

CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES



Direction Technique et Numérique
Sous-Direction Technique Véhicules Orbitaux
Service Propulsion, pyrotechnie et aérodynamique

DEBRISK

DBK-NT-LOG-0567-CNES

Edition : 01 Date : 01/06/2023

Révision : 00 Date : 01/06/2023

Réf. : intentionnellement vide

Code diffusion : E

NOTE TECHNIQUE

GUIDE D'UTILISATION DE L'OUTIL DEBRISK POUR DES APPLICATIONS SATELLITES

Rédigé par : ANNALORO Julien DTN/TVO /PR GALERA Stephane DTN/TVO /PR BELLUCCI Aurélie DTN/DV /IFL	le : 01/06/2022	
Validé par : CASTANET Fabien DTN/TVO LAUR Grégoire DOA/SME /LOS	le :	
Pour application : ELJED Oifa DOA/SME/LOS	le :	

BORDEREAU D'INDEXATION

CONFIDENTIALITE :

MOTS CLES : DEBRISK, méthode, satellite, rentrée atmosphérique, LOS

TITRE DU DOCUMENT :

NOTE TECHNIQUE

GUIDE D'UTILISATION DE L'OUTIL DEBRISK POUR DES APPLICATIONS SATELLITES

AUTEUR(S) :

ANNALORO Julien

DTN/TVO /PR

GALERA Stephane

DTN/TVO /PR

BELLUCCI Aurélie

DTN/DV /IFL

RESUME : GUIDE D'UTILISATION DE L'OUTIL DEBRISK POUR DES APPLICATIONS SATELLITES

DOCUMENTS RATTACHES : Ce document vit seul.

LOCALISATION :

VOLUME : 1

NBRE TOTAL DE PAGES : 44
DONT PAGES LIMINAIRES : 6
NBRE DE PAGES SUPPL. : 0

DOCUMENT COMPOSITE : N

LANGUE : FR

GESTION DE CONF. : Non

RESP. GEST. CONF. :

CAUSE D'EVOLUTION :

CONTRAT : Néant

SYSTÈME HÔTE :

Microsoft Word 16.0 (16.0.5383)

\\Bacchus\Gdoc\ModeleGDOC.dot

Version GDOC : v4.5.1

Base projet : \\to05res04\GdocBasesPartagees\Projets\CNES\DEBRISK.accdb

DIFFUSION INTERNE

Nom	Sigle	Bpi	Observations
ANNALORO Julien	DTN/TVO /PR	1716	
BELLUCCI Aurélie	DTN/DV /IFL		
CARPENTIER Benjamin	DTN/STS/SPC		
CASTANET Fabien	DTN/TVO	1716	
GOESTER Jean-Francois	DTN/DV /IFL	1712	
JACQUESSON Marie	DTN/STS/STM		
LAUR Grégoire	DOA/SME /LOS	2912	
OMALY Pierre	DOA/SME	2912	
PRALY Nicolas	DTN/STS/SPC		
THIEBAUT Cedric	DTN/STS/STM		
GALERA Stephane	DTN/TVO /PR	1716	
PUILLET Christian	DTN/TVO/SM	1717	
MARTINEZ TORIO Alexandra	DTS/ /LOS		
GUELOU Yann	DTS/ /LOS		
LACOMBA Florent	DOA/SME/LOS	2912	
THAUVIN Emmanuelle	DOA/SME/LOS	2912	
ELJED Olfa	DOA/SME/LOS	2912	
PILLET Nicolas	IGQ	225	
PRESSECQ Francis	DTN/TVO		
BRICOUT Jean-Noel	DOA/ /ACP	2521	
FRANCILLOUT Laurent	DOA/SME	2912	
PASQUIER Pierre	DTN/AVI/MT	1714	
CHEMOUL Bernard	IGQ	225	

DIFFUSION EXTERNE

Nom	Sigle	Observations

MODIFICATION

Ed.	Rév.	Date	Référence, Auteur(s), Causes d'évolution
01	00	01/06/2023	Intentionnellement vide ANNALORO Julien DTN/TVO /PR GALERA Stephane DTN/TVO /PR BELLUCCI Aurélie DTN/DV /IFL

SOMMAIRE

GLOSSAIRE ET LISTE DES PARAMETRES AC & AD	1
1. GENERALITES	2
1.1. DOCUMENTS DE REFERENCE	2
1.2. DOCUMENTS APPLICABLES	2
2. INTRODUCTION	3
2.1. OBJECTIF	3
2.2. CHAPITRAGE	3
3. PRESENTATION DU LOGICIEL DEBRISK	5
3.1. ALGORITHME	5
3.2. NOUVELLES MODELISATION DANS DEBRISK V3.....	7
4. METHODE DE CALCUL DE LA SURFACE MEURTRIE POUR DEBRISK ET ELECTRA	9
5. RECOMMANDATIONS PREALABLES A L'UTILISATION DE DEBRISK POUR LE CHOIX DES CONDITIONS INITIALES ET DE MODELES D'ATMOSPHERE.....	11
5.1. INTRODUCTION	11
5.2. CHOIX DU MODELE D'ATMOSPHERE	11
5.2.1. Détermination du type de rentrée	11
5.2.2. Cas d'une rentrée contrôlée	12
5.2.3. Cas d'une rentrée naturelle	12
5.3. DEFINITION DES CONDITIONS INITIALES	13
5.3.1. Rentrée naturelle	13
5.3.2. Rentrée contrôlée	14
5.4. SCHEMA DE SYNTHESE.....	14
6. RECOMMANDATIONS PREALABLES A L'UTILISATION DE DEBRISK, POUR L'ANALYSE DE FRAGMENTATION	16
6.1. INTRODUCTION	16
6.2. DEMANTELEMENT ET RELATION ENTRE OBJETS	17
6.3. TRANSFERT D'ENERGIE	18
6.4. REGLES DE MODELISATION DU VEHICULE PARENT.....	18
6.4.1. Définition du véhicule parent	18
6.4.2. Détermination de la fragmentation principale.....	19
6.4.3. Modélisation de la survie des panneaux structuraux.....	20
6.4.4. Modélisation de la survie des panneaux solaires.....	21
6.5. REGLE DE MODELISATION POUR LES FRAGMENTS	21

6.5.1.	Définition des formes	21
6.5.2.	Recommandation sur les masses minimales à modéliser.....	22
6.5.3.	Formes DEBRISK	23
6.5.3.1.	Forme sphère	23
6.5.3.2.	Forme cylindre à bords plats	23
6.5.3.3.	Forme cylindre à bords hémisphériques.....	24
6.5.3.4.	Forme boîte	24
6.5.3.5.	Forme plaque plane.....	25
6.5.3.6.	Forme complexe	26
6.5.4.	Panneaux sandwich	27
6.5.4.1.	Panneaux sandwich NIDA/Aluminium (hors panneaux structuraux)..	27
6.5.4.2.	Panneaux sandwichs NIDA/CFRP (hors panneaux solaires déployés).....	28
6.5.5.	Autres éléments en CFRP	29
6.5.6.	Equipements de type boîtier Electronique	29
6.5.7.	Formes non directement assimilables à une forme DEBRISK	30
6.5.7.1.	Panneau de type propulsion (Plaque pleine trouée).....	31
6.5.7.2.	Assemblages	32
6.5.7.3.	Harnais	33
6.6.	PROPRIETES DES MATERIAUX.....	33
6.7.	SYNTHESE DE LA METHODOLOGIE V3.....	35
7.	RECOMMANDATIONS POUR LES ETUDES EN PHASE 0	36
	ANNEXE A : LISTE DES RECOMMANDATIONS/EXIGENCES	A.1

GLOSSAIRE ET LISTE DES PARAMETRES AC & AD

Liste des paramètres AC :

Liste des paramètres AD :

1. GENERALITES

1.1. DOCUMENTS DE REFERENCE

DOCUMENT DE REFERENCE	TITRE DU DOCUMENT
[DR1]	REGLEMENTATION- GUIDE DES BONNES PRATIQUES MAITRISE D'UN OBJET SPATIAL RNC-LOS-GR-CNF-8-CNES
[DR2]	DEBRISK SOFTWARE USER'S MANUAL - LOS MODE DBK-MU-LOG-0268-GMV_02_18
[DR3]	PROJECTED AREA AND DRAG COEFFICIENT OF HIGH VELOCITY IRREGULAR FRAGMENTS THAT ROTATE OR TUMBLE. John f. Moxnes et al. Defence technology, 13(4), 269–280. Doi:10.1016/j.dt.2017.03.008
[DR4]	ESA SPACE DEBRIS MITIGATION COMPLIANCE VERIFICATION GUIDELINES ESSB-HB-U-002 DATE 19 FEBRUARY 2015 ISSUE 1 REV 0
[DR5]	Le site ConnectByCnes où la bibliothèque CNES Patrius est décrite, on peut y consulter la ReleaseNote et télécharger gratuitement la bibliothèque: https://www.connectbycnes.fr/en/patrius http://patrius.cnes.fr/index.php/Accueil
[DR6]	DOSSIER DE SYNTHESE DE LA METHODE ELECTRA POUR LE CALCUL DES RISQUES LIES A LA RETOMBEE DE VEHICULES SPATIAUX. ELECT-DS-2200-89-CNES, V3.0

1.2. DOCUMENTS APPLICABLES

2. INTRODUCTION

2.1. OBJECTIF

Ce document a pour objectif de fournir un ensemble de recommandations, à un utilisateur désireux de mener à bien avec l'outil DEBRISK, l'analyse d'une rentrée atmosphérique complète d'un véhicule spatial et de ses fragments.

Ces recommandations concernent, lors de la mise en place des simulations avec DEBRISK à la fois le choix

- de la méthodologie pour la sélection des conditions initiales de rentrée,
- du modèle d'atmosphère adéquat
- ainsi que des formes permettant de modéliser le véhicule et ses fragments.

Ce guide d'utilisation est une aide technique apportée en support du « **GUIDE DES BONNES PRATIQUES POUR L'APPLICATION DE LA REGLEMENTATION TECHNIQUE ASSOCIEE A LA LOI SPATIALE FRANÇAISE** », nommé ci-après « GBP », [DR1].

Pour chacune des parties consacrées aux recommandations/exigences, la lecture s'articule globalement de la manière suivante :

1. Contexte

2. Recommandation ou Exigence

3. Mise en œuvre

4. Exemples

Les parties Recommandations/Exigences se déclinent en un numéro de recommandation ou d'exigence, un titre et l'énoncé encadré en rouge, tels que détaillés ci-dessous :

DBSK_REC_XXX_YYY ou DBSK_EX_XXX_YYY

Titre de la recommandation

Recommandation ou Exigence

2.2. CHAPITRAGE

Ce document est structuré de la manière suivante :

- **§3 – Présentation du logiciel DEBRISK**

Ce chapitre introduit le logiciel DEBRISK dans sa version V3, ainsi que les modélisations physiques principales mises en jeu dans le cadre d'un calcul d'ablation et de détermination des débris susceptibles de faire une victime.

- **§4 - Calcul de la surface meurtrie**

Ce chapitre fournit les principales formules de calcul de la surface meurtrie proposées par DEBRISK V3. Cette surface est recommandée pour calculer le risque qu'une personne soit touchée par un objet atteignant le sol.

- **§5 - Recommandations sur les conditions initiales et sur le modèle d'atmosphère préalable à l'utilisation de DEBRISK**

Ce chapitre traite des recommandations concernant à la fois l'orbite initiale à considérer selon le type de rentrée envisagée, et concerne aussi le modèle d'atmosphère à sélectionner.

- **§6 - Recommandations pour l'analyse de fragmentation préalable à l'utilisation de DEBRISK**

Ce chapitre traite de la démarche « Analyse de fragmentation » à mener avant toute utilisation du logiciel DEBRISK V3. Cette partie traite tout aussi bien de la modélisation du parent principal (véhicule spatial) que de ses fragments (enfants et/ou composants).

- **§7 - Recommandations pour l'analyse des phases 0 avec DEBRISK V3**

Ce chapitre traite de la démarche à adopter lors de la préparation d'une phase 0.

3. PRESENTATION DU LOGICIEL DEBRISK

3.1. ALGORITHMME

DEBRISK est un outil permettant l'évaluation de la survivabilité des fragments d'un véhicule rentrant dans l'atmosphère terrestre, en utilisant une approche orientée objet. Cette approche suppose que le véhicule rentrant (nommé par la suite véhicule parent), puisse être modélisé comme un jeu de plusieurs objets, de formes géométriques élémentaires à disposition. Cet outil a donc besoin comme entrées des conditions initiales cinématiques du véhicule parent, de ses caractéristiques physiques, ainsi que d'une liste d'objets. Cette liste représente les fragments du véhicule étudié, liés ou non entre eux suivant différents types de relations, et qui naîtront à partir de l'altitude de fragmentation principale du dit véhicule, ou lors de la disparition de l'objet parent les contenant. Cette liste est sous la responsabilité de l'opérateur qui la produit. L'identification de la géométrie de l'ensemble des fragments s'effectue par l'intermédiaire de formes déjà à disposition au sein du logiciel.

A partir de l'ensemble de ces renseignements, DEBRISK permet de calculer la trajectoire et la thermique du véhicule rentrant dans l'atmosphère terrestre et de prendre en compte sa fragmentation à l'altitude supposée de cet évènement. A partir de cet évènement, chaque objet représentant un fragment est simulé pas à pas, via sa trajectoire, sa température ainsi que son ablation éventuelle en fonction des flux entrants et sortants.

Plus précisément, DEBRISK modélise à chaque pas de temps et pour chaque objet :

- L'atmosphère terrestre afin de définir les conditions d'écoulement local,
- Les équations du mouvement dans un référentiel inertiel – **modélisation de la trajectoire**,
- Le coefficient de traînée en fonction de l'écoulement local – **modélisation aérodynamique**,
- Le flux thermique en fonction de l'écoulement local – **modélisation aérothermodynamique**,
- L'évolution de température de l'objet – **modélisation thermique**,
- L'ablation du matériau et le calcul des nouvelles dimensions – **modélisation de l'ablation**.

Ci-dessous nous présentons les principales modélisations physiques utilisées dans DEBRISK.

- **La modélisation de la trajectoire** et la propagation numérique utilisent la bibliothèque CNES Patrius, cf. [DR5].
- **Le calcul des forces aérodynamiques** ne considère que les forces de trainée. Les coefficients et surfaces de référence aérodynamiques sont définis pour chaque forme et pour chaque régime d'écoulement. Le régime de l'écoulement est basé sur le nombre de Knudsen, lui-même calculé en utilisant une longueur de référence qui dépend des caractéristiques géométriques de chaque objet.
- **Le flux thermique** sur chaque objet inclut la contribution des différents modes d'échauffement suivants :
 - Transfert convectif, qui s'applique à la surface de référence thermique,
 - Transfert d'oxydation, qui s'applique à la surface de référence thermique,
 - Rayonnement : pertes dues au rayonnement de la paroi ; qui s'appliquent à la surface totale de l'objet exposée vers l'extérieur
 - Transfert par contact : transfert d'énergie entre deux objets par l'intermédiaire d'un coefficient de contact s'appliquant sur la surface d'interaction entre ces objets.
- **Le coefficient de traînée** de l'objet et la **chaleur absorbée** dépendent de sa forme, de ses dimensions, des conditions de l'écoulement, et de l'attitude de l'objet. Le calcul de la température de paroi est une fonction du flux thermique, de la chaleur spécifique et de la masse de l'objet. La quantité de masse ablatée est déterminée à partir de l'intégration des flux une fois la température de fusion atteinte. Enfin, l'intégration des équations du mouvement dépend du coefficient balistique et des conditions de l'écoulement local. Ces mêmes conditions dépendent du déplacement de l'objet et de l'atmosphère terrestre.
- **Les surface de référence aérodynamique, thermique et surface totale** de l'objet exposées à l'extérieur dépendent directement de la forme considérée : sphère, cylindre, boîte, plaque, formes complexes ...

- **La température** de chaque objet est considérée uniforme dans le matériau, ce qui suppose que la conduction dans le matériau est infinie. Lorsque la température de fusion est atteinte pour un objet, l'énergie transférée à cet objet n'entraîne plus d'augmentation de la température mais une fusion du matériau, qui réduit sa masse et ses dimensions externes.
- **La masse de matériau ablatée** à chaque pas de temps est calculée par le rapport de la chaleur totale absorbée par l'objet sur l'enthalpie de fusion du matériau. La façon d'ablater un objet est spécifique en fonction des caractéristiques géométriques de celui-ci.
- **L'objet est considéré détruit** s'il déclenche l'un des critères suivant :
 - La masse restante atteint une valeur minimale limite définie et fixée dans le logiciel (0%).
 - Une dimension de l'objet atteint une valeur minimale limite définie et fixée dans le logiciel (10^{-5} m).
 - La décélération atteint une valeur maximale limite définie et fixée dans le logiciel (100 G).
 - L'énergie cinétique atteint une valeur minimale limite définie et fixée dans le logiciel (14 J).

Quelques définitions importantes à préciser :

La fragmentation

Il existe quatre types de fragmentation :

- La fragmentation principale est le processus qui désigne le moment où le satellite « s'éclate » et fait naître l'ensemble des éléments pré-listés par l'utilisateur (donc des enfants).
- La fragmentation des panneaux solaires est le processus « automatique » de séparation des panneaux solaires de son véhicule, qui s'effectue soit à 95 km, soit à l'altitude de fragmentation principale si cette dernière est supérieure à 95km.
- La fragmentation (sans préciser « principale » ou « des panneaux solaire ») est le processus classique de naissance :
 - d'un enfant qui est dans un parent, et qui est réalisé automatiquement quand le parent a disparu au sens de DEBRISK (critère de disparition déclenchée, comme vu ci-dessus)
 - d'un composant, réalisé automatiquement quand la température de séparation imposée par l'utilisateur est atteinte.

Ablation

C'est le processus de perte de masse d'un objet le long de sa rentrée.

3.2. NOUVELLES MODELISATION DANS DEBRISK V3

Le Tableau 1, montre l'ensemble des nouvelles modélisations physiques (en violet) intégrées dans la version DEBRISK V3 ainsi qu'une comparaison par rapport à celles de la version précédente DEBRISK V2.

	V2	V3
Type de relations	<ul style="list-style-type: none"> « Enfant » signifie une relation parent/enfant 	<ul style="list-style-type: none"> « Enfant » signifie une relation parent/enfant, avec transfert conducteur. « Composant » signifie une relation où un objet est constitué de primitives qui le composent. Les composants hériteront de la température du parent au moment de la fragmentation.
S/C	Les primitives disponibles sont boîte/cylindre.	Les primitives disponibles sont sphère/boîte/cylindre.
Fragmentation	Les relations de type « enfant » sont rompues en fonction des critères activés. Lorsque plusieurs critères sont définis, la fragmentation a lieu dès que le premier d'entre eux est activé. Lorsqu'une relation est rompue, une liste de fragments est générée	Les relations de type « enfant » ou « composant » sont rompues en fonction des critères activés. Lorsque plusieurs critères sont définis, la fragmentation a lieu dès que le premier d'entre eux est activé. Lorsqu'une relation est rompue, une liste de fragments est générée
Critères de fragmentation	DEBRISK fait une distinction entre le véhicule parent et un de ses éléments. Les critères de fragmentation sont donc différents. Pour le véhicule parent : <ul style="list-style-type: none"> L'altitude de fragmentation peut être fixée par l'utilisateur. Pour les fragments : <ul style="list-style-type: none"> Pour les relations de type « enfant », la fragmentation s'effectue quand il y a ablation totale. 	DEBRISK fait une distinction entre le véhicule parent et un de ses éléments. Les critères de fragmentation sont donc différents. Pour le véhicule parent : <ul style="list-style-type: none"> L'altitude de fragmentation peut être fixée par l'utilisateur ou elle s'effectue sur critère thermique. Pour les fragments : <ul style="list-style-type: none"> Pour les relations de type « enfant », la fragmentation s'effectue quand il y a ablation totale. Pour les relations de type « composant », la fragmentation s'effectue quand la température de séparation est atteinte.
Composition de la liste de fragments	Liste prédéfinie de primitives : <ul style="list-style-type: none"> Sphère Cylindre Boite Plaque 	Liste prédéfinie de primitives : <ul style="list-style-type: none"> Sphère Cylindre à bords plat Boite Plaque Cylindre à bords hémisphérique Tube/Anneau Cône ouvert et fermé Calotte sphérique Secteur de tube/anneau Secteur de calotte sphérique
Equation du mouvement	Modélisation 3ddl <ul style="list-style-type: none"> Dormand-Price d'ordre 5/3 avec différentes tolérances relatives et absolues en fonction de la variable. Les pas de temps min et max sont de 10^{-15} et 5s. 	Modélisation 3ddl <ul style="list-style-type: none"> Dormand-Price d'ordre 5/3 avec différentes tolérances relatives et absolues en fonction de la variable. Les pas de temps min et max sont de 10^{-15} et 5s.
Couplage	Les aspects thermiques et dynamiques sont couplés, assurant la mise à jour de la masse tout au long de la rentrée.	Les aspects thermiques et dynamiques sont couplés, assurant la mise à jour de la masse tout au long de la rentrée.
Modèle d'environnement terrestre	Modèle Terre <ul style="list-style-type: none"> Modèle WGS84, pour lequel la Terre est modélisée par une sphère légèrement aplatie aux pôles. Modèle atmosphérique : <ul style="list-style-type: none"> Par défaut un modèle statique US76. Modèle de gravité :	Modèle Terre <ul style="list-style-type: none"> Modèle WGS84, pour lequel la Terre est modélisée par une sphère légèrement aplatie aux pôles. Modèle atmosphérique : <ul style="list-style-type: none"> Par défaut un modèle statique US76. Un modèle dynamique est aussi proposé en option, basé sur le modèle NRLMSISE-00.

	<ul style="list-style-type: none"> • J0 	Modèle de gravité : <ul style="list-style-type: none"> • J0 ou J2
Base de données matériaux	<p>Une base de données est fournie par défaut.</p> <p>L'utilisateur peut rentrer des matériaux. Les caractéristiques peuvent être rentrées en fonction de la température.</p>	<p>Une base de données est fournie par défaut (différente de celle de V2).</p> <p>L'utilisateur peut rentrer des matériaux. Les caractéristiques peuvent être rentrées en fonction de la température.</p>
Modélisation thermique	<p>La thermique est de type 0D.</p> <p>Un réseau thermique est construit où chaque primitive est représentée par un nœud thermique. L'évolution thermique est le résultat des flux de chaleur entrant et sortant.</p>	<p>La thermique est de type 0D.</p> <p>Un réseau thermique est construit où chaque primitive est représentée par un nœud thermique. L'évolution thermique est le résultat des flux de chaleur entrant et sortant.</p> <p>La conduction n'est considérée que dans une relation de type « enfant ».</p>
Modélisation de l'attitude	<p>Un seul mode d'attitude est possible : mouvement aléatoire.</p>	<p>Un seul mode d'attitude est possible : mouvement aléatoire.</p>
Modélisation aérothermodynamique	<p>Quelle que soit l'attitude, la modélisation de la traînée et des flux convectifs de chaque primitive est basée sur les méthodes issues de Klett.</p>	<p>Les méthodes sont basées sur une utilisation de base de données réalisée à partir de calculs CFD/DSMC 3D.</p>
Modélisation aérodynamique en régime dit de « Basse vitesse »	<p>Modélisation tirée ORSAT, et issue en partie des formulations de HOERNER.</p>	<p>Modélisation en dessous de Mach 5 spécifique à chaque primitive, basée sur des données expérimentales.</p>
Modèle d'ablation	<p>La modélisation d'ablation est de type métaux.</p>	<p>La modélisation d'ablation est de type métaux.</p>
Modèle d'oxydation	<p>Modèle de Cropp</p>	<ul style="list-style-type: none"> • L'influence de l'oxydation sur l'émissivité est considérée • Nouveau modèle de flux d'oxydation • Modèle de perte de masse pour le Titane
Critères d'arrêts du calcul	<ul style="list-style-type: none"> • Fragmentation : les primitives en relation avec le fragment sont libérées dans l'écoulement. • Disparition : Le fragment est totalement ablaté si : <ul style="list-style-type: none"> ○ Masse égale à zéro, ○ Dimension minimale de 10µm • Impact au sol : Le fragment passe en dessous des 100m d'altitude. • Energie cinétique : L'énergie cinétique du fragment passe en dessous de 14J. • Accélération : le fragment dépasse les 100G d'accélération. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fragmentation : les primitives en relation avec le fragment sont libérées dans l'écoulement. • Disparition : Le fragment est totalement ablaté si : <ul style="list-style-type: none"> ○ Masse égale à zéro, ○ Dimension minimale de 10µm • Impact au sol : Le fragment passe en dessous des 100m d'altitude. • Energie cinétique : L'énergie cinétique du fragment passe en dessous de 14J. • Accélération : le fragment dépasse les 100G d'accélération.

Tableau 1 – Comparaison des modélisations associées à DEBRISK V3 par rapport à DEBRISK V2.

4. METHODE DE CALCUL DE LA SURFACE MEURTRIE POUR DEBRISK ET ELECTRA

Ce chapitre a pour objectif d'expliquer au lecteur, la méthode retenue pour calculer la surface meurtrie d'un débris. Elle est applicable aussi bien à DEBRISK qu'à ELECTRA par souci de cohérence.

Une fois la simulation de DEBRISK terminée et la liste des fragments qui survivent obtenue, le calcul de référence utilisé pour les estimations de risque qu'une personne soit touchée par un objet atteignant le sol, est celui de la surface meurtrie (ou « casualty area » A_c). Cette surface décrit le potentiel de nuisance d'un objet atteignant le sol par rapport à la présence éventuelle d'un être humain à proximité. Elle est donc spécifique à chaque forme d'objet. Cette méthode est définie en Figure 1 telle que :

$$A_c = (\sqrt{A_h} + \sqrt{A_d})^2$$

Equation 1

où A_h représente la surface d'un disque de diamètre $D_h = 0,677m$, (représentatif de l'être humain [DR6]), et A_d représente la surface projetée au sol du débris.

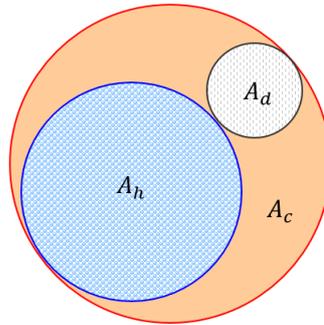


Figure 1 – Surface meurtrie ou « Casualty Area »

La surface projetée au sol du débris A_d se calcule dans DEBRISK V3 comme une surface projetée moyenne pour être statistiquement représentatif de la position de l'objet lors de sa chute, également recommandé par l'ESA dans son « ESA Space Debris Mitigation Compliance Verification Guidelines », [DR4].

Le mouvement des objets n'est pas aléatoire pour toutes les formes. De ce fait, la surface projetée doit être cohérente avec les hypothèses de mouvements retenus :

1. Pour la sphère, le cylindre et les formes « complexes » : c'est la moyenne pondérée en rotation aléatoire de la surface projetée sur un plan perpendiculaire à la direction de l'écoulement.
2. Pour la boîte et la plaque : c'est la moyenne pondérée en mouvement de tangage de la surface projetée sur un plan perpendiculaire à la direction de l'écoulement.

Les formules se déclinent de la manière suivante :

- Pour les formes convexes, ces formulations sont analytiques et sont issues de [DR3] :

- Pour la sphère et le cylindre :

$$A_d = \frac{S_{ext}}{4}$$

Equation 2

où S_{ext} représente la surface extérieure de l'objet.

- Pour la boîte :

$$A_d = \frac{2}{\pi} L(W + H)$$

Equation 3

où L, W, H représentent la longueur, la largeur et la hauteur respectivement de la boîte.

- Pour la plaque :

$$A_d = \frac{2}{\pi} L(W + \tau)$$

Équation 4

où L, W, τ représentent la longueur, la largeur et l'épaisseur respectivement de la plaque.

- Pour les formes de type cadre et tube, A_d est calculée et implanté de la façon suivante :

$$A_d = \frac{(S_{out} + S_{top} + S_{bot} + S_{in})}{4}$$

Équation 5

Avec :

$$S_{top} = S_{bot} = \pi(R^2 - (R - e)^2)$$

Équation 6

$$S_{out} = 2\pi RL$$

Équation 7

$$S_{in} = \pi(R - e)L(\sqrt{N^2 + 4} - N)$$

Équation 8

$$N = \frac{L}{R - e}$$

Équation 9

où R et e représentent le rayon et l'épaisseur respectivement. L'Équation 5 est dérivée de celle utilisée pour les formes convexes comme la sphère et le cylindre, et issue de [DR3], appliquée à chaque face. La face interne prend en compte le facteur de vue du cylindre interne dont l'expression est tirée de [DR1].

- Pour les autres types de formes, les formulations analytiques n'existant pas, une méthodologie d'interpolation a été mise en place, cf. [DR3]. Cette méthodologie est associée à une base de données dédiée. Cette base est réalisée en utilisant un outil numérique validé, de calcul d'ombre projetée sur un certain nombre de formes et de dimensions.

La létalité d'un débris dépend de sa surface meurtrie mais également de l'énergie cinétique du débris à l'arrivée au sol. Pour une même surface meurtrie, le débris le plus énergétique présente la dangerosité la plus élevée. DEBRISK définit pour chaque débris un coefficient de pondération de la surface meurtrie $\alpha_{CA}(E_{c_{imp}})$ dépendant de l'énergie d'impact $E_{c_{imp}}$. La surface meurtrie pondérée est ainsi définie par :

$$A_{c_{pond}} = \alpha_{CA}(E_{c_{imp}}) A_c$$

Équation 10

Où :

$$\alpha_{CA} = \begin{cases} 0 & \text{si } E_{c_{imp}} < E_{c_{min}} \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\left(\pi \frac{\ln(E_{c_{imp}}) - c_0}{c_1 - c_0}\right) & \text{si } E_{c_{min}} \leq E_{c_{imp}} \leq E_{c_{max}} \\ 1 & \text{si } E_{c_{max}} < E_{c_{imp}} \end{cases}$$

Équation 11

Avec $c_0 = \ln(E_{c_{min}})$ et $c_1 = \ln(E_{c_{max}})$, et tels que $E_{c_{min}} = 14J$ et $E_{c_{max}} = 296J$

5. RECOMMANDATIONS PREALABLES A L'UTILISATION DE DEBRISK POUR LE CHOIX DES CONDITIONS INITIALES ET DE MODELES D'ATMOSPHERE

5.1. INTRODUCTION

Afin de calculer la liste des fragments survivants lors d'une rentrée atmosphérique, le logiciel DEBRISK calcule la trajectoire d'un véhicule intègre et de ses fragments. La trajectoire d'un objet dépend à la fois des caractéristiques de cet objet (dimension, matériaux, forme...) et de son interaction avec son environnement (frottement atmosphérique, force de gravité, thermique, ...). Cet environnement n'étant pas nécessairement uniforme autour de la Terre selon les modèles choisis, le bulletin d'orbite initial influence également la trajectoire, en particulier si celle-ci est courte (moins d'une période orbitale par exemple).

L'objectif de ce chapitre est d'indiquer des recommandations concernant :

- le modèle d'atmosphère à sélectionner,
- l'orbite initiale à considérer.

Ces recommandations s'appuient sur deux études complémentaires concernant l'influence des conditions initiales sur les vitesses du véhicule à l'altitude standard de fragmentation (78km) et l'influence du modèle d'atmosphère.

Les recommandations dépendent du type de rentrée considérée : une rentrée naturelle, également appelée aléatoire ou une rentrée contrôlée.

On se place néanmoins toujours dans le cas de la préparation d'un dossier de conformité et donc bien en amont de la rentrée atmosphérique qui interviendra à une date inconnue au moment de la soumission de ce dossier.

5.2. CHOIX DU MODELE D'ATMOSPHERE

Contexte

Depuis la version 3.2 de DEBRISK, l'utilisateur peut choisir parmi 2 modèles d'atmosphère : US76 et MSIS00. Le modèle US76 est un modèle simple dans lequel la densité et la température varient uniquement en fonction de l'altitude géodésique. Il ne prend en compte aucun effet saisonnier ou géographique. C'est un modèle bien adapté aux études de dimensionnement. Au contraire, le modèle MSIS00 est empirique et dépend de la date, de l'heure, de l'activité solaire et de la position (altitude géodésique, latitude et longitude) de l'objet considéré tout au long de sa trajectoire de rentrée. Toute variation sur ces données engendre une variation des caractéristiques atmosphériques utilisées dans une simulation DEBRISK et donc une variation potentielle sur le résultat.

5.2.1. Détermination du type de rentrée

DBSK_REC_ATM_010

Choix du modèle d'atmosphère, premier calcul

La date de rentrée étant inconnue, il est recommandé d'utiliser le modèle US76 afin de définir le type de rentrée envisageable. On veillera à utiliser une inclinaison correspondant à la mission.

DBSK_REC_ATM_020

Choix du modèle d'atmosphère, deuxième calcul

Afin d'éviter d'être dans un cas atypique non représentatif, il est recommandé de renouveler le calcul US76 en modifiant les conditions initiales (cf. 5.3) afin de s'assurer que le résultat varie peu et reste dans la même gamme

de valeurs.

Mise en œuvre

Le choix du modèle d'atmosphère se fait dans l'onglet « Simulation Parameters » comme détaillé dans le Manuel Utilisateur, cf. [DR2].

5.2.2. Cas d'une rentrée contrôlée

Contexte

Dans le cas où le calcul recommandé par DBSK_REC_ATM_010, réalisé avec une atmosphère US76 donne une valeur de surface meurtrie bien supérieure au seuil permettant de respecter la Réglementation Technique [DR1] pour l'année considérée, une rentrée contrôlée devra être envisagée. La notion de « bien supérieure au seuil » n'est pas quantifiée car elle dépend de la phase de développement du projet considéré.

DBSK_REC_ATM_030

Choix du modèle d'atmosphère pour une rentrée contrôlée

Si une rentrée contrôlée est envisagée, alors il est recommandé de réaliser un calcul en utilisant le modèle d'atmosphère US76 avec une densité atmosphérique minorée et majorée de 50% afin d'évaluer comment évolue le nombre de fragments survivants et la surface meurtrie totale. Si les nouveaux fragments survivants ainsi révélés ont des coefficients balistiques inférieurs ou supérieurs à ceux déjà identifiés, cela influencera la taille de la tâche d'impacts (fragments le plus court ou fragment le plus long).

DBSK_REC_ATM_040

Choix du modèle d'atmosphère, fin de mission

En fin de mission il est recommandé d'effectuer un calcul DEBRISK en utilisant le modèle MSIS00, car la date de rentrée et l'activité solaire sont connues, ou en cas de nécessité de réaliser une étude paramétrique.

Mise en œuvre

Dans l'onglet « Simulation Parameters » il est possible d'appliquer un coefficient multiplicatif de la densité atmosphérique afin de majorer/minorer celle-ci (Cf. Manuel Utilisateur. [DR2]).

5.2.3. Cas d'une rentrée naturelle

Contexte

Dans le cas où le calcul recommandé par DBSK_REC_ATM_010, réalisé avec une atmosphère US76 donne une valeur de surface meurtrie bien inférieure au seuil permettant de respecter la Réglementation Technique (RT) [DR1] pour l'année considérée, une rentrée naturelle peut-être envisagée. La notion de « bien inférieure au seuil » n'est pas quantifiée car elle dépend de la phase de développement du projet considéré.

DBSK_REC_ATM_050

Choix du modèle d'atmosphère pour une rentrée naturelle

Si une rentrée naturelle est envisagée, alors il est recommandé de réaliser un calcul en utilisant le modèle d'atmosphère US76 avec une densité atmosphérique minorée et majorée de 50% afin de vérifier que le résultat

reste suffisamment inférieur au seuil de la RT.

Dans le cas contraire, une étude paramétrique (variation des conditions initiales + MSIS00) est recommandée.

Mise en œuvre

Dans l'onglet « Simulation Parameters » il est possible d'appliquer un coefficient multiplicatif de la densité atmosphérique afin de majorer/minorer celle-ci (Cf. Manuel Utilisateur. [DR2]).

5.3. DEFINITION DES CONDITIONS INITIALES

Contexte

Il s'agit ici de définir les conditions initiales du calcul DEBRISK qui sont définies par une date et 6 paramètres orbitaux osculateurs. Parmi les paramètres requis, l'inclinaison est le paramètre le mieux connu. Il s'agit de l'inclinaison de l'orbite mission. Elle évolue très peu au cours du temps, tout au plus de +/- 1° sur 25 ans.

5.3.1. Rentrée naturelle

Contexte

Pour une rentrée naturelle, les conditions initiales sont totalement inconnues mis à part l'inclinaison de la mission. L'influence des différents paramètres a été étudiée afin d'aboutir aux préconisations ci-dessous. Les choix résultent du besoin de garantir un temps de calcul raisonnable, de s'affranchir des écarts entre altitudes géocentriques et géodésiques, de l'effet de l'aplatissement terrestre tout en sachant que l'influence de chaque paramètre reste faible dans le cas d'un calcul avec le modèle d'atmosphère US76 préconisé ci-dessus. Les études ayant néanmoins révélés quelques résultats sensibles à des effets de seuils, plusieurs valeurs de PSO initiales sont à tester.

DBSK_REC_CI_010

Conditions initiales en rentrée naturelle

Il est recommandé d'utiliser les conditions initiales suivantes pour une rentrée naturelle :

- Date : 01-01-2020 0h00
- Altitude Périgée : 140 km
- Altitude Apogée : 140 km
- Inclinaison : valeur mission
- Ascension droite du nœud ascendant Ω : 0°
- Argument du périgée ω : 0°
- Anomalie vraie v : 180° en première approche puis 0°, 90° et 270° pour vérifier la variabilité du résultat. Si nécessaire, on balayera les valeurs possibles tous les 30°.
- Modèle d'atmosphère : US76

Mise en œuvre

Le 1^{er} onglet de DEBRISK permet la saisie du bulletin d'orbite initial utilisé pour le calcul de la trajectoire du véhicule intègre. Ce bulletin (date + 6 paramètres orbitaux osculateurs) est donné dans le repère J2000.

5.3.2. Rentrée contrôlée

Contexte

Par définition, le risque humain pour une rentrée contrôlée est nul. L'objectif de l'étude de risque est d'estimer la probabilité de victime en cas de contingence avant ou durant la rentrée contrôlée. Le calcul du risque global d'une rentrée contrôlée combine le risque en cas de rentrée aléatoire (contingence avant la dernière manœuvre) et le risque en cas de contingence lors de la dernière manœuvre qui dirige le véhicule vers la zone de retombée visée (Cf. [DR1]).

DBSK_REC_CI_020

Conditions initiales en rentrée contrôlée

Dans le cas d'une rentrée contrôlée, il est donc recommandé de réaliser deux calculs avec DEBRISK :

- l'un avec des conditions initiales d'une rentrée naturelle (cf. §5.3.1),
- l'autre avec le bulletin en fin de dernière manœuvre fourni par l'analyse mission.

Mise en œuvre

Chaque calcul DEBRISK donnera une liste de fragments survivants. Lors du calcul du risque global, on utilisera la liste appropriée pour chaque étape du calcul. Dans le cas de l'utilisation d'ELECTRA, on utilisera donc la liste appropriée à pour chaque mode.

5.4. SCHEMA DE SYNTHESE

L'ensemble de ces préconisations est regroupé dans le schéma s (cf. Figure 2) :

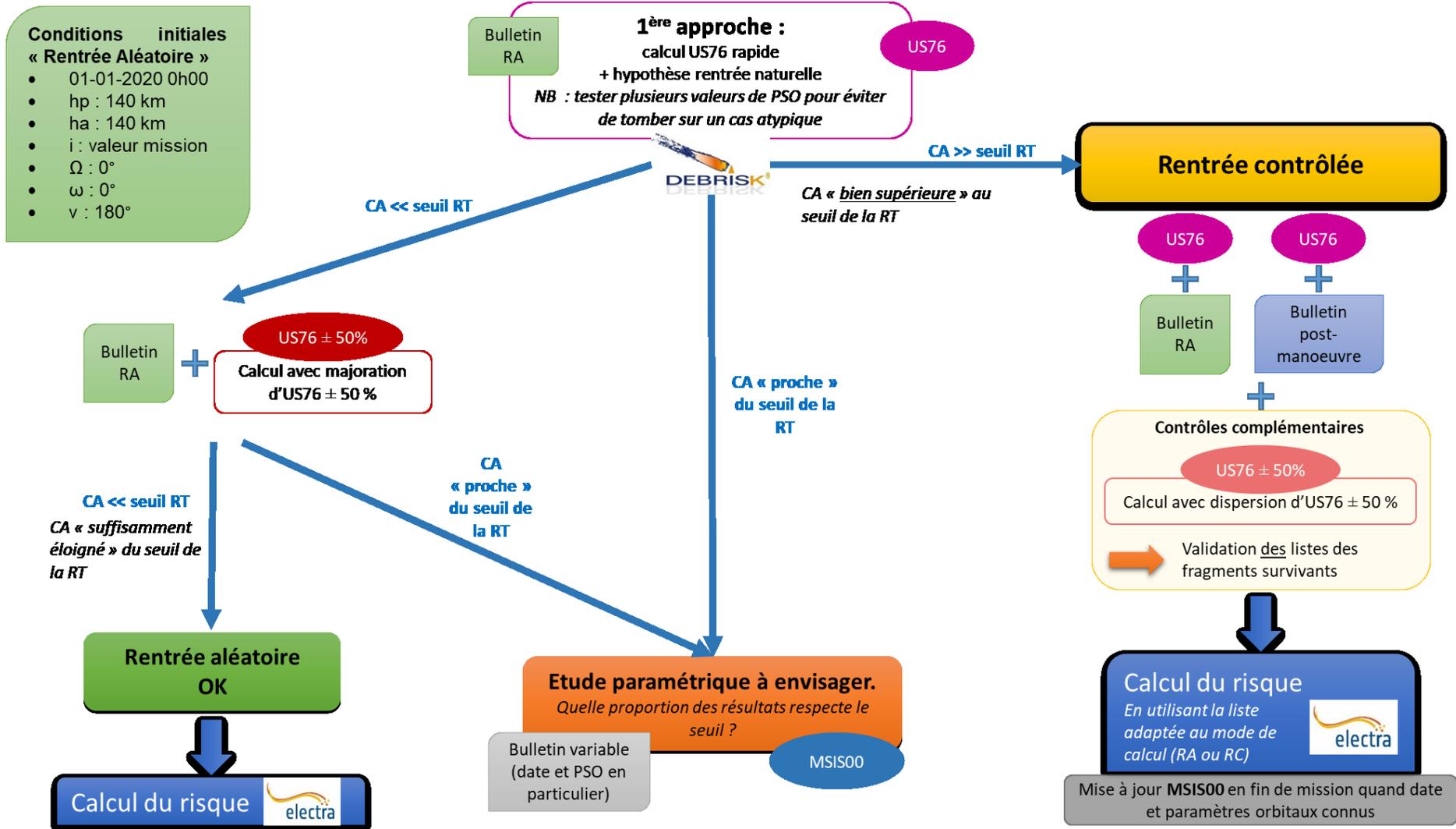


Figure 2 – Schéma des préconisations sur le choix du modèle d'atmosphère et des conditions orbitales

6. RECOMMANDATIONS PREALABLES A L'UTILISATION DE DEBRISK, POUR L'ANALYSE DE FRAGMENTATION

6.1. INTRODUCTION

Dans les parties suivantes, nous détaillons les différentes recommandations permettant de fragmenter le plus correctement possible un véhicule spatial dans le cadre d'une étude de conformité avec DEBRISK.

Cette étape consiste donc à établir et justifier comment s'opère la fragmentation, car le logiciel DEBRISK ne le définit pas : c'est une démarche nécessitant des compétences d'ingénieurs expert en mécanique, structures, et matériaux.

Dans l'évaluation de la fragmentation, il est nécessaire de conduire à minima la démarche suivante :

- **Représentation du véhicule spatial intègre avant fragmentation.**
- **Décomposition en objets fragments primaires, secondaires, etc.**
- **Connaissance des matériaux qui constituent chaque élément du satellite.**

Pour cela, l'opérateur doit s'appuyer sur les documents tels que

- **DJD : Dossiers de Justification et de Définition**
- **CIDL (Configuration Item Data List) : La configuration des équipements (liste des pièces, S/S ensembles)**
- **DML (Declared Material List) : Les matériaux utilisés, avec leurs caractéristiques**
- **DPL (Declared Process List) : Les procédés utilisés pour assembler les éléments (collage, brasures, ...), et leurs caractéristiques (conduction, fusions, ...)**
- **MICD : Plans des pièces, géométries**
- **Bilan MCI : Masses des éléments**
- **CAO : Conception Assistée par Ordinateur**

DEBRISK nécessite une connaissance précise de tous les fragments en volume pour pouvoir effectuer une fragmentation réaliste. A titre d'exemples, l'opérateur doit connaître les éléments constituant l'intérieur d'une roue à inertie, les dimensions/masses (ou épaisseur) de la coque du boîtier électronique et de ses cartes, l'épaisseur des peaux et du NIDA d'un panneau sandwich...

L'altitude de fragmentation principale du véhicule parent devra être estimée suivant la méthodologie recommandée au § 6.4.

DBSK_EX_MOD_010

Modélisation générique

Pour que chaque fragment soit décrit correctement, qu'il soit issu de la décomposition du véhicule parent, ou qu'il concerne le véhicule parent lui-même, il faudra fournir les informations suivantes :

- Nom explicite (avec définition des acronymes),
- Quantité (cela concerne uniquement les fragments issus de la décomposition du véhicule parent)
- Le type de relation avec d'autres fragments en suivant la méthodologie recommandée du § 6.2,
- La forme retenue pour sa modélisation, en suivant les méthodologies recommandées des § 6.4 et § 6.5. Il faudra y préciser en particulier :
 - Les caractéristiques géométriques : dimensions extérieures et intérieures, masse thermique, cf. 6.5.1
 - Les caractéristiques physiques :
 - Coefficients de conductance, cf. § 6.3,
 - Matériaux cf. § 6.6.

Pour aider l'opérateur dans sa démarche, il est recommandé de suivre les règles définies ci-dessous, afin de profiter de toutes les fonctionnalités offertes par DEBRISK. Pour l'utilisation de cet outil, l'opérateur se référera au manuel utilisateur de DEBRISK [DR2].

6.2. DEMANTELEMENT ET RELATION ENTRE OBJETS

Contexte

La liste de fragments issue de la décomposition du véhicule parent, est une succession d'éléments. Lors de la fragmentation principale du satellite sont libérés les éléments de tout premier niveau : ils représentent les fragments qui sont fixés directement aux panneaux structuraux, qu'ils soient en interaction avec l'écoulement (donc à l'extérieur de la structure) ou à l'intérieur du satellite. Les éléments sont indépendants les uns des autres.

Dans le cas contraire, certains éléments peuvent avoir des relations spécifiques entre eux. Ainsi DEBRISK propose deux types de relations :

- Une relation de type « Parent / Enfants » (déjà présente dans DEBRISK V2) : c'est une relation entre deux éléments lorsque l'un est contenu dans l'autre. Dans ce cas, le fragment parent contient des enfants. Ces enfants sont ensuite relâchés dans l'écoulement dès lors que le fragment parent a disparu. L'objet enfant apparaît dans les mêmes conditions d'écoulement que l'objet parent disparu. La température de naissance de l'enfant est quant à elle soit de 300K (si l'enfant n'a pas d'échange thermique avec le parent), soit supérieure à 300 K si une conductance de contact a été définie entre le parent et l'enfant, cf. § 6.3.
- Une relation « Parent / Composants » (nouvelle relation disponible dans DEBRISK V3) : c'est une relation entre un élément, et des sous-éléments qui le constituent. Un composant est relâché dans l'écoulement uniquement via un critère de température de séparation sur l'objet parent qui doit être atteint (définie par le terme *Separation Temperature* dans DEBRISK). Pour cette relation, l'objet composant apparaît dans les mêmes conditions d'écoulement que l'objet parent disparu et hérite également de sa température puisque les éléments composants ont bien été en interaction avec l'écoulement (contrairement à la relation parent / enfants). Cette modélisation est particulièrement intéressante et applicable aux panneaux sandwich NIDA. Elle permet en effet de pouvoir simuler la séparation des peaux avec le NIDA à la température de pyrolyse des colles permettant de faire le lien entre ces deux sous-éléments (cf. § 6.4.2). Dans ce cas, l'objet parent serait donc le panneau sandwich intègre avec comme composants (au nombre de 3) les deux peaux et le NIDA.

DBSK_REC_MOD_010

Choix de la relation

L'utilisation de la relation de type « Parent / Enfants » est recommandée pour deux cas de figure :

- 1- Lors de la création des éléments de premier niveau car ils représentent les enfants dont le parent est le satellite. Même si les éléments extérieurs à la structure ne sont pas encapsulés par le satellite comme pour les éléments intérieurs, ils sont considérés de même niveau.
- 2- Dans le cas d'emboîtement d'autres éléments secondaires, comme par exemple, des cartes électroniques dans un boîtier PCDU.

L'utilisation de la relation « Parent / Composants » est recommandée quand un fragment élémentaire peut se disloquer en sous éléments (nommés par la suite composants), comme par exemple un panneau sandwich dont la peau se désolidariserait du NIDA.

Mise en œuvre

Le choix de la relation se fait au moment de la création de la forme, via l'onglet « Relationship », comme détaillé dans le Manuel Utilisateur, cf. [DR2].

6.3. TRANSFERT D'ENERGIE

Contexte

Dans le cas d'une relation de type « Parent / Enfants », un transfert d'énergie est désormais possible dans DEBRISK V3 entre le parent et ses enfants, permettant ainsi de préchauffer ces derniers même s'ils sont protégés de l'environnement extérieur. Pour cela, il faut renseigner la conductance de contact C_c (Conduction Coefficient) telle que $C_c = h S_{contact}$ (W/K) où h représente le coefficient de contact (W/K/m²) entre le parent et l'enfant et $S_{contact}$ représente la surface de contact entre les deux.

DBSK_REC_MOD_020

Transfert thermique

Il est recommandé de laisser cette option à 0 quand la nature du contact est inconnue.

Si l'opérateur souhaite rendre compte d'un transfert d'énergie pour un contact entre deux objet, il devra justifier la démarche, ainsi que les coefficients de conductance qu'il utilise.

Mise en œuvre

Cette option s'utilise en renseignant la valeur de la conductance de contact C_c (« Conduction Coefficient ») lors de la création de la forme, comme détaillé dans le Manuel Utilisateur, cf. [DR2].

6.4. REGLES DE MODELISATION DU VEHICULE PARENT

Cette partie concerne la modélisation du véhicule parent et de la méthodologie recommandée pour définir l'altitude de fragmentation principale de celui-ci ainsi que celle de la perte des panneaux solaires (nommés par la suite systématiquement GS). Sont considérés ici deux types de véhicules parent : ceux, constitués d'une structure du type sandwich NIDA/Aluminium et les autres.

La méthodologie appliquée à DEBRISK V3, et détaillée dans les parties suivantes, se décline suivant la logique ci-dessous :

- Définition du véhicule parent
- Détermination de l'altitude de fragmentation
- Modélisation des panneaux structuraux
- Modélisation des panneaux solaires

6.4.1. Définition du véhicule parent

DBSK_EX_MOD_020

Définition du véhicule parent

Les caractéristiques du véhicule parent sont à définir de la façon suivante :

- **Forme du corps principal** : La forme doit être choisie parmi les formes proposées par DEBRISK qui s'en rapproche le plus.
Dimensions du corps principal : Les dimensions doivent englober les dimensions maximales extérieures du véhicule, hors éléments déployés.
- **Masse totale du corps principal** : cette masse correspond à la masse sèche totale du satellite en tenant compte des panneaux solaires.
- **Masse thermique du corps principal** : cette masse correspond à la masse de la structure du véhicule parent qui subit un échauffement lors de la rentrée atmosphérique, c'est-à-dire les panneaux structuraux.

- **Les panneaux solaires** : les panneaux solaires sont représentés par les formes « plaque » dans DEBRISK. Dans le cas où les panneaux sont déployés, il faut renseigner :
 - Le nombre de panneaux solaires.
 - La masse totale de chacun des panneaux.
 - La surface S_{panel} de chacun des panneaux, suivant la formule suivante :

$$S_{panel} = LW$$

Équation 12

où L et W représentent respectivement la longueur et la largeur de la forme « plaque » associée au panneau.

Mise en œuvre

Les valeurs des caractéristiques du véhicule parent sont à renseigner au moment de la création de la forme initiale, désignée par défaut dans DEBRISK par « Spacecraft », cf. le Manuel Utilisateur [DR2].

Exemple

La **Figure 3** ci-dessous présente la structure externe du satellite MICROSCOPE. Au regard de la figure du véhicule parent, la définition se fait de la manière suivante :

- Le corps du véhicule parent doit être modélisé par une boîte qui englobent ses dimensions maximales.
- La masse totale du véhicule doit représenter la masse totale de MICROSCOPE.
- La masse thermique du véhicule est la somme des masses des 6 panneaux structuraux.
- Il faut de plus considérer les 2 panneaux solaires en tant que plaques.



© CNES - Juillet 2012 / Illustr. D. Ducros

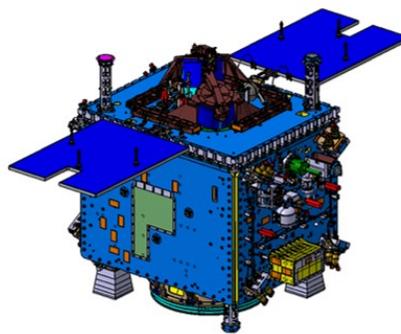


Figure 3 – Structure externe de MICROSCOPE

6.4.2. Détermination de la fragmentation principale

Contexte

DEBRISK V3 offre la possibilité entre deux méthodes, permettant soit de déterminer automatiquement cette altitude, soit de l'imposer comme dans DEBRISK V2.

DBSK_REC_MOD_030

Fragmentation principale

Pour un véhicule principalement constitué d'une structure du type sandwich NIDA/Aluminium dont l'assemblage est effectuée avec une colle de type résine époxy, la méthodologie recommandée est de choisir comme critère de fragmentation principale du véhicule, l'altitude où la température de l'objet représentant le véhicule parent atteint la température de dégradation des colles qui fixent les feuillets au NIDA.

Lorsque le véhicule parent ne présente pas une configuration telle que l'on puisse appliquée la recommandation précédente, il est recommandé de choisir 78 km comme altitude de fragmentation principale.

Mise en œuvre

Pour déterminer automatiquement la fragmentation principale d'un véhicule constitué principalement d'une structure du type sandwich NIDA/Aluminium dont l'assemblage est effectuée avec une colle de type résine époxy, la recommandation s'applique de la façon suivante :

- Utiliser l'option de fragmentation « *Separation temperature* », permettant ainsi de calculer l'évolution de la température du véhicule parent pendant sa phase de rentrée.
- Définir la température de séparation, dûment justifiée, ou choisir la valeur conseillée par défaut de 573K.

Lorsque le véhicule parent ne présente pas une configuration telle que l'on puisse appliquer la recommandation précédente, il faut renseigner à 78 km dans l'option « *Fragmentation altitude* ».

6.4.3. Modélisation de la survie des panneaux structuraux**DBSK_REC_MOD_040****Panneaux structuraux**

Il est recommandé de prendre en compte les panneaux structuraux dans la liste des fragments libérés au moment de la fragmentation principale, définie au § 6.4.2, et de les modéliser selon le type de matériau :

- Si les panneaux structuraux sont de type sandwich NIDA/Aluminium, seuls les deux peaux en Aluminium sont à modéliser.
- Si les panneaux structuraux sont en aluminium plein (un panneau propulsion par exemple), il faut donc les modéliser classiquement par des « plaques pleines ».

Mise en œuvre

Si les panneaux structuraux sont de type sandwich NIDA/Aluminium, les deux peaux en Aluminium, sont à modéliser telles que décrites dans le Tableau 2 ci-dessous.

Forme	Plaque
Longueur et largeur	Dimensions réelles des peaux
Masse/Épaisseur	Masse ou épaisseur réelle des peaux
Matériau	Matériau des peaux
Type de relation avec son parent	Parent/Composant

Tableau 2 – Caractéristiques des deux plaques modélisant un panneau sandwich NIDA/Aluminium.

Si les panneaux structuraux sont en aluminium plein, il faut les modéliser telles que décrites dans le Tableau 3 ci-dessous.

Forme	Plaque
Longueur et largeur	Dimensions réelles du panneau
Masse	Masse réelle du panneau
Matériau	Matériau du panneau
Type de relation avec son parent	Parent/Composant

Tableau 3 – Caractéristiques de la plaques modélisant un panneau plein en Aluminium.

6.4.4. Modélisation de la survie des panneaux solaires

DBSK_REC_MOD_050

Panneaux solaires déployés

Dans le cas où les panneaux solaires sont déployés, il n'est pas recommandé de les considérer dans la liste initiale des fragments.

Mise en œuvre

Dans le cas où les panneaux solaires sont déployés, l'utilisateur n'a aucune action à effectuer.

DBSK_EX_MOD_030

Panneaux solaires gerbés

Dans le cas où les panneaux solaires sont encore gerbés, il est exigé de les considérer dans la liste initiale des fragments.

Mise en œuvre

Dans le cas où les panneaux solaires sont gerbés, il faut les modéliser telle que décrit dans le §6.5.4.2 - Panneaux sandwich NIDA/CFRP.

6.5. REGLE DE MODELISATION POUR LES FRAGMENTS

Cette partie concerne la modélisation des fragments issus de la décomposition du véhicule parent.

6.5.1. Définition des formes

DBSK_EX_MOD_040

Définition des formes

Les caractéristiques de chacune des formes sont à définir de la façon suivante :

- **Forme** :
 - La forme doit être choisie parmi celles proposées par DEBRISK qui s'en rapproche le plus.
 - Pour certaines formes réelles non disponibles, une équivalence est recommandée.
- **Dimensions** : Les dimensions (rayon, longueur, largeur, hauteur, épaisseur, angles de révolution, courbure, ...) extérieures doivent être respectées au maximum. Une fois les dimensions extérieures renseignées, l'utilisateur peut soit rentrer la masse thermique de l'objet ou l'épaisseur. Il est recommandé de privilégier la masse quand celle-ci est connue.
- **Masse thermique** : Cette masse correspond à la masse de la structure du fragment, c'est-à-dire à celle qui subit un échauffement lors de la rentrée atmosphérique. Il ne faut pas la confondre avec la masse aérodynamique, qui elle, correspond à la masse totale d'un fragment et qui est utilisée pour calculer le coefficient balistique.
- **Conduction thermique** : Le phénomène de transfert d'énergie entre un parent et un enfant ne peut être pris en compte que s'il est fourni un coefficient de conductance non nul.
- **Température de séparation** : C'est la température à laquelle une forme se fragmente en ses composants. Cette température doit être inférieure à la température de fusion du matériau associé.
- **Matériau** : Le matériau peut être choisi parmi les matériaux proposés par DEBRISK ou proposé par l'utilisateur s'il peut justifier ses sources (publications, expériences, données internes, ...).

Mise en œuvre

Les formes et choix recommandés sont détaillées aux § 6.5.3 à 6.5.7. Les caractéristiques ci-dessus sont à renseigner au moment de la création de la forme, comme détaillé dans le Manuel Utilisateur [DR2].

6.5.2.Recommandation sur les masses minimales à modéliser**Contexte**

Lors de la rentrée atmosphérique d'un véhicule spatial, il existe des fragments pour lesquels il n'est pas nécessaire de réaliser des simulations, car ils ne représentent aucun risque au sol au sens de la Loi sur les Operations Spatiales (LOS). C'est le cas des fragments qui sont entièrement ablatés, ou pour lesquels l'énergie cinétique passe en dessous de 14J. Pour une rentrée de type « non-contrôlée », une étude a été réalisée et permet d'établir le Tableau 4, qui fournit pour chaque famille d'objet, les valeurs extrêmes des masses de fragments qui ne représentent aucun risque au sens de la LOS, et ce, pour une topologie, un coefficient balistique et un matériau donné.

DBSK_REC_MOD_060

Masses minimales

Il est recommandé de ne pas modéliser dans la liste de fragmentation de premier niveau, un fragment dont la masse (initiale) est strictement inférieure à celle donnée dans le Tableau 4.

Mise en œuvre

La prise en compte ou non d'un élément dans la liste de fragmentation est possible en utilisant le Tableau 4.

L'utilisation de ce tableau est justifiée pour une rentrée naturelle ou contrôlée, et pour les formes/matériaux et coefficients balistiques y figurant.

Pour déterminer le coefficient balistique du véhicule parent, l'utilisateur pourra réaliser une première simulation avec DEBRISK, en ne modélisant que le véhicule parent, puis devra consulter les fichiers de résultats (fichier de sortie au format .csv).

	Nombre de calculs	Coefficient Balistique du véhicule parent [kg/m ²] Matériaux	Masses à prendre en compte pour un coefficient balistique :		
			≥ 10	≥ 100	≥ 1000
Sphère	~ 4000	Aluminium	0,501	1,585	1,995
		Acier	0,025	0,04	0,04
		Titane	0,02	0,025	0,02
Boîte	~ 10 ⁶	Aluminium	0,251	1,259	1,585
		Acier	0,01	0,016	0,016
		Titane	0,01	0,01	0,01
Plaque	~ 50000	Aluminium	0,158	0,794	1,259
		Acier	0,04	0,063	0,063
		Titane	0,063	0,05	0,05
Cylindre	~ 200000	Aluminium	0,398	2,512	3,162
		Acier	0,02	0,032	0,032
		Titane	0,02	0,02	0,02
Tube	~40000	Aluminium	0,631	3,981	7,943
		Acier	0,025	0,063	0,063
		Titane	0,02	0,025	0,025

Tableau 4 – Masse [kg] minimale critique à prendre en compte lors des simulations

6.5.3. Formes DEBRISK

Sont traités dans ce chapitre, les fragments directement assimilables aux formes proposées par DEBRISK.

DBSK_EX_FRAG_010

Formes pleines

Pour toutes les formes ci-dessous, si l'objet à modéliser est plein, il ne faut pas utiliser la forme creuse pour la remplir, mais utiliser la forme pleine mise à disposition.

6.5.3.1. Forme sphère

Contexte

DEBRISK propose deux types de sphères : creuses et pleines. Les variables primitives présentées ci-dessous sont uniquement valables pour la forme creuse. En effet, dans le cas de la sphère pleine, la notion d'épaisseur n'existe pas, ainsi que celle de dimension interne.

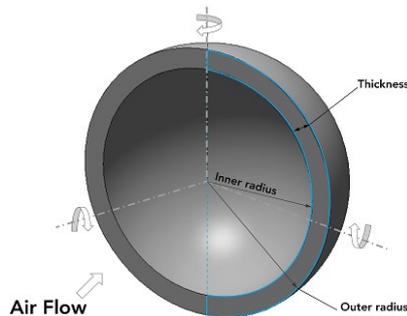


Figure 4 : Définition des dimensions d'une sphère

Les variables à renseigner pour décrire la sphère Figure 4 sont :

- Dimension 1 : le rayon externe R_{outer} , nommé « outer radius » en [m].
- Dimension 2 : le rayon interne R_{inner} , nommé « inner radius » en [m].
- La masse en [kg].
- L'épaisseur en [mm].

A titre d'exemples, peuvent rentrer dans cette catégorie les réservoirs d'ergols (vide) et les sphères de pressurisation.

6.5.3.2. Forme cylindre à bords plats

Contexte

DEBRISK propose deux types de cylindres : creux et pleins. Les variables primitives présentées ci-dessous sont uniquement valables pour la forme creuse. En effet, dans le cas du cylindre plein, la notion d'épaisseur n'existe pas, ainsi que celle de dimension interne.

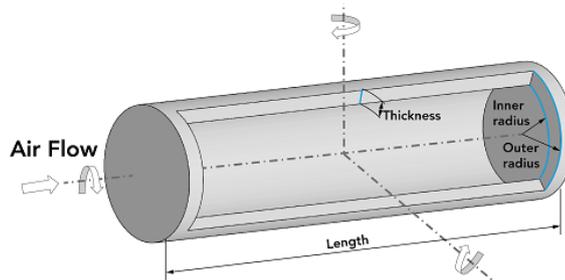


Figure 5 : Définition des dimensions d'un cylindre à bord plat

Les variables à renseigner pour décrire le cylindre Figure 5 sont :

- Dimension 1 : le rayon externe R_{outer} , nommé « outer radius » en [m].
- Dimension 2 : le rayon interne R_{inner} , nommé « inner radius » en [m].
- Dimension 3 : la longueur externe L_{outer} nommée « outer length » en [m].
- La masse en [kg].
- L'épaisseur en [mm].

A titre d'exemples, peuvent rentrer dans cette catégorie :

- Les cylindres longs : Magnéto-coupleurs, bielles, mâts, tuyauterie ...
- Les cylindres plats : Roues à réaction, miroirs ...

6.5.3.3. Forme cylindre à bords hémisphériques

Contexte

Dans DEBRISK, cette forme est creuse.

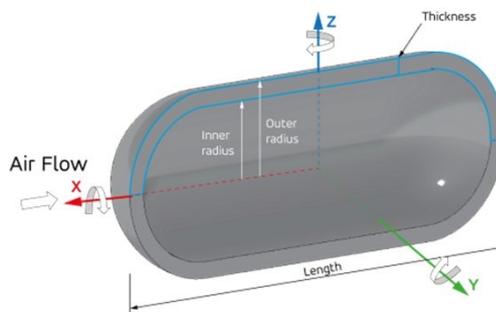


Figure 6 : Définition des dimensions d'un cylindre à bords hémisphériques

Les variables à renseigner pour décrire le cylindre Figure 6 sont :

- Dimension 1 : le rayon externe R_{outer} , nommé « outer radius » en [m].
- Dimension 2 : le rayon interne R_{inner} , nommé « inner radius » en [m].
- Dimension 3 : la longueur externe L_{outer} nommée « outer length » en [m].
- La masse en [kg].
- L'épaisseur en [mm].

A titre d'exemples, peuvent rentrer dans cette catégorie les réservoirs d'ergols (vide).

6.5.3.4. Forme boîte

Contexte

Dans DEBRISK, cette forme est creuse.

Remarque : la longueur doit toujours être la plus grande des dimensions, suivie de la largeur et de la hauteur qui est la plus petite

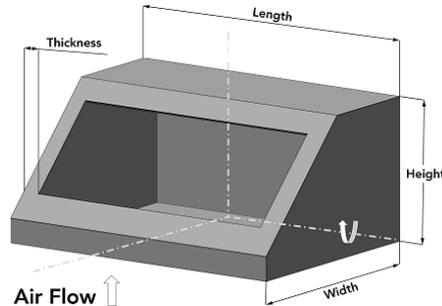


Figure 7 : Définition des dimensions d'une boîte creuse

Les variables à renseigner pour la description d'une boîte creuse cf. Figure 7 sont :

- Dimension 1 : longueur externe L_{outer} , « length » [m].
- Dimension 2 : largeur externe W_{outer} , « width » [m].
- Dimension 3 : hauteur externe H_{outer} , « height » [m].
- Dimension 4 : épaisseur τ_s , « thickness » en [mm].
- La masse en [kg].
- L'épaisseur en [mm].

A titre d'exemples, peuvent rentrer dans cette catégorie les boîtiers électroniques et les batteries.

6.5.3.5. Forme plaque plane

Contexte

Dans DEBRISK, cette forme est pleine.

Remarques :

1. La longueur doit toujours être plus grande que la largeur.
2. Cette forme n'est valable que pour les cas où l'épaisseur (hauteur) est inférieure à 10% de la largeur. Dans les autres cas, DEBRISK impose d'utiliser la forme boîte, cf.§ 6.5.3.4.

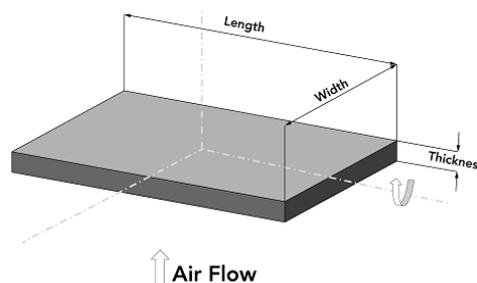


Figure 8 : Définition des dimensions d'une plaque plane

Les variables à renseigner pour décrire la plaque plane Figure 8 sont :

- Dimension 1 : longueur externe L_{outer} , « length » [m].
- Dimension 2 : largeur externe W_{outer} , « width » [m].
- Dimension 3 : épaisseur τ_s , « thickness » en [mm].
- La masse en [kg].

A titre d'exemples, peuvent rentrer dans cette catégorie, les plateaux porte-équipements, les panneaux structuraux, les feuillets des panneaux sandwich, les couvercles de fermeture.

6.5.3.6. Forme complexe

Dans DEBRISK, cette forme est pleine, telle que montrée dans les Figure 9 et Figure 10. En fonction des caractéristiques géométriques rentrées par l'opérateur, elle peut se décliner en :

- Anneau, tube
- Cône ouvert
- Calotte sphérique ouverte
- Calotte sphérique fermée
- Secteur d'anneau/tube
- Secteur de cône
- Secteur de calotte sphérique ouverte
- Secteur de calotte sphérique fermée

A titre d'exemples, peuvent rentrer dans cette catégorie, les viroles, les paraboles, les adaptateurs d'interface satellite/lanceur et les parties d'étages lanceurs.

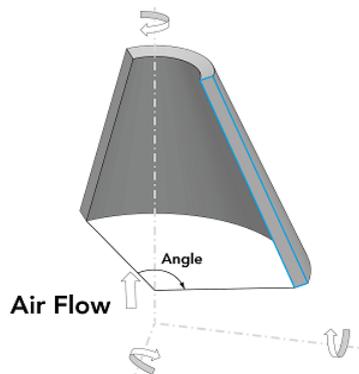


Figure 9 : Profil conique d'une forme complexe.

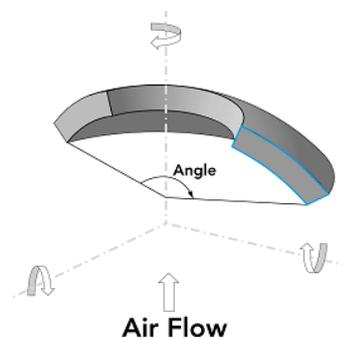


Figure 10 : Profil sphérique d'une forme complexe.

La forme dite « complexe » peut se définir exactement à partir des 6 variables primitives suivantes :

- R_G , le grand rayon externe, nommé « Large Radius » en $[m]$. On en déduit ainsi le diamètre D_G .
- R_P , le petit rayon externe, nommé « Small Radius » en $[m]$. On en déduit ainsi le diamètre D_P .
- h , la hauteur, en $[m]$.
- e , l'épaisseur du matériau constituant le fragment, en $[mm]$.
- θ , l'angle de révolution du profil de la forme, en $[^\circ]$.
- *flatness*, la courbure du profil, qui peut prendre la valeur de « conical » pour un profil linéaire (cylindre ouvert, tronc de cône ouvert et secteurs associés) et de « spherical » pour un profil à courbure sphérique (calotte sphérique et secteurs associés).

Quelques précisions sur la terminologie :

Anneau : Forme complexe pour laquelle $R_G = R_P$

Tube : Anneau dont l'épaisseur est grande devant la hauteur, ce qui se traduit par $e/h \geq 0,1$.

La définition de ces paramètres est explicitée par les Figure 11 et Figure 12 se rapportant respectivement à un profil linéaire (*flatness* = conical) et à un profil sphérique (*flatness* = spherical), la géométrie complète du fragment en résultant étant générée par rotation de ces profils d'un angle θ .

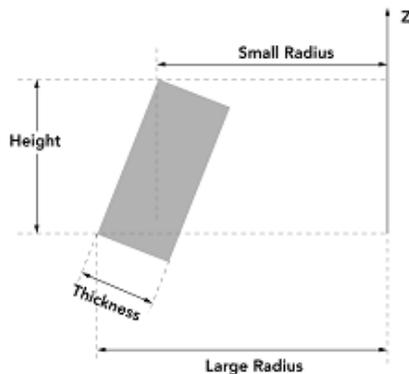


Figure 11 : Définition des paramètres géométriques pour le profil d'une forme lanceur de type cylindre ouvert, tronc de cône ouvert ou secteur de ces derniers.

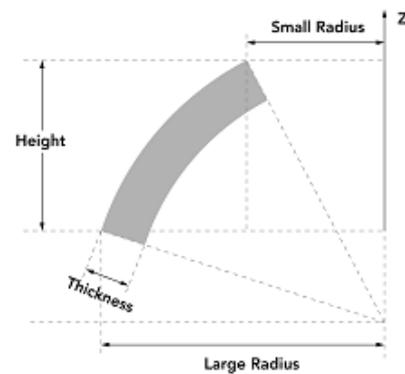


Figure 12 : Définition des paramètres géométriques pour le profil d'une forme lanceur de type calotte sphérique (non percée ou percée) ou secteur de cette dernière.

6.5.4. Panneaux sandwich

Les structures sandwich constituent la majeure partie des panneaux structuraux, et des panneaux solaires, mais aussi de certains panneaux internes au satellite comme des panneaux de cisaillement par exemple. Ils sont principalement constitués d'une âme en Nida aluminium et de feuillets en aluminium ou en tissus de fibres de carbone matrice époxy (CFRP, Carbon Fiber Reinforced Polymer), comme le montre la Figure 13 ci-dessous.

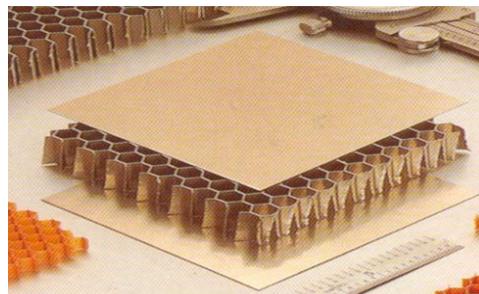


Figure 13 – Panneau sandwich NIDA/Aluminium

A l'image de l'exemple ci-dessus, certains fragments peuvent être approximativement considérés comme un empilement de plusieurs couches de matériaux différents. Pour certains d'entre eux, les modélisations ci-dessous sont recommandées.

6.5.4.1. Panneaux sandwich NIDA/Aluminium (hors panneaux structuraux)

Contexte

Cette partie ne concerne que les panneaux qui sont isolés dans la décomposition interne du véhicule parent, et qui sont par conséquent protégés thermiquement.

DBSK_REC_FRAG_010

Panneaux sandwich NIDA/Aluminium

Il est recommandé de le modéliser comme « enfant » de son élément « parent ».

Mise en œuvre

La méthode à appliquer est la suivante :

1. Rentrer le panneau sandwich en question avec les caractéristiques de l'Aluminium, la masse réelle et les dimensions réelles (sauf l'épaisseur qui s'adaptera automatiquement par DEBRISK),
2. Rentrer une température de séparation de 573 K (température de dégradation de la colle entre la peau et le NIDA),
3. En tant que composants de ce panneau, rentrer juste les peaux avec les caractéristiques de l'Aluminium, et les dimensions réelles. En priorité il est recommandé d'indiquer une masse permettant ainsi de prendre en compte les ferrures, inserts, et autres éléments accrochés, ou en indiquant l'épaisseur de la peau.

Dans le cas d'un panneau sandwich il est simple de déterminer sa masse, si l'on connaît celle de la partie en NIDA. Il suffit d'appliquer la formule suivante :

$$m_{\text{peau}} = \frac{(m_{\text{tot}} - m_{\text{NIDA}})}{2}$$

Équation 13

Ainsi, le panneau intègre est caractérisé par le Tableau 5 ci-dessous :

Longueur et largeur	Dimensions réelles du panneau
Masse	Masse réelle du panneau
Matériau	Matériau des peaux
Température de séparation	Valeur recommandée de 573 K
Type de relation avec son parent	Parent/Enfant

Tableau 5 – Caractéristiques de l'objet modélisant le panneau sandwich NIDA/Aluminium complet.

Les peaux en Aluminium nouvellement séparées seront des composants de l'objet parent, caractérisées par le Tableau 6 ci-dessous :

Longueur et largeur	Dimensions réelles des peaux
Masse	Masse réelle des peaux
Matériau	Matériau des peaux
Type de relation avec son parent	Parent/Composant

Tableau 6 – Caractéristiques de l'objet modélisant les peaux du panneau sandwich NIDA/Aluminium.

6.5.4.2. Panneaux sandwichs NIDA/CFRP (hors panneaux solaires déployés)

DBSK_REC_FRAG_020

Panneaux sandwich NIDA/CFRP

Il est recommandé de modéliser le panneau sandwich comme « enfant » de son élément « parent ».

Mise en œuvre

La méthode à appliquer est la suivante :

1. Rentrer le panneau sandwich en question avec les caractéristiques du CFRP DEBRISK, la masse réelle et les dimensions réelles (sauf l'épaisseur qui s'adaptera automatiquement par DEBRISK),
2. Rentrer une température de séparation de 773 K (température à laquelle la matrice se désintègre laissant le CFRP s'effiloche),
3. Contrairement aux panneaux NIDA/Alu, il n'est pas nécessaire de rentrer en tant que composant les fibres en CFRP.

Ainsi, le panneau intègre est caractérisé par le Tableau 7 ci-dessous :

Longueur et largeur	Dimensions réelles du panneau
Masse	Masse réelle du panneau solaire
Matériau	CFRP DEBRISK
Température de séparation	Valeur recommandée de 773 K
Type de relation avec son parent	Parent/Enfant

Tableau 7 – Caractéristiques de l'objet modélisant le panneau sandwich NIDA/CFRP complet.

6.5.5. Autres éléments en CFRP

Contexte

Le retour d'expérience montre aujourd'hui que certains fragments peuvent retomber au sol sans subir de dégradation, et ce, principalement du fait de leur composition structurelle.

Exemples

Rentrent par exemple dans cette catégorie, les réservoirs avec liner métallique bobiné en fibres de carbone, les supports optiques, ou des bipodes.

DBSK_REC_FRAG_030

Eléments en CFRP

Dans ces cas de figure suivant :

- Réservoirs avec liner métallique et bobiné en fibres de carbone,
- Manchons servant de support,

Il est recommandé de modéliser l'élément en imposant les dimensions extérieures, la masse réelle et en prenant comme matériau unique, du CFRP à créer par l'utilisateur, pour lequel la température de fusion est telle que l'élément rentre sans s'ablater.

Mise en œuvre

Le Manuel Utilisateur [DR2] permet de réaliser cette modélisation, en suivant les indications du Tableau 8.

Dimensions	Dimensions extérieures
Masse	Masse réelle
Matériau	CFRP à créer par l'utilisateur
Température de fusion du CFRP	Valeur recommandée de 3000 K

Tableau 8 – Caractéristiques de l'élément en CFRP.

Pour créer le CFRP recommandé, il suffit de dupliquer le CFRP de DEBRISK, et de modifier la température de fusion. Le nom à donner à ce nouveau matériau ne doit pas contenir le mot « DEBRISK ».

6.5.6. Equipements de type boîtier Electronique

Contexte

Certains fragments ne peuvent être modélisés indépendamment de leur contenu. C'est le cas par exemple des boîtiers électroniques, cf. Figure 14, pour lesquels il faut à la fois tenir compte de la structure métallique du boîtier, mais aussi des divers éléments (cartes électroniques, composants électroniques, câblage, éléments de liaisons...) qu'il contient.



Figure 14 – Boîtier électronique – vue intérieure.

DBSK_REC_FRAG_040

Boîtiers

Il est recommandé de modéliser les Equipements de type boîtier Electronique comme un emboîtement d'une boîte creuse avec un lest par une relation de type « parent/enfant ».

Mise en œuvre

Le Manuel Utilisateur [DR2] permet d'appliquer la méthode suivante :

- En parent, il faut rentrer une boîte creuse avec les dimensions réelles du boîtier en question, ainsi qu'avec le matériau associé. Ainsi, le boîtier externe est caractérisé par le Tableau 9.

Forme	Boîte creuse
Dimensions	Dimensions extérieures
Masse	Masse réelle de la structure externe
Matériau	Matériau réel

Tableau 9 – Caractéristiques du boîtier externe.

- En enfant, il faut rentrer sous forme de sphère pleine, l'ensemble du contenu, cartes ou autres, dont la masse réelle totale est imposée et pour laquelle il faut choisir un matériau qui permet de la faire disparaître dès sa naissance (à créer par l'utilisateur). Ainsi, les cartes électroniques sont caractérisées par le Tableau 10.

Forme	Sphère pleine
Masse	Masse réelle totale du contenu
Matériau	Matériau à créer par l'utilisateur
Température de fusion du Matériau	Valeur recommandée de 301 K

Tableau 10 – Caractéristiques du contenu du boîtier.

Pour créer le matériau recommandé, il suffit de dupliquer par exemple l'Aluminium de DEBRISK, et de modifier la température de fusion. Le nom à donner à ce nouveau matériau ne doit pas contenir le mot « DEBRISK k ».

6.5.7. Formes non directement assimilables à une forme DEBRISK

Contexte

Certaines formes ne peuvent être directement assimilables aux formes proposées par DEBRISK. Il est proposé d'utiliser par défaut la forme qui se rapproche le plus de la forme enveloppe de l'objet en conservant la masse, les surfaces externes ou les dimensions externes, en fonction de la forme à traiter. Ci-dessous sont présentées les

recommandations proposées pour certains fragments les plus représentatifs.

6.5.7.1. Panneau de type propulsion (Plaque pleine trouée)

Contexte/Exemple

Le cas de la plaque pleine trouée, est typiquement celui du panneau propulsion d'un satellite, comme illustrée par la Figure 15 ci-dessous.

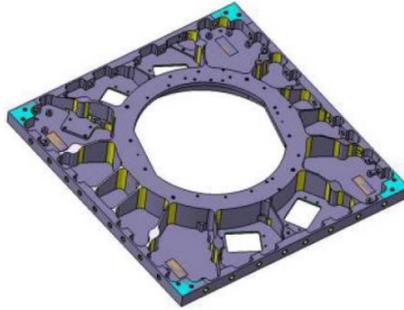


Figure 15 – Panneau troué

DBSK_REC_FRAG_050

Plaque trouée

Il est recommandé de modéliser cette plaque, par un tube (au sens des formes de DEBRISK) pour lequel, et en utilisant la dénomination d'usage, cf. §6.5.3.6 :

- La masse du tube doit être imposée égale à la masse de la plaque trouée
- R_G et R_P , respectivement le grand et le petit rayon extérieur du tube sont définis telles que les surfaces bleues de la Figure 16 ci-dessous soient égales.

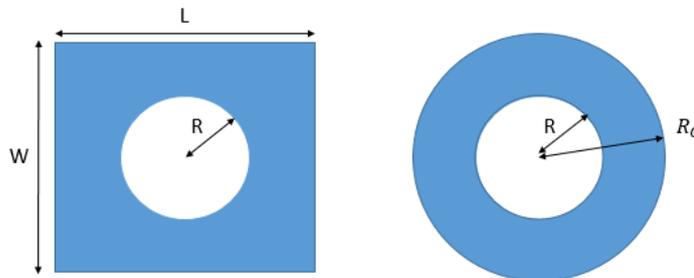


Figure 16 – Modélisation de la plaque trouée

Mise en œuvre

- Les rayons R_G et R_P se calculent de la façon suivante :

$$R_G = R_P = \left(\frac{S_{struct\ externe}}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Équation 14

où $S_{struct\ externe}$ représente la surface de la face, en prenant en compte les dimensions extérieures, comme s'il n'y avait pas de trou. Par exemple, pour une plaque trouée, cette surface serait, quel que soit le trou, égale à $S_{struct\ externe} = LW$.

- La hauteur du tube se calcule par :

$$h = \frac{m}{\rho_{mat} \pi (R_G^2 - R^2)}$$

Équation 15

où ρ_{mat} représente la densité du matériau utilisé, et R le rayon du trou.

Remarque

Cette méthodologie s'applique quelle que soit la forme de départ, plaque carrée, hexagonale ou autre, les formulations précédentes s'adaptant facilement. Dans tous les cas, il faut modéliser la forme en imposant la masse et non l'épaisseur.

6.5.7.2. Assemblages

Contexte

Un assemblage est un ensemble d'éléments dont la conception des liaisons permet de considérer (à justifier par l'opérateur) qu'ils resteront solidaires lors de la retombée pour ne former qu'un seul fragment, conduisant ainsi à une surface meurtrie non dispersée. Les liaisons directes en titane sont considérées comme résistantes, contrairement à celles en résine/colle ou inserts collés qui ne rentrent pas dans le cadre de cette partie.

DBSK_REC_FRAG_060

Assemblages

Il est recommandé de modéliser les éléments d'assemblage par une boîte telle que :

- La masse correspond à la masse réelle de l'ensemble à modéliser.
- Les dimensions choisies correspondent aux dimensions maximales de la boîte à l'intérieure de laquelle il est possible d'envelopper l'élément.

Mise en œuvre/Exemple

A titre d'exemple, peuvent rentrer dans cette catégorie les ferrures montrées en Figure 17. Le passage entre la base et les manchons se fait via un petit bout cylindrique de Titane plein qui doit mesurer approximativement 1 cm de diamètre, il est donc difficile de s'imaginer qu'il va rompre.



Figure 17 – Ferrures

La boîte ainsi modélisée est représentée Figure 18.

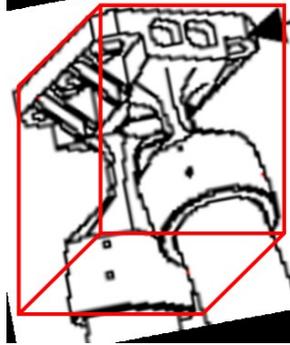


Figure 18 – Ferrures – modélisation boîte

6.5.7.3. Harnais

DBSK_REC_FRAG_070

Harnais

Il est recommandé de ne pas considérer la modélisation des harnais car l'hypothèse retenue est que l'ensemble des câblages se détruira lors de la rentrée.

6.6. PROPRIETES DES MATERIAUX

Contexte

Un calcul DEBRISK nécessite d'attribuer à chaque fragment un matériau homogène.

DBSK_REC_MAT_010

Matériaux thermo-optiques

Concernant le choix des paramètres matériaux thermo-optiques, il est recommandé que dans le cas d'un calcul préliminaire où le type d'alliage n'est pas parfaitement connu, de s'appuyer sur un des matériaux de nature métallique, composite ou céramique proposés par la liste de matériaux de base dans DEBRISK.

DBSK_REC_MAT_020

Matériaux connus

Dans le cas d'un calcul avancé où le type d'alliage est connu, il est recommandé de s'appuyer sur les matériaux disponibles dans la base de données ESTIMATE. Un fichier au format .xml DEBRISK est disponible.

DBSK_REC_MAT_030

Matériaux inconnus

Il est recommandé de créer sa propre référence si le matériau n'est pas disponible ou modifier une caractéristique sur la base d'une justification documentaire ou expérimentale et fournir les caractéristiques utilisées. Quand l'émissivité d'un matériau n'est absolument pas connue à haute température, la valeur de 0,9 est à utiliser.

DBSK_REC_MAT_040**Caractéristiques à utiliser**

Pour un matériau de type Aluminium, Acier, Titane, Inconel et Invar, il est recommandé

- d'utiliser les valeurs d'émissivité proposées par les matériaux de DEBRISK quel que soit l'alliage du matériau.
- d'utiliser les valeurs d'oxydation proposées par les matériaux de DEBRISK quel que soit l'alliage (cf. fichier xml de DEBRISK au niveau des paramètres oxideHeatOfFormation, kOx, oxideConstantFlowRate, Aw et Ea_kB).

DBSK_REC_MAT_050**Zerodur**

Pour le matériau Zerodur, la valeur de l'émissivité par défaut est de 0,8. Elle correspond à un objet d'épaisseur 10 cm ayant atteint sa température de fusion. En fonction de l'épaisseur du fragment, il est recommandé de lire la valeur de l'émissivité sur la Figure 19 au niveau de la courbe magenta à 1482 K. La valeur lue sera rentrée dans DEBRISK quelle que soit la température.

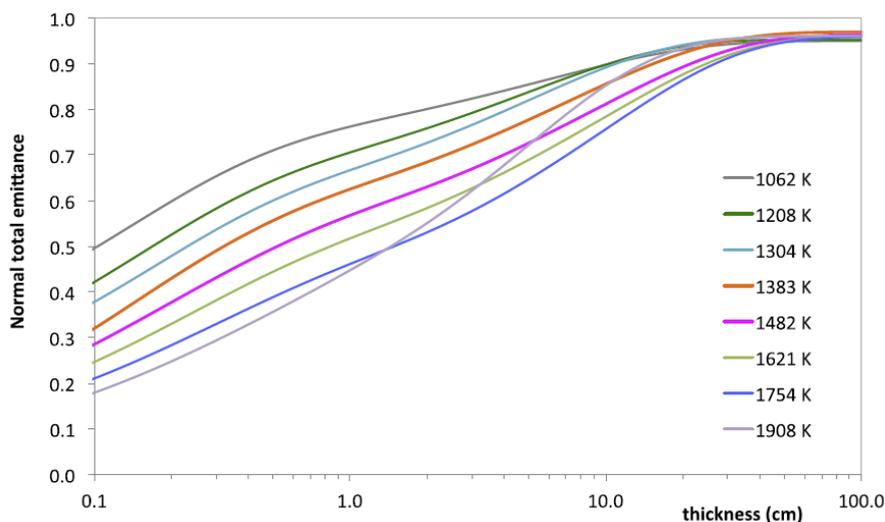


Figure 19 – Emissivité du Zerodur en fonction de l'épaisseur et de la température

Mise en œuvre

La création, édition, modification d'un matériau dans DEBRISK sont expliquées dans le Manuel Utilisateur [DR2].

A ce jour, le lien permettant d'accéder à la base ESTIMATE est le suivant : <https://estimate.sdo.esoc.esa.int/>

Le fichier matériau étendu DEBRISK au format xml est téléchargeable dans l'onglet « Database ».

6.7. SYNTHÈSE DE LA METHODOLOGIE V3

Ci-dessous, une synthèse est réalisée dans le Tableau 11, montrant l'ensemble des méthodologies proposées pour DEBRISK V3 (en violet) ainsi qu'une comparaison avec ceux de DEBRISK V2.

	V2	V3
Altitude de fragmentation principale	Recommandée à 78 km	Pour les structures de type NIDA/Aluminium : calculée en fonction de l'évolution de température, et déclenchée lorsque celle-ci atteint 573 K. Pour les autres structures, recommandée à 78 km
Modélisation du véhicule parent	Masse thermique prise égale à la masse aérodynamique.	Masse thermique et masse aérodynamique sont considérées et sont différentes.
Modélisation des panneaux sandwich	Modélisation de la plaque en objet plein, sans enfants, en Aluminium ou CFRP	Méthodologie issue du §6.5.4 : <ul style="list-style-type: none"> • Pour ce qui est du panneau NIDA/Alu : modélisation de type composant. Le parent est la plaque pleine, et les composants sont les feuillets en Alu. Une fois séparés à 573 K, la rentrée des composants est simulée. • Pour ce qui est du panneau NIDA/CFRP : modélisation de type composant. Le parent est la plaque pleine, et les composants sont les feuillets en CFRP. Une fois séparés à 773 K, la rentrée des composants n'est pas simulée.
Modélisation des boîtiers électroniques	La modélisation se fait par une boîte en suivant deux approches : <ul style="list-style-type: none"> • Une première approche simplificatrice et conservative peut être adoptée en considérant un seul fragment de matériau homogène correspondant à celui de la structure enveloppe et de masse égale à la masse totale de l'équipement (la masse thermique et la masse aérodynamique sont confondues). • Une deuxième approche plus réaliste consiste à utiliser la notion de Parent / Enfants. Le « parent » correspond à l'enveloppe structurale et les « enfants » aux éléments internes. (La masse thermique du parent est réduite à la masse de l'enveloppe structurale externe). 	La modélisation retenue pour DEBRISK V3 correspond à la deuxième approche proposée ci-contre pour DEBRISK V2, et détaillée au §6.5.6.
Modélisation des structures plates pleines trouées	Modélisation en plaque pleine avec équivalence en masse et surface extérieure.	Modélisation sous forme de tube avec équivalence en masse et en surface extérieure. Cette méthodologie est détaillée au §6.5.3.2.
Modélisation des réservoirs hémisphériques	Forme sphérique ou cylindrique à bord plat, avec équivalence en masse, surface extérieure, ou dimensions externes identiques.	Forme modélisée directement par DEBRISK V3, cf. §6.5.3.3
Modélisation des cylindres aplatis	En dessous d'un certain rapport d'aspect L/D, modélisation par une boîte ou une plaque, avec équivalence en masse, surface extérieure, et ou dimensions externes identiques	Forme modélisée directement par DEBRISK V3, cf. §6.5.3.2
Modélisation des anneaux	Cylindre avec équivalence en masse, surface extérieure, et ou dimensions externes identiques	Forme modélisée directement par DEBRISK V3, cf. §6.5.3.6
Modélisation des formes de type assemblage	Modélisation de l'ensemble par une boîte dont les dimensions correspondent aux dimensions maximales de l'assemblage.	La modélisation retenue pour DEBRISK V3 correspond à celle de DEBRISK V2.
Calcul de la surface meurtrie	Surface calculée en utilisant la valeur projetée sur un plan perpendiculaire à la direction de l'écoulement, de la face la plus grande de l'objet.	Surface calculée en utilisant la valeur moyenne pondérée en mouvement de la surface projetée sur un plan perpendiculaire à la direction de l'écoulement.

Tableau 11 – Comparaison des méthodologies et recommandations associées à DEBRISK V3 par rapport à DEBRISK V2.

7. RECOMMANDATIONS POUR LES ETUDES EN PHASE 0

Contexte

Lors d'une phase 0, des premières études de risque sont à mettre en place le plus tôt possible. Ceci afin de rendre la rentrée du véhicule analysé conforme aux exigences de la LOS, anticiper vers quel type de rentrée atmosphérique l'opérateur s'orientera et envisager rapidement de développer des solutions technologiques types Design For Demise (D4D) ou Design For Containment (D4C).

DBSK_REC_PHASE0_010

Phase préliminaire

Lors des phases préliminaires, la masse de chaque équipement n'est pas parfaitement connue. C'est pourquoi il est recommandé de faire deux types de simulations avec DEBRISK :

- Une simulation pour laquelle chaque fragment est modélisé avec sa masse nominale
- Une simulation pour laquelle chaque fragment est modélisé avec sa masse maximale

La surface meurtrie à retenir pour la suite de l'analyse doit être la plus grande entre les deux simulations.

Mise en œuvre

Un fichier xml DEBRISK doit être créé à l'identique de celui qui a été utilisé pour la masse nominale. Pour simuler le cas de la masse maximale, la masse de chaque fragment peut être augmenté de 20%.

DBSK_REC_PHASE0_020

Rentrée naturelle envisagée

Afin d'envisager une rentrée naturelle (également appelée « non-contrôlée »), la surface meurtrie calculée par Debrisk doit être inférieure à un seuil qui dépend de l'inclinaison de l'orbite mission et de l'année de rentrée considérée. Les valeurs seuils sont indiquées dans le guide des bonnes pratiques [DR1] et reportées en Figure 20. La conformité au seuils de risque définis par la Réglementation Technique doit être calculée avec un outil de calcul de risque comme ELECTRA. Dans les études de phase 0, il est recommandé d'utiliser la table ci-dessous pour définir rapidement le type de rentrée envisageable pour la mission.

Mise en œuvre

Ainsi, comme décrit dans la section 5.2, si la surface meurtrie est très en deçà du seuil indiqué, cela signifie que le véhicule est sur une très bonne voie pour espérer réaliser une rentrée non contrôlée. Si par contre la valeur est largement au-dessus du seuil, alors une rentrée dite « contrôlée » est à mettre sérieusement en perspective. Pour une valeur autour de la surface meurtrie maximale autorisée, il existe alors certaines recommandations sur l'architecture du véhicule, permettant de répondre au mieux à la problématique de minimisation de cette surface meurtrie. Elles peuvent se décliner globalement en deux catégories, celles de type « Design For Demise » (D4D) et celles de type « Design For Containment » (D4C).

La première catégorie a pour objectif de favoriser la destruction du fragment, la seconde à minimiser la dispersion au sol. Ci-dessous sont listées celles qui paraissent les plus pertinentes :

- Dans la catégorie « D4D » :
 - Minimiser la masse des éléments.
 - Optimiser les caractéristiques des matériaux retenus (en choisissant principalement des matériaux à faible température de fusion).

- Augmenter localement la densité de flux de chaleur, par exemple en favorisant les formes avec des petits rayons de courbure.
- Ajouter de l'énergie au système par réactions exothermiques (par exemple par l'utilisation de thermites).
- Fragmenter le plus tôt possible, par exemple en utilisant des mécanismes dédiés, ou des points d'attaches favorisant la fragmentation.
- Dans la catégorie « D4C »
 - Maintenir les fragments hautement résistants et/ou dont la survivabilité et la létalité sont avérées.

	2021	2022	2023	2024	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060	2065	2070	2075	2080	2085	2090	2095	2100
0	9.06	8.83	8.61	8.4	8.18	7.26	6.47	5.79	5.21	4.72	4.24	3.82	3.44	3.09	2.79	2.51	2.26	2.03	1.83	1.65
5	9.7	9.52	9.34	9.16	8.99	8.19	7.49	6.85	6.28	5.76	5.28	4.83	4.43	4.06	3.72	3.41	3.12	2.86	2.62	2.40
10	6.85	6.73	6.61	6.49	6.37	5.84	5.35	4.91	4.5	4.13	3.79	3.48	3.19	2.93	2.69	2.47	2.26	2.07	1.90	1.75
15	6.4	6.29	6.18	6.07	5.97	5.49	5.07	4.69	4.36	4.05	3.76	3.49	3.24	3.01	2.79	2.59	2.41	2.23	2.07	1.92
20	6.64	6.56	6.47	6.38	6.29	5.9	5.56	5.24	4.96	4.71	4.45	4.21	3.99	3.77	3.57	3.38	3.20	3.03	2.86	2.71
25	4.95	4.89	4.83	4.77	4.71	4.46	4.24	4.06	3.9	3.76	3.61	3.46	3.33	3.19	3.07	2.95	2.83	2.72	2.61	2.51
30	4.74	4.69	4.64	4.59	4.54	4.32	4.13	3.97	3.83	3.7	3.57	3.44	3.32	3.20	3.08	2.97	2.87	2.76	2.66	2.57
35	4.36	4.32	4.27	4.23	4.19	4.01	3.85	3.72	3.61	3.51	3.41	3.30	3.20	3.11	3.01	2.92	2.83	2.75	2.67	2.59
40	4.69	4.65	4.6	4.56	4.51	4.32	4.15	4.01	3.89	3.8	3.68	3.57	3.47	3.37	3.27	3.17	3.08	2.99	2.90	2.81
45	5.3	5.25	5.2	5.16	5.11	4.9	4.73	4.57	4.43	4.31	4.18	4.05	3.93	3.81	3.70	3.58	3.48	3.37	3.27	3.17
50	5.79	5.75	5.7	5.65	5.6	5.4	5.24	5.09	4.97	4.87	4.75	4.64	4.53	4.42	4.31	4.21	4.11	4.01	3.92	3.82
55	6.16	6.12	6.07	6.02	5.97	5.77	5.6	5.45	5.33	5.23	5.11	5.00	4.89	4.78	4.67	4.57	4.47	4.37	4.27	4.18
60	6.84	6.78	6.73	6.67	6.61	6.38	6.18	6.01	5.86	5.74	5.60	5.46	5.33	5.20	5.08	4.96	4.84	4.72	4.61	4.50
65	7.52	7.45	7.39	7.32	7.26	6.99	6.76	6.56	6.4	6.26	6.09	5.93	5.78	5.64	5.49	5.35	5.21	5.08	4.95	4.83
70	8.01	7.94	7.87	7.8	7.73	7.44	7.19	6.97	6.79	6.63	6.45	6.28	6.11	5.95	5.80	5.64	5.49	5.35	5.21	5.07
75	8.37	8.3	8.23	8.15	8.08	7.77	7.5	7.27	7.08	6.91	6.72	6.54	6.36	6.19	6.02	5.86	5.70	5.55	5.40	5.25
80	8.62	8.55	8.47	8.4	8.32	8	7.72	7.48	7.28	7.11	6.91	6.72	6.53	6.36	6.18	6.01	5.85	5.69	5.54	5.38
85	8.77	8.69	8.62	8.54	8.46	8.13	7.85	7.61	7.4	7.22	7.02	6.82	6.64	6.45	6.28	6.11	5.94	5.78	5.62	5.46
90	8.82	8.74	8.66	8.59	8.51	8.18	7.89	7.65	7.44	7.26	7.05	6.86	6.67	6.49	6.31	6.14	5.97	5.80	5.64	5.49
92	8.81	8.73	8.66	8.58	8.5	8.17	7.89	7.64	7.43	7.25	7.05	6.85	6.67	6.48	6.30	6.13	5.96	5.80	5.64	5.48
94	8.79	8.71	8.63	8.56	8.48	8.15	7.87	7.62	7.41	7.24	7.03	6.84	6.65	6.47	6.29	6.12	5.95	5.79	5.63	5.47
96	8.75	8.67	8.6	8.52	8.44	8.11	7.83	7.59	7.38	7.2	7.00	6.81	6.62	6.44	6.26	6.09	5.93	5.76	5.61	5.45
98	8.69	8.62	8.54	8.46	8.39	8.06	7.78	7.54	7.34	7.16	6.96	6.77	6.58	6.40	6.23	6.06	5.89	5.73	5.57	5.42
100	8.62	8.55	8.47	8.4	8.32	8	7.72	7.48	7.28	7.11	6.91	6.72	6.53	6.36	6.18	6.01	5.85	5.69	5.54	5.38
102	8.54	8.46	8.39	8.31	8.23	7.92	7.65	7.41	7.21	7.04	6.84	6.65	6.47	6.30	6.13	5.96	5.80	5.64	5.49	5.34
104	8.43	8.36	8.28	8.21	8.13	7.82	7.55	7.32	7.13	6.96	6.76	6.58	6.40	6.23	6.06	5.90	5.74	5.58	5.43	5.28
106	8.31	8.24	8.17	8.09	8.02	7.71	7.45	7.22	7.03	6.86	6.67	6.49	6.32	6.15	5.98	5.82	5.67	5.51	5.37	5.22
108	8.17	8.1	8.03	7.96	7.88	7.58	7.33	7.11	6.92	6.76	6.57	6.39	6.22	6.06	5.90	5.74	5.59	5.44	5.29	5.15
110	8.01	7.94	7.87	7.8	7.73	7.44	7.19	6.97	6.79	6.63	6.45	6.28	6.11	5.95	5.80	5.64	5.49	5.35	5.21	5.07

Figure 20 – Surface meurtrie maximale admissible [m²] conduisant à un risque de victime de 10⁻⁴, en fonction de l'année de retombée et de l'inclinaison de l'orbite.

ANNEXE A : LISTE DES RECOMMANDATIONS/EXIGENCES

Exigence	Titre	Page
DBSK_EX_FRAG_010	• Formes pleines	P23
DBSK_EX_MOD_010	• Modélisation générique	P16
DBSK_EX_MOD_020	• Définition du véhicule parent	P18
DBSK_EX_MOD_030	• Panneaux solaires gerbés	P21
DBSK_EX_MOD_040	• Définition des formes	P21
DBSK_REC_ATM_010	• Choix du modèle d'atmosphère, premier calcul	P11
DBSK_REC_ATM_020	• Choix du modèle d'atmosphère, deuxième calcul	P11
DBSK_REC_ATM_030	• Choix du modèle d'atmosphère pour une rentrée contrôlée	P12
DBSK_REC_ATM_040	• Choix du modèle d'atmosphère, fin de mission	P12
DBSK_REC_ATM_050	• Choix du modèle d'atmosphère pour une rentrée naturelle	P12
DBSK_REC_CI_010	• Conditions initiales en rentrée naturelle	P13
DBSK_REC_CI_020	• Conditions initiales en rentrée contrôlée	P14
DBSK_REC_FRAG_010	• Panneaux sandwich NIDA/Aluminium	P27
DBSK_REC_FRAG_020	• Panneaux sandwich NIDA/CFRP	P28
DBSK_REC_FRAG_030	• Eléments en CFRP	P29
DBSK_REC_FRAG_040	• Boîtiers	P30
DBSK_REC_FRAG_050	• Plaque trouée	P31
DBSK_REC_FRAG_060	• Assemblages	P32
DBSK_REC_FRAG_070	• Harnais	P33
DBSK_REC_MAT_010	• Matériaux thermo-optiques	P33
DBSK_REC_MAT_020	• Matériaux connus	P33
DBSK_REC_MAT_030	• Matériaux inconnus	P33
DBSK_REC_MAT_040	• Caractéristiques à utiliser	P34
DBSK_REC_MAT_050	• Zerodur	P34
DBSK_REC_MOD_010	• Choix de la relation	P17
DBSK_REC_MOD_020	• Transfert thermique	P18
DBSK_REC_MOD_030	• Fragmentation principale	P19
DBSK_REC_MOD_040	• Panneaux structuraux	P20
DBSK_REC_MOD_050	• Panneaux solaires déployés	P21
DBSK_REC_MOD_060	• Masses minimales	P22
DBSK_REC_PHASE0_010	• Phase préliminaire	P36
DBSK_REC_PHASE0_020	• Rentrée naturelle envisagée	P36