



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

ENAC – INTER

SYSTEMES DE TRANSPORTS I

Prof. Robert Rivier

LA VOIE FERREE GEOMETRIE ET TRACE GENERAL

Octobre 2004

Document n° 401/14



Prof. Robert E. RIVIER
Laboratoire d'Intermodalité des Transports Et de Planification

LA VOIE FERREE

GEOMETRIE ET TRACE GENERAL

TABLE DES MATIERES

	Page
1. Introduction	1
2. Géométrie de la voie et gabarits	2
2.1 Écartement de la voie	2
2.1.1 Définition et historique.....	2
2.1.2 Choix de l'écartement	3
2.1.3 Surécartement	5
2.1.4 Jeu et tolérances.....	6
2.2 Gabarits ferroviaires	7
2.3 Entraxe des voies	11
3. Tracé en plan	13
3.1 Généralités	13
3.2 Tracé en plan des courbes circulaires et dévers [8].....	14
3.2.1 Approche théorique du calcul du dévers	15
3.2.2 Insuffisance de dévers et accélération transversale non compensée	17
3.2.3 Vitesses maximales en courbe	18
3.2.4 Dévers dans les courbes.....	19
3.3 Courbes de raccordement et rampes de dévers.....	20
3.3.1 Géométrie des courbes de raccordement de la voie en plan	20
3.3.2 Géométrie des rampes de dévers	23
3.3.3 Longueur des courbes de raccordement et des rampes de dévers.....	25
3.4 Courbes sans courbes de raccordement et courbes en S	27
4. Profil en long	28
4.1 Généralités	28
4.2 Chemins de fer à adhérence	29
4.2.1 Limites pratiques de la déclivité	29
4.2.2 Vitesse maximale.....	29
4.2.3 Raccordements de déclivité	30
4.3 Chemins de fer à crémaillère et mixtes (crémaillère-adhérence).....	31
5. Appareils de voie	33
5.1 Introduction	33

5.2	Branchement simple (BS) dans sa forme fondamentale.....	34
5.2.1	Composants d'un branchement	34
5.2.2	Géométrie d'un branchement simple	36
5.2.3	Vitesse admissible en déviation	38
5.3	Autres appareils de voie	39
5.3.1	Types d'appareils de voies.....	39
5.3.2	Combinaisons d'appareils de voie.....	41
5.3.3	Branchements posés en courbe	41
5.4	Détails particuliers	44
5.4.1	Branchements avec cœur à pointe mobile.....	44
6.	Législation en matière de tracé ferroviaire	45
6.1	Procédures d'approbation des plans en Suisse.....	45
6.1.1	Bases légales.....	45
6.1.2	Procédure	46
6.1.3	Procédures de recours.....	47
6.2	Législation suisse en matière de protection de l'environnement.....	48
6.2.1	Généralités.....	48
6.2.2	Étude d'impact sur l'environnement (EIE)	48
6.2.3	Bruit.....	54
6.2.4	Vibrations	58
7.	Démarche des études de tracé	59
7.1	Cadre des études de tracé	59
7.2	Étapes des études de tracé	59
7.2.1	Collecte de données	61
7.2.2	Plans des contraintes.....	64
8.	Exemples de contraintes	65
8.1	Points ou bandes de passage imposés	65
8.2	Obstacles naturels à surmonter	66
8.2.1	Déclivités.....	66
8.2.2	Cols et montagnes	69
8.2.3	Cours d'eau.....	71
8.2.4	Géologie.....	72
8.3	Franchissement d'autres voies de circulation	74
8.4	Peuplement, desserte, occupation du sol	75

Annexes

Références bibliographiques
 Les divers systèmes de crémaillère
 Valeurs des paramètres utilisés pour les éléments du tracé en plan
 Valeurs des paramètres utilisés pour les éléments du profil en long
 Évaluation de variantes de tracé ferroviaire

Collaborateur scientifique : Jean-Daniel Buri, ing. civ. dipl. EPFL

1. INTRODUCTION

Les contraintes dictant le tracé d'une voie de circulation sont nombreuses et toutes les conditions ne peuvent en général être remplies. La préoccupation majeure du projeteur consiste donc à minimiser les effets négatifs de tout nouveau projet, tout en approchant au maximum les objectifs fixés.

Les objectifs de cette note sont :

- de présenter les caractéristiques techniques de la **géométrie de la voie**, des **gabarits** ferroviaires, des **appareils de voie** et **du tracé proprement dit**;
- de présenter les **procédures d'approbation des plans** destinées à obtenir l'autorisation de construire.
- d'esquisser les points essentiels d'une démarche pour les études du tracé général et d'avant-projet;
- et enfin de passer en revue des éléments à prendre en compte pour les études du **tracé général** en fonction des besoins de transport, de la géographie physique, économique, politique et des contraintes de la protection de l'environnement.

Partie A : Profil en travers

2. GEOMETRIE DE LA VOIE ET GABARITS

2.1 Écartement de la voie

2.1.1 Définition et historique

Une voie ferrée est notamment caractérisée par l'écartement de ses deux files de rail (**Fig. 2.1**). Cet écartement dicte les dispositions constructives du matériel roulant, du matériel de voie et des ouvrages d'art. Il a été convenu au sein de l'UIC¹ que l'écartement doit se mesurer entre les joues intérieures des deux files de rail à 14 mm en dessous du plan de roulement.

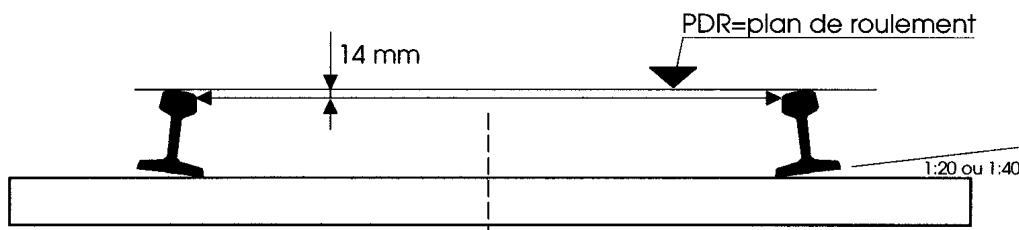


Figure 2.1 – Mesure de l'écartement de la voie [2].

L'écartement le plus répandu dans le monde est l'**écartement normal** de 1435 mm. Cet écartement, d'origine anglaise, remonte à l'époque du grand essor de la traction à vapeur.

- 1845 Le parlement anglais décrète l'écartement de 1435 mm (4'8 1/2") obligatoire.
- 1856 L'écartement normal est défini en Suisse dans l'Ordonnance fédérale sur les chemins de fer.
- 1887 Conférence internationale de Berne.
L'Unité technique des chemins de fer, regroupant 18 Etats (sans l'Angleterre), arrête les règles auxquelles doivent répondre les voies et les véhicules pour le transit international. L'Unité technique est intégrée dans une Ordonnance fédérale en 1938.

La plupart des grands réseaux européens ont adopté l'écartement normal. Mais celui-ci n'est de loin pas unique. De grands réseaux d'Amérique du Sud et d'Asie utilisent l'écartement ibérique de 1668 mm. La voie étroite de 1067 mm (écartement dit du « Cap » et également d'origine anglaise) équipe certains réseaux d'Afrique et d'Asie. L'écartement peut donc être très différent d'un réseau à l'autre en fonction de leurs caractéristiques.

¹ UIC : Union Internationale des Chemins de fer.

Désignation	Ecartement (mm)	Utilisé en	% du réseau mondial
Ecartement large VL	1676	Argentine,Chili, Inde	4,8
	1668	Espagne, Portugal	1,3
	1600	Irlande, Australie, Brésil	1,3
	1524	ex-URSS, Finlande, Mongolie	11,6
	Total des voies à écartement large : 236 700 km		19,0
Ecartement normal VN	1435	Europe (sauf URSS, Espagne, Portugal, Irlande et Finlande), Australie, USA, Canada, Mexique, Cuba, Argentine, Paraguay, Pérou, Uruguay, Vénézuéla, Afghanistan, Chine, Japon, Corée, Pakistan, Iran, Irak, Israël, Liban, Arabie Saoudite, Syrie, Turquie, Algérie, Egypte, Maroc, Tunisie	62,8
	Total des voies à écartement normal : 784 000 km		62,8
Ecartement étroit VE	1067	Australie, Nouvelle Zélande, Costa Rica, Honduras, Equateur, Nicaragua, Taiwan, Indonésie, Japon, Philippines, Afrique équatoriale, Afrique du Sud, Angola, Kenya, Soudan, Zimbabwe, Zambie, Zaïre	7,7
	1000	Autriche, France, Grèce, Yougoslavie, Suisse, Espagne, Portugal, URSS, Porto Rico, Chili, Argentine, Brésil, Bolivie, Inde, Malaisie, Birmanie, Cambodge, Thaïlande, Irak, Ethiopie, Madagascar, Tanzanie, Ouganda, Afrique équatoriale	8,6
	914	Irlande, Guatemala, Honduras, Panama, El Salvador, Colombie	0,6
	762	Roumanie, Inde, Népal, Pakistan, Mozambique	0,5
	Divers		0,8
	Total des voies à écartement étroit : 228 300 km		18,2
		Total des voies du réseau mondial : 1 249 000 km	100

Tableau 2.2 – Ecartements utilisés dans le monde [4, 5].

2.1.2 Choix de l'écartement

De nombreuses considérations interviennent lors du choix d'un écartement pour un réseau.

Ce choix peut être dicté par la volonté d'employer un écartement standard, afin de faciliter les interconnexions entre les différents réseaux et d'éviter ainsi des opérations délicates à l'interface de deux standards différents.

D'autre part, en cas de tracé accidenté en plan et en élévation, la voie étroite offre l'avantage de s'inscrire à moindres coûts d'investissement – exploitation dans la topographie en raison de ses résistances à l'avancement plus faibles qu'une voie à écartement normal (VN). En effet, ces résistances découlent d'une charge par essieu relativement basse, d'un diamètre de roue et d'un empattement des bogies et des véhicules faibles et de résistances locales en courbes peu importantes.

Du point de vue strictement économique, le choix de l'écartement visera à minimiser le prix de revient de la tonne·km ou du voyageur·km. En effet, celui-ci peut sensiblement varier en fonction de l'écartement (**Fig. 2.3**).

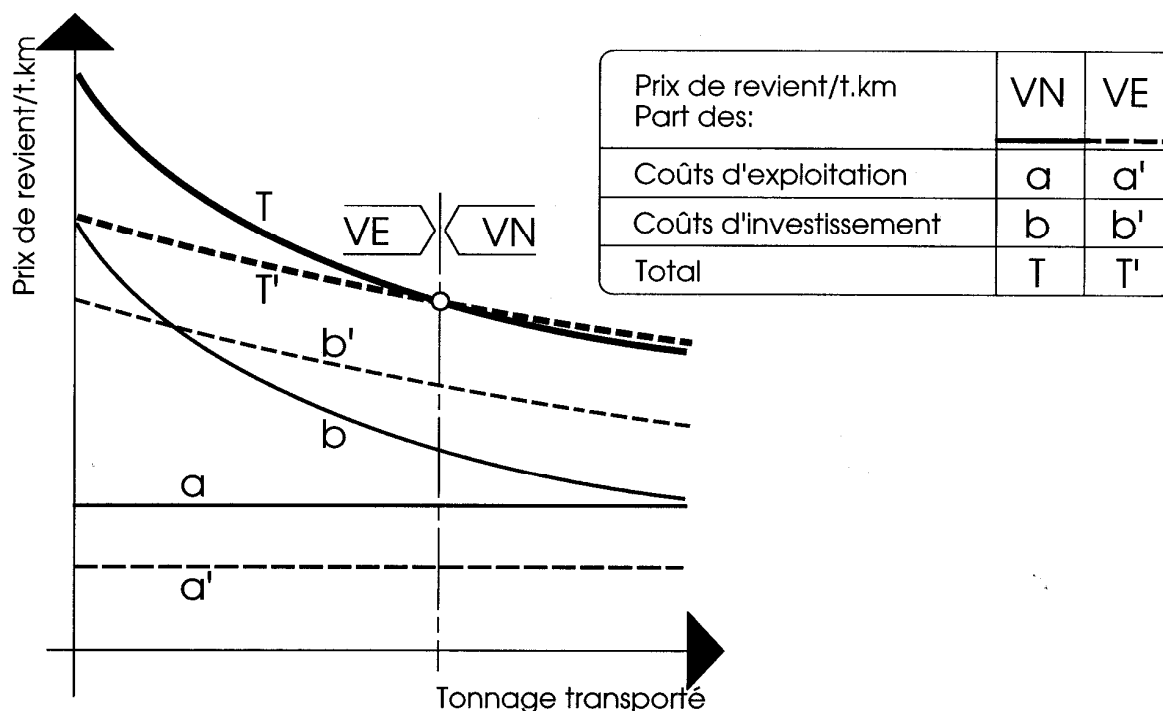


Figure 2.3 – Comparaison des coûts des voies normales (VN) et des voies étroites (VE).

Soient en effet une ligne à simple voie reliant les points A et B et deux écartements possibles (voie normale ou voie étroite).

Dans l'intervalle de capacité commune aux deux types d'écartement, on peut émettre l'hypothèse que les **frais variables**, ou frais d'exploitation (a, a'), varient linéairement par rapport au tonnage transporté. De plus, ces coûts, qui englobent les frais de personnel, d'énergie, d'administration et de matière, seront plus élevés pour la voie normale que pour la voie étroite. Pour un même tonnage transporté, le prix du km·train en voie normale coûte en effet plus cher (énergie et entretien) qu'en voie étroite.

D'autre part, pour un même investissement, la part des **frais fixes**, ou frais de construction (intérêts et amortissements), dans le prix de revient de la tonne·km diminue lorsque le tonnage transporté augmente (courbes b et b' décroissantes). De plus, pour un faible tonnage à transporter, l'investissement correspond pratiquement au coût de l'infrastructure et sera donc plus faible pour la voie étroite, son emprise et le coût de ses installations fixes étant plus faibles.

Pour un tonnage à transporter plus élevé, une part non négligeable de l'investissement est destiné au matériel roulant et aux installations annexes (voies de garage). Cela pénalise donc la voie étroite puisque sa capacité de transport est plus faible (gabarit plus petit).

En considérant les frais totaux, on peut déterminer à partir de quel tonnage transporté il devient intéressant d'utiliser une voie normale plutôt qu'une voie étroite.

Notons encore que le choix d'un écartement peut également résulter de l'historique du réseau, de l'origine du matériel utilisé, d'impératifs liés à la défense nationale ou de considérations politiques diverses.

2.1.3 Surécartement

L'écartement de la voie d'un réseau, pour un même genre de pose (type d'attache), n'est cependant pas constant.

On a en effet recours au surécartement afin de permettre l'inscription des véhicules dans les courbes à faible rayon. Il s'obtient en déplaçant le rail de la file intérieure. Toutefois, en limitant le surécartement au minimum nécessaire, on réduit l'angle d'attaque des bogies (**Fig. 2.4**). Ainsi les conditions de roulement des véhicules sont meilleures et la résistance à l'avancement, l'usure des rails et du bandage des roues sont plus faibles.

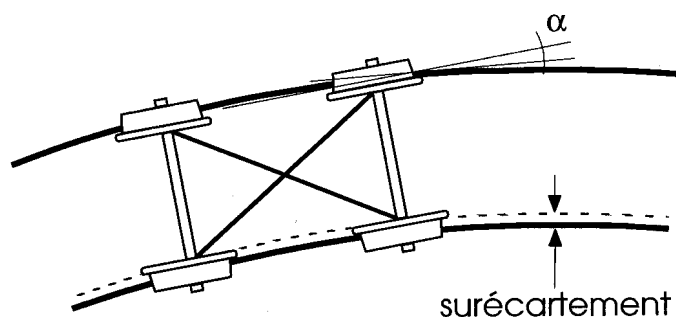


Figure 2.4 – Angle d'attaque α d'un bogie rigide.

Dans les appareils de voie, le surécartement est réduit au minimum, compte tenu des caractéristiques du matériel moteur (empattement important des bogies de certaines locomotives).

Il ne saurait toutefois être question de poser la voie avec un écartement particulier pour chaque rayon de courbure. Cette précision inutile compliquerait les approvisionnements en traverses. C'est pourquoi les réseaux définissent des surécartements qui correspondent à des fourchettes de rayons (**Fig. 2.5**).

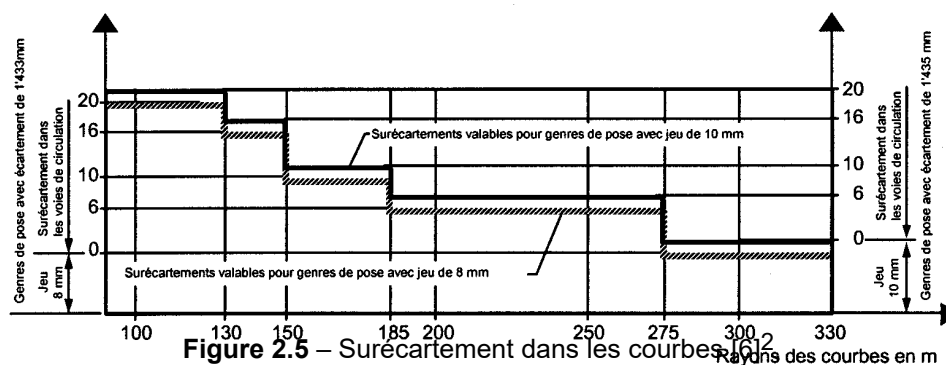


Figure 2.5 – Surécartement dans les courbes

2.1.4 Jeu et tolérances

Afin de tenir compte des tolérances de fabrication du matériel et de pose de la voie et pour donner aux véhicules un certain degré de liberté, l'écartement prévoit un **jeu** entre le rail et les organes de roulement (Fig. 2.6).

Le jeu et l'écartement de la voie peuvent varier en fonction du genre de pose et du type de traverses utilisés. Son comportement est en effet sensiblement différent selon qu'on utilise une pose directe, c'est-à-dire en cas de fixation directe du rail à la traverse, ou indirecte, c'est-à-dire lorsque les fixations du rail à la selle sur laquelle il repose et de cette selle à la traverse, sont indépendantes.

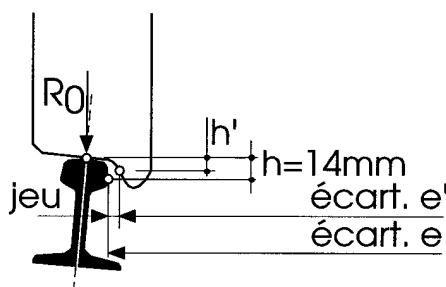


Figure 2.6 – Jeu entre la roue et le rail.

Certaines **tolérances**, tenant compte de la pose et de l'usure, sont admises pour l'écartement de la voie et l'écartement des roues. Leurs valeurs extrêmes permettent de définir les jeux minimaux et maximaux autorisés (Fig. 2.7).

a) Voie à écartement normal (VN)

L'Unité technique qui définit les conditions de circulation en service international précise que l'écartement normal peut varier entre 1470 mm et 1435 mm, avec une tolérance de 5 mm en moins sur le minimum. L'écartement maximal de 1470 mm comprend le surécartement maximal et l'usure maximale tolérée des rails.

² Ecartement de 1433 mm : correspond à une voie équipée de rails de 60 kg/m (patin plus large) posés sur des traverses adaptées à des rails plus légers.

écartement minimum	$1435 \text{ mm} - 5 \text{ mm} = 1430 \text{ mm}$
écartement maximum	1470 mm

D'autre part, on accepte que l'écartement de l'essieu puisse varier entre 1426 et 1410 mm, en fonction de l'usure des roues. Il est mesuré à 10 mm à l'extérieur des cercles de roulement sur les boudins des roues.

Le jeu total entre la voie et les organes de roulement est donc compris entre les valeurs suivantes :

jeu minimum (matériel neuf en alignement) :	$1430 - 1426 = 4 \text{ mm}$
jeu maximum (matériel usagé et $R < 120 \text{ m}$) :	$1470 - 1410 = 60 \text{ mm}$

b) Voie à écartement métrique (VM)

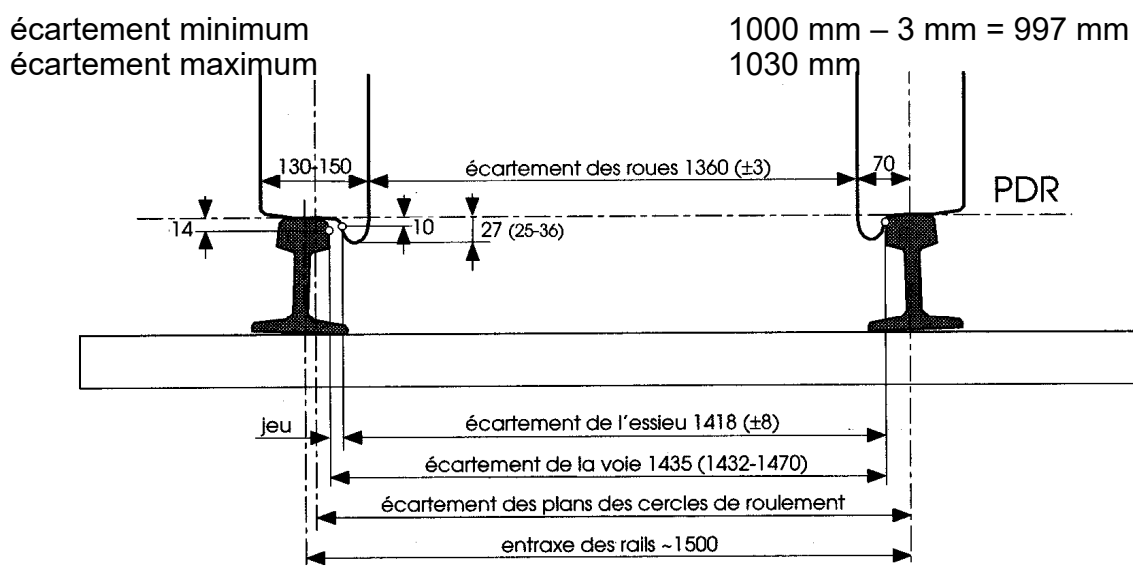


Figure 2.7 – Ecartement de l'essieu (VN).

2.2 Gabarits ferroviaires

Définitions, exemples et valeurs indicatives

Les gabarits ferroviaires permettent de déterminer le contour maximal de construction possible du matériel moteur et remorqué ainsi que la position des obstacles fixes par rapport à la voie. Ils sont définis verticalement par rapport au plan de roulement PDR et horizontalement par rapport à l'axe de la voie.

Les constructeurs de matériel roulant et les constructeurs de la voie de circulation doivent impérativement respecter les conditions fixées par les gabarits ferroviaires afin de garantir une circulation des véhicules sans risque ni restriction sur l'ensemble des lignes d'un réseau.

Dans la définition actuelle des gabarits ferroviaires, on tient compte du mouvement du véhicule en marche et des effets des défauts de position de la voie, ce qui donne au gabarit un caractère dynamique. C'est ainsi que dans l'ordonnance fédérale sur la

construction et l'exploitation des chemins de fer [7], on définit les trois types de gabarits suivants :

- 1° Le contour de référence
- 2° Le gabarit limite des obstacles
- 3° Le profil d'espace libre

1° Le **contour de référence** est utilisé par le constructeur du matériel roulant. C'est le gabarit cinématique des véhicules, compte tenu de ses tolérances admissibles, circulant sur une voie parfaitement définie. Dans les courbes, le gabarit sera adapté et prendra en compte un éventuel dévers ou surlargeur. Il comprend notamment (**Fig. 2.8**) :

- les déplacements latéraux dus aux jeux dans les boîtes d'essieux, déplacements de la caisse par rapport aux essieux (q) et des essieux par rapport à la voie (w);
- les déplacements latéraux quasi statiques résultant de l'inclinaison des parties suspendues sous l'influence, soit du poids (véhicule à l'arrêt ou à faible vitesse sur une voie en dévers), soit d'une accélération centrifuge (véhicule circulant sur une voie en courbe) (Φ);
- les déports et déplacements géométriques horizontaux résultant de l'inscription des véhicules en courbe (σ_R);
- les déplacements résultant de l'usure des éléments des véhicules (roues, ...);
- les flexions élastiques verticales (suspensions);
- les déports géométriques verticaux résultant de l'inscription des véhicules dans les raccords verticaux.

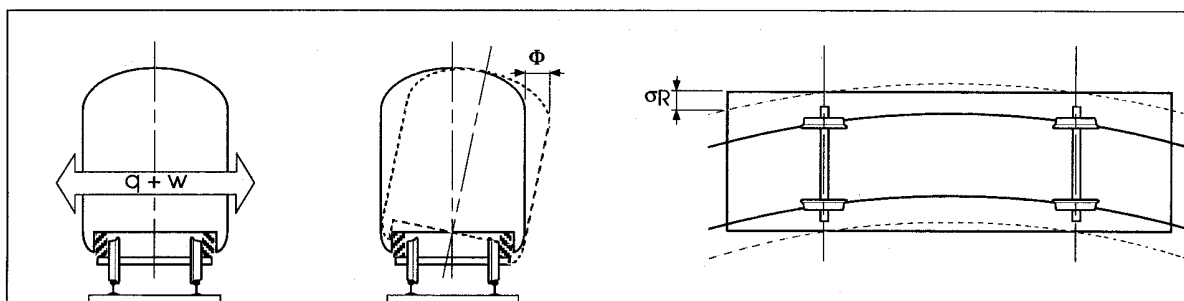


Figure 2.8 – Les différents éléments intervenant dans le contour de référence.

2° Le **gabarit limite des obstacles** est utilisé par le constructeur des équipements ferroviaires (signalisation, alimentation, ...). C'est le contour minimal nécessaire au passage des véhicules, compte tenu de leur comportement et des tolérances pour la position de la voie. Il est particulièrement important dans sa partie inférieure et tient compte d'une courbure en plan de la voie pour un rayon supérieur ou égal à 250 m.

Le gabarit limite constitue un espace minimal ne devant pas être engagé. Il doit également être respecté par les constructions temporaires à proximité des voies.

Il comprend principalement :

- les déformations de la géométrie de la voie en plan, en élévation ou en rotation par suite de l'exploitation;

- le surécartement dû à l'usure du matériel de voie (rail, attaches) et à sa déformation;
- les surlargeurs pour les voies en courbes et en dévers résultant d'un déplacement de la voie.

3° Le **profil d'espace libre** est utilisé par le constructeur d'ouvrages d'art. C'est l'enveloppe du gabarit limite des obstacles et des espaces de sécurité (**Fig. 2.9**). Ces espaces de sécurité comprennent un dégagement à la hauteur des fenêtres, un dégagement de service permettant de cheminer ou de stationner à l'abri des trains en marche et la **distance de sécurité électrique**. C'est la distance conventionnelle par rapport à un organe sous haute tension, permettant d'éviter le déclenchement d'un arc électrique dans les conditions les plus défavorables; elle dépend de la tension de la ligne.

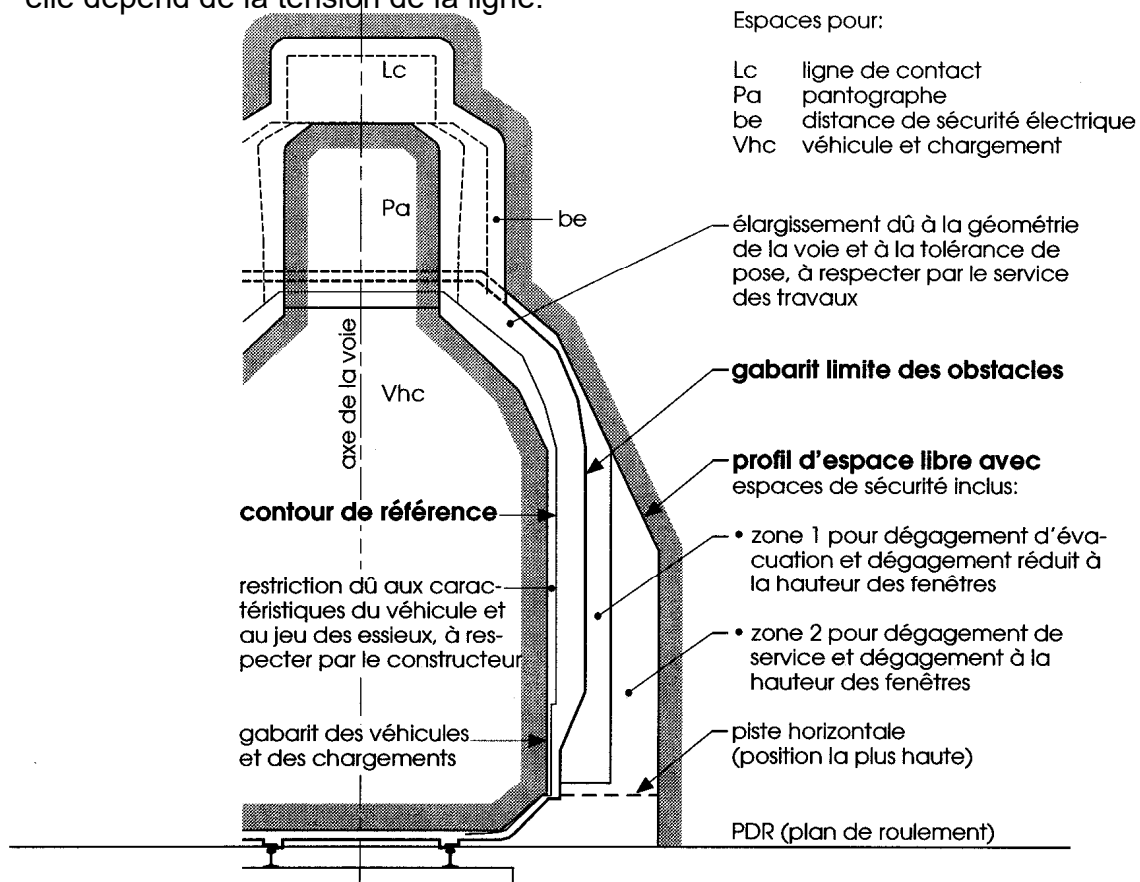


Figure 2.9 – Illustration des différents gabarits définis dans l'ordonnance fédérale [7].

On mentionnera encore le « **gabarit passe-partout international** » en usage dans les pays adhérant à l'Unité technique. Ce gabarit statique permet, à partir d'un contour limite que ne doivent pas dépasser les véhicules à l'état statique, de vérifier, dans les gares, les dimensions des chargements sur wagons ouverts.

La volonté actuelle d'aller vers des vitesses de circulation toujours plus élevées et des volumes transportables plus importants, notamment pour le feroutage, tend à augmenter les dimensions des gabarits ferroviaires. C'est ainsi que les réseaux sont généralement amenés à définir plusieurs gabarits en fonction du type de ligne et de la date de leur mise en service.

L'UIC définit dans ses fiches techniques 505 et 506 les différents gabarits devant être respectés en service international.

Les gabarits utilisés en Suisse par les CFF ou par les compagnies privées sont définis dans les dispositions d'exécution de l'ordonnance sur les chemins de fer [7]. Pour la voie normale, on considère 4 catégories de gabarit OCF1 à OCF4 (**Fig. 2.10**).

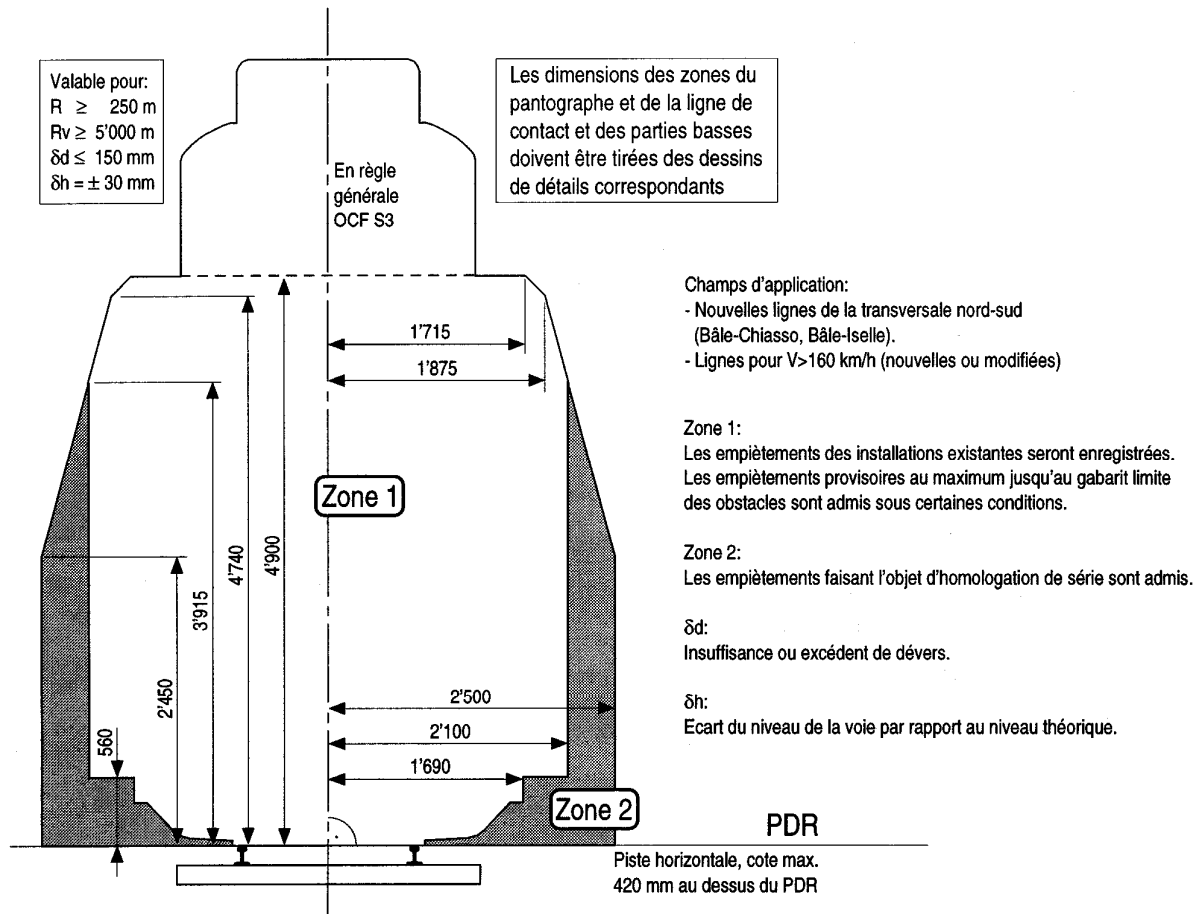


Figure 2.10 – Profil d'espace libre OCF4, voie normale [7].

Ils sont classés par ordre croissant des dimensions :

- OCF1 – installations et lignes existantes;
- OCF2 – doit être respecté pour toutes les nouvelles installations,
 - permet la circulation des voitures à deux niveaux,
 - permet le trafic combiné pour les camions de 3,8 m de hauteur à l'angle (codes de ferroutage P60 / C60 / W50 / NT50);
- OCF3 – prévus pour les lignes adaptées pour le trafic combiné acceptant des camions de 4 m de hauteur à l'angle (couloir de ferroutage du Lötschberg dès 1999 avec codes de ferroutage P80 / NT70);
- OCF4 – doit être respecté pour les nouvelles lignes de la transversale nord-sud Bâle-Chiasso et Bâle-Iselle,

- pour les lignes nouvelles ou modifiées dont la vitesse est supérieure à 160 km/h
- (gabarit établi sur la base du profil agrandi UIC "GC" d'après la fiche technique 506).

Pour les voies avec dévers, les profils d'espace libre sont disposés de la manière suivante (**Fig. 2.11**) :

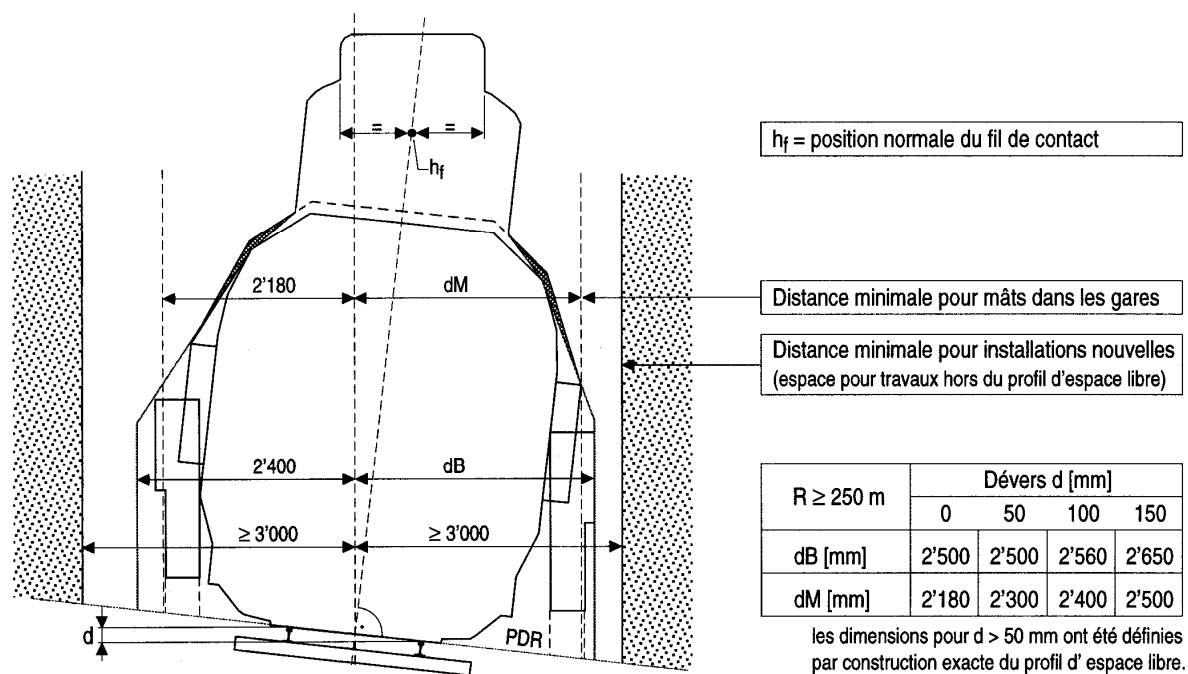


Figure 2.11 – Profil d'espace libre pour voies avec dévers [7].

On tiendra en plus compte d'une surlargeur en courbe pour les rayons inférieurs à 250 m en voie normale (selon [7], art. 18, feuilles 20N, 21N).

2.3 Entraxe des voies

L'**entraxe** est la distance horizontale entre les axes de deux voies contiguës. Les gabarits tiennent compte des entraxes de voie les plus faibles qu'on peut rencontrer sur l'ensemble des réseaux européens soit 3,34 m en alignement au tunnel du St-Gothard. Au-dessus de 200 km/h, les valeurs d'entraxes usuelles deviennent insuffisantes pour tenir compte des phénomènes aérodynamiques (effet de souffle) et des valeurs d'au moins 4,20 m sont appliquées sur les lignes à grande vitesse.

En ce qui concerne les entraxes, les valeurs du **tableau 2.12** doivent être adoptées en Suisse (CFF).

En comparaison, les autres réseaux européens ont adopté les valeurs suivantes pour les doubles voies :

FS (Italie)	5,00 m pour $V \geq 300$ km/h
DB (Allemagne)	4,70 m pour $V = 300$ km/h (ICE)
SNCF (France)	4,50 m – 4,90 m pour le TGV

Lorsqu'une nouvelle voie doit être implantée le long d'une route, on respectera en règle générale [7] entre le bord de la chaussée et l'axe de la voie la plus proche une distance de :

10,00 m pour les routes nationales et autres routes à grand débit,
 6,00 m pour les routes principales,
 4,50 m pour les autres routes.

Ecartement	Gares		Pleine voie	
	Distance normale (sans quai)	Sans passage inférieur (avec quai)	Doubles voies	Voies multiples
Voie normale	4,50 m, exceptionnellement 4,20 m	5,20 m	– voie existante 3,60 m pour $V \leq 140$ km/h – nouvelle voie 3,80 m pour : $V \leq 160$ km/h $R \geq 250$ m $\Delta d \leq 150$ mm 4,20 m pour $160 < V \leq 200$ km/h	5,20 m avec une piste de service
Voie métrique	4,00 m	4,70 m	3,20 m (+ en courbe)	4,20 m
Voie métrique (trucs ³)	4,20 m	4,70 m	3,60 m (+ en courbe)	4,60 m
Tramways	3,50 m	4,20 m	2,70 m (+ en courbe)	3,70 m

Tableau 2.12 – Distances entre les axes des voies généralement utilisées en Suisse [7].

³ Truc : wagon surbaissé muni de deux files de rails et destiné à transporter des véhicules ferroviaires d'un autre écartement;
 actuellement les trucs sont généralement remplacés par des **bogies transporteurs**; chaque bogie muni de roues de petit diamètre peut supporter un essieu du véhicule à transporter.

Partie B : éléments de tracé

Un **tracé** ferroviaire **en plan** est constitué de tronçons en alignement et de tronçons de courbes circulaires, entre lesquels il faut généralement intercaler des courbes de raccordement. Ces courbes de raccordement ont une courbure progressive pour permettre de réduire les chocs. Le **profil en long** est composé de paliers et de rampes ou de pentes, raccordés par des courbes de très grands rayons, qui ne nécessitent généralement pas de courbes de raccordement. Les **appareils de voie** (aiguillages) sont conçus et implantés en tenant compte de la dynamique des circulations imposée par leur cinématique et par le programme d'exploitation.

L'implantation d'éléments de tracé est régie par les lois fondamentales de la dynamique. Il existe une relation entre le tracé en plan et en élévation (profil en long), qui sont étroitement liés et dépendent des vitesses de circulation, des exigences du confort des voyageurs, des sollicitations du matériel et des résistances locales.

En Suisse, l'ordonnance fédérale sur la construction et l'exploitation des chemins de fer [7] dit à propos des éléments du tracé :

art. 17 Le tracé des lignes de chemins de fer sera choisi de manière à permettre une vitesse de marche régulière. Les éléments (courbes, déclivités, dévers, rayons de raccordement verticaux) seront adaptés au mode d'exploitation envisagé et fixés compte tenu de la sécurité, du confort et de la rentabilité du chemin de fer.

La vitesse de circulation des véhicules est sans doute le paramètre le plus important dans la problématique des études de tracé.

Les caractéristiques du tracé en plan et en élévation déterminent dans une large mesure la **vitesse maximale de circulation des véhicules**. En effet, la vitesse de circulation est limitée par :

- les différentes accélérations auxquelles sont soumis les convois circulant sur une trajectoire courbe (problèmes de confort, sécurité, usure...);
- les caractéristiques du matériel moteur dans les déclivités (puissance, capacité de freinage...).

Pour le réseau CFF, le tracé géométrique des voies doit être établi pour la vitesse V_R des trains de la catégorie R (trains voyageurs les plus rapides). Dès lors, les données relatives au dévers, à la longueur des courbes de raccordement et à la détermination de la vitesse dans les courbes, se rapportent aux trains de cette catégorie.

3. TRACE EN PLAN

3.1 Généralités

Afin d'obtenir une vitesse régulière sur un tronçon de ligne, il est nécessaire d'établir un tracé dont les caractéristiques géométriques soient homogènes.

Les fréquents changements du tracé (alignement, courbe de raccordement, courbe circulaire), ainsi que les éléments géométriques de courte longueur influencent négativement la marche des véhicules et le confort des usagers tout en compliquant l'entretien de la voie. Les éléments d'une longueur inférieure à $0,3 V_R$ [m], respectivement de 15-20 m, devraient être évités (en respectant toutefois les longueurs des courbes de raccordement données au paragraphe 3.3).

Parmi les éléments du tracé en plan, l'**alignement** est le plus simple et le plus favorable à l'exploitation. La résistance à l'avancement y est minimale et la vitesse de circulation homogène (en palier).

Les rayons minimaux des **courbes circulaires** sont essentiellement imposés par la vitesse de circulation des véhicules ou plutôt par la force centrifuge qui lui est liée. Toutefois, pour les voies parcourues à faible vitesse, l'inscription des véhicules en courbe, les résistances locales et la stabilité en courbe des voies sans joint ($R_{\min} \cong 300$ m) peuvent également dicter le choix du rayon minimum des courbes.

Les valeurs minimales suivantes peuvent être admises [6] :

Voie normale :	Voies principales	$R_{\min} \cong 200$ m
	Voies de manœuvre	$R_{\min} \cong 150$ m
Voie métrique :	Voies principales	$R_{\min} \cong 100$ m
	Voies de manœuvre	$R_{\min} \cong 80$ m
Tramway :	Voies directes	$R_{\min} \cong 20$ m
	Boucles de rebroussement	$R_{\min} \cong 15$ m

En outre, des rayons supérieurs à 30 000 m ne sont pas réalisable dans la pratique.

3.2 Tracé en plan des courbes circulaires et dévers [8]

Les rayons minimaux pour une circulation à une vitesse donnée sont fonction du dévers et de l'insuffisance de dévers admissibles.

Pour limiter les effets de la force centrifuge F sur le confort des voyageurs, protéger les marchandises (stabilité) et limiter l'usure du matériel, la voie est posée dans les courbes avec un dévers. Celui-ci est réalisé soit par un surhaussement de la file de rails extérieurs (p.ex. SNCF), soit par la répartition du dévers sur les deux files de rails (p.ex. CFF, JNR, ...) (**Fig. 3.1**).

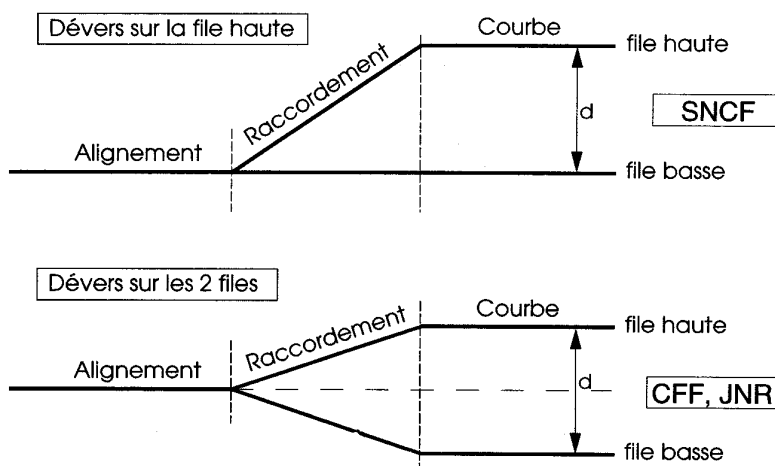


Figure 3.1 – Dévers d sur la file haute ou réparti sur les deux files de rail.

3.2.1 Approche théorique du calcul du dévers

La **figure 3.2** ci-dessous indique les forces agissant sur un véhicule circulant dans une courbe de rayon R . La masse du véhicule est considérée comme concentrée en son centre de gravité.

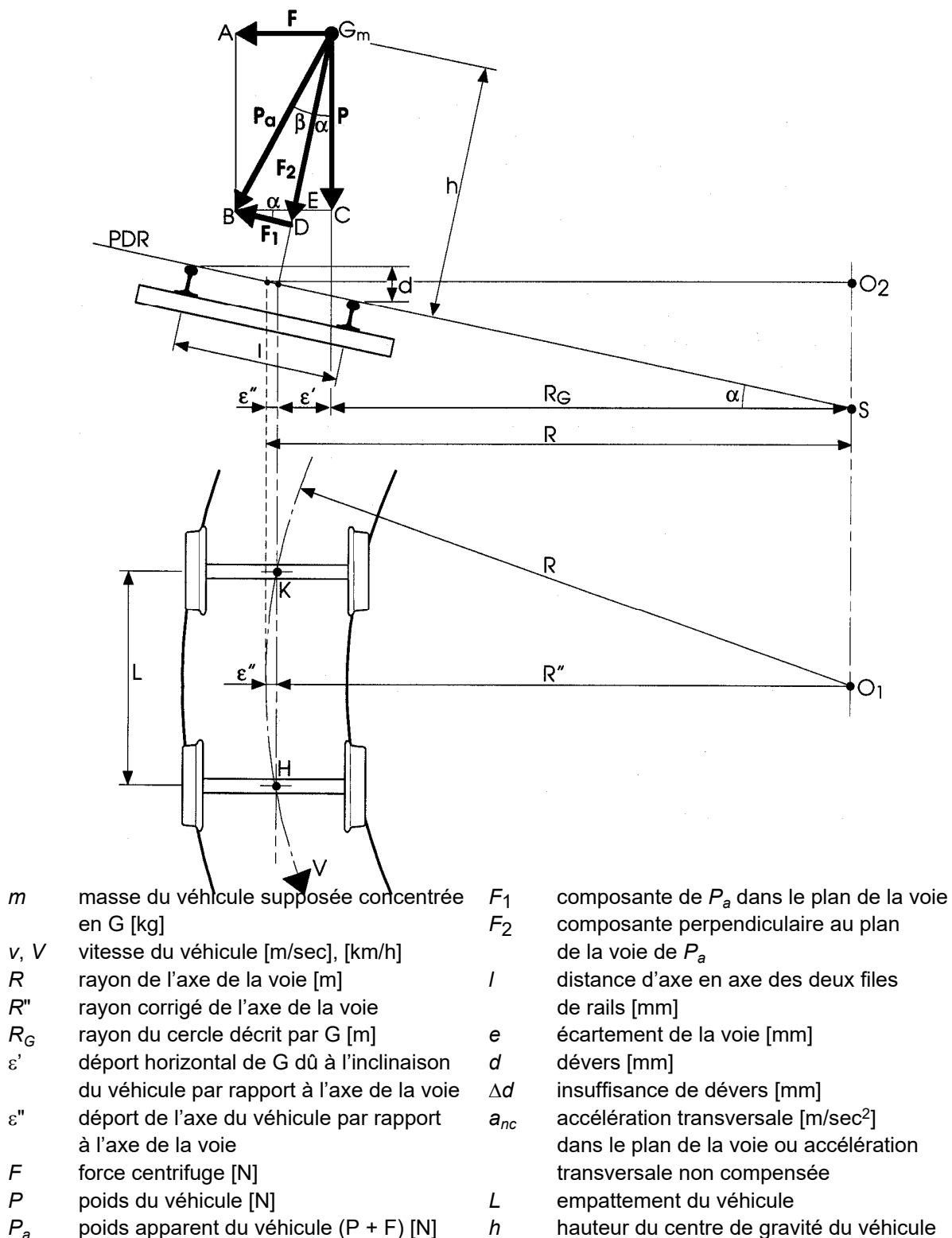


Figure 3.2 – Eléments pour le calcul du dévers théorique.

La deuxième équation intrinsèque du mouvement (équation de Newton : $F = m \cdot a$) nous donne, avec les notations adoptées ci-dessus,

pour la force centrifuge :
$$F = \frac{m \cdot v^2}{R_G}$$

et pour le poids du véhicule :
$$P = m \cdot g$$

Calcul des principales relations régissant la géométrie des voies ferrées

Les deux hypothèses simplificatrices suivantes peuvent être adoptées :

1) *Premièrement* : $R_G \cong R'' \cong R$

En réalité, $R_G = R - (\varepsilon' + \varepsilon'')$ car le centre de gravité G est déplacé vers l'intérieur de la voie du fait de l'inclinaison du véhicule et de son inscription dans la courbe.

Avec : $\varepsilon' = h \cdot \sin \alpha$ et $\varepsilon'' \cong \frac{L^2}{8 \cdot R}$ (flèche au milieu d'une corde de longueur L)

Or, la somme $\varepsilon' + \varepsilon''$ est au maximum de l'ordre de 0,50 m; ce qui est négligeable par rapport aux valeurs usuelles de R.

2) *Deuxièmement* : **$\cos \alpha = 1$ et $\sin \alpha = \tan \alpha = \frac{d}{l}$**

En effet, avec le dévers maximum autorisé $d_{\max} = 150 \text{ mm}$ (§ 3.2.4) pour l'écartement normal, l'angle α ne dépasse pas 6° .

En décomposant le poids apparent P_a du véhicule et en utilisant les hypothèses simplificatrices, on a donc :

$$\begin{aligned} F_1 &= (CB - CE) \cdot \cos \alpha; \quad \text{or} \quad CB = GA = F = \frac{m \cdot v^2}{R} \\ CE &= GC \cdot \tan \alpha = P \cdot \tan \alpha = m \cdot g \cdot \tan \alpha \\ \Rightarrow F_1 &= \left(\frac{m \cdot v^2}{R} - m \cdot g \cdot \tan \alpha \right) \cdot \cos \alpha \end{aligned}$$

On a finalement :

$$\boxed{F_1 = \frac{m \cdot v^2}{R} - m \cdot g \cdot \frac{d}{l}} \quad (0)$$

On obtient l'accélération transversale non compensée (par le dévers), a_{nc} , en divisant (0) par m (car $F_1 = m \cdot a_{nc}$) :

$$\boxed{a_{nc} = \frac{v^2}{R} - g \cdot \frac{d}{l}} \quad (1)$$

En résolvant par rapport à d :

$$\boxed{d = \frac{l}{g} \left(\frac{v^2}{R} - a_{nc} \right)} \quad (2)$$

Pour la voie normale (VN), les variables prennent les valeurs suivantes :

$$\begin{aligned} e &= 1435 \text{ mm} & v \text{ [m/s]} &= \frac{V_R}{3,6} \text{ [km/h]} \\ l &= 1500 \text{ mm} & g &= 9,81 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

D'où, de (1)
$$a_{nc} = \frac{V_R^2}{13 \cdot R} - \frac{d}{153} \quad (3)$$

et de (2)
$$d = 11,8 \frac{V_R^2}{R} - 153 \cdot a_{nc} \quad (4)$$

Le dévers pour lequel $a_{nc} = 0$ est appelé **dévers théorique** d_0 . Il correspond à la vitesse d'équilibre V_0 et vaut :

$$d_0 = 11,8 \frac{V_0^2}{R} \quad (5)$$

3.2.2 Insuffisance de dévers et accélération transversale non compensée

Dans la pratique, on considère plutôt l'**insuffisance de dévers** Δd que l'accélération transversale non compensée a_{nc} . Δd correspond à la partie de l'accélération transversale, dans le plan de la voie, qui n'est pas compensée par le dévers :

$$\Delta d = d_0 - d$$

De (4) et (5), on a pour la VN :
$$\Delta d = 153 a_{nc} \quad (6)$$

L'expérience pratique de nombreux réseaux a permis de montrer que pour des raisons de confort des usagers, l'accélération transversale non compensée devait être comprise entre les valeurs suivantes (**Fig. 3.3**) :

$$-1 \text{ m/s}^2 < a_{nc} < 0,65 \text{ à } 1 \text{ m/s}^2$$

Cela correspond, pour une VN, à un excès de dévers de 150 mm ou une insuffisance de dévers de 100 à 150 mm. C'est pour cela que le dévers maximum autorisé pour la VN est de 150 mm.

Notons que l'accélération transversale quasi-statique en caisse qui est effectivement ressentie par les passagers est plus élevée que l'accélération transversale non compensée dans le plan de la voie (a_{nc}).

Accélération effectivement ressentie $\cong (1 + s) \cdot a_{nc}$.

Elle est fonction de la souplesse des suspensions des voitures des trains de voyageurs considérés. La plupart des voitures modernes ont, en pleine charge, un coefficient de souplesse (s) de l'ordre de 0,4. Grâce à des dispositifs spéciaux, cette valeur peut être réduite jusqu'à 0,20-0,25.

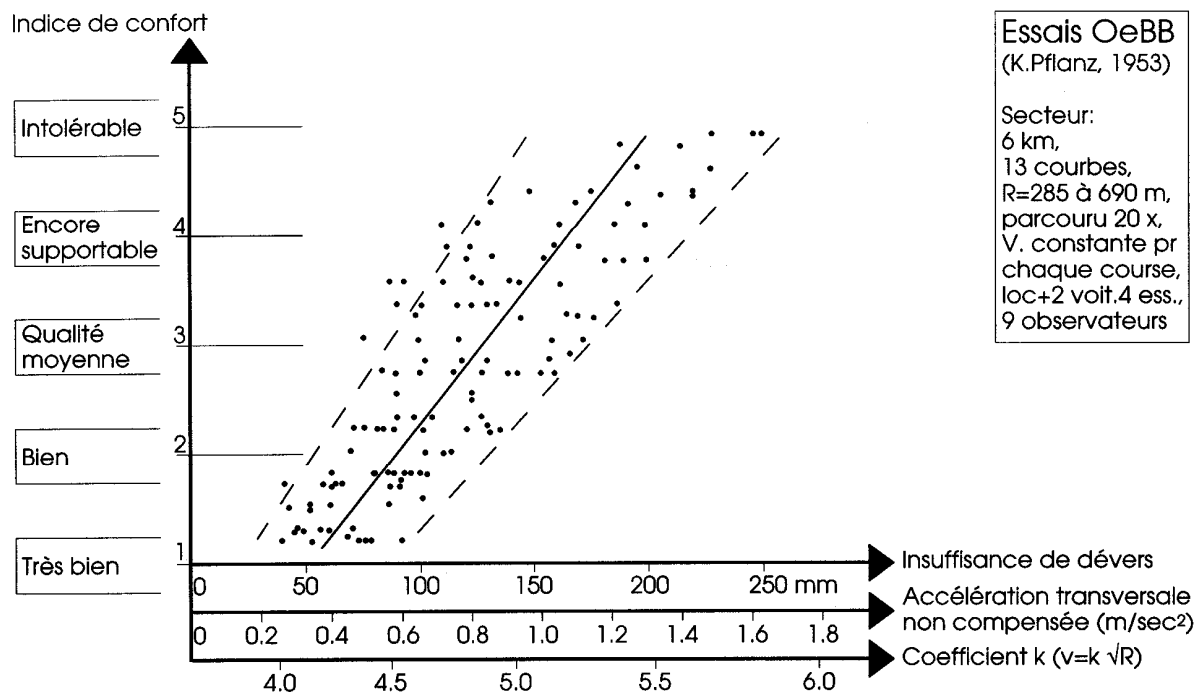


Figure 3.3 – Résultats de l'étude sur l'acceptabilité de l'accélération transversale.

Les valeurs maximales de l'accélération transversale non compensée et de l'insuffisance de dévers utilisées aux CFF ($V_R \leq 160$ km/h) sont les suivantes :

Cas normal	$\Delta d = 122$ mm	$a_{nc} = 0,8$ m/s ²
Cas exceptionnel	$\Delta d = 130$ mm	$a_{nc} = 0,85$ m/s ²

(tableau complet et détaillé dans l'annexe 3).

3.2.3 Vitesses maximales en courbe

La vitesse en courbe est fonction du rayon R de la courbe, du dévers d et de l'accélération transversale non compensée a_{nc} . Pour la VN, en développant (3) par rapport à V_R , on a :

$$V_R = \sqrt{\left(a_{nc} + \frac{d}{153}\right) \cdot 13R} = \sqrt{\frac{(153a_{nc} + d) \cdot 13R}{153}} = \sqrt{\frac{(\Delta d + d) \cdot 13R}{153}}$$

Avec les valeurs limites $\Delta d = 122$ mm ou $a_{nc} = 0,8$ m/s² et $d = 150$ mm,

on a donc :

$$V_{Rmax} = 4,8 \cdot \sqrt{R} \quad (7)$$

Notons qu'il est possible d'augmenter V_{max} sans toutefois diminuer les caractéristiques de confort soit en augmentant d_{max} (sans toutefois dépasser la limite de l'excès de dévers), soit en recourant à des véhicules pendulaires à caisse inclinable par rapport au plan de la voie⁴. On peut monter dans ce cas jusqu'à :

$$V_{max} \cong 5,5 \cdot \sqrt{R}$$

⁴ Cours « Systèmes de transports I », doc. ITEP 401/2.

3.2.4 Dévers dans les courbes

a) Valeurs limites

Pour les CFF, le dévers maximum est normalement de **150 mm**. Dans des cas particuliers dûment justifiés, il est possible, pour des courbes isolées, d'introduire un dévers allant jusqu'à un maximum de 180 mm. D'autre part, la valeur du dévers des voies à quai ne doit pas dépasser 100 mm.

Finalement, des dévers inférieurs à 10 mm ne sont pas constructibles.

b) Calcul du dévers normal

La vitesse de circulation des différents convois dans une même courbe diffère suivant la nature des convois, leur charge, l'usure des bandages des locomotives...

On ne peut donc réaliser un dévers correspondant à la vitesse d'équilibre de tous les trains.

Selon le type de convoi on peut avoir la situation suivante (**Fig. 3.4**) :

$d > d_0$ Excès de dévers. Conséquences : usure et écrasement du rail de la file intérieure, problème du confort pour les trains voyageurs lents ou arrêtés, difficultés de démarrage des trains...

$d = d_0$ Vitesse d'équilibre $V = V_0$

$d < d_0$ Insuffisance de dévers. Conséquences : accélération non compensée, problème du confort des voyageurs et de la protection des marchandises, usure latérale excessive du rail de la file extérieure.

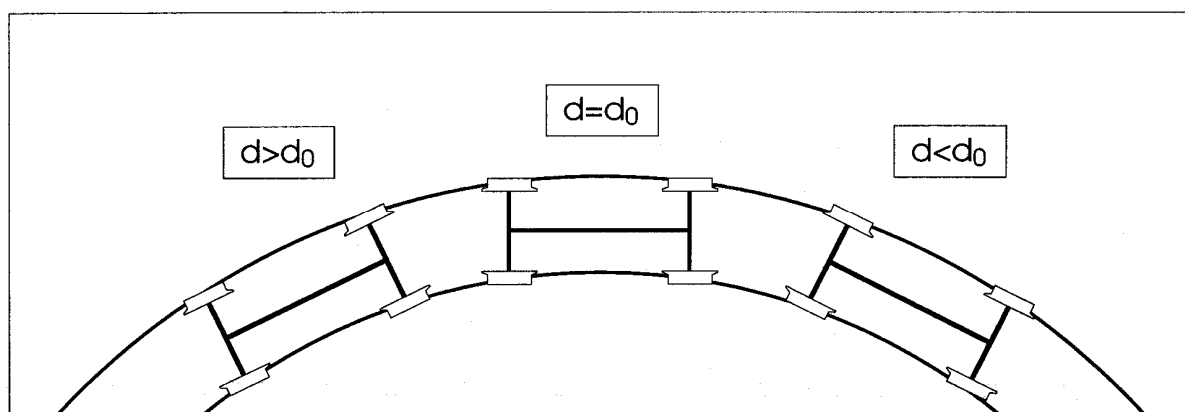


Figure 3.4 – Position du bogie dans les trois cas.

C'est ainsi que le dévers à réaliser dans la voie, appelé **dévers normal**, est non seulement déterminé par la vitesse de circulation maximale mais également par les vitesses minimales.

On aura en effet des dévers normaux sensiblement différents en fonction de l'hétérogénéité des vitesses de circulation résultant d'un trafic mixte marchandises-voyageurs et notamment sur les nouvelles lignes à grande vitesse non spécialisées.

Des standards de confort différents peuvent également expliquer la diversité des dévers normaux entre les réseaux.

Pour des vitesses $V_R \leq 125 \text{ km/h}$, les CFF utilisent la formule suivante :

$$\text{De (4) et (6),} \quad d = 11,8 \frac{V_R^2}{R} - \Delta d$$

$$\text{De (7) :} \quad \frac{V_R^2}{R} = 4,8^2 = 23,1$$

$$\text{Avec la valeur limite de } \Delta d = 122 = 5,3 \cdot 23,1 = 5,3 \cdot \frac{V_R^2}{R}$$

$$\text{D'ou : } d = (11,8 - 5,3) \frac{V_R^2}{R} \Rightarrow \boxed{d = 6,5 \frac{V_R^2}{R}} \quad (8)$$

Le dévers $d = 150 \text{ mm}$ ne doit en général pas être utilisé pour des vitesses V_R supérieures à 125 km/h , pour tenir compte des trains lents. C'est pourquoi on remplace la formule (8) par la suivante :

$$\boxed{d = \frac{6,5 \cdot 125^2}{R} \quad V_R > 125} \quad (9)$$

km/h

Le tableau A3-2 de l'**annexe 3** donne tous les paramètres pour calculer le dévers en fonction de la vitesse, alors que le tableau A3-1 donne les rayons minimaux en fonction de la vitesse et du dévers normal.

3.3 Courbes de raccordement et rampes de dévers

La géométrie des voies ferrées doit permettre une transition progressive (sans chocs) entre des éléments de tracé présentant des accélérations transversales différentes et éviter un accroissement subit de celles-ci à l'entrée d'une courbe. C'est la raison pour laquelle le passage d'un rayon de courbe, de dimension finie ou infinie, à un autre doit être progressif. Ceci est obtenu par l'introduction d'une courbe de raccordement.

Ces éléments liés aux rampes de dévers sont des contraintes importantes dans l'élaboration d'un tracé.

3.3.1 Géométrie des courbes de raccordement de la voie en plan

Les courbes de raccordement de la voie en plan doivent être conçues pour limiter la variation de l'accélération transversale non compensée da_{nc}/dt afin de répondre à des exigences de **confort** (Fig. 3.5).

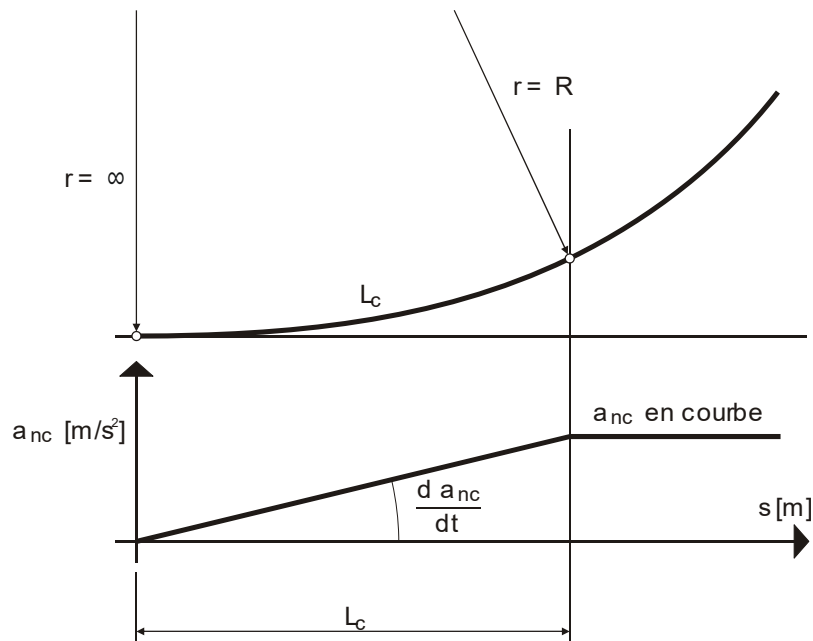


Figure 3.5 – Courbe de raccordement et accélération non compensée ($v = \text{Cte}$).

Ces courbes de raccordement de la voie en plan peuvent être réalisées de différentes manières :

- 1) *Radioïde aux abscisses*, **parabole cubique** ou de Nördling (**Fig. 3.6**)

$$\frac{1}{R_p} = k \cdot X_p \quad \text{courbure proportionnelle à l'abscisse } X \text{ mesurée depuis le point d'inflexion } O \text{ de la courbe.}$$

D'implantation aisée, son utilisation était autrefois généralisée dans le domaine des chemins de fer.

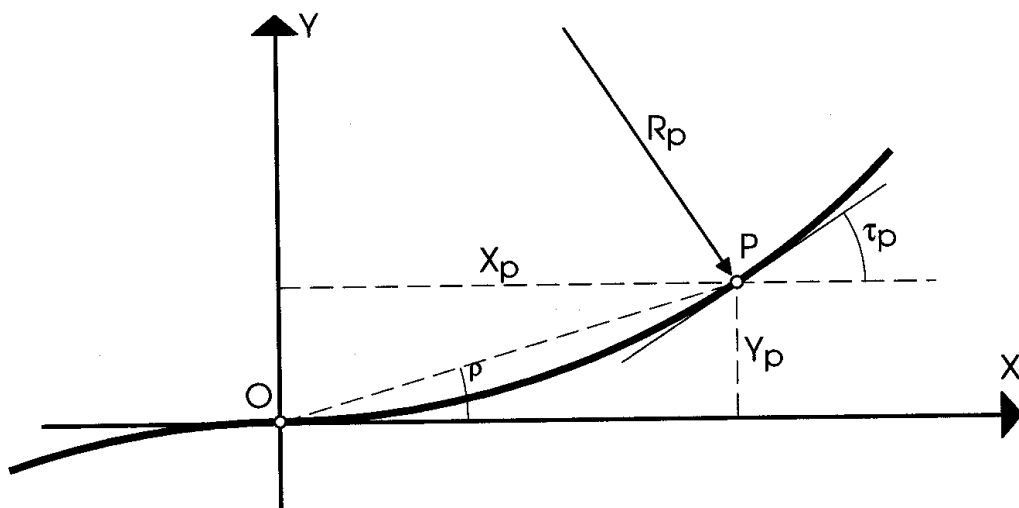


Figure 3.6 – Illustration d'une parabole cubique.

2) *Radioïde aux arcs : clothoïde* ou spirale de Cornu (**Fig. 3.7**)

$$\frac{1}{R_p} = k \cdot L_p \quad \text{courbure proportionnelle à l'abscisse curviligne } L \text{ mesurée depuis le point d'inflexion } O.$$

Répondant le mieux aux conditions spécifiques du trafic, la clothoïde a totalement remplacé la parabole cubique pour les tracés de chemins de fer. Son utilisation dans les projets routiers est également généralisée.

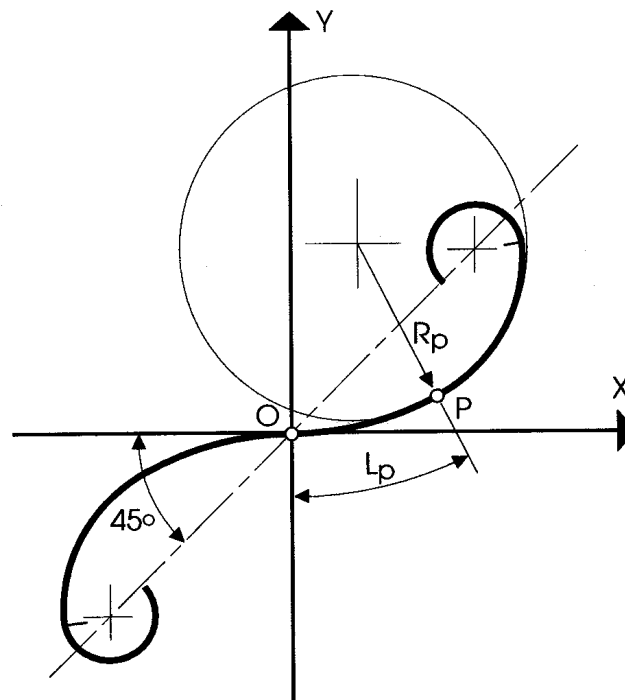


Figure 3.7 – Illustration d'une clothoïde.

Avec l'apparition des moyens de calcul informatiques, tant le calcul de l'axe que le piquetage des clothoïdes a été largement facilité. Jusqu'à un angle τ de 15° , le tracé de la clothoïde ne diffère guère de celui de la parabole cubique. Les deux courbes peuvent en effet être approximées dans ce domaine par la formule suivante :

$$Y = \frac{X^3}{6 \cdot R \cdot L} \quad \text{avec } X \text{ et } Y : \text{ abscisse et ordonnée depuis le point d'inflexion } O$$

R : rayon du cercle ausculteur au point (X, Y)

Les clothoïdes sont des courbes homothétiques, c'est-à-dire géométriquement semblables entre elles, le **paramètre de la clothoïde** étant le rapport d'homothétie ou facteur de similitude. Les angles et les rapports sont donc des invariants.

Il est ainsi possible de calculer et d'implanter une clothoïde de paramètre A à partir d'une table contenant toutes les valeurs de la clothoïde unitaire A = 1. La « Table de clothoïdes » (P. Klaus, édit. USPR) donne les éléments de la clothoïde unitaire et les invariants, pour des points équidistants le long de la courbe (**Fig. 3.8**).

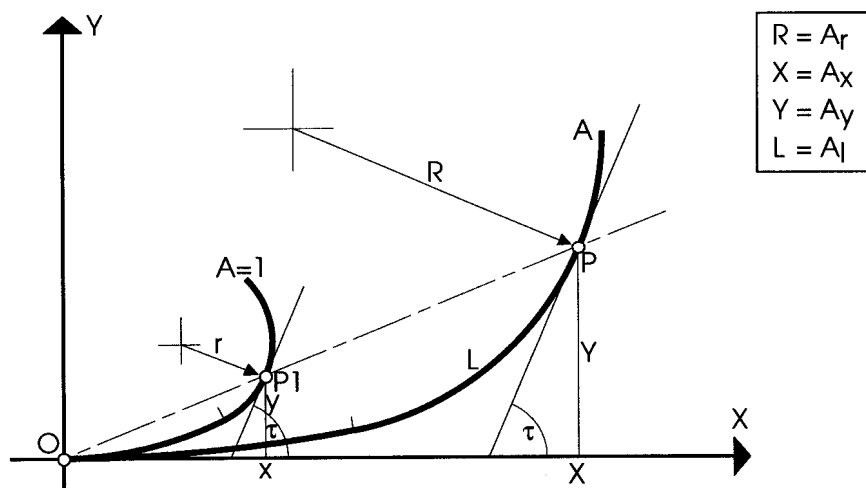


Figure 3.8 – Illustration du rapport d'homothétie entre une clothoïde de paramètre A et la clothoïde unitaire.

3.3.2 Géométrie des rampes de dévers

La transition du dévers entre une courbe circulaire et par exemple un alignement doit également être réalisée de manière progressive (Fig. 3.9). Il s'agit en fait de limiter au maximum les actions dynamiques provoquées par les rampes de dévers non seulement du point de vue du **confort** mais également de la **sécurité** contre le déraillement.

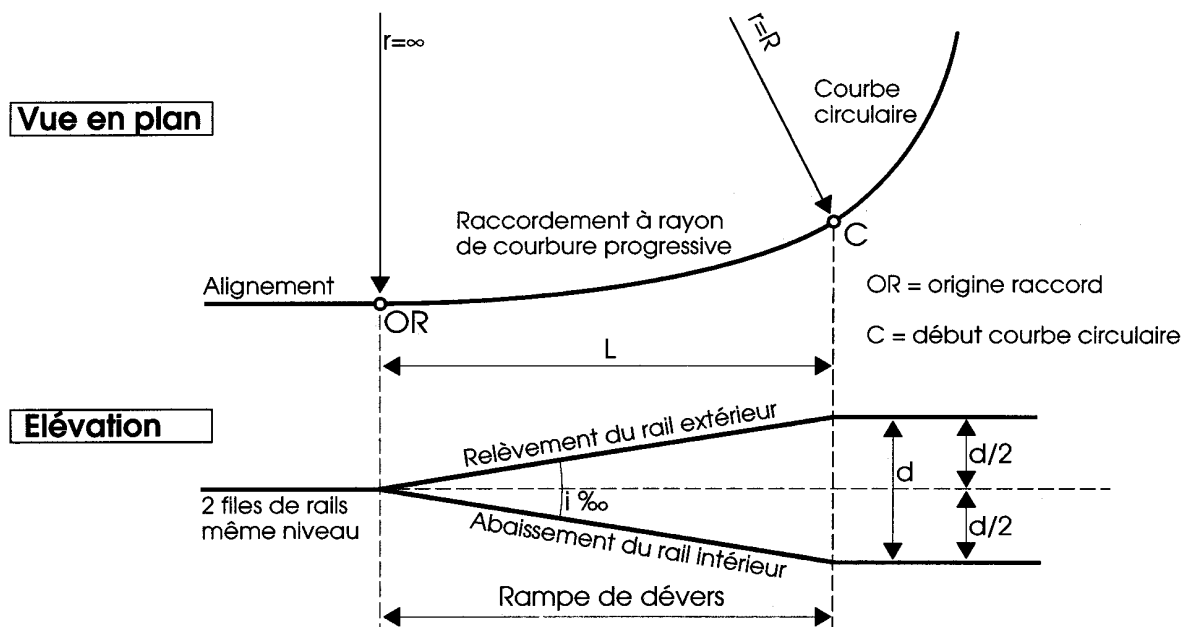


Figure 3.9 – Illustration d'une rampe de dévers (CFF, JNR, ...).

La géométrie de la rampe de dévers (file de rail extérieure) peut être réalisée de différentes manières :

- linéaire (SNCF, ...) (**Fig. 3.10**);

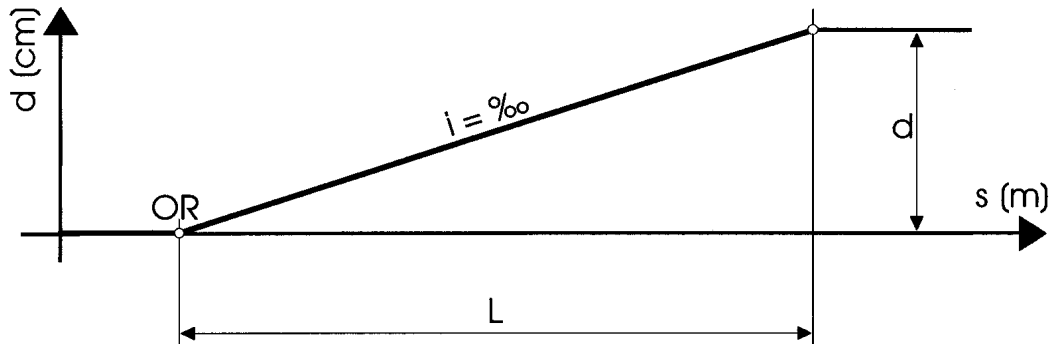


Figure 3.10 – Raccordement linéaire du dévers (file de rail extérieure SNCF, ...).

- sinusoïdale (ligne à grande vitesse du Tokaïdo, JNR, ...);
- ligne brisée avec doucines pour atténuer la brisure de la trajectoire du centre de gravité des véhicules (SNCF...) (**Fig. 3.11**);

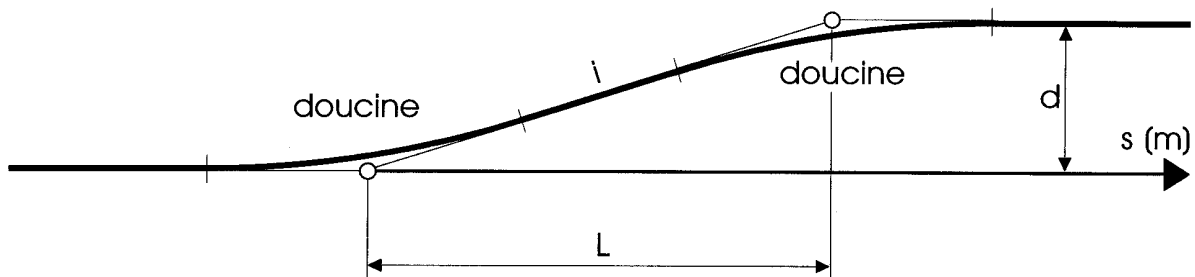


Figure 3.11 – Raccordement linéaire du dévers avec doucines.

- rampe arquée (DB...) (**Fig. 3.12**).

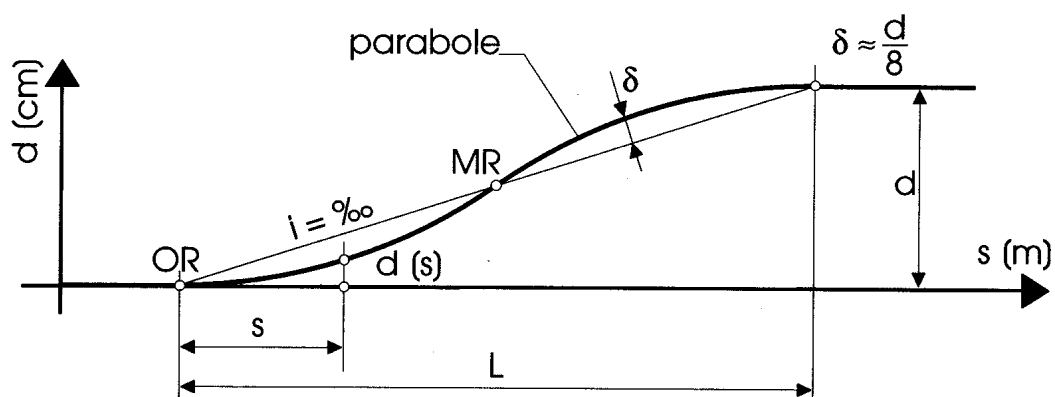


Figure 3.12 – Raccordement parabolique du dévers.

3.3.3 Longueur des courbes de raccordement et des rampes de dévers

Généralement, les courbes de raccordement de voies posées avec dévers seront réalisées de telle sorte que leur longueur L_c coïncide avec celle de la rampe de dévers L_d . La plus grande de ces longueurs, dont le calcul est donné ci-dessous est donc déterminante.

a) Longueur de la courbe de raccordement L_c

Afin de respecter les limites pour la variation de l'accélération transversale non compensée da_{nc}/dt , la longueur des courbes de raccordement de la voie en plan doit répondre au critère suivant :

$$L_c \geq \frac{da_{nc}}{dt} \text{ admissible } a_{nc} \text{ en courbe circulaire}$$

Pour un écartement fixé, l'accélération non compensée a_{nc} étant directement proportionnelle à l'insuffisance de dévers Δd , on a également :

$$L_c \geq \frac{d\Delta d}{dt} \text{ admissible } \Delta d \text{ en courbe circulaire}$$

L'**annexe 3** donne un échantillon de valeurs admissibles recommandées pour différentes classes de vitesse.

On ajoutera encore que l'on peut renoncer à l'usage de courbes de raccordement dans certains cas particuliers ($R > 12\,000$ m, vitesse de circulation relativement faible ($V < 125$ km/h), voie posée sans dévers). C'est également le cas dans les branchements où l'on ne dispose en général pas de la place nécessaire.

La variation de l'accélération transversale non compensée agit alors par à-coups et les chocs résultants sont susceptibles de diminuer sensiblement le confort. L'importance de ces à-coups ne peut être déterminée qu'à partir de modèles de calcul [6].

b) Longueur de la rampe de dévers L_d

Limitation du gauche (sécurité)

Le long de la rampe de dévers la voie est gauche. Les quatre points de contact de deux essieux d'un bogie ou d'un véhicule à 2 essieux ne sont pas dans un même plan (**Fig. 3.13**) et, à moins que le véhicule ne comporte un dispositif longitudinal d'équilibrage, la charge se répartit inégalement sur les 4 roues. Les défauts de nivellement, aggravant ces inégalités par les surcharges dynamiques qu'ils créent, prennent une importance particulièrement néfaste dans les entrées de courbes aux vitesses élevées.

Dans tous les cas, le gauche dans la rampe de dévers doit garantir une sécurité suffisante contre le déraillement. Le gauche g est limité par le jeu existant dans les boîtes d'essieu des véhicules et de la dimension du boudin des roues.

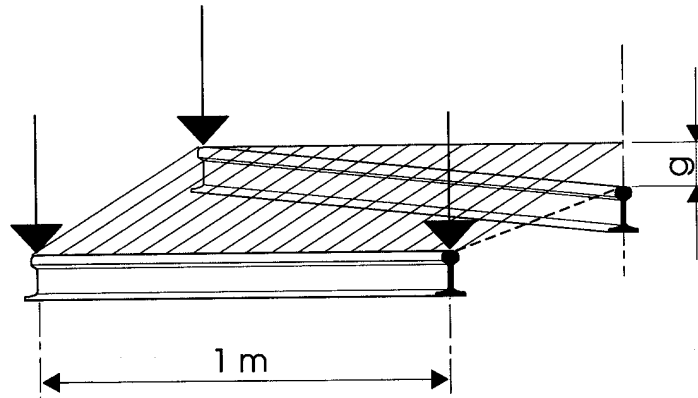


Figure 3.13 – Illustration du gauche.

Le gauche de construction de la voie est défini par la différence de dévers par unité de longueur de voie (mm/m ou ‰). Pour les voies à trafic mixte et $V_R \leq 160$ km/h il est limité à 2‰ (**Annexe 3**, tableau A3-3). La rampe de dévers doit donc impérativement respecter

$$L_d \geq \frac{d}{g_{admissible}}$$

Dynamique des circulations dans la rampe de dévers (confort et sécurité)

Du point de vue du confort et de la sécurité contre le déraillement, les actions dynamiques provoquées par les rampes de dévers doivent être aussi faibles que possible. On limitera donc la variation du dévers (vitesse d'élévation) en tenant compte des valeurs limites données dans le tableau A3-3 de l'**annexe 3**.

Les longueurs des rampes de dévers doivent donc respecter :

$$L_d \geq \frac{d \cdot v}{\frac{dd}{dt}}$$

c) Calcul pratique de la courbe de raccordement

Dans des conditions normales, la longueur de la rampe de dévers L_d correspondra toujours à la longueur L_c de la courbe de raccordement en plan. Dans certains cas exceptionnels, il peut être accepté de prolonger la rampe de dévers dans la courbe circulaire.

Le critère déterminant pour définir la longueur de la courbe de raccordement peut différer selon les vitesses de circulation et les dévers mis en place. Pratiquement, on aura recours à des abaques prenant en compte l'ensemble des conditions [6] et définissant une longueur normale et une longueur minimale des courbes de raccordement.

Une courbe de raccordement plus grande que la valeur normale n'est pas souhaitable, car elle n'augmente pas le confort mais rallonge la zone critique constituée par le gauche de la rampe de dévers.

3.4 Courbes sans courbes de raccordement et courbes en S

Dans certains cas, il n'est pas possible de réaliser des courbes et contre-courbes avec courbe de raccordement; par exemple dans les appareils de voies. Il faut alors tenir compte des deux conditions suivantes :

- Un recouvrement suffisant des tampons doit être garanti au passage des courbes de sens contraire, ceci indépendamment de la vitesse.
- Le choc ψ résultant du passage d'une courbe à l'autre doit être maintenue dans les limites supportable.

Le recouvrement dépend des types de wagons en présence, principalement de la longueur du porte-à-faux entre l'axe de l'essieu et l'extrémité du tampon, ainsi que des dimensions du tampon lui-même.

Pratiquement, il faut prévoir un alignement intermédiaire λ entre les deux courbes lorsque le « rayon idéal » :

$$R_{id} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} < 110 \quad (\text{Fig. 3.14})$$

Les valeurs données par le diagramme sont indicatives et doivent être contrôlées dès que les longueurs des courbes sont inférieures à environ 20 m.

Dans les courbes de sens contraire des voies directes parcourues à grande vitesse, la longueur des alignements intermédiaires situés entre deux courbes de raccordement ne devrait pas être inférieure à $0,3-0,4 V_{\max}$.

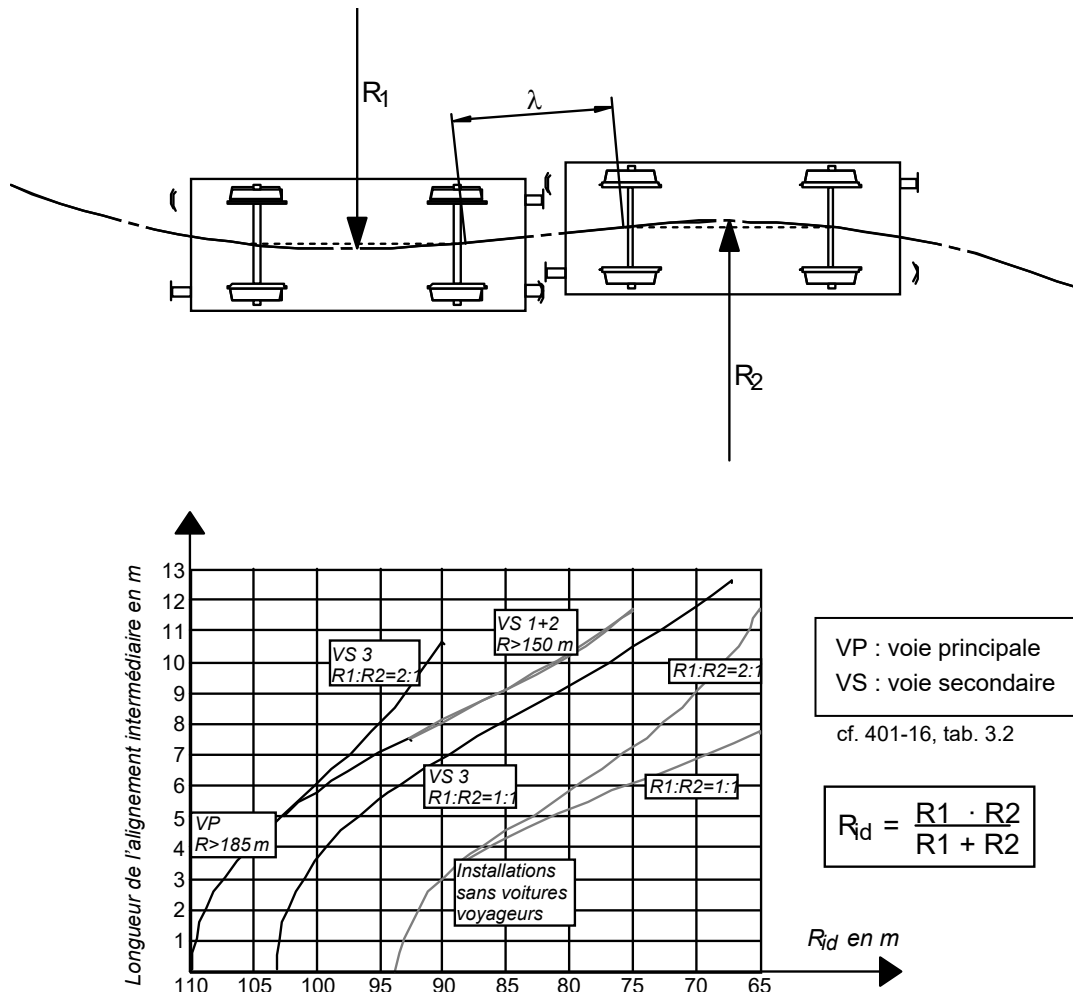


Figure 3.14 – Longueurs minimales des alignements entre courbes et contre-courbes, compte tenu d'un recouvrement suffisant des tampons [6].

4. PROFIL EN LONG

4.1 Généralités

Dans la terminologie ferroviaire, on parle en général de déclivité lorsque $i \geq 1$ à 2‰. C'est une rampe en montée et une pente en descente suivant le sens du kilométrage ou le sens de circulation. Dans les zones horizontales ($i < 2$ ‰), on utilise la notion de palier.

Les déclivités limites sont fonction :

- de l'adhérence;
- du mode de traction et des caractéristiques des véhicules (performance et résistance des attelages);
- des caractéristiques de la ligne et de la topographie (choix de l'écartement);
- des programmes d'exploitation (trafic probable, longueur et charge des convois);
- de la longueur des déclivités.

4.2 Chemins de fer à adhérence

Les ordres de grandeur de la déclivité maximale sont de 30‰ pour la VN et de 70‰ pour la VE.

4.2.1 Limites pratiques de la déclivité

Le chemin de fer est particulièrement sensible aux déclivités. En effet, le coefficient d'adhérence minimale acier-acier est de 0,10 (correspond au coefficient pneu-verglas pour une vitesse de 40 km/h). Un véhicule simplement freiné pourrait donc se mettre en mouvement dès qu'une déclivité dépasse 100‰.

Alors qu'à la fin du siècle passé, des lignes de tramway eurent des déclivités atteignant 115‰, les déclivités maximales rencontrées sur le réseau ferré suisse et les lignes à grande vitesse peuvent se résumer ainsi :

Voie normale :	• <i>Lignes principales :</i>		
	Ligne du Gothard	(1882)	26-28‰
	Ligne du Lötschberg	(1913)	27‰
	Ligne du Mont Cenis	(1879)	30‰
	Ligne de l'Arlberg	(1884)	31‰
	• <i>Lignes à grandes vitesses :</i>		
	Tokaido (Shinkansen-Japon)	(1964)	15‰
			18‰ (<i>l</i> < 2,5 km)
			20‰ (<i>l</i> < 1,5 km)
	Ligne du TGV Paris-Lyon	(1981)	35‰ (<i>l</i> < 4 km)
	Ligne du TGV-Atlantique	(1990)	25‰
	Direttissima Rome-Florence	(70-90)	7,5‰
	(trafic voyageurs & marchandises)		
	• <i>Lignes secondaires :</i>		
Voie étroite :	Ligne des CFF (par ex. Le Day-Le Pont)		38-39‰
	Südostbahn (SOB)		50‰
	Uetlibergbahn (SZU)		70‰
	Ligne de L'Albula (RhB)	(1904)	35‰
	Ligne de la Bernina (RhB)	(1910)	70‰
	Montreux Oberland Bernois (MOB)	(1905)	73‰
	Tramway de la ville de Zurich (VZB)		77‰

D'une manière générale, les déclivités des principales lignes nouvelles du réseau européen à grande vitesse uniquement exploitées en trafic voyageurs sont limitées à 35‰, alors que cette limite est de 12,5‰ pour un trafic mixte (marchandises et voyageurs).

Dans les gares, les déclivités ne devraient pas excéder 1 à 2‰ sur les voies de triage et de garage, afin d'éviter la dérive de wagons mal freinés.

4.2.2 Vitesse maximale

Tout comme les courbes, les déclivités et en particulier les pentes ont une influence sur la vitesse maximale des convois en raison de l'augmentation des distances de freinage.

La vitesse maximale admissible des convois dépend du type de frein ainsi que du rapport de freinage (rapport entre la somme des poids freins et le poids total du train). A l'heure actuelle, ce dernier paramètre est principalement déterminant pour les trains marchandises. Les vitesses maximales pour les chemins de fer suisses à voie normale sont données par des tableaux de freinage contenus dans le DE-OCF [7]. En tenant compte des meilleurs rapports de freinage, le **tableau 4.1** donne les vitesses maximales autorisées en fonction de la déclivité et du type de frein utilisé.

Déclivités en ‰	Vitesse maximale en km/h (en site propre)					
	Cat. N ⁵	Catégorie R		Catégorie A ³		
		Tronçons déterminés ⁶	Frein-voyageur ⁷	Frein-voyageur	Frein-marchand.	Frein à main
Rampes et paliers	200	160	125	120	80	40
Pentes :						
0 jusqu'à 10		160	125	120	80	40
plus de 10 ... 13		160	120	115	80	40
plus de 13 ... 16		160	115	110	80	40
plus de 16 ... 19		160	110	105	80	40
plus de 19 ... 22		160	105	100	80	40
plus de 22 ... 25		155	100	95	75	40
plus de 25 ... 28		150	95	90	70	40
plus de 28 ... 31		145	90	85	65	35
plus de 31 ... 34		140	85	80	60	35
plus de 34 ... 37		140	80	75	55	30
plus de 37 ... 40		135	75	70	50	30
plus de 40 ... 43		130	70	65	45	25
plus de 43 ... 46		130	65	60	45	25
plus de 46 ... 50		125	60	55	40	20

Tableau 4.1 - Vitesse maximale en fonction de la déclivité déterminante pour la VN en Suisse [7].

4.2.3 Raccordements de déclivité

Contrairement au cas de la route, les raccordements de déclivité ne sont pas soumis à des conditions de visibilité. Par contre le soulagement statique d'un essieu de véhicules à bogies peut, avec les effets dynamiques, compromettre la sécurité. De plus, l'inscription des châssis des véhicules de traction doit être possible et les conditions dynamiques dictées par les contraintes de confort des usagers doivent être respectées.

Un changement de déclivité est raccordé par un arc de cercle sans courbes de raccordement (**Fig. 4.2**). La longueur du raccordement de déclivité (L) doit être au minimum de 20 m. L et la valeur de la distance au sommet (y) en son milieu (MV) peuvent être calculées à l'aide des formules suivantes :

⁵ Nouvelle catégorie en cours de définition pour les vitesses supérieures à 160 km/h.

⁶ Lignes nouvelles ou adaptées (distance plus grande entre les signaux avancés et principaux), avec tableau de freinage 90 et rapport de freinage de 135%.

⁷ Tableaux de freinage I et II.

$$\frac{L}{2} = \frac{p_1 \pm p_2}{2000} R_v \quad y = \frac{1000 \cdot L^2}{8 \cdot R_v}$$

avec L Longueur du raccordement [m]
 y Distance au sommet [mm]
 R_v Rayon du raccordement vertical [m]
 p_1 et p_2 Déclivités [‰]
 $p_1 + p_2$ lorsque les déclivités sont de sens contraire
 $p_1 - p_2$ lorsque les déclivités sont de même sens

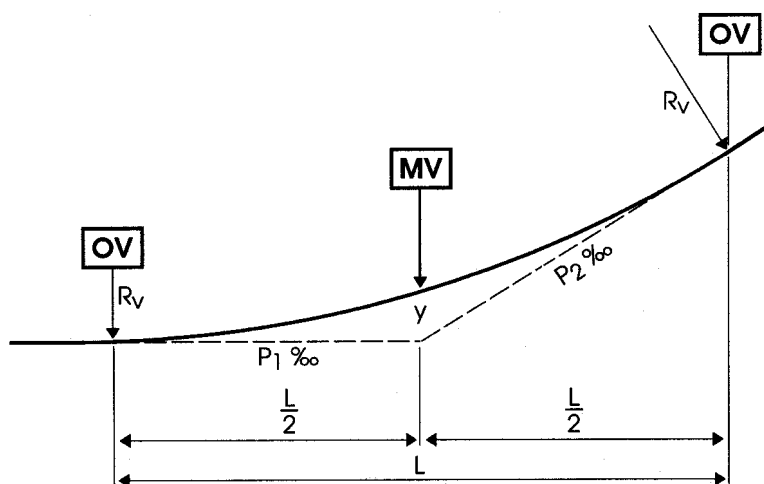


Figure 4.2 – Raccordement vertical [6].

Les rayons des raccordements de déclivité dépendent de la vitesse. Le tableau de l'**annexe 4** donne, en fonction des vitesses, les formules et les valeurs limites nécessaires à leur calcul. Les valeurs minimales pour les voies ferrées sont les suivantes :

	Voie normale	Voie étroite
En bosse (convexe) :	3 000 m	1 500 m
En creux (concave) :	2 000 m	1 000 m

Les changements de déclivités doivent être évités dans les rampes de dévers. Si cette règle ne peut être respectée, les rayons des raccordements de déclivités doivent être choisis aussi grands que possible et pas en-dessous de certaines limites. Des règles sensiblement plus strictes sont appliquées lorsque des appareils de voie doivent être posés dans des courbes de raccordements verticaux.

Notons encore que les installations de débranchement des gares de triage sont soumises à des prescriptions spéciales.

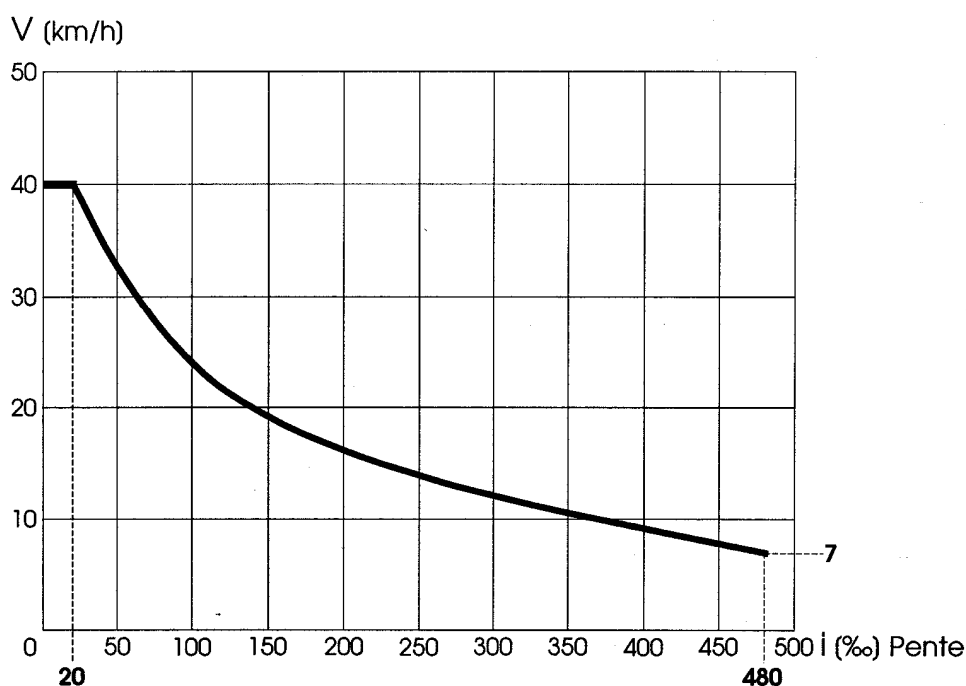
4.3 Chemins de fer à crémaillère et mixtes (crémaillère-adhérence)

Dans les régions montagneuses, il est parfois nécessaire de franchir de fortes variations d'altitude sur de courtes distances. Si le développement du tracé ou la construction d'ouvrages d'art (afin de maintenir les déclivités en-dessous de 70‰) ne peuvent être envisagés, il est nécessaire de recourir à un autre mode de traction comme le funiculaire (traction par câble) ou la crémaillère (cf. **Annexe 2**).

Si le profil en long d'un chemin de fer ne prévoit que quelques tronçons à forte déclivité, la crémaillère n'est implantée que sur ces derniers. On parle alors de chemin de fer « mixte adhérence-crémaillère ».

Lors du choix entre un tracé comprenant quelques tronçons à crémaillère et un autre prévoyant le développement artificiel du tracé, il est nécessaire de prendre en compte les points suivants :

- le chemin de fer mixte permet de raccourcir le tracé mais nécessite une superstructure compliquée et un matériel roulant relativement complexe (4 systèmes de freinage sont exigés par l'OFT, ...);
- sur les tronçons à crémaillère, des considérations techniques et de sécurité dictent les vitesses maximales autorisées par le DE-OCF [7]. En palier ou faible pente, la vitesse des convois peut atteindre 40 km/h mais cette limite décroît très rapidement avec l'augmentation de la déclivité (**Fig. 4.3**).



Déclivité en ‰ pente jusqu'à:	20	30	50	60	70	80	90	100	110	120	130	145	160	180	200	250	300	390	480
Vitesse max. en km/h	40	37,5	33	30,5	29	27	25,5	24	23	21,5	21	19,5	18,5	17	16	14	12	9,5	7

Figure 4.3 - Vitesse max. en fonction de la déclivité (extrait) [7].

5. APPAREILS DE VOIE

5.1 Introduction

Une des caractéristiques fondamentales du chemin de fer est son mouvement guidé qui n'a qu'un seul degré de liberté. Pour comparaison, les véhicules routiers peuvent facilement changer de direction grâce à leur deux degrés de liberté.

Pour les véhicules ferroviaires il est donc nécessaire de prévoir des **appareils de voie** afin de leur permettre de changer de voie. Ceux-ci peuvent être classés en deux groupes (**Fig. 5.1**) :

Groupe 1 branchement, traversées et traversées-jonctions; ils permettent aux trains de passer **sans discontinuité** d'une voie sur l'autre. Dans un branchement, les axes des voies se réunissent tandis que dans une traversée, ils se coupent.

Groupe 2 plaques, ponts ou secteurs tournants et chariots transbordeurs; ces appareils permettant de passer d'une voie sur une autre de façon **discontinue**.

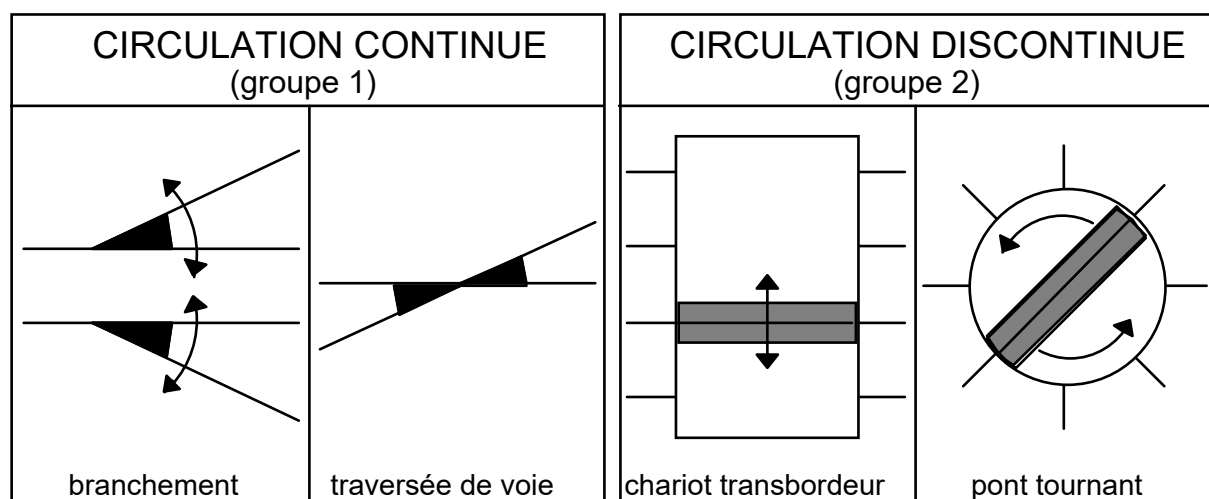


Figure 5.1 - Les différents appareils de voie.

Seuls les appareils du groupe 1 seront traités dans ce cours car ce sont les seuls à être utilisés pour des voies principales. Ils seront dès lors désignés par le terme général « appareils de voie ».

Du point de vue de l'exploitation, un appareil de voie doit :

- Etre franchissable, dans les *voies principales*, sans effets dynamiques ni chocs exagérés.

La vitesse de franchissement de l'appareil de voie devrait être, en voie directe, égale à celle de la voie courante. En voie déviée, la vitesse de franchissement devrait être celle qui est imposée par la dynamique des convois qui empruntent la déviation, dynamique elle-même imposée par la cinématique des circulations et par le programme d'exploitation.

Le confort de l'utilisateur doit également être assuré lors du franchissement de l'appareil de voie; les accélérations transversales et les chocs doivent être inférieurs aux valeurs admissibles.

- Permettre, dans les *voies secondaires ou de service*, de réaliser des liaisons et des têtes de faisceaux d'encombrement aussi réduit que possible pour obtenir des longueurs utiles maximales. Les tracés doivent être conçus de façon à limiter les effets dynamiques, à empêcher les enchevêtrements des tampons et à respecter, s'il y a lieu, les prescriptions relatives au dévers tolérable et à sa variation.

La conception générale et constructive d'un appareil de voie (AV), doit être telle qu'il puisse être placé en alignement, ou cintré de façon à s'inscrire dans des courbes circulaires (avec ou sans dévers) et dans des raccordements à courbure progressive, sans qu'il soit, en principe, nécessaire de recourir à des dispositions constructives particulières.

Les paragraphes suivants présentent donc en détail l'appareil « de base » : le branchement simple dans sa forme fondamentale.

5.2 Branchement simple (BS) dans sa forme fondamentale

Un branchement est dit dans sa **forme fondamentale** lorsqu'il est posé en alignement (la voie principale est rectiligne).

5.2.1 Composants d'un branchement

La **figure 5.2** représente les principaux éléments d'un branchement; leurs fonctions sont décrites ci-dessous.

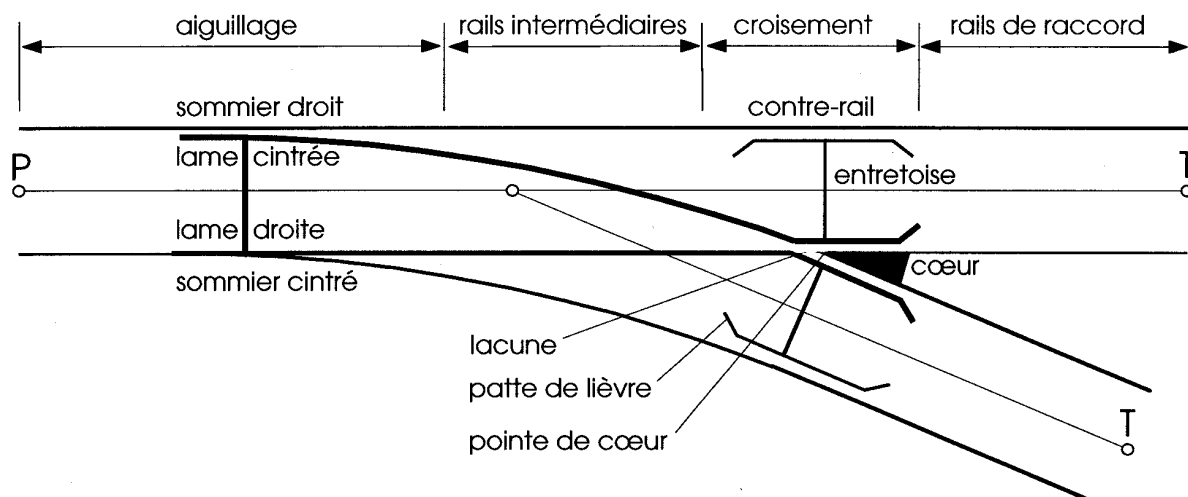


Figure 5.2 – Les éléments constitutifs d'un branchement.

a) L'aiguillage

– *Le sommier* ou « *contre-aiguille* » est le rail fixe contre lequel s'appuient les lames de l'aiguille.

– *Lame d'aiguille* ou plus simplement « *aiguille* » est la section de rail mobile qui permet de dédoubler les files de roulement et ainsi de modifier la course des véhicules.

Les anciens appareils de voie étaient munis de lames articulées (géométrie dite ancienne). Ils ne satisfont plus aux exigences de l'exploitation et occasionnent d'importants frais d'entretien. Depuis 1955, les CFF posent des AV à lames flexibles.

Remarques : un branchement simple possède deux sommiers contre lesquels s'appuient alternativement les deux aiguilles. Ces dernières sont reliées entre elles par des tringles d'écartement et un système de manœuvre / calage / contrôle / verrouillage qui les empêchent de bouger lors du passage d'un train.

b) Le croisement

Le croisement est l'ensemble constitué par un cœur avec deux contre-rails reliés entre eux par des entretoises de liaisons et deux rails extérieurs.

– *Le cœur* Partie centrale d'un AV, le cœur est constitué de plusieurs éléments qui peuvent être assemblés ou coulés en une seule pièce (cœur monobloc). Dans ce cas on utilise de l'acier austénitique au manganèse afin de le rendre résistant à l'usure.

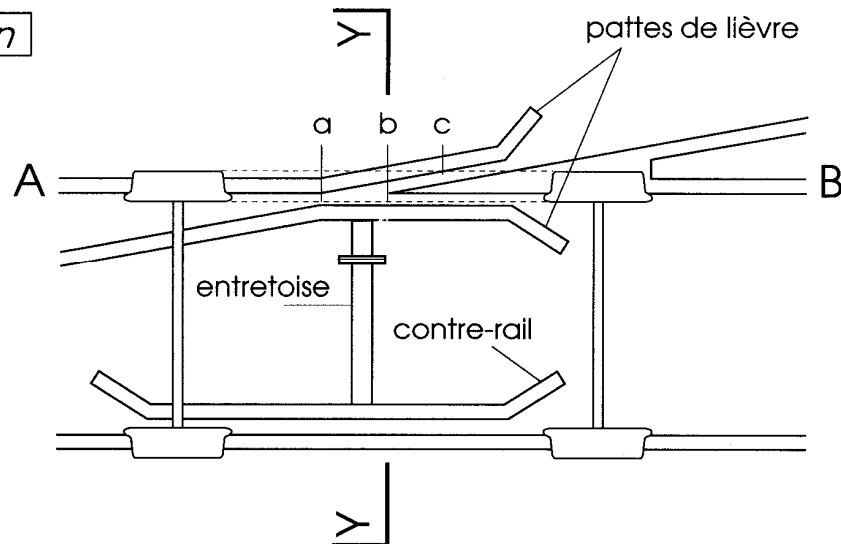
Le cœur est constitué d'une **pointe** et des **pattes de lièvre** qui assurent le soutien de la roue lors du passage de la **lacune** créée par les ornières de passage des boudins des roues (**Fig. 5.3**). Une roue roulant de A vers B est supportée :

de a à b par la patte de lièvre uniquement,
de b à c par la patte de lièvre et la pointe du cœur,
dès c par la pointe du cœur puis le rail.

Suite à la conicité de son bandage, la roue circulant de a à b roule sur un diamètre qui diminue. Elle tend donc à s'abaisser, ce qui exige qu'en b la pointe du cœur soit abaissée de 6 mm par rapport au plan de roulement.

Le type de cœur, droit ou cintré (§ 5.2.2), influence sensiblement la qualité de roulement sur la voie déviée ainsi que le prix de l'AV. C'est ainsi qu'on utilise en général des cœurs cintrés pour les voies principales et notamment lorsque l'AV doit être posé en courbe (§ 5.4.1) alors que les cœurs droits sont surtout utilisés dans les têtes de faisceaux où les vitesses de circulation sont relativement faibles.

Vue en plan



Coupe Y-Y

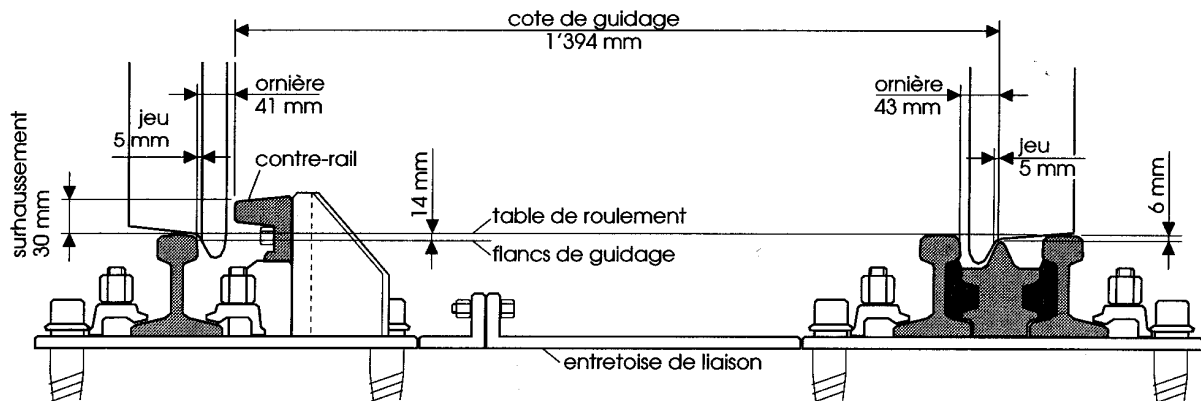


Figure 5.3 – Plan et coupe au droit du cœur d'un appareil de voie.

- *Le contre-rail* C'est un rail de 3 à 10 m de long qui est placé en face du cœur, légèrement rehaussé par rapport au plan de roulement. En assurant le guidage de la roue lors de son passage dans la lacune, il évite que l'autre roue ne percute la pointe du cœur et fasse ainsi dérailler le véhicule.
- *L'entretoise* Elle sert à maintenir une distance correcte nommée « cote de guidage » (**Fig. 5.3**) entre le contre-rail et la pointe du cœur.

5.2.2 Géométrie d'un branchement simple

La **figure 5.4** présente en plan et selon le schéma de piquetage les divers éléments permettant de définir la géométrie d'un branchement. Ce dernier est dit à **cœur cintré** si la courbe de la voie déviée traverse le croisement (cœur) et à **cœur droit** dans le cas contraire. Cette différence est indiquée par un triangle grisé dont les sommets correspondent au point mathématique, à l'extrémité de l'arc de cercle de la voie déviée et au cœur.

On a :

P *Pointe du branchement* c'est le point théorique de tangence des deux voies

T Talons du branchement
O Point mathématique
R Rayon de la voie déviée

α Angle du croisement;

w Longueur du branchement

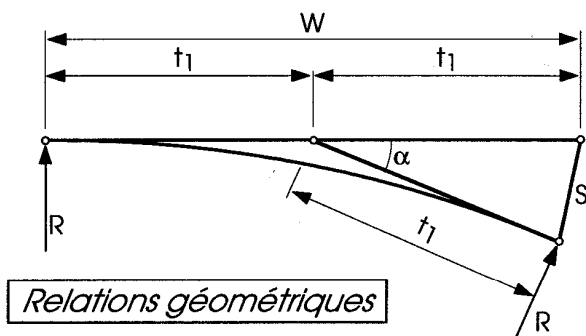
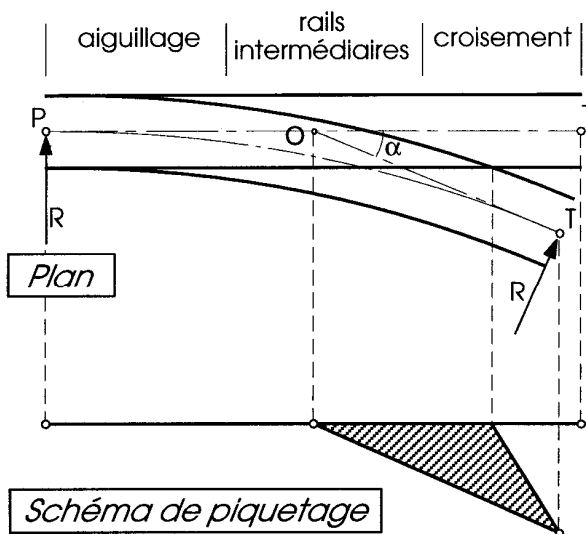
t_1 Longueur de la tangente

s

c'est le point d'intersection des axes des deux voies étant donné la géométrie interne des appareils de voie (place restreinte) et leur pose normale sans dévers, le tracé de la voie déviée est réalisé par des courbes circulaires sans courbe de raccordement.

il est défini par les axes des deux voies et est couramment désigné par sa tangente 1 : n

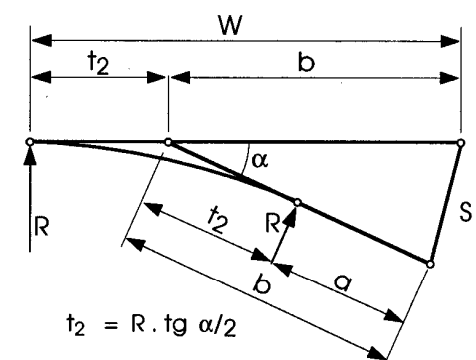
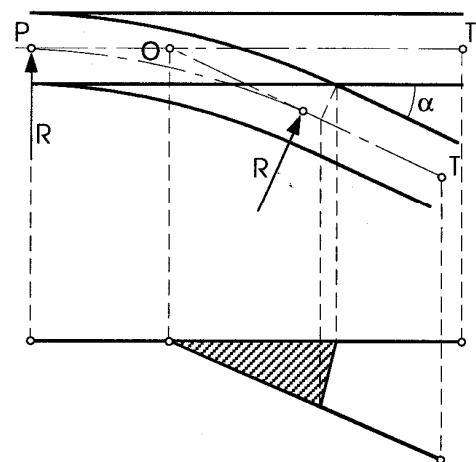
cette valeur détermine la position des talons des aiguilles; en effet, il est nécessaire que l'espace entre les rails soit suffisant afin de permettre les travaux de voie (soudure, boulonnage des attaches des traverses).



$$t_1 = R \cdot \tan \alpha/2$$

$$S = 2 \cdot t_1 \cdot \sin \alpha/2$$

$$W = 2 \cdot t_1$$



$$t_2 = R \cdot \tan \alpha/2$$

$$b = t_2 + a$$

$$S = 2 \cdot b \cdot \sin \alpha/2$$

$$W = t_2 + b$$

a) cœur cintré

b) cœur droit

Figure 5.4 – Géométrie des branchements simples (cœur cintré ou cœur droit).

La voie déviée peut se trouver à droite ou à gauche de la voie directe lorsqu'on parcourt le branchement depuis la pointe. L'appareil est alors désigné par branchement droite, respectivement gauche.

En faisant varier les principaux paramètres, il peut exister une multitude de branchements simples différents. Toutefois, afin de limiter le nombre de pièces, chaque

réseau définit une liste de branchements-types avec quelques rayons de courbure, 2 voire 3 angles de croisement pour chaque rayon dont un seul est compatible avec un cœur cintré.

Ainsi, avant d'élaborer un plan de voies, il est nécessaire de consulter cette liste. Pour les CFF, elle est contenue dans le règlement R 220.64 « Géométrie des appareils de voie à écartement normal » [9].

5.2.3 Vitesse admissible en déviation

Les relations fixant la géométrie de la voie courante (§ 3.2) sont également applicables à la géométrie des appareils de voie. Toutefois, des réductions des vitesses de franchissement sont opérées pour tenir compte de l'absence de courbes de raccordement, voire de dévers.

Les vitesses de franchissement des appareils de voie et leur géométrie seront donc définies en fonction de la dynamique des convois, compte tenu du confort des passagers (limites de l'accélération transversale non compensée et du choc consécutif au changement instantané de courbure), de l'usure du matériel, etc.

En Suisse, les CFF ont admis les valeurs limites suivantes pour l'accélération transversale non compensée et le choc Ψ pour définir la vitesse maximale de franchissement des appareils de voie en déviation :

$$a_{ncadm} = 0,8 \text{ m/s}^2$$

$$\Psi_{\max} = \frac{da_{nc}}{dt} = 1 \text{ m/s}^3$$

1^{ère} condition : accélération transversale non compensée

Soit la formule (4) du § 3.2.1 :

$$d = 11,8 \frac{V_R^2}{R} - 153 \cdot a_{nc}$$

En développant par rapport à V_R :

$$V_R = \sqrt{\frac{R}{11,8} (d + 153 \cdot a_{nc})}$$

Avec $a_{ncadm} = 0,8 \text{ m/s}^2$ et $d = 0$ (1)

$$\Rightarrow \boxed{V_R \leq 3,2 \cdot \sqrt{R}}$$

2^{ème} condition : choc

On peut montrer [6] que

$$\Psi = a_{nc} \cdot \frac{V_R}{3,6 \cdot E}$$

Avec $E = 18,9 \text{ m}$, l'empattement standard d'une voiture voyageur (VU I),

On a finalement : (2)

$$\Rightarrow \boxed{V_R \leq 9,5 \cdot \sqrt[3]{R}}$$

En utilisant ces deux formules, il est donc possible de déterminer la vitesse maximum de franchissement, en déviation, des appareils de voie posés dans leur forme fondamentale sans dévers. Le **tableau 5.5** donne cette vitesse pour tous les rayons de courbure des AV utilisés par les CFF.

Rayon [m]	V_R [km/h]	V_A [km/h]	a_{nc} [m/s ²]	Ψ [m/s ³]
185	40	40	0,67	0,39
300	55	50	0,78	0,63
500	65	60	0,65	0,62
900	95	90	0,77	1,08
1600	115	110	0,64	1,08
1600/2600 ⁸	125	120	0,75	0,85

Tableau 5.5 – Vitesse en déviation des branchements posés sans dévers dans leur forme fondamentale, c'est-à-dire posés en alignement.

5.3 Autres appareils de voie

5.3.1 Types d'appareils de voies

Outre le branchement simple (BS), le concepteur dispose de plusieurs types d'appareils de voies (**Fig. 5.6**) pour résoudre les problèmes liés à la réalisation de plan de voies des nœuds d'un réseau ferroviaire :

- le branchement symétrique (BSy)
- le branchement double (BD)
- la traversée de voie (TV)
- la traversée-jonction simple (TJS)
- la traversée-jonction double (TJD)

Les branchements symétriques (BSy) sont des branchements comportant deux voies déviées divergentes de même rayon (pour plus de détails, voir § 5.3.3).

Les branchements doubles (BD) sont constitués par deux branchements simples intercalés. Ils peuvent être **unilatéraux** lorsqu'ils permettent deux passages en déviation d'un des côtés de la voie directe, ou **bilatéraux** lorsqu'ils permettent une déviation de chaque côté de la voie directe. Ils sont utilisés uniquement lorsque la place disponible est limitée, par exemple pour réaliser des têtes de faisceaux de voies.

Les traversées de voie (TV) sont utilisées pour réaliser le croisement de deux voies.

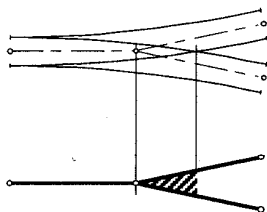
Les traversées-jonctions sont des combinaisons de branchements simples et traversées de voie sur un espace réduit. Il y a lieu de distinguer la traversée-jonction (TJS) simple, qui remplace deux branchements simples et une traversée de voie, et la traversée-jonction double (TJD), qui est la combinaison de quatre branchements simples et d'une traversée de voie.

⁸ AV à rayon de courbure variable formé de deux clothoïdes tronquées; R = 2600 m à la pointe et au talon et R = 1600 m au centre de la courbe.

Du point de vue constructif, les traversées-jonctions peuvent être à lames intérieures ou extérieures, c'est-à-dire que les lames des voies déviées peuvent être situées soit à l'intérieur du losange de la traversée, soit à l'extérieur suivant la dimension du rayon des voies en déviation.

Branchement symétrique

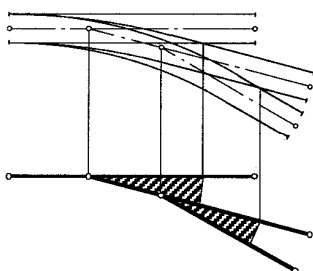
BSy



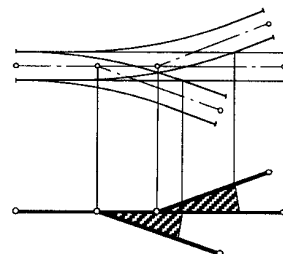
Branchement double

BD

Branchement double unilatéral

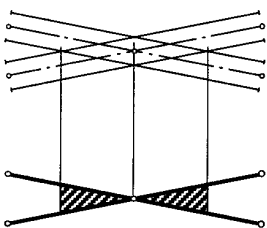


Branchement double bilatéral



Traversée de voie

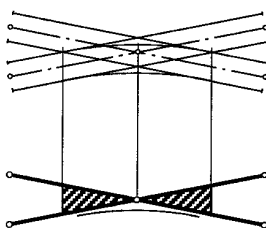
TV



Traversée-jonction

TJ

Traversée-jonction simple
TJS



Traversée-jonction double
TJD

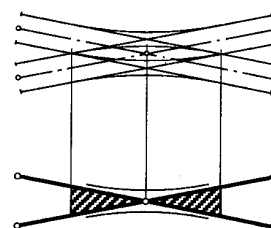


Figure 5.6 – Schémas de piquetage des BSy, BD, TV, TJS et TJD [9].

D'une manière générale, aux CFF, un appareil de voie est désigné de la manière suivante :

BS I - 185 - 1:6 - F/B, D

- type d'appareil TV) BS branchement simple (BSy, BD, TJS, TJD,
En allemand : EW, SW, DW, GD, EKW,
DKW
- profil de rail CFF utilisé CFF I (46 kg/m)
(CFF IV (54 kg/m), CFF VI (60 kg/m))
- rayon de la voie déviée en m 185 (300, 500, 900, 1600, etc.)
- angle de déviation 1:n (inclinaison) 1:6 (1:7, 1:8, 1:9, 1:12, 1:14, etc.)
- type de lame F flexible (Ar articulé)
En allemand : F, G
- travelage B bois (A acier, Be béton)
En allemand : H, S, Be

- sens de la déviation

D droite (G gauche), vu depuis la pointe
En allemand : R, L

5.3.2 Combinaisons d'appareils de voie

Des combinaisons d'appareils de voie permettent des relations entre voies parallèles. On distingue :

- **La diagonale** elle est constituée de deux branchement et permet selon le sens de circulation le passage d'une des voies sur l'autre (**Fig. 5.7**). La valeur minimale de l'entraxe e des voies est fonction du rayon de courbure de la voie déviée R et de l'angle du croisement α . Elle ne peut en aucun cas être inférieure à 3,6 m.

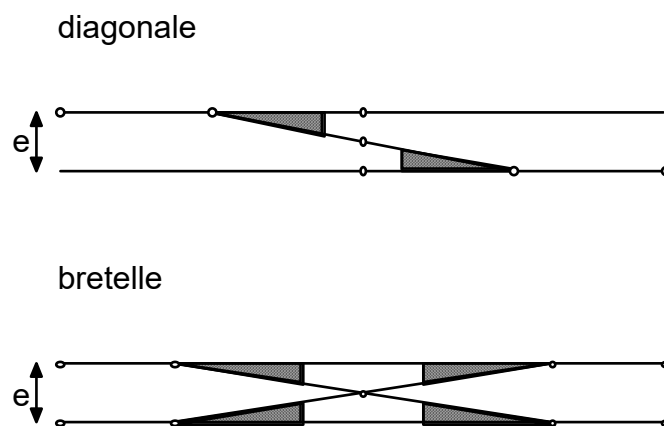


Figure 5.7 – Diagonale et bretelle.

- **La bretelle** afin de permettre le passage de n'importe quelle voie sur l'autre, une solution consiste à placer deux diagonales de sens opposés l'une derrière l'autre. La bretelle assure la même fonctionnalité tout en nécessitant moins de place. Par contre, elle impose un croisement supplémentaire aux circulations. Une bretelle est donc constituée de quatre BS et d'une TV ou plus précisément d'une « Partie centrale de bretelle » Pcb (**Fig. 5.7**). La valeur minimale de l'entraxe e des voies est de 4,5 m.

5.3.3 Branchements posés en courbe

a) Tracé

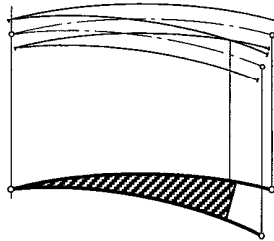
Lorsque le tracé l'exige, les branchements (ainsi que les traversées et traversées-jonctions dans des cas exceptionnels) peuvent être posés dans des courbes circulaires ou de raccordement. Ils sont alors dénommés « *en courbe* » ou « *enroulé* ».

En ce qui concerne les branchements, il sera alors (**Fig. 5.8**) :

- **convergent** si les centres des rayons des deux voies sont placés du même côté du branchement
- **divergent** si les centres sont placés de part et d'autre du branchement

- **symétrique (BSy)** si les deux rayons d'un branchement divergent ont la même valeur

Branchement en courbe (convergent)
(avec cœur dit droit)



Branchement en courbe (divergent)
(avec cœur dit cintré)

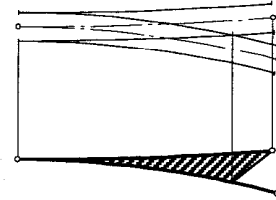


Figure 5.8 – Schémas de piquetage des branchements cintrés [9].

Les branchements en courbe sont construits à partir des éléments normalisés des appareils de la forme fondamentale. Le tracé à l'intérieur du branchement ne peut dès lors être choisi que dans une branche, la **branche principale**.

La géométrie de l'autre branche – **branche secondaire** – résulte de l'emploi des éléments constitutifs de la forme fondamentale. Sa courbure résulte de l'addition de la courbure de la forme fondamentale à celle de la branche principale, sachant que les rayons sont munis du signe + dans les courbes à droite et du signe – dans les courbes à gauche, soit par rapport au kilométrage croissant, soit à partir de la pointe de l'AV en direction du talon.

Avec : R_{Hi} Rayon en un point P_i de la branche principale

R_{Ni} Rayon en un point de la branche secondaire correspondant à P_i

R_G Rayon de déviation au point correspondant dans la forme fondamentale.

$$\text{On a : } \frac{1}{R_{Ni}} = \frac{1}{R_{Hi}} + \frac{1}{R_G} \quad \Rightarrow \quad \boxed{R_{Ni} = \frac{R_{Hi} \cdot R_G}{R_G + R_{Hi}}}$$

Si $R_N < R_H \Rightarrow$ la branche principale est la voie directe du branchement.

Si $R_N > R_H \Rightarrow$ la branche principale est la voie déviée du branchement.

D'autre part, les AV cintrés sont (en principe) posés dans le dévers normal exigé par la vitesse de la pleine voie. Toutefois, étant donné qu'ils ont une influence gênante sur le roulement des véhicules, il est nécessaire de rester en dessous des valeurs limites admises pour le tracé de la voie (Chap. 3). Les valeurs suivantes sont recommandées :

$$d_{\max} = 120 \text{ mm}$$

$$\Delta d_{\max} = 100 \text{ à } 110 \text{ mm}$$

De plus, il est nécessaire de contrôler dans le tracé de la voie déviée que les valeurs limites prescrites pour le dévers (insuffisance, excès voire faux dévers pour un appareil de voie divergent), l'accélération transversale non compensée, la vitesse ascensionnelle et le choc soient respectés en fonction de la vitesse désirée. En cas de dépassement des valeurs limites, il y a lieu de changer de type de branchement ou d'abaisser la vitesse de passage sur la voie déviée.

b) Profil en long et profil en travers

Le profil en long de la voie déviée d'un branchement posé en courbe et en dévers (et plus particulièrement pour les diagonales) doit être soigneusement étudié afin de respecter les normes concernant la géométrie de détail de la voie. En effet, les branchements sont posés sur des traverses longues communes à la voie principale et à la voie déviée qui sont ainsi dans un même plan.

Cette contrainte impose d'adapter le profil en travers d'un tronçon devant recevoir une diagonale. Dans le pire des cas, lorsque la distance entre les talons des branchements est faible et qu'ainsi les dernières traverses longues de chacun des AV sont proches voire intercalées, il est nécessaire d'amener les deux voies dans un même plan (**Fig. 5.9**).

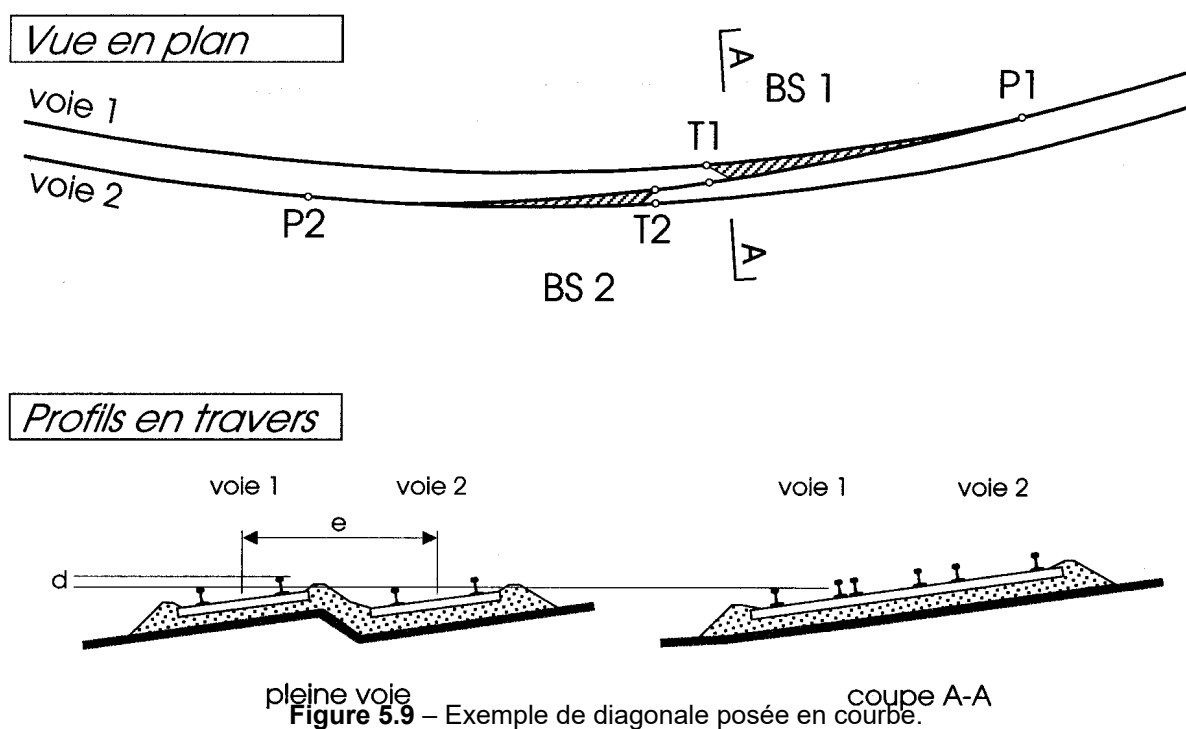
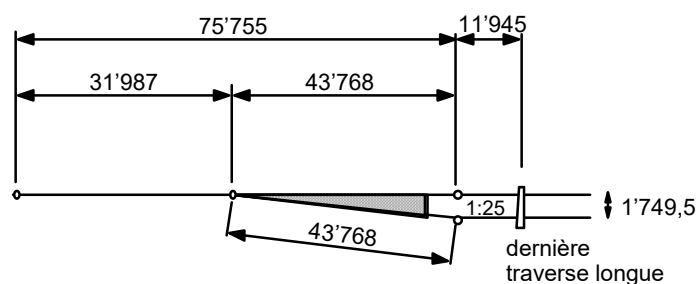


Figure 5.9 – Exemple de diagonale posée en courbe.

Il apparaît donc que la position de la dernière traverse longue est une information importante. Elle se trouve sur les schémas de piquetage (**Fig. 5.10**) et l'on peut constater qu'elle est toujours au-delà du talon de l'appareil de voie.



BS VI - 1600 - 1:25

Figure 5.10 – Position de la dernière traverse longue sur un schéma de piquetage [9].

5.4 Détails particuliers

5.4.1 Branchements avec cœur à pointe mobile

La largeur de l'ornière entre la pointe et les pattes de lièvre des cœurs courants est comprise entre 42 et 50 mm. Suivant la largeur de cette ornière et l'angle de l'appareil, la lacune peut varier d'environ 50 cm à plus d'un mètre. En fait, cette valeur est inversement proportionnelle à l'angle du croisement.

Si la longueur de la lacune devient trop importante, les pattes de lièvre ne suffisent plus pour porter les plus petites roues; dans les traversées, le guidage devient difficile voir impossible car les deux roues d'un essieu se trouvent simultanément en face des lacunes. La solution consiste à assurer la continuité des deux files de rails en utilisant un cœur à pointe mobile (**Fig. 5.11**) ou un cœur à pattes de lièvre mobiles. Ces parties mobiles doivent alors être traitées de la même manière que les lames en ce qui concerne la sécurité (manœuvre, calage, contrôle, verrouillage et chauffage en hiver).

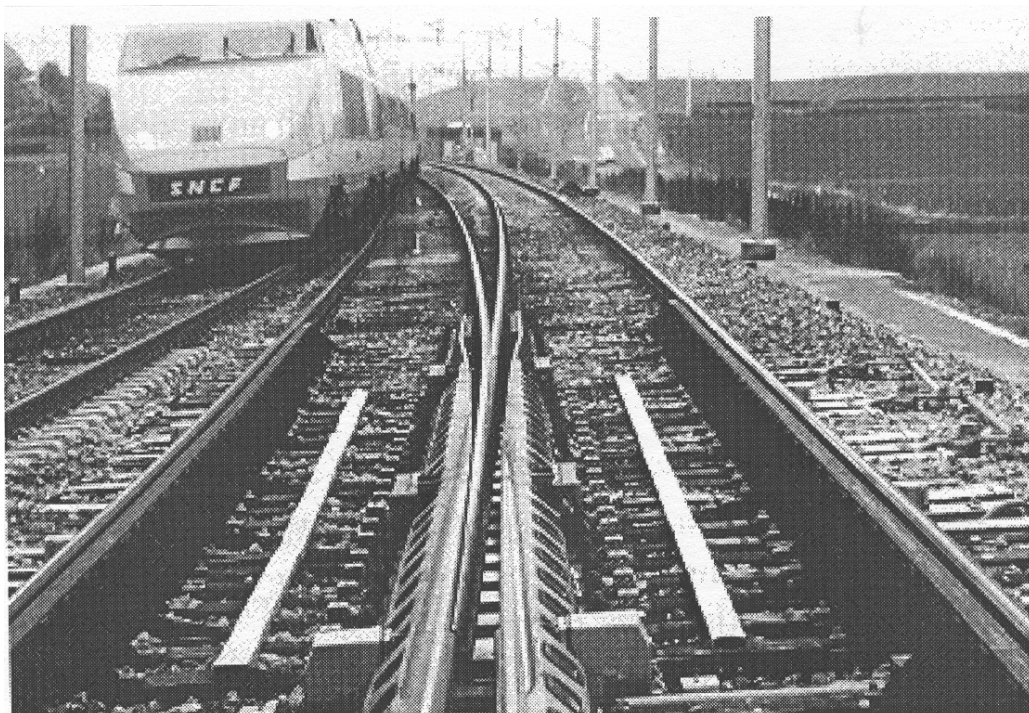


Figure 5.11 – Détail du cœur à pointe mobile d'un branchement utilisé à la SNCF [14].

A partir d'un rayon de 900 m (pour les CFF), les branchements sont conçus de cette manière, ainsi que les traversées de voie dont l'angle est plus petit que 1:9. Grâce à cette technique, il est possible de concevoir des appareils de voie permettant une vitesse de 200 km/h sur la voie déviée (angle de 1:42).

Partie C : Tracé général

6. LEGISLATION EN MATIERE DE TRACE FERROVIAIRE

Les infrastructures de transports, comme toutes les constructions, sont soumises à diverses autorisations. Les chemins de fer ne font pas exception et sont soumis à une législation particulière concernant l'élaboration des projets et leur autorisation de construire.

D'autre part, depuis le milieu des années huitante, la protection de l'environnement fait désormais partie intégrante de tout projet. Afin de limiter le nombre d'oppositions et d'éviter un allongement de la procédure d'approbation des plans, cette législation doit être prise en compte dès les études préliminaires. En effet, les fortes contraintes imposées par la législation et les procédures doivent impérativement et scrupuleusement être respectées pour que le projet puisse être pris en considération.

6.1 Procédures d'approbation des plans en Suisse

6.1.1 Bases légales

Avec l'évolution du contexte socio-économique, les procédures d'approbation des plans des projets ferroviaires ont dû et devront encore évoluer par rapport aux bases légales initiales de façon à accélérer ce processus sans toutefois restreindre les droits des citoyens.

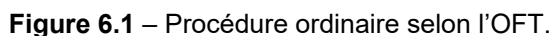
L'approbation des plans signifie que les prescriptions des différentes lois et ordonnances ainsi que leurs dispositions d'exécution sont respectées. En plus de cette fonction de **surveillance**, l'approbation des plans a valeur **d'autorisation de construire**.

Actuellement cette procédure repose sur les bases légales suivantes :

1. ***Loi sur les chemins de fer***, LCF (RS 742.101) du 20.12.1957.
2. ***Ordonnance sur les chemins de fer***, OCF (RS 742.141.1) du 23.11.1983.
3. ***Ordonnance sur la procédure d'approbation des plans pour les installations ferroviaires (OPAPIF)*** (RS 742.142.1) du 2.2.2000.
4. ***Arrêté fédéral relatif à la construction de la ligne ferroviaire suisse à travers les Alpes (Arrêté sur le transit alpin)*** (RS 742.104) du 4.10.1991.
5. ***Loi sur les Chemins de fer fédéraux (LCFF)*** (RS 742.31) du 20.3.1998.

La procédure d'approbation des plans s'applique aux constructions et installations servant exclusivement ou principalement à la construction et à l'exploitation ferroviaires, c'est-à-dire au déplacement des convois au sens technique, aux opérations préparatoires ou terminales.

La législation définit une procédure unique d'approbation des plans, avec simplification possible.



La **procédure ordinaire** d'approbation des plans (**Fig. 6.1**) s'applique à tous les projets de constructions ferroviaires, et prévoit la consultation des cantons et communes avec publication et mise à l'enquête publique.

La **procédure simplifiée** s'applique :

- a) aux projets qui affectent un espace limité et ne concernent qu'un ensemble restreint et bien défini de personnes;
- b) aux installations ferroviaires dont la modification ou la réaffectation n'altère pas sensiblement l'aspect extérieur du site, n'affecte pas les intérêts dignes de protection de tiers et n'a que des effets minimes sur l'aménagement du territoire et sur l'environnement;
- c) aux installations ferroviaires qui seront démontées après trois ans au plus.

La procédure simplifiée s'applique aux plans de détail élaborés sur la base d'un projet déjà approuvé.

Au surplus, la procédure ordinaire est applicable. En cas de doute, cette dernière est appliquée.

Notons enfin que dans certains cas aucune procédure d'approbation des plans n'est nécessaire, entre autres pour :

- des travaux de construction d'importance mineure ou secondaire (signaux, lampes...),
- des constructions ou installations provisoires intervenant pendant l'exécution de travaux, si elle ne nécessitent aucune autorisation tombant sous le coup de la législation (protection des eaux, protection contre le bruit...).

6.1.3 Procédures de recours

Un droit de recours existe contre toute décision prise en vertu du droit fédéral. L'approbation des plans selon la LCF (Loi sur les chemin de fer) ne fait pas exception et peut faire l'objet d'un recours administratif. L'autorité supérieure compétente (**Tab. 6.2**) doit alors statuer sur la légalité et l'opportunité de la décision prise.

En droit fédéral, le délai de recours est de 30 jours. Si aucun recours n'a été déposé à la fin de cette période, l'approbation des plans devient effective et les travaux de construction peuvent commencer. Dans le cas contraire, un recours a généralement un effet suspensif.

	Procédure ordinaire d'approbation des plans	
	cas général	grands projets
Autorité de décision	OFT	DETEC
Autorité de recours – de 1re instance	DETEC	Tribunal Fédéral
– de 2e instance	Tribunal Fédéral	

Tableau 6.2 – Autorités de recours (*DETEC : Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication*).

6.2 Législation suisse en matière de protection de l'environnement

6.2.1 Généralités

Les effets négatifs des activités de transport sur l'environnement sont essentiellement liés à la construction et à l'exploitation du matériel roulant et des infrastructures, tels que les accidents, la congestion, la pollution atmosphérique, le bruit, la consommation d'énergie et de terrains ainsi que d'autres ressources naturelles.

La nature et l'importance des impacts des activités de transport sur l'environnement dépendent de plusieurs facteurs :

- de la construction de l'infrastructure de transport et des véhicules, ainsi que de leur réparation et de leur entretien régulier;
- de l'exploitation des modes de transport (c'est-à-dire de l'intensité d'utilisation de l'infrastructure et des véhicules);
- du mode de transport concerné (aérien, maritime, fluvial, ferroviaire, routier, pipeline, ...);
- des technologies utilisées.

Les principales conséquences des activités de transport sur l'environnement peuvent se résumer et se classer comme indiqué dans le **tableau 6.3**.

6.2.2 Étude d'impact sur l'environnement (EIE)

Législation générale

En Suisse, pas moins de sept lois principales sont destinées à assurer la protection de l'environnement (par ordre chronologique) :

- loi sur les forêts du 4 octobre 1991 (RS 921.0),
- loi sur la protection de la nature et du paysage du 1er juillet 1966 (RS 451),
- loi sur la protection des eaux du 24 janvier 1991 (RS 814.20),
- loi sur la pêche du 21 juin 1991 (RS 923.0),
- loi sur la protection de l'environnement (LPE) du 7 octobre 1983 (RS 814.01),
- loi sur les chemins pour piétons et les chemins de randonnées pédestres du 4 octobre 1985 (RS 704),
- loi sur la chasse du 20 juin 1986 (RS 922.0).

En outre, un certain nombre d'autres dispositions relatives à la protection de l'environnement se trouvent dans d'autres législations fédérales (aménagement du territoire, circulation routière, chemins de fer...).

LPE

La **loi fédérale sur la protection de l'environnement [LPE]** est la première loi fédérale qui comporte une réglementation unifiée et complète en matière de protection contre les **immissions**. Elle vise à garantir la protection contre les

atteintes nuisibles ou incommodantes telles que pollutions atmosphériques, bruit, vibrations et rayons ionisants.

Principaux modes de transport	Transports maritimes et navigation intérieure	Transports ferroviaires	Transports routiers	Transports aériens
Air			Pollution atmosphérique (CO, HC, NO _x , particules et additifs pour carburants comme le plomb). Pollution globale (CO ₂ , CFC).	Pollution atmosphérique.
Ressources en eau	Modification des systèmes hydrologiques lors de la construction des ports et lors du creusement et du dragage de canaux.		Pollution des eaux de surface et des eaux souterraines par les eaux de ruissellement. Modification des systèmes hydrologiques lors de la construction de routes.	Modification des niveaux phréatiques, du tracé des cours d'eau et des écoulements à la surface des terres agricoles lors de la construction des aéroports.
Ressource sol	Utilisation de terrains pour les infrastructures. Abandon des installations portuaires et canaux désaffectés.	Utilisation de terrains pour les voies et les gares. Abandon des installations désaffectées.	Utilisation de terrains pour les infrastructures. Extraction des matériaux de construction des routes.	Utilisation de terrains pour les infrastructures. Abandon des installations désaffectées.
Déchets solides	Navires et bâtiments retirés du service.	Voies ferrées, équipement et matériel roulant abandonnés.	Dépôts abandonnés et matériaux de démolition de chantiers routiers. Véhicules routiers retirés du service. Huiles usées.	Appareils retirés du service.
Bruit		Bruit et vibrations autour des gares et le long des voies ferrées.	Bruit et vibrations produits par les automobiles, les motocyclettes et les poids lourds dans les villes et le long des routes.	Bruit autour des aéroports.
Accidents risques et effets	Transport en vrac de combustibles et de substances dangereuses.	Déraillement ou collisions de trains de marchandises transportant des substances dangereuses.	Décès et dommages corporels ou matériels dus aux accidents de la route. Risques liés au transport de substances dangereuses. Risques d'apparition de défauts de structure dans les équipements routiers anciens ou usés.	
Autres effets		Effets de coupure et dégradation de quartiers, de terres agricoles et d'habitats de la flore et de la faune sauvages.	Effets de coupure et dégradation de quartiers, de terres agricoles et d'habitats, de la flore et de la faune sauvages. Congestion.	

Tableau 6.3 – Effets sélectionnés des principaux modes de transport sur l’environnement (OCDE) [2].

Cette loi est en outre complétée par deux ordonnances donnant des prescriptions plus détaillées en matière de protection de l'air et de lutte contre le bruit : l'OPair (Ordonnance sur la protection de l'air du 16 décembre 1985) et l'OPB (Ordonnance sur la protection contre le bruit du 15 décembre 1986).

Pour atteindre ses objectifs, la LPE repose sur une **stratégie en deux étapes**. La **première** est placée sous le signe de la prévention. Indépendamment des nuisances existantes, il s'agit de réduire autant que possible les atteintes en adoptant des mesures à la source (limitation des **émissions**). Celles-ci doivent rester dans les limites de la technique et de l'exploitation et demeurer économiquement supportables.

La **deuxième étape** doit permettre d'empêcher les atteintes dans tous les cas où elles peuvent se révéler nuisibles ou incommodantes. A cet effet, la loi prévoit des **valeurs limites d'immission**. Si ces dernières sont atteintes, les émissions doivent être plus sévèrement limitées.

EIE

L'article 9 de la LPE introduit la notion **d'étude d'impact sur l'environnement (EIE)**. Cet article a été concrétisé par l'ordonnance du 19 octobre 1988 relative à l'étude d'impact sur l'environnement (OEIE).

L'EIE doit permettre de garantir que les intérêts de la protection de l'environnement sont pris en considération pour chaque ouvrage pouvant affecter sensiblement l'environnement. C'est donc un des éléments de la procédure qui permet à l'autorité compétente de se prononcer en toute connaissance de cause sur un projet et le cas échéant de permettre l'approbation des plans ou d'octroyer une concession d'exploitation. Elle ne constitue pas une procédure distincte, mais s'intègre dans la partie de la procédure appelée « procédure décisive ».

L'EIE est un instrument de prévention permettant de déterminer si un projet répond aux prescriptions fédérales sur la protection de l'environnement, c'est-à-dire à la LPE ainsi qu'aux dispositions concernant la protection de la nature et du paysage, des eaux ainsi que de la sauvegarde des forêts, de la chasse et de la pêche.

Les différentes installations soumises à l'EIE sont précisées dans une annexe de l'OEIE. Les infrastructures ferroviaires et routières en font partie. Pour ces ouvrages, l'EIE peut influencer de manière déterminante la planification. Ainsi elle se déroule en plusieurs étapes, permettant d'augmenter le degré de précision des études environnementales au fur et à mesure de l'avancement du projet.

On notera que la procédure peut sensiblement varier entre les 13 types d'installations de transport considérés. Pour les chemins de fer, les différentes procédures sont données dans le **tableau 6.4**.

Type d'installation	Procédure décisive
Nouvelles lignes de chemin de fer (art. 4, LF du 20 mars 1998 sur les Chemins de fer fédéraux et art. 5 et 6, LF du 20 déc. 1957 sur les chemins de fer)	EIE par étapes 1ère étape : a. CFF Le Conseil fédéral propose à l'Assemblée fédérale de décider la construction de nouvelles lignes ferroviaires (art. 4 al. 2, LF du 20 mars 1998 sur les Chemins de fer fédéraux; RS 742.31) b. Entreprises de chemins de fer concessionnaires Le Conseil fédéral décide d'accorder une concession (art. 6, LF du 20 déc. 1957 sur les chemins de fer; RS 742.101) 2e étape : Approbation des plans par l'autorité d'approbation* (art. 18, al. 1, LF du 20 déc. 1957 sur les chemins de fer; RS 742.101)
Autres installations destinées exclusivement ou essentiellement au trafic ferroviaire (y compris extension de lignes existantes) – lorsque le devis excède 40 millions de francs (sauf installations de sécurité, ou – lorsqu'elles sont assimilables à l'un des types d'installation mentionnés dans la présente annexe	Approbation des plans par l'autorité d'approbation (art. 18, al. 1, LF du 20 déc. 1957 sur les chemins de fer; RS 742.101)
Voies de raccordement (art. 2, LF du 5 oct. 1990 sur les voies de raccordement ferroviaire; RS 742.141.5) lorsque le devis excède 40 millions de francs (sauf installations de sécurité)	Procédure d'approbation du plan d'affectation ou d'autorisation de construire (art. 5 et 19, LF du 5 oct. 1990 sur les voies de raccordement ferroviaire; RS 742.141.5, art. 5, 8 et 9 de l'O du 26 fév. 1992 sur les voies de raccordement; RS 742.141.51)

* En ce qui concerne les nouvelles lignes de chemin de fer soumises à l'AF du 4 oct. 1991 relatif au transit alpin (RS 742.104), les procédures décisives sont régies par les dispositions de cet arrêté.

Tableau 6.4 – Étude d'impact sur l'environnement [EIE] dans le domaine ferroviaire [10].

Droit de recours

En matière d'environnement, la LPE accorde à certaines organisations nationales de protection de l'environnement (désignées par le Conseil Fédéral) le droit de recourir. Cette clause est valable dans la mesure où le recours administratif est admis contre des décisions concernant des installations soumises à EIE.

Ces organisations sont notamment :

- la Ligue suisse pour la protection de la nature (Pro Natura),
- la Fondation suisse pour la protection et l'aménagement du paysage,
- Heimatschutz Suisse,

- L'Association suisse pour le plan d'aménagement national,
- Le WWF Suisse.

6.2.3 Bruit

La principale nuisance causée par le transport ferroviaire est le bruit. La gêne occasionnée est en effet de plus en plus perçue, notamment dans les zones d'habitation à forte densité, ainsi que pendant la nuit.

La problématique posée par le bruit des chemins de fer n'est toutefois pas ressentie de la même manière dans chaque pays. En effet, la densité des réseaux de voies ferrées, la géographie ou la densité des habitations sont trois données essentielles qui diffèrent d'un pays à l'autre. En Suisse, le pourcentage de la population exposée au bruit du transport ferroviaire est relativement élevé (**Tab. 6.5**).

Pays	Année	Niveau sonore extérieur en Leq (dB(A)) ^b										Unité : pourcentage ^{a, f}				
		Bruit des transports routiers					Bruit des avions					Bruit des chemins de fer				
		>55	>60	>65	>70	>75	>55	>60	>65	>70	>75	>55	>60	>65	>70	>75
Australie	-	46,0	..	8,0	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
Japon ^c	1980	80,0	58,0	31,0	10,0	1,0	3,0	1,0	0,5	0,2	0,1	..	..	..	..	..
France ^d	1985	54,4	33,1	16,6	5,5	0,6	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
Allemagne	1985	45,0	26,7	12,5	5,1	1,1	..	..	1,0	..	0,2	18,0	8,4	2,9	0,8	0,1
Pays-Bas	1987	54,0	20,0	4,1	1,3	—	36,0	15,0	0,4	0,1	—	6,0	1,5	0,6	0,3	0,1
Suisse ^e	1985	53,7	26,3	11,7	4,1	0,7	2,0	1,0	0,6	0,7	—	23,4	13,0	5,9	2,5	0,9

a) Les pourcentages sont cumulatifs et non additifs (par exemple, le pourcentage de personnes exposées à plus de 55 dB(A) inclut le pourcentage de personnes exposées à plus de 60 dB(A)).

b) L_{eq} de jour (de 6 à 22 heures) mesuré devant les façades les plus exposées des bâtiments.

c) Estimation de l'OCDE.

d) L_{eq} (de 8 à 20 heures); zones urbaines (> 5000 hab); les données concernent toutes les façades.

e) Avions : chiffres de 1980.

f) .. non disponible,

— nul ou négligeable.

Tableau 6.5 – Pourcentages de la population nationale exposée aux bruits des transports [12].

L'évolution de ces niveaux de bruit et des populations concernées sont très difficiles à prévoir. Toutefois, les programmes actuels d'investissement pour de nouvelles lignes (entre autres à grande vitesse) devrait contribuer à l'augmentation des problèmes liés au bruit des transports ferroviaires. D'autre part, le financement de l'assainissement des installations existantes n'est pas encore réglé et les mesures nécessaires – parois antibruit et adaptation des véhicules notamment – exigeront des dépenses très importantes (2,3 Mrd CHF⁹⁸).

Réglementation

Aux termes de la LPE, le bruit est d'abord limité sous l'angle des **émissions**, c'est-à-dire dans les installations mêmes. Pour y parvenir, il est possible :

- de réduire les émissions à la source en améliorant la conception de la voie et du contact rail-roue, en utilisant des véhicules munis de freins à disque, en limitant l'exploitation à certaines heures, ...;
- d'agir au niveau du tracé (en plan et/ou du profil en long) en contournant les zones à protéger ou en prévoyant des tranchées, galeries et tunnels mais ces dernières solutions engendrent des coûts qui croissent rapidement (**Fig. 6.6**, voir page suivante);
- d'empêcher la propagation du bruit par des constructions telles que parois ou digues antibruit, talus à parois cellulaires, plantations, voire des éléments de bâtiments formant un écran (**Fig. 6.7**).

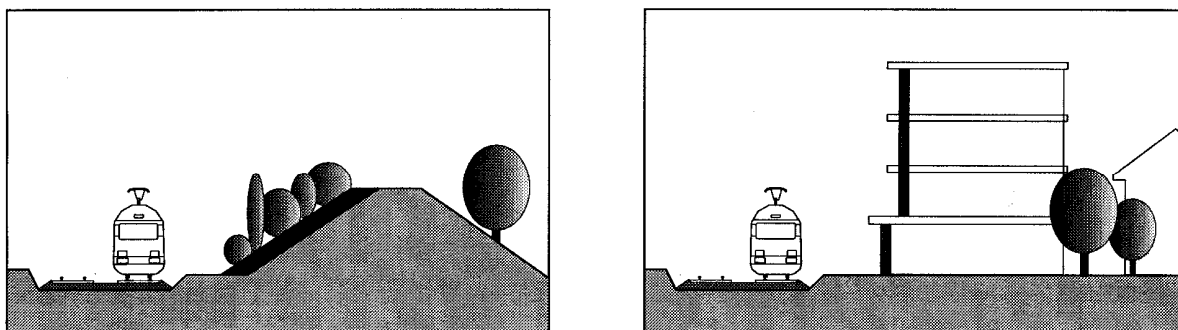


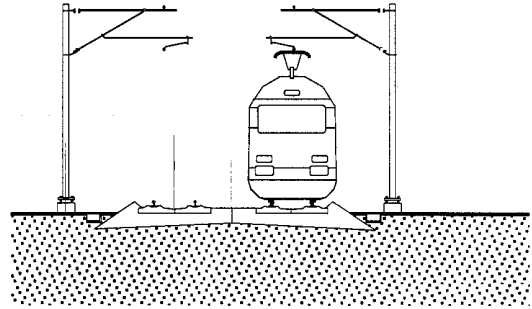
Figure 6.7 – Digue antibruit et éléments de construction formant écran.

Lorsque les limites d'émissions ne suffisent pas à maintenir les **immissions** en-dessous des valeurs limites, des mesures compensatoires sont nécessaires. Celles-ci peuvent consister à isoler les bâtiments contenant des locaux sensibles au bruit (bureaux, habitations). Dans la pratique l'autorité d'exécution (OFEFP) évalue, au cours des procédures d'autorisation ou d'approbation des plans, l'importance de l'exposition prévisible au bruit, en tenant compte des mesures déjà prévues pour limiter les émissions. En cas de dépassement des valeurs limites d'immission, elle ordonne des mesures de protection.

La prévision des immissions est en général du ressort du maître de l'ouvrage. Ces valeurs doivent être comparées aux valeurs limites d'exposition, qui dépendent du degré de sensibilité de la zone concernée. Ces degrés de sensibilité sont définis par le plan d'affectation ou sont déterminés de cas en cas en se fondant sur les critères établis par l'art. 43 de l'OPB (**Fig. 6.8**).

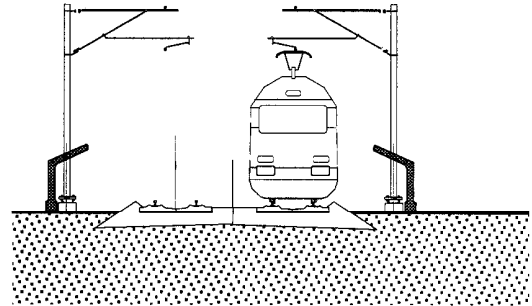
Aucune mesure anti-bruit

hypothèse 1
aucune mesure anti-bruit
n'est nécessaire
(les zones limitrophes ne sont
pas sensibles au bruit)
coûts: 100 %



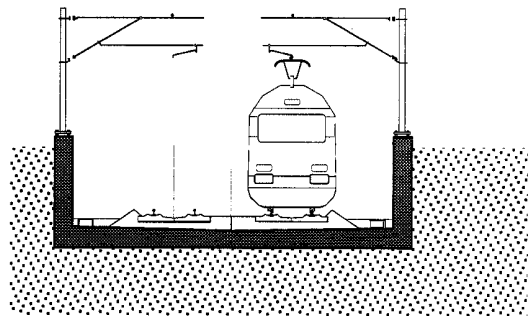
Parois anti-bruit

hypothèse 2
les valeurs de planification peuvent
être observées avec des parois
anti-bruit de 2,50 m de hauteur.
coûts: 120 à 130 %



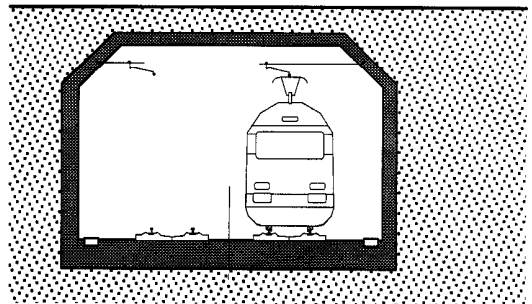
Tranchée

hypothèse 3
les valeurs de planification peuvent
être observées avec des parois anti-
bruit de 2,50 m de hauteur,
le tracé en tranchée est souhaité.
coûts: 150 à 200 %



Tunnel en caisson

hypothèse 4
couverture,
le tunnel en caisson est nécessaire
coûts: 300 à 800 %



source: **Figure 6.6** – Lignes ferroviaires nécessitant une protection accrue contre le bruit [12].

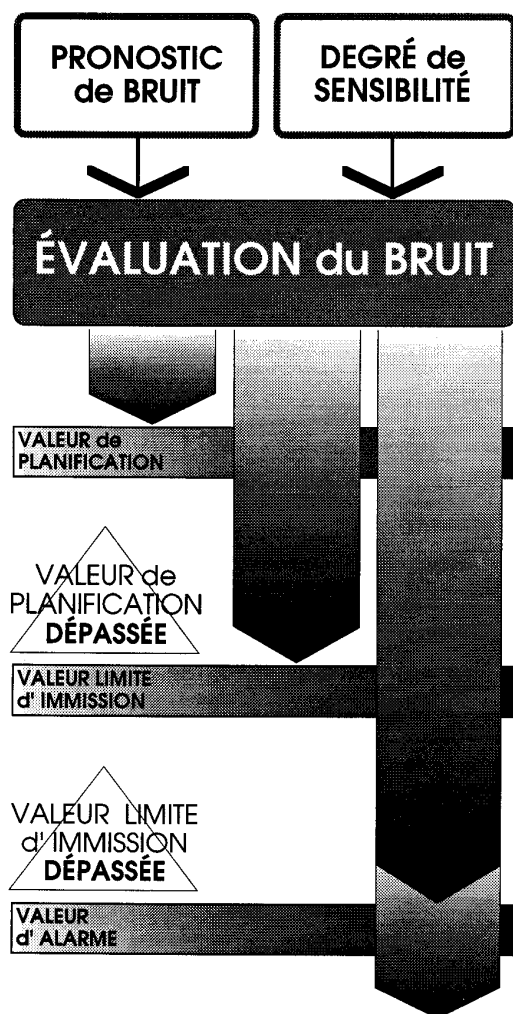


Figure 6.8 – Principes de l'évaluation du bruit et degrés de sensibilité.

art. 43, 1er al., OPB

Dans les zones d'affectation selon l'article 14 ss de la loi fédérale du 22 juin 1979 sur l'aménagement du territoire, les degrés de sensibilité suivants sont à appliquer :

- a. Le degré de **sensibilité I** dans les zones qui requièrent une protection accrue contre le bruit, notamment dans les zones de détente;
- b. Le degré de **sensibilité II** dans les zones où aucune entreprise gênante n'est autorisée, notamment dans les zones d'habitation ainsi que celles réservées à des constructions et installations publiques;
- c. Le degré de **sensibilité III** dans les zones où sont admises des entreprises moyennement gênantes, notamment dans les zones d'habitation et artisanales (zones mixtes) ainsi que dans les zones agricoles;
- d. Le degré de **sensibilité IV** dans les zones où sont admises des entreprises fortement gênantes, notamment dans les zones industrielles.

Pour toutes nouvelles installations ou lors de modifications d'installations construites après l'entrée en vigueur de l'OPB, les valeurs de planification (**Tab. 6.9**) doivent être respectées alors que pour des modifications notables d'installations construites avant, des valeurs limites d'immission un peu moins sévères sont appliquées.

Degré de sensibilité (art. 43 OPB)	Valeur de planification Lr en dB(A)		Valeur limite d'immission Lr en dB(A)		Valeur d'alarme Lr en dB(A)	
	Jour	Nuit	Jour	Nuit	Jour	Nuit
I	50	40	55	45	65	60
II	55	45	60	50	70	65
III	60	50	65	55	70	65
IV	65	55	70	60	75	70

Tableau 6.9 – Valeurs limites d'immission (OFEFP).

Dérogations

En vertu de l'article 7 de l'OPB consacré aux nouvelles installations, l'autorité d'exécution peut accorder des allègements sur les valeurs d'émissions si l'installation présente un intérêt public prépondérant et que le respect des valeurs de planification constitue une charge disproportionnée pour le projet. Les valeurs limites d'immissions ne doivent cependant pas être dépassées.

D'autre part, l'article 10 prévoit des allègements pour les installations publiques ou concessionnaires lorsque les valeurs limites d'immission ne peuvent pas être respectées partout. La construction de telles installations peut en effet présenter un intérêt tel que le récepteur soit obligé d'accepter, exceptionnellement, un niveau d'immission plus élevé, pour autant que les personnes séjournant dans le bâtiment concerné bénéficient d'une protection contre le bruit suffisante.

Finalement, la problématique du bruit ne doit pas être traitée à la légère car c'est un sujet délicat. Elle place les planificateurs ferroviaires devant un dilemme car la question du bruit est un des critères déterminant la qualité d'un projet aux yeux des tiers et qu'elle influe fortement sur la conception et les coûts d'investissements des projets (voir fig. 6.6).

6.2.4 Vibrations

La circulation des trains sur une voie ferrée provoque également l'émission de **vibrations** transmises par le sol à des distances relativement importantes. Une directive devrait apporter ces prochaines années les critères d'évaluation qui manquent encore dans le droit suisse.

L'origine de ces vibrations se situe essentiellement dans la succession des charges roulantes, des phénomènes de glissement roue/rail et des imperfections géométriques de la roue et du rail.

On peut les classer en trois bandes de fréquences :

- **de 0 à 15 Hz** : essentiellement dues aux masses suspendues et semi-suspendues des véhicules (caisse et masse du châssis de bogie posées sur des ressorts primaires); elles sont transmises par le sol avec un amortissement très variable suivant la nature du sol et de la valeur de la fréquence;

- **de 15 à 150 Hz** : ces vibrations résultent des oscillations des masses non suspendues (essieux); elles sont affaiblies par le sol de façon notable mais peuvent être gênantes si elles génèrent des vibrations de structures perceptibles (murs, plafonds, dalles); le seuil de danger n'étant jamais atteint même pour des bâtiments très proche de la voie;
- **supérieure à 150 Hz** : sont essentiellement dues aux phénomènes de glissement roue/rail; elles sont très vite amorties par le sol mais, par contre, produisent (par l'intermédiaire du rail et de la roue comme surface radiante) ce qu'on appelle le bruit de roulement car elles tombent assez rapidement dans le domaine audible; l'usure ondulatoire est à cet égard particulièrement redoutable puisqu'elle augmente les vibrations du rail et de la roue dans le domaine audible, d'autant plus qu'avec la vitesse, la fréquence d'excitation rejoint les fréquences propres du rail (1000-2500 Hz).

7. DEMARCHE DES ETUDES DE TRACE

7.1 Cadre des études de tracé

Les études de tracé doivent s'inscrire dans le processus plus général (et plus vaste) d'étude, de réalisation et d'exploitation d'un système de transport⁹. Elles résultent donc d'une **étude de planification générale**, c'est-à-dire d'une analyse de la demande de transport, du contenu socio-économique et du système des transports de la région d'étude (diagnostic).

Si le concept de solution le plus prometteur consiste (par exemple) à modifier ou à compléter le réseau ferroviaire, ce choix a été effectué sur la base d'une conception générale de l'offre voyageurs et/ou marchandises pour les trafics longue distance, de transit et de proximité, ainsi qu'à partir d'un bilan global et comparatif technique, économique, des effets sur l'environnement, d'une possible réalisation par étapes et des disponibilités financières.

7.2 Étapes des études de tracé

Plusieurs étapes sont nécessaires afin de définir le tracé d'un projet ferroviaire qui sera mis à l'enquête. Au fur et à mesure que la solution définitive se profile, les études sont plus fines et plus précises. Le contenu exact des étapes peut varier en fonction de l'ampleur et de la complexité du projet, mais d'une manière générale, il est d'usage de distinguer trois étapes en ce qui concerne le travail de l'ingénieur-projeteur :

- 1) l'étude préliminaire
- 2) l'étude d'avant-projet et projet d'ensemble
- 3) l'étude du projet d'exécution (non traitée).

Ces étapes de l'étude ainsi que le type de résultats obtenus sont mis en évidence dans la **figure 7.1** par rapport à l'ensemble de la démarche générale.

⁹ Cours « Systèmes de transports I », doc. ITEP 401/7.

Ainsi, avant de débiter une étude de tracé, il est nécessaire de définir, sur la base de l'étude de planification générale, les **objectifs détaillés** et les **critères d'évaluation** associés (**Annexe 5**). Ces derniers doivent permettre de guider les études en matière de technique des transports, d'économie du projet et de son intégration dans l'aménagement du territoire et l'environnement.

Ainsi, par exemple, en ce qui concerne le système ferroviaire retenu, il est nécessaire de préciser :

- la localisation des extrémités de la liaison, des gares, stations et centres d'échanges à desservir;
- les fonctions de cette liaison et l'offre de transport prévue (structure d'horaire);
- les temps de parcours à réaliser par les convois et les vitesses que devrait permettre le tracé;
- les caractéristiques techniques retenues pour les convois, les gabarits ainsi que les éléments du tracé en plan et en profil en long (déclivités max., rayons min., ..., cf. chapitres 2 à 5).

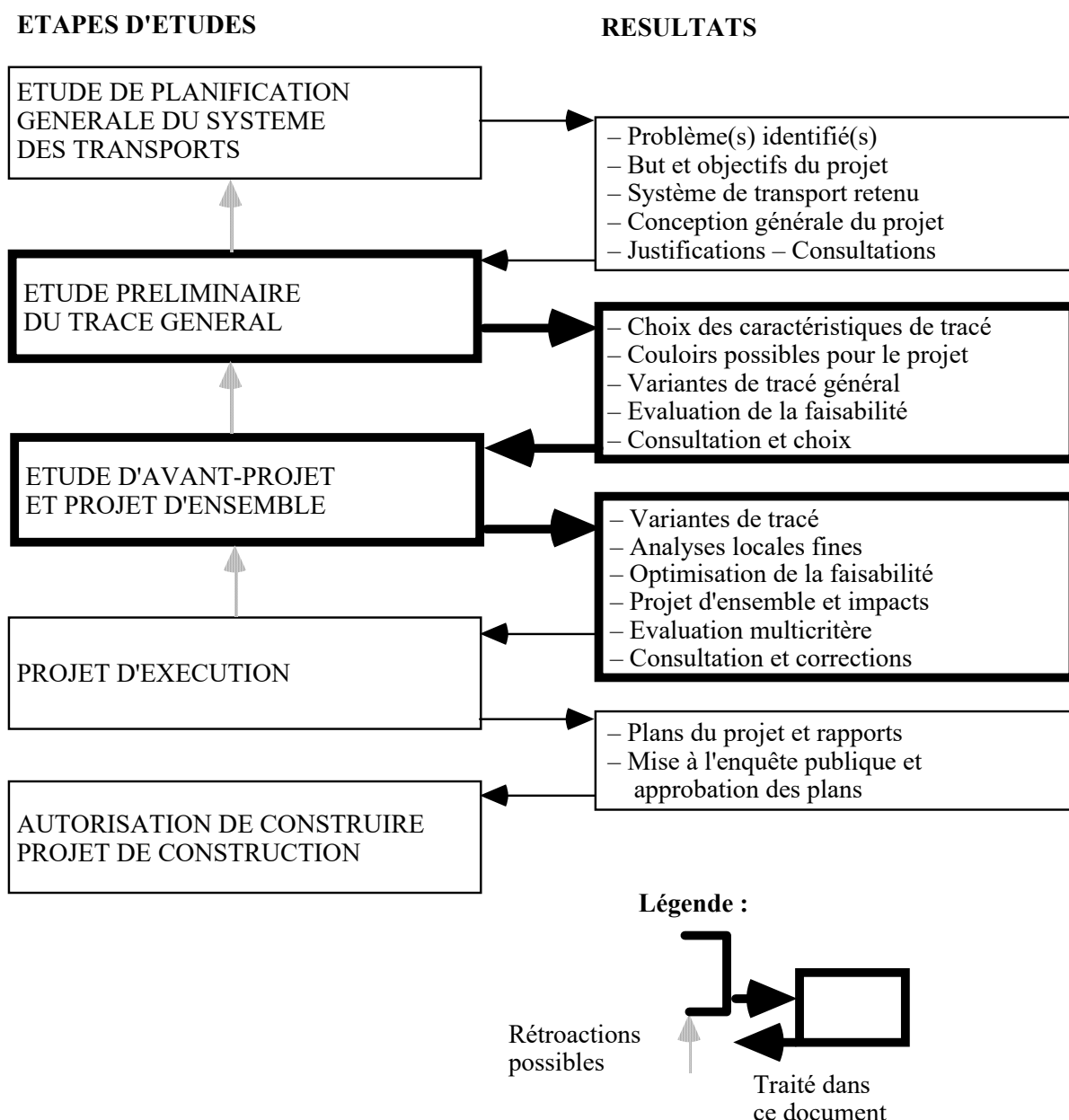


Figure 7.1 – Les études de tracé ferroviaire dans la démarche générale.

7.2.1 Collecte de données

A partir des objectifs définis dans les différents domaines, il est nécessaire de délimiter le champ géographique de l'étude de tracé et de procéder à la collecte des données.

Parmi les nombreuses données nécessaires pour une étude de tracé, celles relatives à la **législation**, à la réglementation ainsi qu'aux **procédures d'approbation** permettant d'obtenir une autorisation de construire revêtent une importance capitale pour assurer l'acceptabilité administrative, politique et sociale du projet (cf. chap. 6).

Cette collecte de données doit permettre (**Fig. 7.2**) :

- d'établir le **plan des contraintes** (§ 7.2.2) dans le champ géographique d'étude;
- de rechercher des **variantes de tracé général**;

- d'élaborer des **variantes d'avant-projets de tracé et d'aménagement**.

Ce processus d'étude par étape est itératif et peut nécessiter des rétroaction et réexamens des étapes précédentes. Ce type de démarche par approche successive de plus en plus détaillée doit permettre de converger vers les solutions répondant le mieux aux objectifs fixés.

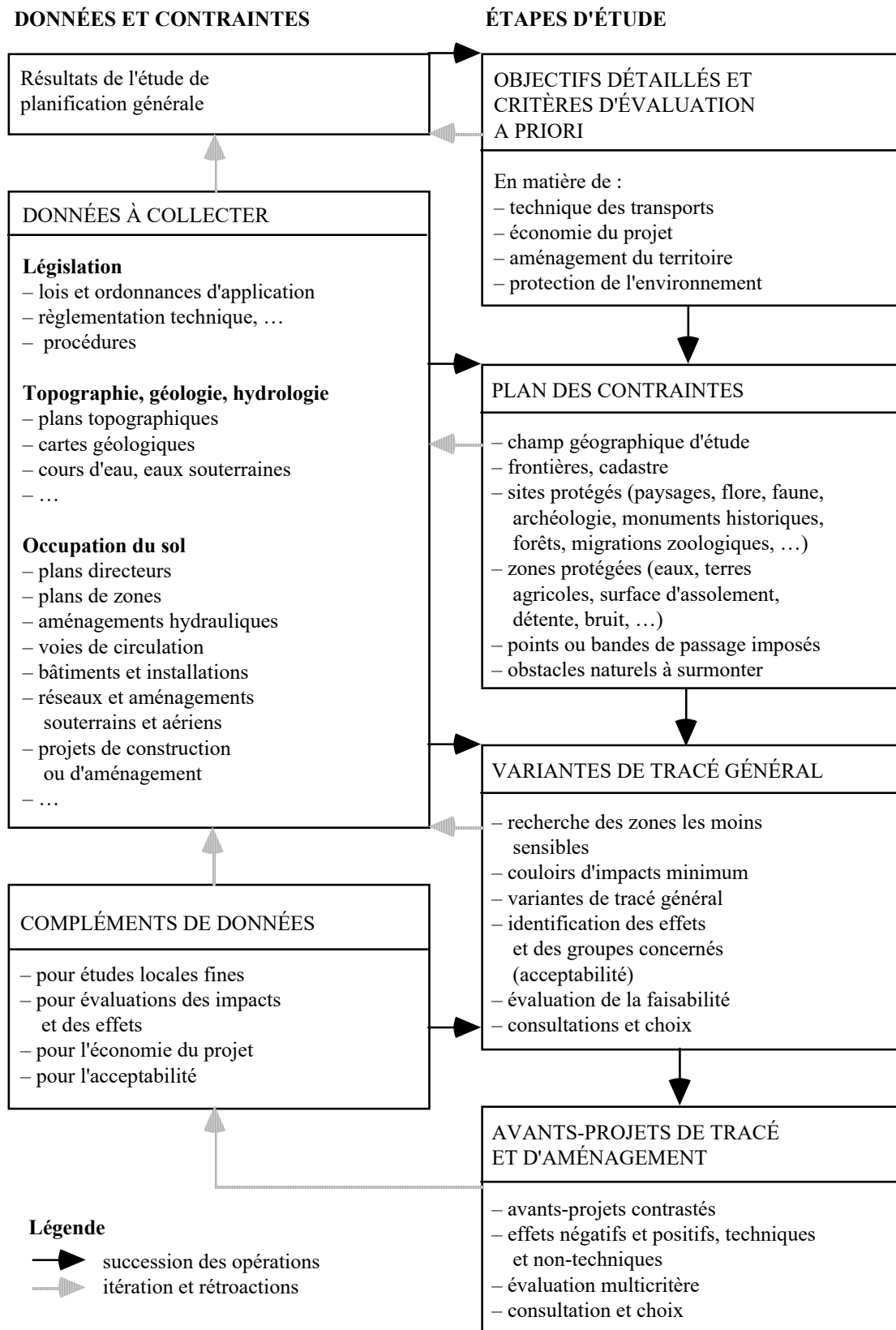


Figure 7.2 – Démarche itérative des études de tracé.

7.2.2 Plans des contraintes

Le plan de contrainte est l'un des documents de base servant à définir les variantes de tracé général.

Compte tenu des objectifs détaillés et des critères d'évaluation déterminés a priori, il est nécessaire de représenter, pour le champ géographique retenu, l'ensemble des données contraignantes qui ont été collectées. Cette opération consiste donc à représenter progressivement sur un plan les contraintes les plus fortes par nature, notamment en ce qui concerne :

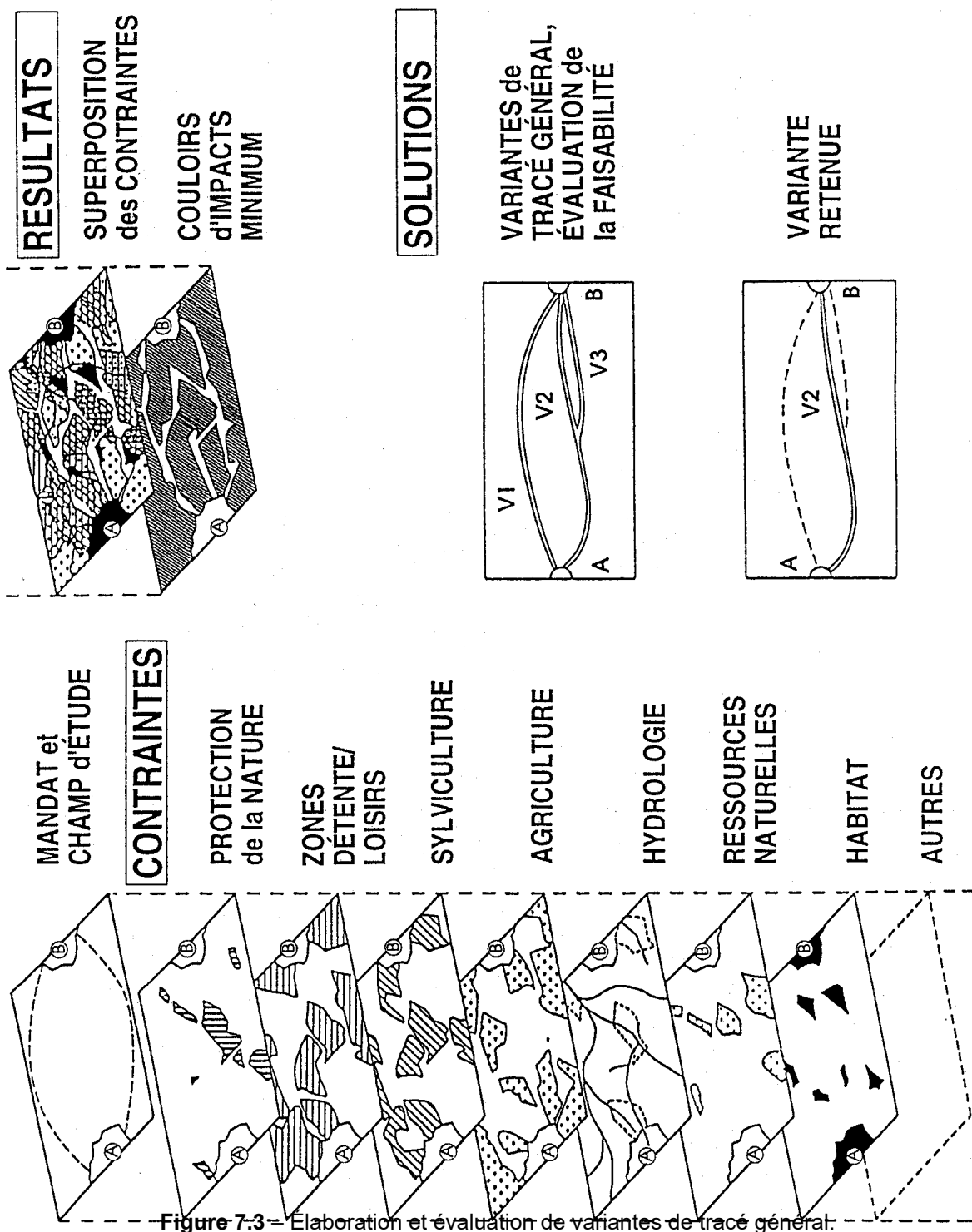
- la protection de l'environnement, c'est-à-dire les sites et les zones protégées;
- la géographie physique, de la géologie et de l'hydrologie;
- la géographie politique et économique, notamment les frontières, le peuplement, l'occupation du sol, le contenu économique et le franchissement d'autres voies de circulation, etc.

A titre d'exemple, la **figure 7.3** schématise cette opération de superposition des contraintes. L'objectif est de mettre en évidence des couloirs "de moindre difficultés" pour le tracé général et par conséquent d'impacts minimaux. Dans ces couloirs ont élaboré ensuite des variantes de tracé général qui devraient simultanément :

- répondre le mieux aux objectifs,
- provoquer le minimum d'inconvénients
- présenter des coûts annuels totaux (charge d'investissement et coûts d'exploitation et de maintenance) minimaux,
- être techniquement faisable,
- respecter les délais fixés,
- être politiquement et socialement les plus acceptables,
- etc.

Cette opération est complexe; elle demande une grande expérience pratique et une méthode de travail très stricte.

Le chapitre suivant présente une analyse sommaire de quelques exemples de contraintes caractéristiques. Elles mettront en évidence, au niveau du tracé général ou des avant-projets, que le chemin de fer, plus que tout autre moyen de transport, est dépendant du site dans lequel il est implanté.



8. EXEMPLES DE CONTRAINTES

8.1 Points ou bandes de passage imposés

Sur l'ensemble de la topographie d'une région, il est possible de définir, pour des raisons économiques ou politiques, un certain nombre de points où le passage du

tracé d'une voie de circulation est soit exclu, soit obligé. C'est par exemple le cas pour :

Points : extrémités de lacs, cols, contreforts de montagnes, coudes de cours d'eau, biotopes particulièrement sensibles...

Bandes : côtes, vallées, fleuves, chaîne de montagne, terres fertiles, couloir ayant un impact minimum sur l'environnement...

8.2 Obstacles naturels à surmonter

Les obstacles naturels à surmonter sont multiples. Les déclivités, chaînes de montagnes, terrains instables, zones menacées par des éléments naturels en sont les principaux.

8.2.1 Déclivités

Le faible coefficient d'adhérence acier-acier limite fortement les **déclivités** admissibles pour les chemins de fer. Ainsi, lors de l'implantation d'un tracé ferroviaire, l'interaction entre le plan de situation et le profil en long est complète. Par conséquent, un tracé ne doit jamais être étudié en plan sans considérer simultanément son profil en long.

Théoriquement, il existe une infinité de variantes pour relier deux points A et B. La recherche d'une solution économiquement optimale pour un programme d'exploitation donné doit être réalisée par itération entre deux solutions extrêmes :

- la ligne droite qui sera la plus avantageuse du point de vue de la dynamique des circulations et des coûts d'exploitation, mais probablement plus coûteuse du point de vue des investissements;
- un tracé sinueux qui suit le terrain et qui présentera des coûts de construction les plus réduits.

Malheureusement, il n'est pas possible de trouver une solution qui minimise à la fois le coût de construction, la puissance nécessaire, les temps de parcours, etc. Toutefois, le tracé qui permet de maintenir l'effort de traction aussi constant que possible fournit une solution proche de l'optimum, minimisant notamment la puissance des engins moteurs.

Pour chaque tracé permettant de relier les points A et B, il est possible de définir (**Fig. 8.1**) une **déclivité moyenne** i_m et une **déclivité corrigée** i_d tenant compte des différentes résistances auxquelles sont soumis les convois ($i_d = r_d + r_c + r_{at}$).

Soit :	L	[km]	distance entre A et B
	H	[m]	différence d'altitude entre A et B
	r_d	[N]	résistance due aux déclivités
	r_c	[N]	résistance due aux courbes
	r_{at}	[N]	résistance due à l'air dans les tunnels
	h	[m]	différence d'altitude équivalente

$$i_m = H / L \quad \text{et} \quad i_d = (H + h) / L$$

avec $h = h_1 + h_2 + \dots + h_n$

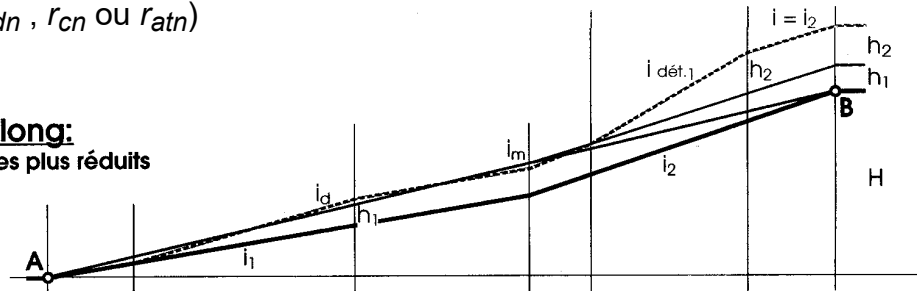
$$h_1 = l_1 \cdot (r_{d1}, r_{c1} \text{ ou } r_{at1})$$

$$h_2 = l_2 \cdot (r_{d2}, r_{c2} \text{ ou } r_{at2})$$

$$h_n = l_n \cdot (r_{dn}, r_{cn} \text{ ou } r_{atn})$$

Cas 1 - Profil en long:

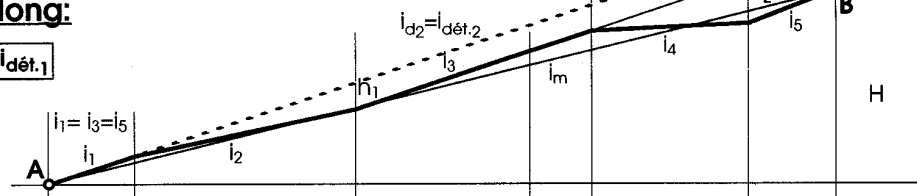
coûts de construction les plus réduits



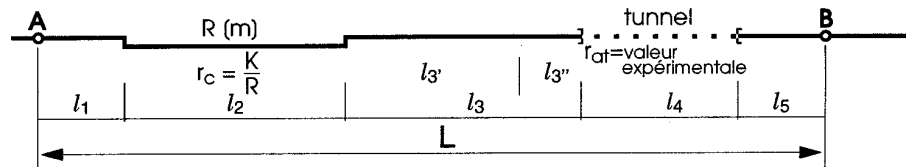
Cas 2 - Profil en long:

$r_2 (s) = \text{const.}$

$$i_{det,2} < i_{det,1}$$



Plan:



Légende:

— profil en long réel
— i_m déclivité moyenne
— i_d déclivité corrigée
- - - i_{det} déclivité déterminante

H = différence de niveau entre A et B

$$h_1 = r_c \cdot l_2$$

$$h_2 = r_{at} \cdot l_4$$

Figure 8.1 – Dynamique des circulations; relation entre le tracé en plan et en élévation.

- **Cas 1** il représente un profil en long épousant le plus possible le terrain et a par conséquent le coût de construction le plus faible (i_d n'est pas constant).
- **Cas 2** en faisant l'hypothèse que le tracé en plan est identique à celui du cas 1, le profil en long est adapté de manière à ce que i_d soit constant de A à B, ce qui conduit à trouver le profil en long qui **minimise la puissance de traction nécessaire**; en effet, la comparaison des déclivités corrigées déterminantes ($i_{det} = i_{d,max}$) montre que $i_{det1} > i_{det2}$, c'est-à-dire que le profil en long du cas 1 nécessite un effort de traction disponible supérieur à celui du cas 2; ainsi un court tronçon (le tunnel) pénalise l'ensemble de la ligne.

Par conséquent, on recherchera donc pour les deux sens de circulation un tracé pour lequel :

- l'effort de traction ne varie que peu le long du parcours;
- la destruction d'énergie par freinage soit la plus réduite possible.

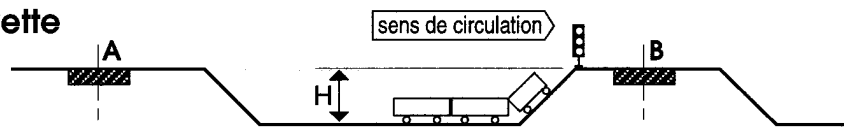
Cas des métros

Pour le profil en long des tunnels métropolitains, il est possible de définir la valeur des déclivités des *rampes d'accélération et de décélération* et leur longueur de façon à ce que le train puisse passer de la vitesse v_0 à v_1 (accélération) ou v_1 à v_0 (décélération) avec l'aide de la force vive (gravité) (**Fig. 8.2**) :

$$F_V = M \cdot v_1^2 / 2 - M \cdot v_0^2 / 2$$

Toutefois, les difficultés de démarrage lorsque les trains sont arrêtés au signal d'entrée d'une station (régime perturbé) ainsi que le risque de dérive de wagons manœuvrés en gare représentent des inconvénients non négligeables. La mise en place de paliers de démarrage est avantageuse mais les déclivités ne doivent toutefois pas dépasser la limite admissible.

Profil en forme de cuvette



Palier de démarrage

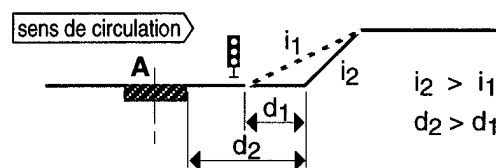


Figure 8.2 – Rampe d'accélération et de décélération.

Déclivités nocives

Tout profil en long exigeant qu'un train soit freiné sur une partie de son parcours est défavorable du point de vue énergétique. Abstraction faite des rampes d'accélération et de décélération, on appelle **déclivité nocive** i_n [‰] toute déclivité supérieure à la somme des résistances à l'avancement d'un convoi. Une telle déclivité parcourue dans le sens de la descente s'appelle communément « pente motrice ».

$$i_n > r_1(v) + r_c + r_{at}$$

Soient :

- i_1 la déclivité moyenne entre A et B
- H_1 la différence de niveau entre A et B
- i_2 et i_3 les déclivités d'un profil en long ACB avec pente et contre-pente
- H_2 la différence de niveau entre A et C
- H_3 la différence de niveau entre B et C
- l_1, l_2, l_3 les distances respectives

Si i_1 , i_2 et i_3 ne sont pas des déclivités nocives, les deux tracés sont donc équivalents du point de vue énergétique, quel que soit le sens de circulation.

Si i_3 est une déclivité nocive, il y aura une consommation d'énergie supplémentaire de B à A même si i_1 est une déclivité nocive car il y aura la rampe i_2 .

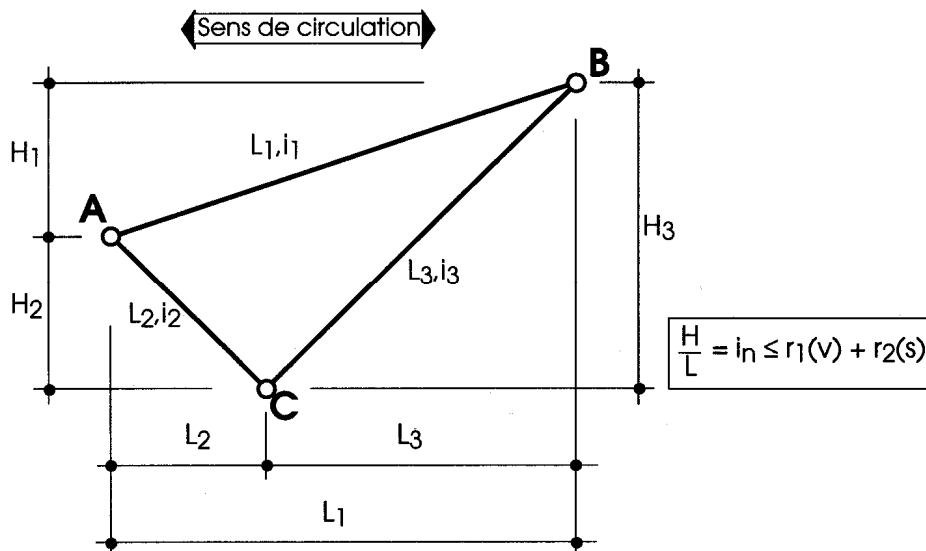


Figure 8.3 – Déclivités nocives.

8.2.2 Cois et montagnes

Dans le cas de **franchissement de montagnes et de cols**, les différences de niveau peuvent être surmontées de différentes manières :

- 1) par un tracé en plan et en élévation tel que la déclivité corrigée $i_d \leq i_{max\text{ pratique}}$
Rappelons que $i_{max\text{ pratique}}$ est dicté par les caractéristiques techniques du type de chemin de fer adopté (adhérence, ...)
- 2) par un profil en long mixte, certaines différences de niveau étant surmontées par des tronçons de voies à crémaillères
- 3) par un développement artificiel du tracé (Fig. 8.4) pour les chemins de fer à adhérence, en gardant $i_d < i_{max\text{ pratique}}$

i_{max} = déclivité maximum

i_d = déclivité corrigée

i_m = déclivité moyenne

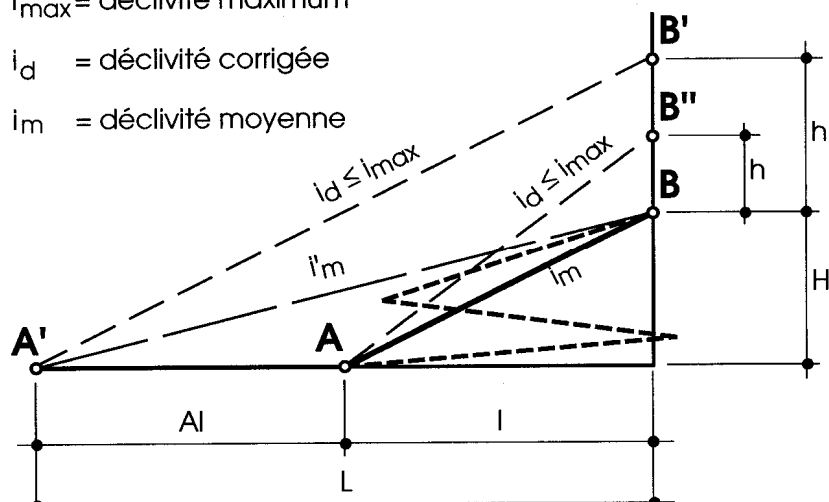


Figure 8.4 – Développement artificiel du tracé (chemin de fer à adhérence).

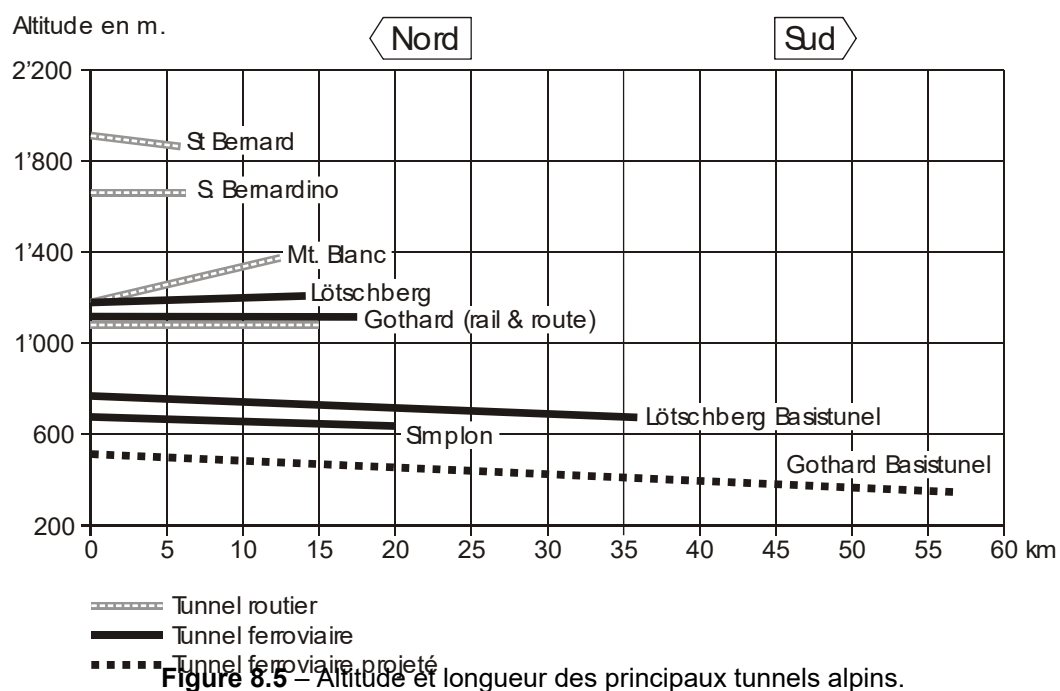
Le développement artificiel du tracé peut être obtenu par :

- *rebroussements* (anciennement) où les investissements relativement réduits sont compensés par des inconvénients majeurs pour l'exploitation.
exemples : Ligne Neuchâtel – La Chaux-de-Fonds, Chambrelieu
Ligne Glovelier – Saignelégier, Combe – Tabeillon
- *boucles et tracés hélicoïdaux*
exemples : Lignes du Gothard, du Simplon (versant italien),
du Lötschberg voie normale, $R = 280$ à 300 m, $i = 26$ à 28‰
Chemins de fer rhétiques, Albula, Bernina
voie étroite, $R = 45$ à 120 m, $i = 70$ à 80‰

Les **tunnels** permettent également le franchissement de montagnes.

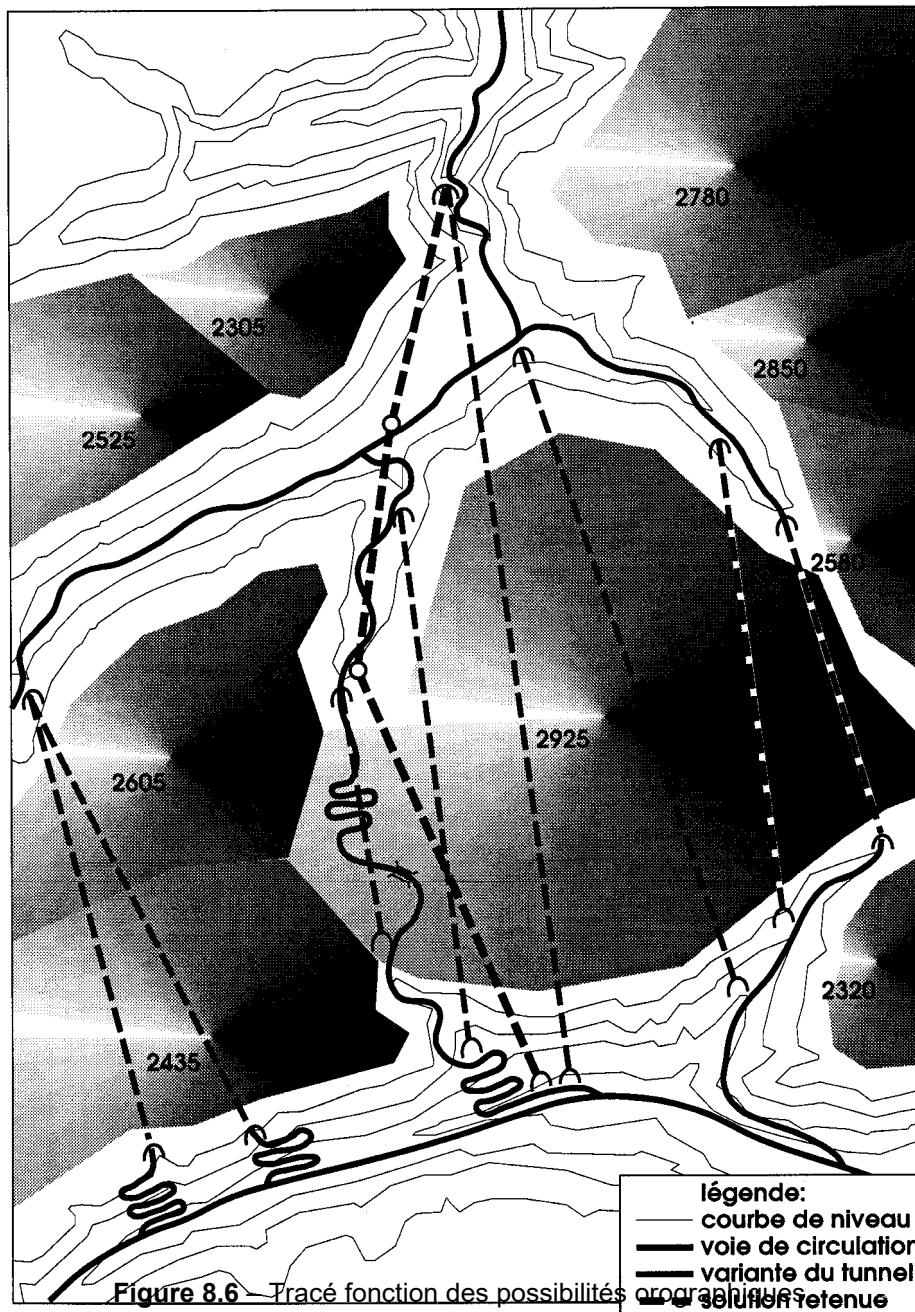
- 4) Les *tunnels de faite* sont généralement caractérisés par des rampes d'accès nécessitant un développement artificiel du tracé et une protection de la ligne contre les éléments naturels.
- 5) Les *tunnels de base* sont équipés de cheminées d'accès et de ventilation, leur déclivité doit permettre l'évacuation des eaux du front d'attaque.

Le choix entre un tunnel de faite et un tunnel de base (**Fig. 8.5**) se fait à partir de l'estimation du trafic probable, de la capacité de la ligne et des frais de construction (tunnel, rampes d'accès) et d'exploitation (traction, usure du matériel, ventilation...).



L'altitude générale et le tracé en plan d'un tunnel sont directement influencés par la géographie physique et par la géologie du massif à franchir.

Les portails doivent être implantés en tenant compte des possibilités orographiques (**Fig. 8.6**), du prolongement naturel des vallées, des déclivités, de la place disponible pour l'installation du chantier voire éventuellement pour les déblais, de la protection contre les chutes de pierres, les avalanches et l'eau, de la présence d'installations militaires ou d'aménagements hydroélectriques, de l'intérêt d'éviter une concentration des installations de transport, etc.



8.2.3 Cours d'eau

Le **franchissement de rivières** est avant tout un problème de génie civil. Le choix du tracé est toutefois important (**Fig. 8.7**). Il est fonction :

- du régime du cours d'eau;
- des projets des pouvoirs publics en ce qui concerne la correction et l'aménagement de la voie fluviale et les usines hydroélectriques;
- des possibilités de construction et d'extension des voies de circulation.

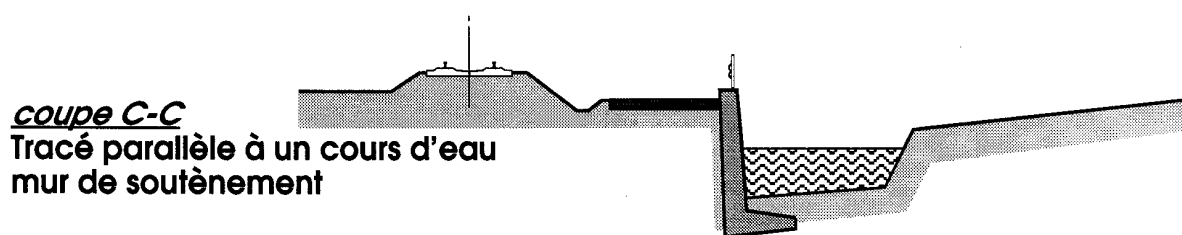
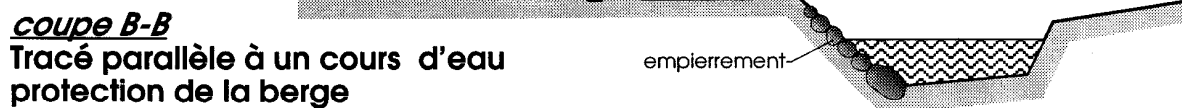
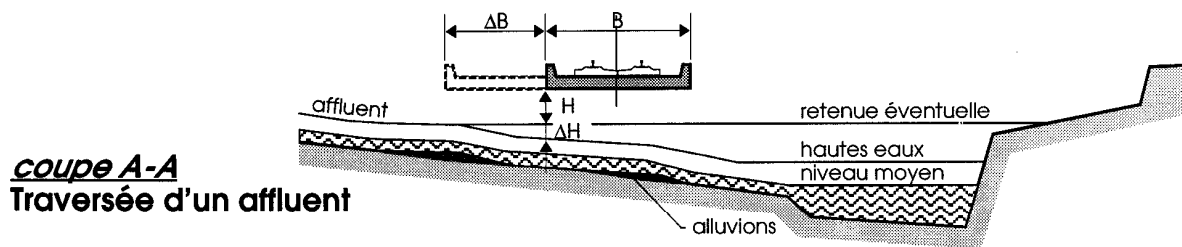
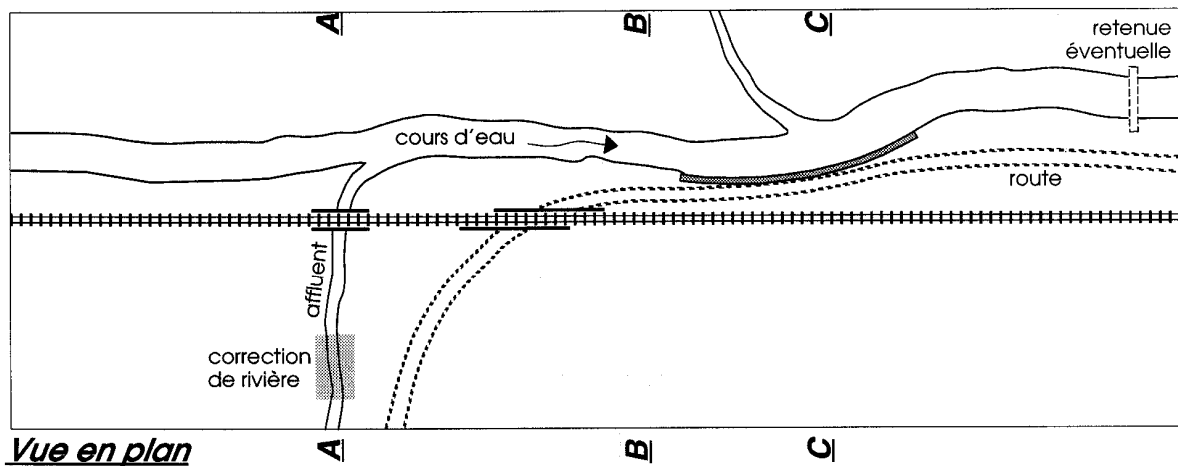


Figure 8.7 – Tracé en plan et en élévation d'une ligne de chemin de fer parallèle ou perpendiculaire à un cours d'eau.

8.2.4 Géologie

La **nature du terrain** peut également fortement influencer le tracé général. Il s'agit en effet d'éviter les zones de glissement de terrain ou les sols de mauvaise qualité (tourbe, marne). La protection contre les éléments naturels peut rendre

économiquement intéressant la construction de tunnels (**Fig. 8.8**) ou de galeries de protection.

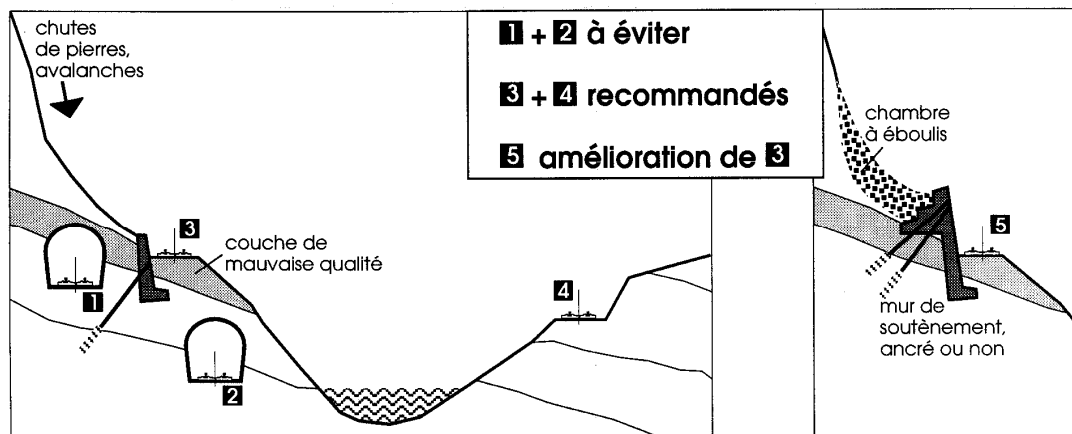


Figure 8.8 – Influence de la nature du terrain sur la détermination du tracé général.

Exemples :

- zones de glissement de terrain (**Fig. 8.9**) Moutier-Court, 1937
Lausanne-Palézieux, 1950
- terrains de mauvaise qualité Ligne Zurich-Coire
Ziegelbrücke-Bad Ragaz
Ligne Lausanne-Bienne
Eclépens-Yverdon
- protection contre les éléments naturels Ligne du Gothard

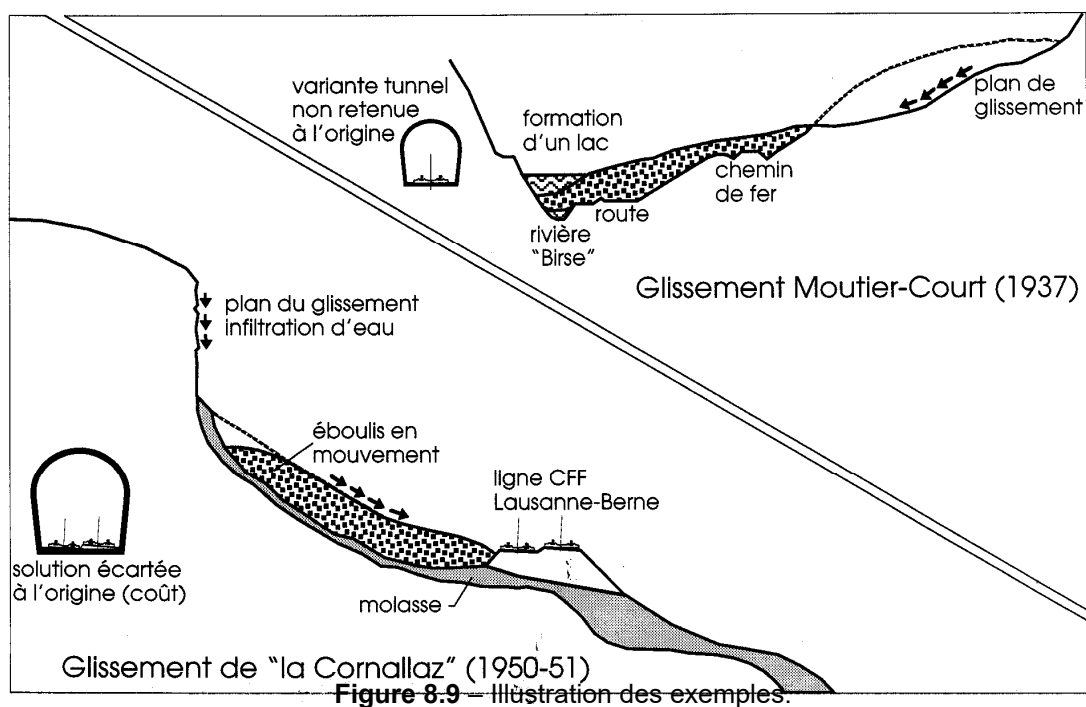


Figure 8.9 – Illustration des exemples.

8.3 Franchissement d'autres voies de circulation

Le franchissement d'un chemin de fer peut se faire par un passage à niveau, par un passage supérieur ou inférieur (**Fig. 8.10**).

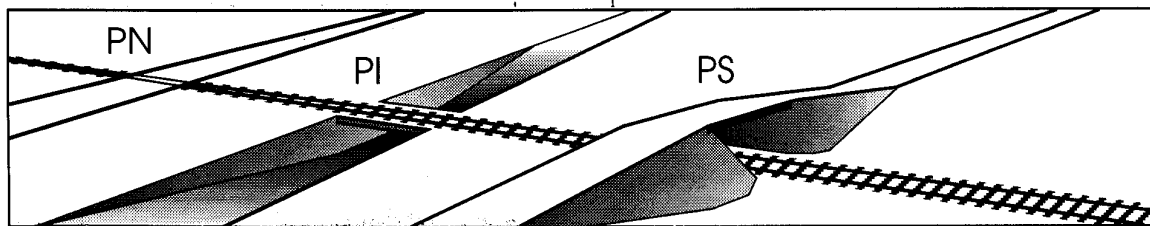


Figure 8.10 – Passage à niveau, supérieur, inférieur.

Lors du choix du tracé, on limitera le nombre des intersections. L'angle d'intersection à niveau (PN) d'une ligne de chemin de fer avec une route (**Fig. 8.11**) ne sera pas inférieur à 30° (si possible $\alpha \geq 45^\circ$) de façon à avoir une surface de la chaussée sur la voie et une longueur des barrières de sécurité réduite, un angle d'attaque des ornières suffisant et une durée de cisaillement aussi courte que possible (diminution du risque d'accident).

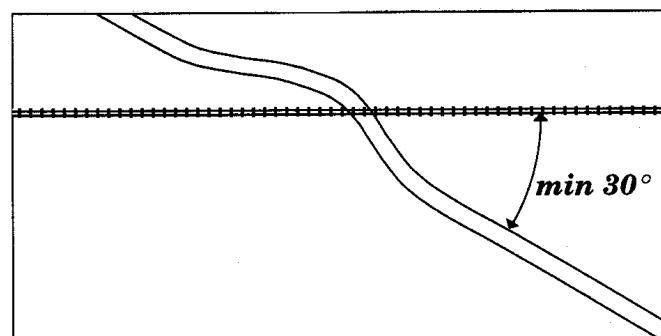


Figure 8.11 – Intersection à niveau rail-route.

La différence de niveau entre la surface de roulement de deux voies de circulation au droit de leur intersection dépend du gabarit des véhicules ou de l'espace libre pour les utilisateurs de la voie de circulation (**Fig. 8.12**), ainsi que des caractéristiques constructives des ouvrages telles qu'épaisseur des dalles.

Lorsqu'un ouvrage est nécessaire (saut de mouton permettant l'intersection à deux niveaux de voies de chemin de fer, **Fig. 8.13**), il est indispensable de toujours tenir compte de la dynamique et de la cinématique des circulations, de la visibilité, des possibilités d'extension, des dispositions constructives des ouvrages, de la place disponible.

CHEMIN DE FER

MÉTRO

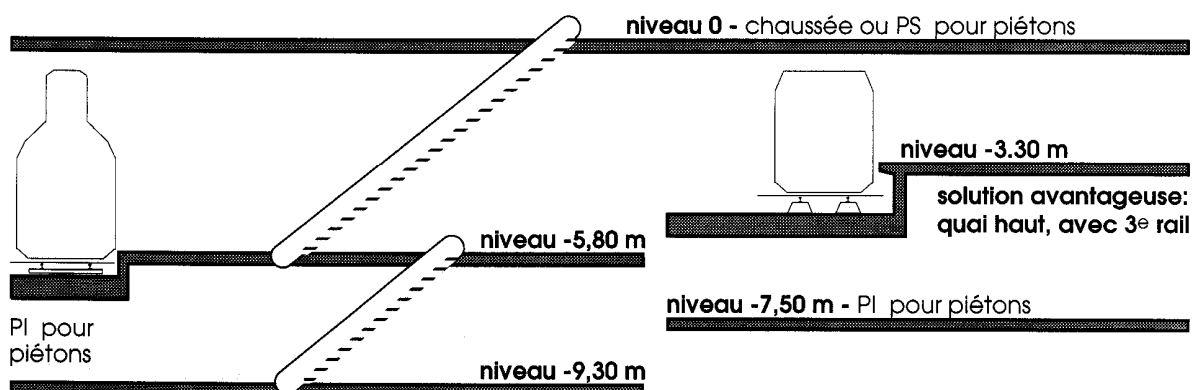


Figure 8.12 – Différences de niveau à surmonter par les voyageurs, en fonction de la position du passage (PS ou PI), de la hauteur des quais et des gabarits (chemin de fer et métro).

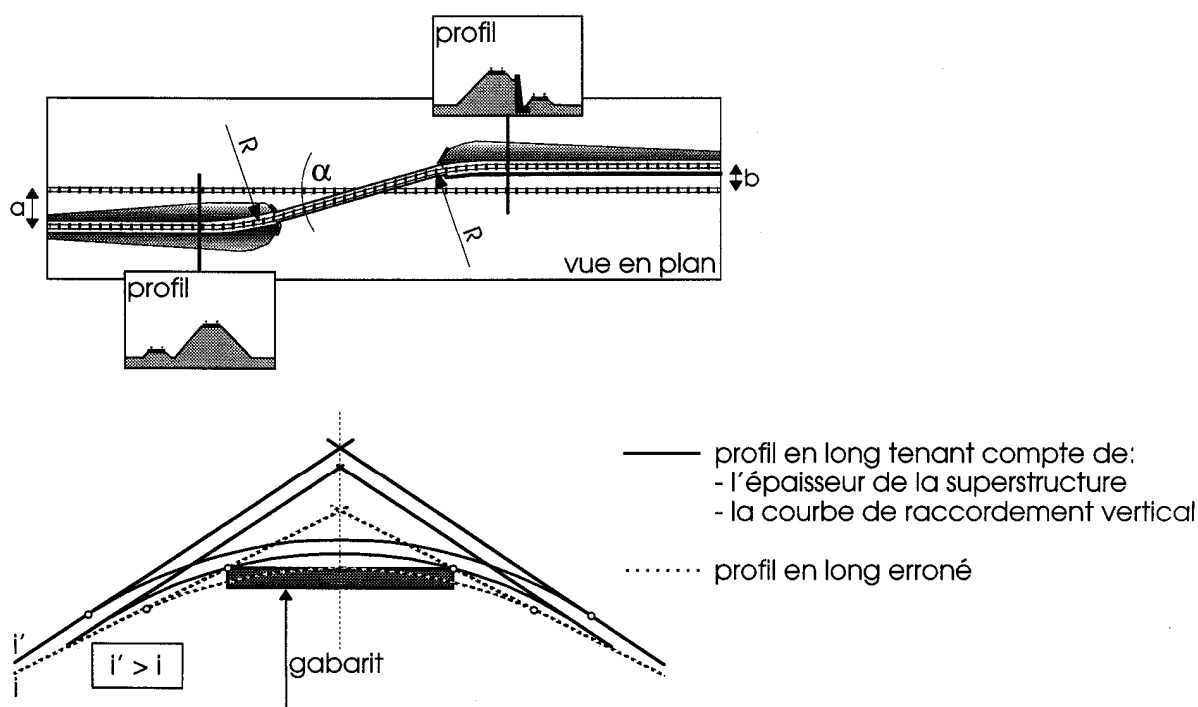


Figure 8.13 – Paramètres essentiels intervenant dans le tracé de détail d'un saut de mouton.

8.4 Peuplement, desserte, occupation du sol

Le choix des localités desservies par une nouvelle ligne est un problème de rentabilité. Toutefois, l'augmentation de la longueur d'une ligne brisée par rapport à

une ligne rectiligne est moins importante que ne peut le laisser supposer le plan de situation.

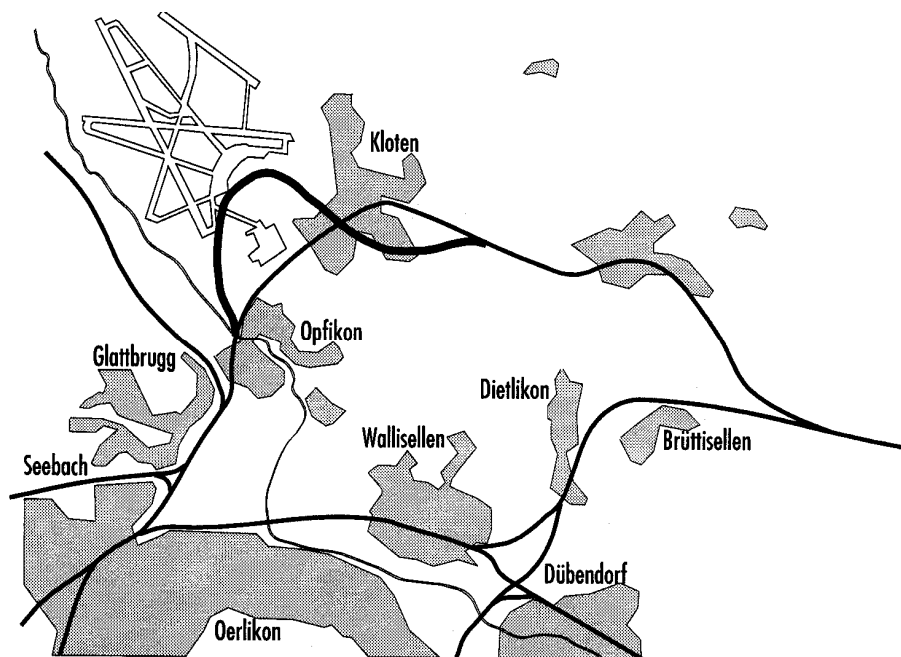


Figure 8.14 – Raccordement de l'aéroport de Zürich-Kloten au réseau des CFF.

Au droit des agglomérations, le tracé des voies de circulations doivent tenir compte de l'urbanisme, du système auquel appartiennent ces voies de circulations, de la présence d'autres systèmes, etc. Il s'agit avant tout de rechercher une structure de réseau évitant les concentrations et les cisaillements.

Dans les grands centres urbains il existe un grand déséquilibre entre la capacité de transport et le volume de trafic (**Fig. 8.15**). L'emplacement des nœuds par rapport au centre est important. Il va conditionner le tracé des accès; les problèmes engendrés par le développement du trafic car la croissance de la ville peut empêcher un développement ultérieur de la gare.

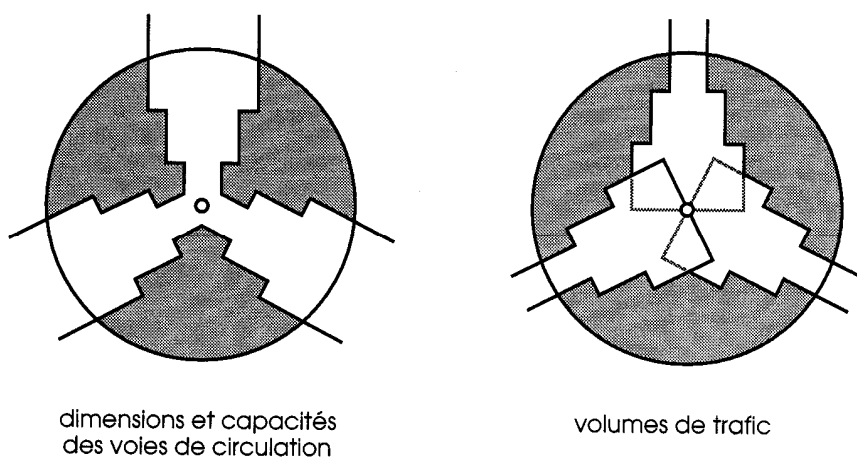


Figure 8.15 – Déséquilibre entre la capacité des voies de circulation et le volume de trafic dans les centres urbains.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Léopold Veuve, *Planification et projets*, EPFL, Département d'architecture, avril 1991.
- [2] OCDE, *La politique des transports et l'environnement*, Session ministérielle de la CEMT, 1990.
- [3] SIA D022, *Étude de l'impact sur l'environnement, un nouveau processus et ses limites*, 1988.
- [4] *Railway directory and yearbook*, 1979.
- [5] *Jane's world railways and rapid transit systems*, 1976.
- [6] *Tracé géométrique de la voie à écartement normal*, règlement CFF R 200.46, 1989.
- [7] *Dispositions d'exécution (DE-OCF) de l'ordonnance sur les chemins de fer*, 1994.
- [8] David Genton : cours *Systèmes de transports*, chap. 3.3, La voie de circulation, 1979.
- [9] *Géométrie des appareils de voie à écartement normal*, règlement CFF R 200.64, 1988.
- [10] Ordonnance fédérale du 19.10.1988 relative à l'étude de l'impact sur l'environnement (OEIE).
- [11] OCDE, *Lutter contre le bruit dans les années 90*, 1991.
- [12] Département fédéral de l'économie publique, *La Vie Économique*, 8/92.
- [13] Patrick Belloncle, *Les chemins de fer de la Jungfrau*, Editions du Cabri, 8/90.
- [14] Coenraad Esveld, *Modern railway track*, NS Permanent Way Departement, 1989.
- [15] Jean Alias, *La voie ferrée*, Eyrolles, 1977.

LES DIVERS SYSTEMES DE CREMAILLERE

Les premiers chemins de fer à crémaillère furent mis en service durant la seconde moitié du XIX^e siècle. C'est à **Sylvester MARSH** que l'on doit la mise au point du premier système traction de ce type. Il consiste en une ornière à échelle placée au milieu de la voie, sur laquelle vient s'agripper la roue dentée de la locomotive. Il fut utilisé pour la première fois en 1869 sur le chemin de fer touristique du Mont Washington aux USA (déclivité de 374‰).

Depuis cette époque d'autres types de crémaillère (**Fig. A2-1**) ont été inventés, principalement en Suisse. Ils peuvent être classés en deux catégories, selon que la roue dentée est verticale ou horizontale.

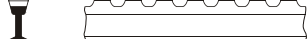
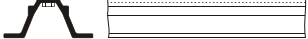
Type	Schéma	Ligne	Ecartement [mm]	Déclivité [‰]
MARSH		Mount-Washington	VE 1411	374
RIGGENBACH		Rigi-Bahn (RB) Zentral Bahn (ZB), ex Brünig-Bahn Berner-Oberland-Bahn (BOB)	VN VE 1000 VE 1000	250 250 120
ABT		Matterhorn-Gothard-Bahn (MGB) Gornergrat Bahn (GGB) Monte Generoso (MG)	VE 1000 VE 1000 VE 800	180 200 220
STRUB		Jungfrau Bahn (JB) Martigny-Châtelard (TMR) Lausanne-Ouchy (LO) avant M2	VE 1000 VE 1000 VN	250 200 120
LOCHER		Pilatus Bahn (PB)	VE 800	480

Figure A2-1 – Les principaux systèmes de crémaillères [13].

a) Crémaillères avec roue dentée verticale

Cette catégorie regroupe 3 systèmes qui ont tous une limite pratique de la déclivité comprise entre **250** et **300‰**.

1. **Niklaus RIGGENBACH** inventa une crémaillère semblable à celle de Marsh pour le chemin de fer Vitznau-Rigi Bahn qui fut mis en service en 1871. Cette crémaillère est très résistante et permet dès le début une pression allant jusqu'à 18 tonnes à la denture. Par contre sa constitution ne permet pas la pose d'aiguillages. De plus, en hiver, de la neige et de la glace peuvent être tassée entre les dents, ce qui peut compliquer l'exploitation hivernale.

Des systèmes dérivés et améliorés furent mis au point, notamment par l'ingénieur Pauli.

2. La crémaillère de **Roman ABT** (ancien employé de Riggenbach) est un système à lamelles dentées, posées au début à raison de trois, puis plus tard deux lamelles parallèles. Les dentures des lames sont décalées, ce qui permet un effort continu de la roue dentée et évite tout risque de chevauchement de celle-ci sur une dent de la crémaillère.

Ce système permet également la construction d'un aiguillage fiable, à denture continue.

3. **Emil Viktor STRUB** a perfectionné le système Abt en ne plaçant qu'une lamelle dentée. Elle a la particularité d'avoir des dents de forme conique vers le haut, afin de permettre l'emploi d'un crochet évitant le soulèvement de la roue dentée en cas de mauvais engrenage de celle-ci.

b) Crémaillères avec roue dentée horizontale

Cette catégorie ne comprend que le système mis au point par **Eduard LOCHER** pour le chemin de fer du Pilatus dont les rampes atteignent **480‰** (record mondial pour le trafic voyageurs). Il imagina une crémaillère à double denture latérale qui permet d'éviter toute sortie imprévue des roues dentées en cas de forte accélération ou de freinage. En effet, en cas de soulèvement du véhicule, le déraillement est évité grâce aux roues de guidage qui viennent buter sous les dents de la crémaillère (**Fig. A2-2**).

Si ce système est parfaitement adapté pour des déclivités supérieures à 250‰, il exclut toute possibilité d'aiguillage. Ils doivent être remplacés par un système assez coûteux de rails pivotants ou de ponts roulants.

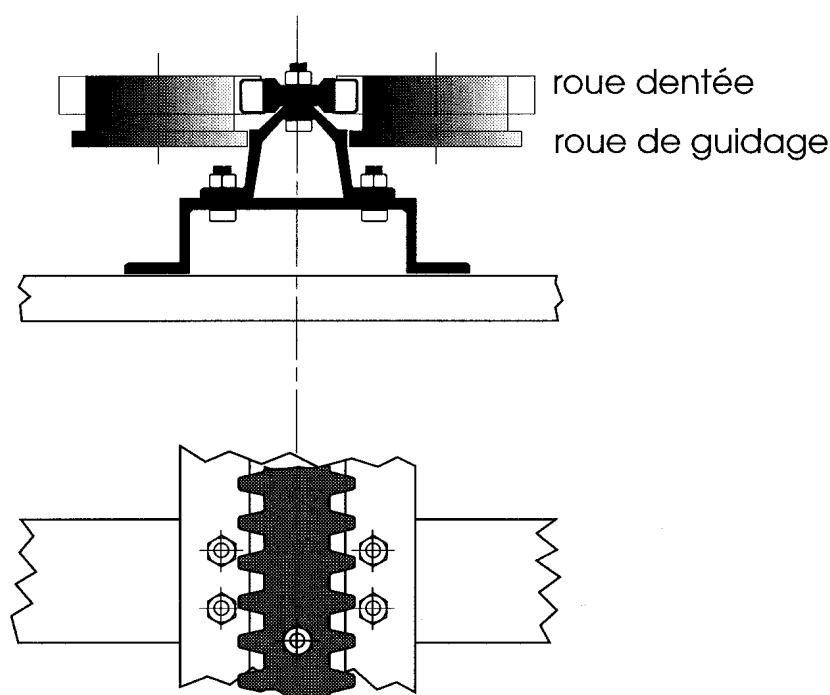


Figure A2-2 – Crémaillère horizontale avec roue de guidage.

VALEURS DES PARAMÈTRES UTILISÉS POUR LES ÉLÉMENTS DU TRACÉ EN PLAN

Cette annexe regroupe dans trois tableaux, les principaux éléments nécessaires pour calculer, en fonction de la vitesse et du type de trafic, les éléments de tracés pour les CFF et les lignes à grande vitesse (UIC).

Vmax [km/h]	Dévers normal [mm]	Rmin [m]
CFF		
80	$6,5 V^2/R$	280
100	$6,5 V^2/R$	435
120	$6,5 V^2/R$	625
140	$5,5 V^2/R$	850
160	$5,5 V^2/R$	1115
200 (nouvelles lignes avec trafic marchandises intense)	$5,2 V^2/R$	3000
200 (nouvelles lignes sans trains marchandises)	$7,9 V^2/R$	2100
TGV Paris-Sud Est		
300	$8 V^2/R$	4000
TGV Atlantique		
350	$9,2 V^2/R$	6250

Tableau A3-1 – Rayons minimaux en plan et dévers normaux en fonction de la vitesse.

Vitesse	Insuffisance de dévers et a_{nc}	Dévers normal	Dévers max.	Type de trafic
$V_R \leq 125$ km/h CFF R220.46 (1989)	122 mm (0,8 m/s ²) Normal 130 mm (0,85 m/s ²) Exceptionnelle 150 mm (0,98 m/s ²) Autoris. nécessaire	$6,5 \frac{V_R^2}{R}$	150 mm 180 mm Except.	Trafic mixte
$130 \text{ km/h} \leq V_R \leq 160 \text{ km/h}$ CFF R220.46 (1989)	122 mm (0,8 m/s ²) Normal 130 mm (0,85 m/s ²) Exceptionnelle 150 mm (0,98 m/s ²) Autoris. nécessaire	$6,5 \frac{125^2}{R}$ $5,5 \frac{V_R^2}{R}$	150 mm 180 mm Except.	Trafic mixte Dans le futur, lorsque la majorité des trains circuleront effectivement à $V \leq 140$ km/h
$170 \text{ km/h} \leq V \leq 200 \text{ km/h}$ DT DG 36001 (1988)	56 mm Normale 80÷70 mm Normale 50÷44 mm Normale 75 mm Normale 100÷90 mm Normale	$6,2 \frac{V_{max}^2}{R}$ $7,9 \frac{V_{max}^2}{R}$ $5,2 \frac{V_{max}^2}{R}$	90 mm 150 mm 80 mm	Nouvelle ligne avec train voyageur prépondérant Correction de ligne avec trains marchandises Passage dans zone de point forcé Nouvelles lignes sans trafic marchandise Trafic marchandise intense
$V = 250$ km/h UIC 703 R (1993)	100 mm (0,65 m/s ²) Conseillée 150 mm (0,98 m/s ²) Admissible 160 mm (1,05 m/s ²) Exceptionnelle	$8 \frac{V^2}{R} \div 10,5 \frac{V^2}{R}$ <i>Pour</i> $V = 250 \div 300$ km/h	160 mm 180 mm Except.	Trafic purement voyageur (pas de véhicules pendulaires)
$V = 300$ km/h UIC 703 R (1993)	80 mm (0,52m/s ²) Conseillée 130 mm (0,85m/s ²) Admissible 150 mm (0,98m/s ²) Exceptionnelle			Trafic purement voyageur (pas de véhicules pendulaires)

Tableau A3-2 – Paramètres du dévers en fonction de la vitesse.

Vitesse	Gauche max.	Variation en fonction du temps de :			Valeur	Type de trafic
		d	Δd	a_{nc}		
$V_R \leq 160$ km/h		$d \, d/dt = 44$ mm/s	$d \, \Delta d/dt = 36$ mm/s	$d \, a_{nc}/dt = 0,236$ m/s ³	Normale	Trafic mixte
CFF R220.46 (1989)	2‰	$d \, d/dt = 60$ mm/s	$d \, \Delta d/dt = 46$ mm/s	$d \, a_{nc}/dt = 0,3$ m/s ³	Maximale	(voies principales et secondaires 1+2)
V = 200 km/h DT DG 36001 (1988) (valeurs calculées)		$d \, d/dt = 17,9$ mm/s	$d \, \Delta d/dt = 16,2$ mm/s	$d \, a_{nc}/dt = 0,11$ m/s ³		Nouvelle ligne avec train voyageur prépondérant
		$d \, d/dt = 34,8$ mm/s	$d \, \Delta d/dt = 34,8$ mm/s	$d \, a_{nc}/dt = 0,23$ m/s ³		Correction de ligne avec trains marchandises
		$d \, d/dt = 27,8$ mm/s	$d \, \Delta d/dt = 25,1$ mm/s	$d \, a_{nc}/dt = 0,16$ m/s ³		Passage dans zone de point forcé
			$d \, \Delta d/dt = 29,0$ mm/s	$d \, a_{nc}/dt = 0,19$ m/s ³		Nouvelles lignes sans trafic marchandise
			$d \, \Delta d/dt = 16,2$ mm/s	$d \, a_{nc}/dt = 0,11$ m/s ³		Trafic marchandise intense
V = 250 km/h	0,50‰	$d \, d/dt = 34,7$ mm/s	$d \, \Delta d/dt = 34,7$ mm/s	$d \, a_{nc}/dt = 0,23$ m/s ³	Conseillée	Trafic purement voyageur (pas de véhicules pendulaires)
UIC 703 R (1993)	0,67‰	$d \, d/dt = 46,3$ mm/s	$d \, \Delta d/dt = 43,6$ mm/s	$d \, a_{nc}/dt = 0,3$ m/s ³	Admissible	
	0,83‰	$d \, d/dt = 57,9$ mm/s	$d \, \Delta d/dt = 69,4$ mm/s	$d \, a_{nc}/dt = 0,45$ m/s ³	Exceptionnelle	
V = 300 km/h	0,44‰	$d \, d/dt = 37$ mm/s	$d \, \Delta d/dt = 37$ mm/s	$d \, a_{nc}/dt = 0,24$ m/s ³	Conseillée	Trafic purement voyageur (pas de véhicules pendulaires)
UIC 703 R (1993)	0,59‰	$d \, d/dt = 49$ mm/s	$d \, \Delta d/dt = 49$ mm/s	$d \, a_{nc}/dt = 0,32$ m/s ³	Admissible	
	0,67‰	$d \, d/dt = 55,6$ mm/s	$d \, \Delta d/dt = 69,4$ mm/s	$d \, a_{nc}/dt = 0,45$ m/s ³	Exceptionnelle	

Tableau A3-3 – Paramètres liés à la variation du dévers.

VALEURS DES PARAMETRES UTILISES POUR LES ELEMENTS DU PROFIL EN LONG

Vitesse	Rayons de raccordements et accélérations limites	Type de trafic
$V_R \leq 160$ km/h CFF R220.46 (1989)	En bosse (convexe) : $\frac{V_R^2}{2,5}$ (0,19 m/s ²) Normal $\frac{V_R^2}{4}$ (0,31 m/s ²) Exceptionnel 3000 m Minimum En creux (concave) : $\frac{V_R^2}{4}$ (0,31m/s ²) Normal $\frac{V_R^2}{6}$ (0,46m/s ²) Exceptionnel 2000m Minimum	Trafic mixte
170km/h $\leq V \leq$ 200km/h DT DG 36 001 (1988)	En creux comme en bosse (concave + convexe) : $\frac{V_R^2}{2,5}$ (0,19m/s ²) Normal $\frac{V_R^2}{4}$ (0,31m/s ²) Exceptionnel	Tous trafics confondus
V = 250 km/h UIC 703 R (1993)	En bosse (convexe) : 22000m (0,22m/s ²) Conseillé 12500m (0,39m/s ²) Admissible 10000m (0,48m/s ²) Exceptionnel En creux (concave) : 22000m (0,22m/s ²) Conseillé 12500m (0,39m/s ²) Admissible 10000m (0,57m/s ²) Exceptionnel	Trafic purement voyageurs (pas de véhicules pendulaires)
V = 300 km/h UIC 703 R (1993)	En bosse (convexe) : 31500m (0,22m/s ²) Conseillé 18000m (0,39m/s ²) Admissible 14500m (0,48m/s ²) Exceptionnel En creux (concave) : 31500m (0,22m/s ²) Conseillé 18000m (0,39m/s ²) Admissible 12000m (0,57m/s ²) Exceptionnel	Trafic purement voyageurs (pas de véhicules pendulaires)

Tableau A4-1 – Rayons limites pour les raccordements verticaux.

ÉVALUATION DE VARIANTES DE TRACE FERROVIAIRE

Exemple de critères regroupés par thèmes

Économie du projet	Aménagement du territoire, structure sociale
Coûts de construction (coût de l'étude, des terrains, ...)	Influence sur l'habitat
Coûts d'exploitation (personnel, énergie, maintenance, ...)	Influence sur l'industrie, l'artisanat, le commerce
Coût de l'usager (temps, kilomètres parcourus, ...)	Influence sur l'agriculture, la sylviculture
Possibilités d'aménagement par étape	Influence sur l'activité économique
Durée de réalisation	Influence sur les impôts locaux
...	Influence sur les services publics
	...
Performances d'exploitation	Protection de l'environnement naturel et construit
Réserve de capacité par rapport à l'offre de référence	Pollution de l'eau
Caractéristiques géométriques du tracé	Faune, flore
Temps de parcours	Terrains agricoles
Qualité de la desserte	Zones de détente
Stabilité des horaires	Zones construites
Sécurité (des usagers et des non-usagers)	Esthétique ou intégration dans le paysage
Liaison avec d'autres modes de transport	...
...	