

R. Rodriguez à

Exploitation et sécurité des transports ferroviaires

Cours donné par

- Joaquin Rodriguez
- Chargé de Recherche à L'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité
- Intelligence Artificielle, Génie Logiciel, Recherche Opérationnelle
- Trains, Métros, Tramways, bus
- joaquin.rodriguez@inrets.fr



1

2765

Sommaire

Introduction

La signalisation ferroviaire

Risques

Principes d'espacement des trains

Principes d'enclenchements

Contrôle de la conduite

Accident de Paddington

Signalisation LGV

Normalisation ERTMS

Automatisme intégral

Modèles pour les problèmes d'exploitation ferroviaire

Exploitation ferroviaire

Problèmes de satisfaction de contraintes

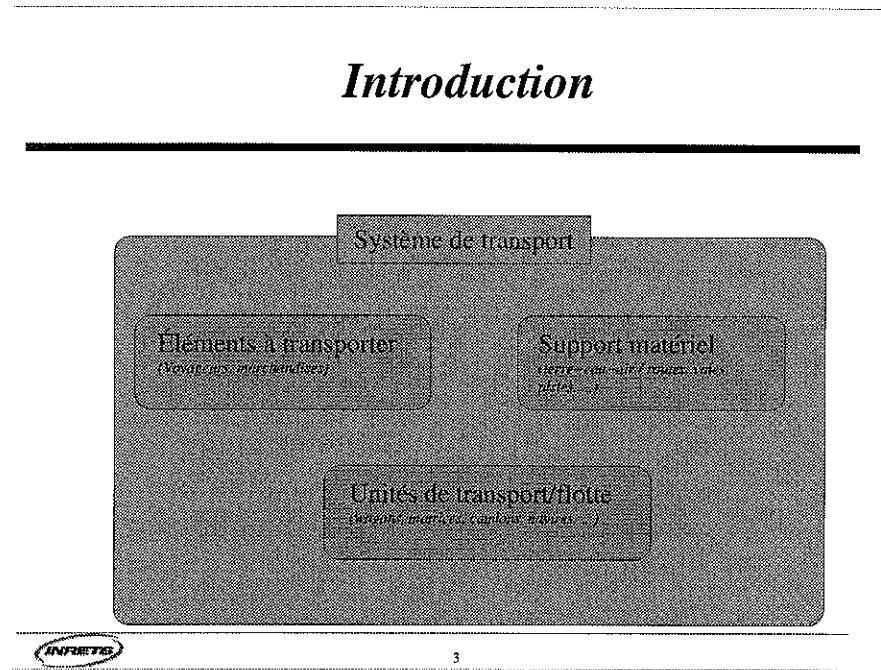
Problèmes d'ordonnancement

Problèmes de diagnostic

Applications



Introduction



Introduction

Nature du transport : service ou industrie ?

Le Transport est :

- un service (*pas de stockage, pas de modification d'objets*)
- une activité industrielle (*modification <position,temp>, incorpore dans la valeur de l'objet*)



Introduction

Exploitation d'un système de transport ferroviaire

Haut niveau de sécurité
(transport de personnes)

Qualité de service (fréquence,
ponctualité, confort, ...)



Composants et procédures
qui permettent de
préserver l'intégrité des
personnes par rapport
aux risques



Signalisation

↓
Composants et procédures
qui permettent d'offrir
un service le plus proche
de l'attente des clients



Exploitation



La signalisation ferroviaire

Risque ferroviaire :

Distance d'arrêt >> Distance de visibilité

Pas de «conduite à vue»

⇒ Transmettre des ordres au mécanicien ?

La signalisation ferroviaire

Moyens de transmission des ordres :

- sifflets
- drapeaux
- lanternes
- cocardes ou ailes amovibles
- panneaux à feux
- écrans informatiques



La signalisation ferroviaire

Types de risques :

1. Rattrapage
2. Franchissement des appareils de voie
 - convergence
 - cisaillement
 - enfourchement
 - bivoie
3. Nez à nez
4. Survitesse
5. Franchissement des passages à niveau



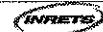
Risque de rattrapage

Principes d'espacement des trains:

Distance entre deux trains successifs > distance d'arrêt

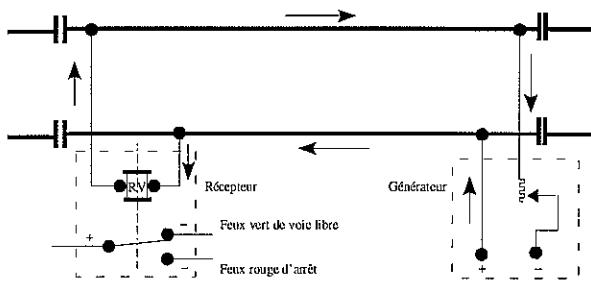
Réalisation (Block system) :

- Déetecter la présence des trains
- Diviser la voie en « cantons »
- Donner des ordres de vitesse à l'entrée de chaque canton qui vérifient en toutes circonstances le principe d'espacement



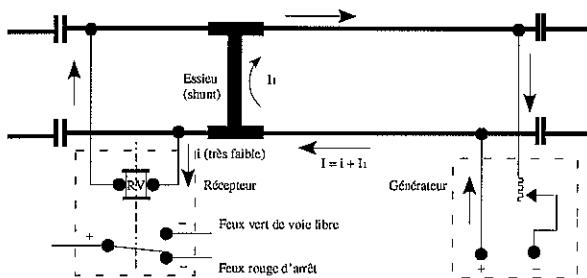
Détection de présence

Déetecter la présence des trains : Circuit de Voie (CdV)



Détection de présence

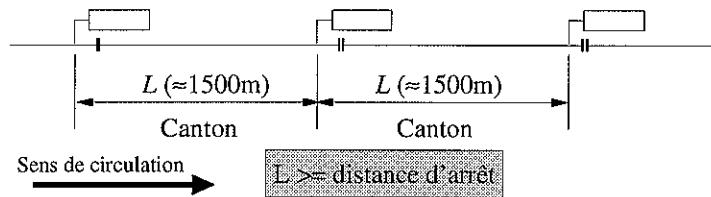
Déetecter la présence des trains : Circuit de Voie (CdV)



Principes d'espacement

Diviser la voie en cantons

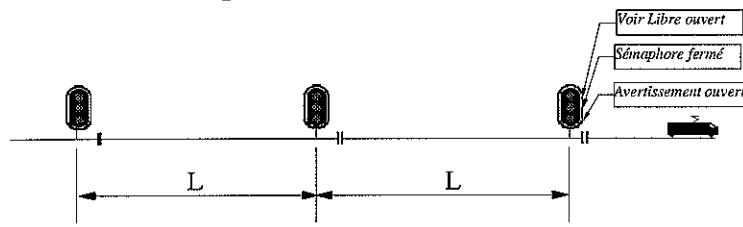
- Dans chaque canton n'est admis normalement qu'un seul train.
- Les cantons sont protégés par un signal d'arrêt «fermé» pendant toute la durée d'occupation



Principes d'espacement

Bock Automatique Lumineux (BAL) à 3 indications ou « aspects » :

Voie Libre (VL) , Avertissement A , Sémafore (S) 



Principes d'espacement

Incidence Signalisation / Débit d'une ligne (BAL 3 aspects) :

v : Vitesse maximale des trains
 T : Intervalle minimum entre deux trains
 L : Longueur des cantons

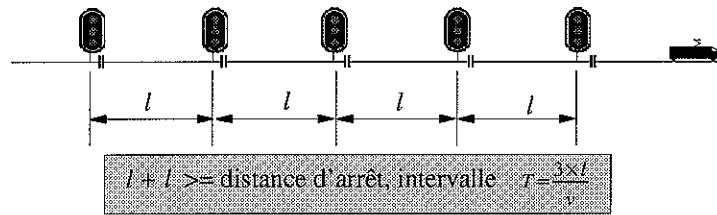
$$T = \frac{2 \times L}{v}$$

Augmenter le débit \Rightarrow Augmenter le nombre d'aspects

Principes d'espacement

BAL à 4 aspects :

BAL 3 aspects + pré-Avertissement (A) 



Permissivité

Block absolu

Jamais de franchissement d'un semaphore fermé

Problèmes :

- Interdiction de porter secours à un train par un second train
- Pénétration des trains de travaux
- Cas de panne des installations : reconnaissance à pied

Block permissif

Franchissement avec prudence d'un semaphore fermé

Procédure de franchissement :

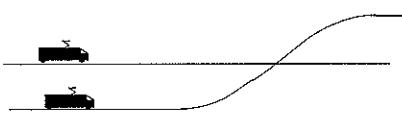
Arrêt → (Autorisation) → Marche à vue.
Marche à vue : « *s'avancer avec prudence en réglant sa vitesse compte tenu de la partie de la voie qu'il aperçoit devant lui de manière à s'arrêter* »

Risques de franchissement des appareils de voie

- Convergence



- Cisaillement

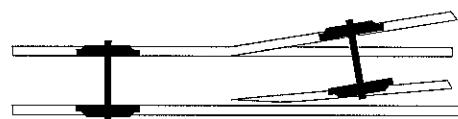


Risques de franchissement des appareils de voie

- Enfourchement



- Bivoie



Enclenchements

Rôle des enclenchements

Imposer des conditions

- aux manœuvres des appareils de voie
- à l'ouvertures des signaux de protection

Exemple pour le risque bivoie :

Le signal protégeant un aiguillage ne peut être ouvert tant que l'aiguille n'a pas une position convenable

Enclenchements

Terminologie ferroviaire

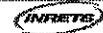
- **levier** : *organes de commande des aiguilles, signaux, autorisations et divers dispositifs*

- **positions d'un levier** :

Normale / N / + levier poussé à fond

(e.g. Signal : fermé, aiguillage : direction indiquée sur le plan de signalisation)

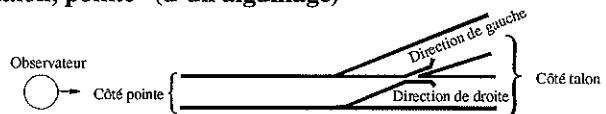
Renversée / R / - levier tiré à fond



Enclenchements

Terminologie ferroviaire

- talon, pointe (d'un aiguillage)

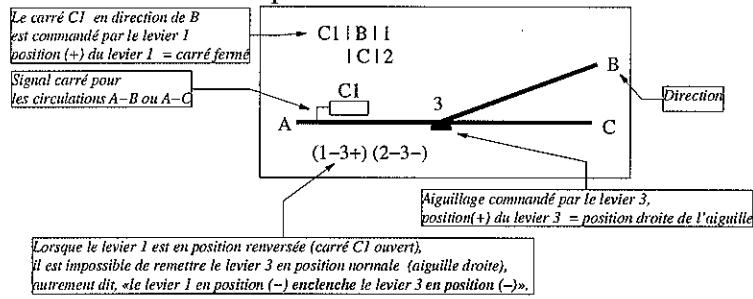


- signal carré : arrêt absolu



Enclenchements

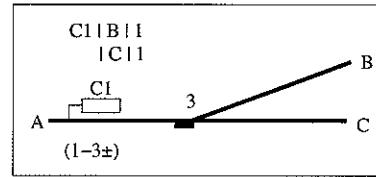
Notation « Descube » des enclenchements
Relation binaire simple



Remarque: pour les enclenchements mécaniques la réciproque est toujours vraie

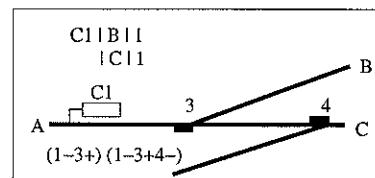
Enclenchements

Relation binaire double :
Un levier enclenche un autre levier dans l'une
ou l'autre de ses positions



Enclenchements

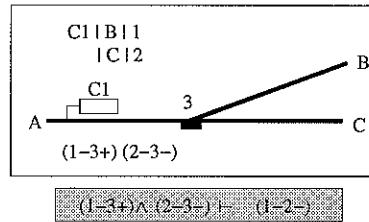
Relation conditionnelle :
relation entre plus de 2 leviers



Enclenchements

Enclenchement

- direct : matérialisé par un levier
- indirect : conséquence logique d'enclenchements directs

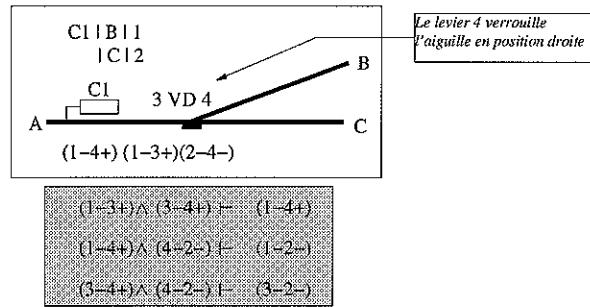


Enclenchements

Recherche tous les enclenchements indirects pour:

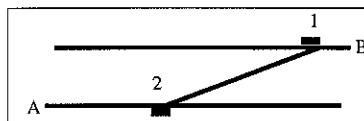
- éviter des réalisations inutiles
- détecter des enclenchements gênants

Exemple :



Enclenchements

Assurer la continuité des itinéraires A-B et B-A ?

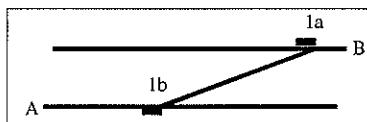


Problème :

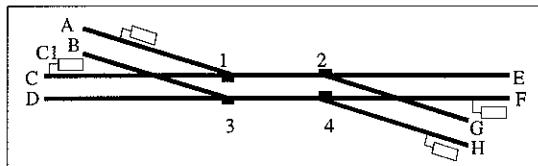
Les enclenchements (1-2+) (1+2-) rendent impossible la manœuvre des leviers

Conjugaison :

Manœuvrer de plusieurs appareils de voie par un seul levier



Enclenchements



Nombre de leviers individuels :

- 4 leviers d'aiguilles
- 4 leviers de carré
- 2 leviers de ralentissement
- 4 leviers de d'avertissement

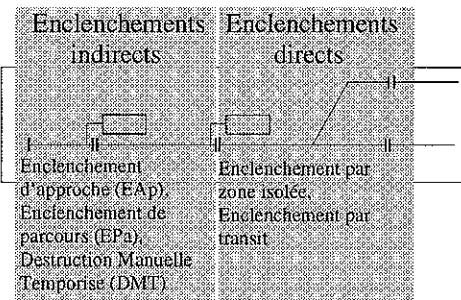
Total = 14 leviers

Ordre des manœuvres de préparation de l'itinéraire C-G

- Renverser l'aiguille 2
- Redresser l'aiguille 1
- Renverser le carré C1
- Renverser l'avertissement du carré C1

Enclosures des aiguillages

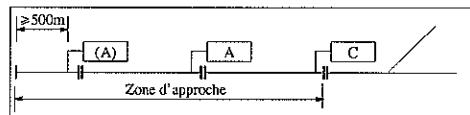
La sécurité des franchissements des aiguillages est assurée par la succession de deux types d'enclosure



Enclenchements d'approche

But : Empêcher toute modification d'un itinéraire établi lorsque le mécanicien voit le premier signal d'annonce

Exemple cas BAL 4 aspects :



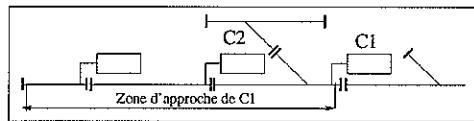
L'occupation de la zone d'approche (ZAp) enclenche à l'ouverture le carré de protection de l'aiguillage

Enclenchements d'approche

Problème : Le principe de l'enclenchement d'approche restreint la gestion des circulations

⇒ modifier la ZAp sous conditions

Exemple 1 Carré intermédiaire (BAL 4 aspects) :

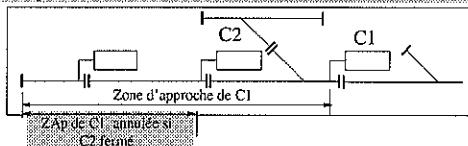


Lorsque le carré C2 est fermé, il peut être gênant
d'enclencher C1 par la partie amont de la ZAp

Enclenchements d'approche

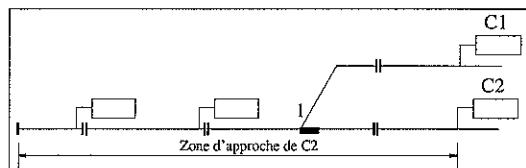
Exemple 1 Carré intermédiaire (BAL 4 aspects) :

Annuler la partie de ZAp amont d'un carré intermédiaire par sa commande de fermeture à condition qu'il soit lui aussi soumis à l'enclenchement d'approche (continuité de la protection)



Enclenchements d'approche

Exemple 2 Aiguillage pris en pointe (BAL 4 aspects) :

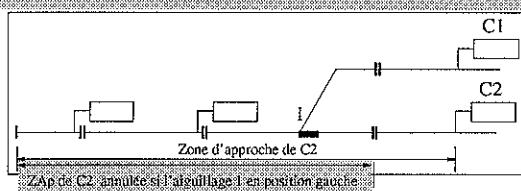


Lorsque l'aiguillage 1 est en position gauche, il peut être gênant d'enclencher C2 par la partie amont de l'aiguillage

Enclenchements d'approche

Exemple 2 Aiguillage pris en pointe (BAL 4 aspects) :

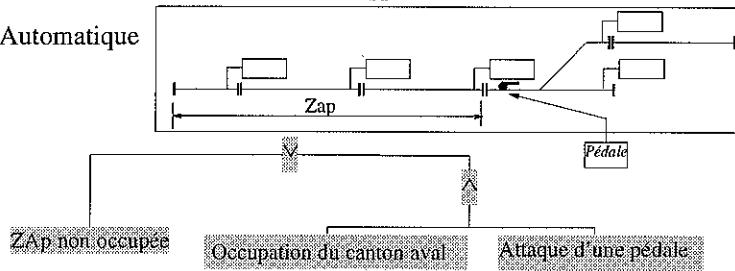
Annuler la partie de ZAp amont d'un aiguillage par sa position



Enclenchements d'approche

Libération de l'enclenchement d'approche

• Automatique



• Manuelle

Par l'ariguilleur au moyen d'un commutateur de fermeture du carrefour
après observation d'un temps moral de 1 à 3 minutes

Enclenchements directs des aiguillages

Libération de l'enclenchemen^tt d'approche

↓
Fermeture du carré de protection

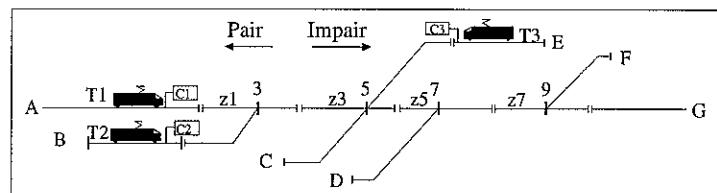


Il faut un nouvel enclenchemen^tt lorsqu'une circulation est en transit entre le carré de protection et l'aiguillage

→ Enclenchements des aiguillages

- └─• Enclenchemen^tt par zone isolée
- └─• Enclenchemen^tt de transit

Enclenchements directs des aiguillages

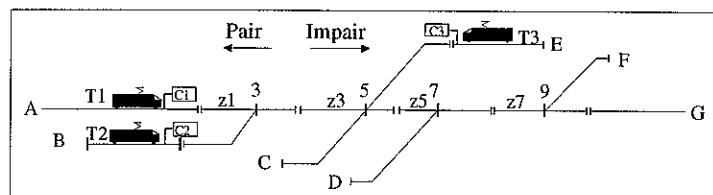


Enclenchements des aiguillages

Aiguillages	A-G	F-B
z1	z1	z7,z5,z3,z1
z3	z1,z3	z7,z5,z3
z5	z1,z3,z5	z7,z5
z7	z1,z3,z5,z7	z7

⇒ Chaque aiguillage est à
enclencher par toutes les zones
« Transit rigide »

Enclenchements directs des aiguillages



Transit souple : Libérer l'enclenchement au fur et à mesure de la libération des zones par le train

- ⇒ Tenir compte du sens
- Grille de sens pour les itinéraires
 - 1 relais de transit par sens par zones

Réalisation :

Ouverture du signal ⇒ désexcitation des relais de transit

Après fermeture du signal et libération de la zone ⇒ réexcitation du relais de transit concerné

R. de jong 2/2

Enclosures entre itinéraires de sens inverses

But : Empêcher à deux mouvements de sens contraires, l'accès à une même partie de voie.

- Enclosure de parcours banalisé
- Enclosure de voie unique

2769 bij

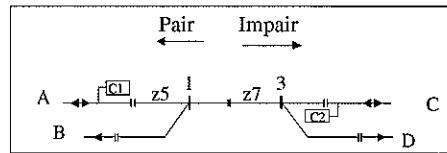
Enclenchements entre itinéraires de sens inverses

Enclenchement de parcours banalisé (itinéraire chevauchant)

Un *relais de banalisation* conditionne l'ouverture des signaux origines des itinéraires

Conditions d'excitation du relais de banalisation :

- libération du dernier transit de sens contraire
- formation de l'itinéraire



- Le relais de banalisation du signal C1 excité si :
- relais du transit impair de Z5 excité
 - contrôle positif des positions des aiguilles de l'itinéraire



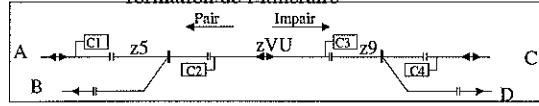
Enclenchements entre itinéraires de sens inverses

Enclenchement de voie unique

Un relais de sens conditionne l'ouverture des signaux donnant l'accès à la partie voie unique

Conditions d'excitation du relais de sens :

- libération du dernier transit de sens contraire
- libération de la zone commune
- sens inverse non pris
- formation de l'itinéraire



Le relais de sens impair de zVU excité si :

- relais du transit pair de z9 excité
- zone zVU libérée
- relais de sens pair de zVU désexcité
- contrôle positif des positions des aiguilles de l'itinéraire



Contrôle de la conduite

Règle fondamentale : « Tout, agent, quel que soit son grade, doit obéissance passive et immédiate au signaux »

Problème : Défaillance du mécanicien

Dispositif :

- (1) Détection/identification
- (2) Action directe sur les engins moteurs

Contrôle de la conduite

Manette « homme-mort »

VACMA (veille automatique avec contrôle de maintien d'appui)

But : Détecter l'état de vigilance du mécanicien

Principe :

- (1) Signal sonore
- (2) Si pas d'action sur la manette
Arrêt du train en freinage d'urgence



Contrôle de la conduite

Répétition des signaux (« crocodile »)

But : Déetecter l'état de vigilance du mécanicien
lors de la visibilité des signaux

Principe :

(1) Cas signal fermé

Indication sonore continue

Cas signal ouvert

Indication sonore brève

(2) Si indication sonore continue

Si dans les 5 secondes pas d'action du dispositif de vigilance

Arrêt du train en freinage d'urgence

sinon

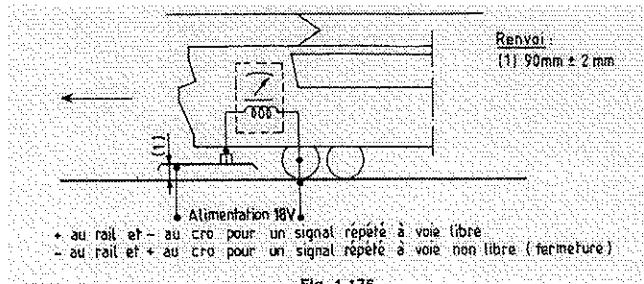
Arrêt du son



Contrôle de la conduite

Répétition des signaux (« crocodile »)

Schéma de réalisation



Contrôle de la conduite

Répétition des signaux (« crocodile »)

Les informations reçues et les actions du mécanicien sont enregistrées sur une bande graphique

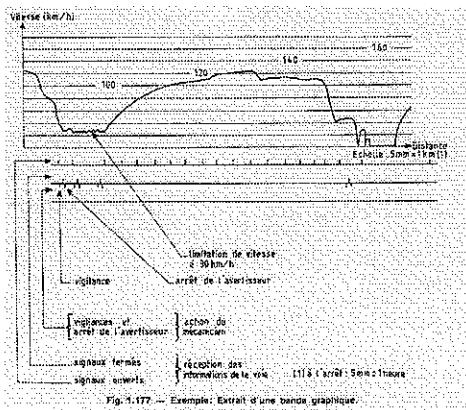


Fig. 1.177 --- Exemple : Extrait d'une bande graphique.

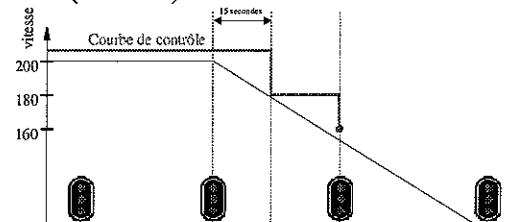
Contrôle de la conduite

Répétition des signaux par balise et contrôle de vitesse

Principe similaire au crocodile mais réalisé avec une balise

+

Contrôler le ralentissement après le signal de préannonce pour les grandes vitesses (200km/h)

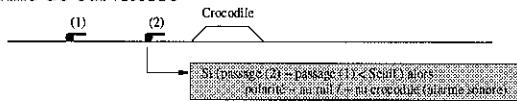


Contrôle de la conduite

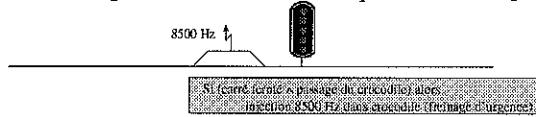
Contrôle de vitesse ponctuel (type gare de Paris-Lyon 1978)

But : Contrôler ponctuellement un taux de vitesse

Principe : Réutiliser la répétition sonore « signal fermé » comme alarme de survitesse



Extension : Dispositif d'arrêt automatique (DAAT – Ligne C RER 1988)



Contrôle de la conduite

Contrôle de vitesse à balises (KVB-1990)

But : Contrôler en continue la vitesse

Principe : Calculer à tout instant une courbe de vitesse à partir des paramètres du mobile, de la voie et de la signalisation.

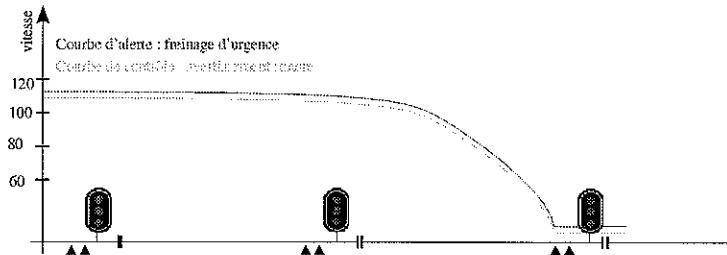
Réalisation :

- Deux balises (émission paramètres de la voie et de la signalisation)
- Une antenne (réception)
- Une centrale tachymétrique (vitesse, accélération du train)
- Un panneau de saisie des paramètres du mobile
- Un panneau de visualisation des alarmes
- Un calculateur (interface homme-machine, commande des organes)



Contrôle de la conduite

Contrôle de vitesse à balises (KVB-1990)



Contrôle de la conduite

Contrôle de vitesse à balises (KVB-1990)

Avantages:

- Aucun accident sur 10 ans causé par non respect de la signalisation sur les trains équipés
- Pas de modifications profondes du matériel
- Simplicité des procédures
- Grande sécurité des composants

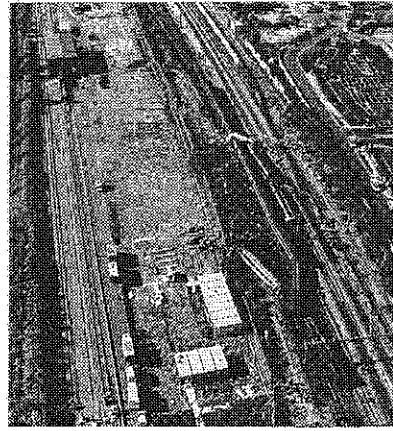
Inconvénients:

- Diminution du débit
- Transmission ponctuelle
- Le système n'est pas « de sécurité » (saisie manuelle des caractéristiques du train, patinage/enrayage)



Accident de Paddington

Mardi 5 octobre 1999 : collision entre un train de banlieue et un InterCity



Accident de Paddington

Bilan : 120 morts, 150 blessés



Accident de Paddington

Scénario :

6h03 départ train InterCity Cheltenham–Paddington (1A09 – Thames Trains)
8h06 départ du train de banlieue Paddington–Bedwyn, automoteur diesel 3 caisses
(1K20 – Great Western)

Le train 1K20 doit passer de la voie 4 à la voie 1, tracé par l'aiguilleur des itinéraires du 1K20 jusqu'au signal SN109 de la voie 3 (présente l'indication «at danger»—feu rouge).

Arrivée sur la voie 2 à hauteur de la bifurcation Ladbroke Grove du train 1A09, ralentissement (60 km/h), tous les signaux sont verts

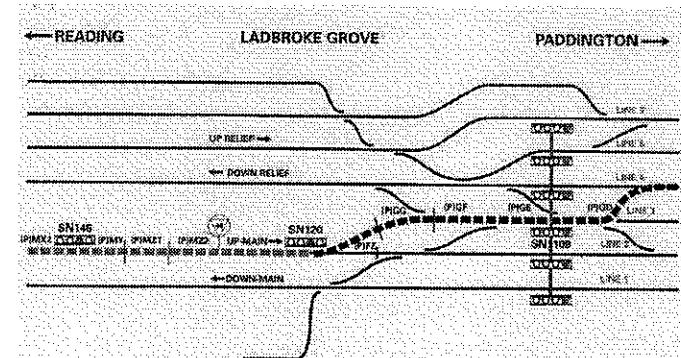
L'aiguilleur observe le franchissement du signal SN109 par le train 1K20 (80 km/h), tentative d'arrêter le 1A09 en fermant le signal SN120

8h 11 collision par prise en écharpe du 1A09 par le 1K20 700 m après le franchissement du SN109



Accident de Paddington

Plan des voies Ladbroke Grove



Accident de Paddington

Enquête

Cause immédiate : passage du signal SN109 fermé par le conducteur du 1K20

Enquêteur : « *Notre conviction est qu'il s'agit d'un défaut du système, et que toute action ou toute omission de la part du mécanicien ne peut être regardée que comme l'un des facteurs responsables de l'accident* »

Pas de défaillance de la signalisation

Le signal SN109 a été franchi 8 fois depuis son installation

Conducteurs : « *Le signal SN109 est difficile à voir sous certains angles et a été impliqué dans huit accidents depuis 1993* ».

Entre Mars 1998 et Mars 1999 643 franchissements de signaux (+ 8%)

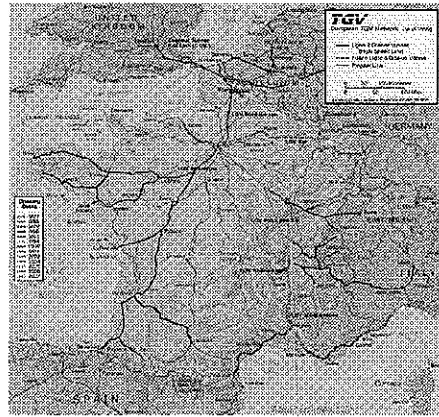
Le train 1K20 a effectué le cisaillement maximum (remodelage des gares)

L'accident aurait pu être évité par un système de contrôle de vitesse type « KVB »



Signalisation LGV

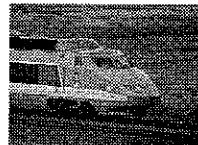
Plan des Lignes à
Grande Vitesse (LGV)



Signalisation LGV

Types de rame TGV

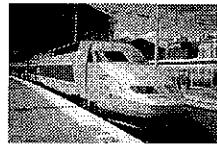
TGV Sud-Est (1981)



TGV Atlantique (1989)



TGV Réseau (1992)



Signalisation LGV

Signalisation LGV : TVM (« Transmission Voie Machine »)
Concepteur : CSEE Transport

Types de signalisation LGV :

- **TVM 300**
- **TVM 430**

Signalisation LGV

Signalisation TVM 300

Étudiée pour les distances d'arrêts :

6300 m : 270 km/h

8000 m : 300 km/h

Signalisation en cabine

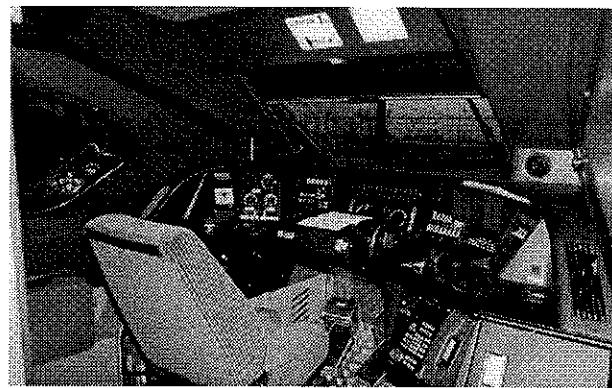
Conduite manuelle

Contrôle de vitesse



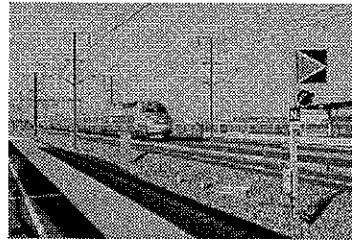
Signalisation LGV

Cabine TGV



Signalisation LGV

Matérialisation des entrées de canton par un repère



Signalisation LGV

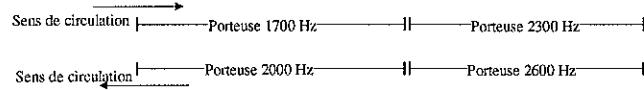
Principe :

Envoi ponctuel et continu d'informations

- Élaborer des consignes de vitesse
- Courbes de contrôle

Réalisation

- Émission d'un signal sur le rail d'un canton modulé avec 18 fréquences : 2^{18} informations

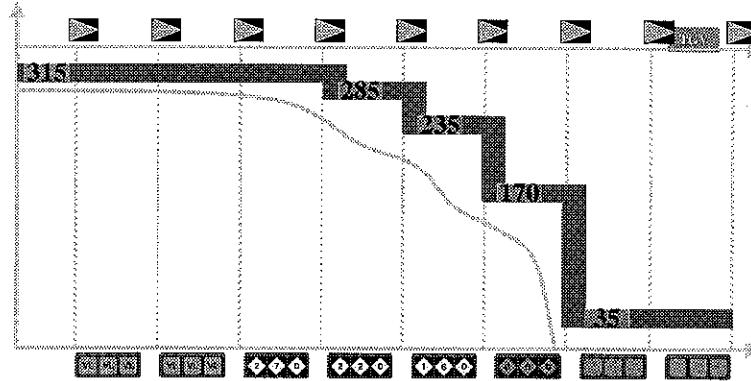


- Boucle à saut de phase : 2^{14} informations



Signalisation LGV

Taux de vitesse et courbe de contrôle TVM 300



Signalisation LGV

Limites de la TVM 300

Impossibilité d'élaborer une courbe de contrôle de vitesse parabolique

Utilisation d'un canton tampon « excessif »

Signalisation LGV

Signalisation TVM 430

Principes TVM 300 conservés :

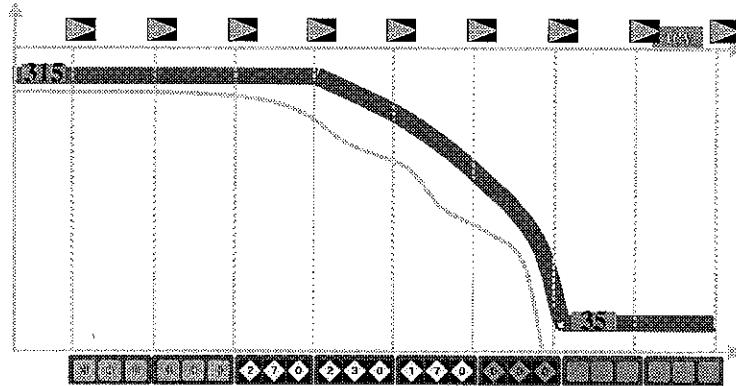
- Transmission par le rail
- Marquage des débuts de canton par un repère
- Conduite manuelle
- Contrôle de vitesse

Extensions :

- Émission d'un signal modulé avec 21 fréquences : 2^{21} informations
- Boucle à saut de phase : 2^{18} informations

Signalisation LGV

Taux de vitesse et courbe de contrôle TVM 430



Signalisation LGV

Tableau type de TGV / signalisation LGV

	TVM 300 TGV-Sud-Est	TVM 300 TGV-Atlantique	TVM 430 TGV-Réseau
Vitesse Max (km/h)	270	300	300
Longueur du canton (m)	2100	2000	1500
Freinage Nominal (m)	8400 4 cantons	10000 5 cantons	7500 5 cantons
Intervalle minimum (min)	5	4	3

Normalisation ERTMS/ETCS

ERTMS :European Rail Traffic Management System
ETCS : European Train Control System

Objectif : Interopérabilité.

Définition :

Faire circuler les trains sur différents réseaux européens

1. sans arrêter les trains aux frontières
2. sans changer les motrices aux frontières
3. sans arrêter les mécaniciens aux frontières
4. sans demander aux mécaniciens d'autres compétences de conduite que celles liées au système ERTMS/ETCS

Normalisation ERTMS/ETCS

Interopérabilité technique :

Définir les interfaces entre les différents composants (voie , embarqué) pour réaliser correctement les échanges d'informations

Problème

Une modification de la signalisation a des impacts financiers importants

→ Trois niveaux ERTMS/ETCS

Normalisation ERTMS/ETCS

ERTMS Niveau 1:

Sur-couche du système de signalisation existant

Deux options

- avec signalisation en cabine
- sans signalisation en cabine

Cantonnement : fixe

Communication : EUROBALISE EUROLOOP

Contrôle de vitesse : de sécurité

Localisation : non

Occupation de la voie : oui

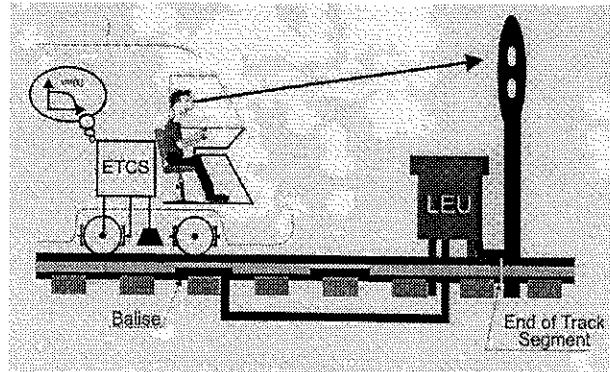
Signalisation en cabine : oui

Intégrité des trains : dispositif sur la voie



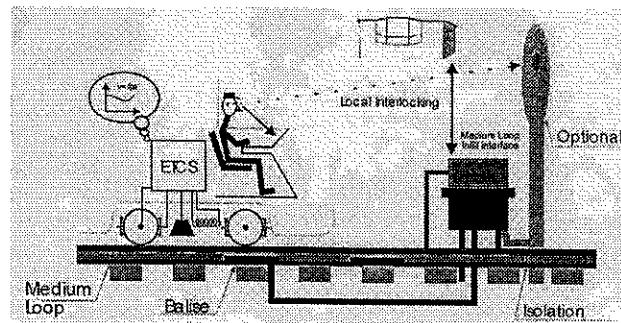
Normalisation ERTMS/ETCS

Schémas ERTMS Niveau 1:



Normalisation ERTMS/ETCS

Schémas ERTMS Niveau 1:



Normalisation ERTMS/ETCS

ERTMS Niveau 2:

Sur-couche du système de signalisation existant ou comme système de signalisation autonome.

Signalisation en cabine

Cantonnement : fixe

Communication : radio (GSM R), dispositif de transmission ponctuelle pour le calibrage de l'odométrie

Contrôle de vitesse : de sécurité

Localisation : calculée en fonction de la position relative envoyée par le train, l'occupation de la voie, les itinéraires tracés

Occupation de la voie : non

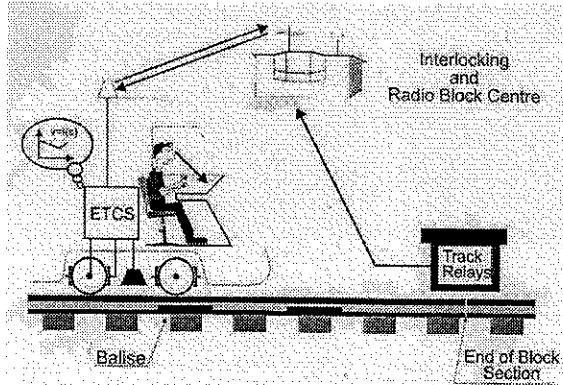
Signalisation en cabine : oui

Intégrité des trains : dispositif sur la voie



Normalisation ERTMS/ETCS

Schémas ERTMS Niveau 2:



Normalisation ERTMS/ETCS

ERTMS Niveau 3:

Système de signalisation complet sans signaux latéraux

Cantonnement : fixe et/ou mobile

Communication : radio (GSM R), dispositif de transmission ponctuelle pour le calibrage de l'odométrie

Contrôle de vitesse : de sécurité

Localisation : calculée en fonction de la position relative envoyée par le train, l'occupation de la voie, les itinéraires tracés

Occupation de la voie : non

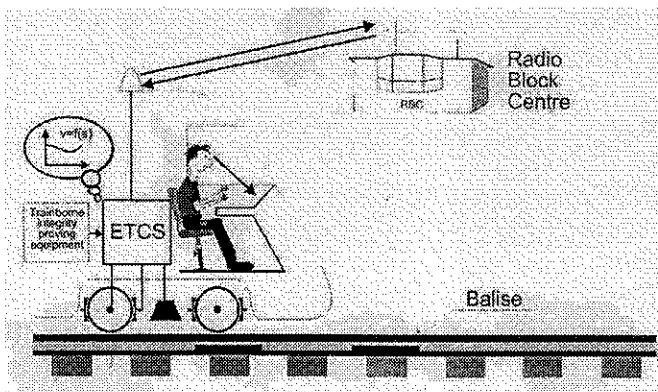
Signalisation en cabine : oui

Intégrité des trains : dispositif à bord des trains



Normalisation ERTMS/ETCS

Schémas ERTMS Niveau 3:



Automatisme intégral

Dans un système « fermé » le nombre de situations de conduite est faible

L'ensemble des situations de conduite peut être couvert par un automate

➡ Automatisme intégral

Avantages :

- + souplesse
- + sûreté
- + fréquence

Historiquement :

Idée (1950)

Prototype/recherche (1970)

Mise en service VAL-Lille (1983)

Automatisme intégral

Systèmes automatiques en France:

VAL (Véhicule Automatique Léger – 1983)

MAGGALY (Métro Automatique à Grand Gabarit de l'Agglomération Lyonnaise – 1992)

MÉTÉOR (Métro Est–Ouest Rapide – 1998)

Automatisme intégral

VAL

Espacement des trains :

Canton Fixe (2 aspects)

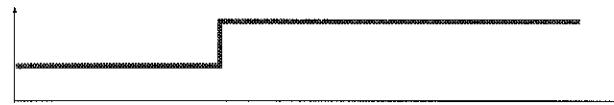
Contrôle de vitesse :

Tapis Pilote

Croisement équitemps



« Courbe » de vitesse



Automatisme intégral

VAL

Contrôle de vitesse :

3 modes de conduite

Mode Normal (MN)

Mode Perturbé (MP) : arrêt en limite du canton

Mode Accostage : vitesse constante 0.8 m/s

1 tapis pilote par mode MN, MP et par sens (si double sens)

Fonctions de sécurité :

Technologie Relais

Monoprocesseur codé (VAL Chicago – Taïpeh)

Quai des stations :

Portes palier



Automatisme intégral

VAL

Régulation ligne:

Si retard < 1 mn rattrapage sur temps arrêt au quai et interstation
sinon décalage des rames d'un sens et utilisation de la réserve en terminus

Panne :

Accostage à 0.8 m/s par la rame amont

Couplage des rames

Évacuation au garage-atelier

Opérateurs PCC :

Supervisent les circulations, l'état des rames (télémesures)

Procédures d'exploitation et de sécurité (télécommandes)

Contact phonie avec les rames

Vidéo surveillance des stations

