

Aéroport international de Genève

Sortie rapide Charlie 2

Dimensionnement

RAPPORT FINAL

N. Bueche

Janvier 2013

ENAC – Faculté de l'environnement naturel,
architectural et construit
Laboratoire des voies de circulation



TABLE DES MATIERES

1	INTRODUCTION	5
1.1	CONTEXTE	5
1.2	DÉMARCHE DE L'ÉTUDE	5
2	DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES	7
2.1	CHOIX DES MÉTHODES	7
2.2	DONNÉES DE BASE ET HYPOTHÈSES DE CALCUL	8
2.2.1	DURÉE DE SERVICE DE LA CHAUSSÉE	8
2.2.2	TRAFIC	8
2.2.3	PORTANCE DU SOL SUPPORT	13
2.2.4	COMPOSITION DE LA CHAUSSÉE ET TYPE DE MATÉRIAUX	14
2.3	DIMENSIONNEMENT SELON LA MÉTHODE OACI (MÉTHODE FRANÇAISE)	14
2.3.1	DONNÉES D'ENTRÉE ET HYPOTHÈSES	15
2.3.2	CHAUSSEE RIGIDE	16
2.3.2.1	Effet de la durée de service de la chaussée	18
2.3.2.2	Effet de l'épaisseur de grave traitée	19
2.3.3	CHAUSSEE SOUPLE	20
2.3.3.1	Effet de la durée de service de la chaussée	22
2.3.3.2	Effet de l'épaisseur de grave traitée	23
2.4	DIMENSIONNEMENT SELON UNE MÉTHODE RATIONNELLE (MÉTHODE MULTICOUCHE)	24
2.4.1	BRÈVE DESCRIPTION DE LA MÉTHODE	24
2.4.2	DONNÉES D'ENTRÉE ET HYPOTHÈSES	25
2.4.3	CHAUSSEE RIGIDE	29
2.4.3.1	Utilisation de l'Airbus A330-300 au lieu du Boeing B777-300-ER (catégorie E)	32
2.4.3.2	Effet de la durée de service de la chaussée	34
2.4.3.3	Effet du balayage	35
2.4.3.4	Qualité du béton	36
2.4.3.5	Variante avec deux couches de béton	37
2.4.3.6	Effet des conditions de collage	38
2.4.3.7	Effet de l'épaisseur de grave traitée aux liants hydrauliques	40
2.4.4	CHAUSSEE SOUPLE	41
2.4.4.1	Calcul d'une variante avec AC T	44
2.4.4.2	Utilisation du A330-300 au lieu du B777-300-ER (catégorie E)	44
2.4.4.3	Effet de la durée de service de la chaussée	46
2.4.4.4	Effet du balayage	46
2.4.4.5	Effet de l'épaisseur de grave traitée aux liants hydrauliques	47
2.4.4.6	Effet de la vitesse des avions	48
2.5	SÉLECTION DE VARIANTES DE CHAUSSEES	50
2.5.1	CHAUSSEE RIGIDE	50
2.5.2	CHAUSSEE SOUPLE	51

2.6	VÉRIFICATION AU GEL	52
2.7	DÉTERMINATION DU PCN	53
2.7.1	PCN CHAUSSÉE RIGIDE	54
2.7.2	PCN CHAUSSÉE SOUPLE	55
3	<u>CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS</u>	57
4	<u>REFERENCES</u>	60
5	<u>ANNEXES</u>	61
5.1	CODE DE RÉFÉRENCE D'AÉRODROME	61
5.2	CALCUL DÉTAILLÉ DU TRAFIC SUR LE TAXIWAY C2	62

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

Avec l'augmentation continue du trafic de l'Aéroport International de Genève (AIG), il devient indispensable de proposer des solutions permettant de diminuer la durée d'occupation de la piste notamment lors de l'atterrissage des différents appareils. Lors de l'atterrissage d'un avion en piste 05, ce dernier doit actuellement rouler jusqu'au taxiway (TWY) B afin d'évacuer la piste, rallongeant ainsi de manière non nécessaire le temps d'occupation de cette piste. Par ailleurs, le TWY C actuel ne permet pas de sortir « rapidement » de la piste, ceci car les avions doivent fortement ralentir afin de l'emprunter. C'est dans le but d'apporter une solution à cette problématique que la sortie rapide Charlie 2 a été imaginée par l'aéroport, permettant aux avions de sortir avant le taxiway B.

La construction de cette nouvelle sortie rapide au point kilométrique Pk 1'920 m. a pour objectif principal d'augmenter la sécurité des atterrissages en piste 05 tout en respectant les normes de l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI). Par une évacuation plus rapide des avions, la création de la sortie rapide Charlie 2 permet par la même occasion d'augmenter le nombre de mouvements sur la piste en 05. Il n'est initialement pas prévu d'exploiter la nouvelle sortie Charlie 2 pour les départs en piste 23, mais cela ne peut être exclu totalement dans le cadre des mouvements futurs. Ce nouveau taxiway, appelé Charlie 2 (Rapid Exit Taxiway Charlie 2) sera également dénommé dans la suite du présent rapport taxiway C2 ou TWY C2.

1.2 Démarche de l'étude

C'est dans le cadre de la planification de la construction du taxiway C2 que le Laboratoire des Voies de Circulation (LAVOC) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) a été contacté par le bureau d'ingénieurs SOLFOR SA (Meyrin). L'objectif principal de l'étude consiste à apporter son expertise dans le domaine du dimensionnement des chaussées aéroportuaires et du comportement mécanique des structures.

Les travaux sont réalisés selon la séquence suivante, également suivie lors de la rédaction du présent rapport.

1. Recueil et analyse des données de base

Cette première partie concerne tout particulièrement les hypothèses relatives à la durée de service de la chaussée, au trafic, à la portance du sol support et à la composition de la chaussée (matériaux et caractéristiques intrinsèques). Pour cela, les informations fournies par l'aéroport seront analysées de manière détaillée et complétées par les discussions lors de séances de travail ainsi que par des éléments issus de littérature spécialisée.

2. Dimensionnement de chaussées souples et rigides

Le dimensionnement est focalisé sur la structure mécaniquement nécessaire afin de supporter le trafic au cours de la durée de mise en service de la chaussée. Des considérations relatives au gel seront fournies dans une ultime phase. Dans un premier temps, un calcul est réalisé selon la méthode française issue des recommandations de l'OACI. Cette méthode et son applicabilité aux sollicitations et aux matériaux de

construction actuels étant passablement discutés, un second calcul sera proposé selon une méthode de calcul multicouche (méthode rationnelle).

3. Calcul du PCN

Un choix de chaussées rigides et souples sera proposé sur la base des calculs de dimensionnement. Pour les chaussées sélectionnées un calcul du PCN (Pavement Classification Number) sera finalement réalisé, ceci afin d'évaluer l'admissibilité des différents appareils pour les structures sélectionnées.

Nous pouvons relever que les calculs de dimensionnement sont menés pour des matériaux de construction conformes aux exigences issues de la normalisation et de la littérature. Le choix définitif des matériaux de construction doit être réalisé ultérieurement et un soin particulier apporté aux exigences et caractéristiques de ces matériaux. De même, les aspects constructifs ne sont pas détaillés dans le présent rapport, bien que quelques considérations non exhaustives soient fournies.

2 DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES

L'objectif principal de l'étude consiste à effectuer un dimensionnement et analyse de sensibilité de la chaussée mécaniquement nécessaire afin de supporter le trafic prévu au cours de la durée de service du Taxiway C2. Les calculs de dimensionnement seront également complétés par :

- Différentes analyses de sensibilité mettant en évidence l'influence des principaux paramètres sur l'épaisseur de chaussée mécaniquement nécessaires,
- des considérations relatives au gel (dimensionnement au gel),
- un calcul du PCN pour les chaussées préalablement sélectionnées,
- quelques considérations constructives.

Nous pouvons relever qu'une première estimation de l'épaisseur de chaussée nécessaire a été réalisée de manière empirique [3], sur la base des hypothèses de trafic 2025 (voir chapitre 2.2.2) et de l'avion Boeing B777-300-ER (catégorie E) seul. Les épaisseurs suivantes ont été obtenues (durée de service de 20 ans) :

- Chaussée souple : Pour une portance moyenne (CBR=10), l'épaisseur équivalente de chaussée nécessaire proposée est de 37 inches (94 cm).
- Chaussée rigide : Pour une portance moyenne ($k=300$ pci ou 81.42 MN/m³), l'épaisseur de la dalle de béton nécessaire proposée est de 40 cm (45 cm proposés par sécurité).

Les hypothèses de trafic pour ce pré-dimensionnement considèrent un nombre annuel de 25'000 mouvements de l'avion B777-300-ER. Ceci semble cependant quelque peu élevé, comme il le sera détaillé par la suite.

2.1 Choix des méthodes

Différentes méthodes de calcul existent pour les chaussées d'aéroports. Le manuel de conception de l'OACI [4] mentionne notamment les méthodes canadienne, française, américaine ainsi que la méthode du Royaume-Uni. Nous proposons d'appliquer dans un premier temps la méthode française (OACI) de dimensionnement des chaussées d'aéroports. Cette méthode, détaillée dans [8, 9] sera brièvement décrite avant sa mise en application.

La méthode OACI de dimensionnement des superstructures d'aéroports présente certaines limites pour le cas de chaussées actuelles. Ces limites concernent notamment le recours à des abaques de dimensionnement et simplifications établies il y a plus de 30 ans. Les abaques ne sont donc pas nécessairement adaptés aux sollicitations actuelles en termes de charge et de configuration d'atterrisseurs. Une autre limitation se situe au niveau des matériaux de construction et de la prise en compte des conditions d'interface entre ces matériaux. Ces différentes limitations de la méthode OACI (méthode française) ont notamment été discutées dans [10].

Sur la base de ce constat, il a été décidé de compléter le premier calcul réalisé selon les recommandations de l'OACI par un calcul selon une méthode multicouche (ou rationnelle) prenant en compte les développements récents en terme de dimensionnement des chaussées aéroportuaires et autres surfaces à fortes sollicitations. De nombreuses méthodes multicouches ou par éléments finis sont actuellement disponibles afin de réaliser un calcul de chaussées aéronautiques. Bien que non reconnues (pour le moment) au niveau de l'OACI, ces méthodes

permettent de réaliser un dimensionnement optimisé tout en proposant des analyses de sensibilité.

2.2 Données de base et hypothèses de calcul

2.2.1 *Durée de service de la chaussée*

Nous considérons les durées de service suivantes pour les calculs de dimensionnement :

- Chaussées rigides : 50 ans
- Chaussées souples : 20 ans

Ces durées de service sont des valeurs habituellement recommandées par les méthodes de dimensionnement. Une analyse de sensibilité avec différentes durées de service sera par ailleurs proposée. La méthode de dimensionnement de l'OACI recommande une durée de service de 10 ans dans le cas de chaussées souples, et 10 à 20 ans dans le cas de chaussées rigides (aéroports à fort trafic) [8, 9].

2.2.2 *Trafic*

Les données de trafic concernent le type d'avion et ses caractéristiques associées, le nombre de mouvements des différents avions sur l'aéroport ainsi que la circulation des appareils dans l'enceinte de l'aéroport. Nous décrivons dans un premier temps les différents éléments à disposition, avant de proposer des scénarios de trafic en vue des calculs de dimensionnement. Ces données de trafic ainsi que les hypothèses principales sont discutées avec le maître d'ouvrage lors de deux séances de suivi.

Par convention, nous considérons : 1 mouvement = 1 atterrissage ou décollage

Circulation des avions

La création du taxiway C2 a pour objectif principal de proposer une sortie rapide aux avions atterrissant en piste 05 afin de leur éviter de rouler jusqu'à la TWY B et ainsi libérer plus rapidement la piste. Les avions évacuant plus rapidement la piste, la capacité de la piste 05 est par la même occasion augmentée. Il n'est pas prévu d'exploiter prioritairement le TWY C2 pour la piste 23, mais son utilisation serait possible dans le cas des départs. Nous considérons donc une utilisation du taxiway C2 par 50% des avions partant en piste 23.

La modélisation ARCPort [7] définit les hypothèses suivantes pour les sorties d'avions :

- Avions de lignes et charter (L/C) : 50% des avions empruntent la sortie C2, 12% la sortie B et 38% la sortie D.
- Aviation générale (AG) Sud : 70% des avions empruntent la sortie C2 et 30% la sortie D.
- Aviation générale (AG) Nord : Les avions empruntent les sorties Y (60%) et Z (40%).

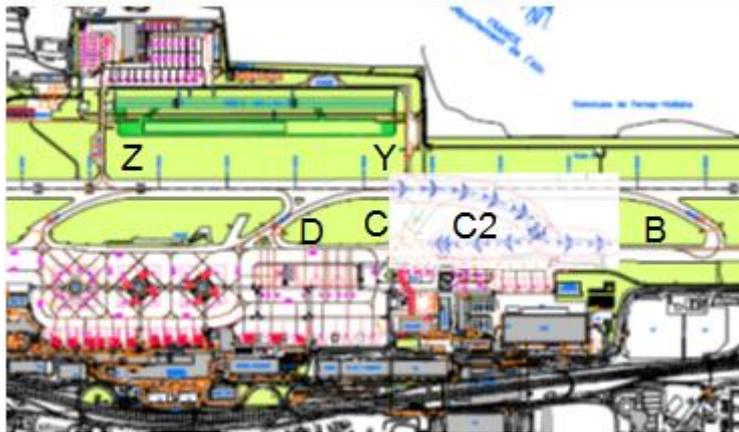


Figure 1 : Schéma sorties pour modélisation ARCPort [7]

Concernant le stationnement des avions :

- Avions de catégorie C : stationnement dans le P48.
- Avions de catégorie E et F : stationnement dans l'aérogare.

Trafic actuel

L'analyse de la journée du 21.02.2012 indique le trafic suivant [7] :

- Nombre total de mouvements (arrivées et départs) : 547 mvt/j. En considérant des mouvements sur une durée de 18 h/j, nous obtenons environ 31 mvt/h.
- Trafic de ligne/charter de 418 mvt/j (76% du total des mouvements), soit 209 départs et 209 arrivées.
- Aviation générale présente un trafic de 129 mvt/j (68 arrivée, 61 départs), ce qui correspond à 24% du nombre total de mouvements.

Trafic prévu en 2025

Le trafic prévu en 2025 est de 220'000 mouvements annuels (avions commerciaux et non-commerciaux) [3], ce qui correspond à 603 mvt/j. Ces mouvements concernent à la fois des atterrissages et décollages pour lesquels nous supposons une répartition 50%-50%. Le nombre de mouvements annuels sur le taxiway C2 est finalement calculé sur la base du nombre total de mouvements et en appliquant les hypothèses suivantes (calculs détaillés en Annexe 5.2) :

- 50% des mouvements sont effectués selon la piste 05, et 50% selon la piste 23.
- Pour chaque piste, 50% des mouvements sont des atterrissages et 50% des décollages.
- Piste 05 : 60% des atterrissages (L/C) empruntent la sortie C2 (+10% de marge par rapport à la simulation ARCPort de circulation des avions). Ceci correspond également aux hypothèses émises lors de la première séance de projet.
- Piste 05 : Les décollages n'empruntent pas la sortie C2.
- Piste 23 : le taxiway C2 est exploité pour les décollages (hypothèse 50%).
- Piste 23 : Le taxiway C2 n'est pas utilisé pour les atterrissages.

Pour un certain volume de trafic, le Tableau 1 indique la proportion des différents types d'avions (catégories OACI) ainsi que l'avion représentatif pour chaque catégorie.

Tableau 1 : Prévisions de trafic 2025 sur TWY C2

Catégorie OACI	Avion type	Proportion [%]	TWY C2 [mvt/an]
A	NA	11	6'655
B	Saab 2000	12	7'260
C	A320	70	42'350
D	B767	1	605
E	A330-300 / B777-300-ER	6	3'630

Nous pouvons encore relever :

- En raison de leur charge très faible ainsi que du nombre de mouvements réduits, la prise en compte des avions de catégorie A n'est pas nécessaire. Dans la suite du travail, seuls les appareils des catégories B à E seront donc considérés.
- Dans le cas de référence calculé par la suite, le Boeing B777-300-ER a été choisi pour la catégorie E, ceci car il est davantage agressif pour la chaussée que l'Airbus A330-300. Certains calculs seront cependant proposés avec le choix du A330-300 à la place du B777-300-ER.

Prévisions de trafic pour 2060

On suppose une saturation des pistes à l'horizon 2060. Cela signifie dans le cas extrême un total de 50 mvt/h sur une durée de 18 h/j, ce qui correspond à 900 mvt/j (328'500 mvt/an). La circulation des avions au sein de l'aéroport est considérée analogue à 2025. Considérant la répartition du trafic entre les catégories d'avions, nous supposons une proportion de 10% d'avions de catégorie E (au lieu de 6% en 2025), et par conséquent une diminution des avions de catégorie A (7% au lieu de 11% selon scénario 2025). Cette hypothèse semble conforme à l'évolution prévue pour l'AIG. Le trafic sur le taxiway C2 prévu en 2060 est reporté dans le Tableau 2 (détails en Annexe 5.2).

Tableau 2 : Prévisions de trafic 2060 sur TWY C2

Catégorie OACI	Avion type	Proportion [%]	TWY C2 [mvt/an]
B	Saab 2000	12	10'841
C	A320	70	63'236
D	B767	1	903
E	A330-300 / B777-30-ER	10	9'034

Nous pouvons relever que dans le cas d'hypothèses de trafic futur, il aurait été possible d'intégrer des avions de type B787 (première livraison en septembre 2011) et A350 (mise en service prévue en 2014).

Analyse données de trafic TP Master N. Bueche [10]

Le travail [10] contient des données de trafic fournies par le service statistiques de l'aéroport de Genève (journée moyenne d'été et journée chargée d'hiver) pour les années 2005-2006. Sur la base de ces données, les avions déterminants dans le cadre du dimensionnement peuvent être identifiés. Les résultats du dimensionnement étant plus sensibles aux variations de charges (et atterrisseurs) qu'au nombre de mouvements, les avions identifiés comme déterminants lors de cette étude sont les suivants :

- Airbus A300-600
- Airbus A310
- Airbus A330-200
- Airbus A340-300

- Boeing B767-200
- Boeing B767-300
- Boeing B777-200

Nous pouvons relever que bon nombre des avions ci-dessus sont considérés dans les hypothèses de trafic 2025 et 2060, ce qui corrobore le choix des appareils pour les scénarios de trafic détaillés précédemment. Relevons encore que les avions de type A310 ont aujourd’hui tendance à disparaître, de même que les avions de la famille A340 dont la production a été arrêtée en 2011. Le nombre d’Airbus A330 est par contre en constante augmentation.

Choix des scénarios de trafic pour le dimensionnement

Sur la base des considérations précédentes, deux scénarios seront calculés selon le taux de croissance annuel du trafic ; la réalité se trouvant certainement entre ces deux hypothèses de trafic. Les statistiques 2011 de l’aéroport, indiquent un total de 134'766 mvt/an pour les vols ligne et charter. Cela représente une moyenne de 370 mvt/j. Les hypothèses suivantes sont faites :

- Année de construction : 2012
- Trafic 2012 : 140'000 mvt/an (4% de plus que le trafic 2011)
- Nombre maximal théorique de mouvements (saturation de la piste) : 328'500 mvt/an (900 mvt/j)
- Taux de croissance annuel : 2% (hypothèse basse) / 4% (hypothèse haute)

Le taux de croissance pour l’hypothèse basse est défini en analysant la croissance annuelle du trafic commercial entre les années 2000 et 2011. La croissance annuelle moyenne est de 1.9% ce qui constitue l’hypothèse basse. L’hypothèse haute (4%) est définie en accord avec les gestionnaires de l’aéroport.

La méthode de dimensionnement de l’OACI n’intègre pas la notion de taux de croissance ; cette méthode recourant à un trafic exprimé en nombre de mouvement par unité de temps (par ex. 10 ans). Pour cela, il est décidé de réaliser les calculs en considérant le nombre total de mouvements sur la durée de service de la chaussée. Comme expliqué précédemment, nous supposons pour le cas de référence une durée de service de 20 ans pour les chaussées souples et 50 ans pour les chaussées rigides. Le trafic calculé au cours de la durée de service de la chaussée est reporté dans le Tableau 3 pour les deux hypothèses de trafic. L’année à laquelle la piste arrive à saturation en fonction de la croissance prévue est également indiquée. Nous pouvons relever que l’hypothèse basse correspond à une moyenne de 494 mvt/j sur 20 ans et 659 mvt/j pour une durée de service de 50 ans. L’hypothèse haute correspond quant à elle à 613 mvt/j sur 20 ans et 785 mvt/j sur 50 ans.

Tableau 3 : Calcul du trafic selon la durée de dimensionnement et l'hypothèse

	Mvt ₂₀₁₂	Mvt ₂₀₃₂	Mvt ₂₀₆₂	Année saturation	Trafic cumulé sur la durée de service	
					Mvt (2012-2032)	Mvt (2012-2062)
Hypothèse basse (2%)	140'000	208'033	328'500	2056	3'609'664	12'029'872
Hypothèse haute (4%)	140'000	306'757	328'500	2034	4'475'688	14'321'216

Après avoir déterminé le nombre de mouvements annuels pour les deux hypothèses de trafic, nous pouvons maintenant calculer le nombre de mouvements de chaque famille d'avion sollicitant le TWY C2. Pour les deux hypothèses de trafic (basse / haute), deux scénarios de répartition des avions de la catégorie E sont proposés (avions les plus contraignants) : 6% ou 10% d'avions cat. E. Nous obtenons finalement les quatre situations de trafic détaillées dans le Tableau 4 et le Tableau 5 pour une durée de service de 20 ans, respectivement 50 ans.

Tableau 4 : Nombre de mouvements sur TWY C2 pour une durée de service de 20 ans

Scénario	Trafic total (mvt)	Nbre mvt sur la durée de service par catégorie OACI d'avion			
		B	C	D	E
Hypothèse basse (2%)-6% cat.E	3'609'664	119'119	694'860	9'927	59'559
Hypothèse basse (2%)-10% cat.E		119'119	694'860	9'927	99'266
Hypothèse haute (4%)-6% cat.E	4'475'688	147'698	861'570	12'308	73'849
Hypothèse haute (4%)-10% cat.E		147'698	861'570	12'308	123'081

Tableau 5 : Nombre de mouvements sur TWY C2 pour une durée de service de 50 ans

Scénario	Trafic total (mvt)	Nbre mvt sur la durée de service par catégorie OACI d'avion			
		B	C	D	E
Hypothèse basse (2%)-6% cat.E	12'029'872	396'986	2'315'750	33'082	198'493
Hypothèse basse (2%)-10% cat.E		396'986	2'315'750	33'082	330'821
Hypothèse haute (4%)-6% cat.E	14'321'216	472'600	2'756'834	39'383	236'300
Hypothèse haute (4%)-10% cat.E		472'600	2'756'834	39'383	393'833

Les caractéristiques des avions déterminants, utilisées pour les calculs de dimensionnement, sont indiquées dans le Tableau 6. Dans le cadre du dimensionnement, la masse maximale au roulage sera utilisée (masse la plus élevée) bien qu'à l'atterrissage les avions ont habituellement une charge sensiblement plus faible. Cela permet par ailleurs de positionner l'étude du côté de la sécurité. Pour les avions de catégorie E, nous choisissons le B777-300-ER comme appareil de référence, cet appareil sollicitant davantage la chaussée que l'Airbus A330-300.

Tableau 6 : Caractéristiques des avions utilisés pour le dimensionnement

Catégorie OACI	Avion	Atterrisseurs (tête-princ.-princ.)	Masse maxi. Au décollage [kg]	Masse à vide opérationnelle [kg]	Masse maxi au roulage [kg]
B	Saab 2000	2-2-2	22'999	1'800	23'200
C	A320-200	2-2-2	77'000	40'529	77'400
D	B767-200	2-4-4	163'000	82'100	163'750
E	B777-300-ER	2-6-6	351'533	167'829	352'441
E	A330-300	2-4-4	233'000	119'830	233'900

2.2.3 *Portance du sol support*

Dans le cadre d'études préliminaires, des sondages géotechniques ont été réalisés dans la zone concernée par le taxiway C2. Nous pouvons mettre en évidence les résultats suivants :

- Puits n°6 dans le terrain herbeux entre la piste principale et la voie ALPHA côté Versoix, réalisé par GADZ (Géotechnique Appliquées Deriaz S.A.), en juin 2006 [5] : Le sondage relève un substratum morainique à une profondeur de 2.30 m, dur à très dur, contenant de petites fissures de retrait. Ce substratum est surmonté par des argiles de retrait préconsolidées (dures à très dures) et des remblais (environ 1 m d'épaisseur). Le cheminement préférentiel de l'eau d'infiltration au sein des fissures de retrait des argiles est également mis en évidence.
- Réalisation de 6 sondages à la pelle mécanique dans la zone de la future sortie C2 (décembre 2011) [6]. Ces sondages mettent en évidence une composition faite de terre végétale en surface (environ 40 à 45 cm selon les sondages), surmontant un remblai graveleux (15 à 80 cm environ selon les sondages) et un terrain argileux compacte d'environ 20 à 100 cm d'épaisseur pour trois sondages. Les trois autres sondages indiquent une composition faite de terre végétale, surmontant de la glaise compacte ou de la grave. Les mesures de portance (sonde Farnell) indiquent un coefficient CBR situé entre 8% et >13%, voire >15% pour certains cas. Les différents sondages n'ont pas mis en évidence de venue d'eau, mais la sensibilité à l'eau du terrain est mise en évidence. Le rapport [6] recommande de considérer pour les calculs de dimensionnement une classe de portance S2 selon la norme SN 640 324.

La réglementation OACI (chapitre 1.1.3.2 de [4]) et la normalisation SN 640 324 (classe de portance S2) reportent les valeurs limites suivantes pour une portance moyenne du sol support :

- Chaussées souples : Coefficient CBR situé entre 8% et 13% selon OACI, CBR >6% ... 12% ($ME_1=15 \dots 30 \text{ MN/m}^2$) selon normalisation SN (S2).
- Chaussées rigides : Coefficient k situé entre 60 et 120 MN/m^3 selon l'OACI et entre 30 et 60 MN/m^3 selon la normalisation SN, pour un sol de portance moyenne.

Sur la base des considérations ci-dessus, le choix suivant est fait concernant la portance du sol support (la réaction du sol support dépend du massif le surplombant) :

- Chaussées souples : Nous considérons une valeur CBR=8%, relativement conservatrice par rapport aux résultats des sondages et à la réglementation (OACI et SN).
- Chaussées rigides : Nous considérons pour les calculs de dimensionnement une valeur $K_0=80 \text{ MN/m}^3$.

Nous pouvons finalement mentionner que dans le cadre de premiers calculs [3], des valeurs CBR=10% et $k=80 \text{ MN/m}^3$ ont été considérées. La valeur CBR semble cependant relativement

optimiste en raison des conditions hydrométriques. La sensibilité à l'eau du sol support nécessite en effet de travailler dans des conditions météorologiques favorables.

2.2.4 Composition de la chaussée et type de matériaux

De manière générale, l'infrastructure est composée d'une couche de roulement et couche de base en enrobé bitumineux ou béton de ciment, au-dessous de laquelle on trouvera une couche de grave stabilisée et le sol support.

L'objectif du dimensionnement consiste à déterminer l'épaisseur de béton, respectivement d'enrobé, mécaniquement nécessaire afin de supporter les sollicitations prévues. Le choix des matériaux pour la couche de roulement et de liaison est fait selon le type de chaussée (souple/rigide). Les caractéristiques et hypothèses nécessaires aux calculs de dimensionnement sont indiquées dans la première partie du chapitre relatif à chacune des méthodes de calcul utilisée. On pourra également consulter [8, 9, 11] pour davantage de détails.

Les éléments suivants sont communs aux différentes méthodes de calcul.

- Chaussées rigides :
 - Une seule couche de béton (dalles préfabriquées)
 - Dalles goujonnées
- Chaussées souples :
 - Epaisseur d'enrobé séparée en différentes couches selon les dispositions constructives en vigueur (normalisation)
 - Décomposition de l'épaisseur d'enrobé en deux types de matériaux, soit un EME2 en couche de base et un enrobé bitumineux standard en couche de roulement
- Une couche de grave stabilisée est utilisée, ce qui présente l'avantage d'un compactage rapide avec une durée d'intervention réduite. Il existe cependant le risque de remontée de fissures par retrait thermique. De la grave-bitume aurait également pu être proposée, ses caractéristiques mécaniques étant relativement proches de celles de la grave traitée aux liants hydrauliques.
- Les caractéristiques de portance du sol support sont discutées au chapitre 2.2.3.

2.3 Dimensionnement selon la méthode OACI (méthode française)

La méthode de dimensionnement que nous appelons « OACI » est la méthode française de dimensionnement des chaussées aéronautiques, telle que décrite dans le manuel de dimensionnement de l'OACI [4]. Cette méthode est détaillée dans les rapports [8, 9] établis par le Ministère des transports, la DGAC (Direction Générale de l'Aviation Civile), le SBA (Service des Bases Aériennes) et le STBA (Service Technique des Bases Aériennes).

Cette méthode empirique française est inspirée de la méthode américaine développée par l'United States Corps of Engineers. Elle s'appuie donc sur la méthode CBR (California Bearing Ratio) pour les chaussées souples et sur la méthode PCA (Portland Cement Association) pour les chaussées rigides.

Le principe de la méthode CBR consiste à supposer une rupture de la chaussée par excès de pression sur le sol support (poinçonnement). Le dimensionnement est donc effectué vis-à-vis de ce risque.

La méthode PCA suppose que les dalles de béton s'appuient sur un massif élastique de raideur K, l'épaisseur de la dalle étant définie de manière à ne pas excéder la contrainte maximale de traction par flexion du béton.

Cette méthode de dimensionnement nécessite généralement le recours à des abaques. Dans le cas présent, un logiciel spécifique est utilisé pour la réalisation des calculs (DCA). Nous pouvons finalement relever que cette méthode historique est passablement critiquée et ses limites ont été mises en évidence par de nombreux auteurs. C'est pourquoi un second calcul selon une méthode rationnelle sera proposé au chapitre 2.4.

2.3.1 Données d'entrée et hypothèses

Les données ci-après sont utilisées pour les calculs de dimensionnement selon la méthode française décrite par l'OACI.

Chaussées rigides :

- Contrainte admissible de traction par flexion : $f_{cbt}=5.6$ MPa
Nous pouvons mettre en évidence les éléments suivants concernant la contrainte admissible de traction par flexion du béton :
 - La méthode [8] recommande une valeur de 5.6 MPa.
 - La note de calcul [3] indique une résistance de 575 psi, soit 3.96 MPa.
 - L'hypothèse d'une contrainte admissible de 5.6 MPa est cohérente avec l'expérience acquise à l'aéroport de Bâle pour lequel une valeur de 6-8 MPa est considérée pour la résistance à la traction par flexion (information fournie par AIG).
 - Les normes SIA ne fournissent pas de valeur minimale pour la résistance à la traction par flexion. Pour le contrôle de l'aptitude au service, la norme SIA 162 :1993 recommande d'utiliser pour les bétons de qualité supérieure à B35/25 une résistance à la traction valant $f_{ct}=2.5$ MPa. Nous utilisons ensuite la relation $f_{cbt}=2.0 \cdot f_{ct}=5$ MPa afin de définir une valeur minimale.
- Les caractéristiques suivantes sont considérées pour le béton : $E=30'000$ MPa, $\nu=0.15$ [4]
- Coefficient de sécurité : 1.8 (joints munis de dispositifs de transfert de charge)

Chaussées souples :

- Coefficients d'équivalence :
 - béton bitumineux : 2
 - EME : 2.8 (=5.6/2)
 - AC T : 1.6 (=3.2/2)
 - Grave traitée : 1.5

Le coefficient d'équivalence pour les enrobés à module élevé (EME) ainsi que l'enrobé (AC T) n'est pas défini dans la méthode de dimensionnement de l'OACI. Nous le déterminons par analogie avec le Structural Number (SN) indiqué dans la norme de dimensionnement SN 640 324.

Grave stabilisée aux liants hydrauliques :

- Epaisseur : 20 cm dans le cas de référence. Cette épaisseur sera variée lors des analyses de sensibilité

Données relatives à la méthode de dimensionnement :

- Coefficient de pondération : $C_p=1.0$ (voie de circulation)
- Module de réaction corrigé pour les chaussées rigides : $K_c=104$ MN/m³

Le sol est caractérisé par son module de réaction K_0 (chapitre 2.2.3). Ce module est corrigé afin de tenir compte de la présence d'une couche de forme ou de fondation (i.e. grave stabilisée). L'incidence sur les calculs est relativement faible, mais la couche de

fondation joue un rôle essentiel dans le comportement mécanique (répartition des charges, continuité de l'appui des dalles, évite la remontée des fines, ...).

- Trafic inséré pour une période de 10 ans (et non pas trafic cumulé sur la durée de service)

Nous distinguons deux méthodes de dimensionnement :

- Dimensionnement forfaitaire : dimensionnement en fonction d'une charge normale de calcul que la chaussée doit supporter. Il ne prend en compte qu'un type d'avion.
- Dimensionnement optimisé : Dimensionnement prenant en compte tous les types d'avions pouvant produire un effet significatif sur la chaussée pour une durée de service déterminée. Dans le cadre d'un dimensionnement optimisé et selon les aires de trafic, on considérera différentes masses d'avions.

2.3.2 Chaussée rigide

La méthode de dimensionnement forfaitaire est suffisamment ajustée dans le cas de chaussées rigides. Un dimensionnement forfaitaire est donc réalisé pour chaque avion déterminant, le choix final étant guidé par l'avion nécessitant l'épaisseur la plus importante de béton. Pour rappel, la durée de service de dimensionnement est de 50 ans dans le cas de chaussées rigides ; le trafic étant indiqué dans le Tableau 5.

Les résultats détaillés du dimensionnement forfaitaire sont indiqués dans le Tableau 7 au Tableau 10 pour les différents scénarios de trafic. La nomenclature suivante est utilisée :

P	Charge réelle effectivement appliquée par un atterrisseur d'avion [t.]
P'	Charge réelle pondérée en fonction de l'aire de trafic [t.]
	$P'=P/C_p$
C_p	Coefficient de pondération en fonction de l'aire de trafic
N	Nombre réel de mouvements par unité de temps (10 ans)
N_0	Nombre de mouvements normalisés (10 mvt/j pendant 10 ans i.e. 36'500 mvt)
P_0	Charge de calcul ou masse admissible de l'avion [t.]
	$P_0=P'/(1.2-0.2\log(n))$
	Avec n = nombre réels de mouvements/jour pendant 10 ans
E_p	Epaisseur de la dalle de béton [cm]

Tableau 7 : Dimensionnement chaussée rigide selon méthode OACI – Hypothèse basse (2%)-6% cat. E

Avion (Cat.)	P	P'	N	N/N ₀	P'/P ₀	P ₀	E _p [cm]
Saab 2000 (B)	23.2	23.2	79'397	2.18	0.93	24.9	17.3
A320-200 (C)	77.4	77.4	463'150	12.69	0.78	99.3	32.2
B767-200 (D)	163.8	163.8	6'616	0.18	1.15	142.6	24.4
B777-300-ER (E)	352.4	352.4	39'699	1.09	0.99	355.0	34.2

Il vient :

- L'avion déterminant pour le dimensionnement est l'avion de catégorie E, puis l'avion de catégorie C en raison du nombre élevé de mouvements.
- L'épaisseur de béton nécessaire selon le scénario de trafic hypothèse basse (2%) – 6% cat. E est donc de 35 cm au minimum (34.2 cm).
- Un calcul avec l'avion A330-300 à la place du B777-300-ER pour la catégorie E abouti à une épaisseur de béton de 30.9 cm. L'avion B777 est donc davantage déterminant.

Tableau 8 : Dimensionnement chaussée rigide selon méthode OACI – Hypothèse basse (2%)-10% cat. E

Avion (Cat.)	P	P'	N	N/N ₀	P'/P ₀	P ₀	Ep [cm]
Saab 2000 (B)	23.2	23.2	79'397	2.18	0.93	24.9	17.3
A320-200 (C)	77.4	77.4	463'150	12.69	0.78	99.3	32.2
B767-200 (D)	163.8	163.8	6'616	0.18	1.15	142.6	24.4
B777-300-ER (E)	352.4	352.4	66'164	1.81	0.95	371.6	35.4

- L'avion de catégorie E est déterminant.
- L'épaisseur de béton nécessaire selon le scénario de trafic hypothèse basse (2%) – 10% de cat. E est de 36 cm au minimum (35.4 cm).
- Un calcul avec l'Airbus A 330-300 en lieu et place du Boeing B777 abouti à une épaisseur nécessaire de 31.8 cm de béton.

Tableau 9 : Dimensionnement chaussée rigide selon méthode OACI – Hypothèse haute (4%)-6% cat. E

Avion (Cat.)	P	P'	N	N/N ₀	P'/P ₀	P ₀	Ep [cm]
Saab 2000 (B)	23.2	23.2	94'520	2.59	0.92	25.3	17.4
A320-200 (C)	77.4	77.4	551'367	15.11	0.76	101.3	32.6
B767-200 (D)	163.8	163.8	7'877	0.22	1.13	144.5	24.6
B777-300-ER (E)	352.4	352.4	47'260	1.29	0.98	360.5	34.7

- L'épaisseur minimale de béton nécessaire selon le scénario de trafic hypothèse haute (2%) – 6% de cat. E est de 35 cm (34.7 cm).
- Un calcul avec l'Airbus A330 pour la catégorie E indique une épaisseur de béton nécessaire de 31.2 cm.

Tableau 10 : Dimensionnement chaussée rigide selon méthode OACI – Hypothèse haute (4%)-10% cat. E

Avion (Cat.)	P	P'	N	N/N ₀	P'/P ₀	P ₀	Ep [cm]
Saab 2000 (B)	23.2	23.2	94'520	2.59	0.92	25.3	17.4
A320-200 (C)	77.4	77.4	551'367	15.11	0.76	101.3	32.6
B767-200 (D)	163.8	163.8	7'877	0.22	1.13	144.5	24.6
B777-300-ER (E)	352.4	352.4	78'767	2.16	0.93	377.7	35.9

- L'épaisseur minimale de béton nécessaire selon le scénario de trafic hypothèse haute (2%) – 6% de cat. E est de 36 cm (35.9 cm).
- Un calcul avec l'Airbus A 330 pour la catégorie E indique une épaisseur de béton nécessaire de 32.1 cm.

Nous pouvons finalement observer :

- Les résultats et tendances observées entre les différentes hypothèses de trafic sont consistants. De même, pour un scénario de trafic donné, l'influence de chaque appareil est cohérente.
- Une synthèse des résultats est proposée dans le Tableau 11. La différence entre les hypothèses hautes et basses se traduit par une épaisseur de 0.5 cm de béton. L'effet lié à la proportion d'avions de catégorie E est davantage marqué. La différence entre 6% et 10% d'appareils catégorie E est de 1.2 cm d'enrobé.
- Une attention particulière doit être portée aux avions de catégorie C et E qui sont déterminant pour le dimensionnement, soit en raison de leur charge (catégorie E) ou alors du nombre très important de mouvements (catégorie C)

Tableau 11 : Synthèse des résultats de dimensionnement de chaussées rigides selon la méthode de l'OACI

Scénario	Ep min [cm]
Hypothèse basse (2%)-6% cat.E	34.2
Hypothèse basse (2%)-10% cat.E	35.4
Hypothèse haute (4%)-6% cat.E	34.7
Hypothèse haute (4%)-10% cat.E	35.9

2.3.2.1 Effet de la durée de service de la chaussée

Le cas de référence pour les chaussées rigides considère une durée de service de 50 ans. Cette durée de service est cependant relativement élevée et elle constitue un maximum au-delà duquel les prévisions de trafic ne sont plus fiables. Une analyse de l'effet de la durée de service sur l'épaisseur de la dalle de béton est proposée. Pour cela, deux autres durées de service sont calculées, soit 20 ans et 30 ans.

Le calcul est réalisé pour l'hypothèse basse (2%), 10% d'avions de catégorie E. Le trafic considéré est synthétisé dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Trafic pour différentes durées de service de chaussée rigides (hypothèse basse, 10% cat. E)

Durée de service	Trafic total (mvt)	Nbre mvts sur la durée de service par cat. OACI d'avion			
		B	C	D	E
20 ans	3'609'664	119'119	694'860	9'927	99'266
30 ans	5'933'122	195'793	1'142'126	16'316	163'161
50 ans	12'029'872	396'986	2'315'750	33'082	330'821

Les résultats du dimensionnement sont indiqués dans le Tableau 13. Nous pouvons observer qu'une diminution de la durée de service à 20 ou 30 ans ne présente que des conséquences limitées par rapport à l'épaisseur de la dalle de béton nécessaire. La diminution de l'épaisseur de la dalle de béton nécessaire est de 4 mm dans le cas d'une durée de service de 30 ans et 6 mm dans le cas d'une durée de service de 20 ans.

Tableau 13 : Dimensionnement OACI, chaussées rigides : Effet de la durée de service de la chaussée (hypothèse basse, 10% cat. E)

Avion (Cat.)	P	P'	N	N/N ₀	P'/P ₀	P ₀	Ep [cm]
Durée de service : 20 ans							
Saab 2000 (B)	23.2	23.2	59'559	1.63	0.96	24.2	17.0
A320-200 (C)	77.4	77.4	347'430	9.52	0.80	96.2	31.7
B767-200 (D)	163.8	163.8	4'963	0.14	1.17	139.6	24.2
B777-300-ER (E)	352.4	352.4	49'633	1.36	0.97	362.1	34.8
Durée de service : 30 ans							
Saab 2000 (B)	23.2	23.2	65'264	1.79	0.95	24.4	17.1
A320-200 (C)	77.4	77.4	380'709	10.43	0.80	97.2	31.9
B767-200 (D)	163.8	163.8	5'439	0.15	1.17	140.5	24.3
B777-300-ER (E)	352.4	352.4	54'387	1.49	0.97	365.1	35.0
Durée de service : 50 ans (REF)							

Saab 2000 (B)	23.2	23.2	79'397	2.18	0.93	24.9	17.3
A320-200 (C)	77.4	77.4	463'150	12.69	0.78	99.3	32.2
B767-200 (D)	163.8	163.8	6'616	0.18	1.15	142.6	24.4
B777-300-ER (E)	352.4	352.4	66'164	1.81	0.95	371.6	35.4

2.3.2.2 Effet de l'épaisseur de grave traitée

Le calcul de référence prend pour hypothèse une épaisseur de grave traitée de 20 cm. Conformément à la norme SN 640 491, l'épaisseur pour ce type de couche se situe généralement entre 150 mm et 300 mm ; la méthode française de dimensionnement des chaussées routières recommandant une épaisseur minimale de 150 mm. L'incidence d'une modification de l'épaisseur de grave traitée est illustrée dans le Tableau 14. Notons que ces résultats sont largement dépendants des hypothèses de calcul de la méthode, comme il le sera discuté plus loin.

Tableau 14 : Dimensionnement OACI, chaussées rigides : Effet de l'épaisseur de grave traitée (hypothèse basse, 10% cat. E)

Avion (Cat.)	P	P'	N	N/N ₀	P'/P ₀	P ₀	Ep [cm]
Epaisseur grave traitée : 15 cm (Kc=96)							
Saab 2000 (B)	23.2	23.2	79'397	2.18	0.93	24.9	17.4
A320-200 (C)	77.4	77.4	463'150	12.69	0.78	99.3	32.5
B767-200 (D)	163.8	163.8	6'616	0.18	1.15	142.6	24.8
B777-300-ER (E)	352.4	352.4	66'164	1.81	0.95	371.6	36.2
Epaisseur grave traitée : 20 cm (Kc=104) - REF							
Saab 2000 (B)	23.2	23.2	79'397	2.18	0.93	24.9	17.3
A320-200 (C)	77.4	77.4	463'150	12.69	0.78	99.3	32.2
B767-200 (D)	163.8	163.8	6'616	0.18	1.15	142.6	24.4
B777-300-ER (E)	352.4	352.4	66'164	1.81	0.95	371.6	35.4
Epaisseur grave traitée : 30 cm (Kc=117)							
Saab 2000 (B)	23.2	23.2	79'397	2.18	0.93	24.9	17.1
A320-200 (C)	77.4	77.4	463'150	12.69	0.78	99.3	31.8
B767-200 (D)	163.8	163.8	6'616	0.18	1.15	142.6	23.9
B777-300-ER (E)	352.4	352.4	66'164	1.81	0.95	371.6	34.2
Epaisseur grave traitée : 40 cm (Kc=124)							
Saab 2000 (B)	23.2	23.2	79'397	2.18	0.93	24.9	16.9
A320-200 (C)	77.4	77.4	463'150	12.69	0.78	99.3	31.6
B767-200 (D)	163.8	163.8	6'616	0.18	1.15	142.6	23.6
B777-300-ER (E)	352.4	352.4	66'164	1.81	0.95	371.6	33.7

Une diminution de l'épaisseur de grave traitée (15 cm) nécessite une épaisseur plus importante de la dalle de béton. L'augmentation d'épaisseur est de 0.8 cm. Par contre, une augmentation de 10 cm de l'épaisseur de grave traitée a pour conséquence une diminution de 1.2 cm de l'épaisseur de la dalle de béton nécessaire qui est de 34.2 cm. Dans le cas d'une épaisseur de grave de 40 cm, l'épaisseur nécessaire de la dalle de béton peut être diminuée de 1.7 cm. Rappelons encore que l'augmentation de l'épaisseur de la grave traitée peut avoir des conséquences sur le mécanisme d'endommagement déterminant de la chaussée. Ceci sera davantage illustré plus loin.

D'un point de vue pratique, pour des épaisseurs de grave traitée supérieures à 30 cm environ, une pose et un compactage en deux sous-couches serait à recommander afin de garantir une portance satisfaisante.

2.3.3 Chaussée souple

La chaussée souple est dimensionnée pour une durée de service de 20 ans, selon une méthode de dimensionnement optimisé. Ce dimensionnement consiste à procéder de manière itérative pour finalement déterminer l'épaisseur équivalente nécessaire de la chaussée afin de supporter le trafic prévu. Cette épaisseur équivalente est ensuite convertie en épaisseur réelle par le recours aux coefficients d'équivalence CE. En fonction de l'épaisseur équivalente totale et de la portance du sol support (CBR), l'épaisseur minimale de matériaux traités est également déterminée. La démarche de dimensionnement optimisé peut être résumée ainsi [8] :

- 1) Définition d'une épaisseur équivalente totale initiale. On pourra définir cette épaisseur en procédant à un dimensionnement forfaitaire dont l'épaisseur est légèrement majorée.
- 2) Pour chaque avion (i), détermination des paramètres suivants :
 - P Charge réelle effectivement appliquée par un atterrisseur d'avion [t.]
 - P' Charge réelle pondérée en fonction de l'aire de trafic [t.]
 - $P' = P / C_p$
 - P₀ Charge admissible déterminée à-partir des abaques de dimensionnement [t.]
- 3) Pour chaque avion (i), le nombre de mouvements réels N à la charge réelle pondérée P' est converti en un nombre de mouvements équivalents N' à la charge admissible P₀. Pour cela, on calcule pour chaque avion :
 - $R_{ij} = P'_{ij} / P_{0i}$
Ce rapport ne doit pas dépasser 1.2 pour les voies de circulation. Si la valeur limite est dépassée, alors il est nécessaire d'augmenter l'épaisseur équivalente.
 - Coefficient de pondération Cp_{ij} défini par la relation $Cp_{ij} = 10^{5(R_{ij}-1)}$
 - Nombre de mouvements équivalents N' = N · Cp_{ij}
- 4) Calcul du nombre total de mouvements équivalents en sommant la valeur N' obtenue pour chaque avion. Ce trafic est appelé trafic équivalent.
- 5) Si le trafic équivalent est sensiblement inférieur à 36'500 mvt (10 mvt/j pendant 10 ans), alors l'épaisseur équivalente utilisée pour l'itération doit être diminuée et les calculs recommencés. Au contraire, si le trafic équivalent est sensiblement supérieur à 36'500 mvt, alors l'épaisseur équivalente totale doit être augmentée.

Les résultats du dimensionnement optimisé sont indiqués ci-après ; le trafic étant décrit dans le Tableau 4

Tableau 15 : Dimensionnement chaussée souple selon méthode OACI - Hypothèse basse (2%)-6% cat. E

Avion (Cat.)	P	P'	P ₀	R _{ij}	Cp _{ij}	N	N'	
Saab 2000 (B)	23.2	23.2	95.8	0.24	0.00	59'560	10	
A320-200 (C)	77.4	77.4	122.6	0.63	0.01	347'430	4'983	
B767-200 (D)	163.75	163.75	230.1	0.71	0.04	4'964	180	
B777-300-ER (E)	352.441	352.441	352.7	1.00	0.99	29'780	29'529	
Total							34'701	
Epaisseur équivalente minimale : 90 cm								
Epaisseur minimale de matériaux traités : 39.6 cm								

Tableau 16 : Dimensionnement chaussée souple selon méthode OACI – Hypothèse basse (2%)-10% cat. E

Avion (Cat.)	P	P'	P ₀	R _{ij}	C _{p_{ij}}	N	N'
Saab 2000 (B)	23.2	23.2	103.9	0.22	0.00	59'560	8
A320-200 (C)	77.4	77.4	131.2	0.59	0.01	347'430	3'094
B767-200 (D)	163.75	163.75	243.2	0.67	0.02	4'964	115
B777-300-ER (E)	352.441	352.441	368.8	0.96	0.60	49'633	29'784
						Total	33'002
Epaisseur équivalente minimale : 94 cm							
Epaisseur minimale de matériaux traités : 41.4 cm							

Tableau 17 : Dimensionnement chaussée souple selon méthode OACI – Hypothèse haute (4%)-6% cat. E

Avion (Cat.)	P	P'	P ₀	R _{ij}	C _{p_{ij}}	N	N'
Saab 2000 (B)	23.2	23.2	99.6	0.23	0.00	73'849	11
A320-200 (C)	77.4	77.4	126.9	0.61	0.01	430'785	4'830
B767-200 (D)	163.75	163.75	236.6	0.69	0.03	6'154	178
B777-300-ER (E)	352.441	352.441	360.7	0.98	0.77	36'925	28'368
						Total	33'386
Epaisseur équivalente minimale : 92 cm							
Epaisseur minimale de matériaux traités : 40.5 cm							

Tableau 18 : Dimensionnement chaussée souple selon méthode OACI – Hypothèse haute (4%)-10% cat. E

Avion (Cat.)	P	P'	P ₀	R _{ij}	C _{p_{ij}}	N	N'
Saab 2000 (B)	23.2	23.2	106.2	0.22	0.00	73'849	9
A320-200 (C)	77.4	77.4	133.4	0.58	0.01	430'785	3'430
B767-200 (D)	163.75	163.75	246.5	0.66	0.02	6'154	129
B777-300-ER (E)	352.441	352.441	372.8	0.95	0.53	61'541	32'818
						Total	36'386
Epaisseur équivalente minimale : 95 cm							
Epaisseur minimale de matériaux traités : 41.8 cm							

Sur la base des différents calculs de dimensionnement, nous pouvons observer :

- L'épaisseur équivalente nécessaire oscille entre 90 cm et 95 cm selon le scénario de trafic considéré. Les tendances au niveau de l'épaisseur de chaussée entre les scénarios de trafic sont similaires à celles observées lors du dimensionnement de la chaussée rigide.
- L'épaisseur de matériaux traités dépend du CBR et de l'épaisseur équivalente totale. Ce critère n'est pas déterminant dans le cadre de ces calculs puisque des matériaux traités sont utilisés également en couche de fondation, ce qui permet de proposer une épaisseur totale de matériaux traités suffisante.
- La majeure partie du trafic équivalent total est due aux avions de catégorie E (B777-300-ER). La contribution des avions de catégorie E se situe entre 85 et 90%. Les avions de catégorie C contribuent également de manière significative (9% à 14%); les autres avions présentant une contribution au trafic équivalent total négligeable.
- La prise en compte de l'Airbus A330-300 à la place du Boeing B777-300-ER a pour incidence de diminuer l'épaisseur équivalente nécessaire. Cette diminution se situe entre 5 cm (hypothèse basse, 6% de cat. E) et 8 cm (hypothèse basse, 10% de cat. E), soit entre 5.5% et 8.5% de l'épaisseur équivalente de référence.

Connaissant l'épaisseur équivalente nécessaire, la composition exacte de la chaussée peut être déterminée. Les variantes proposées dans les Tableau 19 à Tableau 22 ont été établies en considérant les hypothèses suivantes :

- Epaisseur béton bitumineux : 5 cm. Cette couche ne joue qu'un rôle très limité du point de vue du comportement mécanique de la structure et nous proposons donc une épaisseur standard.
- Epaisseur de grave traitée : 20 cm. Une analyse de sensibilité sera effectuée dans la suite du présent chapitre.

Tableau 19 : Détermination de l'épaisseur des couches bitumineuses – Hypothèse basse (2%)-6% cat. E

Matériau	CE	Epaisseur [cm]	
		Réelle	Equivalente
Béton bitumineux	2	5	10
EME2	2.8	18	50.4
Grave traitée	1.5	20	30
<i>Total (min)</i>			<i>90.4 (90)</i>

Tableau 20 : Détermination de l'épaisseur des couches bitumineuses – Hypothèse basse (2%)-10% cat. E

Matériau	CE	Epaisseur [cm]	
		Réelle	Equivalente
Béton bitumineux	2	5	10
EME2	2.8	20	56
Grave traitée	1.5	20	30
<i>Total (min)</i>			<i>96 (94)</i>

Tableau 21 : Détermination de l'épaisseur des couches bitumineuses – Hypothèse haute (4%)-6% cat. E

Matériau	CE	Epaisseur [cm]	
		Réelle	Equivalente
Béton bitumineux	2	2	10
EME2	2.8	19	53.2
Grave traitée	1.5	20	30
<i>Total (min)</i>			<i>93.2 (92)</i>

Tableau 22 : Détermination de l'épaisseur des couches bitumineuses – Hypothèse haute (4%)-10% cat. E

Matériau	CE	Epaisseur [cm]	
		Réelle	Equivalente
Béton bitumineux	2	5	10
EME2	2.8	20	56
Grave traitée	1.5	20	30
<i>Total (min)</i>			<i>96 (95)</i>

2.3.3.1 Effet de la durée de service de la chaussée

Le calcul du cas de référence a été réalisé pour une durée de service de 20 ans. Nous proposons d'analyser l'impact d'une durée de service de 10 ans et 30 ans, durées relativement extrêmes qui pourraient être envisagées dans le cas de chaussées souples. Le trafic considéré est indiqué dans le Tableau 23.

Tableau 23 : Trafic pour différentes durées de service de chaussée souples (hypothèse basse, 10% cat. E)

Durée de service	Trafic total (mvt)	Nbre mvts sur la durée de service par cat. OACI d'avion			
		B	C	D	E
10 ans	1'703'620	56'219	327'947	4'685	46'850
20 ans	3'609'664	119'119	694'860	9'927	99'266
30 ans	5'933'122	195'793	1'142'126	16'316	163'161

Les résultats du dimensionnement pour le scénario de trafic « hypothèse basse, 10% de catégorie E » sont consignés dans le Tableau 24. Nous pouvons observer l'effet négligeable de la prise en considération d'une durée de service de 10 ans, respectivement 20 ans. Ceci est notamment lié aux hypothèses des scénarios de trafic.

Tableau 24 : Dimensionnement OACI, chaussées souples : Effet de la durée de service de la chaussée (hypothèse basse, 10% cat. E)

Avion (Cat.)	P	P'	P ₀	R _{ij}	C _{p_{ij}}	N	N'
Durée de service : 10 ans							
Saab 2000 (B)	23.2	23.2	101.7	0.23	0.00	59'560	8
A320-200 (C)	77.4	77.4	129.1	0.60	0.01	347'430	3'456
B767-200 (D)	163.75	163.75	239.9	0.68	0.03	4'964	128
B777-300-ER (E)	352.441	352.441	364.7	0.97	0.68	49'633	33'706
Total							37'298
Epaisseur équivalente minimale : 93 cm							
Durée de service : 20 ans (REF)							
Saab 2000 (B)	23.2	23.2	103.9	0.22	0.00	59'560	8
A320-200 (C)	77.4	77.4	131.2	0.59	0.01	347'430	3'094
B767-200 (D)	163.75	163.75	243.2	0.67	0.02	4'964	115
B777-300-ER (E)	352.441	352.441	368.8	0.96	0.60	49'633	29'784
Total							33'002
Epaisseur équivalente minimale : 94 cm							
Durée de service : 30 ans							
Saab 2000 (B)	23.2	23.2	103.9	0.22	0.00	59'560	8
A320-200 (C)	77.4	77.4	131.2	0.59	0.01	347'430	3'094
B767-200 (D)	163.75	163.75	243.2	0.67	0.02	4'964	115
B777-300-ER (E)	352.441	352.441	368.8	0.96	0.60	49'633	29'784
Total							33'002
Epaisseur équivalente minimale : 94 cm							

2.3.3.2 Effet de l'épaisseur de grave traitée

Le calcul de référence considère une épaisseur de 20 cm de grave traitée. Une modification de l'épaisseur de grave traitée aura une incidence directe sur l'épaisseur équivalente et donc sur l'épaisseur nécessaire des couches bitumineuses. Considérons le scénario de trafic de l'hypothèse basse (2%), 10% de catégorie E. Il vient alors :

- Epaisseur équivalente nécessaire : 94 cm
- Cas de référence :
 - 5 cm béton bitumineux (CE=2)
 - 20 cm EME 2 (CE=2.8)

- 20 cm grave traitée (CE=1.5)
- Epaisseur équivalente totale : 96 cm
- Variante 1 :
 - 5 cm béton bitumineux (CE=2)
 - 22 cm EME 2 (CE=2.8)
 - 15 cm grave traitée (CE=1.5)
 - Epaisseur équivalente totale : 94.1 cm
- Variante 2 :
 - 5 cm béton bitumineux (CE=2)
 - 14 cm EME 2 (CE=2.8)
 - 30 cm grave traitée (CE=1.5)
 - Epaisseur équivalente totale : 94.2 cm
- Variante 3 :
 - 5 cm béton bitumineux (CE=2)
 - 9 cm EME 2 (CE=2.8)
 - 40 cm grave traitée (CE=1.5)
 - Epaisseur équivalente totale : 95.2 cm

Une diminution de 5 cm de l'épaisseur de grave traitée nécessitera une augmentation de 2 cm de l'enrobé à module élevé EME2. A l'opposé, une augmentation de l'épaisseur de grave traitée à 30 cm respectivement 40 cm aura pour conséquence une diminution conséquente de l'épaisseur d'EME2 de 6 cm (-30%) et respectivement 11 cm (-55%). L'épaisseur minimale d'un enrobé EME 22 est de 80 mm selon la normalisation SN.

2.4 Dimensionnement selon une méthode rationnelle (méthode multicouche)

2.4.1 Brève description de la méthode

La méthode rationnelle de dimensionnement des aéroports est basée sur l'expérience française et issue de méthodes de calcul des sollicitations (état de contraintes et déformations) comparables à celles mise en œuvre dans le cas de chaussées routières. Dans le cas de chaussées routières, on pourra recommander le logiciel Alizé® pour le dimensionnement selon une méthode multicouche. Notons que l'on pourra également se référer au guide de la méthode française [11] ou à la norme NF-P-98-086:2010.

Le dimensionnement des chaussées aéroportuaires selon la méthode multicouche française est basé sur le principe suivant : Le calcul des sollicitations induites par les aéronefs est réalisé à l'aide d'un modèle élastique linéaire isotrope multicouche semi-infini. Deux types d'endommagements sont considérés dans les calculs :

- Fatigue conduisant à la fissuration progressive du matériau
- Déformations permanentes au sommet du sol support (i.e. déformation verticale)

Le trafic aéroportuaire se distingue du trafic routier par la grande diversité des atterrisseurs (configuration et charge). Pour cela, les méthodes rationnelles actuelles utilisent la notion de dommage qui est déterminé pour chaque avion, pour ensuite sommer les dommages des différents aéronefs et déterminer le dommage cumulé total pour la chaussée au cours de sa durée de service. Ce dommage cumulé total est appelé CDF (cumulative damage factor).

L'interprétation de la notion de dommage est la suivante :

- CDF=1 : Durée de vie consommée (selon les calculs)
- CDF > 1 : Chaussée sous-dimensionnée (selon les calculs)
- CDF < 1 : Chaussée sur-dimensionnée (selon les calculs)

Notons encore que le logiciel de calcul utilisé permet de déterminer les éléments suivants pour un critère d'endommagement choisi (non réalisé ici) :

- Roue simple équivalente : Poids de la roue simple (rayon de contact ou pression imposés) créant un dommage identique à celui créé par l'avion (ou le trafic).
- Coefficient d'agressivité : Correspond à une charge de référence pour un avion (ou un trafic), défini comme le ratio entre le nombre de passages de la charge de référence et le nombre de passages de l'avion (ou le trafic) considéré.

La méthode de calcul multicouche permet de prendre en compte de manière exacte les différents atterrisseurs et leurs charges, les caractéristiques intrinsèques des matériaux de construction, ainsi que les conditions et interactions aux interfaces (collage des couches). Ces méthodes de calcul fournissent donc un résultat davantage détaillé, mais elles nécessitent également la connaissance de nombreux paramètres. La prise en main de telles méthodes n'est pas nécessairement aisée.

D'un point de vue « législatif », nous pouvons effectuer les commentaires suivants :

- Les calculs de chaussées rigides réalisés selon la méthode multicouche ne reflètent (actuellement) pas la démarche officielle de l'OACI pour laquelle la démarche recommandée à ce jour est basée sur la méthode PCA (modèle au module de réaction de Westergaard). Les fondements de la méthode rationnelle et de la méthode PCA sont sensiblement différents, ce qui peut expliquer certaines différences au niveau des résultats de calculs. Cependant, les calculs selon la méthode multicouche permettent de fournir des informations complémentaires importantes, réaliser des analyses de sensibilité, ... Ce type de méthode est susceptible d'être recommandée à l'avenir en raison des limites largement reconnues de la méthode PCA.
- Le cas des chaussées souples est différent. Des recherches et développements sont actuellement en cours notamment en France (Alizé®) et aux Etats-Unis (FAARFIELD®) avec pour objectif une refonte complète de la méthode de dimensionnement des chaussées aéronautiques neuves, refonte basée sur un modèle de dimensionnement rationnel. Un guide de dimensionnement est actuellement en cours de rédaction en France (groupe de travail IFSTTAR, LRPC, STAC ; 2012).

2.4.2 Données d'entrée et hypothèses

Chaussées rigides :

- De manière générale, un béton de type bc5 (ou supérieur) est utilisé pour les chaussées aéroportuaires rigides. Les caractéristiques considérées sont donc les suivantes :
 - $E=35'000$ MPa, $\nu=0.25$
 - Fatigue : $\sigma_6=2.15$ MPa, $-1/b=16$
- La méthode de calcul de l'OACI considère un béton de module $E=30'000$ MPa et coefficient de Poisson $\nu=0.15$ [4]. Un calcul sera également réalisé avec ces caractéristiques afin d'en évaluer l'incidence sur le dimensionnement. Notons encore que la norme SIA 262 :2003 indique qu'en première approximation un coefficient de Poisson de $\nu=0.20$ peut être utilisé pour les déformations dans le domaine élastique.

- Béton faiblement armé : Dalles goudonnées et joints conjugués ($1/Kd=1.47$)
- Modélisation :
 - Le calcul réalisé suppose une chaussée constituée d'une dalle de béton monobloc, déposée sur de la grave traitée aux liants hydrauliques. Ceci correspond également à la chaussée dimensionnée selon la méthode OACI.
 - Conditions de collage : On suppose une interface glissante entre le béton et la grave traitée. Les conditions d'interface jouent un rôle primordial sur la répartition des contraintes et par conséquent le dimensionnement. Une interface béton-grave traitée totalement glissante ne pouvant être garantie, un second calcul considérant une interface semi-collée sera également proposé. L'interface entre la grave traitée et le sol support est quant à elle considérée comme collée.
 - Le dimensionnement de la chaussée rigide consiste à vérifier la contrainte de traction par flexion au bas de la couche de béton (couche de roulement) et de la couche de grave traitée (couche de fondation). Une vérification de l'orniérage au sommet du sol support est également réalisée.
 - Le dimensionnement est effectué en considérant le critère de dommage maximal avec balayage. Les résultats sans balayage ne correspondent pas à la réalité, mais ils sont indiqués à titre illustratif.
 - Les coefficients indiqués dans le Tableau 25 sont utilisés pour la modélisation. Ces coefficients sont issus des recommandations relatives à la méthode de dimensionnement.

Tableau 25 : Coefficients pour la modélisation de la chaussée rigide

Couche	Risque	SH	SN	1/Ks	1/Kd	Kc
Béton	5%	0.01	1.00	1.0	1.47	2.50
Grave traitée	5%	0.03	1.00	1.065	1.00	2.10

SH Ecart-type caractérisant la dispersion dans la variabilité de l'épaisseur des couches et de leur compacité [m]

SN Ecart-type de la dispersion des résultats d'essais de fatigue en laboratoire

Ks Coefficient de plate-forme (prise en compte d'hétérogénéités locales)

Kd Coefficient dépendant du type de dalle (chaussées rigides uniquement)

Kc Coefficient de calage (ajustement entre prédictions et observations)

Kr Coefficient de risque, calculé à-partir des écarts-types SN et SH et du risque admis. On admet un risque de 5% étant donné le type de voie dimensionnée. Pour une piste, nous préférons un risque plus faible (2.5%) ceci en fonction de la catégorie de l'aéroport et des possibilités de report du trafic sur une autre voie.

Chaussées souples :

- La chaussée souple de référence est constituée de deux couches bitumineuses avec un béton bitumineux standard (BB) en couche de roulement et une couche de base en enrobé à module élevé (EME2). Les caractéristiques des matériaux (Tableau 26) sont issues des recommandations pour la modélisation selon la méthode française. On indique également les caractéristiques de l'enrobé AC T (assimilé à de la grave bitume 3) utilisé pour un calcul additionnel de variante.

Tableau 26 : Caractéristiques des enrobés bitumineux pour le dimensionnement des chaussées souples

Matériau	E (15°C, 10 Hz) [MPa]	ν	ε_6 [10^{-6}]	-1/b
BB	5'400	0.35	-	-
EME2	14'000	0.35	130	5
AC T	9'300	0.35	90	5

- Choix du type de produits : Pour davantage de détails concernant le choix du produit, on pourra se référer au GAN [13] dans lequel des recommandations sont faites pour les différentes couches, ceci en fonction du niveau de sollicitation NS (dépend de la classe de trafic et du climat).
- Modélisation :
 - Conditions de collage : Dans le cas de la modélisation de couches bitumineuses, on suppose un collage parfait entre les différentes couches. Les conditions de collage peuvent cependant évoluer selon le mode de dégradation de la chaussée. Ceci sera détaillé plus loin.
 - Le dimensionnement consiste à vérifier la déformation par traction au bas de la couche bitumineuse (EME2) ainsi que la déformation verticale au sommet du sol support (orniérage).
 - Comme précédemment, le dimensionnement est réalisé en considérant le critère de dommage maximal avec balayage. Les données sans balayage sont indiquées à titre informatif.
 - Les différents coefficients utilisés pour la modélisation sont récapitulés dans le Tableau 27.

Tableau 27 : Coefficients pour la modélisation de la chaussée souple

Couche	Risque	SH	SN	1/Ks	Kc
EME2	5%	0.025	0.25	1.0	1.35
AC T	5%	0.025	0.30	1.0	1.8

- SH Ecart-type caractérisant la dispersion dans la variabilité de l'épaisseur des couches et de leur compacité [m] (SH=2.5 cm si épaisseur de matériaux bitumineux supérieure à 15 cm)
- SN Ecart-type de la dispersion des résultats d'essais de fatigue en laboratoire
- Ks Coefficient de plate-forme (prise en compte d'hétérogénéités locales)
- Kc Coefficient de calage (ajustement entre prédictions et observations). Pour les chaussées aéronautiques, le coefficient est de 1.8 (1.3 pour les chaussées routières), à l'exception des EME pour lesquels un coefficient de 1.35 est utilisé.
- Kr Coefficient de risque, calculé à-partir des écarts-types SN et SH et du risque admis.

Grave stabilisée aux liants hydrauliques :

- Les caractéristiques considérées pour la grave stabilisée aux liants hydrauliques sont celles proposées pour la gc3 dans la méthode française de dimensionnement [11].
- E (15 °C, 10 Hz)=23'000 MPa, $\nu=0.25$
- Fatigue : $\sigma_6=0.75$ MPa, -1/b=15

Portance du sol support :

- Les méthodes de calcul multicouche caractérisent la portance du sol support par son module d'élasticité E [MPa] ; ceci pour les chaussées rigides et souples. Les hypothèses de portance indiquées au chapitre 2.2.3 doivent donc être converties en module.
- [12] suggère les relations suivantes dans le cas de dimensionnement de chaussées d'aéroports (voir chapitre 2.2.3 pour CBR et k) :
 - E [psi]=1500 x CBR=1500 x 8 =12'000 psi \approx 83 MPa (en règle générale, on admet que le module E correspond à 5-10 fois le CBR)
 - E [psi]=26 x $k^{1.284}$ [pci]=38'528 psi \approx 265 MPa
- Nous pouvons remarquer que, une fois converties en MPa, les hypothèses de portance pour le dimensionnement souple (CBR) et rigide (k) sont relativement éloignées. Ceci pourra donc avoir des conséquences sur le résultat du dimensionnement.
- Afin d'éviter l'introduction d'un biais potentiel, nous considérons pour les calculs selon la méthode rationnelle une portance du sol support de 80 MPa. Cette valeur semble réaliste compte tenu de la portance moyenne observée in-situ et des discussions avec les gestionnaires de l'aéroport.

Vitesse des avions:

- De manière générale, plus la catégorie OACI d'avion est élevée, plus la vitesse de circulation sur taxiway est réduite. La normalisation autorise une vitesse de 93 km/h.
- La vitesse la plus faible est dans les courbes ; ces sections sont donc déterminantes.
- Afin d'être représentatif, une vitesse de 60 km/h est considérée pour les avions de catégorie B et C. Une vitesse de 30 km/h est par contre utilisée pour les avions de catégorie D et E.
- La vitesse des avions influe sur la fréquence de sollicitation et par conséquent sur le module d'élasticité des matériaux de chaussées bitumineuses. Les chaussées rigides présentent quant à elles un module ne dépendant pas de la fréquence de sollicitation dans le domaine de calcul considéré (méthode de calcul).
- Une analyse de sensibilité sera réalisée.

Balayage :

- On peut définir le balayage comme le positionnement latéral des aéronefs sur les aires de circulation concernées.
- Le balayage dépend de la catégorie d'avion. Il sera plus important dans le cas des avions de catégorie C par exemple, comparativement aux avions de catégorie E pour lesquels le balayage est très faible.
- Le balayage par défaut est de 1.5 m (2 x écart-type). Une analyse de sensibilité sera réalisée.

De manière générale, les paramètres standards de la méthode de calcul sont utilisés (conforme au guide de dimensionnement des chaussées aéronautiques flexibles). Nous pouvons relever :

- Le trafic est exprimé en nombre de mouvements annuels, la durée de service de la chaussée étant également renseignée. Les données du Tableau 4 et du Tableau 5 sont donc utilisées.
- Orniérage : Coefficient $A=16'000$, $-1/b=-0.222$
- Température équivalente : 15 °C
- Susceptibilité température-fréquence des matériaux bitumineux

2.4.3 Chaussée rigide

La chaussée modélisée est rappelée dans la Figure 2 (cas de référence). Pour le calcul de l'épaisseur de la dalle de béton, un pas de 5 mm est considéré entre les différentes itérations.

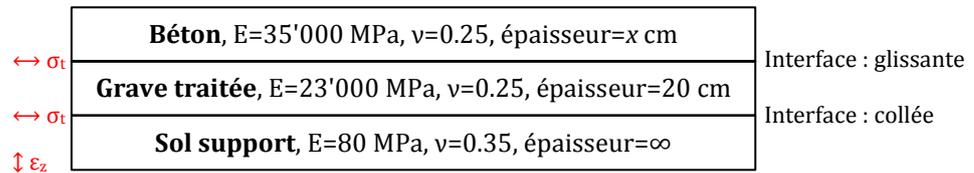


Figure 2 : Chaussée rigide de référence pour modélisation multicouche

Comme pour la méthode de calcul précédente, le dimensionnement est tout d'abord réalisé pour les quatre scénarios de trafic. Suite à cela, une analyse de quelques paramètres spécifiques et de leur impact sur l'épaisseur de chaussée sera conduite.

La modélisation du trafic permet également de représenter les zones de sollicitation de la chaussée. La Figure 3 illustre ceci pour les différents avions composant le trafic (axe vertical=axe transversal au sens de circulation). On peut observer la diversité des atterrisseurs ainsi que la zone de sollicitation pour chaque type d'avion. Il est recommandé de prendre ces aspects en considération notamment lors de la détermination de la position des joints de la chaussée.

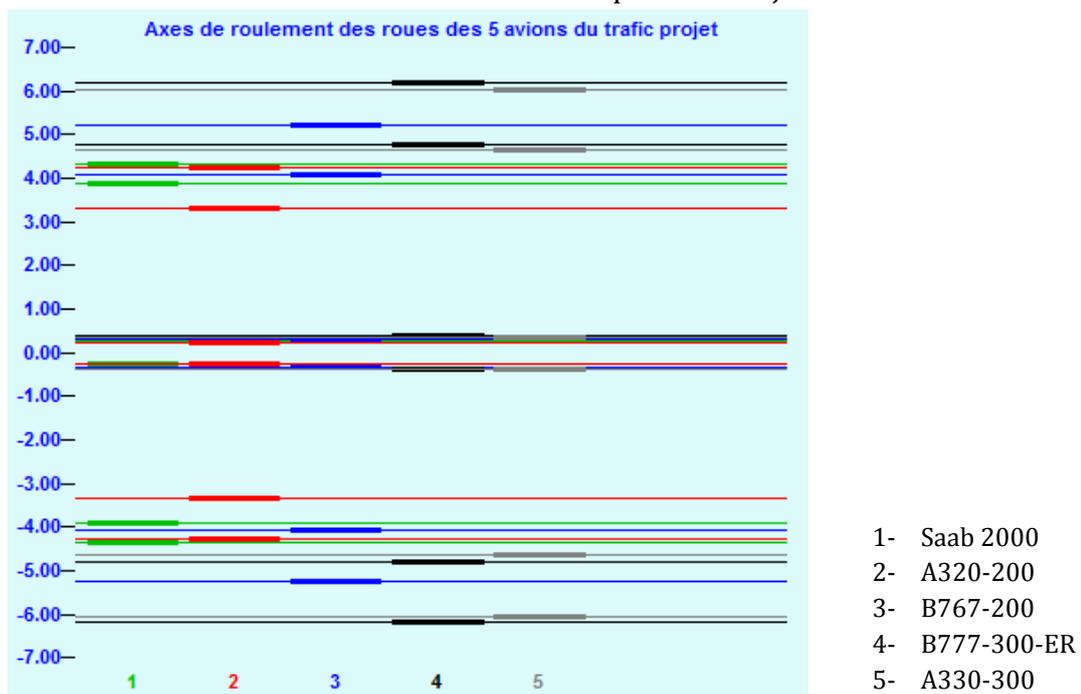


Figure 3 : Zone de sollicitation de la chaussée des différents avions composant le trafic (Source : logiciel multicouche LCPC-IFSTTAR)

Les résultats du dimensionnement pour le scénario de trafic hypothèse basse (2%), 6% d'avions de catégorie E sont consignés dans le Tableau 28. Comme mentionné précédemment, le dimensionnement est réalisé en considérant le dommage cumulé sur la chaussée, avec balayage des charges.

Tableau 28 : Dimensionnement selon méthode multicouche – Hypothèse basse (2%)-6% cat. E

Epaisseur béton	Avion (Cat.)	Dommage max selon le critère dim. Avec balayage			Dommage max selon le critère dim. Sans balayage		
		$\sigma_{t,béton}$	$\sigma_{t,grave\ traitée}$	$\epsilon_{z,sol}$	$\sigma_{t,béton}$	$\sigma_{t,grave\ traitée}$	$\epsilon_{z,sol}$
47.0 cm	Saab 2000 (B)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	A320-200 (C)	0.0005	<0.0001	0.0009	0.0014	<0.0001	0.0013
	B767-200 (D)	0.0002	<0.0001	0.0001	0.0006	<0.0001	0.0001
	B777-300-ER (E)	0.9777	0.0062	0.0092	4.4558	0.0338	0.0113
	Dommage cumulé	0.9779	0.0062	0.0095	4.4558	0.0338	0.0116

Nous pouvons remarquer :

- L'épaisseur de béton nécessaire pour ce scénario de trafic est de 47 cm. Le dommage cumulé total est de $0.9779 < 1$.
- Le critère déterminant pour le dimensionnement est la contrainte de traction au bas de la dalle de béton.
- Comme lors des calculs selon la méthode de l'OACI, l'avion de catégorie E (B777-300-ER) est largement déterminant. Le second avion « déterminant » est l'Airbus A 320-200 (catégorie C), mais ce dernier ne représente cependant qu'une faible proportion du dommage cumulé total.
- La différence entre les calculs avec et sans balayage est illustrée dans la Figure 4 qui représente le dommage cumulé total. La non-considération du balayage n'est pas réaliste et elle aboutirait de plus à des chaussées largement sur-dimensionnées.

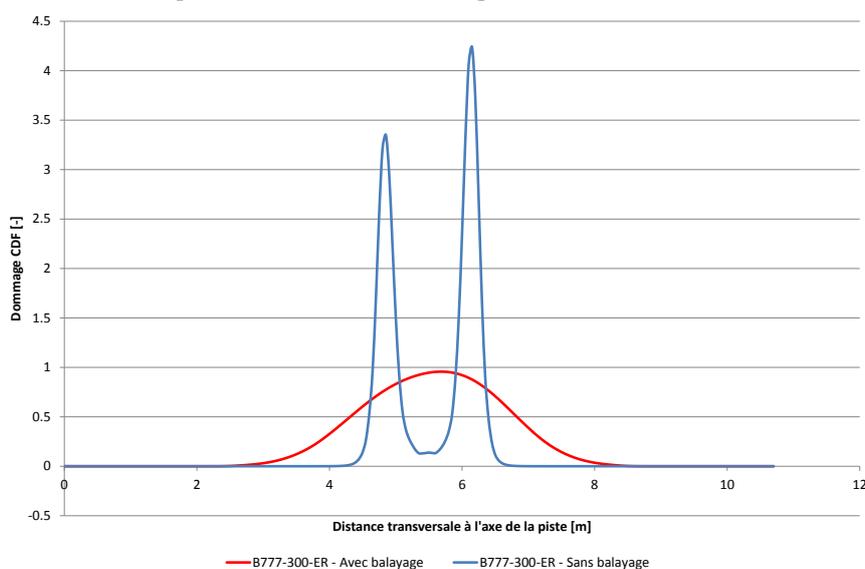


Figure 4 : Dommage cumulé total avec et sans balayage (chaussée rigide, 48.5 cm béton, 20 cm grave traitée, trafic hypothèse basse 10% cat E)

Les résultats du dimensionnement pour le scénario de trafic hypothèse basse (2%), 10% d'avions de catégorie E sont indiqués dans le Tableau 29.

Tableau 29 : Dimensionnement selon méthode multicouche – Hypothèse basse (2%)-10% cat. E

Epaisseur béton	Avion (Cat.)	Dommages max selon le critère dim.			Dommages max selon le critère dim.		
		Avec balayage			Sans balayage		
		$\sigma_{t,béton}$	$\sigma_{t,grave\ traitée}$	$\epsilon_{z,sol}$	$\sigma_{t,béton}$	$\sigma_{t,grave\ traitée}$	$\epsilon_{z,sol}$
48.5 cm	Saab 2000 (B)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	A320-200 (C)	0.0003	<0.0001	0.0007	0.0007	<0.0001	0.001
	B767-200 (D)	0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0003	<0.0001	0.0001
	B777-300-ER (E)	0.9563	0.0038	0.0127	4.2398	0.0205	0.0155
	Dommage cumulé	0.9563	0.0038	0.0129	4.2398	0.0205	0.0157

Nous pouvons observer :

- Comme précédemment, le critère déterminant pour le dimensionnement est la contrainte de traction au bas de la dalle de béton.
- Un calcul avec une épaisseur de béton de 47 cm abouti à un dommage cumulé avec balayage de 1.63, ce qui indique que la chaussée dimensionnée avec 6% de catégorie E ne serait alors pas suffisante. Il est nécessaire d'augmenter l'épaisseur de la dalle de béton de 1.5 cm.
- Le dommage est quasi-exclusivement causé par l'avion de catégorie E (B777-300-ER).
- L'épaisseur nécessaire de béton est de 48.5 cm, soit 1.5 cm de plus que pour le scénario avec 6% d'avions de catégorie E.

Les résultats du dimensionnement pour le scénario de trafic hypothèse haute (4%), 6% d'avions de catégorie E sont résumés dans le Tableau 30.

Tableau 30 : Dimensionnement selon méthode multicouche – Hypothèse haute (4%)-6% cat. E

Epaisseur béton	Avion (Cat.)	Dommages max selon le critère dim.			Dommages max selon le critère dim.		
		Avec balayage			Sans balayage		
		$\sigma_{t,béton}$	$\sigma_{t,grave\ traitée}$	$\epsilon_{z,sol}$	$\sigma_{t,béton}$	$\sigma_{t,grave\ traitée}$	$\epsilon_{z,sol}$
47.5 cm	Saab 2000 (B)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	A320-200 (C)	0.0005	<0.0001	0.001	0.0013	<0.0001	0.0015
	B767-200 (D)	0.0002	<0.0001	0.0001	0.0006	<0.0001	0.0002
	B777-300-ER (E)	0.974	0.0053	0.0103	4.3986	0.0287	0.0126
	Dommage cumulé	0.9742	0.0053	0.0106	4.3986	0.0287	0.0129

Il vient :

- Le critère déterminant ainsi que l'avion déterminant sont les mêmes que pour les calculs précédents. Le dommage est presque exclusivement lié aux avions de catégorie E.
- L'épaisseur nécessaire de la dalle de béton est de 47.5 cm. Ces résultats et la comparaison entre les scénarios de trafic sont consistants avec les calculs précédents selon la méthode de l'OACI.

Les résultats du dimensionnement pour le scénario de trafic hypothèse haute (4%), 6% d'avions de catégorie E sont indiqués dans le Tableau 31.

Tableau 31 : Dimensionnement selon méthode multicouche – Hypothèse haute (4%)-10% cat. E

Epaisseur béton	Avion (Cat.)	Domage max selon le critère dim. Avec balayage			Domage max selon le critère dim. Sans balayage		
		$\sigma_{t,béton}$	$\sigma_{t,grave\ traitée}$	$\epsilon_{z,sol}$	$\sigma_{t,béton}$	$\sigma_{t,grave\ traitée}$	$\epsilon_{z,sol}$
49.0 cm	Saab 2000 (B)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	A320-200 (C)	0.0003	<0.0001	0.0008	0.0006	<0.0001	0.0012
	B767-200 (D)	0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0003	<0.0001	0.0001
	B777-300-ER (E)	0.9541	0.0032	0.0142	4.1915	0.0175	0.0173
	Domage cumulé	0.9542	0.0032	0.0144	4.1915	0.0175	0.0175

Les mêmes remarques que précédemment peuvent être faites. L'épaisseur nécessaire de la dalle de béton afin de supporter le trafic prévu selon ce scénario est de 49 cm.

Nous proposons ci-dessous une synthèse des résultats du dimensionnement selon la méthode rationnelle.

Tableau 32 : Synthèse des résultats de dimensionnement de chaussées rigides selon la méthode rationnelle (méthode multicouche)

Scénario	Ep,min [cm]
Hypothèse basse (2%)-6% cat.E	47.0
Hypothèse basse (2%)-10% cat.E	48.5
Hypothèse haute (4%)-6% cat.E	47.5
Hypothèse haute (4%)-10% cat.E	49.0

La suite du présent chapitre propose une analyse de quelques paramètres spécifiques afin d'identifier l'impact de chacun sur le dimensionnement et affiner l'analyse des résultats obtenus pour le dimensionnement selon les scénarios de base.

2.4.3.1 Utilisation de l'Airbus A330-300 au lieu du Boeing B777-300-ER (catégorie E)

Les différents calculs ont été réalisés en considérant un Boeing B777-300-ER pour la catégorie E. Ceci permet de se situer du côté de la sécurité, mais peut cependant mener à un certain surdimensionnement de la chaussée. Un nouveau calcul est donc réalisé, ceci en utilisant l'Airbus A330-300 pour la catégorie E. Les résultats sont consignés dans le Tableau 33 où le chiffre indiqué entre parenthèses pour l'épaisseur de béton correspond au calcul de base avec le Boeing B777-300-ER comme appareil de catégorie E.

Tableau 33 : Dimensionnement rationnel, chaussées rigides – A330-300 pour catégorie E

Epaisseur béton	Avion (Cat.)	Dommage max selon le critère dim. Avec balayage			Dommage max selon le critère dim. Sans balayage		
		$\sigma_{t,béton}$	$\sigma_{t,grave traitée}$	$\epsilon_{z,sol}$	$\sigma_{t,béton}$	$\sigma_{t,grave traitée}$	$\epsilon_{z,sol}$
Scénario de trafic: Hypothèse basse (2%)-6% cat.E							
39 cm (47.0 cm)	Saab 2000 (B)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	A320-200 (C)	0.0286	0.011	0.0035	0.0837	0.0333	0.0053
	B767-200 (D)	0.0052	0.001	0.0004	0.0199	0.0041	0.0005
	A330-300 (E)	0.8409	0.1348	0.0068	3.8023	0.6625	0.01
	Dommage cumulé	0.849	0.1374	0.0085	3.8023	0.6625	0.0119
Scénario de trafic: Hypothèse basse (2%)-10% cat.E							
40 cm (48.5 cm)	Saab 2000 (B)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	A320-200 (C)	0.017	0.0048	0.0029	0.0489	0.0145	0.0044
	B767-200 (D)	0.0034	0.0004	0.0003	0.0127	0.0019	0.0004
	A330-300 (E)	0.9294	0.1057	0.0098	4.1387	0.5167	0.0143
	Dommage cumulé	0.9344	0.1068	0.011	4.1387	0.5167	0.0157
Scénario de trafic: Hypothèse haute (4%)-6% cat.E							
39 cm (47.5 cm)	Saab 2000 (B)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	A320-200 (C)	0.034	0.0131	0.0041	0.0997	0.0396	0.0064
	B767-200 (D)	0.0062	0.0012	0.0004	0.0237	0.0049	0.0006
	A330-300 (E)	1.001	0.1605	0.0081	4.5263	0.7887	0.0119
	Dommage cumulé	1.0107	0.1635	0.0101	4.5263	0.7887	0.0141
Scénario de trafic: Hypothèse haute (4%)-10% cat.E							
40.5 cm (49.0 cm)	Saab 2000 (B)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	A320-200 (C)	0.0156	0.0038	0.0031	0.0446	0.0114	0.0048
	B767-200 (D)	0.0032	0.0004	0.0003	0.012	0.0015	0.0005
	A330-300 (E)	0.9021	0.0866	0.0108	3.9864	0.4223	0.0157
	Dommage cumulé	0.9069	0.0875	0.0121	3.9864	0.4223	0.0173

Nous pouvons relever :

- Le critère déterminant est toujours la contrainte au bas de la couche de béton. Cependant, la contrainte au bas de la couche de grave non traitée est à prendre en considération car le dommage cumulé total augmente par rapport au cas de référence.
- De manière générale, l'avion de catégorie E reste l'avion déterminant pour le dimensionnement, mais la différence est moins marquée que lors du calcul avec le Boeing B777-300-ER. L'Airbus A320-200 est le second avion déterminant pour le dimensionnement, les appareils de catégorie B et D ne contribuant que très peu au dommage de la chaussée.
- Le calcul avec l'Airbus A330-300 pour les avions de catégorie E diminue sensiblement l'épaisseur nécessaire de la dalle de béton. Cette diminution est de 8 – 8.5 cm, soit environ 17% de l'épaisseur calculée pour le cas de référence.
- Le choix du type d'avion de catégorie E est déterminant en vue du dimensionnement. Dans un souci de réalisme, il aurait pu être proposé de considérer un panachage de différents appareils de catégorie E.
- La différence de dommage causé par le passage du A330-300 et celui du B777-300-ER est illustrée dans la Figure 5.

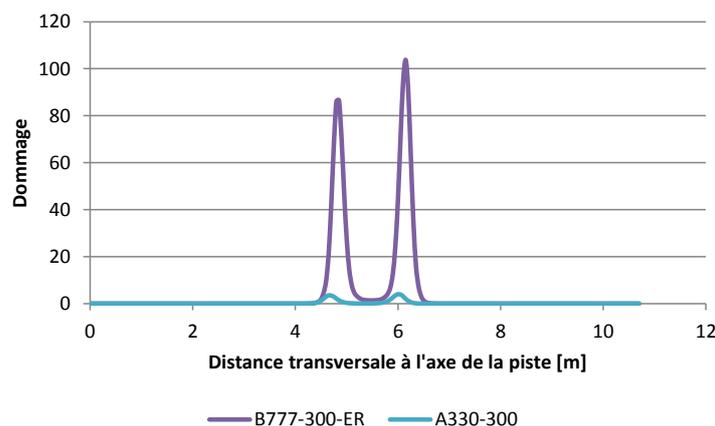


Figure 5 : Comparatif du dommage au passage du A330 et du B777 (sans balayage, hypothèse haute 10% catégorie E, dalle de béton de 40.5 cm)

2.4.3.2 Effet de la durée de service de la chaussée

Le choix d'une durée de service de 50 ans est fait pour les chaussées rigides. Cette durée est cependant relativement élevée. Nous proposons de réaliser de nouveaux calculs de l'épaisseur de béton nécessaire pour une durée de service de 20 ans et respectivement 30 ans. Le calcul est réalisé pour l'hypothèse basse (2%), 10% d'avions de catégorie E. Le trafic considéré est indiqué dans le Tableau 12. L'épaisseur nécessaire de la dalle de béton en fonction de la durée de service de la chaussée est indiquée dans le Tableau 34.

Tableau 34 : Dimensionnement rationnel, chaussées rigides : Effet de la durée de service de la chaussée (hypothèse basse, 10% cat. E)

Epaisseur béton	Avion (Cat.)	Dommage max selon le critère dim. Avec balayage			Dommage max selon le critère dim. Sans balayage		
		$\sigma_{t,béton}$	$\sigma_{t,grave\ traitée}$	$\epsilon_{z,sol}$	$\sigma_{t,béton}$	$\sigma_{t,grave\ traitée}$	$\epsilon_{z,sol}$
Durée de service : 50 ans (REF)							
48.5 cm	Saab 2000 (B)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	A320-200 (C)	0.0003	<0.0001	0.0007	0.0007	<0.0001	0.001
	B767-200 (D)	0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0003	<0.0001	0.0001
	A330-300 (E)	0.9563	0.0038	0.0127	4.2398	0.0205	0.0155
	Dommage cumulé	0.9563	0.0038	0.0129	4.2398	0.0205	0.0157
Durée de service : 30 ans							
46.5 cm	Saab 2000 (B)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	A320-200 (C)	0.0003	<0.0001	0.0005	0.0009	<0.0001	0.0007
	B767-200 (D)	0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0004	<0.0001	<0.0001
	A330-300 (E)	0.9607	0.0072	0.0081	4.4187	0.0391	0.0099
	Dommage cumulé	0.9608	0.0072	0.0082	4.4187	0.0391	0.0101
Durée de service : 20 ans							
45 cm	Saab 2000 (B)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	A320-200 (C)	0.0004	<0.0001	0.0004	0.0011	<0.0001	0.0006
	B767-200 (D)	0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0004	<0.0001	<0.0001
	A330-300 (E)	1.0007	0.0121	0.006	4.73	0.0666	0.0074
	Dommage cumulé	1.0008	0.0121	0.0061	4.73	0.0666	0.0075

Il vient :

- Pour une durée de service de 30 ans, la chaussée avec 48.5 cm de béton est alors sensiblement sur-dimensionnée (dommage cumulé total de 0.48). Une épaisseur de dalle

de béton de 46.5 cm est suffisante, ce qui diminue de 2 cm (4.1%) l'épaisseur nécessaire par rapport à une durée de service de 50 ans.

- La prise en compte d'une durée de service de 20 ans permet de diminuer l'épaisseur de la dalle de béton de 3.5 cm (7.2%) par rapport à une durée de service de 50 ans.
- De manière générale et considérant la catégorie de l'aéroport, une chaussée rigide sera dimensionnée pour une durée de service de minimum 30 ans. La diminution d'épaisseur de la dalle de béton par rapport à une durée de service de 50 ans n'est pas déterminante et il serait proposé de privilégier une durée de service de 50 ans.

2.4.3.3 Effet du balayage

Les calculs réalisés considèrent par défaut un balayage de 1.5 m. Les avions de catégorie élevée ayant habituellement un balayage plus faible, nous effectuons deux hypothèses complémentaires pour le balayage des avions de catégorie D et E. Les résultats pour le scénario de trafic « Hypothèse basse (2%)-10% cat.E », sont consignés dans le Tableau 35.

Tableau 35 : Analyse de l'effet du balayage sur les résultats du dimensionnement (hypothèse. basse, 10% cat. E)

Epaisseur béton	Avion (Cat.)	Dommages max selon le critère dim. Avec balayage			Dommages max selon le critère dim. Sans balayage		
		$\sigma_{t,béton}$	$\sigma_{t,grave traitée}$	$\epsilon_{z,sol}$	$\sigma_{t,béton}$	$\sigma_{t,grave traitée}$	$\epsilon_{z,sol}$
Balayage : 1.5 m (REF)							
48.5 cm	Saab 2000 (B)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	A320-200 (C)	0.0003	<0.0001	0.0007	0.0007	<0.0001	0.001
	B767-200 (D)	0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0003	<0.0001	0.0001
	A330-300 (E)	0.9563	0.0038	0.0127	4.2398	0.0205	0.0155
	Dommages cumulés	0.9563	0.0038	0.0129	4.2398	0.0205	0.0157
Balayage : 0.75 m pour avions de catégories D et E							
49.5 cm	Saab 2000 (B)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	A320-200 (C)	0.0002	<0.0001	0.0006	0.0004	<0.0001	0.0009
	B767-200 (D)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0002	<0.0001	0.0001
	A330-300 (E)	0.9783	0.003	0.0127	2.9246	0.0105	0.0136
	Dommages cumulés	0.9783	0.003	0.013	2.9246	0.0105	0.0138
Balayage : 0 m pour avions de catégories D et E							
52.5 cm	Saab 2000 (B)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	A320-200 (C)	<0.0001	<0.0001	0.0004	0.0001	<0.0001	0.0006
	B767-200 (D)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	A330-300 (E)	0.972	0.0015	0.0093	0.972	0.0015	0.0093
	Dommages cumulés	0.972	0.0015	0.0096	0.972	0.0015	0.0095

Nous pouvons remarquer :

- Avec une épaisseur de dalle de béton de 48.5 cm (cas de référence) et un balayage de 0.75 m. (cat. D et E), le dommage cumulé au bas de la dalle de béton est alors de 1.39. Ceci indique une chaussée sous-dimensionnée. L'épaisseur de béton doit donc être augmentée de 1 cm afin de garantir un dommage cumulé total < 1.
- Lorsque le balayage des avions de catégorie D et E est nul (hypothèse limite, non réaliste), alors l'épaisseur nécessaire de la dalle de béton doit être sensiblement augmentée (52.5 cm, soit 4 cm de plus). Une épaisseur de dalle de 48.5 cm aboutit à un dommage cumulé total de 4.24.

2.4.3.4 Qualité du béton

Les calculs initiaux sont réalisés avec l'utilisation d'un béton traditionnel pour ce type de chaussée (bc5, voir chapitre 2.4.2). Nous proposons ci-dessous un calcul complémentaire avec un béton identique à celui considéré dans la méthode de calcul de l'OACI (méthode française). Notons que ces résultats ne sont pas nécessairement réalistes ; la qualité et les exigences du matériau ayant évolués depuis l'élaboration de [4].

A défaut de valeur fournies dans [4], nous supposons les caractéristiques en fatigue suivantes pour le béton « OACI », caractéristiques intermédiaires entre un bc4 et un bc5 ce qui semble *a priori* cohérent : $\sigma_6=2.05$ MPa, $-1/b=15.5$. Les autres paramètres de modélisation sont conservés identiques à ceux recommandés dans le Tableau 25.

Tableau 36 : Effet de la qualité du béton sur le dimensionnement (hypothèse basse, 10% cat. E)

Epaisseur béton	Avion (Cat.)	Dommages max selon le critère dim. Avec balayage			Dommages max selon le critère dim. Sans balayage		
		$\sigma_{t,béton}$	$\sigma_{t,grave traitée}$	$\epsilon_{z,sol}$	$\sigma_{t,béton}$	$\sigma_{t,grave traitée}$	$\epsilon_{z,sol}$
Béton bc5: E=35'000 MPa, $\nu=0.25$							
48.5 cm	Saab 2000 (B)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	A320-200 (C)	0.0003	<0.0001	0.0007	0.0007	<0.0001	0.001
	B767-200 (D)	0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0003	<0.0001	0.0001
	A330-300 (E)	0.9563	0.0038	0.0127	4.2398	0.0205	0.0155
	Dommage cumulé	0.9563	0.0038	0.0129	4.2398	0.0205	0.0157
Béton « OACI » : E=30'000 MPa, $\nu=0.15$							
44.5 cm	Saab 2000 (B)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	A320-200 (C)	0.001	0.0014	0.0022	0.0025	0.0039	0.0033
	B767-200 (D)	0.0002	0.0001	0.0002	0.0006	0.0005	0.0003
	A330-300 (E)	0.9886	0.4289	0.0312	4.8285	2.3807	0.0391
	Dommage cumulé	0.9888	0.4291	0.0319	4.8285	2.3807	0.0396

Nous pouvons remarquer :

- Le dimensionnement avec le béton « OACI » abouti à un dommage cumulé total de 0.2605 pour une épaisseur de béton de 48.5 cm. L'épaisseur de béton peut donc être sensiblement réduite. Il est finalement proposé de diminuer l'épaisseur de la dalle de béton de 4 cm.
- Différentes caractéristiques du béton ont une influence sur les calculs de dimensionnement. Nous pouvons relever (pour une dalle de 48.5 cm) :
 - Module d'élasticité : Tout autre paramètre maintenu identique, une diminution du module d'élasticité rend la structure moins rigide et diminue le dommage. Par rapport au cas de référence (dommage de 0.9563), un module $E=30'000$ MPa entraîne un dommage cumulé total de 0.4092 au bas de la dalle de béton.
 - Caractéristiques de fatigue ($\sigma_6, -1/b$) : Tout autre paramètre maintenu identique, la modification des caractéristiques en fatigue par des performances moins élevées du béton ($\sigma_6=2.05$ MPa, $-1/b=15.5$) augmente le dommage au bas de la dalle (dommage cumulé total de 2.1677 au lieu de 0.9563 dans le cas de référence).
 - Coefficient de Poisson ν : Tout autre paramètre maintenu identique, l'utilisation d'un coefficient de Poisson de 0.15 diminue sensiblement le dommage cumulé total, ce dernier passant à 0.2497. Ce calcul illustre l'importance considérable du coefficient de Poisson sur le dimensionnement réalisé dans le Tableau 36. L'utilisation d'un béton « OACI » de module $E=30'000$ MPa, mais avec un

coefficient de Poisson de 0.25 abouti à une épaisseur nécessaire de la dalle de béton de 48.5 cm. ce qui est identique au cas de référence (dommage cumulé total au bas de la dalle de béton de 0.9522)

2.4.3.5 Variante avec deux couches de béton

Le dimensionnement du cas de base suppose une dalle de béton monobloc. Pour des raisons constructives notamment, on pourra préférer une variante comportant deux couches de béton (interface glissante entre les dalles). Un exemple de calcul avec deux couches de béton est proposé pour le cas de trafic relatif à l'hypothèse basse, 10% de cat. E. La structure modélisée est représentée dans la Figure 6 dans laquelle on pourra relever deux qualités de béton différentes (bc5 en couche de roulement, bc3 en couche de liaison avec coefficient SH=0.01 et épaisseur fixée à 25 cm).

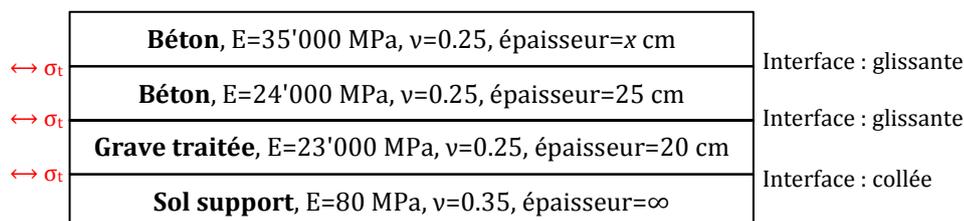


Figure 6 : Modélisation d'une structure comportant deux couches de béton

Les résultats du dimensionnement sont consignés dans le Tableau 37. La variante de référence recommande une épaisseur de 48.5 cm de béton. Le calcul avec deux dalles de béton abouti à une épaisseur de 45.0 cm pour la dalle de béton en couche de roulement, ce qui est relativement proche de l'épaisseur obtenue pour une seule dalle de béton. L'épaisseur totale de béton est donc de 70 cm ce qui est considérablement plus élevé que pour le cas de référence. Ce résultat peut être expliqué par les conditions de collage. Ce paramètre sera encore détaillé plus loin mais nous pouvons analyser:

- Le cas de base considère une interface glissante entre les deux couches d'enrobé (Figure 6) et abouti aux épaisseurs détaillés ci-dessus. Dans ce cas, la contrainte au bas de la dalle de roulement est déterminante pour le dimensionnement.
- Dans le cas d'une interface semi-collée entre les deux dalles de béton, l'épaisseur nécessaire pour la dalle de roulement est de 28 cm, une dalle de base de 25 cm étant conservée (dommage cumulé total de 1.067). L'épaisseur totale de béton est donc de 53 cm. En raison de la transmission des efforts, le critère dimensionnant est la contrainte au bas de la couche de grave traitée.
- Dans le cas d'une interface collée entre les deux dalles de béton, alors la dalle en couche de roulement peut être sensiblement réduite. Une dalle de 20 cm est requise, la dalle de béton en couche de base devant être réduite à 24 cm (dommage cumulé total 0.609). L'épaisseur totale de béton est donc de 44 cm. En raison de la transmission des efforts, le critère de dimensionnement déterminant est la contrainte au bas de la couche de grave traitée. Notons que ces conditions de collage ne semblent pas réalistes.
- Sur la base de ces résultats, nous pouvons évaluer que dans le cas d'une structure composée de deux dalles de béton, l'épaisseur totale de béton est en tous les cas supérieure au cas de calcul d'une dalle monobloc. Davantage d'analyses seraient nécessaires, mais avec une dalle de base de 25 cm, la dalle en couche de roulement devra *a priori* avoir une épaisseur d'au moins 35 cm.

Tableau 37 : Calcul d'une variante avec deux couches en béton (hypothèse basse, 10% cat. E)

Epaisseur béton	Avion (Cat.)	Dommages max selon le critère dim. Avec balayage			Dommages max selon le critère dim. Sans balayage		
		$\sigma_{t,béton\ bc5}$	$\sigma_{t,béton\ bc3}$	$\sigma_{t,grave\ traitée}$	$\sigma_{t,béton\ bc5}$	$\sigma_{t,béton\ bc3}$	$\sigma_{t,grave\ traitée}$
45.0 cm	Saab 2000 (B)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	A320-200 (C)	0.0003	<0.0001	<0.0001	0.0008	<0.0001	<0.0001
	B767-200 (D)	0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0003	<0.0001	<0.0001
	A330-300 (E)	0.9174	<0.0001	0.005	4.2159	<0.0001	0.022
	Dommage cumulé	0.9175	<0.0001	0.005	4.2159	<0.0001	0.022

2.4.3.6 Effet des conditions de collage

Comme indiqué précédemment, les différents calculs ont été réalisés en supposant une interface glissante entre la dalle de béton et la grave traitée. L'interface n'étant pas nécessairement totalement glissante, un second calcul est effectué en supposant une interface semi-collée. Le comportement réel de la chaussée se situe certainement entre ces deux situations. Les résultats sont consignés dans le Tableau 38. L'épaisseur de dalle indiquée entre parenthèse correspond au cas de référence (interface glissante). On peut relever :

- Dans le cas d'une interface semi-collée les efforts sont davantage transmis au sein du massif (continuité partielle des déplacements aux interfaces). Les sollicitations au bas de la couche de grave traitée sont donc plus importantes et elles deviennent déterminantes en vue du dimensionnement.
- Scénario de trafic hypothèse basse (2%) – 6% de cat. E : le dimensionnement de base (47 cm) abouti à un dommage de 2.43 au bas de la grave traitée, ce qui indique un sous-dimensionnement. Une augmentation de 2.5 cm de l'épaisseur de la dalle est nécessaire.
- Une tendance similaire est observée pour les autres scénarios de trafic.

Tableau 38 : Effet des conditions de collage sur le dimensionnement

Epaisseur béton	Avion (Cat.)	Dommages max selon le critère dim. Avec balayage			Dommages max selon le critère dim. Sans balayage		
		$\sigma_{t,béton}$	$\sigma_{t,grave\ traitée}$	$\epsilon_{z,sol}$	$\sigma_{t,béton}$	$\sigma_{t,grave\ traitée}$	$\epsilon_{z,sol}$
Scénario de trafic: Hypothèse basse (2%)-6% cat.E							
49.5 cm (47.0 cm)	Saab 2000 (B)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	A320-200 (C)	<0.0001	0.0005	0.0004	<0.0001	0.0012	0.0005
	B767-200 (D)	<0.0001	0.0002	<0.0001	<0.0001	0.0006	<0.0001
	A330-300 (E)	0.001	0.8402	0.0042	0.004	3.2806	0.005
	Dommages cumulés	0.001	0.8403	0.0043	0.004	3.2806	0.0052
Scénario de trafic: Hypothèse basse (2%)-10% cat.E							
50.5 cm (48.5 cm)	Saab 2000 (B)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	A320-200 (C)	<0.0001	0.0003	0.0003	<0.0001	0.0007	0.0005
	B767-200 (D)	<0.0001	0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0004	<0.0001
	A330-300 (E)	0.0012	0.9261	0.0062	0.005	3.5513	0.0075
	Dommages cumulés	0.0012	0.9262	0.0063	0.005	3.5513	0.0077
Scénario de trafic: Hypothèse haute (4%)-6% cat.E							
49.5 cm (47.5 cm)	Saab 2000 (B)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	A320-200 (C)	<0.0001	0.0006	0.0004	<0.0001	0.0014	0.0006
	B767-200 (D)	<0.0001	0.0003	<0.0001	<0.0001	0.0007	<0.0001
	A330-300 (E)	0.0011	1.0002	0.005	0.0048	3.9054	0.006
	Dommages cumulés	0.0011	1.0003	0.0051	0.0048	3.9054	0.0062
Scénario de trafic: Hypothèse haute (4%)-10% cat.E							
51 cm (49.0 cm)	Saab 2000 (B)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	A320-200 (C)	<0.0001	0.0003	0.0004	<0.0001	0.0007	0.0005
	B767-200 (D)	<0.0001	0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0004	<0.0001
	A330-300 (E)	0.0012	0.8988	0.007	0.0051	3.4154	0.0085
	Dommages cumulés	0.0012	0.8989	0.0071	0.0051	3.4154	0.0086

La transmission des efforts est très largement influencée par la modélisation des conditions d'interface. Ceci est illustré dans la Figure 7 et la Figure 8 qui représentent la contrainte maximale pour l'avion B777-300-ER et le cas de trafic hypothèse basse (2%), 6% d'avions de catégorie E. Nous pouvons remarquer :

- Interface béton-grave traitée glissante : La sollicitation déterminante pour le dimensionnement est la contrainte de traction par flexion au bas de la dalle de béton ; les contraintes de traction au bas de la grave traitée sont en effet négligeables.
- Interface béton-grave traitée semi-collée : En raison du collage partiel, la transmission des efforts a lieu entre le béton et la grave traitée. La sollicitation déterminante pour le dimensionnement est alors la contrainte de traction au bas de la grave traitée.

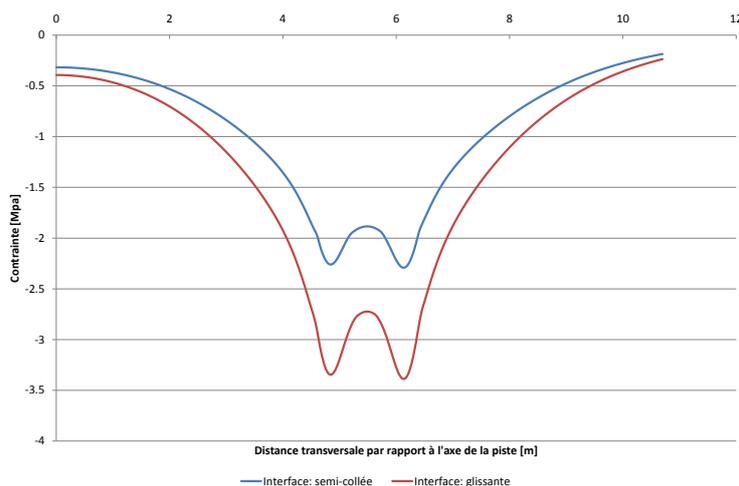


Figure 7 : Représentation de la contrainte maximale ($x_{\min}=31.220$, $y_{\min}=6.15$) selon l'axe transversal Oy, au bas de la dalle de béton (dalle 47 cm, trafic hypothèse basse, 6% de cat.E)

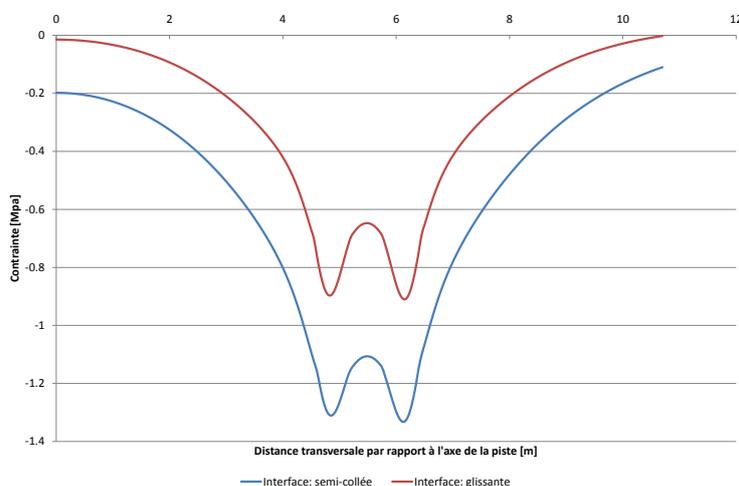


Figure 8 : Représentation de la contrainte maximale ($x_{\min}=31.220$, $y_{\min}=6.15$) selon l'axe transversal Oy, au bas de la grave traitée (dalle 47 cm, trafic hypothèse basse, 6% de cat.E)

2.4.3.7 Effet de l'épaisseur de grave traitée aux liants hydrauliques

Comme mentionné précédemment, une épaisseur de 20 cm de grave traitée est utilisée dans le cas de référence. La normalisation SN 640 491 (remplace SN 640 509a) recommande pour ce type de matériau une épaisseur située entre 150 mm et 300 mm; la méthode française de dimensionnement des chaussées routières recommandant une épaisseur minimale de 150 mm.

L'impact d'une modification de l'épaisseur de la grave non traitée est largement dépendant des conditions de collage. Dans le cas d'une interface béton – grave traitée glissante ou semi-collée, le comportement suivant est observé : Une augmentation de l'épaisseur de grave traitée diminue les sollicitations dans le béton, mais augmente les sollicitations au bas de la grave traitée. Le critère de dommage relatif à la grave traitée devient alors déterminant et non plus la contrainte au bas de la dalle en béton. Ceci est illustré dans le Tableau 39 qui contient les résultats de dimensionnement avec 20 cm et 30 cm de grave, pour les deux scénarios de trafic extrêmes. Dans ce tableau, la désignation « REF » correspond au calcul du cas de base calculé dans le Tableau 28 et le Tableau 31. On remarque donc que l'augmentation de l'épaisseur de grave ne permet pas de diminuer de manière substantielle l'épaisseur de la dalle de béton, le gain

maximal étant de 1 cm pour le scénario de trafic avec hypothèse haute. Ces résultats sont par ailleurs consistants avec les résultats obtenus avec les calculs selon la méthode OACI (diminution de l'épaisseur de la dalle de béton de 1.2 cm)

Tableau 39 : Effet de l'épaisseur de grave – Calcul du dommage cumulé total avec balayage

Scénario de trafic	Epaisseur béton	Epaisseur grave	Dommage maximal, avec balayage	
			$\sigma_{t,\text{béton}}$	$\sigma_{t,\text{grave traitée}}$
Hypothèse basse (2%), 6% cat. E	47 cm (REF)	20 cm (REF)	0.978	0.006
	47 cm (REF)	30 cm	0.246	0.730
	46 cm	30 cm	0.331	1.301
Hypothèse haute (4%), 10% cat. E	49 cm (REF)	20 cm (REF)	0.954	0.003
	49 cm (REF)	30 cm	0.269	0.461
	48 cm	30 cm	0.363	0.816
	47 cm	30 cm	0.489	1.449

2.4.4 *Chaussée souple*

Comme détaillé précédemment, l'utilisation d'une couche de grave traitée est requise pour ce projet. Ce type de structure, appelé structure mixte, est modélisé selon les hypothèses suivantes :

- Lors de la mise en service, les couches sont collées et l'on a alors une continuité des déplacements aux interfaces. Dans ce cas, les matériaux de fondation (i.e. grave traitée) sont les plus sollicités.
- Après un certain temps, la couche de grave traitée est endommagée par fatigue et un glissement se produit à l'interface avec la couche d'enrobé (EME2). Dans ce cas, le module de la couche de fondation traitée chute et on retiendra pour le dimensionnement une valeur de 1/5 son module initial, soit 4'600 MPa. Dans cette seconde phase, les matériaux bitumineux sont endommagés par fatigue et la fondation évolue très peu.

Conformément au mode de dégradation explicité ci-dessus, on suppose une couche de grave traitée endommagée et donc une sollicitation par fatigue de l'enrobé bitumineux. Les modes de dégradation considérés sont donc l'orniérage du sol support ainsi que la fatigue au bas des couches bitumineuses.

Par souci de comparaison avec le dimensionnement « OACI » de chaussées souples réalisé précédemment, on suppose une épaisseur de 5 cm pour le béton bitumineux en couche de roulement ; cette couche ne participant que peu (pas) à la résistance mécanique de la chaussée. Pour la couche de grave traitée, nous choisissons une épaisseur de 25 cm pour le cas de référence, et non pas 20 cm comme pour la méthode de calcul « OACI ». Ce choix permet d'économiser une certaine épaisseur de matériaux bitumineux. L'analyse de sensibilité réalisée au chapitre 2.4.4.5 permettra de compléter l'analyse.

Un schéma de la structure de base pour le dimensionnement est présenté dans la Figure 9, l'épaisseur d'enrobé EME2 étant à déterminer. Pour des raisons constructives, l'épaisseur d'enrobé à module élevé est généralement comprise entre 8 cm et 12 cm. Ainsi, dans le cas d'épaisseurs supérieures à 12 cm, on modélisera différentes couches d'EME, avec des conditions de collage parfait entre les couches bitumineuses.

	BB , $E(15^{\circ}\text{C}, 10\text{Hz})=5'400$ MPa, $\nu=0.35$, ép.=5 cm	Interface : collée
	EME2 , $E(15^{\circ}\text{C}, 10\text{Hz})=14'000$ MPa, $\nu=0.35$, ép.=x cm	Interface : collée
$\leftrightarrow \varepsilon_t$	Grave traitée , $E=23'000$ (4'600) MPa, $\nu=0.25$, épaisseur=25 cm	Interface : collée (glissante)
$\downarrow \varepsilon_z$	Sol support , $E=80$ MPa, $\nu=0.35$, épaisseur= ∞	

Figure 9 : Chaussée souple de référence pour modélisation multicouche

Le résultat du dimensionnement pour l'hypothèse basse (2%), 6% d'appareils catégorie E est présenté dans le Tableau 40.

Tableau 40 : Dimensionnement selon méthode multicouche – Hypothèse basse (2%)-6% cat. E

Epaisseur EME2	Avion (Cat.)	Dommages max selon le critère dim. Avec balayage		Dommages max selon le critère dim. Sans balayage	
		$\varepsilon_{t,EME}$	$\varepsilon_{z,sol}$	$\varepsilon_{t,EME}$	$\varepsilon_{z,sol}$
22.5 cm	Saab 2000 (B)	0.0016	0.0004	0.0045	0.0011
	A320-200 (C)	0.8697	0.2114	1.7788	0.3863
	B767-200 (D)	0.013	0.0105	0.0347	0.0203
	B777-300-ER (E)	0.3227	0.3469	1.2582	0.7412
	Dommages cumulés	1.0091	0.4156	1.8295	0.7621

- Un calcul avec une épaisseur de 20 cm de grave traitée indique une épaisseur nécessaire d'enrobé (EME2) de 25 cm, soit 2.5 cm de plus.
- Le mode de dégradation déterminant est la fatigue au bas des couches bitumineuses. L'orniérage du sol support ne doit cependant pas être négligé (voir dommages cumulés).
- Contrairement aux calculs précédents, la contribution majeure au dommages cumulés total est liée aux appareils de catégorie C, les avions de catégorie E ayant également une contribution substantielle au dommages cumulés total.

Tableau 41 : Dimensionnement selon méthode multicouche – Hypothèse basse (2%)-10% cat. E

Epaisseur EME2	Avion (Cat.)	Dommages max selon le critère dim. Avec balayage		Dommages max selon le critère dim. Sans balayage	
		$\varepsilon_{t,EME}$	$\varepsilon_{z,sol}$	$\varepsilon_{t,EME}$	$\varepsilon_{z,sol}$
23.5 cm	Saab 2000 (B)	0.0013	0.0003	0.0036	0.0009
	A320-200 (C)	0.7399	0.1717	1.4909	0.3104
	B767-200 (D)	0.0114	0.0089	0.0301	0.017
	B777-300-ER (E)	0.4785	0.5025	1.8439	1.0477
	Dommages cumulés	0.9649	0.5453	1.8839	1.0646

- Un calcul avec une épaisseur de 20 cm de grave traitée indique une épaisseur nécessaire d'enrobé EME2 de 25.5 cm soit 2 cm de plus que pour le cas de référence avec 25 cm de grave traitée.
- Comme précédemment, le dommages cumulés total est principalement causé par les appareils de catégorie C et E.

Tableau 42 : Dimensionnement selon méthode multicouche – Hypothèse haute (4%)-6% cat. E

Épaisseur EME2	Avion (Cat.)	Dommages max selon le critère dim. Avec balayage		Dommages max selon le critère dim. Sans balayage	
		$\epsilon_{t,EME}$	$\epsilon_{z,sol}$	$\epsilon_{t,EME}$	$\epsilon_{z,sol}$
24.0 cm	Saab 2000 (B)	0.0015	0.001	0.004	0.0004
	A320-200 (C)	0.8455	0.3453	1.6913	0.192
	B767-200 (D)	0.0133	0.0192	0.0348	0.0102
	B777-300-ER (E)	0.3358	0.7183	1.2859	0.3489
	Dommages cumulés	0.9923	0.7401	1.7448	0.4076

- Un calcul avec une épaisseur de 20 cm de grave traitée indique une épaisseur nécessaire d'enrobé (EME2) de 26 cm, soit 2 cm de plus que pour le cas de référence avec 25 cm de grave.

Tableau 43 : Dimensionnement selon méthode multicouche – Hypothèse haute (4%)-10% cat. E

Épaisseur EME2	Avion (Cat.)	Dommages max selon le critère dim. Avec balayage		Dommages max selon le critère dim. Sans balayage	
		$\epsilon_{t,EME}$	$\epsilon_{z,sol}$	$\epsilon_{t,EME}$	$\epsilon_{z,sol}$
24.5 cm	Saab 2000 (B)	0.0013	0.0003	0.0036	0.0009
	A320-200 (C)	0.7788	0.1731	1.5469	0.3099
	B767-200 (D)	0.0125	0.0094	0.0324	0.0176
	B777-300-ER (E)	0.5279	0.5429	2.0085	1.1039
	Dommages cumulés	1.0304	0.5856	2.055	1.1234

- Un calcul avec une épaisseur de 20 cm de grave traitée indique une épaisseur nécessaire d'enrobé (EME2) de 27 cm.
- L'épaisseur totale d'enrobé EME étant de 24.5 cm, la modélisation a été faite avec deux couches de respectivement 12 cm et 12.5 cm. Ces épaisseurs sont à la limite de l'épaisseur maximale recommandée pour une couche avec ce type de matériau.
- Critère déterminant est toujours la fatigue au bas des couches bitumineuses ; mais l'orniérage est tout de même un mode de dégradation déterminant.

Tableau 44 : Synthèse des résultats de dimensionnement de chaussées rigides selon la méthode rationnelle (méthode multicouche)

Scénario	Ep,min EME2 [cm]	Ep,min EME2 [cm]
	(25 cm GT)	(20 cm GT)
Hypothèse basse (2%)-6% cat.E	22.5	25.0
Hypothèse basse (2%)-10% cat.E	23.5	25.5
Hypothèse haute (4%)-6% cat.E	24.0	26.0
Hypothèse haute (4%)-10% cat.E	24.5	27.0

Nous pouvons remarquer :

- Les résultats sont globalement homogènes et les tendances comparables aux observations effectuées précédemment. Ces résultats sont par ailleurs comparables à ceux obtenus dans le cadre de [10].
- Les épaisseurs d'enrobé nécessaires selon le calcul multicouche sont plus importantes que pour le calcul selon méthode « OACI » (18 cm à 20 cm).
- Le calcul selon une méthode multicouche permet une meilleure prise en compte des matériaux, de leurs caractéristiques intrinsèques, des conditions de collage ainsi que des

modes de dégradations des chaussées. Ces résultats sont donc certainement plus ajustés que les calculs selon la méthode « OACI ».

2.4.4.1 Calcul d'une variante avec AC T

Les enrobés de type AC T peuvent également être utilisés en couche de base, à la place de l'enrobé à module élevé (EME2). L'incidence d'un tel choix est illustrée dans le Tableau 45 où l'épaisseur indiquée entre parenthèse correspond au cas avec EME.

Tableau 45 : Chaussées souples – Calcul de variantes avec AC T

Epaisseur AC T (EME2)	Avion (Cat.)	Dommmage max selon le critère dim. Avec balayage		Dommmage max selon le critère dim. Sans balayage	
		$\epsilon_{t,EME}$	$\epsilon_{z,sol}$	$\epsilon_{t,EME}$	$\epsilon_{z,sol}$
Scénario de trafic: Hypothèse basse (2%)-6% cat.E					
33 cm (22.5 cm)	Saab 2000 (B)	0.0011	<0.0001	0.003	0.0003
	A320-200 (C)	0.7833	0.056	1.4379	0.0966
	B767-200 (D)	0.0152	0.0037	0.0357	0.0065
	B777-300-ER (E)	0.4088	0.1456	1.4356	0.2685
	Dommmage cumulé	0.9718	0.1609	1.5102	0.278
Scénario de trafic : Hypothèse haute (4%)-10% cat.E					
35 cm (24.5 cm)	Saab 2000 (B)	0.001	<0.0001	0.0026	0.0002
	A320-200 (C)	0.7232	0.0496	1.2978	0.0844
	B767-200 (D)	0.015	0.0035	0.0341	0.006
	B777-300-ER (E)	0.6897	0.2414	2.3437	0.429
	Dommmage cumulé	1.0885	0.2535	2.411	0.4382

Nous pouvons relever :

- Tous les calculs sont réalisés avec une épaisseur de 25 cm de grave.
- Etant donné l'épaisseur d'enrobé AC T nécessaire, la couche bitumineuse a été décomposée en trois couches pour la modélisation.
- Hypothèse basse, 6% de cat. E : Le dimensionnement de base (22.5 cm) abouti à un dommage cumulé total de 4.15 dans le cas où un enrobé AC T est utilisé. Ceci est cohérent étant donné que ce type d'enrobé présente un module plus faible et possède des performances en fatigue moins élevées. L'épaisseur d'AC T finalement nécessaire est de 10.5 cm plus importante que l'épaisseur d'EME, ce qui représente une augmentation de 46%. Nous pouvons également rappeler que le coefficient d'équivalence de l'EME (2.8) est 40% plus élevé que celui de l'enrobé AC T (2).
- Hypothèse haute, 10% : Le dimensionnement de base (24.5 cm) abouti à un dommage cumulé total de 12.38 dans le cas où un enrobé AC T est utilisé. L'augmentation de l'épaisseur d'enrobé est de 10.5 cm, soit 43% de l'épaisseur initiale d'EME calculée pour la solution de base.
- Ces calculs illustrent bien l'effet de l'EME qui permet de considérablement diminuer l'épaisseur de matériaux bitumineux nécessaire.
- Un calcul avec un béton bitumineux aéronautique (BBA) aurait également été possible, les résultats n'étant pas fondamentalement différents à ceux présentés ici.

2.4.4.2 Utilisation du A330-300 au lieu du B777-300-ER (catégorie E)

Les résultats de l'utilisation du A330-300 au lieu du B777-300-ER sont présentés dans le Tableau 46 où le chiffre entre parenthèse indique le résultats du cas de référence (avec B777-300-ER) :

- Hypothèse basse, 6% cat. E : Avec une épaisseur de 22.5 cm d'enrobé EME, le dommage cumulé total (avec balayage) est de 0.98 (1.09 pour le cas de référence). Ceci illustre l'agressivité moins importante de l'Airbus A330. L'épaisseur d'enrobé pourrait être très légèrement diminuée, mais ceci n'est pas significatif.
- Hypothèse basse (2%), 10% cat. E : Le calcul avec une épaisseur de 23.5 cm d'enrobé (cas de référence), mais avec l'Airbus A 330-300 abouti à un dommage cumulé total de 0.91. Le dommage est donc légèrement inférieur au cas de référence. L'épaisseur d'enrobé peut être diminuée de 0.5 cm (2.1%).
- Hypothèse haute (4%), 6% cat. E : Le calcul avec une épaisseur de 24.0 cm d'enrobé (cas de référence), mais avec l'Airbus A 330-300 abouti à un dommage cumulé total 0.96. L'épaisseur de la chaussée ne peut pas être diminuée de manière significative.
- Hypothèse haute (4%), 6% cat. E : Le dimensionnement de base (24.5 cm) mais avec l'Airbus A 330-300 abouti à un dommage cumulé total de 0.97. Les épaisseurs du cas de base sont conservées.
- Nous pouvons finalement remarquer que la prise en compte de l'Airbus A330 au lieu du B777 ne modifie pas de manière significative le dimensionnement pour ce type de chaussées. La différence est également plus faible que pour la méthode de calcul « OACI ».

Tableau 46 : Dimensionnement rationnel, chaussée souple – A330-300 pour catégorie E

Epaisseur EME2	Avion (Cat.)	Dommage max selon le critère dim. Avec balayage		Dommage max selon le critère dim. Sans balayage	
		$\epsilon_{t,EME}$	$\epsilon_{z,sol}$	$\epsilon_{t,EME}$	$\epsilon_{z,sol}$
Scénario de trafic: Hypothèse basse (2%)-6% cat.E					
22.5 cm (22.5 cm)	Saab 2000 (B)	0.0016	0.0004	0.0045	0.0011
	A320-200 (C)	0.8697	0.2114	1.7788	0.3863
	B767-200 (D)	0.013	0.0105	0.0347	0.0203
	A330-300 (E)	0.2424	0.1682	0.6417	0.3478
	Dommage cumulé	0.9858	0.3001	1.8604	0.4443
Scénario de trafic : Hypothèse basse (2%)-10% cat.E					
23.0 cm (23.5 cm)	Saab 2000 (B)	0.0015	0.0004	0.004	0.001
	A320-200 (C)	0.8025	0.1905	1.6289	0.3462
	B767-200 (D)	0.0122	0.0097	0.0323	0.0185
	A330-300 (E)	0.3774	0.2586	0.9931	0.5295
	Dommage cumulé	0.9885	0.3474	1.7401	0.5757
Scénario de trafic : Hypothèse haute (4%)-6% cat.E					
24.0 cm (24.0 cm)	Saab 2000 (B)	0.0015	0.0004	0.004	0.001
	A320-200 (C)	0.8455	0.192	1.6913	0.3453
	B767-200 (D)	0.0133	0.0102	0.0348	0.0192
	A330-300 (E)	0.2448	0.1639	0.6368	0.3292
	Dommage cumulé	0.9633	0.2799	1.776	0.4034
Scénario de trafic : Hypothèse haute (4%)-10% cat.E					
24.5 cm (24.5 cm)	Saab 2000 (B)	0.0013	0.0003	0.0036	0.0009
	A320-200 (C)	0.7788	0.1731	1.5469	0.3099
	B767-200 (D)	0.0125	0.0094	0.0324	0.0176
	A330-300 (E)	0.3808	0.2523	0.9854	0.5021
	Dommage cumulé	0.9678	0.3302	1.664	0.5465

2.4.4.3 Effet de la durée de service de la chaussée

Selon les recommandations de la méthode française, la durée de service d'une chaussée aéronautique souple est généralement de 10 ans. Nous proposons un calcul additionnel pour une durée de service de 10 ans et respectivement 30 ans. Les calculs sont réalisés pour un seul scénario de trafic ; les détails de trafic étant disponibles dans le Tableau 23.

Tableau 47 : Dimensionnement selon méthode rationnelle - chaussées souples : Effet de la durée de service de la chaussée (hypothèse basse, 10% cat. E)

Epaisseur EME2	Avion (Cat.)	Dommmage max selon le critère dim. Avec balayage		Dommmage max selon le critère dim. Sans balayage	
		$\epsilon_{t,EME}$	$\epsilon_{z,sol}$	$\epsilon_{t,EME}$	$\epsilon_{z,sol}$
Durée de service : 10 ans					
18 cm	Saab 2000 (B)	0.0019	0.0006	0.0055	0.0016
	A320-200 (C)	0.8051	0.2551	1.7794	0.4943
	B767-200 (D)	0.0104	0.0104	0.0299	0.0217
	B777-300-ER (E)	0.4215	0.525	1.718	1.2546
	Dommmage cumulé	0.9926	0.5976	1.8241	1.2705
Durée de service : 20 ans (REF)					
23.5 cm	Saab 2000 (B)	0.0013	0.0003	0.0036	0.0009
	A320-200 (C)	0.7399	0.1717	1.4909	0.3104
	B767-200 (D)	0.0114	0.0089	0.0301	0.017
	B777-300-ER (E)	0.4785	0.5025	1.8439	1.0477
	Dommmage cumulé	0.9649	0.5453	1.8839	1.0646
Durée de service : 30 ans					
27 cm	Saab 2000 (B)	0.0011	0.0003	0.0029	0.0007
	A320-200 (C)	0.6816	0.1379	1.3089	0.2412
	B767-200 (D)	0.0121	0.0084	0.03	0.0151
	B777-300-ER (E)	0.523	0.5152	1.9237	0.9848
	Dommmage cumulé	0.9406	0.5486	1.9736	1.0057

- Durée de service de 10 ans : Le calcul selon le dimensionnement du cas de référence (23.5 cm enrobé) indique un dommmage cumulé total de 0.45. L'épaisseur de la chaussée peut donc être diminuée de 5.5 cm soit 23.4%.
- Durée de service de 30 ans : Le calcul selon le dimensionnement du cas de référence (23.5 cm enrobé) indique un dommmage cumulé total de 1.58. L'épaisseur de la chaussée doit donc être augmentée afin de supporter le trafic prévu sur une durée de 30 ans. Notons que nous aurions également pu modifier l'épaisseur de grave traitée, ce qui sera fait dans une analyse ultérieure.

2.4.4.4 Effet du balayage

Les calculs réalisés considèrent par défaut un balayage de 1.5 m. Les avions de catégorie élevée ayant habituellement un balayage plus faible, nous effectuons deux hypothèses de balayage réduit pour les avions de catégorie D et E.

Tableau 48 : Analyse de l'effet du balayage sur les résultats du dimensionnement de chaussées souples (Hyp. basse, 10% cat. E)

Epaisseur EME2	Avion (Cat.)	Dommages max selon le critère dim. Avec balayage		Dommages max selon le critère dim. Sans balayage	
		$\epsilon_{t,EME}$	$\epsilon_{z,sol}$	$\epsilon_{t,EME}$	$\epsilon_{z,sol}$
Balayage : 1.5 m (REF)					
23.5 cm	Saab 2000 (B)	0.0013	0.0003	0.0036	0.0009
	A320-200 (C)	0.7399	0.1717	1.4909	0.3104
	B767-200 (D)	0.0114	0.0089	0.0301	0.017
	B777-300-ER (E)	0.4785	0.5025	1.8439	1.0477
	Dommages cumulés	0.9649	0.5453	1.8839	1.0646
Balayage : 0.75 m pour avions catégories D et E					
24 cm	Saab 2000 (B)	0.0012	0.0003	0.0032	0.0008
	A320-200 (C)	0.6819	0.1548	1.3641	0.2785
	B767-200 (D)	0.0129	0.01	0.028	0.0155
	B777-300-ER (E)	0.6342	0.5541	1.7284	0.9655
	Dommages cumulés	1.039	0.6345	1.7672	0.9819
Balayage : 0 m pour avions catégories D et E					
31 cm	Saab 2000 (B)	0.0004	<0.0001	0.001	0.0002
	A320-200 (C)	0.2652	0.0392	0.4822	0.0689
	B767-200 (D)	0.0126	0.005	0.0126	0.005
	B777-300-ER (E)	0.8434	0.3507	0.8434	0.3507
	Dommages cumulés	0.9818	0.3734	0.868	0.3576

- Balayage 0.75 m : Le calcul selon le dimensionnement de référence (23.5 cm EME2) abouti à un dommage cumulé total (avec balayage) de 1.11. Ceci est trop élevé et l'épaisseur d'enrobé doit être augmentée de 0.5 cm (2.1%).
- Balayage 0 m : Le calcul selon le dimensionnement de référence (23.5 cm EME2) abouti à un dommage cumulé total (avec balayage) de 2.23. Bien que non réaliste, ce cas illustre l'importance du balayage des gros avions et son incidence sur les sollicitations et donc le dimensionnement de la chaussée. L'épaisseur d'enrobé nécessaire doit être augmentée de 7.5 cm (31.9%).

2.4.4.5 Effet de l'épaisseur de grave traitée aux liants hydrauliques

Le cas de référence est calculé avec une épaisseur de grave traitée de 25 cm. Des calculs ont également été proposés avec une épaisseur de 20 cm de grave traitée. Nous supposons des conditions identiques au calcul de référence, soit une couche de grave traitée endommagée (module réduit) avec interface glissante. Le critère de dimensionnement est donc la fatigue au bas des couches bitumineuses (Tableau 49).

- Par rapport au cas de référence, une diminution de l'épaisseur de grave traitée de 5 cm a pour conséquence une augmentation des sollicitations et donc un dommage cumulé total de 1.37 (sous-dimensionnement). L'épaisseur d'enrobé doit être augmentée de 1.5 cm afin de supporter les sollicitations au cours de la durée de service.
- Dans le cas d'une augmentation de l'épaisseur de grave traitée (30 cm), l'épaisseur nécessaire d'enrobé bitumineux peut être diminuée de 3.5 cm soit 14.9%. Cette diminution n'est pas négligeable financièrement.
- Dans le cas d'une épaisseur de grave de 40 cm, le critère déterminant devient la déformation verticale au sommet du sol support et non plus la fatigue au bas des couches

bitumineuses. La diminution de l'épaisseur d'enrobé a pour conséquence d'augmenter le dommage au bas des couches bitumineuses, mais tout en restant inférieure à un dommage cumulé de 1, alors que dans le même temps la déformation verticale au sommet du sol support devient déterminante. Dans ce cas, l'épaisseur d'enrobé mécaniquement nécessaire est uniquement le minimum constructif soit 8 cm pour des EME (SN 640 430b).

Tableau 49 : Analyse de l'effet de l'épaisseur de grave traitée sur les résultats du dimensionnement de chaussées souples (Hyp. Basse, 10% cat. E)

Epaisseur EME2	Avion (Cat.)	Dommage max selon le critère dim. Avec balayage		Dommage max selon le critère dim. Sans balayage	
		$\epsilon_{t,EME}$	$\epsilon_{z,sol}$	$\epsilon_{t,EME}$	$\epsilon_{z,sol}$
Epaisseur de grave : 20 cm					
25.0 cm	Saab 2000 (B)	0.0013	0.0003	0.0036	0.0007
	A320-200 (C)	0.8036	0.1413	1.5661	0.2629
	B767-200 (D)	0.0128	0.0078	0.0325	0.0152
	B777-300-ER (E)	0.5345	0.4436	2.0063	0.9462
	Dommage cumulé	1.0571	0.4787	2.0566	0.9582
Epaisseur de grave : 25 cm (REF)					
23.5 cm	Saab 2000 (B)	0.0013	0.0003	0.0036	0.0009
	A320-200 (C)	0.7399	0.1717	1.4909	0.3104
	B767-200 (D)	0.0114	0.0089	0.0301	0.017
	B777-300-ER (E)	0.4785	0.5025	1.8439	1.0477
	Dommage cumulé	0.9649	0.5453	1.8839	1.0646
Epaisseur de grave : 30 cm					
20 cm	Saab 2000 (B)	0.0017	0.0005	0.0048	0.0014
	A320-200 (C)	0.7566	0.2529	1.6608	0.4548
	B767-200 (D)	0.0111	0.0118	0.0318	0.0224
	B777-300-ER (E)	0.4626	0.6435	1.8878	1.3585
	Dommage cumulé	0.9707	0.7081	1.9122	1.3811

2.4.4.6 Effet de la vitesse des avions

La vitesse des avions influence la fréquence de sollicitation et par conséquent le module des couches bitumineuses (dépendance fréquence-température). Les hypothèses du cas de référence sont globalement situées du côté de la sécurité en ce qui concerne la vitesse des différents appareils. Pour rappel, le cas de référence considère une vitesse de 60 km/h pour les avions de catégorie B et C et 30 km/h pour les avions de catégorie D et E. Trois variantes sont calculées, afin d'analyser l'effet de la vitesse des avions sur le dimensionnement :

- Variante 1 : 40 nœuds au maximum (74 km/h) pour les avions de catégorie B et C, 50 km/h pour les avions de catégorie D et E.

Avec une augmentation de la vitesse des avions, la fréquence de sollicitation augmente également et par conséquent le module des matériaux bitumineux est également plus élevé. En conséquence, le dommage cumulé total est plus faible pour le cas de référence (23.5 cm EME2) ; un dommage de 0.95 est calculé. L'épaisseur de couche bitumineuse peut être légèrement diminuée (0.5 cm). Nous pouvons ajouter qu'une vitesse de 50 nœuds (93 km/h) aboutira également à une épaisseur légèrement plus faible que pour le cas de référence.

- Variante 2 : 50 km/h pour les avions de catégorie B et C et 20 km/h pour les avions de catégorie D et E.

Cette variante suppose une diminution de la vitesse et le mécanisme est donc opposé à la première variante. La fréquence de sollicitation étant plus faible, le module des matériaux bitumineux diminue. Conséquence de cette diminution du module, le dommage cumulé total est plus élevé. Un dommage de 0.98 est calculé pour le cas de référence (23.5 cm enrobé). L'épaisseur des différentes couches est donc conservée.

- Variante 3 : Vitesse de 10 km/h pour l'ensemble des avions.

Cette troisième variante suppose une vitesse spécifiquement faible des différents avions, diminuant également la fréquence de sollicitation. Notons que ce cas n'est pas totalement réaliste et il sera plutôt adapté aux aires de stationnement. Il permet cependant d'évaluer l'impact sur les sollicitations (et donc le dimensionnement) d'une vitesse réduite des appareils. Le calcul du cas de référence abouti à un dommage cumulé total de 1.08. L'épaisseur des couches bitumineuses doit donc être très légèrement augmentée. Une épaisseur de 24 cm d'enrobé EME s'avère suffisante.

Tableau 50 : Analyse de l'effet de la vitesse des avions sur les résultats du dimensionnement de chaussées souples (Hyp. Basse, 10% cat. E)

Epaisseur EME2	Avion (Cat.)	Dommage max selon le critère dim. Avec balayage		Dommage max selon le critère dim. Sans balayage	
		$\epsilon_{t,EME}$	$\epsilon_{z,sol}$	$\epsilon_{t,EME}$	$\epsilon_{z,sol}$
Vitesse des avions : REF					
23.5 cm	Saab 2000 (B)	0.0013	0.0003	0.0036	0.0009
	A320-200 (C)	0.7399	0.1717	1.4909	0.3104
	B767-200 (D)	0.0114	0.0089	0.0301	0.017
	B777-300-ER (E)	0.4785	0.5025	1.8439	1.0477
	Dommage cumulé	0.9649	0.5453	1.8839	1.0646
Vitesse des avions : Variante 1					
23.0 cm	Saab 2000 (B)	0.0014	0.0004	0.0039	0.0009
	A320-200 (C)	0.787	0.1786	1.5923	0.3236
	B767-200 (D)	0.0119	0.0086	0.0313	0.0162
	B777-300-ER (E)	0.499	0.4842	1.9185	1.0024
	Dommage cumulé	1.0205	0.529	1.9606	1.0198
Vitesse des avions : Variante 2					
23.5 cm	Saab 2000 (B)	0.0014	0.0004	0.0037	0.001
	A320-200 (C)	0.7529	0.1816	1.5214	0.3293
	B767-200 (D)	0.0116	0.0099	0.0308	0.0189
	B777-300-ER (E)	0.4848	0.5468	1.8801	1.1573
	Dommage cumulé	0.9803	0.5921	1.9194	1.1744
Vitesse des avions : Variante 3					
24.0 cm	Saab 2000 (B)	0.0015	0.0006	0.0042	0.0015
	A320-200 (C)	0.7985	0.2653	1.6437	0.4905
	B767-200 (D)	0.0112	0.0108	0.03	0.0207
	B777-300-ER (E)	0.4677	0.5893	1.8226	1.2634
	Dommage cumulé	1.0125	0.6596	1.859	1.2831

2.5 Sélection de variantes de chaussées

Sur la base des différents calculs et analyses de sensibilité réalisées, il est maintenant possible de proposer des épaisseurs de chaussées mécaniquement nécessaires afin de supporter le trafic au cours de la durée de service de l'infrastructure. Les aspects relatifs au gel seront traités dans le chapitre 2.6.

La proposition des structures de chaussées est également basée sur les discussions lors des deux séances de suivi ainsi que sur la philosophie générale des gestionnaires de l'aéroport selon laquelle un léger sur-dimensionnement est préféré afin de garantir des performances mécaniques suffisantes. Il est en effet crucial de limiter au maximum les futures interruptions de trafic. Ce léger sur-dimensionnement permet également de prévenir l'effet lié à l'évolution future des charges et des atterrisseurs.

Il est utile de rappeler ici que les calculs de dimensionnement ont été réalisés avec prise en compte de la masse maximale au roulage des différents appareils, et non pas de la masse maximale à l'atterrissage, ce qui positionne l'étude du côté de la sécurité. Le PCN des chaussées finalement sélectionnées sera calculé au chapitre 2.7.

2.5.1 *Chaussée rigide*

Les chaussées rigides constituent la majorité des structures de l'aéroport de Genève. A l'exception du taxiway Fox, l'ensemble des taxiways sont en béton. Cette variante de structure sera donc préférée par les gestionnaires pour le cas du taxiway C2.

Les calculs selon la méthode française (OACI) aboutissent à des épaisseurs de dalle de béton plus faibles, l'épaisseur maximale calculée étant de 35.9 cm. Les résultats issus de la modélisation multicouche apportent des éléments intéressants permettant notamment de mieux analyser l'impact de la qualité des matériaux ainsi que celui des conditions de collage aux interfaces. Sur la base des différents calculs, nous retenons finalement deux variantes de chaussées rigides, dénommées CR1 et CR2 en fonction de l'épaisseur de grave traitée.

Tableau 51 : Proposition de structures rigides mécaniquement nécessaires

Variante	CR1	CR2
Epaisseur béton	48 cm	47 cm
Epaisseur grave traitée	20 cm	30 cm

Nous pouvons ajouter :

- La proposition initiale [3] basée sur l'expérience ainsi que les premiers calculs aboutit à une épaisseur de 45 cm de béton (40 cm nécessaire, marge de 5 cm additionnels). Il est donc choisi de ne pas aller en deça de 40 cm de béton pour les propositions finales de chaussées.
- Dans le cas d'une épaisseur de grave traitée de 20 cm, la méthode « OACI » indique une épaisseur maximale de béton de 36 cm mécaniquement nécessaire. Les calculs optimisés selon la méthode multicouche prennent en considération les conditions de collage et le type de dalle de béton notamment. Ils sont donc davantage précis et contiennent des développements plus récents en termes de comportement mécanique des matériaux. Sur cette base, on privilégie principalement les résultats obtenus selon cette seconde méthode de calcul, bien qu'elle ne fasse pas partie des recommandations officielle de l'OACI. Les calculs optimisés avec une méthode multicouche aboutissent à des épaisseurs

sensiblement plus élevées, ce qui est conforme aux attentes. Sur la base des scénarios de trafic et analyses de sensibilité, une épaisseur de béton de 48 cm est finalement proposée. Ce choix offre un bon compromis au vu des différentes analyses de sensibilité.

- L'augmentation de l'épaisseur de grave traitée (variante CR2) permet de diminuer que très légèrement l'épaisseur de la dalle de béton nécessaire. La méthode OACI indique une diminution d'épaisseur de 1.2 cm (Tableau 14). Considérant les calculs additionnels réalisés, une diminution de l'épaisseur de la dalle de béton de 1 cm est proposée, l'épaisseur finalement choisie étant de 47 cm.
- On relèvera que ces propositions de structures sont relativement conservatrices ; une épaisseur de 45 cm étant probablement suffisante.
- Un calcul avec une épaisseur de grave traitée de 40 cm a également été réalisé. Le gain au niveau de l'épaisseur de la dalle de béton est faible comparativement à une épaisseur de 30 cm de grave traitée. Par ailleurs, considérant la normalisation et les recommandations constructives, il ne serait pas recommandé de recourir à une épaisseur de 40 cm de grave traitée.

2.5.2 Chaussée souple

Comme illustré précédemment, la méthode de calcul de l'OACI (méthode française) a montré ses limites, et ceci en particulier dans le cas de chaussées souples. La prise en compte des différents types de matériaux et de leurs caractéristiques intrinsèques, des conditions aux interfaces, de la vitesse des avions etc est réalisée à l'aide de la méthode de calcul multicouche. Cette seconde méthode semble donner des résultats davantage conformes aux attentes et à l'expérience actuelle. Nous privilégierons donc les résultats selon cette seconde méthode. Comme dans le cas des structures rigides, deux variantes de chaussées mécaniquement nécessaires sont proposées, ceci selon l'épaisseur de grave traitée.

Tableau 52 : Proposition de structures souples mécaniquement nécessaires

Variante	CS1	CS2
Epaisseur béton bitumineux (CE= 2)	5 cm	5 cm
Epaisseur enrobé EME (CE=2.8)	25 cm	20 cm
Epaisseur grave traitée (CE=1.5)	20 cm	30 cm
<i>Epaisseur totale réelle</i>	<i>50 cm</i>	<i>55 cm</i>
<i>Epaisseur équivalente totale</i>	<i>110 cm</i>	<i>111 cm</i>

Il vient les commentaires suivants :

- Dans le cas d'une épaisseur de 20 cm de grave traitée, la méthode de calcul selon l'OACI recommande une épaisseur d'EME située entre 18 cm et 20 cm. La méthode rationnelle propose des épaisseurs de 25.0 cm à 27.0 cm. Nous choisissons finalement une épaisseur de 25 cm. Au vu de l'expérience d'autres aéroports également, cette structure semble mécaniquement suffisante. Il est à noter qu'une telle couche d'enrobé devra être décomposée en deux, voire trois couches lors de la pose.
- Dans le cas où l'épaisseur de grave traitée est de 30 cm, 20 cm d'enrobé EME2 suffisent selon la méthode multicouche ; 14 cm selon la méthode de l'OACI. Nous proposons finalement une épaisseur de 20 cm d'enrobé à module élevé.

2.6 Vérification au gel

Les chaussées dimensionnées dans le présent rapport sont les chaussées nécessaires afin de supporter les sollicitations mécaniques sur leur durée de service. La vérification au gel est habituellement réalisée dans une seconde phase. Nous proposons ici une vérification conformément aux normes VSS appliquées dans le cadre de chaussées routières.

Le rapport des sondages [6] indique majoritairement un « limon argileux avec rares cailloux ». Selon la classification U.S.C.S (norme SN 670 010), ce type de matériau peut être assimilé à un limon argileux (CL-ML), un matériau de degré de gélivité G4 selon la norme SN 670 140b. Ce degré de gélivité nécessite une vérification de la chaussée au gel (SN 640 324). Nous obtenons :

$$FI_s = FI - RI$$

FI : Indice de gel de l'air 200 ... 400 [°C · jour] selon carte de la norme

RI : Indice de radiation 100 [°C · jour] pour un ensoleillement moyen

FI_s : Indice de gel de la route FI_s = 300 [°C · jour] afin de se positionner du côté de la sécurité

L'indice critique de gel de la route FI_s^{*} est déterminé selon le catalogue des structures de chaussées (SN 640 324), de même que le facteur de dimensionnement f. L'indice critique de gel dépend de la portance (S2) et de la classe de trafic (hyp : T6). Il vient, pour les deux types de chaussées préalablement sélectionnées :

Chaussées rigides (CR1, CR2) Chaussée type 14 FI_s^{*}=200 [°C · jour] f=0.45

Chaussées souples (CS1, CS2) Chaussée type 5 FI_s^{*}=300 [°C · jour] f=0.45

Pour les deux types de chaussées, nous obtenons FI_s^{*} ≤ FI_s ce qui indique que le dimensionnement au gel est nécessaire. Nous devons donc vérifier :

$$d_s \geq f \cdot X_{30}$$

d_s : Epaisseur de la chaussée CR1=68 cm CR2=77 cm, CS1=50 cm CS2=55 cm

f : Facteur de dimensionnement (voir ci-dessus)

X₃₀ : Profondeur de pénétration moyenne du gel des trois hivers les plus froids des 30 dernières années (lecture sur abaque)

CR1=112 cm CR2=119 cm CS1=105 cm CS2=110 cm

Il vient, pour les différents types de chaussées :

CR1 : d_s=68 cm ≥ f · X₃₀=50.4 cm dimensionnement au gel non déterminant

CR2 : d_s=77 cm ≥ f · X₃₀=53.6 cm dimensionnement au gel non déterminant

CS1 : d_s=50 cm ≥ f · X₃₀=47.3 cm dimensionnement au gel non déterminant

CS2 : d_s=55 cm ≥ f · X₃₀=49.5 cm dimensionnement au gel non déterminant

Nous pouvons également relever qu'une vérification au gel conformément aux méthodes de dimensionnement des chaussées aéronautiques aurait pu être réalisée (méthode française par exemple).

2.7 Détermination du PCN

La détermination du PCN (Pavement Classification Number) permet d'évaluer l'admissibilité des différents appareils sur la chaussée. Le PCN peut être obtenu de différentes manières, soit par expérience ou alors selon un calcul technique. Nous proposons une détermination par calcul du PCN selon la méthode française, en adéquation avec les exigences de l'OACI [4, 1]. Cette méthode est par ailleurs détaillée dans [14] et décrite de manière plus générale dans [15].

Le PCN est déterminé de manière optimisée (faisant donc intervenir l'ensemble du trafic), pour les chaussées sélectionnées précédemment au chapitre 2.5. De manière générale, le PCN optimisé sera calculé ainsi pour un trafic composé de n avions donc chacun possède un trafic équivalent t' :

$$PCN = ACN_1 \cdot t'_1 + ACN_2 \cdot t'_2 + \dots + ACN_n \cdot t'_n$$

On peut remarquer que le calcul du PCN nécessite la connaissance du trafic et par la suite le calcul du trafic équivalent tel que réalisé lors du dimensionnement. L'ACN des différents appareils est ensuite calculé :

$$ACN_i = ACN_{i,min} + (ACN_{i,max} - ACN_{i,min}) \cdot \frac{P_{t0} - m_i}{M_i - m_i}$$

ACN_i	ACN de l'avion i
$ACN_{i,min}$	ACN de l'avion i correspondant à la masse m_i
$ACN_{i,max}$	ACN de l'avion i correspondant à la masse M_i
P_{t0}	Charge totale admissible ou masse réelle de l'avion (abaques)
m_i	Masse à vide en ordre d'exploitation (masse minimale)
M_i	Masse maximale au roulage

Les différents paramètres de masse dans l'équation ci-dessus sont déterminés par les avionneurs qui publient également les ACN de leurs avions en fonction de la nature de la chaussée (rigide ou souple) et de la catégorie de résistance du sol support. La masse P_{t0} est donc le seul paramètre à déterminer. Sur le principe, deux possibilités existent avec soit la prise en compte de la charge totale admissible (abaques) ou alors avec la prise en compte de la masse réelle de l'avion. Pour cela, nous distinguerons dans la suite deux coefficients ACN :

ACN1 : Déterminés à-partir de la masse réelle

ACN2 : Déterminé à-partir de la charge totale admissible

Le calcul du PCN se fera finalement sur la base de la charge totale admissible, positionnant ainsi l'analyse du côté de la sécurité.

Les données nécessaires au calcul du PCN sont consignées dans le Tableau 53, ces données étant issues de bases de données aéronautiques reconnues (winFiCAV).

Tableau 53 : Caractéristiques des avions pour calcul de l'ACN/PCN (sol catégorie B)

Avion (cat.)	Chaussées souples		Chaussées rigides		m [t]	M [t]
	ACN _{min}	ACN _{max}	ACN _{min}	ACN _{max}		
Saab 2000 (B)	7	14	9	16	13.8	23.2
A320-200 (C)	20	42	23	49	40.529	77.4
B767-200 (D)	18	44	18	46	82.1	163.75
B777-300-ER (E)	25	71	28	85	167.829	352.441

2.7.1 PCN chaussée rigide

Le PCN des chaussées rigides sélectionnées au chapitre 2.5.1 est calculé. Pour rappel, les chaussées considérées sont les suivantes :

- Chaussée CR1 : Dalle de 48 cm de béton, 20 cm de grave traitée
- Chaussée CR2 : Dalle de 47 cm de béton, 30 cm de grave traitée

Les résultats sont consignés dans le Tableau 54 et le Tableau 55. Ces calculs sont par ailleurs confirmés par un nouveau calcul avec un logiciel spécifique appliquant la méthode française de dimensionnement des chaussées aéronautiques (méthode OACI). Les détails concernant les différents facteurs sont indiqués précédemment au chapitre 2.3. Nous pouvons cependant rappeler que la charge admissible P_0 est déterminée à partir des abaques de dimensionnement. Les hypothèses suivantes, en adéquation avec les calculs de dimensionnement, sont également rappelées :

- Contrainte de rupture par flexion du béton : 5.6 MPa
- Coefficient de sécurité : 1.8
- Coefficient de pondération pour aires de stationnement : 1.0
- Module de réaction corrigé pour les chaussées rigides: $K_{CR1}=104$ MN/m³ et $K_{CR2}=117$ MN/m³
- Données de trafic : Considération du trafic hypothèse haute (4%), 10% cat. E ce qui situe l'analyse du côté de la sécurité

Tableau 54 : Calcul du PCN chaussée rigide CR1 (20 cm grave traitée, portance cat. B)

Avion (Cat.)	P [t]	P' [t]	P ₀ [t]	N	N'	Trafic éq. [%]	ACN1	ACN2
Saab 2000 (B)	23.2	23.2	162.1	94'520	5	0.28%	16	119
A320-200 (C)	77.4	77.4	202.7	551'367	447	25.28%	49	137
B767-200 (D)	163.75	163.75	399.7	7'877	9	0.50%	46	127
B777-300-ER (E)	352.441	352.441	547.2	78'767	1'308	73.94%	85	145

Trafic équivalent total sur 10 ans 1'770 100%

PCN 143

Tableau 55 : Calcul du PCN chaussée rigide CR2 (30 cm grave traitée, portance cat. B)

Avion (Cat.)	P [t]	P' [t]	P ₀ [t]	N	N'	Trafic éq. [%]	ACN1	ACN2
Saab 2000 (B)	23.2	23.2	158.8	94'520	5	0.31%	16	117
A320-200 (C)	77.4	77.4	200	551'367	475	28.82%	49	135
B767-200 (D)	163.75	163.75	402.3	7'877	9	0.52%	46	128
B777-300-ER (E)	352.441	352.441	556.3	78'767	1'159	70.35%	85	148

Trafic équivalent total sur 10 ans 1'647 100%

PCN 144

Comme attendu, le PCN optimisé dépend principalement de l'avion de catégorie E (B777-300-ER), ceci en raison de sa contribution très importante sur le trafic total équivalent (plus de 70%). Dans les deux variantes de chaussée, le PCN est finalement très proche, ce qui pouvait être attendu. Le calcul du PCN sur la base de la charge totale admissible indique des PCN relativement élevés. Un calcul du PCN selon la masse réelle des avions (ACN1) fournit les résultats suivants :

- Chaussée CR1 $PCN_{(ACN1)}=76$
- Chaussée CR2 $PCN_{(ACN1)}=74$

2.7.2 PCN chaussée souple

Deux chaussées souples dont la résistance mécanique est suffisante afin de supporter le trafic prévu ont été retenues (Tableau 52). Les paramètres nécessaires au calcul du trafic équivalent total et au PCN sont les suivants ; ces paramètres ayant préalablement été détaillés dans le rapport :

- Epaisseur équivalente totale : CS1 =110, CS2=111
- Coefficient de pondération : 1.0
- CBR : 8% (Catégorie B)
- Données de trafic : Considération du trafic hypothèse haute (4%), 10% cat. E ce qui situe l'analyse du côté de la sécurité

Les résultats du PCN optimisé des deux variantes de chaussées souples sont consignés dans le Tableau 56 et le Tableau 57. L'avion de catégorie E représentant près de 90% du trafic équivalent, le PCN calculé dépend en majeure partie du B777-300-ER. Le PCN obtenu, selon que la chaussée comporte 20 cm ou 30 cm de grave traitée est par ailleurs très proche. Comme précédemment, les PCN indiqués sont ceux déterminés sur la base de la charge totale admissible. Un calcul du PCN sur la base de la charge réelle (ACN1) aboutit aux résultats suivants :

- Chaussée CS1 $PCN_{(ACN1)}=68$
- Chaussée CS2 $PCN_{(ACN1)}=68$

Tableau 56 : Calcul du PCN chaussée souple CS1 (20 cm grave traitée, portance cat. B)

Avion (Cat.)	P [t]	P' [t]	P ₀ [t]	N	N'	Trafic éq. [%]	ACN1	ACN2
Saab 2000 (B)	23.2	23.2	142.3	73'849	5	0.05%	14	97
A320-200 (C)	77.4	77.4	168.2	430'785	1'073	10.35%	42	92
B767-200 (D)	163.75	163.75	297.3	6'154	43	0.42%	44	83
B777-300-ER (E)	352.441	352.441	433.2	61'541	9'247	89.18%	71	88.3

Trafic équivalent total sur 10 ans 10'368 100%

PCN 92

Tableau 57 : Calcul du PCN chaussée souple CS2 (30 cm grave traitée, portance cat. B)

Avion (Cat.)	P [t]	P' [t]	P ₀ [t]	N	N'	Trafic éq. [%]	ACN1	ACN2
Saab 2000 (B)	23.2	23.2	144.9	73'849	5	0.06%	14	105
A320-200 (C)	77.4	77.4	170.7	430'785	797	10.75%	42	98
B767-200 (D)	163.75	163.75	300.7	6'154	33	0.44%	44	88
B777-300-ER (E)	352.441	352.441	437.4	61'541	6'576	88.74%	71	92

Trafic équivalent total sur 10 ans 7'410 100%

PCN 93

Note : En raison de la portance du sol support (CBR=8%), la portance de la chaussée se situe à la limite entre les catégories B et C. En accord avec les exigences du guide de la méthode française et afin d'être consistant avec le PCN calculé pour les chaussées rigides, il a été décidé de réaliser un calcul selon une portance de catégorie B. La classe de portance de la chaussée a en effet une influence sur l'ACN des différents appareils (Tableau 53).

3 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

L'étude réalisée a pour objet le dimensionnement du taxiway Charlie 2 de l'aéroport international de Genève. Pour cela, deux méthodes de calcul ont été appliquées :

- Méthode française de dimensionnement des chaussées aéronautiques, en adéquation avec les recommandations de l'OACI.
- Méthode rationnelle (multicouche) de dimensionnement des chaussées aéronautiques (méthode française).

La méthode OACI de dimensionnement des chaussées aéronautiques est une des méthodes officiellement reconnues. Cette méthode date de plus de 30 ans et de nombreux auteurs ont mis en évidence ses limites notamment par rapport aux charges de trafic et configuration d'atterrisseurs utilisés actuellement. Pour cette raison, une méthode multicouche a également été appliquée afin de proposer des analyses complémentaires. Ce type de méthode, non reconnue actuellement par l'OACI, autorise une précision accrue des calculs: prise en compte des atterrisseurs et charges réelles, modélisation des matériaux (caractéristiques et performances), analyse des conditions aux interfaces, définition du balayage et de la vitesse des avions, définition des conditions météorologiques... L'utilisation de cette méthode nécessite par contre davantage de connaissances.

Les différents calculs de dimensionnement (chapitre 2.3 et 2.4) ont consisté en l'étude de quatre scénarios de trafic ainsi la réalisation de différentes analyses de sensibilité. La synthèse des analyses de sensibilité est représentée de manière qualitative dans le Tableau 58. Nous pouvons ajouter :

- L'échelle qualitative suivante a été choisie :
 - 0 incidence négligeable (<3% par rapport au cas de référence)
 - + incidence faible (3-8% par rapport au cas de référence)
 - ++ incidence modérée (8-15% par rapport au cas de référence)
 - +++ incidence faible (>15% par rapport au cas de référence)
- Chaussées souples : parmi les paramètres analysés, l'épaisseur de grave est celui présentant la plus grande incidence sur les résultats.
- Chaussées rigides : Parmi les paramètres analysés, le trafic d'avions de catégorie E ainsi que la modélisation du béton (principalement nombre de couches et caractéristiques) jouent un rôle déterminant.
- Pour certains paramètres de l'analyse de sensibilité, une différence substantielle existe entre les deux méthodes. Ceci est lié aux hypothèses de calcul ainsi qu'à la modélisation réalisée (paramètres de modélisation notamment).
- Cette analyse permet également d'évaluer la robustesse des solutions proposées. D'autres analyses de sensibilité auraient pu être réalisées (température de sollicitation, types de matériaux, scénarios de trafic, etc.) dans le cadre d'une étude plus complète.

Tableau 58 : Synthèse qualitative des analyses de sensibilité (bleu : méthode OACI, rouge : méthode multicouche)

	Chaussée souple	Chaussée rigide
Durée de service	0 +++	0 +
Epaisseur grave traitée	+++ ++	0 0
Balayage des avions	Analyse non réalisable 0	Analyse non réalisable 0
Caractéristiques du béton (E, v, fatigue)		Analyse non réalisable +
Modélisation béton bicouche		Analyse non réalisable +++
Conditions de collage	Analyse non réalisable Analyse non pertinente	Analyse non réalisable +
A330 au lieu de B777 (cat. E)	+ 0	++ +++
Vitesse des avions	Analyse non réalisable 0	

Sur la base des calculs de dimensionnement et analyses de sensibilité, deux structures souples et respectivement rigides ont été proposées, structures se distinguant par leur épaisseur de grave traitée (chapitre 2.5). Un dimensionnement au gel a ensuite été réalisé (chapitre 2.6), de même que le calcul du PCN (chapitre 2.7). Nous pouvons finalement sélectionner les structures répertoriées dans le Tableau 59.

Tableau 59 : Proposition de chaussées souples et rigides

Variante	Rigide	Souple
Couche roulement	Béton, 47 cm	Enrobé standard, 5 cm
Couche de base	-	Enrobé EME, 20 cm
Couche de fondation	Grave traitée, 30 cm	Grave traitée, 30 cm
Epaisseur totale	77 cm	55 cm (ép. équiv. 111 cm)

Il vient les commentaires suivants :

- Pour le choix final de variantes, nous proposons une épaisseur de grave traitée de 30 cm. Cela correspond aux recommandations constructives généralement en vigueur.
- Les avions déterminants pour le dimensionnement sont principalement les appareils de catégorie E (charge élevée), et dans une moindre mesure les avions de catégorie C en raison du nombre important de mouvements (cat. C).
- Pour les raisons détaillées précédemment, le choix final des variantes est principalement basé sur les calculs selon la méthode rationnelle. Ce choix positionne par ailleurs l'analyse du côté de la sécurité ; chacune des variantes proposées étant supérieure aux exigences minimales obtenues lors du dimensionnement selon la méthode OACI.
- Les différents calculs et tendances sont consistants. La proposition finale de chaussée souple et rigide est également conforme aux attentes selon le pré-dimensionnement et l'expérience acquise avec ce type de chaussées.

- En raison de la philosophie de construction et de gestion de l'aéroport (raisons historiques également), les gestionnaires souhaitent privilégier la variante de chaussée rigide.

D'un point de vue constructif, nous pouvons mettre en évidence pour les chaussées rigides :

- Différentes variantes de dallage ont été envisagées, le dallage en béton coulé directement sur place et sans intervention du portique (béton préfabriqué) semblant être préféré. Cela nécessite, d'un point de vue logistique notamment, une préparation minutieuse (centrale à béton sur place, conditions météo, essais de contrôle, évolution de la résistance ...)
- La position et composition des différents joints est à analyser de manière détaillée. Il est particulièrement recommandé de vérifier la position longitudinale des joints par rapport aux atterrisseurs principaux. La dimension des dalles joue également un rôle considérable (*a priori* 7.5 m x 15 m).
- Le dispositif de transfert de charge (goujonnage des dalles) doit être évalué de manière spécifique.

Les recommandations suivantes peuvent finalement être formulées :

- Les chaussées rigides présentent certains risques parmi lesquels l'apparition de fissures et de fractures provoquant le battement des dalles, dangereux pour les trains d'atterrissage. Le recours à des chaussées souples en enrobé bitumineux permet quant à lui d'offrir une maintenance aisée, remise en service rapide (enrobés tièdes notamment) ainsi que d'excellentes qualités de surface (uni, glissance). Afin de bénéficier des avantages des deux familles de chaussées, il pourrait être proposé d'analyser des variantes de chaussées mixtes. Notons que cette tendance est également observée dans le cas de chaussées routières.
- Afin de valider cette analyse, il pourrait être proposé de procéder à un calcul complémentaire, par exemple avec une méthode à éléments finis de type FAARFIELD® également largement reconnue dans le domaine du dimensionnement des chaussées aéroportuaires. Cela permettrait de confronter les résultats avec l'expérience américaine.
- Une fois la construction achevée, il serait conseillé de procéder à une campagne de mesure de la portance. Cela permet d'évaluer l'état initial de la chaussée, calculer son PCN de manière optimale et également déterminer la durée de service théorique de la chaussée. La réalisation de campagnes de mesure ultérieures permettra de détailler le mode et la vitesse d'endommagement de la chaussée, ainsi qu'anticiper d'éventuelles faiblesses ou opérations de maintenance.

Nicolas Bueche
Ing. Civil, dr. ès sc EPF

4 REFERENCES

- [1.] ICAO. Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation. Aerodromes. Volume 1 : Aerodrome Design and Operations. July 2009
- [2.] ICAO. Doc 9157 AN/901. Aerodrome Design Manual. Part I. 2006
- [3.] Memo interne Genève aéroport. New_RET-C2. Séance OFAC / SOSDI-A / GA, présentation du projet à l'OFAC. 06.02.12, modifié le 21.02.12
- [4.] ICAO. Aerodrome Design Manual. Part 3: Pavements. Second Edition. 1983
- [5.] Géotechnique appliquée Deriaz SA (GADZ). Aéroport International de Genève : Balisage lumineux. Puits et rapport géotechnique. Août 2006
- [6.] SOLFOR SA. Genève aéroport : Rapport sondages géotechniques. 4359 – Nouvelle sortie rapide Charlie 2. Janvier 2012
- [7.] Présentation interne aéroport international de Genève. Nouvelles « Rapid Exit Taxiway » RET 05-C2. Février 2011
- [8.] DGAC / STBA. Dimensionnement des chaussées. Volume 1. 1983
- [9.] DGAC / STBA. Dimensionnement des chaussées. Volume 2. 1983
- [10.] Bueche N. Dimensionnement des superstructures d'aéroports : Cas des aéroports de Genève et de Sion. Travail pratique de Master EPFL-LAVOC. 2004-2005
- [11.] LCPC / SETRA. Conception et dimensionnement des structures de chaussée. Guide technique. Décembre 1994
- [12.] U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. AC No: 150/5320-6E. Airport Pavement Design and Evaluation. 2009.
- [13.] DGAC / STAC. Enrobés hydrocarbonés et enduits superficiels pour chaussées aéronautiques. Guide d'application des normes. 2009
- [14.] DGAC / STBA. La méthode ACN-PCN. Guide pratique d'utilisation de la méthode ACN-PCN. 1988
- [15.] Braber R. & Gautier A. Approche pratique de la méthode ACN/PCN. Route et Trafic N°11. Novembre 2012

5 ANNEXES

5.1 Code de référence d'aérodrome

Le code de référence des différents aérodromes peut être lu dans la figure ci-dessous, issue de [2]

Élément de code 1		Élément de code 2		
Chiffre de code	Distance de référence de l'avion	Lettre de code	Envergure	Largeur hors-tout du train principal ^a
1	Inférieure à 800 m	A	Jusqu'à 15 m exclus	Jusqu'à 4,5 m
2	De 800 m à 1 200 m exclus	B	De 15 m à 24 m exclus	De 4,5 m à 6 m exclus
3	De 1 200 m à 1 800 m exclus	C	De 24 m à 36 m exclus	De 6 m à 9 m exclus
4	1 800 m et plus	D	De 36 à 52 m exclus	De 9 m à 14 m exclus
		E	De 52 à 65 m exclus	De 9 m à 14 m exclus
		F	De 65 à 80 m exclus	De 14 à 16 m exclus

a. Distance entre les bords extérieurs des roues du train principal.

Figure 10 : Code de référence des aérodrome [2]

5.2 Calcul détaillé du trafic sur le taxiway C2

Le trafic sur le taxiway C2 pour les scénarios 2025 et 2060 est reporté dans la Figure 11 et la Figure 12.

AEROPORT DE GENEVE - CALCUL TRAFIC TAXIWAY C2			
Nombre total de mouvements		220'000	mvt/an
		603	mvt/j
Piste 05 - Tous mouvements		Piste 23 - Tous mouvements	
Proportion	50%	Proportion	50%
Mouvements	110'000 mvt/an	Mouvements	110'000 mvt/an
Piste 05 - Atterrissages		Piste 23 - Atterrissages	
Proportion	50%	Proportion	50%
Mouvements	55'000 mvt/an	Mouvements	55'000 mvt/an
TWY C2 - proportion	60%	TWY C2 - proportion	0%
TWY C2 - mvt	33'000 mvt/an	TWY C2 - mvt	0 mvt/an
TWY C2 - proportion	40%	TWY C2 - proportion	100%
TWY C2 - mvt	22'000 mvt/an	TWY C2 - mvt	55'000 mvt/an
Piste 05 - Décollages		Piste 23 - Décollages	
Proportion	50%	Proportion	50%
Mouvements	55'000 mvt/an	Mouvements	55'000 mvt/an
TWY C2 - proportion	0%	TWY C2 - proportion	50%
TWY C2 - mvt	0 mvt/an	TWY C2 - mvt	27'500 mvt/an
TWY C2 - proportion	100%	TWY C2 - proportion	50%
TWY C2 - mvt	55'000 mvt/an	TWY C2 - mvt	27'500 mvt/an
Nombre total de mouvements sur TWY C2		60'500	mvt/an
Proportion de mouvements sur Taxiway C2		28%	
Composition du trafic sur TAXIWAY C2 (L/C)			
Catégorie OACI	Avion type	Proportion	Mvt/an
B	Saab2000	12%	7'260
C	A320	70%	42'350
D	B767	1%	605
E	A330-300 / B777-300ER	6%	3'630

Figure 11 : Scénario de trafic 2025 – Circulation sur TWY C2

AEROPORT DE GENEVE - CALCUL TRAFIC TAXIWAY C2			
Nombre total de mouvements		328'500	mvt/an
		900	mvt/j
Piste 05 - Tous mouvements		Piste 23 - Tous mouvements	
Proportion	50%	Proportion	50%
Mouvements	164'250 mvt/an	Mouvements	164'250 mvt/an
Piste 05 - Atterrissages		Piste 23 - Atterrissages	
Proportion	50%	Proportion	50%
Mouvements	82'125 mvt/an	Mouvements	82'125 mvt/an
TWY C2 - proportion	60%	TWY C2 - proportion	0%
TWY C2 - mvt	49'275 mvt/an	TWY C2 - mvt	0 mvt/an
TWY C2 - proportion	40%	TWY C2 - proportion	100%
TWY C2 - mvt	32'850 mvt/an	TWY C2 - mvt	82'125 mvt/an
Piste 05 - Décollages		Piste 23 - Décollages	
Proportion	50%	Proportion	50%
Mouvements	82'125 mvt/an	Mouvements	82'125 mvt/an
TWY C2 - proportion	0%	TWY C2 - proportion	50%
TWY C2 - mvt	0 mvt/an	TWY C2 - mvt	41'063 mvt/an
TWY C2 - proportion	100%	TWY C2 - proportion	50%
TWY C2 - mvt	82'125 mvt/an	TWY C2 - mvt	41'063 mvt/an
Nombre total de mouvements sur TWY C2		90'338	mvt/an
Proportion de mouvements sur Taxiway C2		28%	
Composition du trafic sur TAXIWAY C2 (L/C)			
Catégorie OACI	Avion type	Proportion	Mvt/an
B	Saab2000	12%	10'841
C	A320	70%	63'236
D	B767	1%	903
E	A330-300 / B777-300ER	10%	9'034

Figure 12 : Scénario de trafic 2060 – Circulation sur TWY C2

Le calcul détaillé du trafic sur le taxiway C2 est défini ici, la synthèse étant disponible dans le Tableau 4 et le Tableau 5.

AEROPORT DE GENEVE - CALCUL TRAFIC TAXIWAY C2					
Nombre total de mouvements		3'609'664	mvt		
		20	Durée de vie [an]		
		494	mvt/j		
Piste 05 - Tous mouvements			Piste 23 - Tous mouvements		
Proportion	50%			Proportion	50%
Mouvements	1'804'832	mvt		Mouvements	1'804'832
Piste 05 - Atterrissages			Piste 23 - Atterrissages		
Proportion	50%			Proportion	50%
Mouvements	902'416	mvt		Mouvements	902'416
TWY C2 - proportion	60%			TWY C2 - proportion	0%
TWY C2 - mvt	541'450	mvt		TWY C2 - mvt	0
TWY C2 - proportion	40%			TWY C2 - proportion	100%
TWY C2 - mvt	360'966	mvt		TWY C2 - mvt	902'416
Piste 05 - Décollages			Piste 23 - Décollages		
Proportion	50%			Proportion	50%
Mouvements	902'416	mvt		Mouvements	902'416
TWY C2 - proportion	0%			TWY C2 - proportion	50%
TWY C2 - mvt	0	mvt		TWY C2 - mvt	451'208
TWY C2 - proportion	100%			TWY C2 - proportion	50%
TWY C2 - mvt	902'416	mvt		TWY C2 - mvt	451'208
Nombre total de mouvements sur TWY C2		992'658	mvt/an		
Proportion de mouvements sur Taxiway C2		28%			
Composition du trafic sur TAXIWAY C2 (L/C)					
Catégorie OACI	Avion type	Proportion	Mvt	Mvt/an	Mvt/j
B	Saab2000	12%	119'119	5956	16
C	A320	70%	694'860	34743	95
D	B767	1%	9'927	496	1
E	A330-300 / B777-300ER	6%	59'559	2978	8

Figure 13 : Hypothèse basse de trafic (2%) - 6% de catégorie E - chaussée souple (20 ans)

AEROPORT DE GENEVE - CALCUL TRAFIC TAXIWAY C2					
Nombre total de mouvements		3'609'664	mvt		
		20	Durée de vie [an]		
		494	mvt/j		
Piste 05 - Tous mouvements			Piste 23 - Tous mouvements		
Proportion	50%			Proportion	50%
Mouvements	1'804'832	mvt		Mouvements	1'804'832 mvt
Piste 05 - Atterrissages			Piste 23 - Atterrissages		
Proportion	50%			Proportion	50%
Mouvements	902'416	mvt		Mouvements	902'416 mvt
TWY C2 - proportion	60%			TWY C2 - proportion	0%
TWY C2 - mvt	541'450	mvt		TWY C2 - mvt	0 mvt
TWY C2 - proportion	40%			TWY C2 - proportion	100%
TWY C2 - mvt	360'966	mvt		TWY C2 - mvt	902'416 mvt
Piste 05 - Décollages			Piste 23 - Décollages		
Proportion	50%			Proportion	50%
Mouvements	902'416	mvt		Mouvements	902'416 mvt
TWY C2 - proportion	0%			TWY C2 - proportion	50%
TWY C2 - mvt	0	mvt		TWY C2 - mvt	451'208 mvt
TWY C2 - proportion	100%			TWY C2 - proportion	50%
TWY C2 - mvt	902'416	mvt		TWY C2 - mvt	451'208 mvt
Nombre total de mouvements sur TWY C2		992'658	mvt/an		
Proportion de mouvements sur Taxiway C2		28%			
Composition du trafic sur TAXIWAY C2 (L/C)					
Catégorie OACI	Avion type	Proportion	Mvt	Mvt/an	Mvt/j
B	Saab2000	12%	119'119	5956	16
C	A320	70%	694'860	34743	95
D	B767	1%	9'927	496	1
E	A330-300 / B777-300ER	10%	99'266	4963	14

Figure 14 : Hypothèse basse de trafic (2%) - 10% de catégorie E - chaussée souple (20 ans)

AEROPORT DE GENEVE - CALCUL TRAFIC TAXIWAY C2					
Nombre total de mouvements		4'475'688	mvt		
		20	Durée de vie [an]		
		613	mvt/j		
Piste 05 - Tous mouvements			Piste 23 - Tous mouvements		
Proportion	50%			Proportion	50%
Mouvements	2'237'844	mvt		Mouvements	2'237'844
Piste 05 - Atterrissages			Piste 23 - Atterrissages		
Proportion	50%			Proportion	50%
Mouvements	1'118'922	mvt		Mouvements	1'118'922
TWY C2 - proportion	60%			TWY C2 - proportion	0%
TWY C2 - mvt	671'353	mvt		TWY C2 - mvt	0
TWY C2 - proportion	40%			TWY C2 - proportion	100%
TWY C2 - mvt	447'569	mvt		TWY C2 - mvt	1'118'922
Piste 05 - Décollages			Piste 23 - Décollages		
Proportion	50%			Proportion	50%
Mouvements	1'118'922	mvt		Mouvements	1'118'922
TWY C2 - proportion	0%			TWY C2 - proportion	50%
TWY C2 - mvt	0	mvt		TWY C2 - mvt	559'461
TWY C2 - proportion	100%			TWY C2 - proportion	50%
TWY C2 - mvt	1'118'922	mvt		TWY C2 - mvt	559'461
Nombre total de mouvements sur TWY C2		1'230'814	mvt/an		
Proportion de mouvements sur Taxiway C2		28%			
Composition du trafic sur TAXIWAY C2 (L/C)					
Catégorie OACI	Avion type	Proportion	Mvt	Mvt/an	Mvt/j
B	Saab2000	12%	147'698	7385	20
C	A320	70%	861'570	43078	118
D	B767	1%	12'308	615	2
E	A330-300 / B777-300ER	6%	73'849	3692	10

Figure 15 : Hypothèse haute de trafic (4%) - 6% de catégorie E - chaussée souple (20 ans)

AEROPORT DE GENEVE - CALCUL TRAFIC TAXIWAY C2					
Nombre total de mouvements		4'475'688	mvt		
		20	Durée de vie [an]		
		613	mvt/j		
Piste 05 - Tous mouvements			Piste 23 - Tous mouvements		
Proportion	50%			Proportion	50%
Mouvements	2'237'844	mvt		Mouvements	2'237'844
Piste 05 - Atterrissages			Piste 23 - Atterrissages		
Proportion	50%			Proportion	50%
Mouvements	1'118'922	mvt		Mouvements	1'118'922
TWY C2 - proportion	60%			TWY C2 - proportion	0%
TWY C2 - mvt	671'353	mvt		TWY C2 - mvt	0
TWY C2 - proportion	40%			TWY C2 - proportion	100%
TWY C2 - mvt	447'569	mvt		TWY C2 - mvt	1'118'922
Piste 05 - Décollages			Piste 23 - Décollages		
Proportion	50%			Proportion	50%
Mouvements	1'118'922	mvt		Mouvements	1'118'922
TWY C2 - proportion	0%			TWY C2 - proportion	50%
TWY C2 - mvt	0	mvt		TWY C2 - mvt	559'461
TWY C2 - proportion	100%			TWY C2 - proportion	50%
TWY C2 - mvt	1'118'922	mvt		TWY C2 - mvt	559'461
Nombre total de mouvements sur TWY C2		1'230'814	mvt/an		
Proportion de mouvements sur Taxiway C2		28%			
Composition du trafic sur TAXIWAY C2 (L/C)					
Catégorie OACI	Avion type	Proportion	Mvt	Mvt/an	Mvt/j
B	Saab2000	12%	147'698	7385	20
C	A320	70%	861'570	43078	118
D	B767	1%	12'308	615	2
E	A330-300 / B777-300ER	10%	123'081	6154	17

Figure 16 : Hypothèse haute de trafic (4%) - 10% de catégorie E - chaussée souple (20 ans)

AEROPORT DE GENEVE - CALCUL TRAFIC TAXIWAY C2					
Nombre total de mouvements		12'029'872	mvt		
		50	Durée de vie [an]		
		659	mvt/j		
Piste 05 - Tous mouvements			Piste 23 - Tous mouvements		
Proportion	50%		Proportion	50%	
Mouvements	6'014'936	mvt	Mouvements	6'014'936	mvt
Piste 05 - Atterrissages			Piste 23 - Atterrissages		
Proportion	50%		Proportion	50%	
Mouvements	3'007'468	mvt	Mouvements	3'007'468	mvt
TWY C2 - proportion	60%		TWY C2 - proportion	0%	
TWY C2 - mvt	1'804'481	mvt	TWY C2 - mvt	0	mvt
TWY C2 - proportion	40%		TWY C2 - proportion	100%	
TWY C2 - mvt	1'202'987	mvt	TWY C2 - mvt	3'007'468	mvt
Piste 05 - Décollages			Piste 23 - Décollages		
Proportion	50%		Proportion	50%	
Mouvements	3'007'468	mvt	Mouvements	3'007'468	mvt
TWY C2 - proportion	0%		TWY C2 - proportion	50%	
TWY C2 - mvt	0	mvt	TWY C2 - mvt	1'503'734	mvt
TWY C2 - proportion	100%		TWY C2 - proportion	50%	
TWY C2 - mvt	3'007'468	mvt	TWY C2 - mvt	1'503'734	mvt
Nombre total de mouvements sur TWY C2		3'308'215	mvt/an		
Proportion de mouvements sur Taxiway C2		28%			
Composition du trafic sur TAXIWAY C2 (L/C)					
Catégorie OACI	Avion type	Proportion	Mvt	Mvt/an	Mvt/j
B	Saab2000	12%	396'986	7940	22
C	A320	70%	2'315'750	46315	127
D	B767	1%	33'082	662	2
E	A330-300 / B777-300ER	6%	198'493	3970	11

Figure 17 : Hypothèse basse de trafic (2%) - 6% de catégorie E - chaussée rigide (50 ans)

AEROPORT DE GENEVE - CALCUL TRAFIC TAXIWAY C2					
Nombre total de mouvements		12'029'872	mvt		
		50	Durée de vie [an]		
		659	mvt/j		
Piste 05 - Tous mouvements			Piste 23 - Tous mouvements		
Proportion	50%		Proportion	50%	
Mouvements	6'014'936	mvt	Mouvements	6'014'936	mvt
Piste 05 - Atterrissages			Piste 23 - Atterrissages		
Proportion	50%		Proportion	50%	
Mouvements	3'007'468	mvt	Mouvements	3'007'468	mvt
TWY C2 - proportion	60%		TWY C2 - proportion	0%	
TWY C2 - mvt	1'804'481	mvt	TWY C2 - mvt	0	mvt
TWY C2 - proportion	40%		TWY C2 - proportion	100%	
TWY C2 - mvt	1'202'987	mvt	TWY C2 - mvt	3'007'468	mvt
Piste 05 - Décollages			Piste 23 - Décollages		
Proportion	50%		Proportion	50%	
Mouvements	3'007'468	mvt	Mouvements	3'007'468	mvt
TWY C2 - proportion	0%		TWY C2 - proportion	50%	
TWY C2 - mvt	0	mvt	TWY C2 - mvt	1'503'734	mvt
TWY C2 - proportion	100%		TWY C2 - proportion	50%	
TWY C2 - mvt	3'007'468	mvt	TWY C2 - mvt	1'503'734	mvt
Nombre total de mouvements sur TWY C2		3'308'215	mvt/an		
Proportion de mouvements sur Taxiway C2		28%			
Composition du trafic sur TAXIWAY C2 (L/C)					
Catégorie OACI	Avion type	Proportion	Mvt	Mvt/an	Mvt/j
B	Saab2000	12%	396'986	7940	22
C	A320	70%	2'315'750	46315	127
D	B767	1%	33'082	662	2
E	A330-300 / B777-300ER	10%	330'821	6616	18

Figure 18 : Hypothèse basse de trafic (2%) - 10% de catégorie E - chaussée rigide (50 ans)

AEROPORT DE GENEVE - CALCUL TRAFIC TAXIWAY C2					
Nombre total de mouvements		14'321'216	mvt		
		50	Durée de vie [an]		
		785	mvt/j		
Piste 05 - Tous mouvements			Piste 23 - Tous mouvements		
Proportion	50%		Proportion	50%	
Mouvements	7'160'608	mvt	Mouvements	7'160'608	mvt
Piste 05 - Atterrissages			Piste 23 - Atterrissages		
Proportion	50%		Proportion	50%	
Mouvements	3'580'304	mvt	Mouvements	3'580'304	mvt
TWY C2 - proportion	60%		TWY C2 - proportion	0%	
TWY C2 - mvt	2'148'182	mvt	TWY C2 - mvt	0	mvt
TWY C2 - proportion	40%		TWY C2 - proportion	100%	
TWY C2 - mvt	1'432'122	mvt	TWY C2 - mvt	3'580'304	mvt
Piste 05 - Décollages			Piste 23 - Décollages		
Proportion	50%		Proportion	50%	
Mouvements	3'580'304	mvt	Mouvements	3'580'304	mvt
TWY C2 - proportion	0%		TWY C2 - proportion	50%	
TWY C2 - mvt	0	mvt	TWY C2 - mvt	1'790'152	mvt
TWY C2 - proportion	100%		TWY C2 - proportion	50%	
TWY C2 - mvt	3'580'304	mvt	TWY C2 - mvt	1'790'152	mvt
Nombre total de mouvements sur TWY C2		3'938'334	mvt/an		
Proportion de mouvements sur Taxiway C2		28%			
Composition du trafic sur TAXIWAY C2 (L/C)					
Catégorie OACI	Avion type	Proportion	Mvt	Mvt/an	Mvt/j
B	Saab2000	12%	472'600	9452	26
C	A320	70%	2'756'834	55137	151
D	B767	1%	39'383	788	2
E	A330-300 / B777-300ER	6%	236'300	4726	13

Figure 19 : Hypothèse haute de trafic (4%) - 6% de catégorie E - chaussée rigide (50 ans)

AEROPORT DE GENEVE - CALCUL TRAFIC TAXIWAY C2					
Nombre total de mouvements		14'321'216	mvt		
		50	Durée de vie [an]		
		785	mvt/j		
Piste 05 - Tous mouvements			Piste 23 - Tous mouvements		
Proportion	50%			Proportion	50%
Mouvements	7'160'608	mvt		Mouvements	7'160'608 mvt
Piste 05 - Atterrissages			Piste 23 - Atterrissages		
Proportion	50%			Proportion	50%
Mouvements	3'580'304	mvt		Mouvements	3'580'304 mvt
TWY C2 - proportion	60%			TWY C2 - proportion	0%
TWY C2 - mvt	2'148'182	mvt		TWY C2 - mvt	0 mvt
TWY C2 - proportion	40%			TWY C2 - proportion	100%
TWY C2 - mvt	1'432'122	mvt		TWY C2 - mvt	3'580'304 mvt
Piste 05 - Décollages			Piste 23 - Décollages		
Proportion	50%			Proportion	50%
Mouvements	3'580'304	mvt		Mouvements	3'580'304 mvt
TWY C2 - proportion	0%			TWY C2 - proportion	50%
TWY C2 - mvt	0	mvt		TWY C2 - mvt	1'790'152 mvt
TWY C2 - proportion	100%			TWY C2 - proportion	50%
TWY C2 - mvt	3'580'304	mvt		TWY C2 - mvt	1'790'152 mvt
Nombre total de mouvements sur TWY C2		3'938'334	mvt/an		
Proportion de mouvements sur Taxiway C2		28%			
Composition du trafic sur TAXIWAY C2 (L/C)					
Catégorie OACI	Avion type	Proportion	Mvt	Mvt/an	Mvt/j
B	Saab2000	12%	472'600	9452	26
C	A320	70%	2'756'834	55137	151
D	B767	1%	39'383	788	2
E	A330-300 / B777-300ER	10%	393'833	7877	22

Figure 20 : Hypothèse haute de trafic (4%) - 10% de catégorie E - chaussée rigide (50 ans)

RAPPORT DE SYNTHÈSE

Référence : Bueche, N. Aéroport International de Genève : Dimensionnement sortie rapide Charlie 2. Rapport final Janvier 2013.

1. Contexte et objectifs

Dans le but de diminuer le temps d'occupation de la piste 05 lors d'atterrissages, l'Aéroport International de Genève (AIG) souhaite construire une nouvelle sortie rapide Charlie 2 (TWY C2) permettant aux avions de quitter la piste avant le taxiway B.

C'est dans le cadre de la planification de la construction du TWY C2 que le Laboratoire des Voies de Circulation (LAVOC) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) a été contacté par le bureau d'ingénieurs SOLFOR SA (Meyrin). L'objectif principal de l'étude consiste à apporter son expertise dans le domaine du dimensionnement des chaussées aéroportuaires et du comportement mécanique des structures. Après une analyse détaillée des données, un dimensionnement de chaussées souples et rigides est réalisé, ceci selon deux méthodes de calcul. Les structures de chaussées finalement sélectionnées ont été vérifiées au gel et le PCN calculé. Sur la base de ces résultats, une sélection de chaussées est effectuée ainsi que quelques recommandations.

2. Principales hypothèses

Les principales hypothèses et postulats sont les suivants :

- Durée de service de la chaussée : 50 ans pour les chaussées rigides, 20 ans pour les chaussées souples.
- Trafic : Les hypothèses de trafic concernent la circulation des avions au sein de l'aéroport, le nombre de mouvements annuels ainsi que les appareils accueillis. Sur la base de l'évolution au cours des 12 dernières années, du trafic actuel, ainsi que des prévisions de trafic 2025 et 2060, quatre différents scénarios ont été définis. Ces scénarios se distinguent par le taux de croissance prévu et la proportion d'avions de catégorie E. Le trafic ainsi que les avions considérés pour les calculs de dimensionnement sont disponibles ci-dessous. Relevons encore que la masse maximale au roulage est utilisée pour les calculs.

Tableau 1 : Caractéristiques des avions utilisés pour le dimensionnement

Catégorie OACI	Avion	Atterrisseurs (tête-princ.-princ.)	Masse maxi. Au décollage [kg]	Masse à vide opérationnelle [kg]	Masse maxi au roulage [kg]
B	Saab 2000	2-2-2	22'999	1'800	23'200
C	A320-200	2-2-2	77'000	40'529	77'400
D	B767-200	2-4-4	163'000	82'100	163'750
E	B777-300-ER	2-6-6	351'533	167'829	352'441
E	A330-300	2-4-4	233'000	119'830	233'900

Tableau 2 : Scénarios de trafic selon la durée de service de la chaussée

		Scénario	Trafic total (mvt)	Nbre mvt sur la durée de vie par catégorie OACI d'avion			
				B	C	D	E
Durée service : 50 ans	Hypothèse basse (2%)-6% cat.E	12'029'872	396'986	2'315'750	33'082	198'493	
	Hypothèse basse (2%)-10% cat.E		396'986	2'315'750	33'082	330'821	
	Hypothèse haute (4%)-6% cat.E	14'321'216	472'600	2'756'834	39'383	236'300	
	Hypothèse haute (4%)-10% cat.E		472'600	2'756'834	39'383	393'833	
Durée service : 20 ans	Hypothèse basse (2%)-6% cat.E	3'609'664	119'119	694'860	9'927	59'559	
	Hypothèse basse (2%)-10% cat.E		119'119	694'860	9'927	99'266	
	Hypothèse haute (4%)-6% cat.E	4'475'688	147'698	861'570	12'308	73'849	
	Hypothèse haute (4%)-10% cat.E		147'698	861'570	12'308	123'081	

- Portance du sol support : Les hypothèses relatives à la portance du sol support ont été établies sur la base de sondages géotechniques, de l'expérience des gestionnaires ainsi que de la normalisation en vigueur (OACI et VSS). Nous supposons une portance moyenne, soit CBR=10% (chaussées souples) et $k=80 \text{ MN/m}^3$ (chaussées rigides).
- Composition de la chaussée : Pour l'ensemble des structures de chaussées, une couche de grave stabilisée est positionnée au-dessus du sol support. La couche de roulement ainsi que la couche de base sont ensuite calculées selon la famille de chaussée considérée.

3. Dimensionnement et analyse de sensibilité

Deux méthodes de dimensionnement ont été successivement appliquées :

- 1) Méthode française (OACI) : La méthode française de dimensionnement des chaussées d'aéroports est conforme aux recommandations de l'OACI. Cette méthode empirique française est inspirée de la méthode américaine développée par l'United States Corps of Engineers. Pour les chaussées souples, elle s'appuie donc sur la méthode CBR (California Bearing Ratio) qui suppose une rupture de la chaussée par excès de pression sur le sol support. La méthode PCA (Portland Cement Association) est appliquée pour les chaussées rigides, méthode dont le critère de rupture est la contrainte maximale de traction par flexion du béton.

La méthode française (OACI), élaborée il y a plus de 30 ans, présente certaines limitations largement reconnues (utilisation d'abaques, charges et configuration des atterrisseurs non actualisées, choix des matériaux de construction, ...). Pour cela, il est choisi de procéder à un second calcul selon une méthode en adéquation avec les développements récents dans le domaine.

- 2) Méthode multicouche ou rationnelle : La méthode rationnelle de dimensionnement des aéroports est basée sur l'expérience française et issue de méthodes de calcul des sollicitations (état de contraintes et déformations) comparables à celles mise en œuvre dans le cas de chaussées routières. Le dimensionnement des chaussées aéroportuaires selon la méthode multicouche française est basé sur le principe suivant : Le calcul des sollicitations induites par les aéronefs est réalisé à l'aide d'un modèle élastique linéaire

isotrope multicouche semi-infini. Deux types d'endommagements sont considérés dans les calculs, soit la fatigue conduisant à la rupture progressive du matériau et la déformation permanente au sommet du sol support. Les méthodes rationnelles actuelles utilisent la notion de dommage qui est déterminé pour chaque avion, pour ensuite sommer les dommages des différents aéronefs et déterminer le dommage cumulé total pour la chaussée au cours de sa durée de service. Ce dommage cumulé total est appelé CDF (cumulative damage factor) et il doit respecter la règle $CDF \leq 1$ (CDF=1 : durée de vie consommée).

L'utilisation d'une méthode multicouche permet de modéliser de manière détaillée la chaussée (matériaux, interfaces) ainsi que les charges et la configuration des atterrisseurs. La prise en compte de divers paramètres permet de nombreuses analyses, mais nécessite par contre des connaissances spécifiques pour la réalisation de ces calculs. Ces méthodes ne sont pas (encore) reconnues par l'OACI, mais leur utilisation devient de plus en plus fréquente.

Les calculs de dimensionnement sont donc réalisés pour quatre scénarios de trafic (Tableau 2). Une première estimation de l'épaisseur de chaussée nécessaire a été effectuée par l'AIG (hypothèses discutées dans le rapport technique). Les épaisseurs suivantes ont été déterminées :

- Chaussée souple : L'épaisseur équivalente de chaussée nécessaire proposée est de 37 inches (94 cm), ceci pour une portance moyenne (CBR=10).
- Chaussée rigide : L'épaisseur de la dalle de béton nécessaire proposée est de 40 cm (45 cm choisis par sécurité), ceci pour une portance moyenne ($k=300$ pci ou 81.42 MN/m³).

Dimensionnement selon la méthode française (OACI)

Les résultats du dimensionnement selon la méthode française sont consignés dans le Tableau 3 (chaussée rigide) et le Tableau 4 (chaussée souple). Nous pouvons commenter :

- Dans le cas de chaussées rigides un dimensionnement forfaitaire est suffisant, c'est-à-dire basé uniquement sur l'avion le plus contraignant. Le dimensionnement de chaussées souples est par contre réalisé avec la prise en compte de l'ensemble du trafic (calcul optimisé).
- Le cas de base est calculé avec une épaisseur de grave traitée de 20 cm, une variation de cette épaisseur étant considérée dans les analyses de sensibilité. Les recommandations normatives et l'expérience constructive recommandent habituellement une épaisseur située entre 15 cm et 30 cm.
- L'avion déterminant pour le dimensionnement est l'avion de catégorie E. L'avion de catégorie C est également contraignant, mais dans une proportion plus faible. Les autres catégories d'appareils ne jouent qu'un rôle négligeable en raison de la masse réduite et/ou du faible nombre de mouvements.
- Pour les avions de catégorie E, le Boeing B777-300-ER est sensiblement plus contraignant que l'Airbus A 330-300 (*i.e.* plus agressif pour la chaussée).
- Les différents résultats sont consistants, l'épaisseur de chaussée nécessaire augmentant avec le trafic prévu au cours de la durée de service.

- Chaussées rigides : La prise en compte des hypothèses haute ou basse de trafic induit une différence de 0.5 cm de béton. Selon la proportion d'avions de catégorie E, l'épaisseur de la dalle de béton nécessaire varie de 1.2 cm.
- Chaussées souples : L'épaisseur équivalente nécessaire varie entre 90 cm et 95 cm selon le scénario de trafic. En supposant une couche de roulement standard (5 cm enrobé), l'épaisseur d'enrobé à module élevé (EME) nécessaire varie entre 18 cm et 20 cm.

Tableau 3 : Synthèse des résultats de dimensionnement selon la méthode française (OACI) – Chaussée rigide

Scénario	Béton	Grave traitée
Hypothèse basse (2%)-6% cat.E	34.2 cm	20 cm
Hypothèse basse (2%)-10% cat.E	35.4 cm	20 cm
Hypothèse haute (4%)-6% cat.E	34.7 cm	20 cm
Hypothèse haute (4%)-10% cat.E	35.9 cm	20 cm

Tableau 4 : Synthèse des résultats de dimensionnement selon la méthode française (OACI) – Chaussée souple

Scénario	Enrobé bitu.	EME2	Grave traitée	Ep. équiv.
Hypothèse basse (2%)-6% cat.E	5 cm	18 cm	20 cm	90.4 cm
Hypothèse basse (2%)-10% cat.E	5 cm	20 cm	20 cm	96.0 cm
Hypothèse haute (4%)-6% cat.E	5 cm	19 cm	20 cm	93.2 cm
Hypothèse haute (4%)-10% cat.E	5 cm	20 cm	20 cm	96.0 cm

Dimensionnement selon une méthode multicouche

La modélisation réalisée dans le cadre des calculs multicouche requiert la définition de nombreuses données concernant les matériaux (rigidité, résistance en fatigue, coefficient de Poisson, conditions aux interfaces), le trafic (atterrisseurs, nombre de mouvements, charges, vitesse, balayage, ...), les conditions météorologiques (température) et divers coefficients de calculs. Les résultats du dimensionnement selon la méthode multicouche sont consignés dans le Tableau 5 (chaussée rigide) et le Tableau 6 (chaussée souple). Nous pouvons ajouter :

- Le dimensionnement est réalisé sur la base du dommage avec balayage des appareils, mais un calcul sans balayage des avions est également proposé.
- Les résultats et tendances observés sont globalement consistants ; les mêmes tendances sont observées que lors des calculs selon la méthode OACI.
- Comme pour les calculs précédents, l'avion de catégorie E est déterminant pour le dimensionnement ; il cause la majeure partie du dommage (CDF). Une faible proportion du dommage est également issue des appareils de catégorie C. Les autres appareils sont négligeables pour le dimensionnement.
- Chaussées rigides : Le critère de rupture est généralement la contrainte de traction au bas de la dalle de béton. L'épaisseur de la dalle de béton recommandée est sensiblement plus élevée que lors des calculs selon la méthode OACI. Ces résultats sont cependant plus proches du pré-dimensionnement (45 cm béton).

- Chaussées souples : Le mode de dégradation déterminant est la fatigue au bas des couches bitumineuses ; l'orniérage du sol support ne doit cependant pas être négligé. Afin de diminuer l'épaisseur d'enrobé nécessaire, le cas de base a été calculé avec une épaisseur de grave traitée de 25 cm ; la variante avec 20 cm étant également calculée. De manière générale, entre 25 cm et 27 cm d'enrobé EME sont nécessaires dans le cas d'une épaisseur de 20 cm de grave traitée. L'épaisseur requise est donc plus élevée que pour le calcul selon la méthode OACI.

Tableau 5 : Synthèse des résultats de dimensionnement selon la méthode multicouche – Chaussée rigide

Scénario	Béton	Grave traitée
Hypothèse basse (2%)-6% cat.E	47.0 cm	20 cm
Hypothèse basse (2%)-10% cat.E	48.5 cm	20 cm
Hypothèse haute (4%)-6% cat.E	47.5 cm	20 cm
Hypothèse haute (4%)-10% cat.E	49.0 cm	20 cm

Tableau 6 : Synthèse des résultats de dimensionnement selon la méthode multicouche – Chaussée souple

Scénario	Enrobé bitu.	EME2	Grave traitée	Ep. équiv.
Hypothèse basse (2%)-6% cat.E	5 cm	25.0 cm	20.0 cm	110.0 cm
	5 cm	22.5 cm	25.0 cm	110.5 cm
Hypothèse basse (2%)-10% cat.E	5 cm	25.5 cm	20.0 cm	111.4 cm
	5 cm	23.5 cm	25.0 cm	113.3 cm
Hypothèse haute (4%)-6% cat.E	5 cm	26.0 cm	20.0 cm	112.8 cm
	5 cm	24.0 cm	25.0 cm	114.7 cm
Hypothèse haute (4%)-10% cat.E	5 cm	27.0 cm	20.0 cm	115.6 cm
	5 cm	24.5 cm	25.0 cm	116.1 cm

Synthèse des analyses de sensibilité

Une fois les cas de référence calculés, différentes analyses de sensibilité ont été menées. L'objectif principal consiste à identifier les facteurs déterminants pour le dimensionnement et quantifier leur impact. Ces calculs permettent également d'évaluer la robustesse de la solution de base obtenue. Les résultats de l'analyse de sensibilité sont représentés de manière qualitative dans le Tableau 7 :

- L'échelle qualitative suivante a été choisie :
 - 0 incidence négligeable (<3% par rapport au cas de référence)
 - + incidence faible (3-8% par rapport au cas de référence)
 - ++ incidence modérée (8-15% par rapport au cas de référence)
 - +++ incidence forte (>15% par rapport au cas de référence)
- Chaussées souples : parmi les paramètres analysés, l'épaisseur de grave traitée est celui présentant la plus grande incidence sur les résultats.

- Chaussées rigides : Parmi les paramètres analysés, le trafic d'avions de catégorie E ainsi que la modélisation du béton (principalement nombre de couches et caractéristiques) jouent un rôle déterminant.
- Pour certains paramètres de l'analyse de sensibilité, une différence substantielle existe entre les deux méthodes. Ceci est lié aux hypothèses de calcul ainsi qu'à la modélisation réalisée (paramètres de modélisation notamment). D'autres analyses de sensibilité auraient pu être réalisées (température de sollicitation, types de matériaux, scénarios de trafic, etc.) dans le cadre d'une étude plus complète.

Tableau 7 : Synthèse qualitative des analyses de sensibilité (bleu : méthode OACI, rouge : méthode multicouche)

	Chaussée souple	Chaussée rigide
Durée de service	0 +++	0 +
Épaisseur grave traitée	+++ ++	0 0
Balayage des avions	Analyse non réalisable 0	Analyse non réalisable 0
Caractéristiques du béton (E, ν , fatigue)		Analyse non réalisable +
Modélisation béton bicouche		Analyse non réalisable +++
Conditions de collage	Analyse non réalisable Analyse non pertinente	Analyse non réalisable +
A330 au lieu de B777 (cat. E)	+ 0	++ +++
Vitesse des avions	Analyse non réalisable 0	

4. Conclusions et recommandations

Sur la base des différents calculs de dimensionnement et des analyses de sensibilité, les structures présentées dans le Tableau 8 sont finalement proposées.

Tableau 8 : Proposition de chaussées souples et rigides

Variante	Rigide	Souple
Couche roulement	Béton, 47 cm	Enrobé standard, 5 cm
Couche de base	-	Enrobé EME2, 20 cm
Couche de fondation	Grave traitée, 30 cm	Grave traitée, 30 cm
Épaisseur totale	77 cm	55 cm (ép. equiv. 111 cm)

Nous pouvons effectuer les commentaires suivants :

- Les résultats et tendances observés lors des calculs de dimensionnement sont consistants. Des différences parfois substantielles existent selon la méthode de dimensionnement choisie ; cela est propre aux méthodes (hypothèses et modélisation).
- Les diverses analyses de sensibilité permettent de quantifier les paramètres déterminants ainsi qu'évaluer la robustesse de la solution proposée.
- Une épaisseur de grave traitée de 30 cm est proposée, ce qui correspond à l'épaisseur maximale recommandée par la normalisation et les exigences constructives.

- Le choix final des variantes est principalement basé sur les calculs selon la méthode rationnelle qui s'avère être davantage ajustée et mieux correspondre à la problématique actuelle, bien que cette méthode ne fasse pas partie des recommandations de l'OACI. Ce choix positionne par ailleurs l'analyse du côté de la sécurité : Chacune des variantes sélectionnées étant supérieure aux exigences minimales obtenues lors du dimensionnement selon la méthode OACI.
- Les structures de chaussées proposées semblent se positionner du côté de la sécurité au vu de l'expérience, des hypothèses de trafic (mouvements, appareils et charges) et d'analyses de cas comparables.
- Chaussée rigide : Sur la base du pré-dimensionnement et de l'expérience acquise par les gestionnaires de l'aéroport, il est choisi de ne pas aller en deçà de 40 cm pour l'épaisseur de la dalle de béton.
- En raison de la philosophie de construction et de gestion de l'aéroport (raisons historiques également), ainsi que des caractéristiques propres au béton, les gestionnaires souhaitent privilégier la variante de chaussée rigide.
- D'un point de vue constructif, il est recommandé de porter une attention particulière à la phase de préparation du chantier (centrale à béton, essais de conformité, conditions météorologiques, ...), aux dispositifs de transferts de charge, au choix de la dimension des dalles ainsi qu'aux joints (position longitudinale et composition surtout).

Nous pouvons finalement effectuer les recommandations suivantes :

- Les chaussées rigides présentent certains risques parmi lesquels l'apparition de fissures et de fractures provoquant le battement des dalles, dangereux pour les trains d'atterrissage. Le recours à des chaussées souples en enrobé bitumineux permet quant à lui d'offrir une maintenance aisée, remise en service rapide (enrobés tièdes notamment) ainsi que d'excellentes qualités de surface (uni, glissance). Afin de bénéficier des avantages des deux familles de chaussées, il pourrait être proposé aux gestionnaires d'analyser des variantes de chaussées mixtes. Notons que cette tendance est également observée dans le cas de chaussées routières.
- Afin de valider cette analyse, il pourrait être proposé de procéder à un calcul complémentaire, par exemple avec une méthode à éléments finis de type FAARFIELD® également largement reconnue dans le domaine du dimensionnement des chaussées aéroportuaires. Cela permettrait de confronter les résultats avec l'expérience américaine.
- Une fois la construction achevée, il serait conseillé de procéder à une campagne de mesure de la portance. Cela permet d'évaluer l'état initial de la chaussée, calculer son PCN de manière optimale et également déterminer la durée de service théorique de la chaussée. La réalisation de campagnes de mesure ultérieures permettra de détailler le mode et la vitesse d'endommagement de la chaussée, ainsi qu'anticiper d'éventuelles faiblesses ou opérations de maintenance.

Nicolas Bueche
Ing. Civil, dr. ès sc EPF

**Demande
d'approbation des
plans**

RET 04
Projet 11-0139

Dossier pour examen spécifique à l'aviation
– **AP11**

1.	Introduction	3
2.	Dossier pour examen spécifique à l'aviation	3
3.	Caractéristiques physiques	4
4.	Servitudes liées à la limitation et à l'exemption des obstacles	6
5.	Aides visuelles.....	6
6.	Chantier	7
7.	Exploitation.....	8
8.	Publication.....	8

1. Introduction

Ce dossier contient un descriptif des différents documents nécessaires à l'OFAC pour effectuer l'examen spécifique à l'aviation conformément à leur demande faite dans le cadre de la détermination de la procédure.

2. Dossier pour examen spécifique à l'aviation

Ce dossier doit contenir tous les éléments permettant à l'OFAC de se déterminer en termes de conformité aux diverses normes et réglementations aéronautiques, notamment l'Annexe 14 à la convention relative à l'aviation civile internationale (OACI), les manuels de conception des infrastructures aéroportuaires (DOC 9157, Parties 1 – 6) et les manuels de services aéroportuaires (DOC 9137, Parties 1 – 9) et les *Certifications Specifications and Guidance material for Aerodromes Design* de l'Agence Européenne de la Sécurité Aérienne AESA (*CS ADR-DSN – Issue 4*, 8 décembre 2017).

Il s'agit principalement des thématiques suivantes qui seront reprises dans les chapitres ci-dessous:

Domaine	Documents du dossier	Référence normative : <i>CS ADR-DSN – Issue 4</i> , 8 décembre 2017 AESA
Caractéristiques physiques Physical characteristics	Plans n° 110139_501C , Projet Aéronautique 2018 et n° 110139_502_EASA , Dimensions du taxiway et ses accotements. Rapport du <i>Laboratoire des voies de circulation de l'EPFL</i> pour la Sortie rapide Charlie 2 de 2013. Plans n° 4359_1010g Situation nouveau projet et n° 4359_1012 Calepinage des dalles	Chapter B – Runways Chapter C- Runway end safety area Chapter D – Taxiways Chapter E - Aprons
Servitudes liées à la limitation, suppression et à l'exemption des obstacles Obstacle restriction and removal	110139_503A , Surfaces de limitation d'obstacles	Chapter H- Obstacle limitation surfaces Chapter J- Obstacle limitation requirements Chapter Q- Visual aids for denoting obstacles
Visual aids for navigation • Marques	Plans n° 110139_504A Détail marquages aéronautiques Barres d'arrêt et 110139_505A , Détail marquages aéronautiques, Taxiway center line.	Airports Council International (ACI) - Apron Markings and Signs – Handbook – 2 nd Edition 2009 CS ADR-DSN - Chapter L- Markings

Aides visuelles à la navigation Visual aids for navigation <ul style="list-style-type: none"> Balisage lumineux (feux) Panneaux Balises 	Dossier EM – Plans AER 8828-16-01_CHARLIE_II Aménagement des installations électriques et AER 8828-17-01_CHARLIE_II Orientation des équipements EM	Chapter K- indicators and signalling devices Chapter M – Lights Chapter N- Signs Chapter P - Markers Chapter U- Colours
Systèmes électriques Electrical systems	Dossier EM – Plans AER 8828-16-01_CHARLIE_II Aménagement des installations électriques	Chapter S- electrical systems
Chantier Restricted use areas	Plan n° 4359_1011a Phasage des travaux et document Principe des travaux.	Chapter R- visual aids for denoting restricted use areas
Exploitation de l'aérodrome Aerodrome operational services, equipment and installation	AN 14, Chapitre 9 ; DOC 9137 Parties 1 à 9	Chapter T- aerodrome operational services, equipment and installation
Publications	AN 14, Chapitre 2	

3. Caractéristiques physiques

Ce paragraphe devra démontrer, en complément des plans liés au dossier, la conformité des adaptations physiques aux différents articles de l'Annexe 14, Vol. I de l'OACI et/ou de *Certifications Specifications and Guidance material for Aerodromes Design* de l'AESA (*CS ADR-DSN – Issue 4*, 8 décembre 2017).

3.1. Justification du projet

Le projet de nouvelle sortie rapide a pour but d'augmenter la sécurité des opérations pour les atterrissages en piste 04. Cette nouvelle voie permettra également de minimiser le temps d'occupation de la piste.

NOTA : pour ce projet de construction de la sortie rapide RET 04, la dénomination du taxiway est **Charlie 2**, celle-ci n'est pas encore la dénomination définitive de la voie.

Ce dossier ne tient non plus compte du projet de regroupement des barres d'arrêt.

3.2. Conception du taxiway "Charlie 2"

Avions utilisés pour le design du taxiway Charlie 2 :

Avions avec largeur hors-tout du train principal (OMGWS) de 9m jusqu'à 15m, soit les avions de lettres de code E : Airbus 340-600 et F : Airbus 380 et Boeing 777X.

Pour le design de la voie **Charlie 2**, l'avion plus contraignant est le Boeing 777-10X.

Référence normative EASA CS ADR-DSN.D.305.a1 taxiway shoulders

Largeur du segment rectiligne du Taxiway et ses accotements de 44m (code F) constituée de 30m de dallage béton central, et deux bandes de 3.5m en enrobés bitumineux plus 3.5m d'accotements stabilisés herbeux. Voir plan n° 110139_502_EASA.

CS ADR-DSN.D.305b, sur-largeur de la chaussée aéronautique dans les courbes, en particulier vers le tarmac principal ou vers le Parking P48.

Pour le design des filets (sortie C2/Alpha vers tarmac principal) l'avion plus contraignant est le B777-10X.

CS ADR-DSN.D.305c, accotements en enrobés bitumineux et herbeux, résistants à l'érosion, résistants aux charges des avions sortant accidentellement du taxiway.

CS ADR-DSN.D.325, aire nivelée du taxiway largeur 37m (2x 18.5m), libre d'objets.

CS ADR-DSN.D.265 et D.280 Longitudinal and Transverse slopes on taxiways, Pentas longitudinales et transversales inférieures à 1.5%, voir plan n° 4359_1010g.

CS ADR-DSN.D.290 Surface of taxiways, le traitement de finition de la chaussée béton par balayage mécanique avec règles vibrantes garantira un coefficient de frottement adéquat ainsi que l'écoulement correct des eaux pluviales.

Référence normative EASA CS ADR-DSN.D.295 Rapid exit taxiways

Conception aéronautique pour la RET_C2_25° (voir plan N° 110139_501):

- Point tangente à la piste situé au point kilométrique PK 1'920m
- Rayon de la courbe de dégagement de 550m pour permettre des vitesses de sortie de piste sur chaussée mouillée de 93 km/h (CS ADR-DSN.D.295 b.1)
- Filets d'élargissement du Taxiway **C2** à son intersection avec le Taxiway ALPHA vers le tarmac principal et vers le Parking48 avec radius de 45.5m (CS ADR-DSN.D.295 c) ; avion de design *Boeing 777-10X* pour les filets d'élargissement.
- Portion rectiligne de la TWY de 96m après la courbe de dégagement de la piste (CS ADR-DSN.D.295 d)
- Angle d'intersection avec la piste de 25° (CS ADR-DSN.D.295 e)

Référence normative EASA CS ADR-DSN.D.285 Strength of taxiways

Voir Rapport du *Laboratoire des voies de circulation de l'EPFL* pour la Sortie rapide Charlie 2 de 2013.

En raison de la philosophie de construction et de la gestion de Genève Aéroport, la variante privilégiée pour le *Taxiway Charlie 2* est la chaussée rigide, avec durée de service de 50 ans.

La structure proposée par le LAVOC sur le *tableau 59* du rapport est ci-dessous en chaussée rigide (colonne 2). Cette structure, basée sur la méthode rationnelle (2), positionne l'analyse du côté de la sécurité, étant supérieure aux exigences minimales obtenues lors du dimensionnement selon la méthode OACI (colonne 3).

L'avion de dimensionnement déterminant pour les calculs du LAVOC-EPFL est le Boeing B777-300-ER.

En se basant sur le document du constructeur BOEING *777X Airport Compatibility Brochure*, de mai 2015, les avions dérivés du B777-300ER comme les 777-9X ou 8X ont le même MTOW de 770'000 LB ou 352'441kg, néanmoins la répartition du poids de l'avion est légèrement plus importante sur les atterrisseurs principaux des avions dérivés.

En courbe, les filets d'élargissement du 777-9X sont aussi similaires à ceux du 777-300ER (avion de design pour les filets : B777-10X).

1. Variante	2. Structure Rigide Méthode rationnelle	3. Structure rigide Méthode OACI (tableau 14)	4. Structure rigide du projet	5. Dallages préfabriqués Bord de piste
Couche roulement	Béton, 47 cm	Béton, 34.2cm	Béton coulé in situ, 40cm sur béton de propreté 5cm	Béton armé 45cm sur coulis de réglage 5cm
Couche de base	-			
Couche de fondation	Grave traitée, 30 cm	Grave traitée, 30cm	Grave stabilisée au ciment, 60cm	Grave stabilisée au ciment, 60cm
Épaisseur totale	77 cm	64.2 cm	105 cm	110 cm
Calcul du PCN,				

portance catégorie B 144

La structure choisie par Genève Aéroport est celles des colonnes 4 et 5 (bord de piste).

Calcul du PCN : sur la base de la charge totale admissible des avions, le PCN calculé est de **144** pour la chaussée rigide 2 ; le PCN optimisé dépendant principalement de l'avion lettre de code E Boeing B777-300ER. En calculant selon la mase réelle des avions le PCN est de **76**.

En se basant sur le document du constructeur BOEING *777X Airport Compatibility Brochure*, de mai 2015, les avions dérivés du B777-300ER comme les 777-9X ou 8X ont le même MTOW de 770'000 LB ; néanmoins la répartition du poids étant légèrement différente, l'ACN est détaillé sur le tableau ci-dessous pour chaussée rigide, subgrade de portance B :

AIRCRAFT TYPE	MTOW LB (KG)	ACN FOR RIGID PAVEMENT SUBGRADES – MN/m3
		MEDIUM 80
777-300ER	777,000 (352,441)	85
777-9	777'000 (352'442)	90

Nous proposons la publication du PCN suivant : 90 R/B/W/T.

4. Servitudes liées à la limitation et à l'exemption des obstacles

Voir chapitre DAP 07 Plan d'obstacles et le plan n° **110139_503A**.

5. Aides visuelles

o Marques

Marques axiales de voie de circulation, selon EASA **CS ADR-DSN.L.555** *Taxiway centre line marking*. L'axe de la sortie rapide commence 60m avant le point de tangence avec la piste. Les raccordements du marquage axial, respectivement avec la piste ou la voie ALPHA, seront exécutés en dernier afin d'éviter le risque d'incursion des avions ou véhicules dans la zone des travaux.

Marques axiales améliorées de voie de circulation, selon EASA **CS ADR-DSN.L.570** *Enhanced taxiway centreline marking* et *Figure L-6* (avec des traits de 3m).

Marques des points d'attente avant piste « CAT II/III » et « CAT I », respectivement à 120m et 90m selon EASA **CS ADR-DSN.L.575** *Runway-holding position marking* et figure L-7.

Marques d'obligation « 04 - 22 », selon EASA **CS ADR-DSN.L.605** *Mandatory instruction marking* et *Figure L-9 B*.

Voir plans de marquage : n° **110139_504A** Détail marquages aéronautiques, Points d'attente avant piste « CAT II/III », « CAT I » et **110139_505A**, Détail marquages aéronautiques, Taxiway center line.

o **Balisage lumineux**

RETILs feux indicateurs de voie de sortie rapide selon le CS ADR-DSN.M.700 *Rapid exit taxiway indicator lights (RETILs)*

Feux axiaux de taxiway selon le CS ADR-DSN.M.710 *Taxiway centre line lights* et le CS ADR-DSN.M.715 *Taxiway centre line lights on taxiways, runways, rapid exit taxiways, or on other exit taxi-ways.*

Une **barre d'arrêt** selon le CS ADR-DSN.M.730 *Stop bars* est prévue au point d'attente Cat II/III.

Des **feux de protection de piste** selon le CS ADR-DSN.M.745 *Runway guard lights* seront installés.

Feux de bord de taxiway selon le CS ADR-DSN.M.720 *Taxiway edge lights* seront installés.

Voir plans: n° **AER-8828-17-01** Orientation des équipements électromécaniques et n° **AER-8828-16-01** Plan d'aménagement des installations électriques.

o **Panneaux**

Panneaux d'obligation

Panneaux d'obligation selon le CS ADR-DSN.N.780 *Mandatory instruction signs* seront montés.

Panneaux d'information selon le CS ADR-DSN.N.785 *Information signs*

La nouvelle sortie rapide pourrait aussi être utilisée pour des décollages depuis une intersection (*intersection take-off*) ; la distance rémanente pour le décollage depuis la *Charlie 2* est de 2'233m → Un panneau indiquant une TORA de **2230m** sera installé conformément au CS ADR-DSN.N.785 (a)(5).

En particulier, la hauteur des caractères, des faces et du panneau une fois installé respectera les tableaux *N-1* et *N-2* de la régulation européenne.

Le besoin opérationnelle pour des décollages par piste 04 depuis l'intersection **Charlie 2** ne s'avère pas nécessaire ; nous n'installerons pas de panneau indiquant la TORA 04 depuis l'intersection *Charlie 2*.

6. **Chantier**

Le phasage des travaux est décrit dans le plan n° **4359_1011a** et le document : **Principe des travaux.**

Les travaux s'exécuteront en dehors des heures d'exploitation de l'aéroport (environ de minuit à 5h30), à l'exception de la préfabrication des dalles qui pourra s'exécuter de jour.

La variante constructive choisie pour le projet a été analysée en tenant compte du risque d'une sortie accidentelle ou incursion accidentelle d'un avion dans la zone de travaux et est la suivante :

Construction d'un dallage en béton armé préfabriqué posé avec l'aide des portiques en bord de piste et de voie Alpha (2'125 m², 20% de la surface) et d'un dallage en béton armé coulé in-situ pour le 80% de la nouvelle sortie Charlie 2 (8'640 m²).

7. Exploitation

Aucune modification de l'exploitation de la piste CONC ou des taxiways *Alpha*, *Bravo* ou *Charlie* pendant la phase des travaux.

À l'état final de l'infrastructure **RET 04**, et par sa configuration et position, l'utilisation de la **RET 04 Charlie 2** permettra d'améliorer la sécurité des opérations par piste 04 tout en permettant de réduire le temps d'occupation de la piste.

8. Publication

Les publications aéronautiques (textes, tableaux et cartes) seront adaptées pour la mise en service de la future **RET 04**.

Demande
d'approbation des
plans

Nouvelle sortie rapide
RET 04 - Projet 11-0139

Principe des travaux

Genève, le 21 janvier 2019

Introduction	3
Principe de base	3
Principe des travaux.....	3
Synthèse des risques encourus en cas de sortie accidentelle d'un avion de la piste.....	5
Mesures complémentaires	6
Conclusions :	6

Introduction

Dans l'optique de respecter les normes de l'OACI et d'assurer une sécurité optimale lors des travaux de construction de la **nouvelle sortie rapide Charlie 2**, nous vous présentons, à travers ce document, les différentes phases du chantier et leurs impacts sur la sécurité aéronautique.

Cette future construction se situe dans la bande de piste, dont 2/3 dans l'aire nivelée de la bande de piste. Une attention particulière est donc à prendre. Les travaux dans l'aire nivelée de la voie ALPHA imposent une contrainte supplémentaire.

Principe de base

La variante retenue pour les travaux est la suivante :

Construction d'un dallage en béton armé préfabriqué posé avec l'aide des portiques en bord de piste (2'125 m², 20% de la surface) et d'un dallage en béton armé coulé in-situ pour le 80% de la nouvelle sortie Charlie (8'640 m²).

Les travaux s'exécuteront en dehors des heures d'exploitation de l'aéroport (environ de minuit à 05h30), à l'exception de la préfabrication des dalles qui pourra s'exécuter de jour.

Lors de la séance du lundi 6 février 2012 en présence de M. Philippe Roth de l'OFAC, il a été rappelé qu'aucun « trou » ou obstacle ne pouvait être existant à la réouverture de la piste dès 5h30 du matin.

Il a également été rappelé qu'au moment de la réouverture au trafic, l'ensemble de la zone des travaux devait avoir une portance équivalente à celle de la zone herbeuse existante.

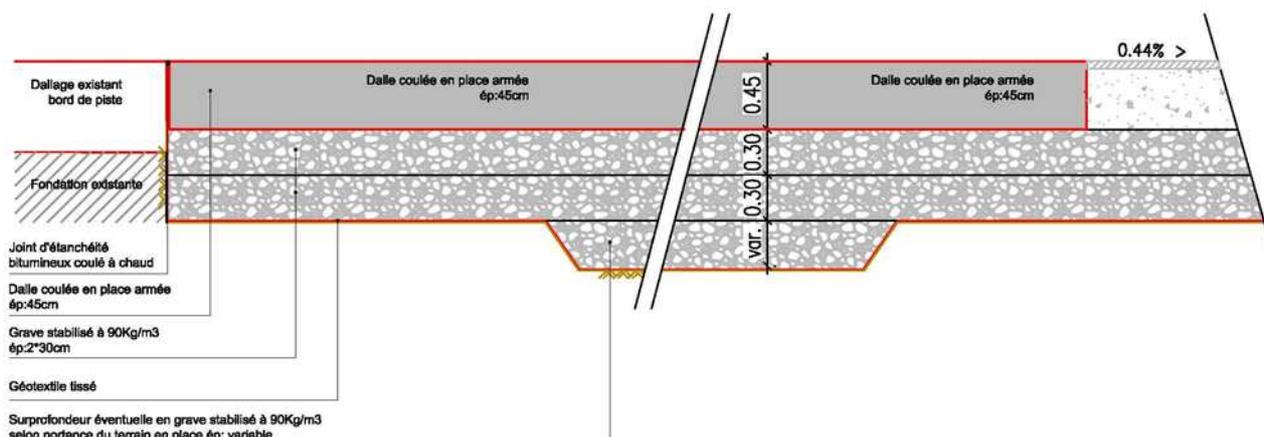
Des essais de portance sur la terre végétale ont permis de déterminer une valeur comprise entre 50 kg/cm² et 150 kg/cm² pour le module ME.

La possibilité de créer de grands chanfreins respectant les recommandations du *Document 9157, ICAO, Part 2, Aerodrome Design Manual*, en particulier le tableau 1-1 *Design criteria for a taxiway*, a été également évoquée et retenue.

Principe des travaux

La construction d'un dallage en béton pour une voie de circulation avions nécessite, en plus de la réalisation du dallage proprement dit, la création d'une fondation, de réseaux d'assainissement et de réseaux électriques pour les balisages lumineux.

Ci-dessous, une coupe des travaux à réaliser :

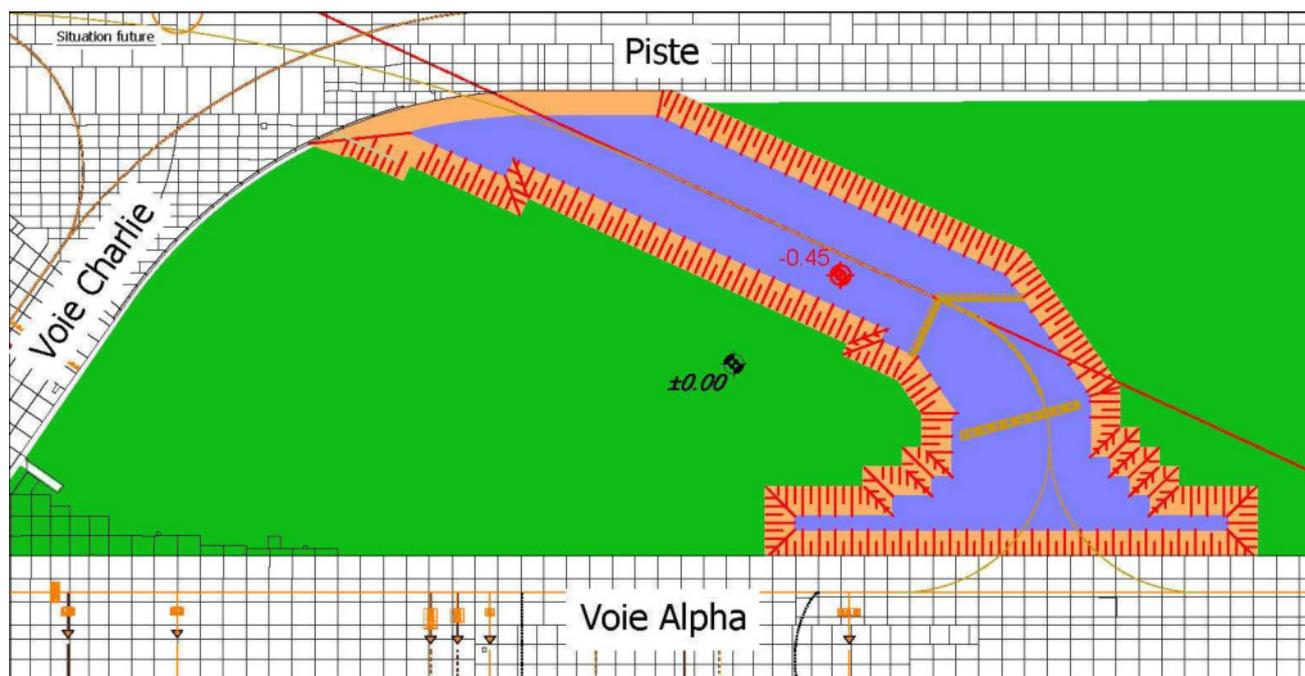


Afin de construire la fondation par étapes, nous proposons de décapier la terre végétale en place (ép. variable entre 25 et 50 cm) et de créer des grands chanfreins en bordure de la future zone bétonnée. Ces chanfreins auront une pente transversale qui pourra atteindre 5% maximum.

Après décapage nous serons à une profondeur de -45 cm par rapport au terrain en place. Les chanfreins en bordure de zone feront 10 m.

À noter que le décapage de terre végétale se fera par étape de 10 cm de profondeur. De cette façon, chaque matin, une différence de niveaux entre chaque zone sera d'au maximum 10 cm.

Ci-dessous la situation après décaissement par étape de la terre végétale :



L'opération suivante sera la réalisation de la fondation. Celle-ci comme le montre la coupe sera constituée de 2 couches de 30 cm de grave stabilisée. Chaque nuit, environ 110 m² de fondation seront traités. Chaque matin, la zone traitée sera comblée et le niveau sera restitué à -45 cm du niveau du terrain en place.

- ➔ Il n'y a, par conséquent, aucun risque particulier lors de cette étape. Les chanfreins réalisés à l'étape précédente permettront à un éventuel avion de traverser la zone sans rencontrer d'obstacle et la fondation aura une portance supérieure au terrain en place.

Une fois l'ensemble de la fondation réalisée, le dallage béton sera exécuté.

Pour des raisons de ruissellement des eaux en surface, les travaux commenceront par le bord côté voie Outer (point bas du projet).

Une dalle d'environ 6m x 12m sera bétonnée par nuit. Ces dalles font 45 cm d'épaisseur. Le plan ci-joint N°4359 – 1011a montre quelques exemples d'éta pes de bétonnage.

Les travaux vont nécessiter, chaque matin, une adaptation des chanfreins créés précédemment.

Ces adaptations de chanfreins figurent sur le plan n° 4359-1011a.

Avant de décrire plus précisément ce travail au niveau des chanfreins, il faut mentionner le travail sur la zone de raccord en bordure de piste. Cette zone devra être traitée à l'aide de dalles préfabriquées qui assureront la transition entre la partie existante et la nouvelle voie.

Synthèse des risques encourus en cas de sortie accidentelle d'un avion de la piste.

<u>Phase chantier</u>	<u>Risques</u>
Décapage terre végétale	Risque mineur Terrain de portance uniforme (terrain en place.)
Décapage terre végétale terminée	Risques mineurs Différence de niveaux de -45 cm Terrain de portance uniforme Grands chanfreins en périphérie de la zone
Réalisation de la fondation	Risques faibles Différence de niveaux de -45 cm Deux types de portances différentes, grave stabilisée / terrain en place Grands chanfreins en périphérie de la zone toujours existants
Fondation terminée	Risques mineurs Différence de niveaux de -45 cm Terrain de portance identique, grave stabilisée Grands chanfreins en périphérie de la zone toujours existants
Bétonnage du dallage	Risques mineurs Plus de différences de niveaux avec le terrain en place sur les zones bétonnées. Chanfrein adapté chaque nuit Au matin le béton est en train de faire sa prise. La résistance n'est donc pas très importante. Nécessité d'employer un béton assurant à 06h00 du matin une portance équivalente à celle du

	terrain en place.
Bétonnage du dallage terminé	Risque inexistant L'ensemble de la surface est à niveau avec le terrain adjacent. Il reste les deux zones raccords en remblayage provisoire
Pose des dalles préfabriquées	Risque inexistant

Mesures complémentaires

Aucun stockage de matériaux, ni de machines, n'aura lieu dans l'emprise du chantier.
Le périmètre du chantier sera délimité par un balisage frangible (hauteur du chanfrein), afin d'éviter que des engins ou le personnel ne sortent de la zone du chantier. Cette mesure simplifiera également le contrôle de la zone le matin à 05h30.

Conclusions :

Pendant toutes les phases de cet important chantier et dans le cas où un avion sortirait de la piste dans le secteur des travaux de la future sortie rapide Charlie 2, les différents supports auront une portance d'au minimum celle de la zone herbeuse dans la bande de la piste et des changements graduelles de pente.