

Automatismes et conduite des trains (*)

Claude HENNEBERT

Adjoint au Chef du service
des études techniques
de la Régie Autonome des Transports Parisiens

Michel FICHEUR

Chef du département transport, urbanisme, logement
de la Mission scientifique et technique
au Ministère de la Recherche et de l'Industrie.

La mission d'une entreprise de transport public est d'assurer en toute sécurité et au moindre coût global pour la collectivité la permanence et la qualité du service de transport dont elle a la charge.

Quatre notions importantes apparaissent dans cette définition de mission :

- la sécurité des personnes, largement reconnue pour ce qui concerne les transports ferroviaires mais dont le maintien doit être une préoccupation constante;

- la disponibilité du système de transport, indispensable en termes socio-économiques;

- la qualité du service offert;

- la recherche du coût minimal au niveau global : investissements, exploitation, renouvellement.

L'introduction des automatismes de conduite ou de contrôle de la conduite a pour but d'augmenter les performances des systèmes de transport (capacité, qualité de service...) au moindre coût global (en particulier par une plus grande productivité des moyens matériels : grandes infrastructures, équipements, matériels roulants).

Encore faut-il que cette adjonction ne soit pas en partie illusoire faute d'une disponibilité suffisante de ces automatismes et surtout qu'elle ne soit pas réalisée à l'encontre de la sécurité.

1. Les niveaux d'automatisation (fig. 1)

Partant d'un état initial, la conduite manuelle libre, où l'entière respon-

sabilité de la marche du train repose sur le conducteur, différents niveaux d'automatisation peuvent être mis en œuvre :

- la conduite manuelle contrôlée avec des automatismes de contrôle ponctuel — « crocodiles », balises — qui permettent de s'assurer de la prise en compte par le conducteur des informations restrictives de la signalisation;

- la conduite manuelle contrôlée avec des automatismes de contrôle continu de vitesse (ou « contrôle enveloppe ») qui assurent qu'en aucune circonstance le train ne peut se trouver dans une situation dangereuse;

- la conduite automatique avec présence d'un conducteur;

- l'automatisme intégral (sans conducteur).

Ces deux derniers niveaux incluent bien évidemment un contrôle enveloppe.

Nous citerons aussi pour mémoire les systèmes d'aides à la conduite — vitesse imposée, tir au but — qui permettent d'améliorer la régularité et la précision de la marche.

2. Principe de conservation de la sécurité globale

La sécurité peut être définie comme la probabilité de non accident.

Ceci, qui peut paraître une évidence, traduit le fait que, au niveau global du système de transport, la sécurité de fonctionnement résulte de la conjugaison de nombreux paramètres. Prenons l'exemple de la probabilité de collision entre deux trains. Elle est la résultante des probabilités de défaillance de la fonction de protection des trains (signalisation) et de la probabilité que deux trains se trouvent dans des conditions de rapprochement potentiellement dangereuses. En conséquence, si pour augmenter la capacité de transport sur une ligne on désire augmenter le nombre de trains, donc diminuer l'intervalle, il faut renforcer les automatismes de protection des trains, voire remplacer l'homme par un automatisme de conduite, de façon que le niveau de sécurité global du système de transport ne soit pas altéré par l'augmentation de la probabilité de rattrapage due au rapprochement des trains.

	Conduite manuelle libre	Conduite manuelle contrôlée	Pilotage automatique	Automatisme intégral
Conduite automatique			●	●
Contrôle continu		●	●	●
Contrôles ponctuels		●	●	●
Conducteur	●	●	○	

Fig. 1. — Les niveaux d'automatisation.

(*) L'exposé de MM. Michel Ficheur et Claude Hennebert a été présenté aux Journées Rail et Recherche, Paris, 1-3 décembre 1982 R.G.C.F., mars 1983.

La figure 2 illustre l'application de ce principe de conservation de la sécurité globale à la mise en œuvre des différents niveaux d'automatisation liés à la conduite des trains. Ainsi, l'automatisme de répétition ponctuelle de l'état des signaux renforce et contrôle la vigilance du conducteur, mais ne contrôle pas sa réaction ni la vitesse du train, et diminue la probabilité d'accident en cas de défaillance du conducteur par une commande d'arrêt d'urgence au franchissement indu des signaux d'arrêt (l'arrêt peut se faire au-delà du point protégé). Le contrôle continu de la conduite manuelle renforce la protection par rapport à la solution précédente puisque, complètement indépendant du conducteur, il évite tout risque en cas de défaillance de celui-ci (la probabilité de défaillance globale est le produit des probabilités de défaillance de l'homme et de l'automatisme). Si on ajoute une fonction de conduite automatique, le gain n'est pas égal à sa probabilité de défaillance car, en général, cette fonction n'est pas complètement indépendante de la fonction de contrôle et la vigilance du conducteur est moindre qu'en conduite manuelle. Dans ces conditions, pour profiter pleinement des potentialités de la conduite automatique en matière de réduction de l'intervalle, il faut garantir une réduction de la probabilité de défaillance du système de contrôle continu par rapport à ce qui était jugé satisfaisant pour la conduite manuelle contrôlée. Pour l'automatisme intégral il faut évidemment une

réduction supplémentaire de cette probabilité pour compenser l'absence de l'homme.

On constate ainsi que, plus le niveau d'automatisation est élevé, plus la démonstration du caractère sécuritaire des automatismes de contrôle doit être convaincante.

3. Sécurité, disponibilité et qualité du service

Conformément au principe de conservation de la sécurité globale, ayant identifié pour un mode d'exploitation donné toutes les fonctions qui concourent à la sécurité à des degrés divers, toute indisponibilité de l'une de ces fonctions doit être compensée de telle façon que le niveau de sécurité global soit inchangé. Reprenant l'exemple ci-dessus, si un automatisme de conduite ou de protection des trains n'est plus disponible, on peut poursuivre l'exploitation avec les fonctions qui subsistent mais en restreignant les conditions de circulation des trains : augmentation de l'intervalle ou diminution de la vitesse autorisée ou les deux. La permanence du service est donc assurée avec le même niveau de sécurité globale mais au prix d'une dégradation de la qualité du service.

La figure 3 illustre le fait que la présence d'un conducteur permet de disposer d'une hiérarchie de niveaux dégradés d'exploitation : en cas de panne de la fonction de conduite automatique, l'exploitation en conduite manuelle avec contrôle continu

permet de minimiser la dégradation de l'intervalle; si la fonction de contrôle continu est indisponible, la conduite manuelle avec contrôles ponctuels permet encore d'assurer le service dans des conditions temporairement acceptables; enfin, s'il y a indisponibilité de toutes les fonctions de contrôle (circuit de voie calé à l'arrêt par exemple) la conduite manuelle libre dans le respect des consignes amène, certes, à une dégradation importante mais permet d'assurer la continuité du service. A l'inverse, l'automatisme intégral conduit sans transition à une dégradation très importante, voire à un blocage momentané du système de transport, en cas d'indisponibilité d'une fonction d'automatisme ou de contrôle de la conduite.

Ainsi, plus la dégradation potentielle de la qualité du service est grande suite à la panne d'un automatisme, plus l'exigence de disponibilité de cet automatisme doit être importante. C'est en particulier le cas pour l'automatisme de conduite intégral.

4. Sécurité, disponibilité et fiabilité

La sécurité globale repose principalement sur l'ensemble des dispositifs de protection automatique du mouvement des trains que l'on appelle souvent « systèmes de sécurité » du fait qu'ils sont conçus et réalisés de telle manière que leur probabilité de défaillance contraire à la sécurité soit extrêmement faible. Cette conception consiste à faire en sorte que les réactions du système en cas de défaillance soient orientées dans le sens de la sécurité : en général, commande automatique d'arrêt d'urgence et inhibition du système. Les systèmes de sécurité ont donc une propension naturelle contraire à la disponibilité qui doit être compensée par une architecture appropriée et une bonne fiabilité.

Une solution pour assurer la disponibilité d'une fonction consiste à assurer une redondance — active ou passive — du système qui la réalise. Mais ce n'est pas toujours possible (circuits de voie par exemple), la complexité de l'équipement est accrue du fait des dispositifs de basculement et surtout cela conduit à des coûts élevés. Cette solution est

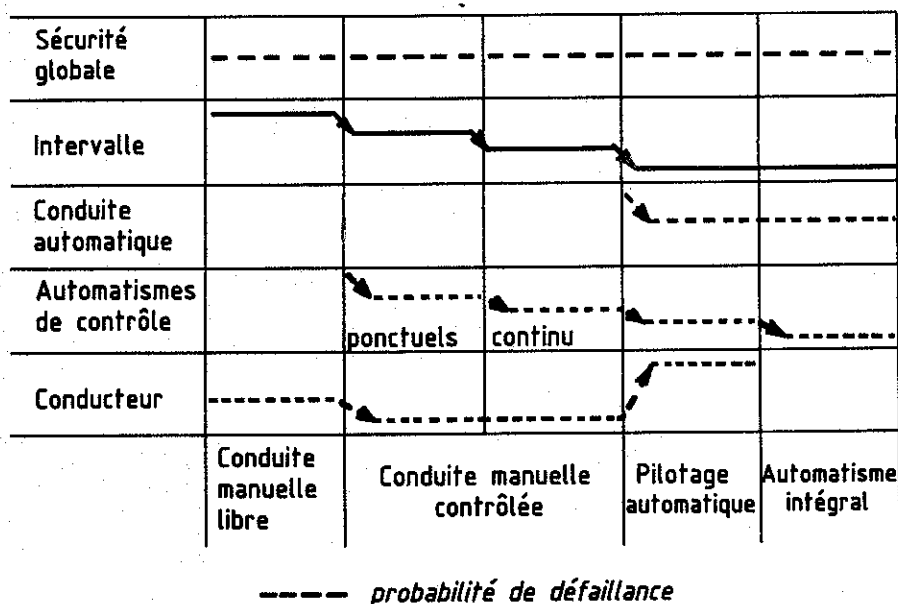


Fig. 2. — Principe de conservation de la sécurité globale.

donc utilisée principalement dans le cas de l'automatisme intégral.

Par contre, avec la présence d'un conducteur, l'architecture du système peut être telle que l'on dispose d'une hiérarchie de modes de conduite qui minimise la dégradation de la qualité du service entre chaque mode. Dans ce cas, on préférera exiger une grande fiabilité de chaque élément du système dont le coût, bien qu'élevé, est plus faible que celui de systèmes moins fiables redondancés.

Entre le pilotage automatique avec présence d'un conducteur et l'automatisme intégral, les automatismes de conduite et de contrôle de la conduite ne présentent donc pas de différences fondamentales au niveau des principes de réalisation ou de la technologie, mais plutôt au niveau de leur structure fonctionnelle et de leur architecture du fait des contraintes de disponibilité.

5. Sécurité, disponibilité et maintenabilité

La disponibilité pour l'exploitant dépend aussi beaucoup du délai d'intervention et de remise à disposition suite à une défaillance, c'est-à-dire de la bonne maintenabilité des systèmes. Ceux-ci doivent donc être conçus de façon telle qu'elle favorise l'identification rapide du sous-ensemble défectueux et l'échange standard qui permettent de remettre la fonction en service dans des délais brefs, la réparation du sous-ensemble étant faite ensuite « off-line » sans incidence pour la disponibilité.

Par ailleurs, un dispositif « de sécurité » ne doit pas pouvoir devenir non sécuritaire à la suite d'une opération de maintenance quelle qu'elle soit. Il est donc impératif que cette maintenance soit aisée, que les réglages soient minimisés, que les tests après intervention soient simples et puissent être exhaustifs.

6. Adaptabilité

En plus des diverses qualités évoquées précédemment, il paraît indispensable d'exiger une très grande adaptabilité des automatismes de conduite, dans le temps et dans l'espace, et cela pour de nombreuses raisons.

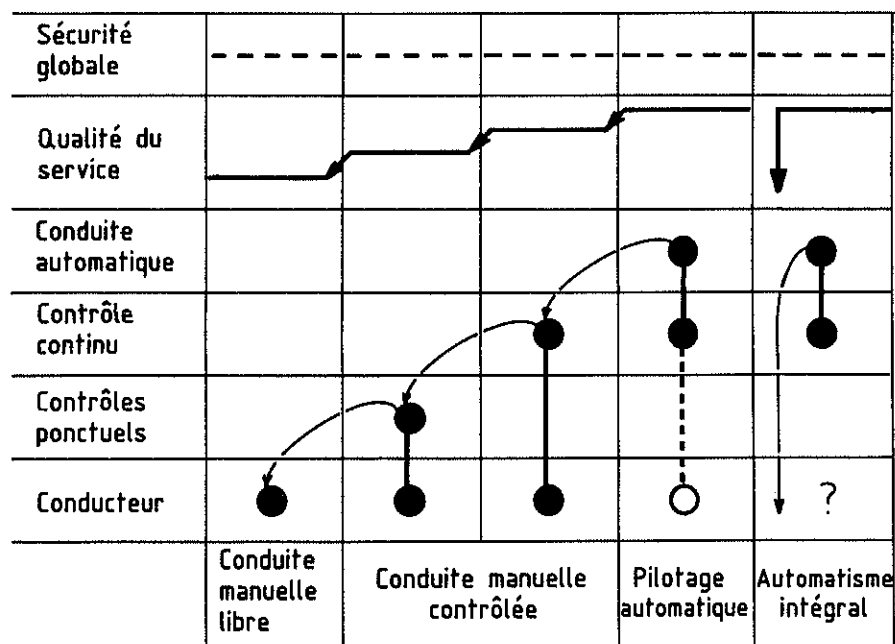


Fig. 3. — Sécurité, disponibilité et qualité de service.

6.1. L'évolution du contexte

Au cours de leur durée de vie, les équipements ferroviaires en général et ceux-ci plus particulièrement sont soumis à de multiples variations de leur contexte : modifications des caractéristiques et des méthodes d'exploitation, introduction de nouveaux matériels roulants, progrès technologiques.... Il est donc important qu'ils puissent être adaptés aisément, et surtout sans interruption de leur utilisation, en fonction de ces évolutions.

6.2. Les coûts et délais de développement

Du fait des nombreuses exigences à satisfaire — fiabilité, maintenabilité, disponibilité et surtout sécurité — le développement de ces systèmes, en particulier les plus performants, est très long et très coûteux. Il paraît donc souhaitable d'amortir ces efforts de développement sur un maximum d'applications. Pour cela, c'est la conception générale fonctionnelle et technique d'une génération de systèmes qui doit résister le plus longtemps possible au phénomène d'obsolescence grâce à une capacité d'adaptation suffisante et une génération de systèmes doit aussi pouvoir s'adapter à des besoins différenciés selon les réseaux pour maximaliser son champ d'applications.

6.3. La standardisation au niveau « réseaux »

Pour des raisons évidentes de facilité d'exploitation, de gestion du parc de matériels roulants, de maintenance, de formation des personnels..., une entreprise gérant un réseau recherche la standardisation de ses équipements et surtout des automatismes de conduite qui doivent donc pouvoir être adaptés aux caractéristiques d'exploitation des diverses parties du réseau, et aux divers matériels roulants et équipements existants. Mais compte tenu de la durée de mise en œuvre d'une génération de systèmes sur un réseau existant important (par exemple : 8 ans pour le métro de Paris), la standardisation exige, en plus de l'adaptabilité géographique, une grande adaptabilité dans le temps aux évolutions fonctionnelles et technologiques.

6.4. L'« exportabilité »

Il est fortement souhaitable, au plan de l'intérêt général, que les systèmes développés et éprouvés pour satisfaire des besoins nationaux puissent être proposés par les constructeurs sur le marché mondial. Les facultés d'adaptation de ces systèmes doivent être alors beaucoup plus grandes que ce qui est nécessaire pour le marché national de façon à pouvoir satisfaire des conceptions fonctionnelles et des normes techniques très variées.

Seule une architecture des systèmes présentant une très grande modularité fonctionnelle et technique peut permettre de satisfaire ces nombreuses contraintes d'adaptabilité. C'est donc dès le début de la conception des systèmes que l'ensemble de ces contraintes doivent être définies et prises en compte.

7. Évolution technologique

Jusque vers les années 1960, la fonction de protection des trains était limitée à la signalisation latérale d'espacement et de vitesse et à la protection des itinéraires et réalisée par des ensembles électromécaniques selon les principes de la sécurité intrinsèque (en présence d'une panne quelle qu'elle soit, le système prend toujours un état plus restrictif que celui qu'il aurait eu sans cette panne).

Au cours des années 1960, le développement de l'électronique a permis de concevoir des automatismes plus performants assurant de nouvelles fonctions (cab-signal, contrôle continu de vitesse...). Les circuits réalisés à partir de composants discrets (semi-conducteurs, résistances, capacités, self...) sont conçus encore selon les principes de la sécurité intrinsèque bien que cela se révèle plus difficile qu'avec les technologies électromécaniques (il faut en effet connaître toutes les pannes possibles pour chaque composant et étudier les conséquences de chacune).

Avec le développement des circuits LSI et surtout des microprocesseurs et micro-ordinateurs dans les années 1970, une nouvelle évolution est possible vers des systèmes encore plus performants. Mais les principes de la sécurité intrinsèque ne peuvent plus être appliqués avec des composants aussi complexes dont on ne peut connaître de façon exhaustive toutes les pannes possibles et leurs conséquences. Il faut alors adopter une nouvelle démarche pour garantir la sécurité du fonctionnement de ces systèmes : l'analyse probaliste, avec comme objectif de faire au moins aussi bien que ce qui existait déjà

(toujours selon le principe de conservation de la sécurité globale).

L'expérience montre que ces nouvelles technologies amènent de grands gains :

- en fiabilité, puisque le MTBF d'un circuit VLSI est assez voisin de celui d'un seul transistor;
- en maintenabilité, puisque l'on peut sans difficulté adjoindre un logiciel d'autotest au logiciel opérationnel, voire installer un système programmé spécifique de surveillance et de diagnostic automatique qui détecte les défauts, identifie les sous-ensembles en cause et transmet les informations directement au centre d'intervention;
- en disponibilité, du fait des gains ci-dessus mais aussi parce que la transmission et le traitement d'informations numériques peuvent être mieux immunisés qu'en analogique vis-à-vis des phénomènes parasites nombreux qui existent dans le contexte ferroviaire.

Par contre, leur utilisation présente deux inconvénients qu'il faut s'efforcer de surmonter :

- la difficulté, dans l'état actuel des connaissances, de démontrer la sécurité de conception et d'intégration des logiciels qui leur sont associés;
- une obsolescence accélérée due aux progrès technologiques très rapides dans ce domaine.

Une dernière remarque doit être faite concernant ces évolutions : loin d'être exclusifs les uns des autres, ces diverses technologies ou principes de conception s'avèrent être complémentaires. Tout l'art des concepteurs consiste donc à les mettre en œuvre de la façon la plus judicieuse pour satisfaire, au moindre coût, l'ensemble des objectifs et des contraintes.

8. Les domaines de recherche

Décider de développer une génération d'automatismes de conduite qui satisfasse les objectifs de performances et d'adaptabilité évoqués précédemment est déjà ambitieux.

Mais vouloir satisfaire toutes les contraintes, parfois contradictoires, tant fonctionnelles que techniques, que l'on s'impose de surcroît peut paraître une gageure, sauf à poursuivre un programme de recherche et développement dans tous les domaines concernés :

- l'évaluation fonctionnelle et technique des systèmes existants;
- l'analyse des besoins fonctionnels, avec une approche portant sur l'ensemble du marché potentiel national et international, complétée par une analyse prospective des évolutions possibles sur la durée de vie d'une génération (15 à 20 ans);
- la définition des structures fonctionnelles, pour déterminer le meilleur compromis entre les impératifs d'adaptabilité, les performances et les coûts;
- la conception de l'architecture des systèmes, pour chercher à obtenir à la fois une structure fonctionnelle satisfaisante et une modularité technique favorable à l'adaptabilité technologique et à la maintenabilité;
- le développement de nombreuses méthodes : méthodes d'aide à la conception, pour faciliter la recherche des solutions techniques optimales vis-à-vis des contraintes imposées et des performances attendues; méthodes d'élaboration et de contrôle de logiciels « de sécurité »; méthodes d'homologation, principalement en ce qui concerne la sécurité, adaptées à l'évolution des conceptions et des techniques; méthodes d'analyse de la valeur et de « conception pour un coût objectif » qui doivent permettre d'améliorer la compétitivité des systèmes; méthodes de maintenance, pour définir celles qui sont les mieux adaptées en fonction des critères de disponibilité et de coûts;
- le développement de prototypes avec tests en vraie grandeur.

Et cet effort de recherche doit être non seulement important mais aussi permanent pour toujours adapter au mieux et améliorer la génération en service en fonction de l'évolution des besoins et pour concevoir et développer la génération suivante.