



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Verkehr BAV
Office fédéral des transports OFT
Ufficio federale dei trasporti UFT
Uffizi federal da traffic UFT

Distances sur les quais

Zone de danger – Zone sûre



Rapport de recherche

2011

Editeur

Office fédéral des transports (OFT)
CH-3003 Berne

Coordination du projet

Office fédéral des transports (OFT)
Division Sécurité
Nicolas Keusen

Textes

Office fédéral des transports (OFT), Berne
Chemins de fer fédéraux suisses (CFF), Berne

Illustrations

Office fédéral des transports (OFT), Berne
W. Daamen, NL-Delft (photographies de la fig. 8) [8]
VSS, Zurich (fig. 9) [5]

Référence bibliographique

Rapport de recherche - Distances sur les quais,
Office fédéral des transports (OFT), Berne, 2011.

Distribution

Le rapport peut être téléchargé gratuitement sous
www.bav.admin.ch

Version allemande :
Abstände auf Perrons Forschungsbericht

Photographie de couverture

Panneau de mise en garde des voyageurs

TABLE DES MATIÈRES

ABRÉVIATIONS ET NOTATIONS	5
1. RÉSUMÉ	6
1.1 Zone de danger	6
1.2 Zone sûre	6
2. AVERTISSEMENT	7
2.1 Rédaction du document	7
2.2 Articulation du document	7
3. DÉFINITIONS	8
ZONE DE DANGER	9
4. INTRODUCTION	10
4.1 Objet de l'étude	10
4.2 But de l'étude	10
4.3 Domaine d'application	10
5. BASES	11
6. DÉMARCHE DE L'ÉTUDE	12
7. DÉFINITION DES RISQUES ADMISSIBLES ET INADMISSIBLES	13
8. DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES DE L'ÉTUDE	14
9. ÉTUDE ET DISCUSSION DES PARAMÈTRES ET DE LEURS EFFETS	15
9.1 Profil d'espace libre	15
9.2 Contact	15
9.3 Aérodynamique	17
9.3.1 Bases théoriques et expérimentales	18
9.3.2 Seuil de danger	19
9.3.3 Exploitation des résultats	20
9.3.4 Comparaison des études	22
9.4 Effet de surprise	22
9.4.1 Cause	22
9.4.2 Réaction	22
9.4.3 Conclusion	22
9.5 Bruit	23
9.5.1 Effet favorable	23
9.5.2 Effet défavorable	23
9.6 Poussières	23
9.7 Comportement de l'individu sur le quai	23
9.8 Conditions locales	24

10. SYNTHÈSE	25
11. CONCLUSION	28
11.1 Proposition pour les chemins de fer à voie normale	28
11.2 Proposition pour les chemins de fer à voie étroite	29
11.3 Dispositions transitoires	29
ZONE SÛRE	31
12. INTRODUCTION	32
12.1 Objet de l'étude	32
12.2 But de l'étude	32
12.3 Champ d'application	32
13. BASES	33
14. NÉCESSITÉ D'UN DIMENSIONNEMENT DES QUAIS	34
15. CARACTÉRISTIQUE FONDAMENTALE DU SYSTÈME	35
16. DIMENSIONS MINIMALES	36
16.1 Généralités	36
16.2 Encombrement du voyageur	36
16.3 Dépassement d'un voyageur	37
16.4 Croisement de voyageurs	37
16.5 Zones étroites de faible longueur (largeur < 1,50 m)	38
16.6 Mise en garde quant aux largeurs minimales	40
17. PRINCIPES POUR LE DIMENSIONNEMENT DES QUAIS	41
17.1 Généralités	41
17.2 Théorème et principe de dimensionnement	41
17.3 Démonstration du théorème	41
17.4 Corollaire au principe de dimensionnement	42
17.5 Valeurs de dimensionnement	43
17.6 Appréciation du risque	46
18. CONCLUSION	48
18.1 Proposition pour les chemins de fer à voie normale	48
18.2 Proposition pour les chemins de fer à voie étroite	48
18.3 Mesures transitoires	49
BIBLIOGRAPHIE	50
ANNEXE 1 : COMPARAISONS DES DIVERSES PRESCRIPTIONS ET DES RÉSULTATS DE L'ÉTUDE	51
ANNEXE 2 : ILLUSTRATION DES DIVERS TYPES DE TRAINS – VITESSE DU SOUFFLE PRODUIT	53

ABRÉVIATIONS

A

Acela : Trains à grande vitesse circulant entre Washington et Boston, acronyme d'« accélération » et d'« excellence »

C

CFF : Chemins de fer fédéraux suisses

D

DB : Deutsche Bahn SA

DE : Disposition d'exécution

DE-OCF Dispositions d'exécution de l'ordonnance sur les chemins de fer (RS 742.141.11)

E

EPFL : Ecole polytechnique fédérale de Lausanne

I

IC : Intercity, train tracté ou poussé composé de matériel voitures unifiées IV et locomotive Re 460.

ICE : Intercity-Express, train automoteur à grande vitesse de la DB

ICN : Intercity-Neigezug, train automoteur à caisse inclinable série 500 des CFF

L

LOS : « Level of service », niveau de service.

O

OCF : Ordonnance sur la construction et l'exploitation des chemins de fer (Ordonnance sur les chemins de fer, RS 742.141.1)

OFT : Office fédéral des transports

ORE : Office de recherche et d'essais de l'Union internationale des chemins de fer (ensuite : ERRI European Rail Research Institute)

P

PEL : Profil d'espace libre

R

RS : Registre systématique de la législation suisse

S

SNCF : Société nationale des chemins de fer français

T

TGV : Train à grande vitesse de la SNCF

TGV POS : TGV Paris-Ostfrankreich-Süddeutschland (série TGV 384000)

TRB : Transportation Research Board, Washington D.C.

U

UIC : Union internationale des chemins de fer

NOTATIONS

L_{eq} Niveau acoustique continu équivalent [dB(A)]

P Pression [N/m^2] = [Pa]

U Vitesse du souffle d'air [km/h] ou [m/s]

V Vitesse du train [km/h] ou [m/s]

1. RÉSUMÉ

En définissant une zone de danger et une zone sûre sur les quais, le but est de protéger les voyageurs des risques dus au passage des trains.

1.1 Zone de danger

Depuis l'introduction en 1984 des premières dispositions légales concernant la zone de danger sur les quais, les vitesses de passage des trains – dont dépend la dimension de cette zone – ont augmenté et les dimensions définies empiriquement ne semblaient plus adéquates pour les vitesses élevées.

La direction de l'Office fédéral des transports a donc lancé en 2003 un projet de recherche à ce sujet.

L'analyse des impacts sur le voyageur se trouvant sur un quai montre que la dimension des véhicules est déterminante pour les petites vitesses. A partir d'une vitesse de passage de 80 km/h, l'effet du souffle produit par le train est décisif.

Les recherches aérodynamiques établissent que l'effet du souffle varie considérablement selon le type de train, rame rapide bien profilée (ICN par exemple), train de voyageurs ou train de marchandises.

Les auteurs proposent donc de réviser les dispositions légales en distinguant le type de train circulant le long des quais. Les exigences pour les trains aérodynamiquement bien profilés et pour les trains de voyageurs en sont allégées alors qu'elles sont accrues pour les trains de marchandises.

1.2 Zone sûre

La surface à disposition des voyageurs sur les quais – que ce soit pour leurs déplacements entre les accès au quai et le train, entre le train et les sorties ou pour l'attente du train – doit répondre à des exigences contradictoires que sont la sécurité des voyageurs face au train et le critère économique, l'adaptation ou la construction d'un quai étant coûteux.

La zone sûre pour les voyageurs sur les quais étant non seulement contiguë mais aussi en interaction avec la zone de danger, la révision des dispositions légales concernant cette dernière devait logiquement aussi toucher la zone sûre.

L'analyse du comportement des voyageurs – qui sont des piétons sur les quais – et des dangers auxquels ils sont exposés permet de dégager des exigences de sécurité que l'on propose de reprendre dans les dispositions légales.

La réflexion menée nécessite de considérer les valeurs de dimensionnement qui sont aussi présentées au lecteur.

2. **AVERTISSEMENT**

2.1 **Rédaction du document**

Le but principal de ce rapport est de documenter les DE-OCF relatives aux distances sur les quais et de rendre ces connaissances accessibles aux personnes concernées par ce sujet.

La première partie du présent document (« zone de danger ») a été rédigée en juillet 2005 et a servi de base à la publication des DE-OCF du 2.7.2006.

Lorsque le présent rapport cite les « prescriptions existantes », il s'agit donc des prescriptions antérieures à juillet 2006 (état 1984).

Ce rapport a été complété ultérieurement par les résultats des campagnes de mesures effectuées en août et novembre 2006 (*cf.* ci-après sous 9.3).

Afin de documenter l'ensemble du thème de la sécurité sur les quais et en regard des questions de détail qui ne sont pas publiées dans un document législatif tel que les DE-OCF, les notes de travail les plus importantes et les réflexions accumulées au sujet de la zone sûre ont été transcrites dans la seconde partie du présent document (« zone sûre ») ; celle-ci a été rédigée en automne 2009 (avec un complément au printemps 2011) mais reflète l'état des prescriptions DE-OCF du 2.7.2006.

L'OFT remercie les spécialistes des CFF qui ont assisté et facilité les diverses campagnes de mesures et qui ont participé à la rédaction de la partie « zone de danger » de ce document et à sa relecture.

2.2 **Articulation du document**

Le présent rapport est articulé comme suit :

Introduction : chapitres 1 à 3

Zone de danger : chapitres 4 à 11

Zone sûre : chapitres 12 à 18

Bibliographie et annexe

3. DÉFINITIONS

Zone de danger : Zone d'un quai de chemin de fer dans laquelle un individu est menacé dans son intégrité physique par le passage d'un train.

La largeur de la zone de danger est définie à partir de l'axe de la voie.

Zone sûre : Zone d'un quai de chemin de fer ouvert au public située hors de la zone de danger.

En coupe, ces zones peuvent être représentées comme suit :

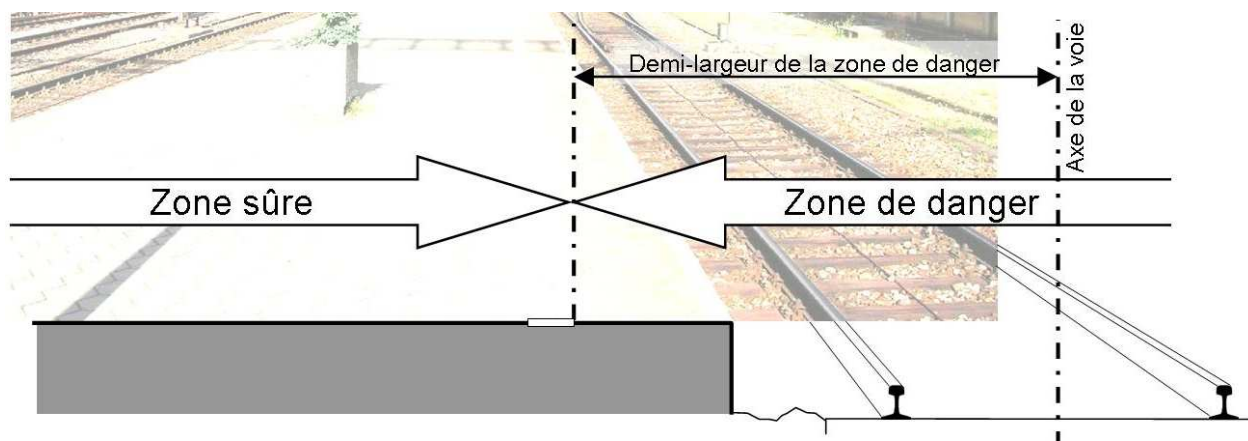


Figure 1 : Zone sûre et zone de danger en coupe

La limite entre les zones est choisie verticale, en rapport avec la position verticale de l'être humain.

Pour la définition de la position de la limite, d'autres études ou prescriptions se réfèrent au rail, à la surface du véhicule ou même à l'arête du quai ; ces éléments étant variables ou pouvant soulever des doutes (intérieur ou extérieur du rail, position différente en plan de l'arête du quai selon sa hauteur) ou même provoquer des erreurs (par exemple dans le cas de chemins de fer à voie métrique acheminant des véhicules à voie normale ou dans le cas de tronçons à trois files de rail), la définition choisie par rapport à l'axe de la voie s'imposait.

Voie étroite : Afin d'alléger le texte, on admet ici que le terme « voie étroite » regroupe tous les écartements inférieurs à celui de la voie normale (1'435 mm) ; ceci permet d'éviter la répétition de « voie métrique et voie étroite ».

Voyageur : Le terme générique de « voyageur », utilisé principalement dans la seconde partie de l'étude, désigne les piétons qui se déplacent et attendent sur les quais.

Zone de danger

4. INTRODUCTION

4.1 Objet de l'étude

Le chemin de fer, en tant que système de transport de personnes, possède et nécessite des interfaces – les quais – permettant d'embarquer et de débarquer les voyageurs. On admet que l'interface entre les voyageurs et les trains se limite aux quais ouverts au public.

De par les effets produits par les trains en mouvement, on pense en premier lieu aux effets aérodynamiques, les voyageurs peuvent être mis en danger sur les quais lors du passage d'un train.

L'objet de la présente partie de l'étude est la détermination de la zone de danger sur les quais le long des voies parcourues par les trains.

4.2 But de l'étude

Les dispositions d'exécution de l'ordonnance sur les chemins de fer (DE-OCF) contiennent, depuis leur première édition en 1984, des valeurs indicatives de la zone de danger le long des quais. Ces distances sont fonction de la vitesse de passage des trains et sont définies jusqu'à 160 km/h.

En raison de l'élévation des vitesses le long des quais, de la détermination empirique des distances définies dans les DE-OCF en 1984, de l'absence d'unité entre les pays voisins voire même de l'absence de la définition d'une distance de sécurité pour d'autres pays et de l'impossibilité de se référer à des bases indubitables, l'Office fédéral des transports (OFT) a décidé de mener un projet de recherche sur les distances de sécurité sur les quais ; les conclusions de cette recherche doivent permettre de réviser les DE-OCF y relatives.

4.3 Domaine d'application

Le champ de l'étude s'est étendu aux chemins de fer à voie normale dont le gabarit est conforme aux DE-OCF (et par extension aux gabarits UIC), ceci pour toutes les vitesses de passage des trains. Les chemins de fer à voie étroite ont été pris en compte de manière appropriée.

Le domaine d'application s'étend ainsi aux chemins de fer à voie normale et par analogie à ceux à voie étroite (en tenant compte des différences de gabarit) mais se limite expressément aux zones ouvertes aux voyageurs le long des voies, soient les quais.

5. BASES

La présente étude sur la zone de danger s'appuie sur et se réfère principalement aux bases suivantes :

- [1] « Studie zu aerodynamischen Lasten am Bahnsteig », DB Systemtechnik, München, Dezember 2004 (commande de l'OFT),
- [2] « Questions relatives au souffle provoqué par le passage d'un train », Note destinée à l'OFT, Laboratoire de mécanique des fluides environnementale, EPFL, Lausanne, mars 2005,
- [3] « Prüfbericht. Messung der zuginduzierten Strömungsgeschwindigkeiten am Bahnsteig Kiesen an der Strecke Bern - Thun », DB Systemtechnik, München, Dezember 2006 (commande de l'OFT).

D'autres références sont mentionnées dans la liste bibliographique.

6. DÉMARCHE DE L'ÉTUDE

L'étude a été conduite par l'OFT (division Construction jusqu'en 2005, division Sécurité dès 2006) avec la participation de spécialistes des CFF (Infrastructure) et s'articule selon la suite des réflexions suivantes :

1. Définition des risques admissibles et inadmissibles.
2. Détermination des paramètres de l'étude.
3. Etude et discussion des paramètres et de leurs effets.
4. Synthèse des paramètres et de leurs effets déterminants.

Des deux acteurs de l'étude, le train et le voyageur, le premier est parfaitement guidé alors que le second possède un comportement plus aléatoire. Ce fait fixe la principale limite de l'étude : rechercher une précision absolue dans la quantification des effets étudiés ne serait que vanité. Cette limite conduira aussi à écarter sans longue discussion certains paramètres secondaires non déterminants.

7. DÉFINITION DES RISQUES ADMISSIBLES ET INADMISSIBLES

Le but visé est d'éviter les atteintes à l'intégrité physique des personnes.

Ces atteintes inadmissibles sont la mort, les blessures externes et internes invalidantes provisoirement ou définitivement. La peur n'est pas retenue en tant que blessure ; ses conséquences doivent par contre être discutées si elles entraînent des atteintes inadmissibles.

Les atteintes au confort des personnes sont acceptées dans cette étude pour autant qu'elles ne conduisent pas directement à un danger ou à un risque inadmissible. Il est admis qu'une situation inconfortable mais pas dangereuse est tolérée. Dans ce cas, l'amélioration du confort n'est pas du ressort des prescriptions de l'autorité de surveillance, mais de l'entreprise de chemin de fer.

8. DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES DE L'ÉTUDE

Les auteurs ont tenté de déterminer l'ensemble des paramètres pouvant avoir une influence sur la zone de danger. Pour certains paramètres, il existe des facteurs aggravant ou soulageant l'effet du paramètre ; ceux-là ne sont pas mentionnés expressément dans la liste ci-dessous mais mentionnés et discutés lors de l'étude de chaque paramètre. La combinaison de deux ou plusieurs paramètres est aussi prise en compte dans l'étude des paramètres.

Les paramètres retenus pour l'étude sont :

- a. Profil d'espace libre
- b. Contact
- c. Aérodynamique
- d. Effet de surprise
- e. Bruit
- f. Poussières
- g. Comportement du voyageur / individu sur le quai
- h. Conditions locales

9. ETUDE ET DISCUSSION DES PARAMÈTRES ET DE LEURS EFFETS

9.1 Profil d'espace libre

Le profil d'espace libre (PEL) est l'enveloppe à tenir libre d'installations fixes autour d'une voie et qui est nécessaire pour garantir l'exploitation sûre du chemin de fer. Il est composé du gabarit limite des obstacles et des dégagements de sécurité (art. 18 OCF).

Pour la sécurité des personnes, le PEL assure en premier lieu celle des employés du chemin de fer. Les seuls tiers directement protégés par le PEL, plus précisément par son dégagement à la hauteur des fenêtres, sont les voyageurs à bord d'un train.

Avec la demi-largeur de 2,50 m à partir de l'axe de la voie pour la voie normale, le PEL ne répond pas aux exigences des distances de sécurité sur les quais, objet du présent rapport, et il n'est pas prévu de pouvoir l'utiliser dans le but de déterminer ces distances.

On peut tout de même constater que le PEL forme la limite inférieure qui doit être respectée par n'importe quelle installation fixe, y compris sur le quai, sous réserve d'autres exigences.

9.2 Contact

Le contact est défini comme celui entre le véhicule et l'individu sur le quai. Le contact doit en tous les cas être évité puisqu'il engendre le plus souvent et même à des vitesses modérées des blessures voire même des suites funestes pour l'individu sur le quai (menace de l'intégrité physique).

La démarche d'étude du paramètre de contact se résume comme suit :

- détermination de la position déterminante du véhicule,
- détermination de la position déterminante de l'individu,
- déduction de la position idéale de la limite des zones sûre et de danger.

Position déterminante du véhicule

En plus du véhicule considéré dans sa position statique, il faut tenir compte des surlargeurs créées par les éléments suivants :

- a) Les portes ouvertes et marchepieds. Leur position limite est donnée par les DE-OCF, DE ad art. 47 al., DE 47.2, soit, pour la voie normale, 0,20 m au-delà du contour de référence ; il en résulte une position de $1'645 + 200 = 1'845$ mm à partir de l'axe de la voie.
- b) Les chargements mal arrimés (en particulier les bâches flottantes). Dans un tel cas, la position limite est difficilement quantifiable mais une estimation prudente de 400 à 500 mm est plausible et raisonnable ; additionnée au gabarit de chargement de 1'565 mm, on obtient une valeur de 1'965 à 2'065 mm à partir de l'axe de la voie.

- c) Les transports hors gabarit ont une largeur statique qui atteint celle du gabarit limite des obstacles de 1'900 mm pour la voie normale¹. Les suppléments d'inclinaison transversale quasi-statique et la somme des différents déplacements aléatoires mentionnés par la fiche UIC 505-4 peuvent atteindre un total d'environ 200 mm à une hauteur de 2,5 m sur le plan de roulement.

De ces considérations, on retient une valeur de 1,85 à 1,90 m à partir de l'axe de la voie pour les cas usuels a) et c).

Le cas accidentel b) doit aussi être pris en compte pour protéger l'individu sur le quai ; on retient une valeur moyenne de 2,00 m.

Pour la voie normale, les surlargeurs dans les courbes de faible rayon ne sont pas considérées car aucun quai ne devrait être construit dans des courbes inférieures à 250 m de rayon, valeur au-dessus de laquelle les surlargeurs sont comprises dans la détermination des gabarits.

Par contre, pour la voie étroite, la surlargeur en courbe n'est jamais comprise et doit donc être ajoutée dans tous les cas.

Position déterminante de l'individu

On admet comme hypothèse de base que l'individu ne dépasse pas la limite des zones sûre et de danger avec son pied le plus proche du bord du quai, conformément au cas de figure souvent observé en pratique. Cette hypothèse implique un dépassement de la limite par le haut du corps et les bagages éventuels.

Afin de déterminer la position de l'individu, il faut connaître l'écartement de ses pieds durant la marche ainsi que son gabarit. On admet des valeurs moyennes tirées de la littérature médicale [4] pour le premier paramètre et de la norme suisse SN 640 201 [5] pour le second. Pour le gabarit d'un individu dans le cas usuel, il est adéquat de considérer les dimensions de base d'un piéton avec bagage, parapluie ou chaise roulante, soit une largeur de 0,80 m. La valeur du piéton sans bagage de 0,60 m est aussi prise en compte pour étudier le cas accidentel b).

Il s'en suit que le gabarit de l'individu avec bagage déborde d'une valeur théorique de 0,23 m dans la zone de danger et celui sans bagage de 0,13 m.

L'individu étant en mouvement, il faut tenir compte de la marge de mouvement de 0,10 m conformément à la norme suisse SN 640 201.

La position de l'individu en mouvement ainsi obtenue est illustrée par le croquis suivant :

¹ Par exemple : Char « Léopard 2 », largeur 3,70 m. *Éléments préfabriqués pour hôtels modulaires, largeur jusqu'à 3,80 m.*

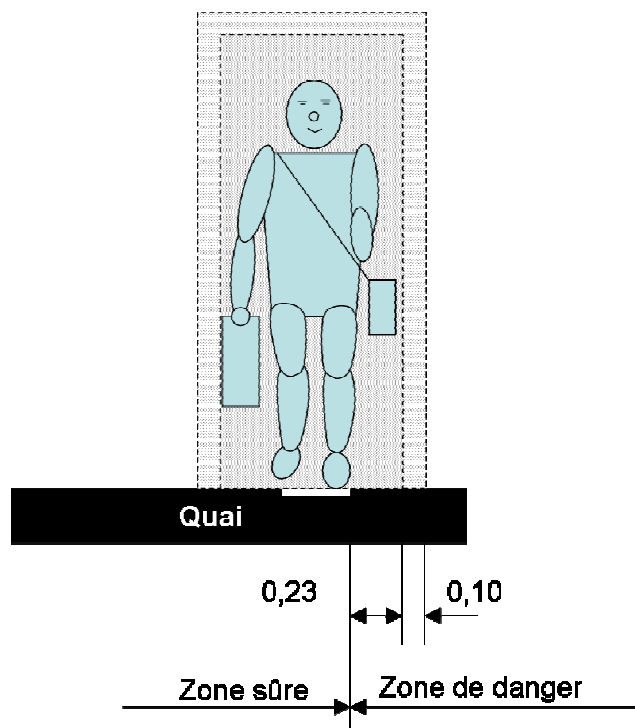


Figure 2 : Hypothèse de la position de l'individu en mouvement à la limite des zones

Position idéale de la limite des zones

Dans le cas usuel, la distance de la limite des zones depuis l'axe de la voie est donc de (1,85 m à 1,90 m) + 0,33 m = 2,18 m à 2,23 m.

Dans le cas accidentel (chargements mal arrimés), on considère le gabarit d'un individu sans bagage avec l'hypothèse que si l'individu porte un bagage, seul le bagage entre en contact avec l'élément du véhicule, sans suite grave pour l'individu ; on obtient donc une distance de : 2,00 m + 0,23 m = 2,23 m.

Actuellement, la valeur minimale de la zone de danger depuis l'axe de la voie est de **2,20 m**. Il est donc judicieux de retenir cette valeur pour le paramètre de contact étudié ici.

Il faut remarquer que cette valeur ne contient aucune marge de sécurité (cf. norme suisse SN 640 201) dans les cas mentionnés et n'est valable que pour l'individu vis-à-vis d'un véhicule dont la vitesse est faible. Lorsque la vitesse augmente, ce sont – entre autres – les effets aérodynamiques qui deviennent prépondérants (cf. chapitre 9.3 ss).

En plus de ces réflexions, une observation pragmatique de la situation sur les quais en alignement montre que la valeur minimale de 2,20 m assure tout juste la sécurité face au contact d'un individu dans la position limite sur la ligne de sécurité et tendant le bras vers le véhicule à faible vitesse.

9.3 Aérodynamique

L'effet de souffle ressenti lors du passage d'un train le long d'un quai est connu de chaque voyageur. Son étude est toutefois restée lacunaire jusqu'à ce jour. On trouve en effet plusieurs études sur les effets des trains à grande vitesse (TGV, Acela [6]) tendant surtout à prouver que le nouveau matériel n'est pas plus péjorant que le matériel existant sur les effets sur le personnel

dans les tunnels mais aucune étude sur les voyageurs sur les quais pour des trains et vitesses conventionnels. Les résultats de l'étude de la DB sur des mannequins placés sur les quais au début des années 1990 n'ont pas pu être retrouvés au sein de cette entreprise.

L'OFT a donc commandé une étude résumée [1] à l'entreprise DB Systemtechnik, Messungen Aerodynamik à Munich (Allemagne) qui est en possession de nombreuses mesures des effets aérodynamiques avec différents types de trains et qui les a exploitées pour la rédaction de la dite étude.

Ce rapport de la DB Systemtechnik a servi de base à l'étude objet du présent rapport.

Une appréciation qualitative a été effectuée par l'OFT par des mesures en août 2006 lors des essais du TGV POS entre Soleure et Bienne (circulations à 175 km/h).

Utilisant les synergies offertes par la circulation d'un train marchandises d'essai à 132 km/h entre Berne et Thoun en novembre 2006, une seconde campagne de mesures a été commandée par l'OFT à DB Systemtechnik à cette occasion [3].

9.3.1 Bases théoriques et expérimentales

Pour la bonne compréhension des phénomènes aérodynamiques, on cite ici les principales bases théoriques et expérimentales de l'étude [1]. Dans les résultats de ses mesures, cette étude différencie quatre catégories de trains : les ICE, les trains voyageurs, les trains régionaux et les trains marchandises.

Extrait traduit de l'étude [1] :

Pour un observateur immobile, le passage d'un train crée des ondes générées par les rapides modifications de la pression et des appels d'air. Ces effets aérodynamiques sont représentés schématiquement par la figure 3. On distingue les ondes du véhicule de tête (onde frontale) et du véhicule de queue (onde arrière), ainsi que les appels d'air provoqués dans la couche limite du train de passage ou dans la traînée (comparables au sillage d'un bateau).

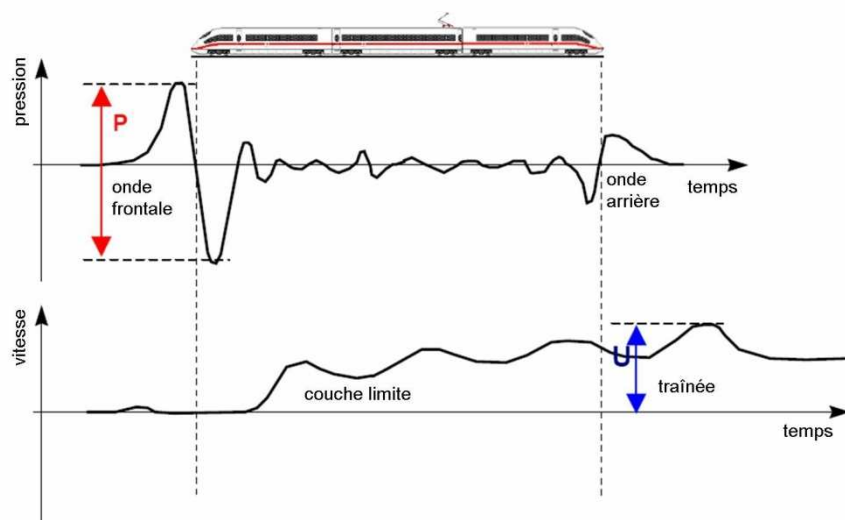


Figure 3 : Représentation idéalisée de l'évolution de la pression et des vitesses de l'air induites par le train le long d'un quai.

■ *Modifications de la pression dans l'onde frontale et l'onde arrière*

Lors du passage du train, la tête de celui-ci déplace l'air stagnant environnant, d'où une onde frontale. L'observateur au repos ressent une oscillation de la pression qui se constate déjà à quelques mètres de la tête du train. L'amplitude de l'onde frontale dépend de la forme de la tête du train et varie en fonction du carré de sa vitesse.

L'onde de pression qui en résulte est due au changement rapide entre l'augmentation et la diminution de pression. En s'éloignant du train, l'amplitude de l'onde frontale diminue rapidement. Cette amplitude, soit la différence P entre la pointe de surpression et la pointe de dépression, est déterminée lors des mesures. Il s'agit de la propriété caractéristique d'un véhicule en marche. L'amplitude de l'onde arrière est toujours plus faible que celle de l'onde frontale.

■ *Souffle d'air lié au passage d'un train*

La couche limite résulte des effets du frottement sur l'enveloppe extérieure du véhicule. Elle se manifeste par le fait qu'à proximité immédiate du train en marche, l'air est entraîné par et avec le train. Les vitesses de l'air sur le quai augmentent donc avec le passage du train. Pour certains trains, la vitesse maximale U n'est atteinte qu'après le passage du véhicule de queue, dans la traînée (le « sillage » du train, cf. figure 3).

Dans les mesures, la qualité d'un véhicule ou la charge aérodynamique sur un quai s'exprime par la vitesse maximale de l'air lors du passage d'un train. Cette valeur dépend de la vitesse du train, de la « rugosité » des véhicules, de la composition de la rame et de la forme du véhicule de queue. On entend par « rugosité » les inégalités des véhicules eux-mêmes mais aussi les espaces intermédiaires entre les véhicules ou le passage des véhicules chargés aux véhicules vides. Les structures fortement fracturées comme les wagons transportant des voitures de tourisme ou les rames composées de diverses catégories de véhicules sont défavorables du point de vue de l'aérodynamisme ; par contre, les véhicules à grande vitesse sans aspérités sont de ce point de vue favorables.

Fin de l'extrait.

9.3.2 Seuil de danger

Les réflexions sur le danger aérodynamique n'ont de sens que si le seuil de danger est fixé.

Les valeurs de l'onde de pression P atteignent des maxima toujours inférieurs à $1'000 \text{ N/m}^2$ ($1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}$) ; à 3,00 m de l'axe de la voie, on a par exemple une valeur maximale de 780 N/m^2 produite par un train de voyageurs roulant à 200 km/h. Les autres types de trains (ICE à 200 km/h, train marchandises à 100 km/h) produisent des ondes de pression sensiblement inférieures. Les valeurs maximales atteintes sont donc inférieures à la valeur du début de l'inconfort de $3'000 \text{ N/m}^2$ expérimentée dans le cadre de la Question C 149 de l'ORE [7], valeur elle-même inférieure aux valeurs dangereuses.

On conclut donc que l'onde de pression n'est pas dangereuse et son influence n'est donc pas retenue dans la suite de l'étude.

Pour fixer la valeur maximale admissible du vent (seuil de danger), on s'est basé sur l'échelle de Beaufort en retenant la valeur de **$U = 50 \text{ km/h}$** ($13,9 \text{ m/s}$).

Force Beaufort	Terme descriptif	Vitesse du vent		Effet à terre
		km/h	m/s	
0	Calme	< 1	< 0,3	La fumée s'élève verticalement.
1	Très légère brise	1 - 5	0,3 - 1,4	La fumée est déviée par le vent.
2	Légère brise	6 - 11	1,7 - 3,1	Frémissement des feuilles On perçoit le souffle du vent sur le visage.
3	Petite brise	12 - 19	3,3 - 5,3	Feuilles et petites branches constamment agitées Le vent déploie les drapeaux.
4	Jolie brise	20 - 28	5,6 - 7,8	Le vent soulève la poussière et les feuilles de papier.
5	Bonne brise	29 - 38	8,1 - 10,6	Les arbustes se balancent. Les fils téléphoniques bougent.
6	Vent frais	39 - 49	10,8 - 13,6	Les grandes branches s'agitent. L'usage du parapluie devient difficile. Les fils électriques et la cheminée "chantent". La marche devient très instable.
7	Grand frais	50 - 61	13,9 - 16,9	Les arbres entiers sont agités. Ils commencent à gémir. Il est pénible de marcher contre le vent.
8	Coup de vent	62 - 74	17,2 - 20,6	Petites branches cassées. Il est généralement impossible de marcher en avant.
9	Fort coup de vent	75 - 88	20,8 - 24,4	Cheminées et ardoises arrachées
10	Tempête	89 - 102	24,7 - 28,3	Arbres déracinés. Toitures endommagées
11	Violente tempête	103 - 117	28,6 - 32,5	Rare à l'intérieur des terres. Gros ravages sur les constructions, les cultures,...
12	Ouragan	> 118	> 32,8	Dévastation étendue et exceptionnelle

Figure 4 : Echelle de Beaufort.

Ce seuil est confirmé par [2] qui précise que le seuil de danger qui correspond à la force qui tend à jeter à terre un être humain est entièrement basé sur des considérations mécaniques et aérodynamiques (maître-couple du corps qui correspond à la surface projetée du corps, poids, position, etc.) et correspond en général à des vitesses de l'ordre de 15 m/s (soit 54 km/h).

9.3.3 Exploitation des résultats

Les études [1] et [3] fournissent des valeurs de pression P et de vitesse du vent U (cf. figure 3) pour quatre types de trains (train profilé ICE, train voyageurs grandes lignes, train régional et train marchandises) à des vitesses de passage et à des distances données. Ces résultats sont toutefois limités à quelques vitesses fixées d'avance pour les essais ou ramenées à ces vitesses pour les calculs et à des distances fixes correspondant à l'appareillage d'essai. Pour atteindre le but fixé de cette étude, il est nécessaire d'établir des courbes donnant la distance de l'axe de la voie en fonction de la vitesse de passage du train pour la valeur retenue du seuil de danger du vent.

Les valeurs du graphe sont obtenues en deux étapes :

1. La relation entre la vitesse du train et la vitesse du vent étant linéaire, on tire pour chaque distance donnée un point de la vitesse du train correspondant au seuil de danger de la vitesse du vent.
2. Le graphe de la distance de danger en fonction de la vitesse de passage du train est un polynôme du deuxième degré. Celui-ci est obtenu par interpolation de Lagrange pour chaque type de train. Pour la construction des polynômes de Lagrange, on introduit un point supplémentaire qui correspond à la peau du train, admis à 1,60 m à partir de l'axe de la voie, distance où la vitesse du vent est identique à celle du train.

On obtient la représentation graphique suivante :

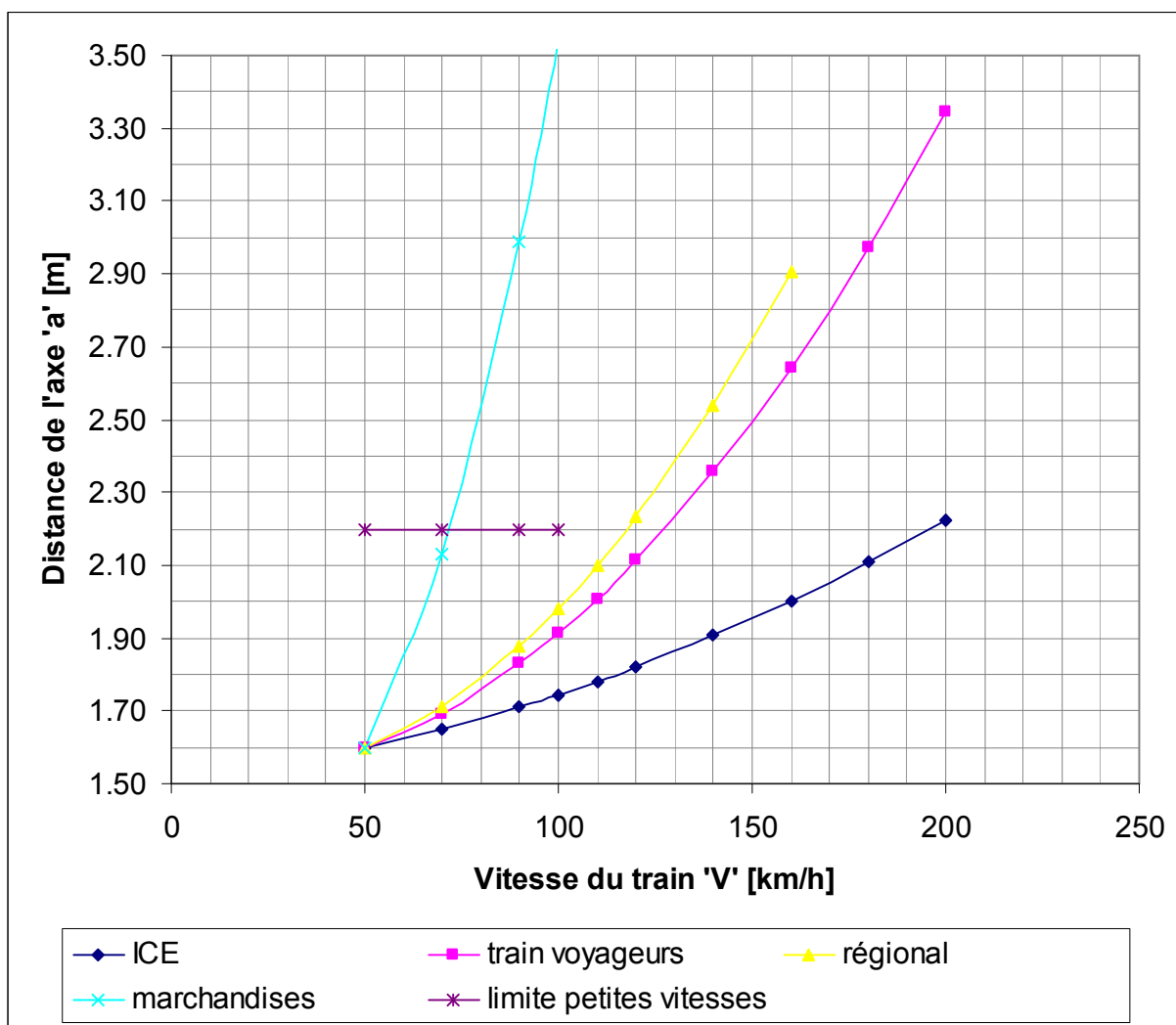


Figure 5 : Courbes $a = f(V)$ correspondant au seuil de danger $U = 50$ km/h.

Les résultats sont discutés dans la synthèse du rapport (chapitre 10).

Un exemple des différents types de train est donné en **Annexe 2**.

9.3.4 Comparaison des études

L'étude [1] est basée sur plusieurs campagnes de mesures menées en Allemagne, en général le long de quai d'une hauteur de 24 cm sur le plan de roulement (PDR) alors que l'étude [3] réalisée en Suisse a eu lieu sur des quais d'une hauteur de 55 cm sur le PDR. Comme la vitesse du souffle produit par le matériel roulant ICE de la DB a été mesuré dans les deux cas, il a été possible d'observer une bonne concordance entre les diverses campagnes de mesures.

Dans tous les cas (trains bien profilés ou non), les parties hautes déterminent le souffle maximal mesuré, ce qui explique les valeurs des trains marchandises mais aussi les valeurs élevées mesurées après le passage d'un train (traînée) ou lors du passage de deux rames bien profilées type ICN accouplées (cf. illustrations de l'**Annexe 2**).

Pour le cas particulier des trains bien profilés (ICE mais aussi IC) et en comparant les deux études, il est intéressant de relever que ce sont les parties basses – donc la zone des organes de roulement – qui sont déterminantes pour le souffle d'air mesuré sur le quai.

9.4 Effet de surprise

9.4.1 Cause

La cause de la surprise est la perception retardée d'un train arrivant à la hauteur d'un individu. Ce peut être un train silencieux ou dont le bruit est couvert par le bruit ambiant, train arrivant à vitesse élevée (par exemple trains à caisse inclinable ICN) ou à petite vitesse (mouvement de manœuvre, wagon manœuvré au lancer).

9.4.2 Réaction

La plupart des gens ont besoin d'environ deux dixièmes de seconde (0,2 s) pour réagir à un stimulus.

Lors d'une surprise, la réaction immédiate la plus courante est la pétrification de l'individu jusqu'à ce qu'il parvienne à analyser la modification de son environnement. Cette absence de réaction peut être très courte ou durer plusieurs secondes. Lorsque la surprise entraîne une réaction de peur, celle-ci conduit en principe à la fuite. Ceci explique aussi que, plus rarement, l'individu peut lâcher les objets qu'il porte ou, exceptionnellement, perdre connaissance. Lorsque la peur est très intense, on constate toutefois des réactions irrationnelles.

9.4.3 Conclusion

Dans tous les cas menant à la surprise, la réaction est plutôt positive pour le cas étudié ici. L'individu n'aura pas tendance à se rapprocher de la source de danger. Une réaction irrationnelle de peur ne semble se produire que pour des événements beaucoup plus intenses ou d'une durée plus longue.

La surprise ne semble donc pas être un facteur déterminant pour fixer la dimension de la zone de danger.

9.5 Bruit

Sur un quai à proximité immédiate de la voie, le niveau de pression équivalent L_{eq} atteint environ 120 dB (A) pour un train profilé ICN à 160 km/h, un train voyageurs standard à 140 km/h et un train de marchandises à 90 km/h.

Le bruit du train a un effet favorable et un effet défavorable.

9.5.1 Effet favorable

Le bruit du train qui s'approche est favorable car il agit comme un avertissement, ceci plusieurs secondes avant l'arrivée du train au droit du quai.

Lors du passage du train au droit du quai, le bruit important qu'il engendre entraîne un inconfort qui oblige les individus à s'éloigner du bord du quai.

Ces effets favorables sont malheureusement atténués avec les véhicules modernes (semelles de frein composites par exemple), voire même annihilés pour les trains silencieux circulant rapidement. Par exemple, pour un train ICN circulant à 200 km/h (55,6 m/s) et suivant les conditions locales de bruit, son arrivée n'est perçue auditivement qu'une demi seconde avant son arrivée au droit du quai.

9.5.2 Effet défavorable

Le niveau de bruit atteint par les trains est assez important ; il ne dépasse toutefois pas, dans le niveau et le temps, des valeurs dommageables pour l'oreille humaine.

De ce point de vue, le bruit n'est pas un critère déterminant pour fixer la dimension de la zone de danger.

9.6 Poussières

Le courant d'air accompagnant le train en déplacement entraîne des poussières, spécialement par temps sec. Il s'agit de poussières minérales ou végétales ainsi que de la poussière de fonte produite par les sabots de frein. Le développement du nuage de poussières est proportionnel aux effets aérodynamiques. Dans les conditions de notre pays, son apparition est limitée dans le temps et ses effets négatifs réduits.

Il a paru disproportionné de fixer ou agrandir la zone de danger pour répondre aux dangers de ce phénomène et une étude poussée ne s'avère pas nécessaire. On considère donc le risque qui en résulte comme admissible.

9.7 Comportement de l'individu sur le quai

Il n'est pas possible de maîtriser le comportement de chaque individu. Sur un quai, seules des mesures constructives lourdes (par exemple des barrières et des portes mécaniques) peuvent assurer que tout individu ne puisse pénétrer dans la zone de danger. Ces mesures semblent toutefois disproportionnées. On postule qu'une part de responsabilité individuelle peut et doit être

laissée à chaque usager du chemin de fer. La ligne de sécurité est appropriée pour marquer la limite entre la zone sûre et la zone de danger de manière adéquate.

De part l'encombrement de l'individu, sa position n'est toutefois pas absolument déterminée par rapport à la limite entre les zones. Cette incertitude peut être couverte par le fait que la ligne de sécurité a une certaine largeur (actuellement 20 cm, ultérieurement 30 cm pour les lignes tactilo-visuelles) et qu'elle est appliquée dans la zone sûre.

9.8 Conditions locales

Des conditions particulières peuvent aggraver certains phénomènes. On pense en particulier aux obstacles qui réfléchissent le souffle et qui peuvent ainsi repousser directement un individu ou un objet contre le train produisant ce souffle. Ce cas se rencontre en particulier dans les gares et haltes en tranchée et en tunnel.

S'agissant de cas particuliers, on ne peut pas ici étudier leurs caractéristiques qui doivent faire l'objet d'études au cas par cas. On remarquera toutefois que des mesures de protection supplémentaires doivent être prises dans de tels cas.

10. SYNTHÈSE

L'étude des différents paramètres retenus pour cette étude montre que le souffle aérodynamique est prépondérant pour fixer la largeur de la zone de danger sur les quais. A faible vitesse, ce sont toutefois les aspects liés au contour des véhicules (« profil d'espace libre ») qui sont déterminants. Le souffle aérodynamique dépend de la vitesse de passage du train et du type de train.

Le cas « train régional » n'est pas foncièrement différent du cas « train voyageurs » et on propose de couvrir ces deux cas par une seule courbe-enveloppe.

Pour la simplicité d'exécution du marquage de sécurité, il faut limiter les distances à appliquer à quelques valeurs caractéristiques qui couvrent les courbes de danger.

Si l'on suit les résultats des mesures, le cas « train marchandises » obligerait à augmenter la zone de danger de manière importante. Dans ce cas, l'inconfort acoustique et l'onde frontale obligent l'individu sur le quai à se retirer instinctivement d'un intervalle supplémentaire par rapport à la bordure du quai ; de ce fait, nous proposons de réduire légèrement la zone de sécurité théorique pour ce cas. On exclut les vitesses supérieures à 120 km/h pour ces trains.

Pour les trains aérodynamiquement bien profilés, ce n'est plus le souffle aérodynamique mais le comportement du voyageur sur le quai qui devient déterminant. Pour cette raison, la courbe-enveloppe correspondante est translatée du côté de la sécurité.

Les courbes-enveloppes proposées sont (trait épais) :

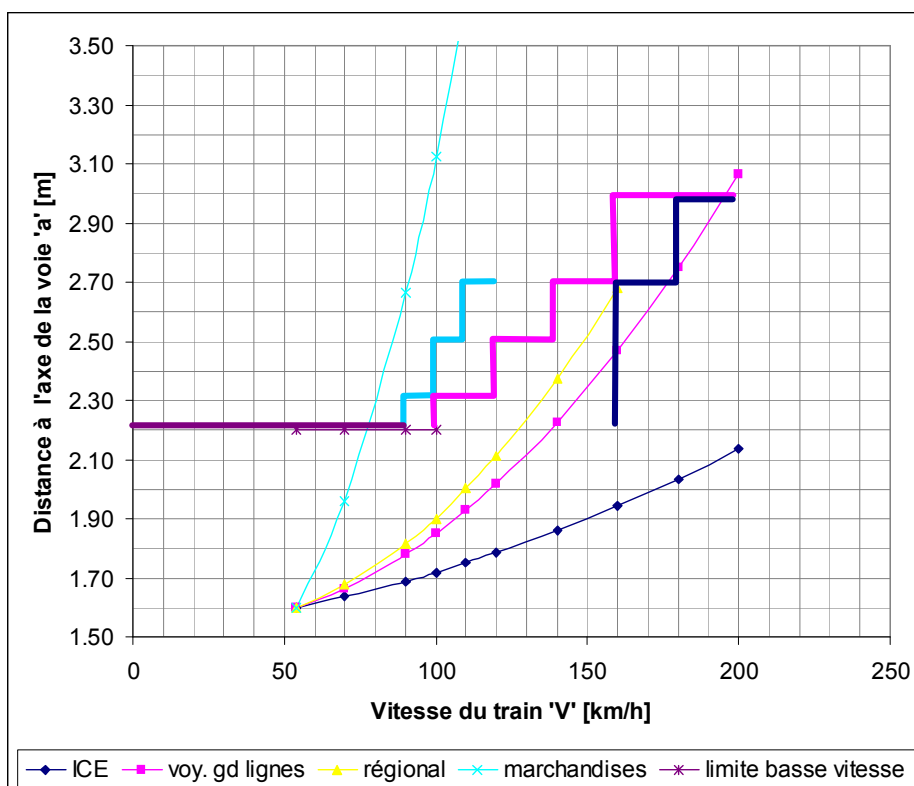


Figure 6 : Courbes-enveloppes des courbes de danger

Dans tous les cas, le marquage (ligne de sécurité) est le seul signe distinctif de la limite entre les zones de danger et sûre. Il est donc impératif que les utilisateurs des quais soient sensibilisés au danger et que le marquage soit bien compris. Une information adéquate doit donc être dispensée aux voyageurs. Le panneau existant (figure 7) en fait partie.



Figure 7 : Exemple d'information aux voyageurs

■ Vitesses élevées (> 160 km/h)

Pour les vitesses élevées (> 160 km/h), il y a conjonction de deux facteurs négatifs, soit le peu de bruit produit par les trains pouvant atteindre ces vitesses, et par là l'absence d'avertissement pour l'individu sur le quai, ainsi que le faible temps de dégagement disponible pour un individu se trouvant en bordure du quai. Aux vitesses considérées, le train s'approche à plus de 45 m/s ; dans le même temps, l'individu ne peut dégager qu'à environ 1 m/s plus le temps de réaction.

Considérons le cas de figure suivant : ICN roulant à 180 km/h (50 m/s). Le mécanicien aperçoit un individu empiétant sur la zone de danger.

- Temps de réaction du mécanicien : 0,5 s
- Avertissement (klaxon UIC) : 1 s
- Temps de réaction de l'individu : 0,5 s
- Temps de dégagement : 1 s
- Total : 3 s, soit un parcours de 150 m pour le train

D'expérience, il n'est pas possible de déterminer avec précision l'emplacement d'un voyageur sur le quai à plus de 150 m devant le train.

De plus, le cas considéré est la cas idéal où le voyageur peut être averti. En raison du caractère silencieux des trains modernes, le voyageur ne prend conscience de l'approche du train qu'au dernier moment (0,5 à 1 s selon le niveau de bruit environnant et la vitesse du train). Il est donc

nécessaire de prendre des mesures complémentaires pour les vitesses supérieures à 160 km/h. Au-delà de 200 km/h, il semble logique d'éviter tout conflit potentiel entre des individus sur un quai et le train.

■ *Prescriptions existantes*

Les prescriptions existantes sont trop conservatrices pour les trains voyageurs aux vitesses supérieures à 125 km/h et sont par contre trop laxistes face au danger créé par les trains de marchandises ; pour ces raisons, leur révision est nécessaire. Une comparaison entre les prescriptions existantes datant de 1984 et les résultats de cette étude est donnée en **Annexe 1**.

■ *Autres prescriptions*

Une comparaison avec les prescriptions françaises et allemandes (état 2005) est donnée en **Annexe 1**.

11. CONCLUSION

L'étude des paramètres déterminants pour la fixation de la zone de danger sur les quais fait apparaître la prépondérance des effets aérodynamiques. Ceux-ci sont différents selon le type de train considéré. Pour les vitesses élevées, le comportement des individus sur les quais devient décisif.

11.1 Proposition pour les chemins de fer à voie normale

Le but de l'étude étant, dans le cadre de la révision des DE-OCF, de réviser la disposition d'exécution *ad* art. 21 alinéa 2 OCF (DE 21.2), nous proposons les modifications suivantes sur la base des résultats de l'étude :

Il faut définir au préalable explicitement les zones du quai :

1	Définition Sur les quais, pour la protection des personnes contre le danger représenté par le passage des trains, on distingue : - la zone de danger, - la zone sûre.
---	---

Pour la zone de danger, le texte suivant est proposé :

2

Zone de danger

21

La zone de danger est déterminée depuis l'axe de la voie en fonction de la vitesse de passage des trains et des conditions locales.

22

En règle générale, la zone de danger est déterminée comme suit :

Vitesse de passage (v) [km/h]			Distance minimum à l'axe de la voie [m]
$v_{\max}$ trains mar- chandises (en général V_A^1)	$v_{\max}$ trains voyageurs (en général V_R^1)	$v_{\max}$ trains bien profilés aérodynamiquement (V_N^1)	
0 - 90	0 - 100	(0 - 160 : pas déterminant)	2,20
91 - 100	101 - 120		2,30
101 - 110	121 - 140		2,50
111 - 120	141 - 160	161 - 180	2,70
(voir chiffre 23)	161 - 200	181 - 200	3,00

Il n'est pas permis de transiter à $v > 200$ km/h le long de quais librement ouverts aux voyageurs.

(suite en page suivante)

23	Particularités Là où les effets du souffle d'air peuvent être amplifiés et provoquer une aspiration dangereuse, on prévoira des mesures de protection supplémentaires ainsi que des largesurs plus grandes pour la zone de danger. Lorsque des trains de marchandises circulent à plus de 120 km/h, il faut examiner sur la base de leurs caractéristiques aérodynamiques si la zone de danger selon chiffre 22 suffit ou s'il faut l'augmenter.
----	--

De plus, il est nécessaire de prendre des mesures particulières pour les vitesses élevées :

3	Zone sûre
33	Pour la plage de vitesses de 161 à 200 km/h, des mesures de protection spéciales contre l'effet de surprise doivent être prises conformément à la directive de l'OFT du 2.7.2006 « Protection des voyageurs sur les quais pour des vitesses de passage supérieures à 160 km/h ».

11.2 Proposition pour les chemins de fer à voie étroite

Pour la voie étroite, nous proposons d'utiliser la réglementation de la voie normale comme base, tout en tenant compte des différences de profil d'espace libre comme suit :

1	La DE 21.2 voie normale est applicable pour la voie métrique sous réserve des chiffres 2 et 3 ci-après.	
2	Zone de danger	
	Les distances doivent être adaptées comme suit :	
21	La distance doit être augmentée de la surlargeur en courbe selon art. 18 feuille n° 13 M.	
22	Selon le gabarit, les distances seront réduites comme suit :	
	- voie métrique A	réduction de 0,20 m
	- voie métrique B (trucs ou bogies transporteurs chargés)	
	- de 0 à 40 km/h	réduction de 0,20 m
	- $V > 40$ km/h	pas de réduction
	- voie métrique C	réduction de 0,40 m

11.3 Dispositions transitoires

Par rapport aux dispositions existantes, les nouvelles distances de sécurité sont réduites pour les trains de voyageurs mais augmentées pour les trains de marchandises. Ceci a des conséquences

pour les gares existantes. Pour cette raison, l'OFT a émis la directive « Dispositions transitoires pour l'aménagement de la zone sûre des constructions existantes » du 2 juillet 2006 à ce sujet.

Par contre, la zone de danger est clairement définie. Sa largeur n'étant dépendante que de la vitesse et du type de train, ces mesures transitoires ne devront pas affecter la zone de danger.

Zone sûre

12. INTRODUCTION

12.1 Objet de l'étude

La zone sûre est la surface sur laquelle les voyageurs peuvent se tenir sans risque d'interactions dangereuses avec les trains, comme ceci est défini dans la première partie de cette étude traitant de la zone de danger.

L'objet de la présente étude est la description des paramètres définissant la zone sûre sur les quais voyageurs le long des voies parcourues par les trains.

12.2 But de l'étude

Avec la définition explicite des « zone de danger » et « zone sûre » et après avoir étudié la zone de danger en détail dans la première partie de ce rapport, il est nécessaire de jeter les bases de la zone sûre.

Dans la première édition de 1984 des dispositions d'exécution de l'ordonnance sur les chemins de fer (DE-OCF) la zone sûre n'est définie qu'indirectement par une distance aux obstacles mais sans tenir compte des différentes dimensions possibles de la zone de danger.

Jusqu'à maintenant, les notions de capacité et de dimensionnement de la zone sûre sont absentes des prescriptions ; vu la charge des quais voyageurs et le problème de l'espace disponible dans l'environnement bâti des gares, les notions mentionnées doivent être précisées. L'Office fédéral des transports (OFT) fait ici une synthèse des connaissances dans ce domaine afin de réviser les DE-OCF en parallèle avec les prescriptions de la zone de danger.

12.3 Champ d'application

Le champ de l'étude s'est étendu à tous les types de chemins de fer suisses. Il s'applique à la population actuelle en regard de ses caractéristiques morphologiques et sociologiques. De rares valeurs extrêmes par rapport à une distribution normale des caractéristiques de la population peuvent toutefois avoir été omises.

Le domaine d'application se limite expressément aux zones ouvertes aux voyageurs le long des voies, soient les quais.

13. **BASES**

La présente étude s'appuie principalement sur les nombreuses expériences tirées de la réalité, lesquelles sont rendues succinctement dans ce rapport, et se réfère aux bases mentionnées dans la liste bibliographique.

14. NÉCESSITÉ D'UN DIMENSIONNEMENT DES QUAIS

L'affluence sur les quais peut être notablement différente selon le point d'arrêt, selon que celui-ci soit, par exemple, une grande gare de correspondance ou une halte dans une région peu peuplée.

Le dimensionnement doit répondre à plusieurs contraintes dont les critères déterminants sont :

1. La charge de voyageurs.
2. L'économie, lequel critère sous-tend :
 - a. La durée de vie de l'ouvrage
 - b. Les coûts de construction.

Vu les coûts de construction élevés des quais, coûts généralement induits par un environnement dense et peu adaptable (milieu urbain, faisceaux de voies), les quais sont habituellement planifiés avec une durée de vie d'au moins 50 ans. Ils ne répondent de ce fait que très difficilement aux variations de la demande, c'est-à-dire aux variations de l'affluence des voyageurs.

Par conséquent, un dimensionnement correspondant à la charge maximale de l'ouvrage sur sa durée de vie est de première importance. Cette exigence est formulée comme suit :

La zone sûre est déterminée sur la base de l'affluence prévisible à long terme sur le quai.

tout en étant conscient que la planification de l'affluence des voyageurs ne peut pas être effectuée de manière réaliste sur le même horizon temporel que la durée de vie du quai.

15. CARACTÉRISTIQUE FONDAMENTALE DU SYSTÈME

Les quais voyageurs du système « chemin de fer » présentent une particularité spécifique dans le dimensionnement de leur zone utilisable par les personnes, appelée ici zone sûre : au contraire des cas généralement étudiés dans le déplacement des piétons, cas qui sont limités par des obstacles fixes, souvent parallèles au déplacement lorsqu'ils sont de grande longueur, la limite de la zone sûre du côté de la voie n'est que virtuelle (ligne de sécurité) et peut être franchie sans aucune difficulté.

Sur un quai voyageurs, la limite physique du système (le bord du quai) est différente de la limite de la zone utilisable par les voyageurs (la ligne de sécurité).

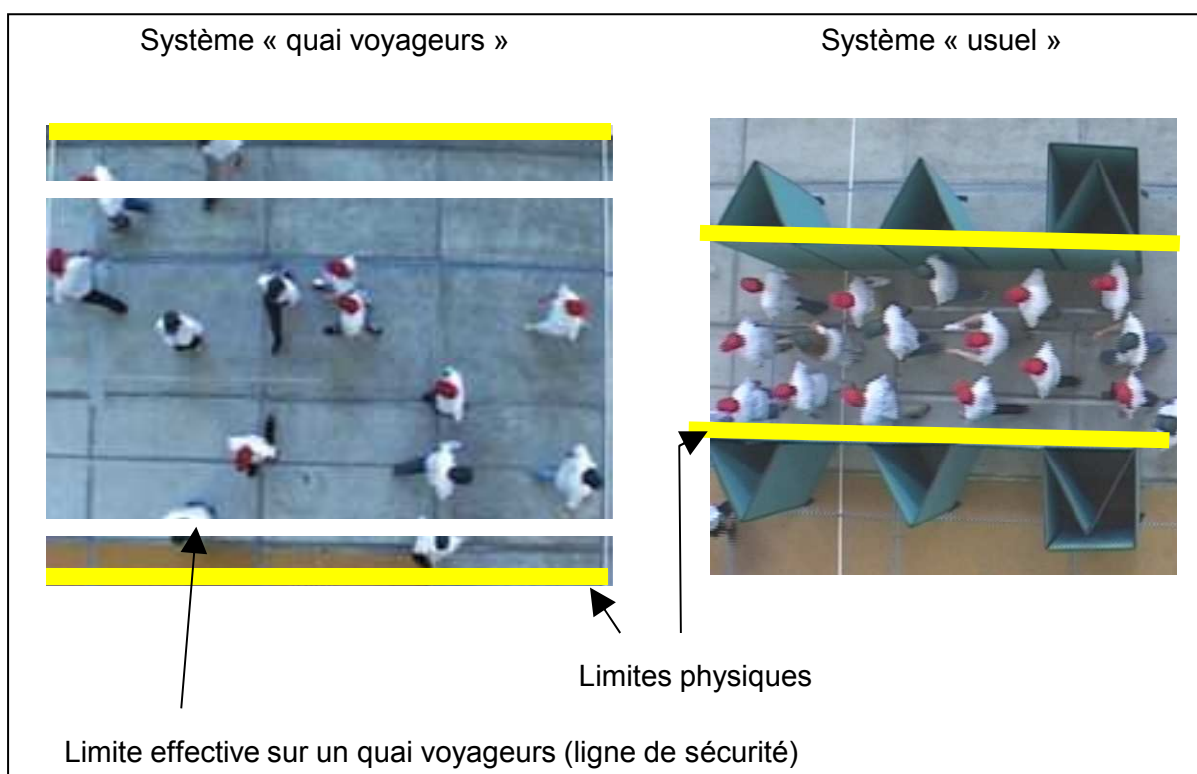


Figure 8 : Illustration des limites différentes selon le système

Dans le cas d'un quai voyageurs, il est donc impératif de tenir compte d'une limite « molle » du système.

Cette limite n'étant pas absolue, il faut tenir compte de son franchissement dans les cas suivants :

1. Dépassement de voyageur(s) dans une zone étroite
2. Croisement de voyageurs dans une zone étroite
3. Augmentation de la densité de voyageurs dans la zone sûre

De plus, la ligne est évidemment franchie dans le cas :

4. Embarquement et débarquement de voyageurs d'un train à l'arrêt.

L'objet de la présente étude étant la sécurité vis-à-vis des trains en mouvement, ce point ne sera pas commenté plus loin ici.

16. DIMENSIONS MINIMALES

16.1 Généralités

Dans les zones moins fréquentées des quais et en particulier dans les petites gares, les critères principaux de dimensionnement énoncés au chapitre 14 conduiraient à des dimensions de la zone sûre qui ne satisferaient pas aux exigences minimales de sécurité sur les quais, en particulier et comme mentionné ci-dessus, dans le cas du croisement et du dépassement de voyageurs.

Pour cette raison, il faut fixer des dimensions minimales de la zone sûre.

Pour une longueur de train donnée, la longueur d'un quai n'a généralement pas ou très peu d'influence sur la capacité de ce quai et c'est habituellement uniquement la dimension transversale qui est déterminante. Les dimensions minimales dont il est question ici se réduisent donc, en première approche, à une seule dimension, la largeur.

16.2 Encombrement du voyageur

De nombreuses publications traitent de ce sujet (*cf.* par exemple [9] et sa bibliographie). On se contente donc ici d'utiliser les informations les plus probantes.

La norme suisse SN 640 201 [5] donne une définition largement utilisée qui construit le gabarit des piétons en considérant :

- la dimension de base d'un piéton, avec ou sans accessoires,
- la marge de mouvement et
- la marge de sécurité

résumées ici sur la figure reprise de la dite norme :

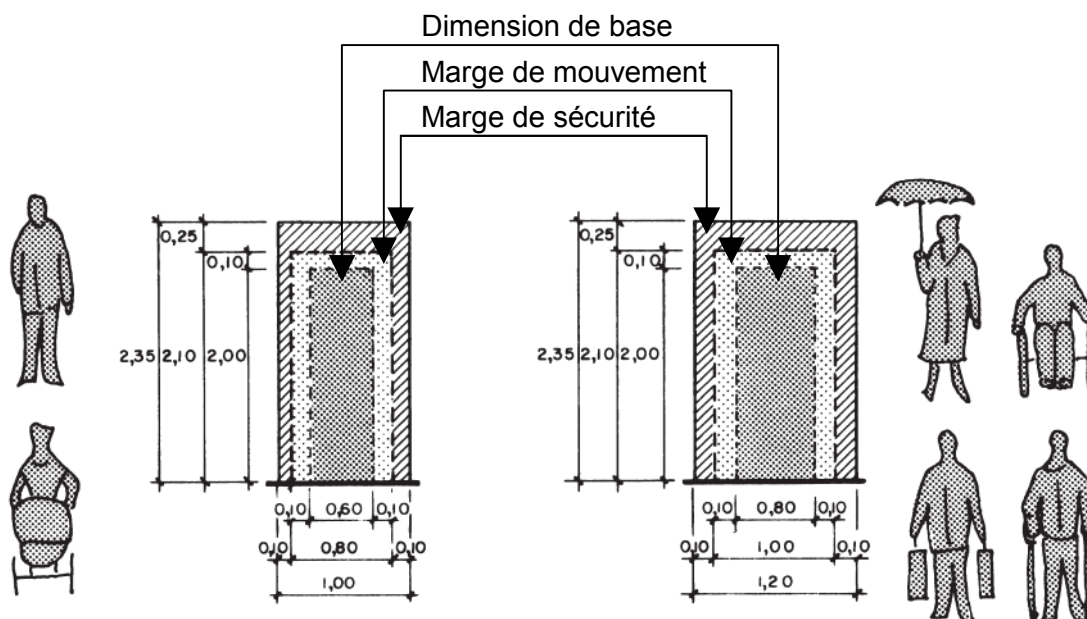


Figure 9 : Constituants du gabarit du piéton selon la norme suisse SN 640 201

16.3 Dépassement d'un voyageur

La pratique montre que le cas de dépassement d'un voyageur se produit souvent le long d'obstacles de grande longueur, tels les parapets des rampes d'accès aux quais. En effet, le parapet est souvent utilisé comme appui pour le voyageur en attente.

Sur la base des données d'encombrement tirées de la norme suisse SN 640 201 et avec l'hypothèse que le dépassement a lieu du côté de la voie et non du côté du parapet, on retient les valeurs d'encombrement minimales suivantes :

- 0,60 m pour le voyageur en attente ; ceci correspond à la dimension de base uniquement puisque le voyageur n'est pas en mouvement et ne peut donc faire valoir ni la marge de mouvement, ni la marge de sécurité.
- 0,90 m pour le voyageur en mouvement car on néglige la marge de sécurité du côté de la voie.

On obtient ainsi une largeur minimale de 1,50 m

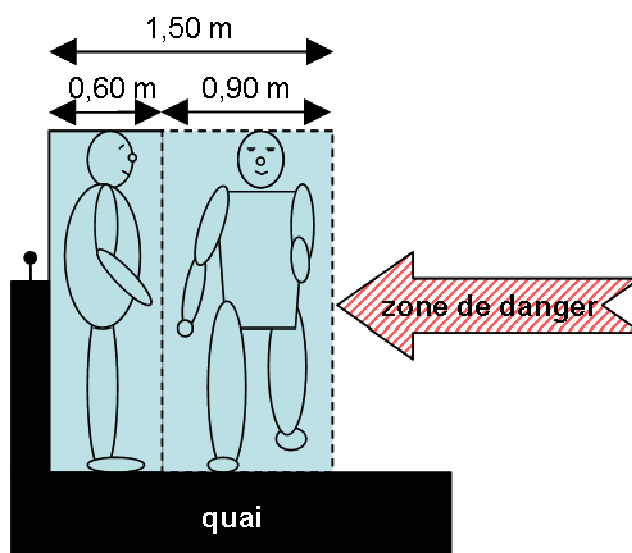


Figure 10 : Largeur minimale en cas de dépassement d'un voyageur

Un voyageur chargé de bagages nécessitera une largeur supérieure à celle de 0,90 m retenue ici. Plusieurs facteurs montrent que l'occurrence de cet événement est plus faible, en particulier en raison du comportement différent des voyageurs lourdement chargés qui s'aventurent moins souvent dans les zones étroites.

On ne cachera pas que le fait que cette distance minimale correspond – pour une bonne partie des gares – aux exigences actuelles des DE-OCF (3,70 m aux obstacles moins 2,20 m de la zone de danger = 1,50 m), permet d'éviter de très grandes dépenses supplémentaires d'infrastructure.

16.4 Croisement de voyageurs

Sur les mêmes bases que celles retenues pour le dépassement d'un voyageur sans bagages, la largeur minimale pour le croisement de deux voyageurs vaut :

- 1,00 m pour le voyageur en mouvement du côté de l'obstacle,

- 0,90 m pour le voyageur en mouvement car on néglige la marge de sécurité du côté de la voie.

soit un total de 1,90 m.

Cette valeur n'est toutefois pas retenue pour les dispositions légales car il était alors admis que des trafics de sens contraire sont l'exception sur les quais. Il ne se produisent que dans les grandes gares disposant de plusieurs accès aux quais et de zones sûres élargies.

De plus, il faudrait dans l'absolu augmenter cette valeur du supplément environnemental de 0,20 m contre la balustrade. La largeur nécessaire pour les bagages doit aussi être comptée en sus.

S'il faut tenir compte du croisement de voyageurs pour le dimensionnement d'un quai, ceci ne doit pas être exprimé comme valeur minimale mais comme paramètre de dimensionnement qui est inclus dans l'exigence principale de dimensionnement (cf. chapitre 14)².

16.5 Zones étroites de faible longueur (largeur < 1,50 m)

Les prescriptions actuelles (DE-OCF de 1984) permettent des largeurs minimales réduites (moins de 1,50 m) le long d'obstacles courts et de nombreuses installations existantes présentent de telles caractéristiques. Il faut donc examiner la pertinence de la conservation ou de la suppression d'une telle prescription.

Dans une zone sûre de largeur inférieure à 1,50 m, la rencontre de deux voyageurs implique nécessairement le franchissement de la limite de la zone et la pénétration dans la zone de danger.

Pour apprécier le risque, les points déterminants abordés sont, en résumé :

- a) Probabilité d'occurrence de la pénétration du voyageur dans la zone de danger,
- b) Durée de la pénétration du voyageur dans la zone de danger,
- c) Mesures pour éviter que le voyageur ne pénètre dans la zone de danger et coûts de ces mesures.

Ces points ont été appréciés comme suit :

- a) La probabilité d'occurrence de la pénétration du voyageur dans la zone de danger dépend de plusieurs facteurs, en particulier
 - a1) l'affluence sur le quai,
 - a2) la longueur de la zone étroite,
 - a3) la largeur de la zone étroite,
 lesquels conduisent aux conclusions partielles suivantes :
 - a1) en cas d'affluence moyenne ou forte sur le quai, l'exigence principale de dimensionnement sera déterminante et imposera une largeur au moins égale à 1,50 m,
 - a2) comme la longueur de la zone étroite est faible, la probabilité d'occurrence est moindre ; corollairement, une limitation de la longueur de la zone étroite est indispensable,
 - a3) la zone étroite doit au moins offrir un espace sûr pour un voyageur en mouvement ; il faut donc fixer une borne inférieure absolue à 0,90 m.

² « La zone sûre est déterminée sur la base de l'affluence prévisible à long terme sur le quai. »

- b) La durée de la pénétration du voyageur dans la zone de danger est aussi limitée du fait que la longueur de la zone étroite est limitée ; à nouveau, ceci montre la nécessité de limiter cette longueur.
- c) Les mesures d'évitement de la pénétration du voyageur dans la zone de danger sont en général très conséquentes car elle nécessitent un réaménagement constructif complet de la zone ; leur coût est donc élevé ou très élevé. Si la probabilité d'occurrence de la pénétration du voyageur dans la zone de danger est faible, le principe de proportionnalité plaide pour une conservation d'une prescription permettant des largeurs minimales réduites le long d'obstacles courts. Toutefois, des mesures de compensation d'un coût modéré doivent être assurées.

Les mesures de compensations prévues sont :

- Main-courante : la présence d'une main-courante permettant aux voyageurs surpris par le passage d'un train de résister aux phénomènes aérodynamiques,
- Ligne de sécurité : l'existence de la ligne de sécurité qui permet aux mécaniciens de déterminer la position des voyageurs sur le quai et de les avertir si nécessaire (sifflet de locomotive).

La possibilité de largeurs minimales réduites doit donc :

- se limiter à des obstacles courts ; leur longueur maximale est fixée sur la base de l'ouverture d'un escalier, soit à peu près 10 m ; aux extrémités peu fréquentées de quai, une largeur réduite est aussi applicable sous réserve que son utilisation future n'en soit pas péjorée (principe du dimensionnement à long terme),
- entraîner des mesures de compensation, en particulier la main-courante.

La ligne de sécurité est en tous les cas obligatoire sur les quais.

Dans tous les cas, la largeur minimale ne doit pas être inférieure à 0,90 m.

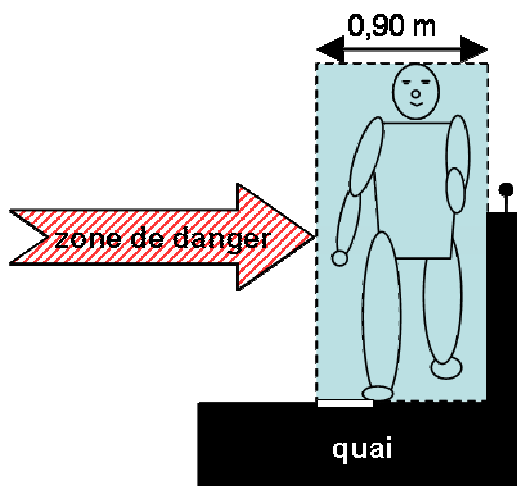


Figure 11 : Largeur minimale réduite le long d'obstacles courts

16.6 Mise en garde quant aux largeurs minimales

Les largeurs minimales n'expriment que des minima de sécurité. Elles ne tiennent aucun compte d'un dimensionnement relatif à l'affluence sur un quai.

On recommande donc de formuler l'exigence du dimensionnement en premier dans la réglementation légale, les largeurs minimales n'en représentant que la borne mathématique inférieure.

17. PRINCIPES POUR LE DIMENSIONNEMENT DES QUAIS

17.1 Généralités

Dans les cas usuels, le but du dimensionnement d'installations piétonnes est de démontrer leur aptitude au service. Toutefois, aucune notion de danger ou de risque n'accompagne généralement ces dimensionnements.

Dans le cas d'un quai de chemin de fer, un dimensionnement de l'installation piétonne doit tenir compte de plusieurs paramètres spécifiques :

- a) La caractéristique fondamentale du système « quai de chemin de fer » mentionnée au chapitre 15, soit la limite « molle » du système,
- b) La notion de risque puisqu'il y a danger mortel lors de la pénétration du voyageur dans la zone de danger.

17.2 Théorème et principe de dimensionnement

Sachant que la vitesse de marche des voyageurs sur le quai est en relation avec la densité de piétons ([8], [9] et d'autres auteurs), la vitesse diminuera avec la présence d'autres voyageurs en fonction de la surface libre disponible ; ceci augmente la densité sur le quai.

Ces deux points (diminution de la vitesse et augmentation de la densité) sont liés et posent les bases du théorème :

Théorème :

Plus la densité est élevée, plus le risque de pénétration dans la zone de danger est grand.

Principe de dimensionnement :

Il faut dimensionner les quais à long terme sur la base de la densité.

Ceci nécessite de fixer une valeur-limite maximale de la densité des voyageurs.

17.3 Démonstration du théorème

Le quai voyageur remplit deux fonctions primaires :

- le stockage des voyageurs en attente de leur train,
- l'échange des voyageurs.

L'échange des voyageurs comprend le déplacement de l'accès à la zone d'attente, la descente du train, la montée dans le train et l'évacuation du quai.

Sur le quai, le voyageur est en priorité exposé au danger d'être happé par le train en mouvement. Pour diminuer ce risque, on distingue la zone de danger et la zone sûre sur le quai et on en marque la limite.

Le danger est effectif lorsque **le piéton pénètre dans la zone de danger** et que le train est en mouvement sur la voie concernée.

La pénétration dans la zone de danger peut survenir pour plusieurs raisons :

- a) Le piéton s'impose instinctivement une zone-tampon autour de lui. Son corps et cette zone occupent une surface de 0,27 à 0,84 m² en fonction de critères sociologiques et environnementaux.

La zone de danger située sur le quai étant libre, le piéton dont la zone-tampon est entamée pourra chercher à recouvrir la surface minimale « vitale » en occupant la surface libre de la zone de danger.

La zone-tampon entamée indique une densité trop élevée selon les critères du piéton.

- b) Lorsque la vitesse de déplacement joue un rôle dans le déplacement du piéton (volonté de minimiser le temps de déplacement, nécessité de respecter un délai [début du travail, correspondance avec un moyen de transport, etc.]), le piéton cherchera à conserver cette vitesse.

Lorsque la vitesse d'un groupe de piétons en déplacement chute, le piéton pressé dépassera le groupe lent. La surface libre de la zone de danger située sur le quai permet ce dépassement.

La vitesse est en relation avec la densité. La densité augmente lorsque la vitesse chute.

- c) Le piéton se déplace en fonction d'un but ; lorsque le trajet vers le but rencontre un obstacle, le piéton cherchera une alternative au niveau microscopique de son déplacement vers le but fixé.

Lorsque la zone sûre est occupée et forme un obstacle qui ne permet pas le passage ou seulement avec difficultés (haute densité), la surface libre de la zone de danger située sur le quai offre la surface libre alternative au trajet vers son but.

Dans les trois cas, une densité trop élevée est la caractéristique de la situation à risque.

C.Q.F.D.

Un nouveau modèle publié par Moussaïd, Helbing et Théraulaz en 2011 [10] et se basant sur des expériences de psychologie postule que le piéton choisit la trajectoire pour laquelle le moins d'obstacles obstruent son champ de vision ; exprimé autrement, que les piétons recherchent les espaces vides. Ceci confirme l'utilisation plus fréquente de la zone de danger sur un quai en cas de forte densité, cette zone représentant une surface libre.

17.4 Corollaire au principe de dimensionnement

Principe : *Il faut dimensionner les quais à long terme sur la base de la densité de piétons.*

Corollaire : *Il n'est pas possible d'admettre un dépassement de la valeur-limite de la densité de piétons.*

Ce corollaire découle directement de la démonstration du théorème énoncé ci-dessus.

Un dépassement de la valeur-limite conduit à une mise en danger ; ce point est expliqué plus en détail dans le paragraphe suivant.

17.5 Valeurs de dimensionnement

Le critère de densité est communément admis et employé pour décrire un état de service en science du trafic. Il est exprimé par le « niveau de service », LOS de l'anglais « level of service ».

La définition de Fruin et du TRB pour les piétons en déplacement est la base reconnue dans ce domaine. Les valeurs ci-dessous correspondent à la définition du TRB :

LOS A	<i>Pedestrian density $< 0.18 P/m^2$; flow $\leq 0.27 P/ms$</i> At a walkway LOS A, pedestrians move in desired paths without altering their movements in response to other pedestrians. Walking speeds are freely selected, and conflicts between pedestrians are unlikely.
LOS B	<i>Pedestrian density $0.18-0.27 P/m^2$; flow $0.27-0.38 P/ms$</i> At LOS B, there is a sufficient area for pedestrians to select walking speeds freely, to bypass other pedestrians, and to avoid crossing conflicts. At this level, pedestrians begin to be aware of other pedestrians, and to respond to their presence when selecting a walking path.
LOS C	<i>Pedestrian density $0.27-0.45 P/m^2$; flow $0.38-0.55 P/ms$</i> At LOS C, space is sufficient for normal walking speeds and for bypassing other pedestrians in primarily unidirectional streams. Reverse-direction or crossing movements can cause minor conflicts and speeds and flow rate are somewhat lower.
LOS D	<i>Pedestrian density $0.45-0.71 P/m^2$; flow $0.55-0.82 P/ms$</i> At LOS D, freedom to select individual walking speed and to bypass other pedestrians is restricted. Crossing or reverse-flow movements face a high probability of conflict, requiring frequent change changes in speed and position. The LOS provides reasonably fluid flow, but friction and interaction between pedestrians is likely.
LOS E	<i>Pedestrian density $0.71-1.33 P/m^2$; flow $0.82-1.25 P/ms$</i> At LOS E, virtually all peds restrict normal walking speed, frequently adjusting gait or shuffling. Space is not sufficient for passing slower peds. Cross or reverse flow movements are possible only with extreme difficulties. Design volumes approach limit of walkway capacity, with stoppages and interruptions to flow.
LOS F	<i>Pedestrian density $\geq 1.33 P/m^2$; flow varies</i> At LOS F, all walking speeds are severely restricted; forward progress is made only by shuffling. There is frequent, unavoidable contact with other peds. Cross- and reverse-flow movements are virtually impossible. Flow is sporadic and unstable. Space is more characteristic of queued peds than of moving ped flows.

Figure 12 : Description des niveaux de service (« LOS ») dans le cas d'un cheminement horizontal (« level walkway »).

Les critères rappelés par Weidmann (1993) sur la base de Pushkarev et Zupan (1975) et ceux du TRB (1985) permettent de cerner au mieux les niveaux de service.

Ces critères étant :

- K1 Possibilité du libre choix de la vitesse
- K2 Fréquence d'un changement forcé de vitesse
- K3 Obligation de prendre garde aux autres piétons

- K4 Fréquence d'un changement forcé de direction
- K5 Gène lors du croisement d'un flux de piétons
- K6 Gène en cas de flux de direction contraire
- K7 Gène lors des dépassements
- K8 Fréquence des contacts involontaires

leur caractérisation selon la densité montre clairement que les conditions présentes pour un niveau de service D (densité supérieure à 0,45 P/m² selon le TRB) ne sont pas acceptables sur un quai.

En détail selon [9] :

(le critère K5 n'est pas mentionné car il n'entre pas en compte pour un quai dont la largeur est très faible par rapport à la longueur)

0,30 à 0,45 P/m ² , LOS C		0,45 à 0,60 P/m ² , LOS D
Choix de la vitesse légèrement restreint en cas de trafic opposé.	K1	Libre choix de la vitesse plus possible.
Pas de changement de vitesse obligé.	K2	Multiplication des changements de vitesse obligés.
Nécessité de prendre garde aux autres piétons.	K3	Nécessité de prendre garde aux autres piétons.
Changements de direction occasionnels, en particulier en cas de trafic opposé.	K4	Changements de direction nécessaires.
Gène occasionnelle en cas de mouvements opposés.	K6	Forte gêne en cas de mouvements opposés.
Gène légère en cas de dépassement, changements de direction nécessaires.	K7	Forte gêne en cas de dépassement, changements de direction nécessaires.
Pas de contacts involontaires.	K8	Pas de contacts involontaires.

Figure 13 : Caractérisation des critères K1 à K4 et K6 à K8 pour les niveaux de service C et D selon [9].

Les critères K1, K2, K4, K6 et K7 subissent une dégradation évidente et leurs caractéristiques pour un niveau de service D (densité > 0,45 P/m² selon TRB) conduisent à la pénétration du piéton dans la zone de danger.

Contrairement aux installations de trafic routier et à d'autres installations du trafic piétons (couloirs, etc.) pour lesquelles un dépassement de la valeur de dimensionnement conduit à un engorgement de l'installation sans mise en danger, un dépassement de la valeur-limite durant une fraction du temps d'utilisation dans le cas d'un quai de chemin de fer entraîne une surcharge qui se traduit immédiatement par l'apparition et la multiplication de situations dangereuses (pénétration du piéton dans la zone de danger). Les caractéristiques mêmes de la définition des LOS, précisées par les critères Ki, ainsi que les paramètres spécifiques du système « quai de chemin de fer » (cf. chap. 17.1) montrent que le danger est réel à partir du LOS D du côté de la voie où peut passer un

train (probabilité d'occurrence plus élevée) ; en l'état actuel des connaissances il ne faut donc pas dépasser le LOS C (densité $\leq 0,45 \text{ P/m}^2$ selon le TRB) pour contenir la probabilité d'occurrence du danger et ainsi la sécurité à un niveau acceptable.

Lors d'une modélisation, on peut :

- différencier les zones de quai où les voyageurs ne sont pas menacés par les trains (p.ex. le long d'un train à l'arrêt) ; lorsqu'une densité maximale plus élevée dans ces zones n'a pas d'influence négative sur une zone où le danger impose un LOS maximal C, un LOS plus élevé peut être admis dans les zones non menacées ; l'observation montre toutefois que plus la densité est grande, moins cette différenciation est possible,
- apprécier le risque effectif relatif au danger décrit en cas de dépassement temporaire (à priori court, quelques secondes) de la densité maximale imposée par le danger.

Ces appréciations nécessitent des connaissances suffisantes du système et de ses paramètres sur l'entier de l'horizon de dimensionnement.

Des dépassements généralisés de la densité maximale dans les zones où le danger est effectif ne sont possibles qu'au prix de sévères restrictions d'exploitation du chemin de fer et pour autant que le risque reste ainsi supportable.

Limitations de la modélisation

Les phénomènes ci-dessous induisent des divergences dans les modèles de calcul supposant une densité uniformément répartie voire même dans les modèles comportementaux « orientés agent » dans lesquels ces phénomènes ne seraient pas pris en compte. Ces divergences peuvent conduire à une appréciation erronée de la sécurité réelle sur un quai.

- Phénomène d'obstruction de zones libres lors de l'échange de voyageurs, cf. figure 14a. Les modélisations omettant les zones non occupées (densité nulle) livrent un résultat trop optimiste, donc du côté de l'insécurité.

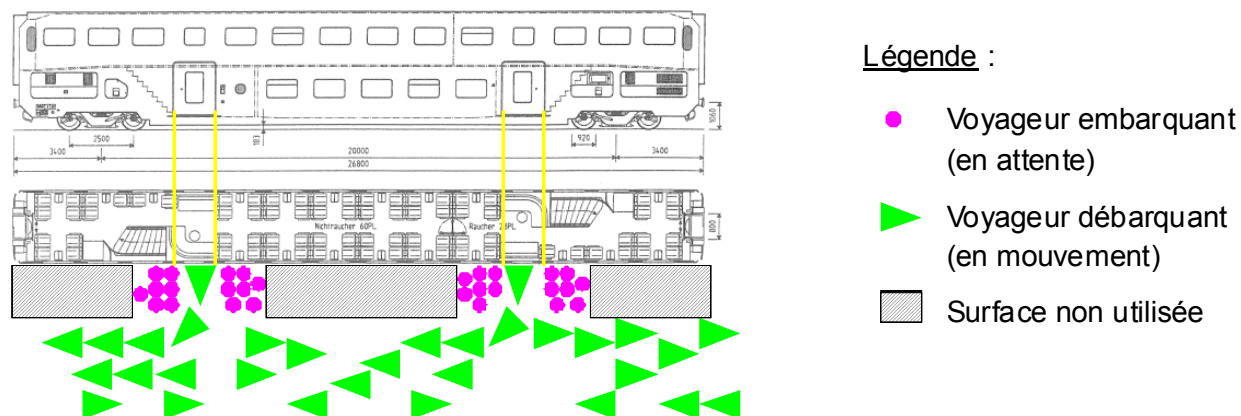


Figure 14a : Obstruction de zones libres lors de l'échange de voyageurs

- Phénomène de mouvement d'évitement des zones obstruées en utilisant le côté opposé du quai, cf. figure 14b. Ce mouvement peut, en particulier à proximité des obstacles d'une certaine dimension (escaliers, cabines d'attente, etc.), conduire à des mises en danger importantes.

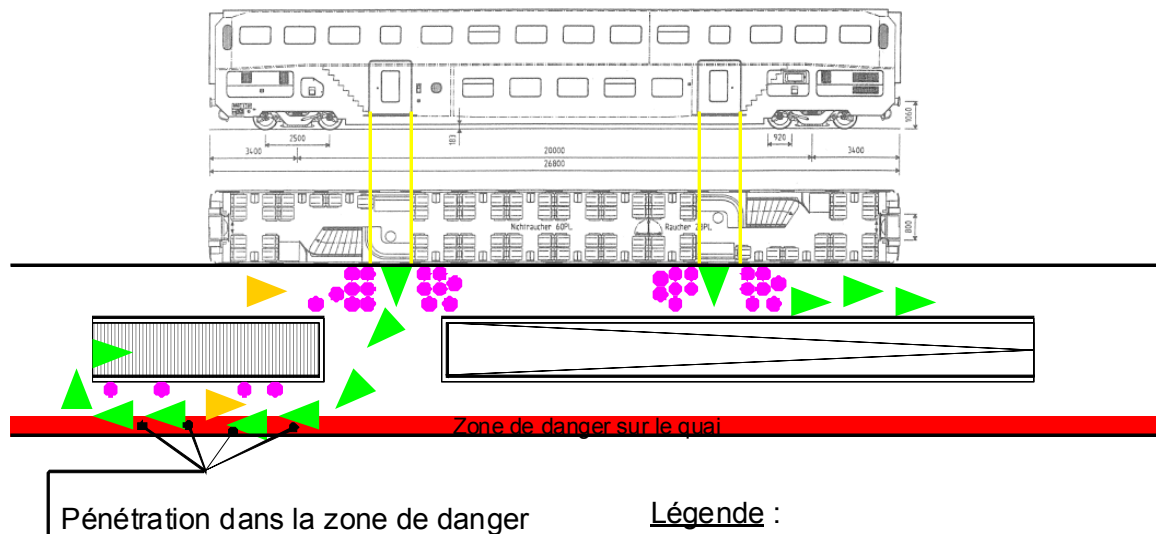


Figure 14b : Mouvement d'évitement

Quand au phénomène de la création spontanée de files, lesquelles permettent une densité plus élevée, il peut être hasardeux d'en faire usage. En effet, et bien que ce phénomène puisse apparaître sur les quais, la topologie de ces derniers est souvent par trop différente du cas idéal (couloirs, rampes, espaces limités par des constructions fixes) par la présence de la « limite molle », de l'ameublement irrégulier et de voyageurs en attente pour en faire usage.

17.6 Appréciation du risque

Le risque est fonction de l'occurrence d'apparition de l'élément « train » dans le système.

Le risque est maximal juste avant et pendant le passage d'un train, ceci à cause du train lui-même (il est la source du danger) et à cause de la densité plus élevée présente précisément à ce moment-là sur le quai, ceci car :

- a) la densité augmente jusqu'à l'arrivée du train attendu,
- b) la structure de l'horaire et/ou la charge du réseau ferroviaire font se suivre des trains à de courts intervalles,
- c) la structure de l'horaire peut faire arriver deux trains sur le même quai dans un même court intervalle de temps.

Etant donné les caractéristiques actuelles et planifiées d'exploitation des chemins de fer suisses, l'occurrence d'apparition de l'élément « train » dans le système est en général grande.

De plus, les fortes concentrations de voyageurs sur les quais se produisent en général dans les gares dont la densité de trafic ferroviaire est grande aussi.

Faire une différenciation du risque dans les gares à faible occurrence d'apparition de l'élément « train » serait une erreur, en particulier en raison de l'argument a) ci-dessus : le risque ne serait

faible que lorsque les deux éléments du système (le train et les voyageurs) ne sont pas présents dans le système ; le but du dimensionnement étant de protéger les voyageurs, leur absence rend l'exercice de différenciation caduc.

Pour ces raisons, la matrice de risque se réduit à la seule probabilité d'occurrence élevée :

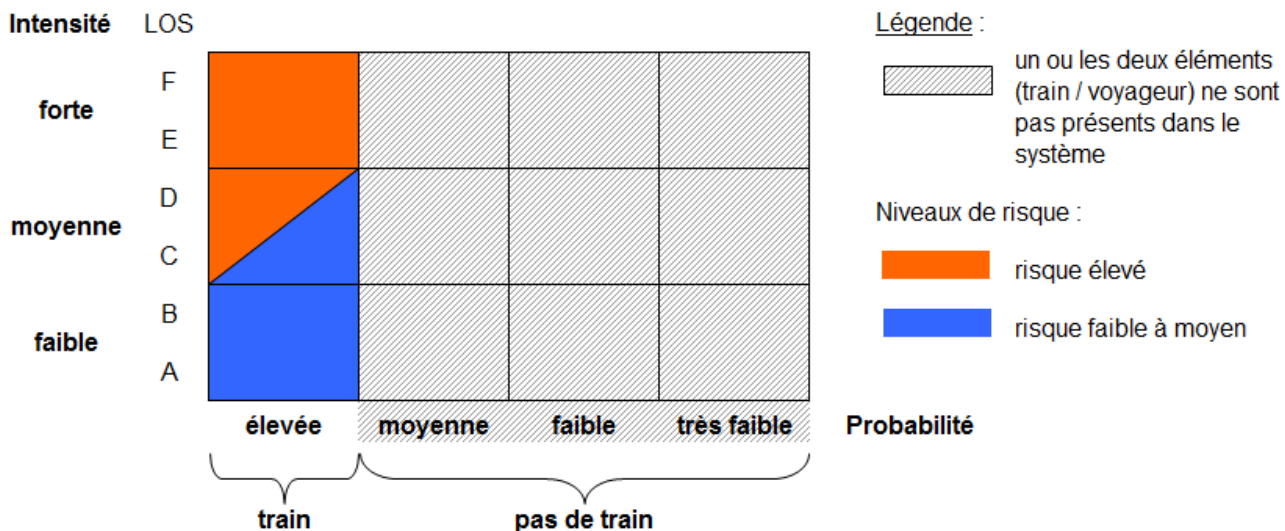


Figure 15 : Matrice de risque pour un voyageur sur un quai vis-à-vis du danger « train »

18. CONCLUSION

L'étude pragmatique des paramètres déterminant la zone sûre sur les quais met en avant la nécessité d'un dimensionnement des quais basé sur le long terme. Des bornes minimales pour la largeur de la zone sûre sont incontournables.

18.1 Proposition pour les chemins de fer à voie normale

Dans le cadre de la révision 2006 des DE-OCF *ad* art. 21 alinéa 2 OCF (DE 21.2) et en plus des propositions émises pour la zone de danger, nous avons proposé de compléter la disposition d'exécution comme suit :

3	Zone sûre
	La zone sûre est déterminée sur la base de l'affluence prévisible à long terme sur le quai.
	On respectera toutefois les largeurs minimales suivantes :
31	En règle générale 1,50 m.
32	Le long d'obstacles courts dotés de mains-courantes (p.ex. escaliers d'accès, abris pour voyageurs, longueur maximale indicative de 10 m) ainsi qu'à l'extrémité des quais, une largeur réduite est admise, mais au minimum 0,90 m. Dans tous les cas, les voyageurs doivent pouvoir se tenir entièrement hors de la zone de danger.

18.2 Proposition pour les chemins de fer à voie étroite

Les dispositions proposées au chapitre 18.1 sont aussi valables pour la voie étroite puisque les caractéristiques des voyageurs sont les mêmes. La proposition de nouvelle disposition d'exécution était la suivante :

1	La DE 21.2 voie normale est applicable pour la voie métrique sous réserve des chiffres 2 et 3 ci-après.
---	---

Toutefois et comme les tramways roulent à vue, en tous cas aux points d'arrêt, une réduction au minimum de la zone sûre est possible et nous avons proposé de compléter la disposition d'exécution comme suit :

3	Zone sûre
	Pour la zone sûre aux arrêts de tramways, la largeur réduite d'au moins 0,90 m selon le chiffre 32 DE 21.2 N est admise de manière générale.

18.3 Mesures transitoires

Les nouvelles distances de sécurité (zone de danger) sont réduites pour les trains de voyageurs mais augmentées pour les trains de marchandises. Pour cette raison, des mesures transitoires dans les gares existantes sont aussi nécessaires pour la zone sûre. Elles sont également contenues dans la directive de l'OFT « Dispositions transitoires pour l'aménagement de la zone sûre des constructions existantes » du 2 juillet 2006.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] « Studie zu aerodynamischen Lasten am Bahnsteig », DB Systemtechnik, München, Dezember 2004 (commande de l'OFT).
- [2] « Questions relatives au souffle provoqué par le passage d'un train », Note destinée à l'OFT, Laboratoire de mécanique des fluides environnementale, EPFL, Lausanne, mars 2005.
- [3] « Prüfbericht. Messung der zuginduzierten Strömungsgeschwindigkeiten am Bahnsteig Kiesen an der Strecke Bern - Thun », DB Systemtechnik, München, Dezember 2006 (commande de l'OFT).
- [4] « La marche humaine, la course et le saut », E. Viel, Masson, Paris, 2000.
- [5] « Profil géométrique type. Dimensions de base et gabarit des usagers de la route », Norme suisse SN 640 201, VSS, Zurich, 1992.
- [6] « Aerodynamic Effects of High-Speed Trains », RR 03-07, U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, Washington DC, June 2003.
- [7] « Problèmes soulevés par la circulation des trains à grande vitesse dans les tunnels » Question C 149, ORE, Utrecht, septembre 1985.
- [8] « Modelling Passenger Flows in Public Transport Facilities », W. Daamen, Trail Thesis Series, T2004/6, The Netherland TRAIL Research School, Delft University Press, Delft, 2004.
- [9] « Transporttechnik der Fussgänger, Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs (Literaturauswertung) », U. Weidmann, Schriftenreihe des IVT Nr. 90, zweite ergänzte Auflage, Zürich, März 1993.
- [10] « How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters », M. Moussaïd, D. Helbing, G. Théraulaz, in : PNAS Early Edition, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, <http://www.pnas.org/>, 2011.

ANNEXE 1 :

COMPARAISONS DES DIVERSES PRESCRIPTIONS ET DES RÉSULTATS DE L'ÉTUDE

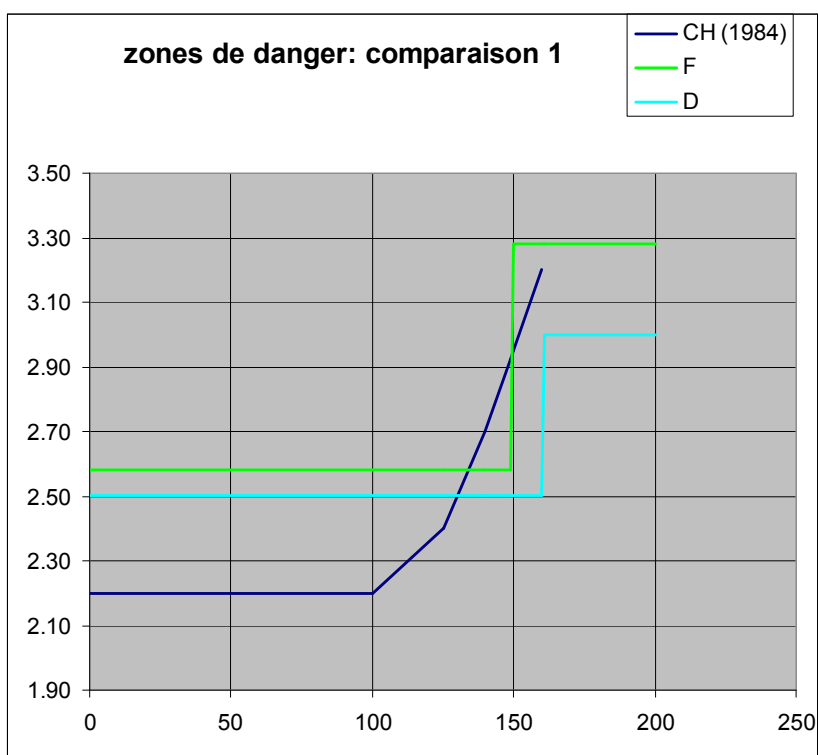


Figure A1.1 : comparaison des dispositions étrangères avec les DE-OCF, édition 1984

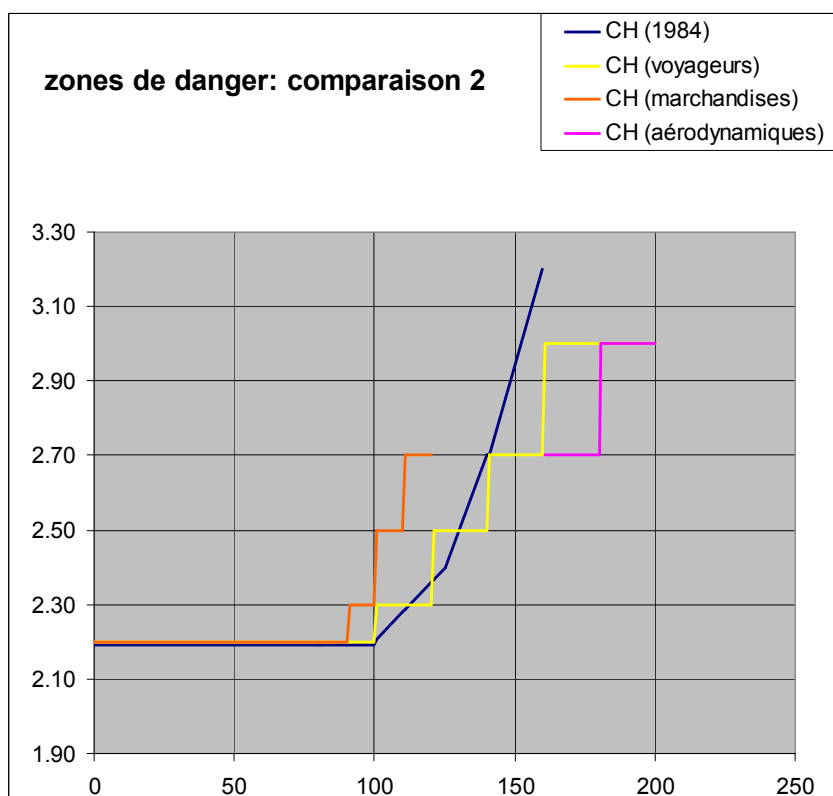


Figure A1.2 : comparaison des dispositions suisses, éd. 1984 et résultats de cette étude

ANNEXE 2 :

ILLUSTRATION DES DIVERS TYPES DE TRAINS – VITESSE DU SOUFFLE PRODUIT

Avertissement : les courbes de la vitesse du souffle (U) lié au passage d'un train ont un caractère purement illustratif du phénomène réel (cf. 9.3.1 et Figure 5).



Figure A2.1 : ICE (catégorie selon DE-OCF : trains bien profilés aérodynamiquement)

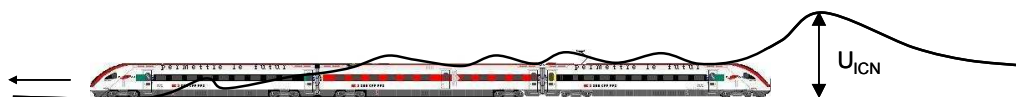


Figure A2.2 : ICN (catégorie selon DE-OCF : trains bien profilés aérodynamiquement)

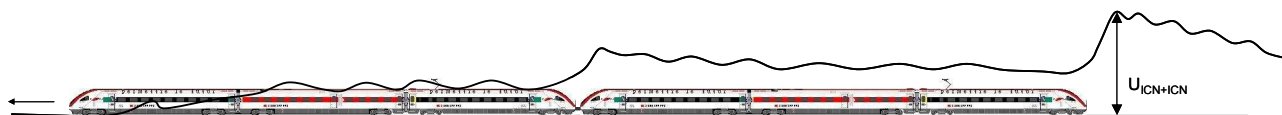


Figure A2.3 : 2 x ICN (catégorie selon DE-OCF : trains bien profilés aérodynamiquement, bien que la lacune entre les deux rames crée un souffle non négligeable)

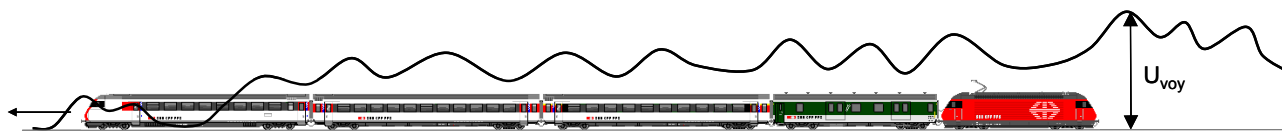


Figure A2.4 : train voyageurs (catégorie selon DE-OCF : train voyageurs). Selon chap. 10, les cas « train régional » et « train voyageurs » de l'étude [1] sont couverts par la même courbe-enveloppe.



Figure A2.5 : train marchandises (catégorie selon DE-OCF : train marchandises)