

Dossier Technique Caténaire

« OSCAR, la caténaire en 3D... »



Résumé

La modélisation tridimensionnelle de l'interaction dynamique du couple pantographe-caténaire est à la fois une nécessité pour mieux connaître la physique du captage en situation perturbée (conditions climatiques extrêmes, présence de défauts) et un avantage compétitif pour développer les innovations de demain. La Direction de l'Innovation et de la Recherche a développé un outil à la fois souple et robuste, capable de remplir ces missions, en s'appuyant sur l'expérience précédemment acquise par la SNCF.



Introduction

Un défaut présent dans le pantographe ou la caténaire peut entraîner des arcs électriques (figure 1) et à terme une rupture du fil de contact. Bien qu'en nombre limité en comparaison du nombre de trains en circulation, chaque incident cause d'énormes dommages aux acteurs ferroviaires et bien évidemment aux clients en premier lieu. Le dilemme des acteurs de la maintenance consiste à trouver le meilleur compromis entre des pas de maintenance allongés qui augmentent le risque d'incidents ; et une sur-maintenance entraînant des coûts directs et indirects (perte de revenus due à la non-exploitation des lignes). L'optimisation de la maintenance joue donc un rôle de premier plan pour l'amélioration de la productivité du transport ferroviaire et pour l'exploitation.



Figure 1 : Arc électrique généré entre le pantographe et la caténaire.

Cette optimisation passe par le développement d'outils de diagnostic automatiques, tels la rame de mesure à grande vitesse Iris 320. Jusqu'à présent, l'analyse des données de mesure embarquée s'est révélée délicate (voir article « De nouveaux outils pour la surveillance caténaire à grande vitesse » paru dans la RGCF n°149 d'Avril 2006), du fait d'une très grande dispersion d'une circulation à une autre. Il est ainsi apparu nécessaire de mieux comprendre la physique du système pantographe-caténaire, en particulier en présence de défauts, de manière à interpréter les données mesurées.

C'est dans le but d'étudier l'influence de ces défauts que le logiciel OSCAR (Outil de Simulation du CAPtage pour la Reconnaissance de défauts) a été développé, pour le compte de la Direction de l'Ingénierie, par la Direction de l'Innovation et de la Recherche en partenariat avec la société SDTools. Ce logiciel a par la suite été sélectionné comme base du projet EUROPAC (EUROpean Optimised PANTograph Catenary interface [1]), rassemblant quinze partenaires de six pays.

Le développement de cet outil a bénéficié de l'énorme expérience de la SNCF dans le domaine du captage. En effet, la SNCF s'est depuis plus de vingt ans dotée d'outils de simulation du captage (PACAT2D en 1984, PACAT3D en 2000), qui ont été alimentés par de nombreuses données d'essais, jusqu'à la vitesse de 515.3 km/h !



Principe du logiciel

Le principe de fonctionnement du logiciel OSCAR est de modéliser indépendamment la caténaire et le(s) pantographe(s), qui n'interagissent qu'à travers un module de contact (cf. figure 2). Les équations ainsi obtenues sont résolues par intégration temporelle, c'est à dire que la durée d'étude est découpée en intervalles d'environ une milliseconde, sur lesquels sont calculés les déplacements et les efforts. A la différence de ses prédécesseurs, le logiciel OSCAR permet de modéliser les situations perturbées telles que les températures extrêmes, les vents forts, les défauts ou singularités présents dans la caténaire ou le pantographe.

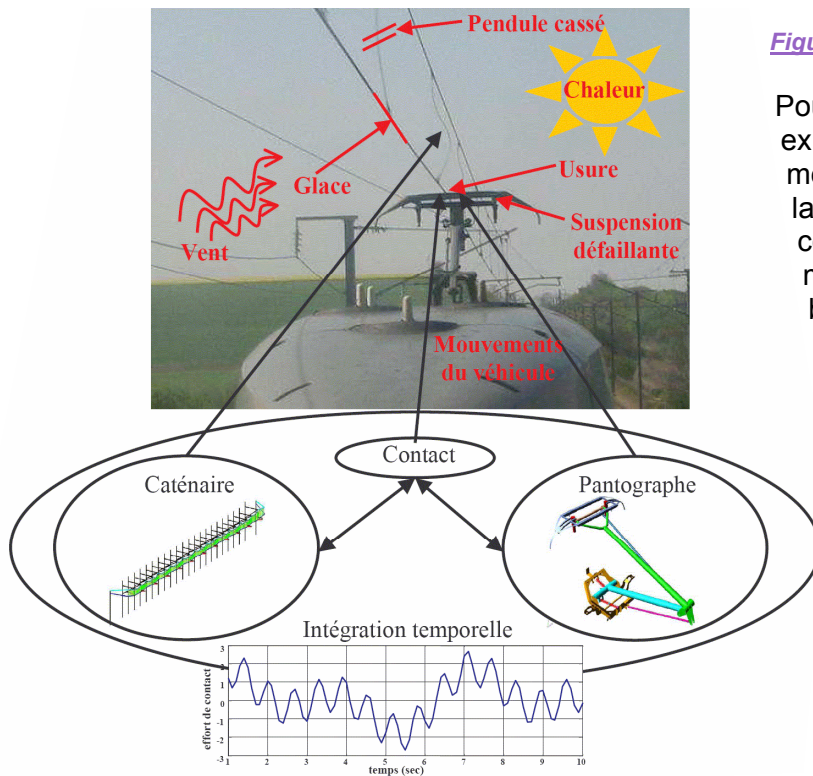
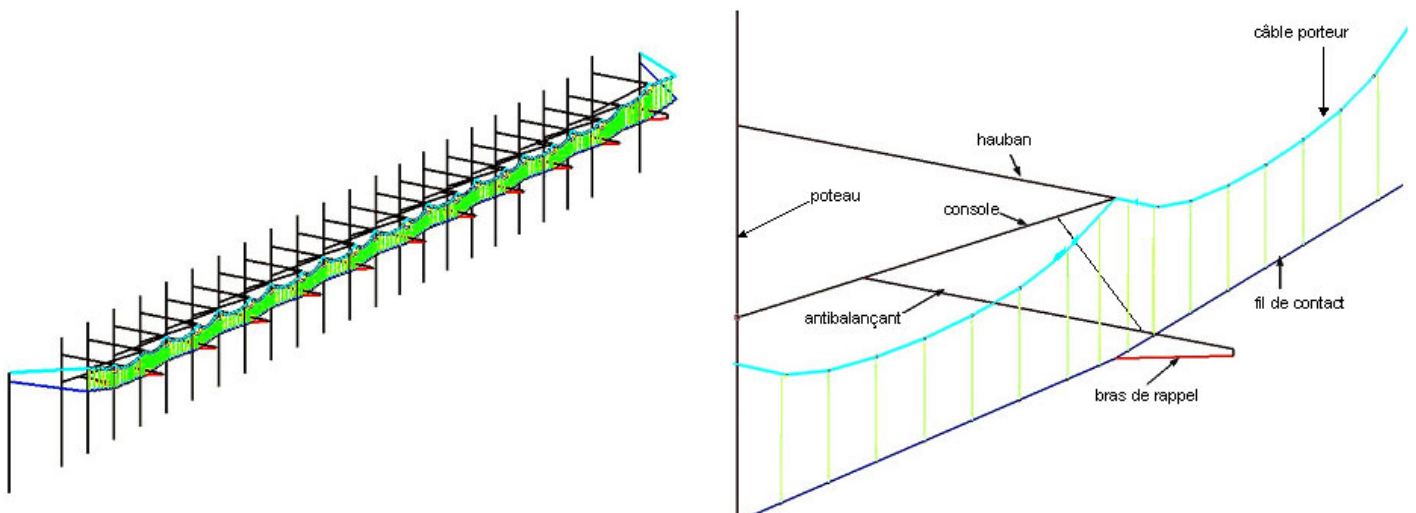


Figure 3 : Modélisation tridimensionnelle d'un canton de la caténaire Grande Vitesse Valence-Marseille.

Figure 2 : Principe de fonctionnement du logiciel OSCAR.

Pour représenter la grande diversité de caténaires existantes, OSCAR utilise la méthode des éléments finis, qui permet de représenter fidèlement la géométrie des caténaires, en modélisant leurs composants principaux d'un point de vue dynamique (fil de contact, câble porteur, pendules, bras de rappel, griffes, etc.) comme indiqué en figure 3.





Les modèles de pantographe utilisés varient selon l'application souhaitée, comme indiqué en figure 4. Pour une étude « simplifiée », un modèle masse-ressort unidimensionnel (4a) peut être suffisant, alors que pour une étude « fine » (étude de défauts, contrôle actif), un modèle multicorps flexible tridimensionnel peut s'avérer nécessaire (4d).

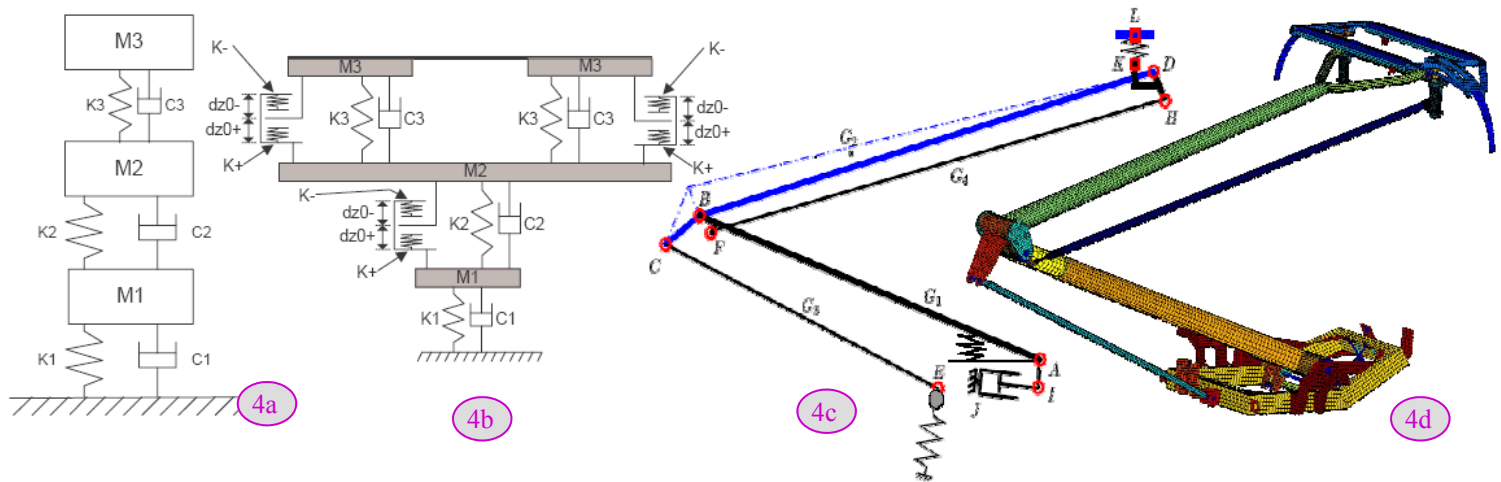


Figure 4 : Modèles de pantographe : Divers degrés de complexité pour des applications diverses. 4a : Modèle masse ressort unidimensionnel, 4b : Modèle masse ressort non linéaire avec bandes de frottement (bi-dimensionnel), 4c : Modèle multicorps bi-dimensionnel, 4d : Modèle multicorps flexible tridimensionnel.

➔ Pourquoi un logiciel 3D ?

Une modélisation tridimensionnelle permet d'étudier l'effet du désaxement (ou zigzag) du fil de contact, des courbes, des équipements tendeurs, autant d'effets jusqu'alors négligés dans la dynamique du captage. Par exemple lors d'une circulation, du fait du désaxement, les mouvements verticaux et latéraux du fil de contact sont fortement couplés, les points du fil de contact décrivant une ellipse dans le plan (Y,Z), comme indiqué en figure 5.

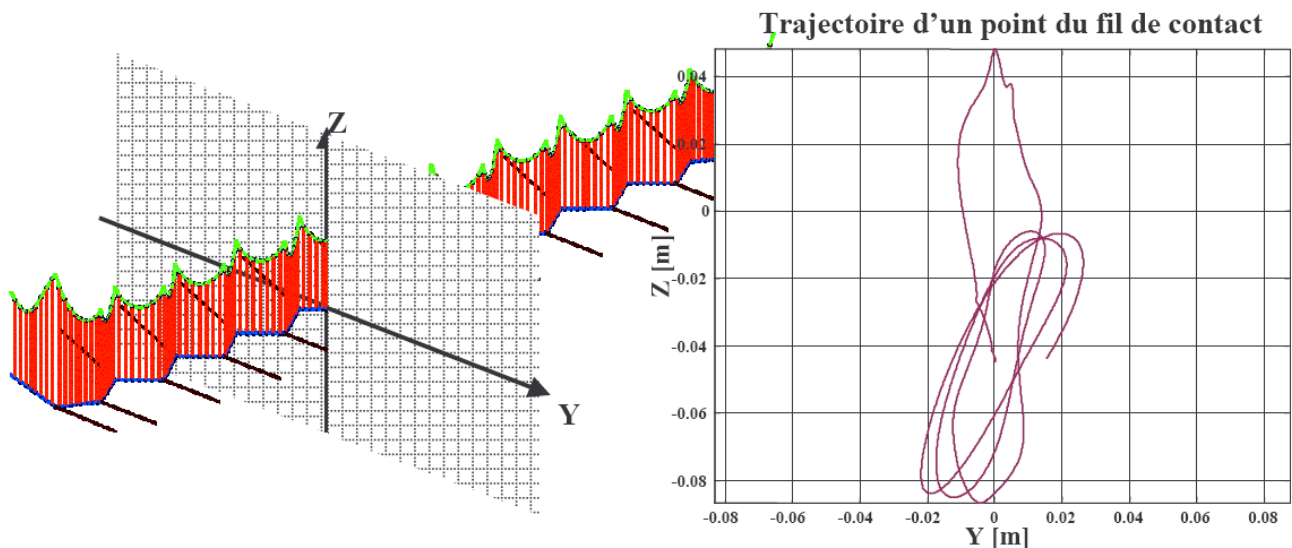


Figure 5 : Couplage des mouvements verticaux et latéraux du fil de contact.

L'aspect tridimensionnel d'OSCAR permet par ailleurs d'étudier le mouvement de balancier de l'archet du pantographe induit par le désaxement : les suspensions supérieures oscillent alternativement à droite et à gauche, dans un mouvement quasi-symétrique (cf. figure 6). Le fait de pouvoir étudier ce phénomène autorise alors une conception plus fine des pantographes.

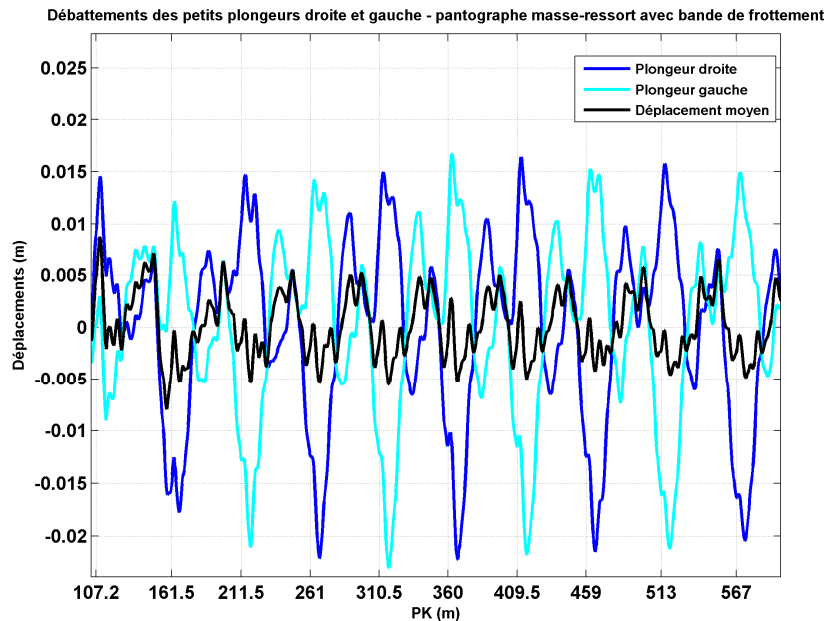


Figure 6 : Illustration du mouvement de balancier de l'archet du pantographe.

Enfin, afin de représenter fidèlement les défauts mais aussi l'ensemble des situations perturbées (vents forts, températures extrêmes), le modèle développé doit être nécessairement tridimensionnel. En effet, se superposent aux mouvements verticaux de la caténaire et du pantographe des mouvements latéraux (effet du vent) et longitudinaux (dilatation due à un réchauffement par exemple).

L'effet du vent sur la caténaire avait jusqu'à présent été étudié en considérant un balancement maximal du fil de contact, pris ensuite en compte pour s'assurer que celui-ci ne s'échappait pas de l'archet lors des circulations. Il

est maintenant possible d'étudier l'effet des fluctuations de vent sur la qualité du captage, en considérant à la fois son influence sur les mouvements de la caténaire et du pantographe. L'approche suivie consiste alors à générer une suite de rafales de vent le long de la ligne (cf. figure 7) puis à appliquer ce vent sur la caténaire et sur le pantographe lors de la simulation de captage. Les résultats obtenus (cf. figure 8) permettent alors de qualifier l'infrastructure et le matériel dans des situations perturbées, et de définir éventuellement des valeurs limites de vent pouvant déclencher des limitations de vitesse.

Figure 7 : Description des rafales de vent le long d'une ligne.

Définition du champs de vent

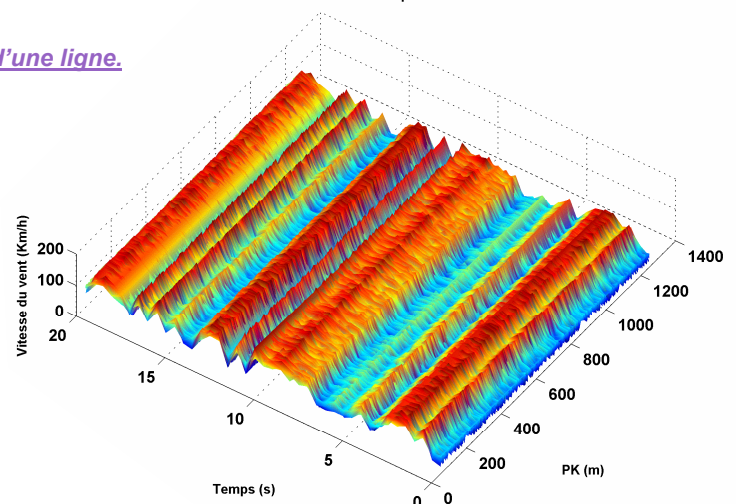
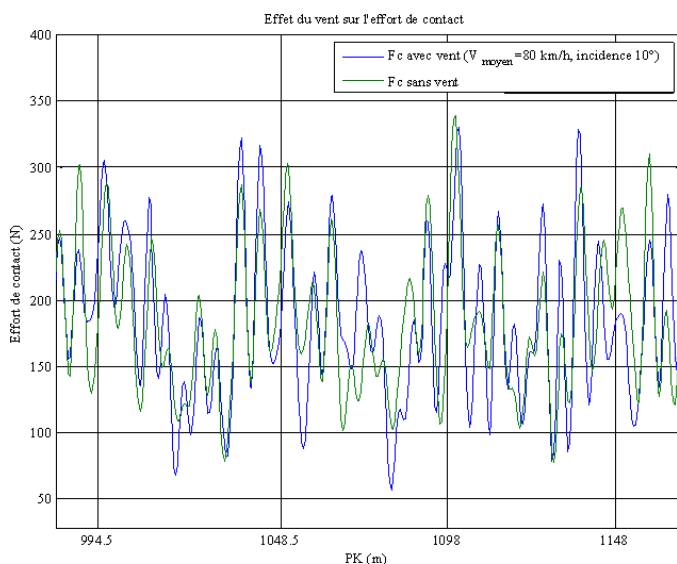


Figure 8 : Influence du vent sur l'effort de contact (cas de la LN2, 300 km/h, vent moyen de 80km/h, incidence de 10°).



L'aspect tridimensionnel d'OSCAR permet également d'étudier l'influence des températures extrêmes sur la qualité du captage. Par exemple lors d'une hausse de température, le fil de contact et le câble porteur se dilatent de part et d'autre du point d'ancrage, les consoles des supports pivotent et les bras de rappel doivent supporter une partie de la tension mécanique longitudinale (cf. figure 9)

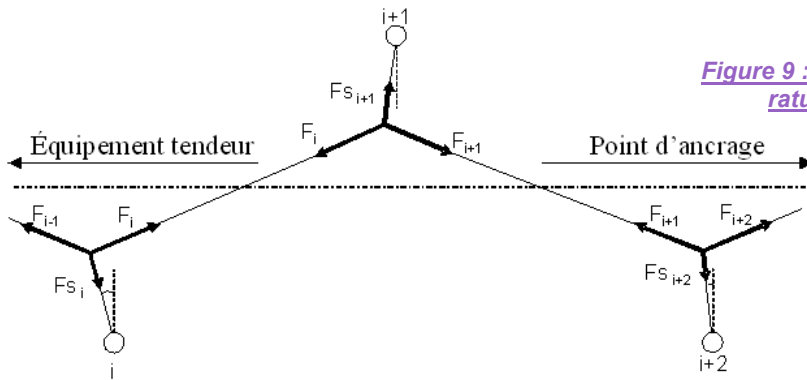


Figure 9 : Rotation des bras de rappel due à une hausse de température, une partie de la tension mécanique longitudinale est alors reprise par ces bras de rappel.

La tension, bien que régulée aux extrémités, décroît alors très faiblement des équipements tendeurs vers le point d'ancrage. Ceci induit une flèche plus importante dans les portées du centre du canton par rapport aux portées extrêmes (figure 10), ce qui modifie la qualité du captage.

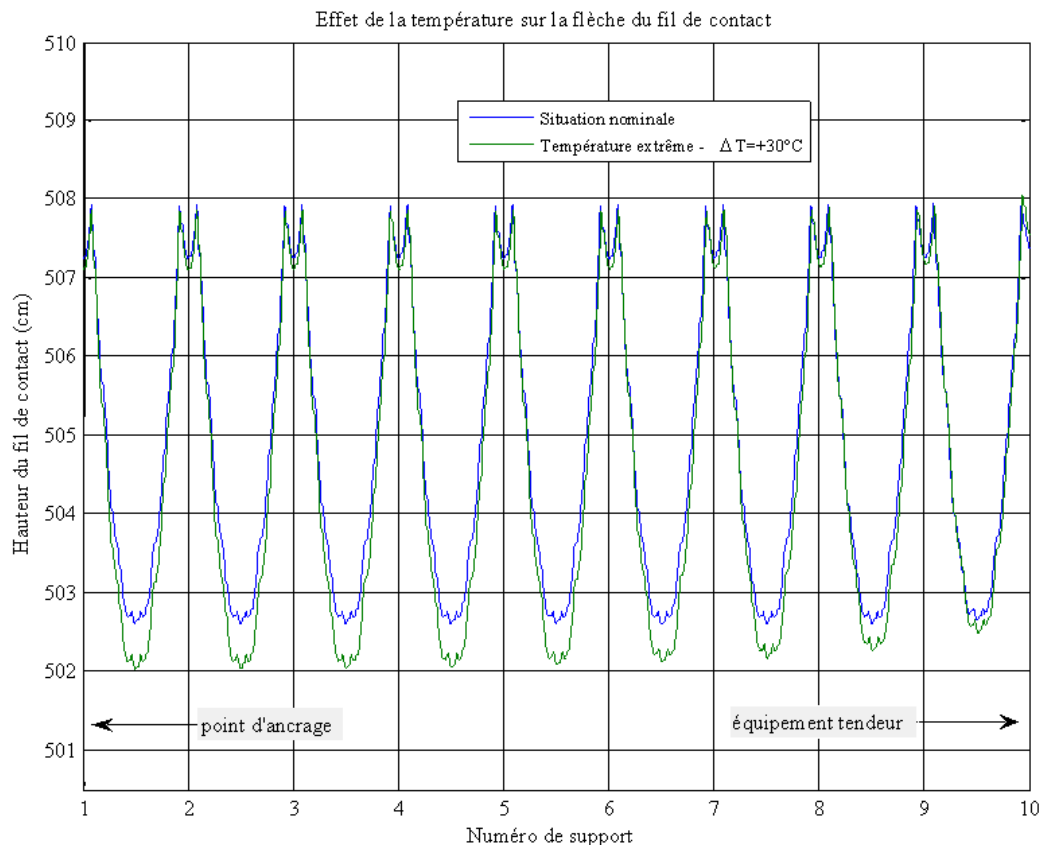


figure 10 : Influence d'une hausse de température sur la répartition de la flèche du fil de contact sur un canton.

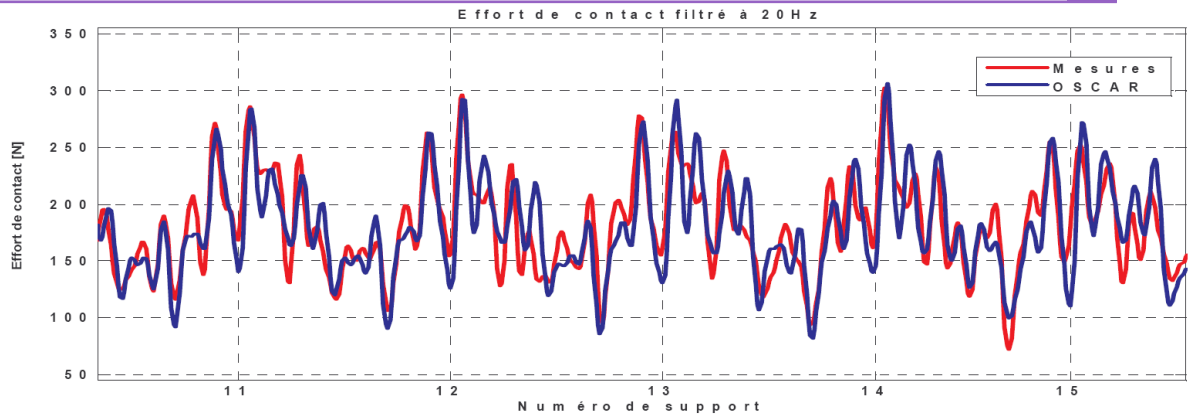
→ La validation du logiciel

Le logiciel de simulation OSCAR a été validé en appliquant la norme EN50318 (Validation des simulations de l'interaction dynamique entre le pantographe et la caténaire). Ainsi, le logiciel a été comparé à des données de mesure d'une part, et aux résultats obtenus avec un modèle de référence d'autre part [2].

Les données de mesure à comparer sont notamment l'effort de contact et le soulèvement aux bras de rappel (mesurés par des systèmes de mesure satisfaisant la norme EN50317 – Prescription et validation des mesures de l'interaction dynamique entre le pantographe et la caténaire). Pour l'effort de contact, le critère fixé par la norme est basé sur l'écart type. OSCAR satisfait ce critère, mais au-delà de ça, la corrélation temporelle des efforts de contact simulés et mesurés est particulièrement bonne (figure 11).

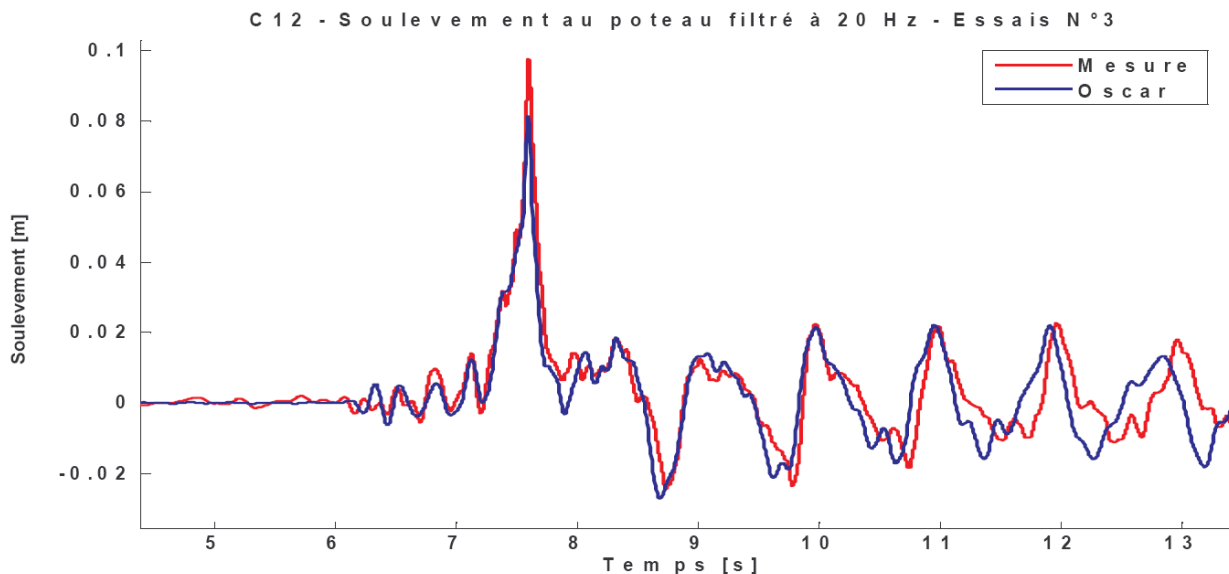


figure 11 : Corrélation calcul / essais. Cas de l'effort de contact pour un pantographe CX-25KV circulant sur la ligne Paris-Le Mans à 298 km/h.



Une autre donnée à comparer est le soulèvement du fil de contact au niveau des bras de rappel, mesuré par un PMCA (Poste de Mesure Caténaire Automatique). La figure 12 présente la corrélation d'un résultat de calcul avec des données de mesure réalisées au poste PMCA de Rouvray, sur la Ligne Grande Vitesse Paris-Le Mans. Là encore, ces résultats sont particulièrement satisfaisants. Au delà du soulèvement maximum satisfaisant le critère, le modèle permet de représenter finement les ondes précédant le passage du pantographe (correspondant au pic de soulèvement), ainsi que l'amortissement dans le temps du mouvement d'oscillation de la caténaire.

figure 12 : Corrélation calcul / essais. Cas du soulèvement du fil de contact au support pour un pantographe GPU circulant sur la ligne Paris-Le Mans à 288 km/h.



→ Etude des défauts

L'objectif initial d'OSCAR est d'étudier l'influence des défauts (griffes de jonction, pendules manquants, etc.) et des singularités (ponts route, équipements tendeurs, etc.) sur le captage et donc sur l'interaction dynamique du couple pantographe-caténaire. Pour ce faire, ces différents éléments sont intégrés au modèle (cf. figure 13). Il est alors possible d'étudier par la simulation l'influence des défauts sur le captage, de manière par exemple à développer des systèmes experts de reconnaissance de défauts.

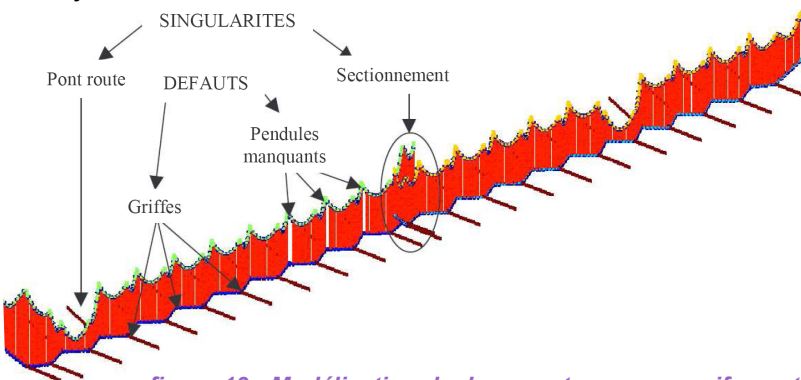


figure 13 : Modélisation de deux cantons successifs contenant des défauts et singularités.

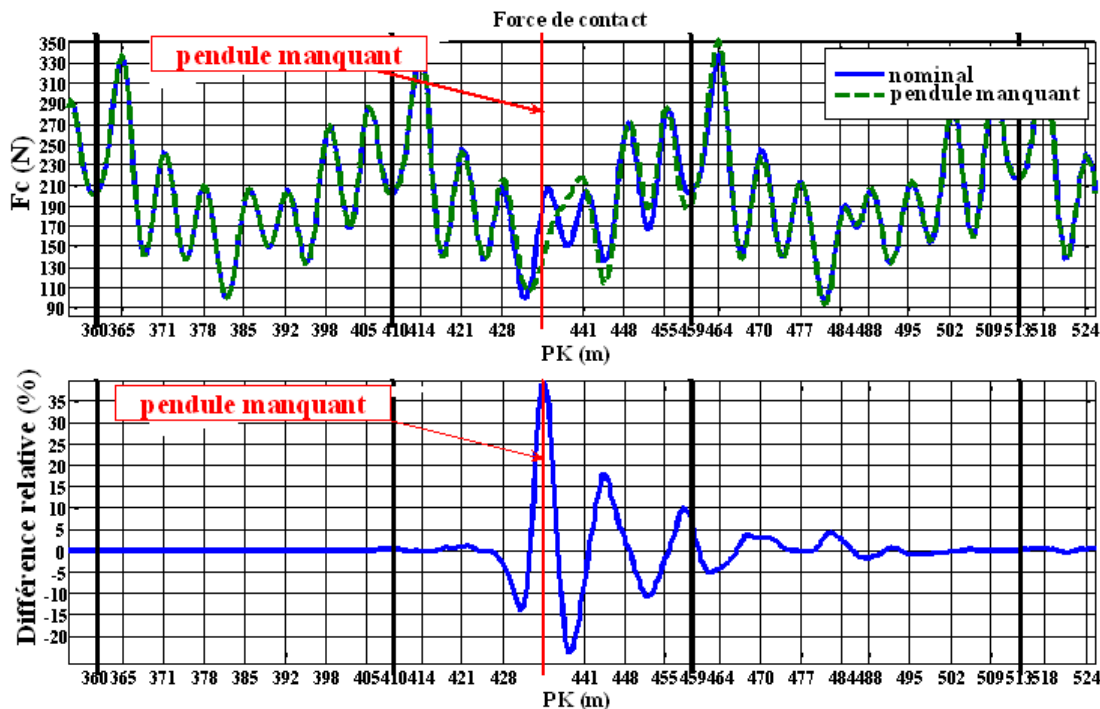


figure 14 : Signature d'un pendule manquant.

Le système de mesure sera ainsi « formé » (par une procédure d'« apprentissage ») par le modèle à reconnaître les défauts. Par exemple, en fournissant au système de mesure la signature d'un pendule manquant (cf. figure 14), celui-ci sera à même de retrouver cette signature dans les Gigabits de données de mesure [3]. Il sera alors possible, à travers la rame de mesure Iris 320, de détecter, localiser et identifier les défauts présents dans la caténaire en temps réel, de manière totalement automatique.

→ OSCAR : Un logiciel interopérable

Le logiciel OSCAR a été sélectionné pour servir de socle au développement d'EUROPACAS, logiciel interopérable développé dans le cadre du projet Européen EUROPAC. Ainsi des caténaires allemandes, suédoises, italiennes et espagnoles peuvent dorénavant être simulées par OSCAR. Ceci n'est ni anodin ni trivial, ces caténaires pouvant être très différentes les unes des autres. Ainsi, certaines caténaires

Grande Vitesse allemandes ont la particularité d'avoir une flèche nulle au pendule, un câble porteur non désaxé, des suspensions d'antibalançant reliées au Y, autant de propriétés dont le modèle doit pouvoir tenir compte (figure 15).

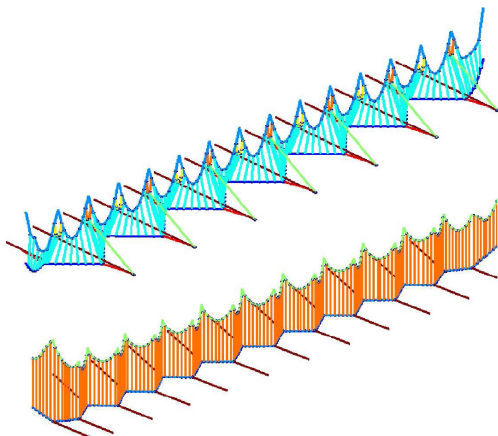


figure 15 : Illustration des différences de conception entre une caténaire allemande (haut) et une caténaire française (bas).

Le logiciel EUROPACAS sera ainsi utilisé en phase de conception pour évaluer l'interopérabilité des matériels et infrastructures, permettant ainsi de réduire les coûts d'essais. Il aidera par ailleurs à comparer les différents critères de compatibilité utilisés dans les différents pays, pour à terme définir des critères communs d'interopérabilité.

→ Perspectives : Optimisation du système

Mais un logiciel de simulation a également pour objectif d'explorer à moindre coût des solutions innovantes. Il est alors utilisé pour évaluer le comportement du système à des vitesses plus importantes, ou encore pour en optimiser la conception.

Optimisation de la caténaire

Une des voies d'optimisation concerne les équipements tendeurs. En effet dans ces zones où le pantographe passe d'un fil de contact à un autre, l'usure est plus rapide car on y observe des efforts de contact importants. Le logiciel



OSCAR a donc été utilisé pour évaluer l'impact de modifications de ces zones sur l'effort de contact. Ainsi une conception différente a pu être proposée, qui diminue le pic d'effort dans les équipements tendeurs (figure 16), réduisant par la même les usures excessives du fil de contact.

figure 16 : Exemple d'optimisation des équipements tendeurs pour diminuer les pics d'effort de contact.

OSCAR peut aussi être utilisé pour orienter les concepts de caténaires futures ou pour améliorer, tant d'un point de vue matériaux que géométrique, les composants caténaire soumis à des sollicitations dynamiques.

Contrôle actif de pantographe

Un autre axe d'amélioration consisterait à équiper les pantographes de systèmes de contrôle actif [4]. Ce système permettrait de contrôler l'effort de contact entre le pantographe et la caténaire avec pour objectif d'appliquer un effort quasi constant, suffisamment important pour éviter les pertes de contact, et suffisamment faible pour réduire l'usure des bandes de frottement et du fil de contact. Pour ce faire, des capteurs mesurent l'effort de contact, ensuite analysé par un système de contrôle qui commande des actuateurs de manière à abaisser ou remonter le pantographe en conséquence (figure 17). L'utilisation d'OSCAR se révèle dans ce cas pertinente car elle permet de tester différentes possibilités à moindre coût, afin d'évaluer la faisabilité des différentes solutions technologiques.

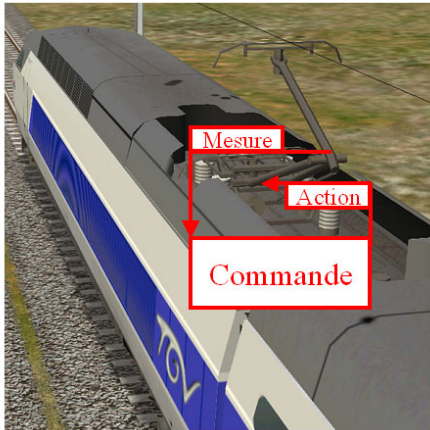
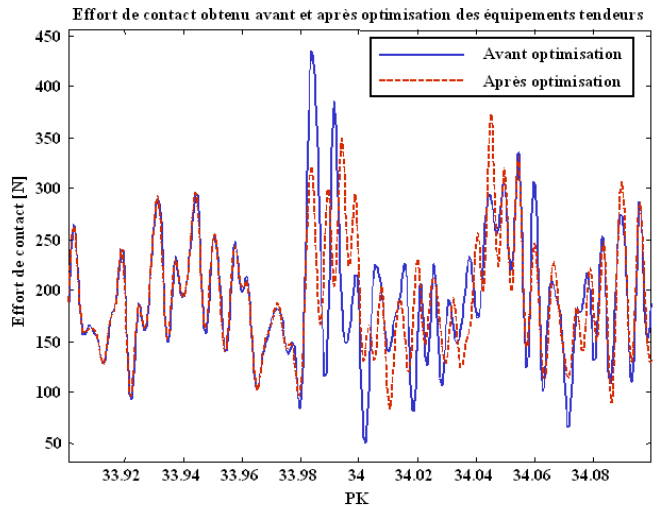


figure 17 : Principe du contrôle actif d'un pantographe.



→ Conclusion

Les enjeux de la modélisation de l'interaction pantographe-caténaire sont donc multiples : connaître l'influence des situations perturbées ; définir des critères d'interopérabilité ; rendre les systèmes de mesure « intelligents » ; et enfin réaliser des études prospectives (vitesses de circulation supérieures, optimisation du système). A travers l'outil OSCAR, possédant une interface utilisateur conviviale, ces défis peuvent dorénavant être relevés.

Article proposé par **E. Aziz, A. Bobillot, L.M. Cléon, J.P. Mentel** pour la Revue Générale des Chemins de Fer — Autorisation de publication pour l'ACTIF de A. BOBILLOT sur l'initiative de C. DI MARCO.

→ Références

- [1] Pantograph-Catenary: a European couple, L.-M. Cléon (SNCF), A. Bobillot (SNCF), A. Collina (Polimi) et O. Mohamed (DB), V. Loverre (Mer Mec), WCRP, Montréal, 2006.
- [2] Etude et modélisation du comportement dynamique du couple pantographe caténaire, T. Godeby, rapport de stage SNCF, 2006.
- [3] Robust Methods for Detecting Defects in Overhead Contact Line Based on Simulation Results, J.P. Massat (SNCF), A. Bobillot (SNCF) et J.P. Laine (ECL), III European Conference on Computational Mechanics, Lisbonne, 2006.
- [4] Contact model for the pantograph-catenary interaction, F. Grases Rauter (SNCF / IST), J. Pombo (IST), J. Ambrósio (IST), J. Chalansonnet (SNCF / Alten), A. Bobillot (SNCF), M. Seabra Pereira (IST), ACMD06, Tokyo, 2006.