Direction générale de l'Aviation civile

Service technique de l'Aviation civile

Mai 2018

Méthode rationnelle de dimensionnement des chaussées aéronautiques souples

Conception étape par étape avec utilisation d'Alizé-aéro

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE

dgac

Ministère de la Transition Écologique et Solidaire

www.stac.aviation-civile.gouv.fr

STAC

Direction générale de l'Aviation civile

Service technique de l'Aviation civile

Mai 2018

Méthode rationnelle de dimensionnement des chaussées aéronautiques souples

Conception étape par étape avec utilisation d'Alizé-aéro

Service technique de l'Aviation civile

Département Structures Adhérence

Rédacteurs :

Jessica CLAVEL

Thomas COURANT

Sommaire

Introduction _____ 3

1. Plate-forme support de chaussée _____ 4

2. Détermination du niveau de sollicitation _____ 5

3. Détermination des matériaux _____ 6

4. Détermination des épaisseurs minimales de matériaux __ 7

5. Bibliothèque de matériaux et risque _____ 8

6. Trafic _____ 9

7. Autres données de trafic _____ 10

8. Calcul unique _____ 11

9. Représentations graphiques _____ 12

10. Calcul itératif _____ 13

11. Pour aller plus loin : Critères d'endommagement _____ 14

12. Pour aller plus loin : RseR (Roue simple équivalente rationnelle) _____ 15

Introduction

En 2014, le STAC a édité le guide technique relatif à la méthode rationnelle de dimensionnement des chaussées aéronautiques souples. En 2016, un logiciel dédié à l'application de ce guide a été commercialisé, en collaboration avec l'Ifsttar.

Cette synthèse du guide technique a pour objectif de faciliter la prise en main de la méthode de dimensionnement et du logiciel associé, Alizé-aéronautique, en résumant les principales étapes permettant de réaliser un calcul, qu'il soit unique ou itératif.

L'objectif premier d'un dimensionnement est d'assurer la pérennité de la chaussée souple et du sol support sur la période de calcul choisie, jusqu'à endommagement de la structure. Il existe deux types d'endommagement.

- Par fatigue, pour les matériaux bitumineux, conduisant à la fissuration progressive du matériau par le bas. Le calcul s'appuie sur les valeurs de déformations horizontales calculées à la base de la couche inférieure de matériaux bitumineux.
- Par déformations permanentes d'origine élasto-plastique, pour la plate-forme non liés. Le calcul s'appuie alors sur les valeurs de déformations verticales calculées au sommet de la plate-forme.

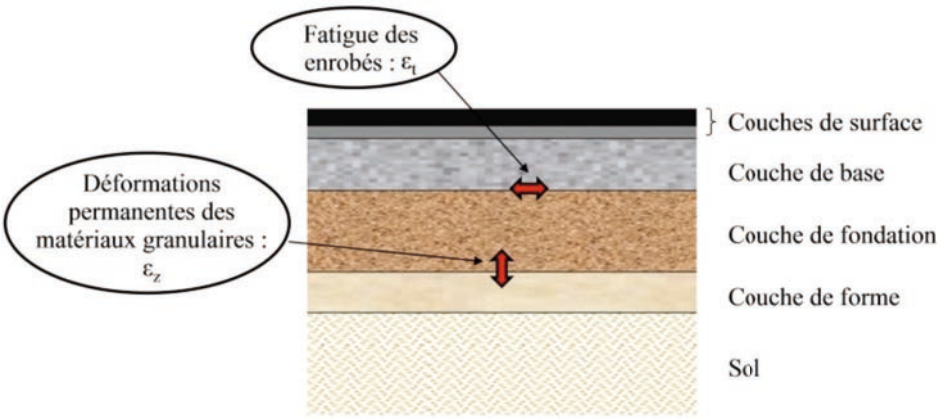


Figure 1 : Modes de dégradation.

Document de référence :

- ***GAN***
- ***Guide de dimensionnement***
- ***Notice alizé***

1. Plate-forme support de chaussée

La première étape consiste à déterminer la classe de plate-forme, fonction de module élastique du sol support (Guide technique p50) :

Module (MPa)	*50*	*80*	*120*	*200*
Classe de plate-forme	*PF2*	*PF2^{QS}*	*PF3*	*PF4*

Tableau 1 : Classes de portance à long terme de la plate-forme support (Guide technique).

▶ Implémentation dans Alizé

Dans le logiciel Alizé, module aéronautique, pour ouvrir une structure de chaussée souple par défaut, cliquez sur :

Fichier ▶ Données structures ▶ Modèle flexible Mf1

Puis, dans l'onglet « Structure de chaussée », cliquez sur le module de Young de la plate-forme afin d'entrer la valeur souhaitée ou sur « plateforme » pour entrer directement la classe de plateforme souhaitée.

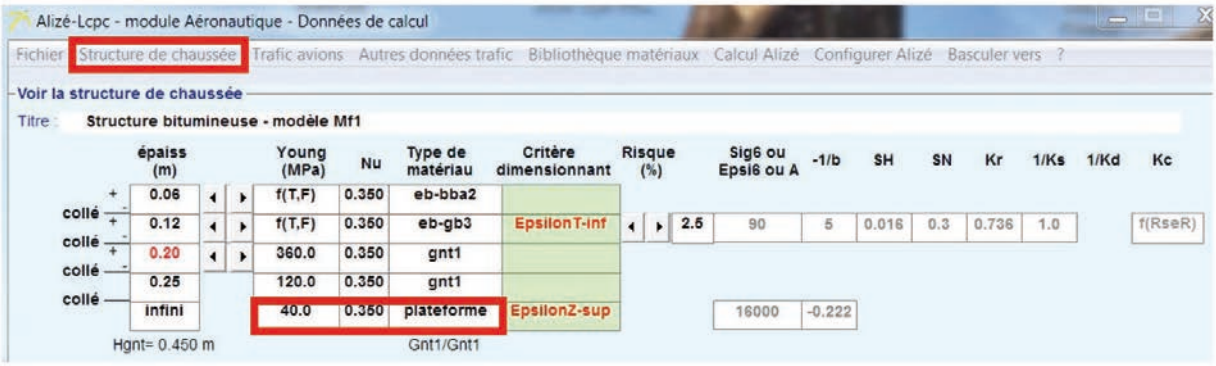


Figure 2 : Alizé aéro, Structure de chaussée, Plate-forme.

2. Détermination du Niveau de Sollicitation

Dans la méthode de dimensionnement, le Niveau de Sollicitation intervient dans la détermination des matériaux (partie 3).

Classe de Trafic CTi (GAN p17, Guide technique p114)

La classe de trafic (CTi) caractérise une zone aéronautique en fonction du groupe et de la fréquence d'accueil de l'avion le plus contraignant qui la fréquente. La pression (P) de gonflage des pneumatiques et le nombre de roue (R) de l'atterrisseur principal sont les données d'entrée. L'annexe A du GAN recense la plupart des aéronefs et leur groupe associé (en 2009).

Pression gonflage x roues (MPa) / Fréquence (F)*	Aviation légère Masse totale avion < 5.7 t	P x R < 2	2 ≤ P x R < 4,1	4,1 ≤ P x R < 5,5	5,5 ≤ P x R
	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	Groupe 5
F < 10 mvts/j**	CT1	CT2	CT2	CT3	CT4
10 mvts/j ≤ F ≤ 100 mvts/j	CT1	CT2	CT3	CT4	CT5
F > 100 mvts/j	CT1	CT2	CT4	CT5	CT5

*un mouvement correspond soit à un atterrissage, soit à un roulage, soit à un décollage

**si F > 1 mvt/j, la classe de trafic déterminée est retenue pour l'ensemble des aires (de manœuvre et de trafic).

si F ≤ 1 mvt/j, la classe de trafic n'est retenue que pour l'aire de trafic et la classe de trafic de l'aire de mouvement est déterminée par les autres avions accueillis sur la plate-forme.

Tableau 2 : Classe de trafic (GAN).

Dans le logiciel, la classe de trafic intervient dans le choix de la nature de la GNT (partie 3), ainsi que dans la détermination du risque (partie 5).

Toutefois, l'utilisation des classes de trafic ne quantifie pas de façon assez précise l'agressivité d'un trafic. C'est pour cela que la notion de RseR a été introduite (partie 12).

Niveau de Sollicitation NSi (GAN p19, Guide technique p114)

Le niveau de sollicitation (NSi) caractérise le degré de sollicitation d'une zone aéronautique en fonction du type de climat et de la classe de trafic.

Classe de trafic / Climat	CT1	CT2	CT3	CT4	CT5
Océanique	NS1	NS1	NS2	NS3	NS4
Continental					
Méditerranéen		NS2	NS3	NS4	
Tropical					

Tableau 3 : Niveau de sollicitation (GAN).

3. Détermination des matériaux

Choix des matériaux bitumineux (GAN p20-22, Guide technique p55)

Le choix des matériaux bitumineux est fonction du niveau de sollicitation NSi et du type d'air à dimensionner.

		NS1	NS2	NS3	NS4
Piste	Partie courante	BBA1 / GB2	BBA1 / GB2	BBA2 / GB2 EME1	BBA2 / GB3 EME2
	Raquette	BBA1 / GB2	BBA2 BBME1 / GB2	BBME2 / GB3 EME1	BBME3 / GB3 EME2
	Sortie rapide	BBA1 / GB2	BBA2 / GB2	BBA3 BBME2 / GB3 EME1	BBA3 / GB3 EME2
	Seuil	BBA1 / GB2	BBA2 / GB2	BBA3 / GB3 EME1	BBA3 / GB3 EME2
Voie de circulation et Voie de Desserte	Partie courante	BBA1 / GB2	BBA2 / GB2	BBA2 BBME1 / GB3 EME1	BBA3 BBME2 / GB3 EME2
	Raccordement	BBA1 / GB2	BBA2 / GB2	BBA3 BBME2 / GB3 EME1	BBA3 BBME2 / GB3 EME2
Aire d'attente**		BBA1 / GB2	BBA3 / GB2	BBME3 / GB3 EME1	BBME3 / GB3 EME2
Aire de stationnement		BBA2 / GB2	BBA3 BBME1 / GB2	* / *	* / *

* Structure en béton hydraulique

Couches de surface / couches d'assise

Tableau 4 : Choix des matériaux bitumineux (GAN).

Choix du type de Grave Non Traitée (GNT) (Guide technique p68)

Seules les GNT de catégorie 1 et 2 sont utilisées en aéronautique :

- Les GNT de catégorie 1 sont utilisées pour les Classes de Trafic CT3, CT4 et CT5
- Les GNT de catégorie 2 sont utilisées pour les Classes de Trafic CT1 et CT2.

▶ Implémentation dans Alizé-Aéronautique

Figure 3 : Alizé aéro, structure de chaussée, Type de matériaux.

4. Détermination des épaisseurs minimales de matériaux

Épaisseurs minimales (GAN p14-15, Guide technique p64)

Les épaisseurs nominales pour les bétons bitumineux et autres enrobés à chaud normalisés, définies dans le GAN, sont indiquées ci-dessous. Ce tableau ne classe que les matériaux les plus communément utilisés sur les plateformes aéronautiques. Pour les autres matériaux, consultez le GAN :

Matériau	Granularité	Epaisseur moyenne (cm)	Epaisseur minimale en tous points (cm)
BB aéronautique EB-BBA	0/10C	6 à 7	4
	0/14C	7 à 9	5
	0/10D	4 à 5	3
	0/14D	5 à 7	4
BB à module élevé EB-BBME	0/10	5 à 7	4
	0/14	6 à 9	5
Grave Bitume EB-GB	0/14	8 à 14	6
	0/20	10 à 16	8
Enrobé Module Elevé EB-EME	0/10	6 à 8	5
	0/14	7 à 13	6
	0/20	9 à 15	8

Tableau 5 : Épaisseurs minimales (GAN).

L'ajustement des épaisseurs doit être fait de façon à :

- tenir compte des contraintes technologiques d'épaisseurs minimales et maximales des couches pour atteindre les objectifs de compacité et d'uni, qui dépendent de la nature des matériaux,
- limiter le nombre d'interfaces et ainsi réduire les risques de défaut de liaison à ces niveaux,
- tenir compte des autres critères du projet (technico-économiques, environnementaux, etc.).

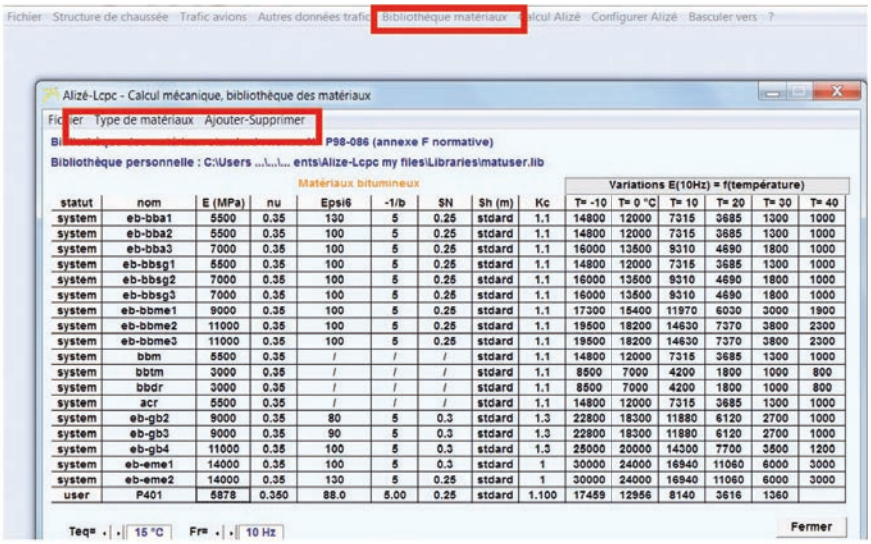
▶ Implémentation dans Alizé-Aéronautique

Figure 4 : Alizé aéro, Structure de chaussée, épaisseurs.

5. Bibliothèque de matériaux et risque

Bibliothèque de matériaux

La bibliothèque matériaux regroupe les principaux matériaux utilisés en construction routière en France. L'ajout de matériaux est possible sur Alizé-aéronautique. Pour plus d'information, se reporter au paragraphe 4.2.3 de la notice d'utilisation du logiciel.



statut	nom	E (MPa)	nu	Epsi6	-1/b	SN	Sh (m)	Kc	T= -10	T= 0 °C	T= 10	T= 20	T= 30	T= 40
system	eb-bba1	5500	0.35	130	5	0.25	stdard	1.1	14800	12000	7315	3685	1300	1000
system	eb-bba2	5500	0.35	100	5	0.25	stdard	1.1	14800	12000	7315	3685	1300	1000
system	eb-bba3	7000	0.35	100	5	0.25	stdard	1.1	16000	13500	9310	4690	1800	1000
system	eb-bbsg1	5500	0.35	100	5	0.25	stdard	1.1	14800	12000	7315	3685	1300	1000
system	eb-bbsg2	7000	0.35	100	5	0.25	stdard	1.1	16000	13500	9310	4690	1800	1000
system	eb-bbsg3	7000	0.35	100	5	0.25	stdard	1.1	16000	13500	9310	4690	1800	1000
system	eb-bbme1	9000	0.35	100	5	0.25	stdard	1.1	17300	15400	11970	6030	3000	1900
system	eb-bbme2	11000	0.35	100	5	0.25	stdard	1.1	19500	18200	14630	7370	3800	2300
system	eb-bbme3	11000	0.35	100	5	0.25	stdard	1.1	19500	18200	14630	7370	3800	2300
system	bbm	5500	0.35	/	/	/	stdard	1.1	14800	12000	7315	3685	1300	1000
system	bbtm	3000	0.35	/	/	/	stdard	1.1	8500	7000	4200	1800	1000	800
system	bbdr	3000	0.35	/	/	/	stdard	1.1	8500	7000	4200	1800	1000	800
system	acr	5500	0.35	/	/	/	stdard	1.1	14800	12000	7315	3685	1300	1000
system	eb-gb2	9000	0.35	80	5	0.3	stdard	1.3	22800	18300	11880	6120	2700	1000
system	eb-gb3	9000	0.35	90	5	0.3	stdard	1.3	22800	18300	11880	6120	2700	1000
system	eb-gb4	11000	0.35	100	5	0.3	stdard	1.3	25000	20000	14300	7700	3500	1200
system	eb-eme1	14000	0.35	100	5	0.3	stdard	1	30000	24000	16940	11060	6000	3000
system	eb-eme2	14000	0.35	130	5	0.25	stdard	1	30000	24000	16940	11060	6000	3000
user	P401	5878	0.350	88.0	5.00	0.25	stdard	1.100	17459	12956	8140	3616	1360	

Figure 5 : Alizé aéro, bibliothèque matériaux.

Risque (Guide technique p36)

Le risque est à choisir en fonction de l'importance de l'aéroport. Il est proposé de le fixer en fonction de la classe de trafic (CTi) prévue sur l'aéroport. Le risque pour un aéroport dont la classe de trafic annuel est supérieure ou égal à CT3 peut être fixé à 2,5 %. Pour un aéroport dont la classe de trafic annuel est inférieure à CT3, ou supérieur à CT3 mais avec la possibilité de reporter le trafic sur une autre piste ou voie de circulation durant les travaux de maintenance ou de réparation, le risque peut être choisi entre 5 et 10 %.

Figure 6 : Alizé aéro, Structure de chaussée, Risque.

6. Trafic

Trafic avion (Guide technique p37)

Le trafic est usuellement décrit par les différents types d'aéronefs prévus sur la chaussée aéronautique et par leur fréquence de passage, avec distinction des décollages et des atterrissages.

Les masses associées sont donc :

- la masse maximale pour les évolutions de l'avion (ou masse maximale au roulage Mrw),
- la masse maximale au décollage de l'avion, Mtow,
- la masse maximale à l'atterrissage de l'avion, Mlw.

L'épaisseur de chaussée souple calculée étant plus sensible aux variations de charges qu'aux variations du nombre de mouvements, il est important de recenser avec précision cette charge (relative au trafic des aéronefs).

▶ Implémentation dans Alizé-aéronautique

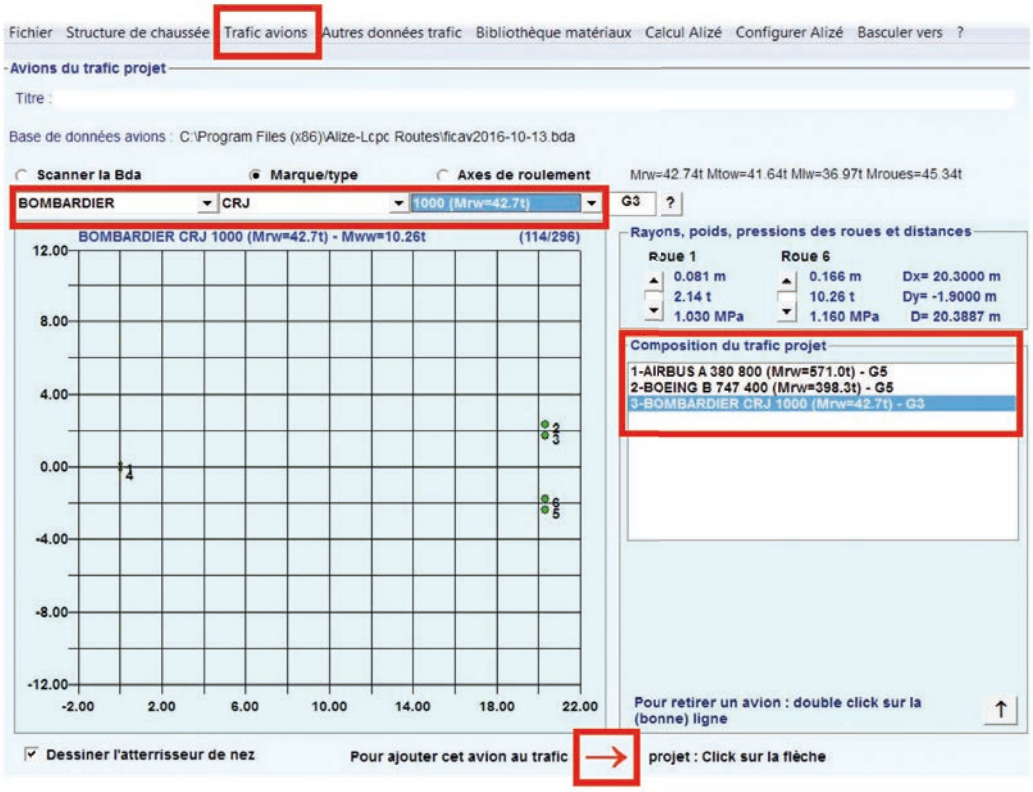


Figure 7 : Alizé aéro, Trafic avion.

7. Autres données trafic

Balayage et Vitesse (Guide technique p38-39)

Par rapport à la trajectoire théorique centrée sur l'axe longitudinal de la voie de circulation à dimensionner (sections circulées à vitesses élevée et modérée), les différents passages d'un aéronef donné présentent un excentrement variable (le balayage), dont il est important de tenir compte dans le cumul des endommagements. Celui-ci a en effet pour conséquence de minorer les endommagements par rapport à un trafic non balayant.

Les vitesses de déplacement des aéronefs influencent le module effectif des enrobés bitumineux du fait de leur comportement viscoélastique et donc sur les champs de déformation induits dans les chaussées.

La figure ci-dessous permet de quantifier ces valeurs de balayage et de vitesse en fonction de l'aire à dimensionner.

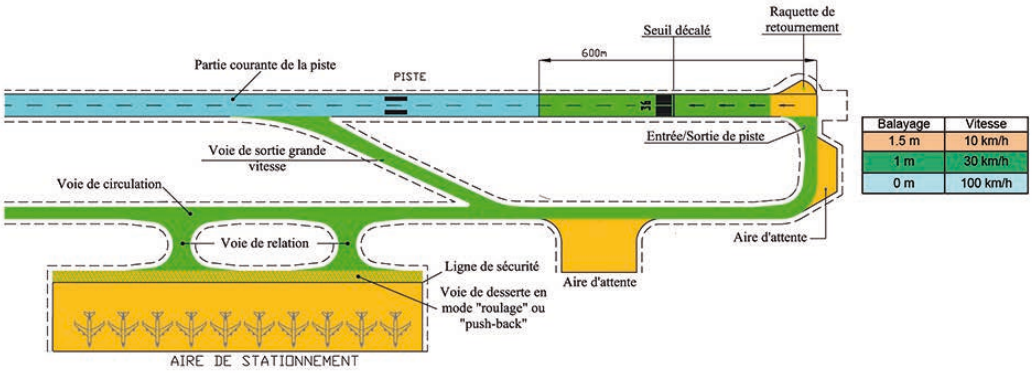


Figure 8 : Balayage et vitesse (Guide technique).

Température équivalente (Guide technique p41)

Pour les climats de types océaniques, méditerranéen ou continental (France métropolitaine et Saint Pierre et Miquelon), la température équivalente est prise égale à **15°C**. Pour les climats de type tropical (territoires d'outre-mer), la température équivalente est prise égale à **25°C**, excepté pour la Guyane pour laquelle une température de **28°C** peut être retenue.

Période de calcul

La période de calcul d'une chaussée aéronautique souple est généralement de 10 ans.

▶ Implémentation dans Alizé-aéronautique

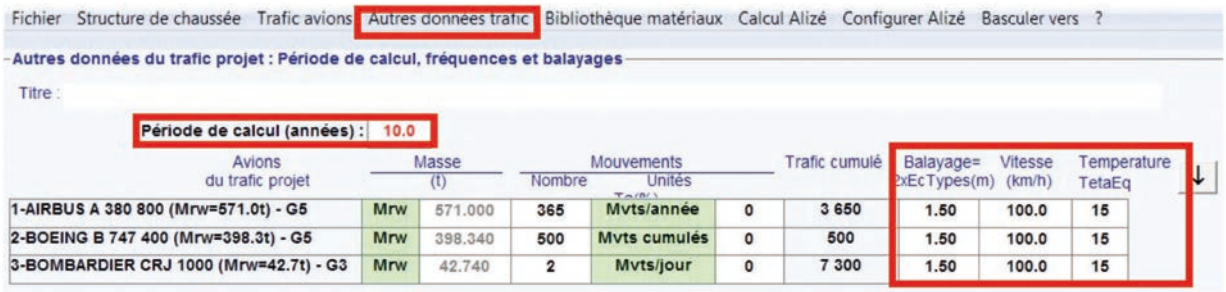


Figure 9 : Alizé aéro, Autres données trafic.

8. Calcul unique

Ce type de calcul vise à évaluer le dommage relatif à la structure de chaussée renseignée dans l'onglet « Structure de chaussée » sous le trafic décrit dans les onglets « Trafic avion » et « Autres données trafic ». Le dommage est calculé suivant deux critères de dimensionnement (cf introduction) :

- la déformation horizontale à la base des couches bitumineuses,
- la déformation verticale au sommet de la plate-forme.

Figure 10 : Alizé aéro,Calcul Alizé, Calcul unique.

Une fois l'ensemble des calculs effectués, les courbes de dommage par avion pour les deux critères de dimensionnement sont tracées. Les courbes relatives au dommage cumulé, avec ou sans balayage et pour les deux critères de dimensionnement, sont également tracées.

Elles peuvent être affichées en cliquant sur « Dommages par avion », « Dommages cumulés », « Avec balayage » et « Sans balayage » cochées

Une structure est considérée comme suffisamment portante pour le trafic considéré lorsque le Dommage Cumulé avec Balayage (DCB) est inférieur à 1 et la structure est optimisée lorsque **le DCB est égal à 1 pour un des critères de dimensionnement et inférieur à 1 pour l'autre**. Les hypothèses de structure et/ou de trafic devront être réglées manuellement afin d'obtenir ce DCB de 1.

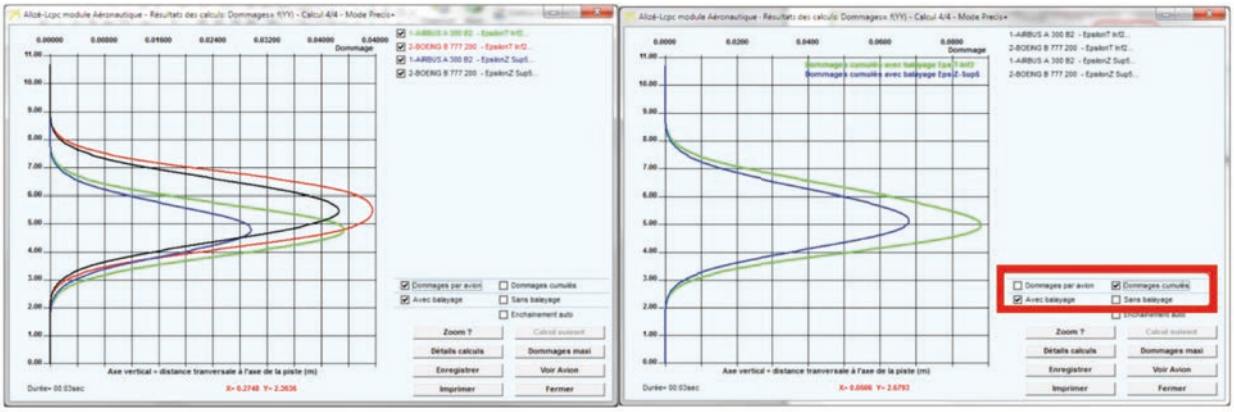


Figure 11 : Alizé aéro, Résultats calcul unique.

9. Représentations graphiques

Balayage et Vitesse (Guide technique p38-39)

Dans l'onglet calcul unique, des informations supplémentaires sont disponibles en cliquant sur l'onglet « Détails calculs ». En particulier, les profils 2D des déflections et des déformations sont tracés pour l'ensemble des positions, à la fois suivant le plan xx et le plan yy.

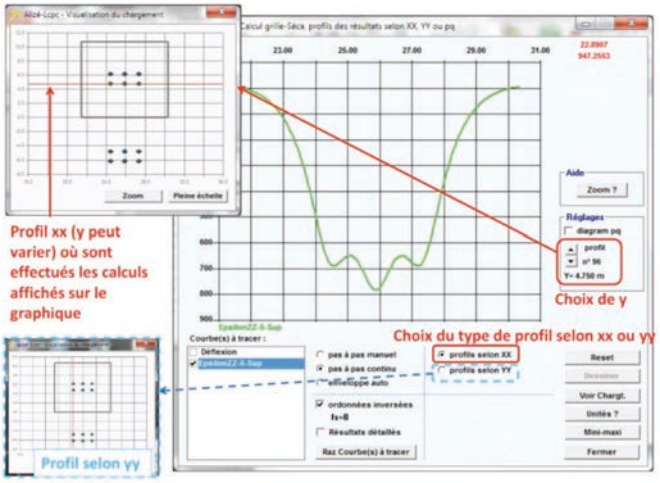


Figure 12 : Alizé aéro, Résultats, Graphes 2D.

De la même façon, des représentations des surfaces 3D sont disponibles pour un certain nombre de paramètres, tel que la déflexion, les déformations et les contraintes.

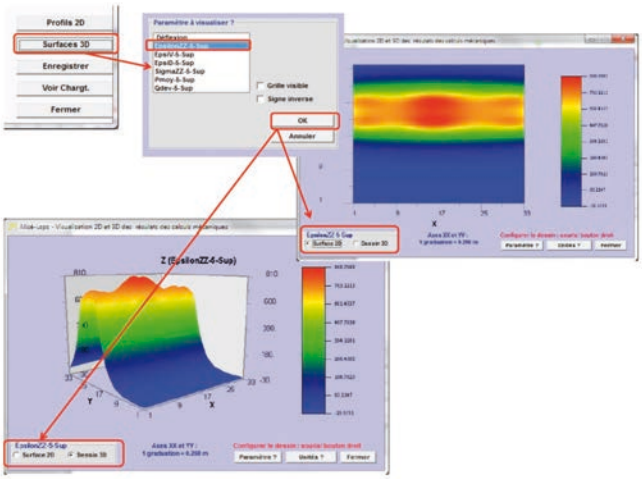


Figure 13 : Alizé aéro, Résultats, Graphes 3D.

Ces représentations graphiques permettent une analyse approfondit des phénomènes d'endommagement présents dans la chaussée.

10. Calcul itératif

Ce type de calcul vise à ajuster automatiquement l'épaisseur d'une couche de matériaux (couche de base ou couche de fondation) afin que le Dommage Cumulé avec balayage (DCB) soit de 1 pour un des critères de dimensionnement, et inférieur à 1 pour l'autre. Le dimensionnement est ainsi optimisé pour la couche étudiée.

Le choix est laissé à l'utilisateur de faire varier la couche de son choix, en double-cliquant sur l'épaisseur de cette dernière (épaisseur en rouge).

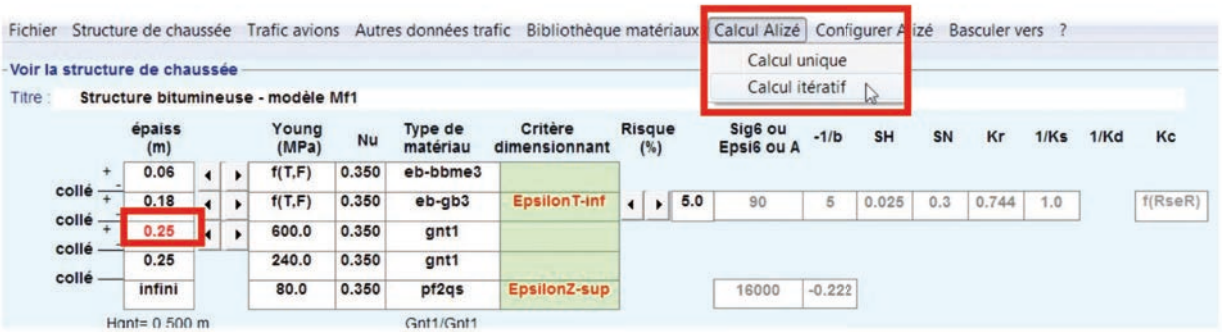


Figure 14 : Alizé aéro,, Calcul Alizé, Calcul itératif.

L'épaisseur optimale est automatiquement intégrée dans la structure. À la fin du calcul, les résultats sont affichés via la fenêtre suivante :

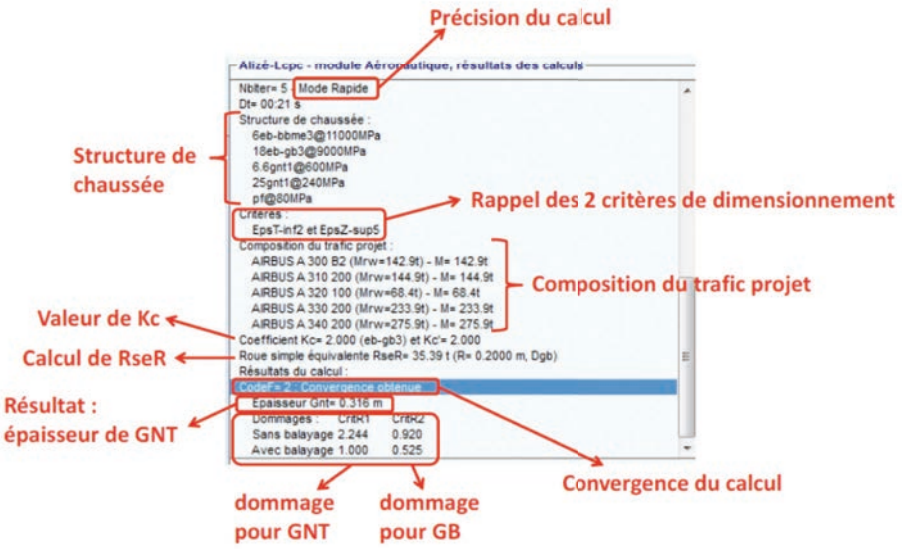


Figure 15 : Alizé aéro, Résultats calcul itératif.

11. Pour aller plus loin : Critères d'endommagement

Les critères d'endommagement sont tous les deux définis par la loi d'endommagement de Wöhler. La loi de Wöhler-Miner permet de généraliser la loi de Wöhler au cas de sollicitation en grand nombre, d'intensité variable et se succédant de manière aléatoire. Elle repose sur la notion d'endommagement élémentaire, le postulat d'additivité de ces endommagements et le critère de rupture pour un endommagement cumulé (DCB) égal à 1.

Dans le cadre de la méthode de dimensionnement, la loi de Wöhler Miner s'applique sous la forme d'une loi intégrale.

Déformation horizontale à la base des matériaux bitumineux

Appliqué aux matériaux bitumineux, la loi de Wöhler devient :

$$N\left(\varepsilon_{t\max}\right)=\left(\frac{K}{\varepsilon_{t\max}}\right)^{\beta} \quad \text{et} \quad K=k_{\theta f}k_r k_s k_c 10^{6/\beta}\,\bar{\varepsilon}_6$$

Avec :

ε_{tmax} la déformation horizontale calculée à la base de la couche bitumineuse.

β la pente de la droite de fatigue et K un coefficient avec :

ε_6 valeur de la déformation (µdef) à 106 cycles, déterminée expérimentalement en laboratoire à 10°C et 25 Hz,

k_{of} le coefficient de correction en température et en fréquence

kr le coefficient de risque

kc le coefficient de calage fonction de la RseR

ks le coefficient de plate-forme (relatif au calcul structurel)

N se rattache à une diminution de la rigidité du matériau sollicité à la température de 10°C et à la fréquence de 25 Hz. Il est défini comme la valeur moyenne du nombre de sollicitations conduisant à la rupture, obtenue par définition lorsque la perte de raideur du matériau atteint 50 % (norme NF EN 12-697-24).

Déformation verticale au sommet de la plate-forme (Guide technique, p52)

$$N(\varepsilon_{zzmax}) = \left(\frac{K}{\varepsilon_{zzmax}}\right)\beta$$

Appliqué à la plateforme, la loi de Wöhler devient :

Avec

K = 1 600

β= 4.5

12. Pour aller plus loin : RseR (Roue simple équivalente rationnelle)

Le concept d'endommagement permet de définir une approche plus rationnelle par rapport à la notion de classe de trafic (paragraphe 2) pour caractériser l'agressivité d'un trafic. Cette approche repose sur la notion de « Roue Simple Équivalente Rationnelle ». La RseR associée à un trafic d'aéronefs et à une structure de chaussée est la charge simple non balayante (en tonnes) appliquée 10 000 fois sur la structure avec une empreinte au sol de rayon égal à 0,20 m, qui donne la même valeur d'endommagement par fatigue des enrobés que l'ensemble du trafic.

Il est important de noter que la valeur de RseR est dépendante de la structure de chaussée considérée, et donc de l'épaisseur d'enrobés préconisée travaillant en fatigue. Ainsi, des valeurs différentes de RseR peuvent être trouvées pour un même trafic.

La RseR ainsi définie est utilisée comme une donnée permettant de :

- statuer sur l'éventuelle mise en œuvre d'une couche de base en matériaux granulaires (pour un trafic faible et peu agressif),
- vérifier que l'épaisseur de couche de base n'est pas sous-dimensionnée,
- définir le coefficient de calage kc pour les matériaux bitumineux.

Ces trois points étant directement liés aux matériaux bitumineux, il est choisi de définir la RseR vis-à-vis de l'endommagement par fatigue des enrobés plutôt que l'endommagement créé par déformations permanentes des matériaux granulaires. Ainsi, l'égalité des endommagements créée d'une part par le trafic réel, et d'autre part par la RseR est effectuée pour la fatigue des enrobés.

Épaisseur de couche de base - Valeurs indicatives

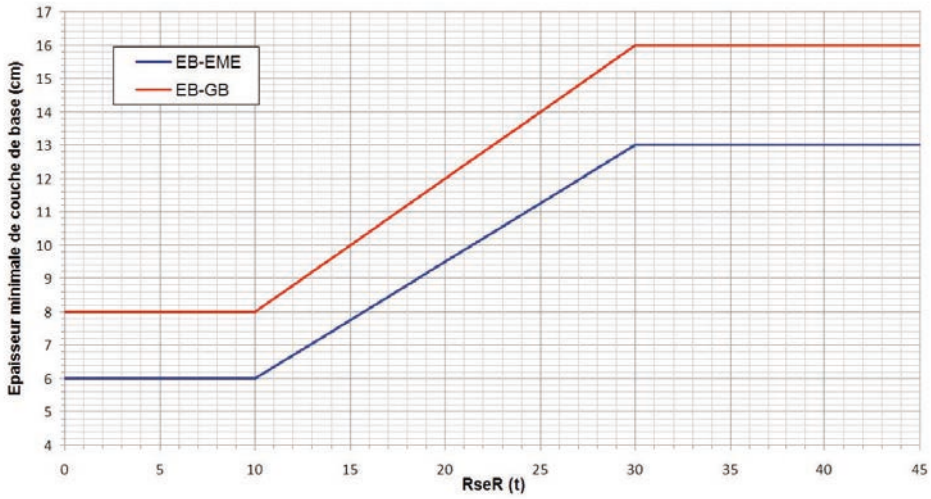


Figure 16 : Épaisseur minimale en fonction de la RseR (Guide technique).

Conception : STAC/SINA groupe Documentation et diffusion des connaissances (DDC)

Couverture : © Richard METZGER DGAC/STAC

Illustrations : © DGAC/STAC

Avril 2018

service technique de l'Aviation civile
CS 30012
31, avenue du Maréchal Leclerc
94385 BONNEUIL-SUR-MARNE CEDEX
Tél. +33 1 49 56 80 00
Fax +33 1 49 56 82 19