cas décollage profil streamwise avec $M=0.25$; Φ particule= $220\mu m$; $\alpha=-12^\circ$ 135
 Figure 91 : Cas décollage profil streamwise avec $M=0.25$; Φ particule= $2000\mu m$; $\alpha=-12^\circ$ 136
 Figure 92 : Cas décollage profil streamwise avec $M=0.25$; Φ particule= $220\mu m$; $\alpha=+12^\circ$ 137
 Figure 93 : Cas décollage profil streamwise avec $M=0.25$; Φ particule= $2000\mu m$; $\alpha=+12^\circ$ 138
 Figure 94 : Cas décollage profil streamwise avec $M=0.25$; Φ particule= $220\mu m$; $\alpha=0^\circ$ 139
 Figure 95 : Cas décollage profil streamwise avec $M=0.25$; Φ particule= $2000\mu m$; $\alpha=0^\circ$ 140
 Figure 96 : Cas croisière profil streamwise avec $M=0.72$; Φ particule= $220\mu m$; $\alpha=0^\circ$ 141
 Figure 97 : Cas croisière profil streamwise avec $M=0.72$; Φ particule= $2000\mu m$; $\alpha=0^\circ$ 142

IX) Résumé

Les conditions extérieures agressives, telles que l'eau, la grêle ou le sable, peuvent entraîner une diminution des performances des matériaux. L'un des phénomènes mis en jeu est l'érosion qui se traduit par une perte progressive de matière due à l'interaction entre la surface et des particules solides ou liquides.

Pour évaluer ce phénomène, une première approche par prédiction avec un modèle semi-empirique a été adoptée. Cette approche associe des résultats expérimentaux à une simulation numérique. Le code d'accrétion bidimensionnel ONICE2D, développé par l'ONERA, a ainsi été utilisé pour simuler l'impact des particules et caractériser les vitesses normale et tangentielle (U_n/U_t) ainsi que l'angle d'impact θ , paramètres influents de l'érosion.

Ces calculs ont permis de modéliser le taux d'érosion autour d'un profil (Plan horizontal A320). Cependant, cette étude a mis en évidence des manques dans les bases de données expérimentales (taux d'érosion fonction du type de particule, vitesse, angle d'impact,...) utilisées pour construire le modèle semi-empirique d'érosion. Des essais complémentaires sont nécessaires pour mieux caractériser le taux d'érosion pour les différents matériaux utilisés sur avion et bâtir un modèle prédictif pouvant être utilisé pour supporter la phase de design.

Mots clefs : érosion, particule solide, particule liquide, modèle semi-empirique, ONICE2D, taux d'érosion.

Summary

External conditions, such as sand, hail or water droplets, can lead to a decrease of the mechanical performances of the materials. One of the involved phenomena is the erosion, which is characterized by a progressive loss of material due to the interaction between surface and solid or liquid particles. To evaluate this phenomenon, a first approach by prediction with a semi-empirical model was adopted. This approach associates lab test results with a numerical simulation. The bidimensional ice accretion suite ONICE2D, developed by ONERA, has been used to simulate the particle impacts and to evaluate the normal and tangential velocities (U_n/U_t) as well as the impact angle θ , significant parameters of erosion.

These calculations enabled the modelling of the erosion rate around an airfoil (A320 horizontal tail plane). However, this study highlighted some lack in the available experimental database (erosion rate as a function of the type of particle, velocity, impact angle,...) used to build the semi-empirical model. Complementary lab tests are necessary to better characterize erosion rate for the different materials used on aircraft and to build a predictive model to be used in Design phase.

Key words: erosion, solid and liquid particles, semi-empirical model, ONICE2D, erosion rate.