

MÉTHODE RATIONNELLE DE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES AÉRONAUTIQUES SOUPLES

Marne-la-Vallée
Vendredi 14 octobre 2016

Damien MOUNIER (STAC)
Jean-Michel PIAU (IFSTTAR)



Direction générale de l'Aviation civile - Service technique de l'Aviation civile

STAC

www.stac.aviation-civile.gouv.fr

REMERCIEMENTS

- Groupe de travail :
 - IFSTTAR
 - CEREMA
 - STAC

- Comité d'experts :
 - RST
 - Consultants
 - Entreprises
 - Aéroports



STAC



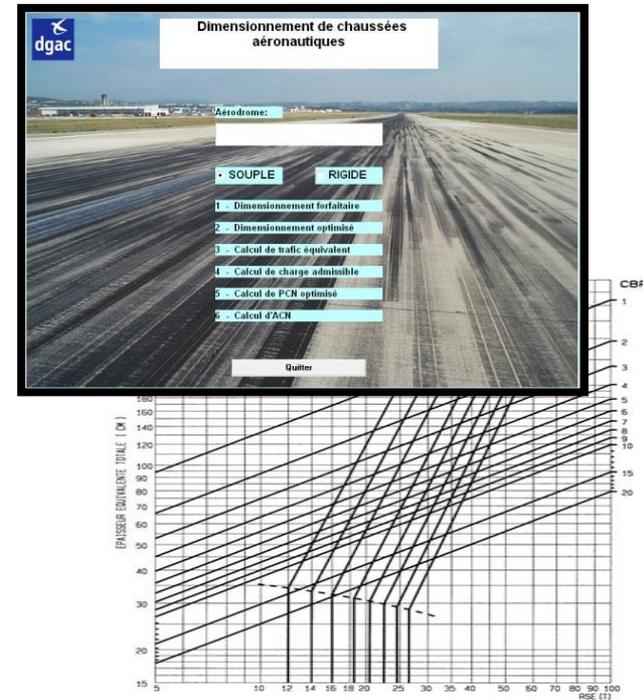
UNE RÉVISION NÉCESSAIRE

Méthodes actuelles empiriques :

- Inspirée de la méthode américaine développée par l'US Corps of Engineers
- Repose sur la méthode CBR (souple) ou Westergaard (rigide)

Limites :

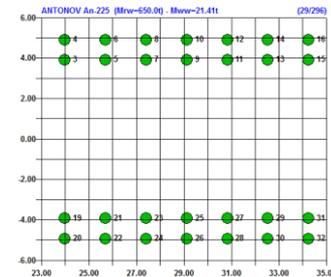
- Pas de prise en compte explicite de l'endommagement des matériaux (hydrocarbonés ou granulaires)
- Caractérisation du sol support par essais CBR
- Prise en compte problématique des nouveaux matériaux et nouveaux aéronaves (géométries atterrisseurs, niveaux de charge)



UNE RÉVISION NÉCESSAIRE

Pour prise en compte de :

- Qualité des interfaces
- Températures et fréquences de chargement variables,
- Nouvelles configurations d'atterrisseur...

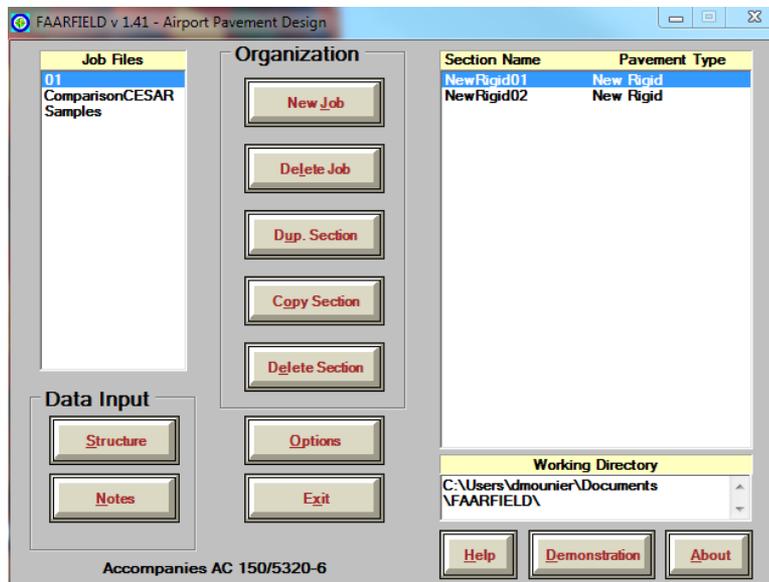


Orientation vers une approche « rationnelle » basée sur un modèle élastique linéaire intégrant une approche performantielle des matériaux.

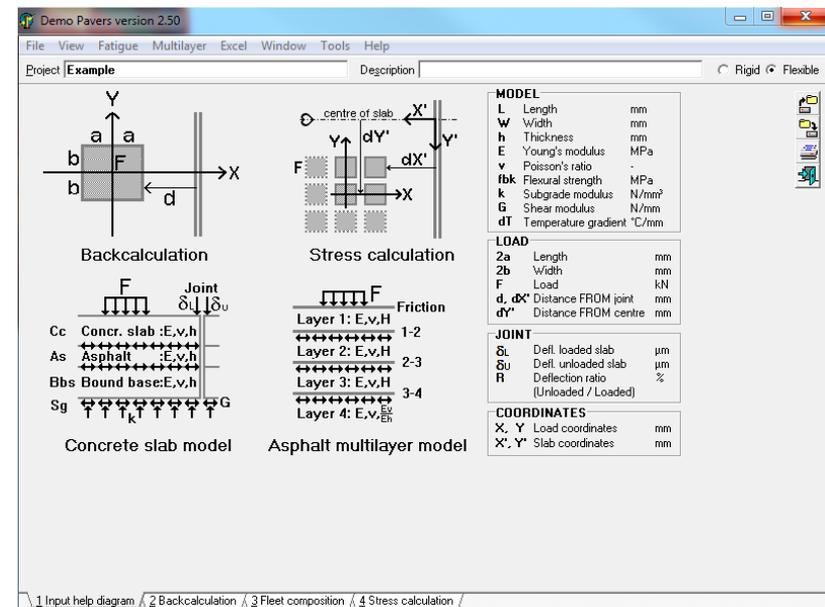
CONTEXTE INTERNATIONAL

- Méthodes empiriques en fin de vie
- Montée en puissance des outils informatiques depuis fin 1980
- Orientation vers des modèles plus basés sur la mécanique ; approches analytiques, voire numériques

Ex : FAARFIELD (USA)



PAVERS (NL)



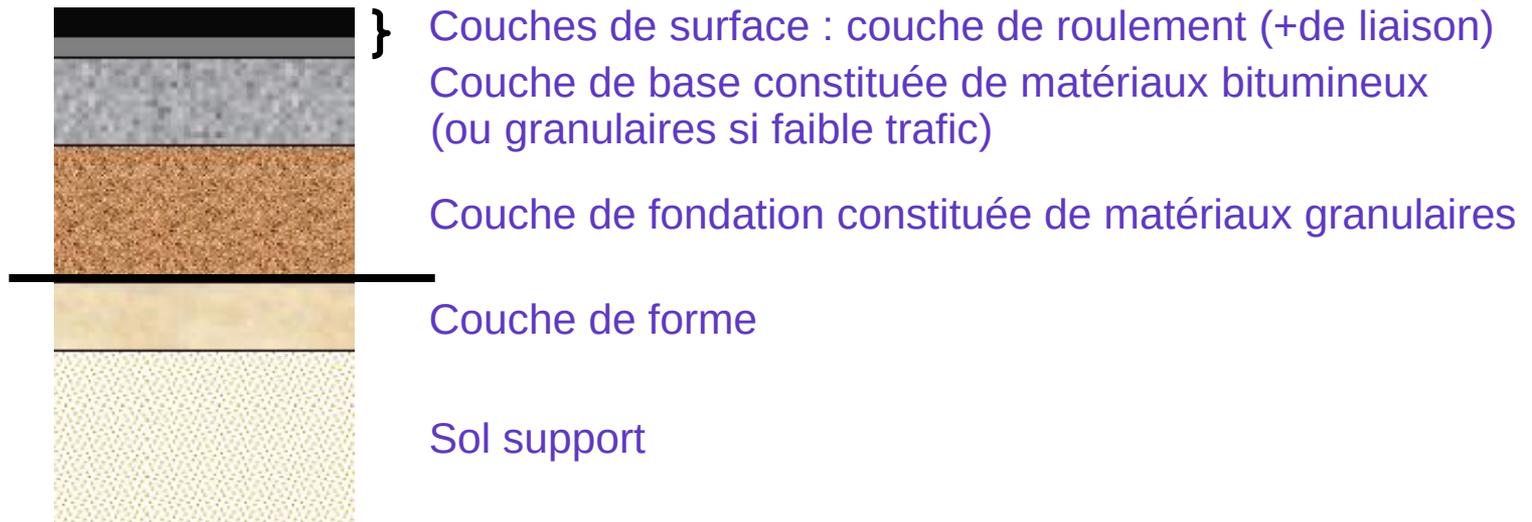
CONTEXTE FRANÇAIS

- Méthode rationnelle utilisée en France dans le domaine routier depuis plus de 30 ans.
- Adaptation de cette méthode au domaine aéronautique : contexte et contraintes différents.
- Source principale : Volet « chaussées bitumineuses » de la méthode de dimensionnement des chaussées routières
- Limitation au cas des chaussées souples neuves dans un premier temps.
- Extensions futures :
 - Renforcement (guide prévu pour 2017)
 - Dimensionnement des chaussées rigides (travaux en cours)
 - ACN/PCN rationnels (travaux en cours OACI+France)

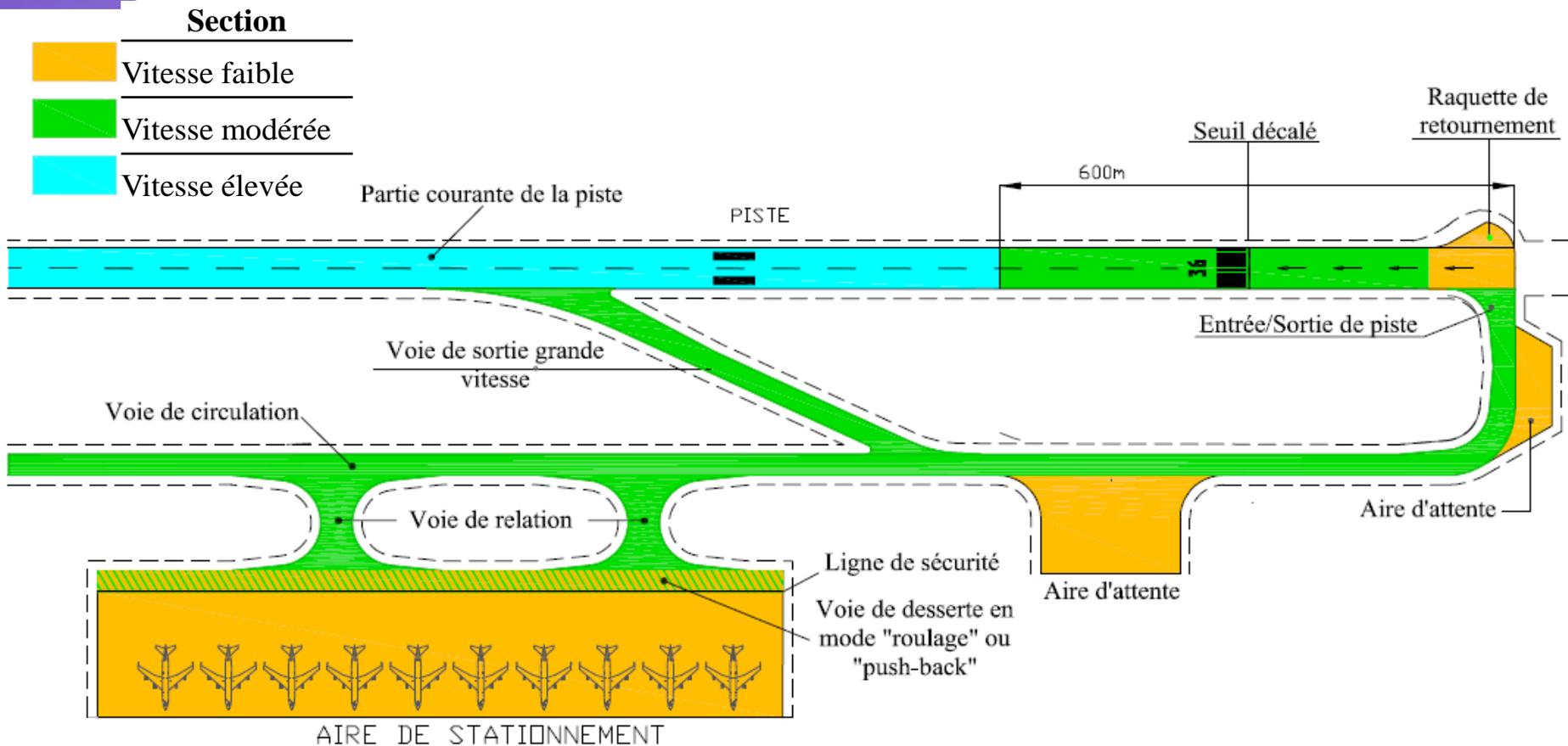


DOMAINE D'APPLICATION

Chaussées souples neuves



DOMAINE D'APPLICATION



DOMAINE D'APPLICATION

Sections circulées à vitesse élevée

Partie courante de la piste

Sections circulées à vitesse modérée

*Voie de desserte exploitée en mode « roulage »
Voie de relation
Entrée/sortie de piste
600 premiers mètres de la piste, intégrant le seuil
Voie de circulation partie courante
Voie de circulation raccordement*

Aires de stationnement et sections circulées à faible vitesse

*Voie de desserte exploitée en mode « push-back »
Aire de stationnement
Raquette de retournement
Aire d'attente (ou plate-forme)*



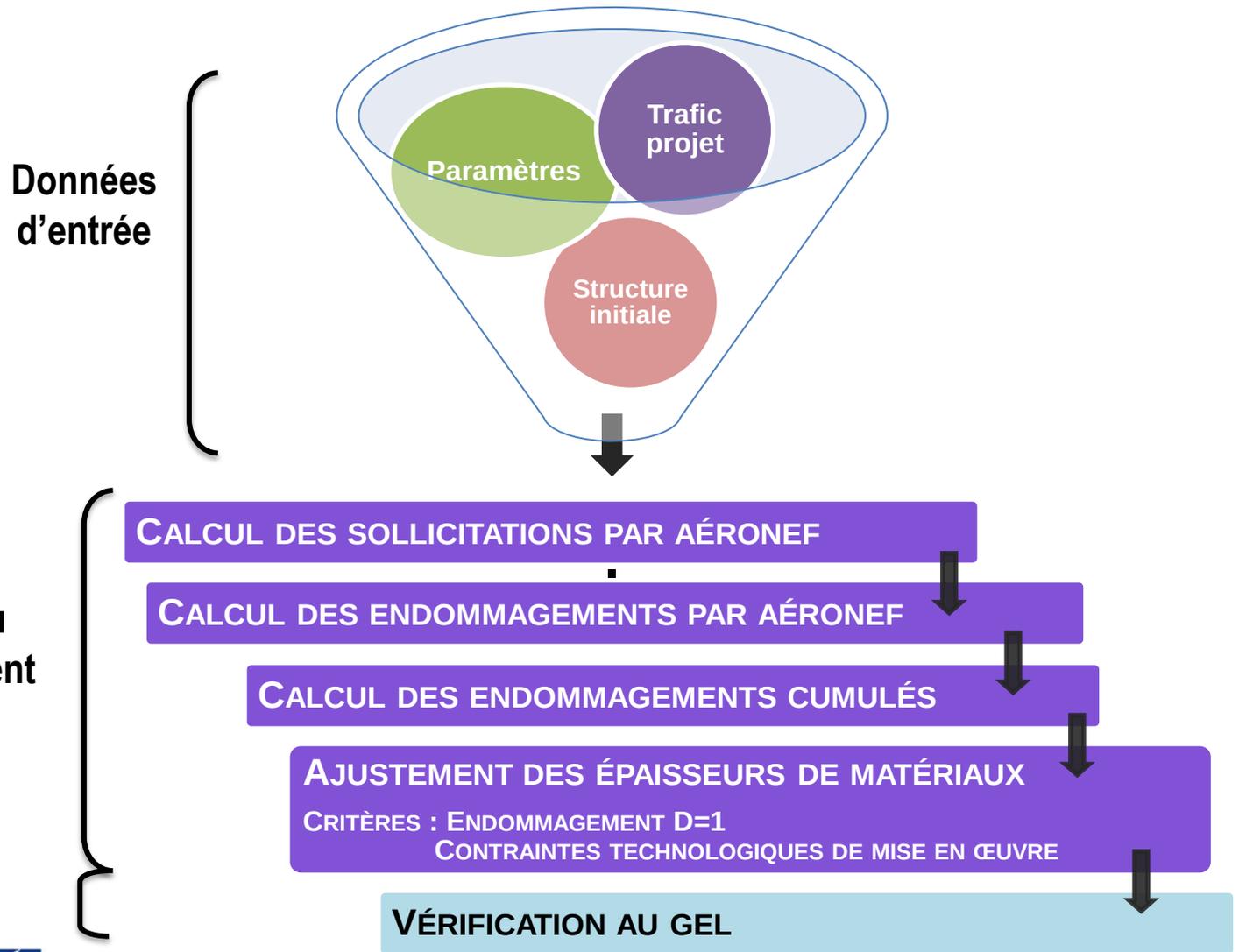
STAC

Direction générale de l'Aviation civile - Service technique de l'Aviation civile

www.stac.aviation-civile.gouv.fr



PRINCIPE DE LA DÉMARCHE



DONNÉES TRAFIC

Base de données FICAV du STAC (Caractéristiques des avions les plus courants)

Fiche avion

Constructeur : AIRBUS
A 340-600 AILE

Caractéristiques générales

Masse maxi au roulage (kg)	Masse maxi au décollage (kg)	Masse maxi à l'atterrissage (kg)	Masse à vide opérationnelle (kg)
381 200	380 000	265 000	176 360

Pression des pneumatiques

Pression de gonflage standard (MPa)

Att. principal	Att. de nez
1.61	1.32

Répartition des charges

Att. de nez		Att. principal	
Centrage avant (% max)		Centrage arrière (% max)	
V statique	V freinage constant	V statique	V freinage constant
10.6		31.8	

Numéros d'ACN

Masse de calcul (kg)	Classes							
	Chaussées souples				Chaussées rigides			
	A	B	C	D	A	B	C	D
381 200	66	71	83	112	63	73	86	100
176 360	26	27	30	36	29	29	31	36

Atterrisseurs

	Voie (m)	SD (m)	Nb roues	
Atterrisseur principal	1.397	2.424	4	
Config. atterrisseurs				
2-4-4-4				
	X (m)	Y (m)	R (m)	Pression (MPa)
1	0	0.407	0.2128	1.39
2	31.8985	4.6435	0.2423	1.61
3	31.8985	6.0405	0.2423	1.61
4	32.6465	0.588	0.2306	1.61
5	33.8795	4.6435	0.2423	1.61
6	33.8795	6.0405	0.2423	1.61
7	34.6275	0.588	0.2306	1.61
8	0	-0.407	0.2128	1.39
9	31.8985	-4.6435	0.2423	1.61
10	31.8985	-6.0405	0.2423	1.61
11	32.6465	-0.588	0.2306	1.61
12	33.8795	-4.6435	0.2423	1.61
13	33.8795	-6.0405	0.2423 </td <td>1.61</td>	1.61
14	34.6275	-0.588	0.2306	1.61

Visualisation des atterrisseurs



Masses à prendre en compte pour le dimensionnement :

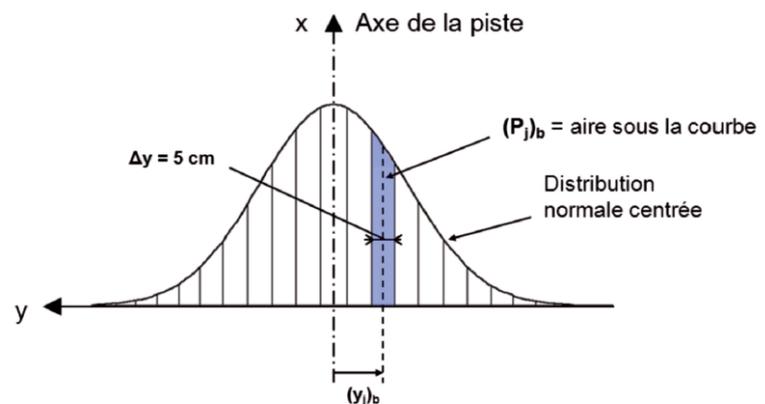
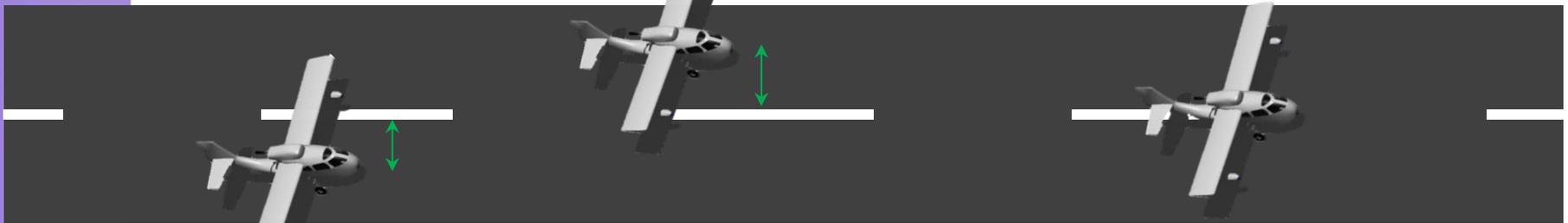
- Masses réelles (si disponibles)
- Masse maxi au roulage **MRW** (pour les décollages)
- Masse maxi à l'atterrissage **MLW** (pour les atterrissages)

Nombre de mouvements N pour chaque avion sur une période de calcul de 10 ans (choix du maître d'ouvrage)

DONNÉES TRAFIC

Balayage transversal : excentrement des aéronefs par rapport à l'axe de la piste

- Caractérisé par une distribution Gaussienne d'écart type S_{bal} (m)
- Balayage = $2 \times S_{bal}$



DONNÉES TRAFIC

- Paramètres vitesse et balayage : recommandations du guide

	Vitesse (km/h)	Balayage (m)
Section à vitesse faible	10	0
Section à vitesse modérée	30	1
Section à vitesse élevée	100	1,5

Ajustement en fréquence des modules des matériaux

bitumineux à partir de la relation $f(Hz) = \frac{V(km/h)}{10}$

AUTRES PARAMETRES: T_{EQ}

Température équivalente T_{eq} :

« Température constante conduisant au même endommagement que les endommagements cumulés calculés aux températures réelles. »

Valeurs recommandées :

- Climat océanique, méditerranéen ou continental : 15° C
- Climat tropical (DOM-TOM) : 25 ° C
- Guyane : 28° C

Ajustement en température des modules des matériaux bitumineux

AUTRES PARAMETRES: RISQUE

Risque de calcul r : choix du maître d'ouvrage

« Le risque de calcul... représente l'espérance au sens des probabilités, du linéaire de chaussée à reconstruire en l'absence de travaux de renforcement à l'issue de la période de calcul »

Valeurs recommandées :

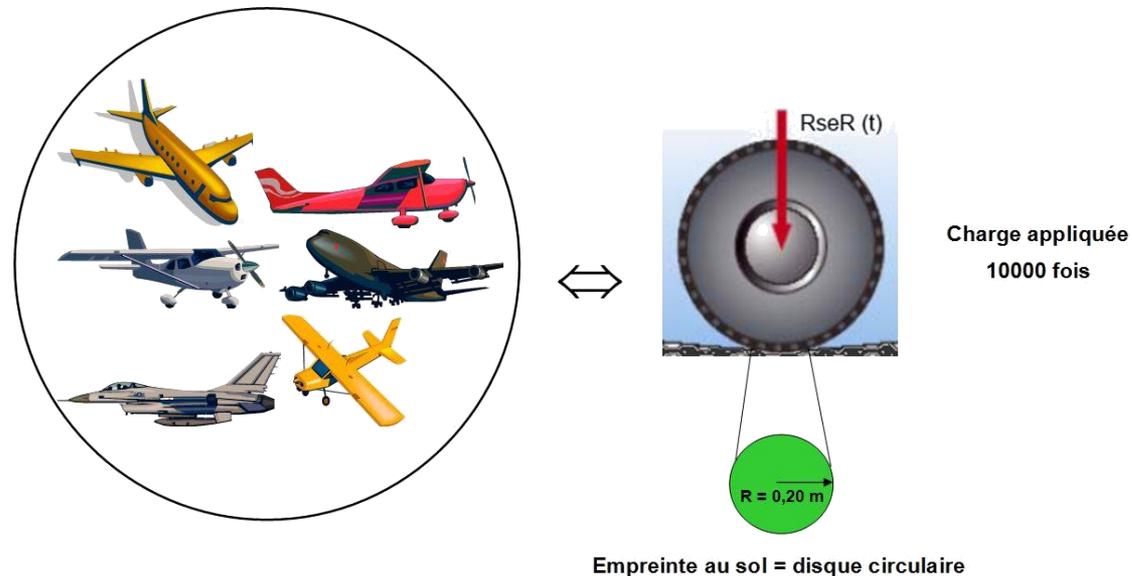
- $r = 2,5 \%$ si classe de trafic \geq CT3
- $5 \% \leq r \leq 10 \%$ si classe de trafic $<$ CT3 ou possibilité de report de trafic

AUTRES PARAMETRES : RseR

Comment évaluer l'agressivité du trafic ?

- Utilisation des classes de trafic définies dans le GAN (CT1 à CT5)
- Utilisation du paramètre RseR (Roue Simple Equivalente 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. »



AUTRES PARAMETRES: RseR

RseR utilisée pour :

- 1- Affiner la calage de la méthode pour les matériaux bitumineux (cf. ci-après)
- 2- Vérifier que l'épaisseur de la couche de base n'est pas sous-dimensionnée au regard des pratiques actuelles (cf. ci-après)
- 3- Statuer sur l'éventuelle mise en œuvre de couche de base en matériaux granulaires (faibles trafics) :

-> aéronefs du **groupe 1 et 2** (au sens du GAN) et **RseR < 10 t**

Quantité calculée suivant la méthode indiquée plus loin

MATÉRIAUX DE LA STRUCTURE

Choix des matériaux bitumineux selon recommandations du GAN :

	Produits
Couche de roulement	EB-BBA, EB-BBSG, EB-BBME, EB-BBM, BBTM, SMA, ESU, ECF, EP
Couche de liaison	EB-BBA, EB-BBME, EB-BBM, EB-BBSG
Couche de base	EB-GB, EB-EME

Matériaux de couche de fondation : GNT de type B

Couche de fondation (GNT subdivisée en sous-couches de 0,25 m d'épaisseur)	$E_{GNT} \{1\} = k.E_{plate-forme\ support}$		
	$E_{GNT} \{sous-couche\ i\} = k.E_{GNT} \{sous-couche\ (i-1)\}$		
	k variant selon la catégorie de la GNT		
	Catégorie	1	2
	k	3	2,5
E_{GNT} borné par : 600 MPa pour une GNT de catégorie 1 400 MPa pour une GNT de catégorie 2			

Catégorie 1 : CT3-CT4-CT5

Catégorie 2 : CT1-CT2

PLATE-FORME SUPPORT DE CHAUSSÉE

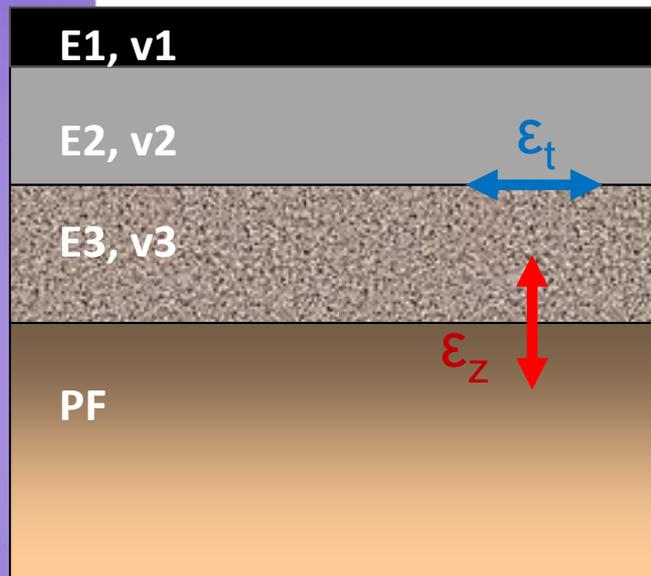
Module de plate-forme plafonné à 120 MPa au vu des charges aéronautiques

<i>Classe de plate-forme</i>	<i>PF2</i>	<i>PF2^{qs}</i>	<i>PF3</i>	<i>PF4</i>
<i>Module considéré dans le calcul (MPa)</i>	50	80	120	120

Utilisation de couches de formes **traitées** sous réserve :

- de mettre en place au moins 20 cm de couche de fondation granulaire
- d'apporter une attention particulière au dispositif de drainage
- de prévoir des dispositions limitant les remontées de fissures anarchiques

CRITÈRES DE DIMENSIONNEMENT



Couche de surface

(Pas de dimensionnement des couches de surface)

Couche de base

Extensions horizontales réversibles à la base de la couche de base (fatigue)

Couche de fondation

Contractions verticales réversibles au sommet des couches granulaires (déformations permanentes)

Plate-forme support de chaussée + sol support

Base du calcul : Modèle multicouche élastique linéaire isotrope (Burmister, 1943)

CALCUL DES HISTORIQUES DE SOLLICITATION PAR LIGNES D'INFLUENCE

Choix d'une position fixe pour le chargement

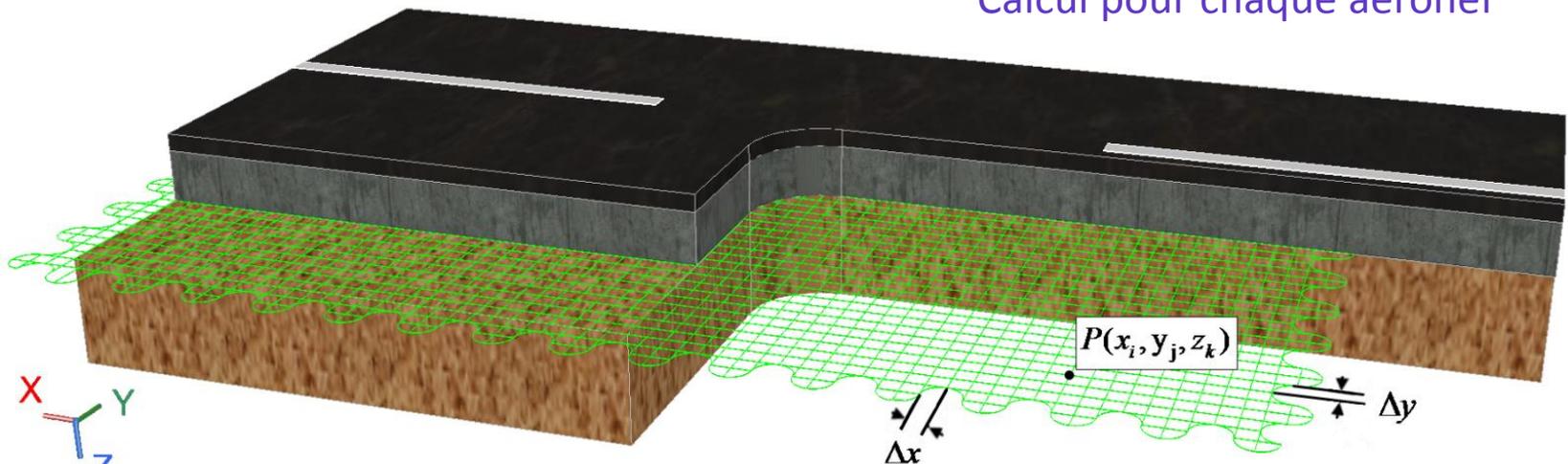
Calcul des déformations sur lignes parallèles à la trajectoire (x)

(x variable, y et z fixes) → historique de déformation suivant x

Discretisation des plans de calcul horizontaux (x,y) situés aux cotes z_k selon une grille de points (x_i, y_j, z_k) .

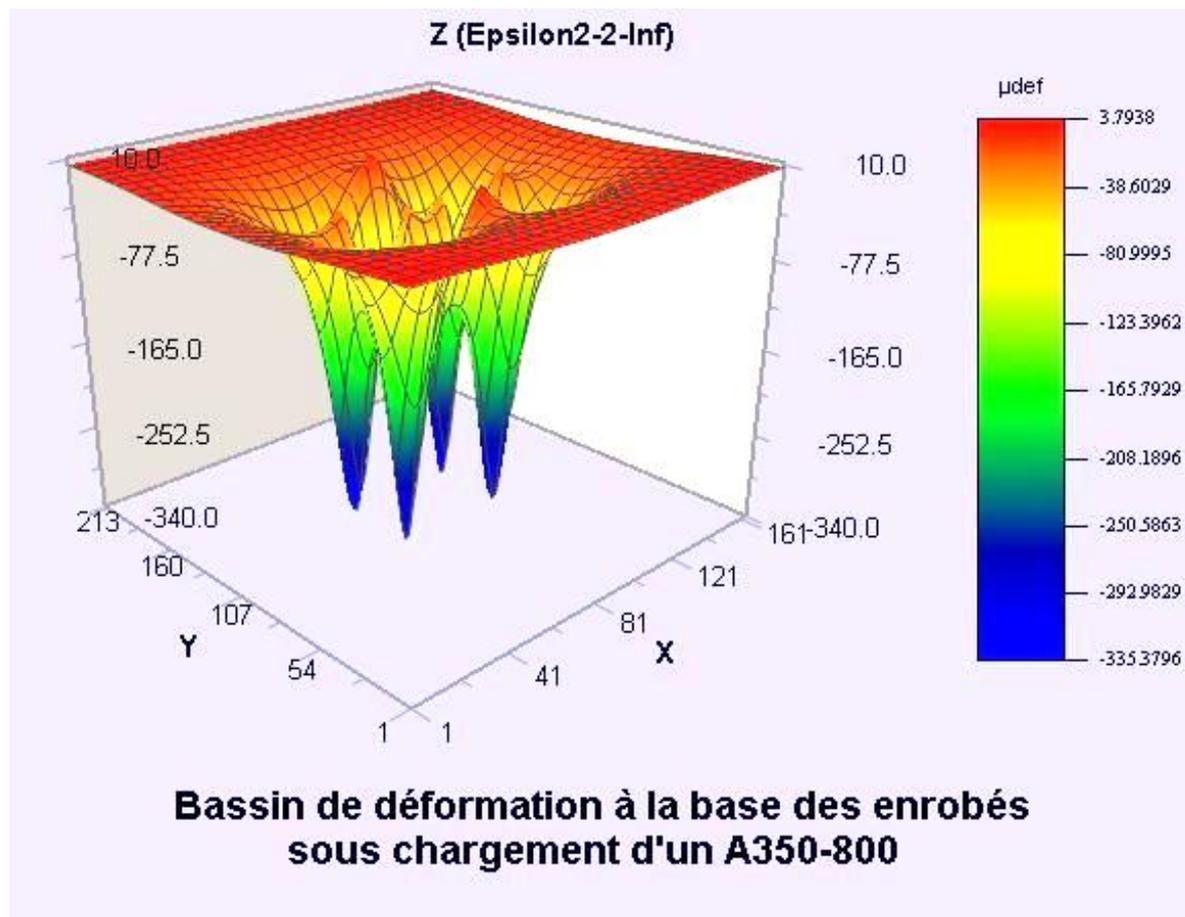
- x : axe longitudinal de la charge roulante
- y : direction transversale

Calcul pour chaque aéronef



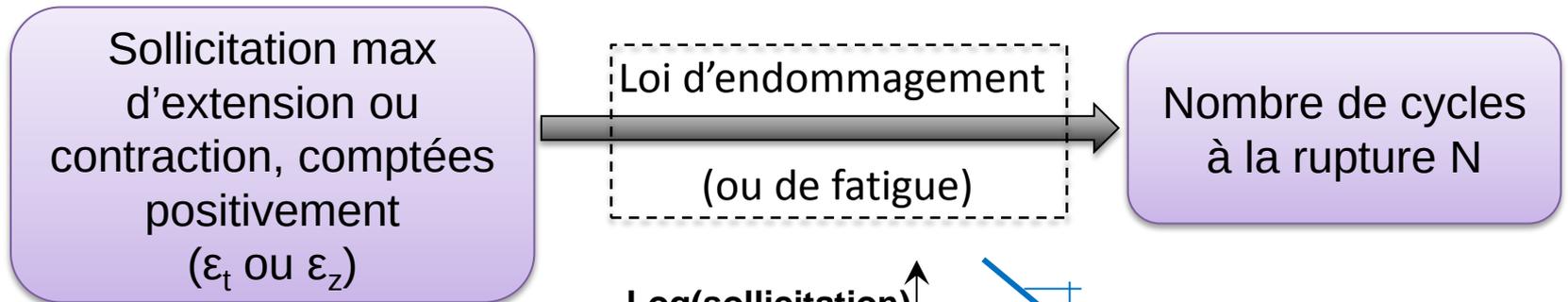
CALCUL DES SOLLICITATIONS ELASTIQUES

Exemple de bassin de déformation (boggie 4 roues)



CALCUL DES ENDOMMAGEMENTS (EB, SOL): LOI DE WÖHLER

- Endommagement sous sollicitations périodiques « simples »

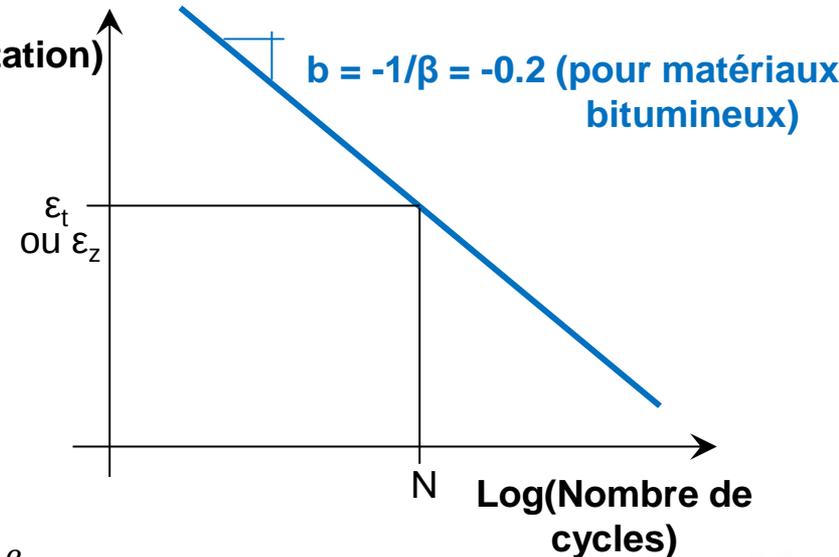


$$N_r = \frac{A}{\varepsilon_{max}^\beta} = \frac{C^\beta}{\varepsilon_{max}^\beta} \Leftrightarrow \varepsilon_{max} = \varepsilon_6 \left(\frac{N_r}{10^6} \right)^b$$

avec $A = 10^6 \varepsilon_6^\beta$ ou $C = 10^{6/\beta} \varepsilon_6$

Endommagement élémentaire ΔD
pour 1 cycle de chargement :

$$\Delta D(\varepsilon_{max}) = \frac{1}{N_r(\varepsilon_{max})} = \frac{\varepsilon_{max}^\beta}{C^\beta}$$



CALCUL DES ENDOMMAGEMENTS :

LOI DE WÖHLER-MINER

- Endommagement sous sollicitations répétées à niveau variable : loi de Wöhler + principe de cumul des dommages de Miner
- Regroupement par paquets de N_i cycles de même niveau $\varepsilon_{i \max}$
 - Chaque niveau produit le dommage cumulé : $\Delta D_i = N_i \frac{\varepsilon_{i \max}^\beta}{C^\beta}$

- Cumul des endommagements produits à chaque niveau :

$$D = \sum N_i \frac{\varepsilon_{i \max}^\beta}{C^\beta} \quad \rightarrow \text{Rupture pour } D = 1$$

- Formulation continue : $D(t) = \frac{\beta}{C^\beta} \int_0^t \langle \varepsilon(t) \rangle^{\beta-1} \langle \frac{d\varepsilon}{dt} \rangle dt$

avec : $\langle . \rangle =$ partie positive de ε et de $\dot{\varepsilon}$

CALCUL DES ENDOMMAGEMENTS : PASSAGE LABO → CHAUSSEE

- Dimensionnement routier: $\varepsilon_{adm} = \varepsilon_6 k_r k_c k_s k_\theta$
- Pour chaussées aéronautiques, formule identique conduisant à « amender » le coefficient A de la loi de Woehler :

$$N_r = \frac{C^\beta}{\varepsilon_{max}^\beta} \oplus C = 10^{\frac{6}{\beta}} \varepsilon_6$$

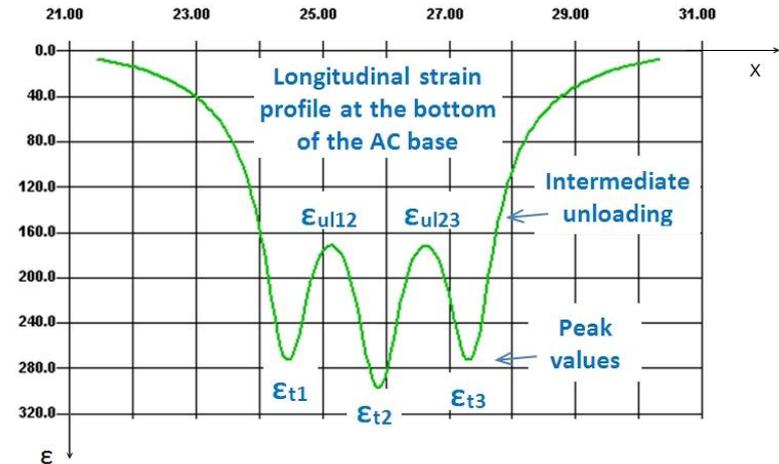
⇔ C est à remplacer par : $K = C k_r k_c k_s k_\theta$

$$D(t) = \frac{\beta}{K^\beta} \int_0^t \langle \varepsilon(t) \rangle^{\beta-1} \langle \frac{d\varepsilon}{dt} \rangle dt$$

- Attention: valeurs de k_c différentes du Guide Routier

CALCUL DES PROFILS TRANSVERSAUX D'ENDOMMAGEMENT

- Dommage créé par le passage d'un aéronef



- Calcul des profils longitudinaux de déformation élastique sous chargement
- Intégration continue de la loi de Wöhler-Miner continue : $t \rightarrow x$

$$\Delta D(y, z_k) = \frac{\beta}{K^\beta} \int_{-\infty}^{+\infty} \langle \varepsilon(x, y, z_k) \rangle^{\beta-1} \langle \frac{d\varepsilon}{dx}(x, y, z_k) \rangle dx$$

Exemple pour signal à 3 pics :

$$\Delta D_{tridem} = \frac{1}{K^\beta} (\varepsilon_{t1}^\beta - \varepsilon_{ul12}^\beta + \varepsilon_{t2}^\beta - \varepsilon_{ul23}^\beta + \varepsilon_{t3}^\beta)$$

- Calcul par intégration numérique discrète sur grille de points
- Le dommage ne dépend que de y et $z_k \rightarrow$ Profil transversal de dommage

CUMUL DES ENDOMMAGEMENTS

Cumul des endommagements pour :

- le nombre de mouvements de chaque aéronef
- l'ensemble des aéronefs du trafic
- en prenant en compte le phénomène de balayage

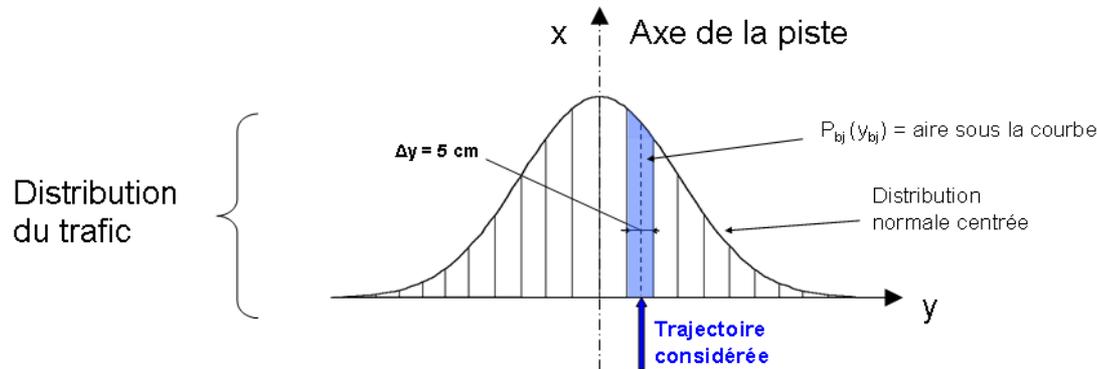
$$\begin{array}{l} 5+6=? \\ 5 \times ? = 20 \\ 12348-?=3 \end{array}$$

$$D_{bal,cumulé}(y_j, z_k) = \sum_{aéronef} N_{aéronef} \Delta D_{bal,aéronef}(y_j, z_k)$$

D = 0 : chaussée neuve

D = 1 (ou 100%) : chaussée « entièrement » endommagée

PRISE EN COMPTE DU BALAYAGE: REDISTRIBUTION DU DOMMAGE SUR LA LARGEUR DE CHAUSSÉE



$\Delta D(y, z_k)$ = profil transversal de dommage pour passage centré d'aéronef

→ $\Delta D(y - y_d, z_k)$ = profil transversal de dommage pour passage décentré de y_d

$p(y_d) dy_d$ = probabilité d'un décentrement compris entre $y_d - \frac{dy_d}{2}$ et $y_d + \frac{dy_d}{2}$ avec
 $p(y_d)$ = densité de probabilité = Gaussienne

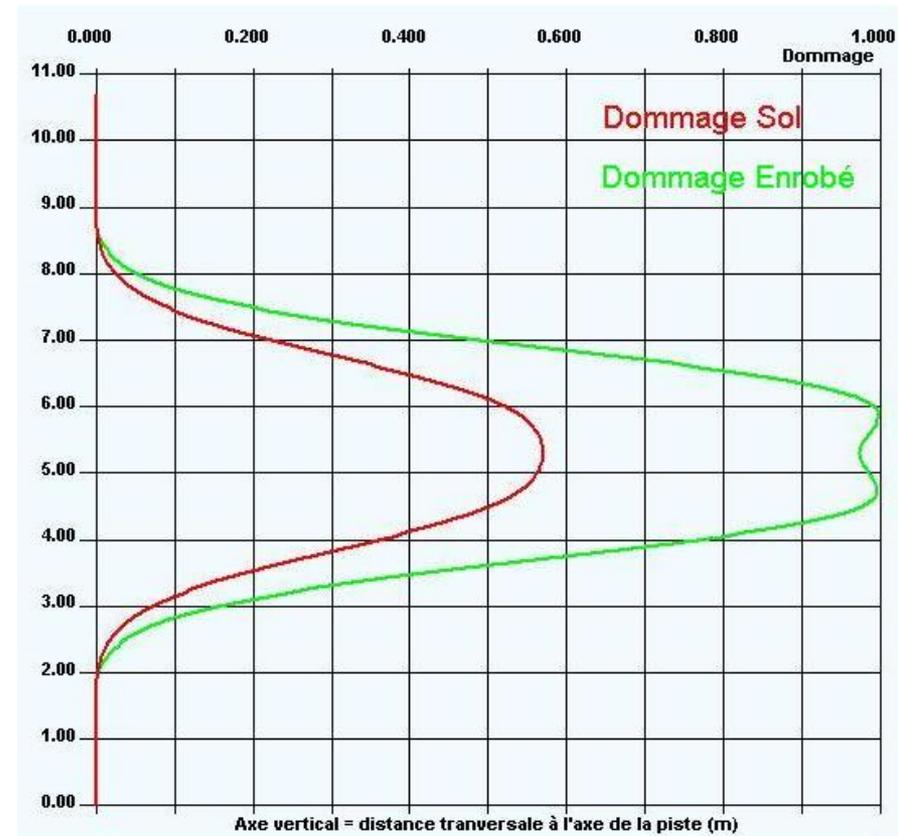
Dommage créé en y pour l'ensemble des valeurs de décentrement (principe de Miner) :

$$\Delta D_{bal}(y, z_k) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta D(y - y_d, z_k) p(y_d) dy_d$$

Intégration numérique à partir de la discrétisation transversale associée à la grille de calcul

PROFILS D'ENDOMMAGEMENT

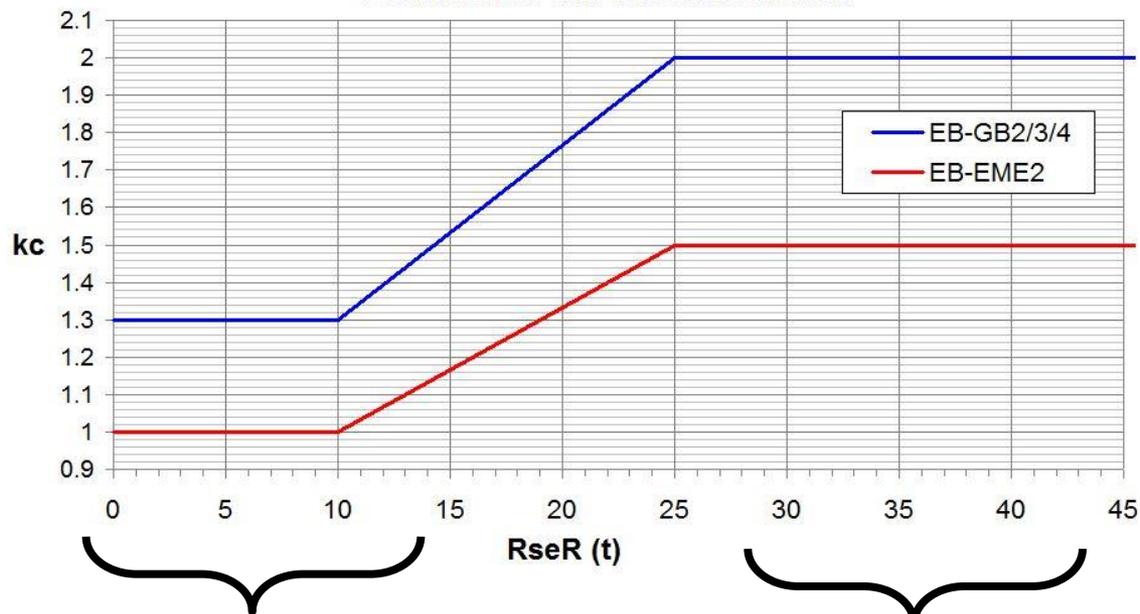
- Optimisation de la structure de chaussée par ajustement des épaisseurs des couches
- Calculs itératifs avec comme critères :
 - $D_{max}=1$
 - Epaisseur de couche de base suffisante
 - Contraintes technologiques de mise en œuvre (GAN)
- Vérification spécifique pour les aires de stationnement (calcul supplémentaire)



Domage avec balayage transversal

COEFFICIENT DE CALAGE

Evolution du coefficient k_c



Faibles trafics équivalents aux sollicitations « routières »



Forts trafics : Données expérimentales PEP, HTPT



COEFFICIENT DE CALAGE

Le coefficient de calage k_c est fonction de l'agressivité du trafic, caractérisée par la R_{seR} .

Mise en œuvre du processus itératif suivant :

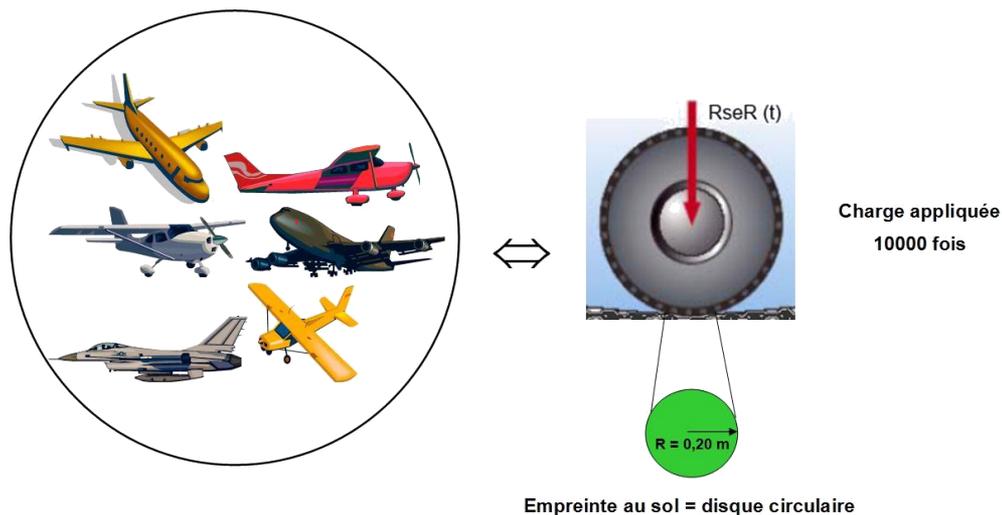
- 1- un premier calcul d'endommagement est effectué pour une valeur de k_c (valeur initiale égale à 1,3 par exemple)
- 2- la valeur de R_{seR} correspondant à cet endommagement est calculée (voir plus loin)
- 3- la valeur de k_c actualisée est déterminée à l'aide de la relation $k_c=f(R_{seR})$ (figure ci-avant).

Ces étapes sont réitérées jusqu'à la convergence du paramètre k_c (algorithme du point fixe).

CALCUL DE RSEr

Pour une structure donnée, soit D la valeur de dommage cumulé pour le critère de fatigue des enrobés (pour l'ensemble du trafic).

Pour cette même structure, on recherche la charge (en t) appliquée sur une roue simple 10 000 fois pour laquelle le dommage est égal à D .



Cette charge ainsi déterminée est égale à la $RseR$.

VALEURS DE RSEr

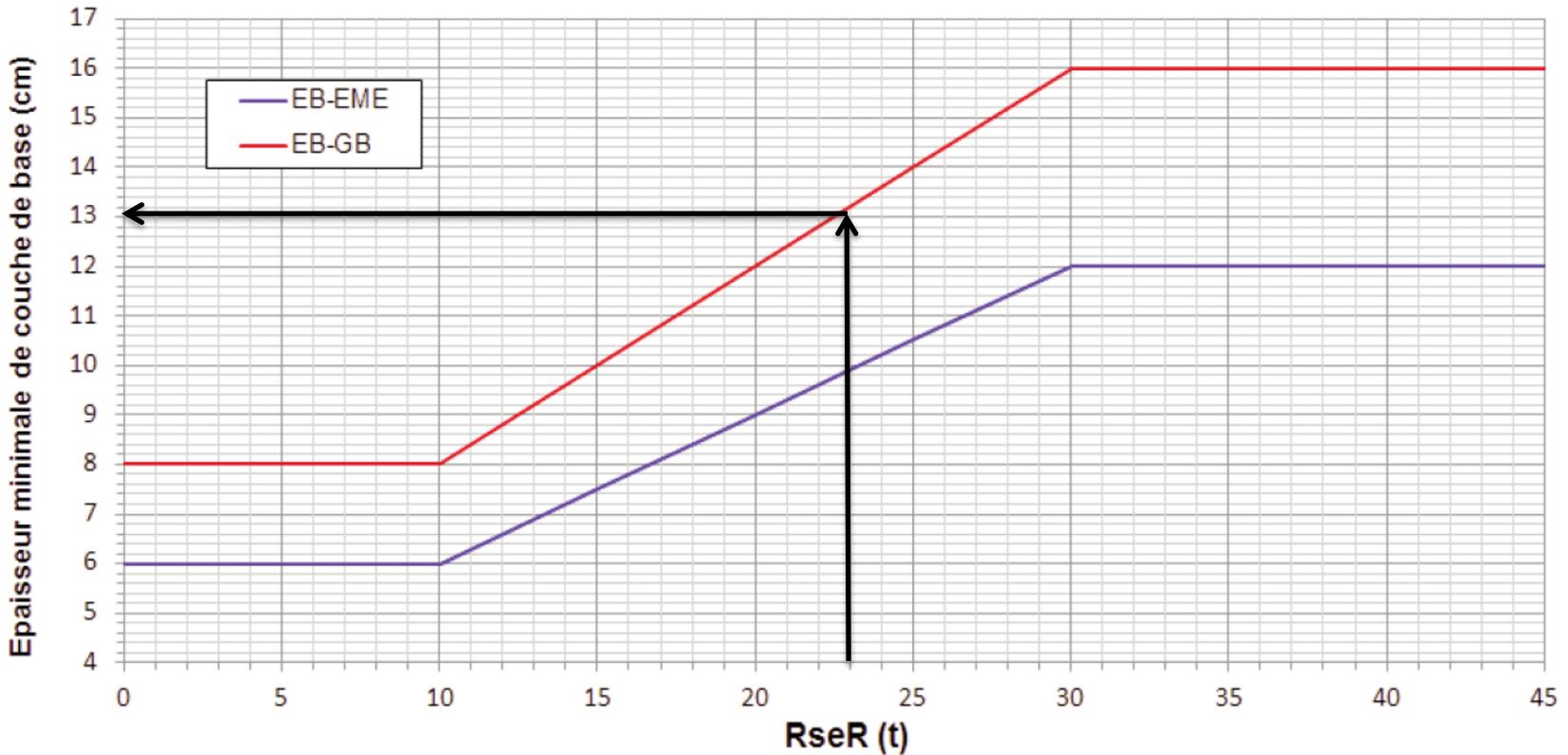
Exemples de RseR pour quelques trafics :

	Mvts /j pendant 10 ans	RseR (t)
ATR 72-101	1	4
	25	9
	50	10,9
A321-200	1	15,3
	25	51,4
	50	66,7
A300-600R	1	11,2
	25	40,1
	50	54
A340-500	1	16,1
	25	70,7
	50	95,1

EPAISSEUR DE COUCHE DE BASE

Relations basées sur les pratiques actuelles

Epaisseur de couche de base - Valeurs indicatives



VÉRIFICATION SPÉCIFIQUE STATIQUE

Calcul complémentaire qui s'applique aux **aires de stationnement et aires d'attente**

→ Prise en compte des effets des chargements statiques sur ces zones.

Dégradation fictive des propriétés mécaniques des couches de matériaux liés de la structure :

- Module $E = 800 \text{ MPa}$
- Paramètre d'endommagement $K = 24\ 000$

Le dommage au niveau du sol doit rester < 1

CONCLUSION

Publication du guide technique :

- 1^{ère} édition de Janvier 2014 (français)
- 2^{ème} édition d'Octobre 2016 disponible prochainement (français et anglais)

Téléchargeable gratuitement :

http://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/publications/documents/dim_chau_souple



Mise en application avec le module **Alizé-Aéronautique**



Merci de votre attention

Damien MOUNIER
DGAC/STAC

damien.mounier@aviation-civile.gouv.fr

Jean-Michel PIAU
IFSTTAR/MAST

jean-michel.piau@ifsttar.fr

