

# Comment la SNCF a maîtrisé les vents traversiers ?

## 1<sup>re</sup> partie

Jacques Aïache • professeur en classes préparatoires  
Damien Claire • professeur en classes préparatoires  
Michel Oury • professeur en classes préparatoires  
Sébastien Roux • professeur en classes préparatoires  
Olivier Valenti • professeur en classes préparatoires

**C**et article a pour objectif de présenter les travaux effectués par la SNCF entre les années 1995 et 2002 afin de maîtriser les vents traversiers sur la ligne TGV Méditerranée LN5. Il est le fruit du lancement d'une coopération entre la SNCF et des équipes d'enseignant(e)s de l'UPSTI (Union des Professeurs de Sciences et Techniques Industrielles) depuis le début de l'année 2006 concernant la réalisation de travaux pratiques en ligne sur des systèmes industriels.

Cette première partie présente la démarche industrielle utilisée par la SNCF et s'attache à caractériser l'ensemble des données fondamentales nécessaires à la définition des stratégies de protection de la ligne TGV Méditerranée.

La collaboration entre la SNCF et l'UPSTI a été initiée à la suite d'une intervention de M. Louis Gallois alors Directeur Général de la SNCF au colloque organisé par l'UPSTI à l'École des Mines de Paris les 19 et 20 mai 2005 et dont le thème était le suivant : «La Formation des Ingénieurs au Service de la Recherche et de l'Industrie : La Relation CPGE – Écoles d'Ingénieurs – Recherche Industrielle».

Un engagement a alors été pris de développer des sujets de travaux pratiques et de travaux dirigés à partir de problèmes techniques issus du domaine ferroviaire. Le thème retenu des « vents traversiers » est le premier à être traité.

L'idée directrice de ce projet est de proposer via un serveur Web, des mesures mises à jour en temps réel. Ainsi, l'étudiant a accès à des supports qui ne peuvent pas entrer dans le laboratoire pour des raisons de place, de coût, d'énergies mises en jeu, de sécurité... Les acti-

ités proposées sont alors directement replacées au cœur du monde industriel.

Plusieurs projets sont en cours de développement et seront mis en ligne sur le site [www.tpline.net](http://www.tpline.net) à l'initiative de Michel Oury, Professeur de génie électrique en classe préparatoire à Saint-Ouen-l'Aumône.

Toutes les informations présentées dans cet article sont issues des documents fournis par M. Cleon, Directeur de la Recherche et de l'Innovation à la SNCF que nous remercions vivement.

### Position du problème

Afin de rapprocher Marseille à moins de 3 heures de la capitale et de satisfaire à la demande passager, la SNCF a dû identifier et contrer de nombreux verrous technologiques, notamment :

– la circulation du TGV dans une zone météorologique

extrêmement ventée (vitesse du vent de 138 km/h en valeur moyenne et 183 km/h en valeur maximale);

- la configuration géographique dans laquelle s’insère le tracé a nécessité la création de remblais, de viaducs qui impliquent des effets locaux d’accélération du vent;
- la vitesse maximale de circulation du TGV a été portée à près de 300 km/h;
- la mise en place du TGV duplex dont la prise au vent est plus importante.

La conjugaison de ces différents facteurs a conduit la SNCF à étudier le risque de renversement de ses trains soumis à des vents traversiers (ou peut dire également vents latéraux) et à élaborer des stratégies de protections passives (coupe vent...) et actives (mesure de la vitesse du vent par girouette/anémomètre et procédure automatique de ralentissement des rames TGV en fonction d’abaques) en rapport avec les risques encourus.

En effet, l’historique des accidents dus au vent met en évidence un risque potentiel de renversement (tableau 1). Au Japon, près de 7 accidents ont été recensés entre 1978 et 1999.

Les causes avancées d’une augmentation de ces accidents depuis environ 1970 sont l’utilisation au Japon de voies à écartement métrique, la diminution du poids du matériel roulant, mais aussi la présence de vents fréquents (typhon).

Dans le cadre de ses études, la SNCF s’est fixée comme objectif un risque probabiliste d’un renversement de train tous les 200 ans.

## La démarche industrielle

Afin de valider le comportement par rapport aux vents des rames TGV, la SNCF a mené de multiples actions en partenariat avec des experts extérieurs notamment dans

les domaines météorologiques et aérodynamiques. Ainsi, il a été nécessaire :

- de réaliser une étude météorologique fine afin d’évaluer les zones à risques. Remarquons que le vent dans ces zones est fortement dépendant de la configuration géographique locale, à savoir, la présence de remblais, de viaducs pouvant entraîner une augmentation locale du vent moyen ;
- d’élaborer, en fonction du niveau de risque, des stratégies afin, soit d’établir un plan de surveillance par des mesures permanentes du vent en bord de ligne et des procédures de ralentissement automatique de la rame TGV en cas de risque, soit par la mise en place d’écrans protecteurs opaques ou ajourés afin de briser la lame de vent, ou encore par des procédures de détournement en cas d’avis de tempête prévu... ;
- de maîtriser une expertise forte en électronique, informatique et réseau afin d’élaborer la procédure de protection dite « active » par des mesures continues de vent, une exploitation centralisée de toutes les mesures et une transmission en cabine des vitesses limites à ne pas dépasser ;
- de maîtriser le comportement aérodynamique de la rame TGV soumis à un vent relatif composé de sa vitesse propre et de la vitesse du vent, les configurations géographiques à risque, les différentes protections à l’aide de campagnes d’essais en soufflerie. Ces essais permettent des mesures locales du champ de pression, la visualisation de l’écoulement de l’air et des mesures des efforts par balance dynamométrique. Ces études ont été réalisées en étroite collaboration avec les études météorologiques qui ont permis de fournir une représentation dynamique du vent ;
- de réaliser une modélisation du comportement de la rame en particulier de la motrice qui est l’élément le

Date	Lieu de l’accident (Type de structure)	Vitesse du train	Nombre de véhicules renversés ou déraillés (masse)	Victimes	Vitesse du vent estimée
28/02/78	Ligne de Tozai (Pont à tablier supérieur)	64 km/h	3 voitures électriques : 2 voitures intermédiaires (36 t/35 t) et la voiture de queue (27,5 t)	21 blessés	52 m/s (Rafale)
01/10/79	Ligne de Kosei (Viaduc)	38 km/h	2 wagons de marchandises	Néant	(Typhon)
28/12/86	Ligne de San’in (Pont à tablier supérieur)	55 km/h	7 voitures (28,8 t ou 36,9 t)	6 morts, 6 blessés	35-45 m/s (Polaire faible)
22/02/94	Ligne de Minami riasu (Remblai)	28 km/h	2 voitures diesel : la voiture de tête (32,1 t) et la voiture de queue (31,9 t)	7 blessés	35-37 m/s (Faible)
22/02/94	Ligne de Nemuro (Remblai)	50-80 km/h	3 voitures diesel : la voiture de tête (35,8 t) et 2 voitures intermédiaires (37,8 t)	7 blessés	30-42 m/s (Faible)
29/06/97	Ligne de Kosei (Viaduc)	0	3 wagons de marchandises	Néant	(Typhon)
19/03/98	Ligne de Chikuhi (Remblai)	55-60 km/h	1 voiture électrique : voiture de tête (32,8 t)	6 blessés	30-35 m/s (Faible)

**Tableau 1 :** Historique des accidents dus aux vents forts au Japon (1978-1999)

plus sollicité et d'évaluer les efforts limites de déchargement. Afin de déterminer les vitesses de vent limite admissibles, le critère utilisé par la SNCF caractérise le décollement d'un côté du véhicule, phénomène apparaissant en premier. Le paramètre contrôlé est alors l'effort normal au contact roue/rail. La valeur du critère retenue est une charge minimale par côté de bogie correspondant à 10% de la charge statique  $Q_0$ , soit un déchargement maximal admissible de 90% (figure 1).

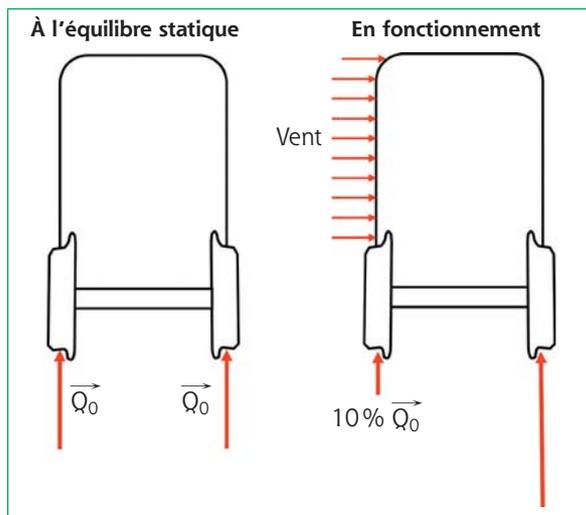


Figure 1: Illustration du critère de renversement (modèle plan)

En fonction de l'avancement du projet et des résultats attendus, des modèles de complexités diverses ont été élaborés :

- des modèles analytiques simplifiés avec un vent constant en vitesse et direction ;
- des modèles numériques avec une modélisation temporelle du déplacement du TGV et du vent ;
- etc.

Ainsi, au travers de l'étude de cette problématique, différents champs disciplinaires abordés dans nos enseignements sont utilisés. On peut citer par exemple : la mécanique des solides, la mécanique des fluides, mais aussi l'électronique, la conversion d'énergie, de signaux, la transmission de données, les réseaux...

Les différentes études peuvent aussi être classées suivant le triptyque : réel, maquette, simulation (figure 2).

Réel	Maquette	Simulation
Instrumentation de rames TGV d'essais, des études météorologiques, et la mise en place du contrôle météo sur les zones critiques.	Caractérisation et validation sur des maquettes en soufflerie du comportement au vent des rames TGV, des viaducs, des remblais...	Utilisation de modèles de prédiction météorologique, modélisation numérique ou analytique multicorps des rames TGV.

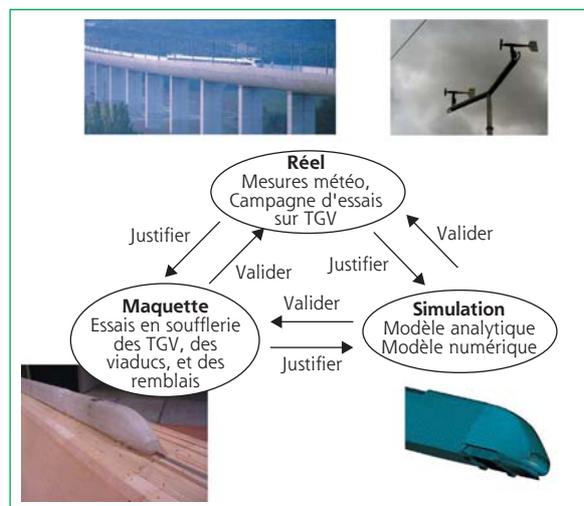


Figure 2: Structuration des travaux de la SNCF suivant le triptyque réel – maquette – simulation

Cette vision du problème guidera l'élève vers une démarche d'ingénieur en validant les différents modèles choisis vis-à-vis des critères définis.

## Caractérisation météorologique de la ligne

L'objectif a été d'effectuer l'analyse des situations de vent fort sur le tracé de la ligne TGV Méditerranée entre Valence et Marseille en intégrant l'ensemble des données des stations MÉTÉO FRANCE dans le domaine d'étude. Cette étude s'appuie sur les données climatologiques disponibles sur la zone étudiée couvrant les périodes 1992-1995 et 1996-1999. Ces travaux ont été réalisés en collaboration avec la société ARIA.

La zone à étudier est influencée par la topographie. Du fait de la présence du relief, des variations de vitesse peuvent apparaître. Pour obtenir la vitesse et la direction des vents dans les zones éloignées des stations (sur le tracé de la ligne par exemple), des modélisations numériques à l'aide du code MINERVE développé par la direction d'étude et de recherche de EDF, ont été effectuées aux échelles régionales (1 km de résolution) et locales (100 à 200 mètres de résolution) du champ de vent (figure 3).

La méthodologie retenue se décompose en trois étapes :

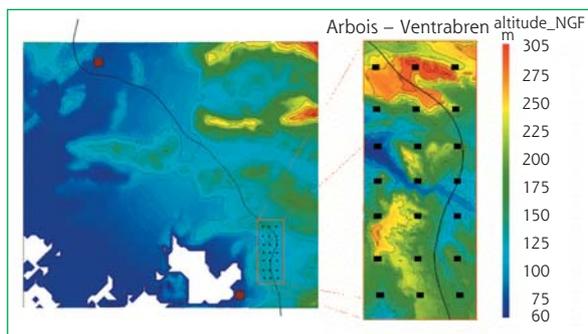
- reconnaissance de la géographie de la ligne, collecte, mise en forme des données expérimentales et analyse statistique permettant de déterminer les signaux temporels représentatifs de la fluctuation du vent ;
- réalisation de simulations numériques sur l'ensemble du domaine afin de reconstruire la carte géographique du vent « moyen », en particulier au niveau du tracé de la ligne ;

– post-traitements locaux afin de simuler l'influence de la présence de remblais ou de viaducs sur la ligne. Un coefficient de rafale est alors calculé. Ce coefficient est défini comme étant le rapport entre la vitesse maximale du vent et sa vitesse moyenne.

En plus de ces études, d'autres sites considérés aussi comme critiques ont fait l'objet d'un travail spécifique : les zones à discontinuité topographique sur lesquelles le train sort d'une portion de voie protégée (tunnel, déblai, tranchée...) pour rejoindre une portion de voie spécialement dégagée (remblai, pont, viaduc...). En effet, à ces endroits, le vent dominant vient s'ajouter au vent relatif ressenti par le train en un laps de temps très court. Pour ces zones, un calcul spécifique a été réalisé car le scénario de vent envisagé dans ce cas est plutôt du type « échelon ».

## Le vent ressenti par le TGV

Différentes modélisations du vent ont été réalisées au cours des études. Cela va d'une représentation statique du vent en vitesse et direction à une représentation



**Figure 3 :** À gauche, relief du domaine Avignon – Marseille à l'échelle régionale ; à droite, domaine à l'échelle locale. Les rectangles noirs figurent les stations météorologiques virtuelles

dynamique de rafales avec des évolutions temporelles des niveaux et un déplacement dans l'espace.

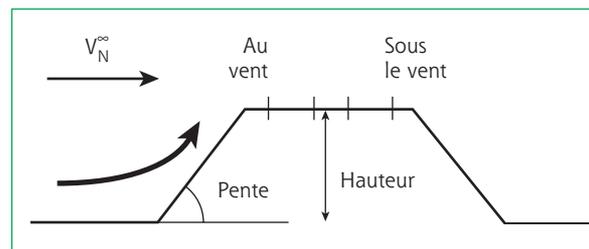
Quelle que soit la modélisation, il est nécessaire de changer de référentiel afin d'évaluer le vent ressenti par le TGV, à savoir le vecteur résultant de la composition de la vitesse du vent (angle d'incidence  $\gamma$ ) et de la vitesse de circulation de la rame TGV par rapport au sol

Dans une configuration plane de variation du vent, le vent ressenti par le TGV sera donc caractérisé par sa norme et par un angle, appelé angle de dérapage et correspondant à l'angle mesuré entre la vitesse du vent par rapport au TGV et la direction de circulation (figure 4).

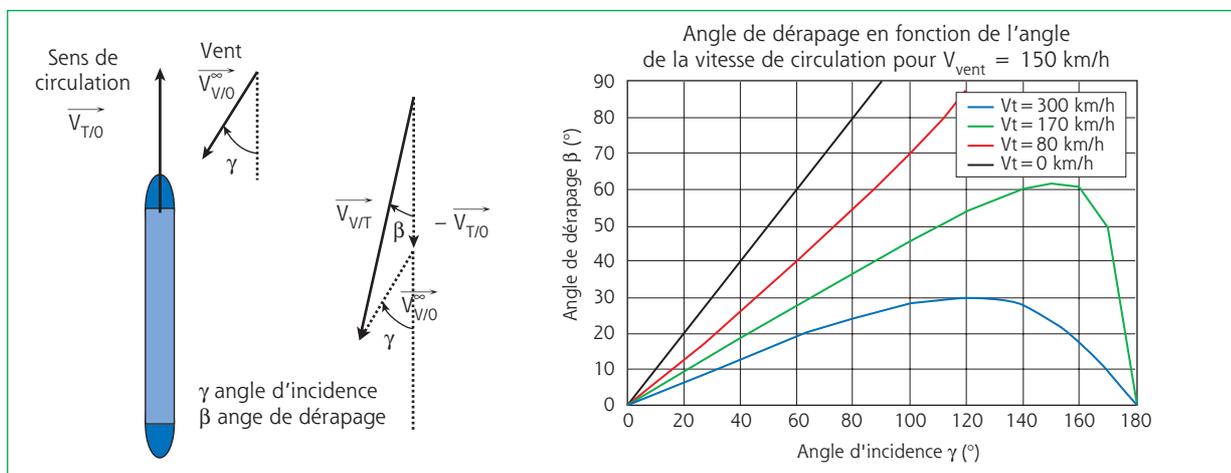
Ce type de graphique permet de définir la plage d'angle de dérapage à explorer en soufflerie, en fonction des études que l'on souhaite réaliser ultérieurement

## ➔ Cas des remblais

Dans le cas d'une configuration remblai (figure 5), la vitesse du vent  $\vec{V}_{V/O}^{\infty}$  est accélérée en haut du remblai et l'angle d'incidence avec la direction de la voie est modifié. Afin de pouvoir comparer les configurations sol plan, remblai, viaduc, un recalage entre les quantités en haut du remblai et en amont a été réalisé. Les paramètres influents sont la hauteur du remblai et la pente.



**Figure 5 :** Action du vent sur un remblai



**Figure 4 :** Évolution de l'angle de dérapage  $\beta$  en fonction de l'angle d'incidence  $\gamma$ , pour une vitesse de vent de 150 km/h et des circulations à 170 km/h et 300 km/h

Le recalage s'effectue uniquement sur la composante normale du vent par rapport au remblai. La composante longitudinale du vent est considérée par hypothèse comme peu modifiée. Un coefficient de survitesse, rapport entre la vitesse normale en haut du remblai et la vitesse normale en amont du remblai est ainsi déterminée par essai. Il est alors possible d'effectuer le changement de référentiel.

## ➔ Modèle de vent

Dans la nature, le vent est instationnaire, avec des fluctuations aléatoires (tant en amplitude qu'en direction). Afin de prendre en compte ces évolutions temporelles et spatiales du vent, la SNCF en concertation avec le CSTB de Nantes (Centre Supérieur des Techniques du Bâtiment), a choisi un modèle de représentation d'une rafale évoluant autour d'un vent moyen sous la forme d'un «ballon de rugby» de largeur 50 mètres, se déplaçant dans le sens du vent moyen à la vitesse du vent moyen, pour un observateur dans un repère spatio-temporel fixe (figure 6) :

- la largeur retenue de la rafale est de 50 m ;
- la vitesse du vent évolue autour d'une certaine vitesse moyenne, avec des fluctuations sinusoïdales qui représentent les rafales de vent ;
- la longueur de la rafale est égale à la vitesse  $U_{\text{moyen}} \times 10$  (avec  $U_{\text{moyen}}$  en  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), ce qui correspond, pour un vent de 50 km/h, à une longueur de 140 m. De petites perturbations de plus haute fréquence (environ 1 Hz) sont ajoutées à cette porteuse.

La vitesse maximale de vent est obtenue à partir de la vitesse moyenne et du coefficient de rafale. Les valeurs couramment obtenues pour le coefficient de rafale se situent entre 1,5 et 1,8. Afin d'être sécuritaire, la valeur retenue a été de 1,8.

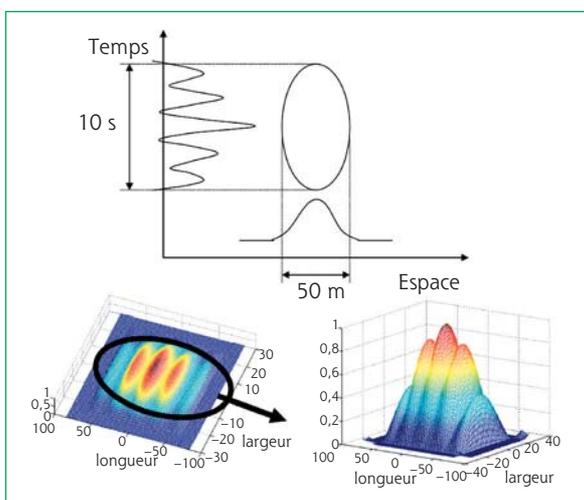


Figure 6 : Évolution spatio-temporelle de la rafale de vent

## Les efforts aérodynamiques sur le TGV

La caractérisation du comportement aérodynamique des rames TGV (réseau et duplex), ainsi que des différentes configurations topographiques (remblai, viaduc, éléments de protection...) ont été réalisées par plusieurs campagnes d'essais effectuées à la fois au CSTB de Nantes et à l'Institut Aérotechnique de Saint-Cyr-l'École. Ainsi, une partie des essais a été doublée et quelques mesures sur site ou sur des rames TGV d'essais ont pu valider le travail effectué sur maquettes.

## ➔ Le principe général des essais

La maquette est installée dans la veine d'essai, de façon statique. Les conditions d'écoulement recréent la vitesse relative du vent par rapport à l'objet. Ainsi, l'angle de dérapage est imposé par un plateau tournant sur lequel repose la maquette et qui permet donc entre deux mesures, de faire varier l'angle de dérapage. La vitesse d'écoulement de l'air dans la veine est imposée par les capacités de la soufflerie. La valeur de la vitesse relative réelle du vent par rapport au TGV n'est pas recherchée. La réalisation d'essais en soufflerie pertinents au sens relation «réel – maquette» demande une grande expertise (figure 7). Sans rentrer dans les détails, voici quelques considérations influençant la pertinence des résultats. Le régime d'écoulement doit rester identique à celui de l'écoulement réel. L'adéquation entre l'échelle de la maquette et la vitesse d'écoulement doit être choisie de façon à respecter au mieux la conservation du nombre de Reynolds (cf. encadré). La similitude est de telle sorte que plus la maquette présente une échelle faible, plus il est nécessaire de souffler fortement.

### Nombre de Reynolds

Le **nombre de Reynolds** est un coefficient sans dimension caractérisant la nature de l'écoulement.

$$Re = \frac{VL}{\mu} = \frac{\rho VL}{\nu}$$

avec :

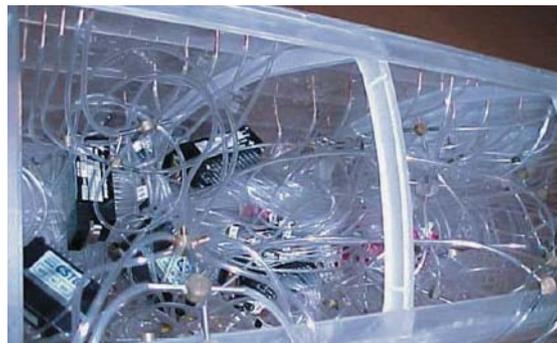
- $V$  : vitesse du fluide (m/s) ;
- $L$  : dimension caractéristique (m) de l'échelle des phénomènes ;
- $\rho$  : masse volumique du fluide ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) ;
- $\mu$  : viscosité cinématique du fluide ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) ;
- $\nu$  : viscosité dynamique du fluide (Pa.s).

Ordres de grandeur :

- Régime laminaire :  $Re < 2\,000$  ;
- Régime transitoire  $2\,000 < Re < 4\,000$  ;
- Régime turbulent  $Re > 4\,000$ .



Balance dynamométrique insérée sous le plancher de la veine de la soufflerie et bras verticaux de liaison avec les maquettes



Instrumentation d'une maquette avec capteurs de pression, tubes, moyenneurs pneumatiques et prises de pressions



Prolongement du Viaduc assurant la continuité aux parois



Écran poreux à lames, hauteur 3 mètres au-dessus du plan de roulement



Visualisation par canne à fumée au travers d'écran poreux



Visualisation de l'écoulement de particule par vélocimétrie laser

**Figure 7 :** Les moyens d'essais en soufflerie

L'écoulement étant influencé par la topographie extérieure, il est nécessaire de recréer l'environnement amont et aval de la maquette testée. Ainsi, si la motrice de tête est testée (mise en évidence comme étant l'élément le plus sollicité), il est nécessaire de recréer une portion de voie en amont et de disposer au minimum d'une remorque en aval. De plus, la rugosité de la topographie peut être recréée en disposant des obstacles en amont de l'écoulement afin d'imposer un taux de turbulence fixé.

Afin de mettre en évidence toute la complexité des essais, il faut savoir que le défilement du sol a une

influence et que certaines souffleries spécialisées recréent par tapis roulant ce défilement. Pour les essais de la SNCF, ce défilement n'a pas été considéré.

### ➔ Les maquettes

L'échelle choisie a une forte influence. Des maquettes allant du 1/7 au 1/25 ont été réalisées. L'échelle privilégiée a été le 1/15 car elle a permis d'obtenir une bonne finesse de détail, un respect des conditions de similitude et une taille raisonnable pour pouvoir être manœuvrée dans la veine d'essai. Pour avoir un ordre d'idée, une

maquette d'une motrice au 1/25 mesure de l'ordre de 90 cm de long (figure 8).

Les maquettes sont constituées d'une enveloppe extérieure réalisée en plexiglas. L'instrumentation est disposée à l'intérieur.

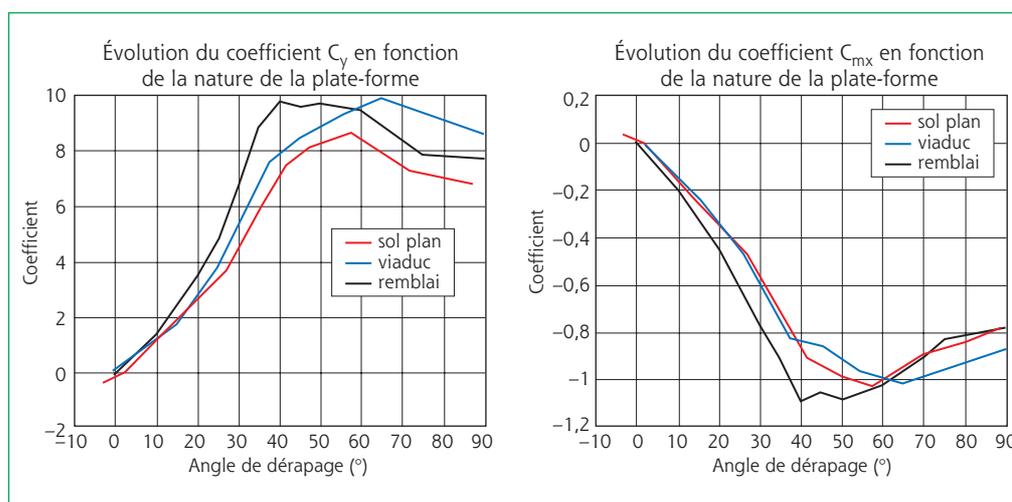


**Figure 8 :** Maquette TGV sur la table tournante de la veine haute vitesse de la Soufflerie Jules Verne (CSTB de Nantes)

## ➔ Les moyens de mesure utilisés en soufflerie

Des essais de quantification du comportement aérodynamique et des essais de visualisation de l'écoulement ont été réalisés. Afin de déterminer les efforts aérodynamiques dans une configuration donnée, deux méthodes ont été utilisées :

- mesure globale du torseur des efforts par balance dynamométrique placée sous le plancher de la veine d'essai et sur laquelle est fixée rigidement la maquette ;
- intégration des mesures locales des pressions au niveau de la coque de la maquette. Pour cela, des sondes de pression type « tubes de Pitot » sont installées en affleurement de la coque et l'acquisition de toutes les voies de mesures s'effectue simultanément.



**Figure 9 :** Évolution des coefficients aérodynamiques  $C_y$  et  $C_{mx}$  dans les configurations sol plan et remblai en fonction de l'angle de dérapage  $\beta$

La balance dynamométrique fournit les 6 composantes du torseur des efforts dans un repère qui lui est propre. Les moments sont déplacés en un point au niveau du plan de roulement.

À partir des efforts, les coefficients aérodynamiques sont calculés suivant les relations :

$$- \text{pour les résultantes: } F_i = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} S C_{Fi}^{\text{aero}}(\beta) V_{\text{veine}}^2 ;$$

$$- \text{pour les moments: } M_i = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} S L C_{Mi}^{\text{aero}}(\beta) V_{\text{veine}}^2 .$$

Avec :

- $\rho_{\text{air}} = 1,205 \text{ kg/m}^3$ , masse volumique de l'air ;
- $S = 10 \text{ m}^2$ , maître couple, surface de référence utilisée pour supprimer la dimension des coefficients ;
- $L = 18,7 \text{ m}$ , longueur de référence pour supprimer la dimension des coefficients ;
- $V_{\text{veine}} \in [20 \text{ m/s}; 40 \text{ m/s}]$ , vitesse de la veine.

Les essais de visualisation participent à une bonne compréhension des phénomènes et une optimisation des formes des protections, des rames... Les méthodes pouvant être utilisées vont de la pose de filets de laine sur la maquette à la visualisation de l'écoulement de particules par laser.

Un exemple de mesures des coefficients aérodynamiques est donné à la figure 9. On peut voir ici l'influence de l'environnement (sol plan ou remblai)

## Conclusion

Cette première partie a permis de présenter la démarche industrielle utilisée par la SNCF et s'est attachée à caractériser l'ensemble des données fondamentales nécessaires à la définition des stratégies de protection de la ligne TGV Méditerranée.

La seconde partie de l'article s'intéressera aux stratégies de protection employées, notamment la protection « active » par un réseau anémométrique communiquant

avec les rames TGV et le poste central de contrôle et de maintenance.

La détermination des sites critiques a nécessité des simulations dynamiques du comportement du TGV face au vent en s'appuyant sur les données présentées dans ce premier article.

# Comment la SNCF a maîtrisé les vents traversiers ?

## 2<sup>e</sup> partie

Jacques Aïache • professeur en classes préparatoires  
Damien Claire • professeur en classes préparatoires  
Michel Oury • professeur en classes préparatoires  
Sébastien Roux • professeur en classes préparatoires  
Olivier Valenti • professeur en classes préparatoires

**L**a première partie de l'article a mis en évidence les moyens et les procédures mis en place afin de déterminer l'ensemble des données fondamentales nécessaires à la définition des stratégies de protection de la ligne TGV Méditerranée, à savoir :

- la connaissance de la topographie de la ligne ;
- la constitution d'une base de donnée météorologique ;
- la détermination du comportement aérodynamique des ouvrages d'art et des rames TGV.

Cette seconde partie s'intéresse aux simulations dynamiques et aux stratégies de protection mises en place. Les calculs dynamiques visent, à partir des différentes données (modèle de vent, coefficients aérodynamiques), à déterminer les vitesses limites de vent admissibles pour chaque configuration de circulation d'une rame TGV.

Ces courbes limites de vent admissible, dénommées abaqués, servent ensuite, par croisement avec les résultats des études météorologiques, à déterminer les sites critiques de la ligne Méditerranée, LN5 à surveiller par réseau anémométrique, et éventuellement à protéger par écrans. Les informations issues des stations anémométriques sont envoyées au centre de contrôle et de maintenance de la gare Saint-Charles de Marseille et transmises sous la forme de signaux éventuels de réduction de vitesse au dispositif de signalisation embarqué des rames TGV.

Toutes les informations présentées dans cet article sont issues des documents fournis par M. Cleon, Directeur de la Recherche et de l'Innovation à la SNCF que nous remercions vivement.

### Des efforts aérodynamiques au déchargement des roues du TGV

Plusieurs modèles d'étude (du plus simple au plus complexe) ont été élaborés par la SNCF, chacun de ces modèles ayant son utilité selon le résultat à montrer et selon l'auditoire. Des formulations analytiques ont été

utilisées en phase d'avant-projet, mais les abaqués définitifs sont issus de l'utilisation de codes de calcul numériques propres au domaine ferroviaire.

Il est rappelé que le critère adopté par la SNCF est un critère de déchargement maximal par coté d'essieu de 90 % de la charge statique.

## ➔ Les simulations dynamiques

Les codes de calculs utilisés sont des codes multicorps. La rame est modélisée par ses deux motrices et ses 8 remorques. Les caractéristiques des différents corps et liaisons sont incorporées au modèle (voir figure 1).

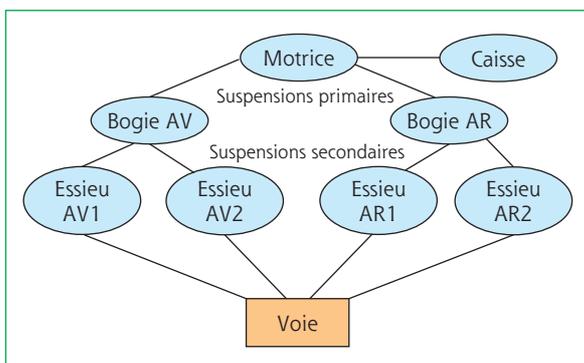


Figure 1 : Sous-ensembles pris en compte dans la modélisation d'un véhicule

Les calculs s'effectuent en dynamique avec des évolutions imposées du vent et de la position du TGV. Le modèle de vent est réalisé suivant la forme de rafale décrite dans la première partie de l'article. Son influence sur la rame TGV est exprimée par l'intermédiaire des coefficients aérodynamiques. Les coefficients aérodynamiques globaux par véhicule sont utilisés. Une représentation « locale », par tranche de 1 m de ces coefficients aérodynamiques a été aussi envisagée afin de prendre en compte de manière plus fine l'impact d'une rafale sur une rame et son évolution. Les coefficients aérodynamiques « locaux » sont issus des mesures locales en soufflerie par sondes de pression (voir figure 2).

Le modèle de voie est fidèle à la géométrie exacte du tracé ce qui permet, par exemple, de simuler la circulation en courbe. La nature de la plateforme (remblai, viaduc, sol plan...) est prise en compte dans les coefficients aérodynamiques.

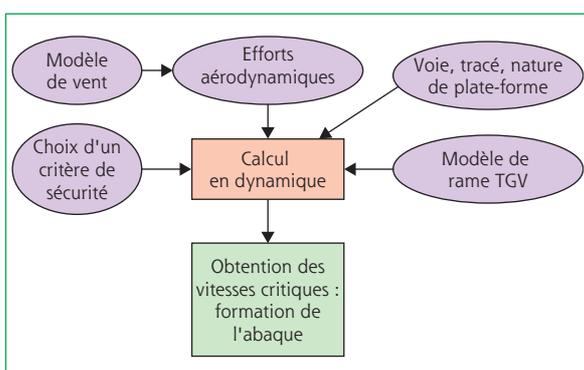


Figure 2 : Organigramme des calculs en dynamique

## ➔ Les abaques de fonctionnement limite

Afin de déterminer les courbes limites de vent admissible, la SNCF a fixé 3 vitesses de circulation possible de ses rames TGV :

– vitesse = 300 km/h, vitesse maximale de circulation passager ;

– vitesse = 170 km/h ;

– vitesse = 80 km/h, c'est la vitesse minimale choisie afin de pouvoir évacuer une rame soumise à un vent très violent et ne pas bloquer complètement le trafic.

Pour un angle d'incidence constant, et dans chaque configuration possible (sol plan, viaduc, remblai, courbe vent vers extérieur, courbe vent vers intérieur), on simule une rafale de vent qui augmente de manière quasi-statique jusqu'à obtenir un déchargement d'un côté de bogie de 90 %. La SNCF se donnant 3 limitations de vitesse possibles, 3 points critiques sont calculés (l'angle de dérapage étant fonction de la vitesse propre du train et de la configuration du terrain).

Trois courbes sont obtenues au final en faisant varier l'angle d'incidence de 10° à 170° par pas de 10° et en conservant la vitesse minimale de vent entre les configurations au vent et sous le vent.

Une symétrie des courbes est réalisée par rapport à 90° et l'on garde la vitesse de vent minimale. Ainsi, cette construction est valable quels que soient la voie utilisée et le sens de circulation (voir figure 3).

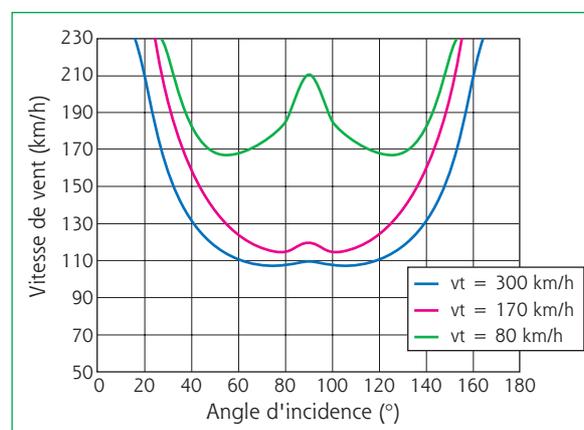


Figure 3 : Abaques pour une circulation en alignement

Ces abaques conditionnent la sécurité. Couplés avec les données météorologiques, ils permettent de définir les zones à protéger et sont implémentés dans les stations anémométriques de surveillance de la ligne.

## ➔ Utilisation d'un modèle analytique (phase d'avant-projet)

Les modèles analytiques ont permis à la SNCF de mettre en évidence les paramètres influents et d'évaluer leur criticité sur le déchargement. Ces travaux ont permis en

outre, à la SNCF, d'ébaucher la démarche qui sera utilisée ensuite pour la détermination des abaques à l'aide des codes de calcul.

Les hypothèses effectuées généralement sur les modèles analytiques sont :

- modélisation plane d'un véhicule dans un plan perpendiculaire à la voie ;
- les calculs s'effectuent en régime stationnaire ;
- le modèle de vent est constant en intensité et en direction dans l'espace ;
- les coefficients aérodynamiques par véhicule permettent de déterminer les efforts aérodynamiques en un point du plan de roulement. Dans le cadre d'une modélisation plane, seules trois composantes sont prises en compte (résultantes transversale et de portance et le moment de roulis) de plus l'action de portance est souvent négligée par rapport à l'action transversale (contribuant à environ 75 % du déchargement).

Il est à noter que dans le cadre des modélisations analytiques, les abaques ont été réalisés avec un niveau de déchargement maxi de 70 % au lieu de 90 %. Cette marge supplémentaire a été fixée vis-à-vis des hypothèses simplificatrices effectuées.

### ➔ Exemple de modélisation plane d'un véhicule utilisé par la SNCF

Le schéma d'architecture (voir figure 4) permet de mettre en évidence les éléments pris en considération dans cette modélisation.

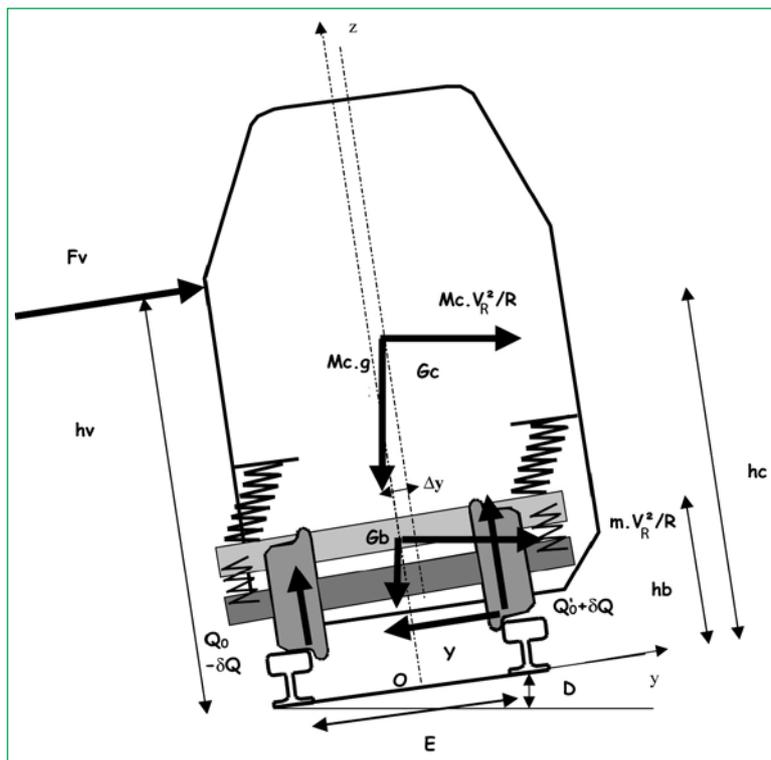


Figure 4 : Modèle plan de la structure Caisse – Bogie – Essieu

- **La caisse :**
  - masse de la caisse,  $M_c = 54,2$  t (vide, sans passager, en ordre de marche) ;
  - hauteur du centre de gravité de la caisse,  $h_c$ .
- **Les bogies + essieux** (la suspension primaire n'est alors pas prise en compte) :
  - masse des 2 bogies équipés (avec 4 essieux),  $m = 13$  t ;
  - hauteur du centre de gravité des bogies équipés,  $h_b$  ;
- **Les suspensions secondaires :**
  - raideur transversale globale,  $K_y = 2,1 \cdot 10^6$  N/mm ;
  - déplacement transversal,  $\Delta_y$ .
- **La voie :**
  - écartement des rails,  $E = 1,5$  m ;
  - rayon de courbure,  $R = 4000$  m ;
  - dévers,  $D = 180$  mm ;
  - effort transversal au contact essieux/voie du rail sous le vent,  $F_y$ . L'effort transversal au contact pour le rail au vent est négligé ;
  - efforts normaux au contact sur chaque rail ;
  - $Q_0$  : charge statique par côté de voiture en configuration sol plan,  $Q_0 = \frac{Mg}{2}$  ;
  - $\delta Q$  : décharge ou surcharge au niveau des contacts roue/rail.
- **Le vent :**
  - vitesse du vent ressenti par le train,  $V_R$  ;
  - angle de dérapage  $\beta$  ;
  - résultante aérodynamique transversale,  $F_v$  ;
  - moment aérodynamique de roulis,  $M_x$  ;

- résultante de portance négligée ;  
 - hauteur du point d'application du vent latéral sur la caisse,  $h_v = \frac{M_x}{F_v}$ .

- **Hauteur du centre de gravité du véhicule ;**  
 $h_G = h_b + h_c = 1,5$  m.

Ces valeurs numériques correspondent à une portion de ligne dans une courbe de faible rayon (4 000 m) avec le plus grand dévers (180 mm). Cette situation se rencontre notamment sur le viaduc d'Avignon, sur le viaduc de Ventabren et dans quelques courbes serrées dans la zone de l'Arbois.

Pour un déplacement à vitesse constante d'un TGV en alignement sur un sol plan, le déchargement est alors :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{2F_v h_v}{E Mg} = \frac{\rho_{\text{air}} S C_{FV}^{\text{aero}}(\beta) V_R^2 h_v}{E Mg}$$

Le risque de renversement est alors influencé par :

- l'allègement des véhicules à travers le facteur  $\frac{1}{M}$  ;

- l'écartement des voies à travers  $\frac{1}{E}$ ;
- la vitesse de vent ressenti par le train  $V_R^2$  dépendant des vitesses du vent  $u$  et du train  $v_t$ ;
- un gabarit de véhicule plus important à travers le facteur.

Dans le cadre de circulation en courbe, le dévers et la vitesse de circulation du train interviennent fortement.

### ➔ Exemple de résultats pour un vent d'incidence 90° en alignement

Plate-forme	V=300 km/h	V=170 km/h	V=80 km/h
Remblai de 20 m	$u_{lim} = 77$ km/h	$u_{lim} = 93$ km/h	$u_{lim} = 149$ km/h
Viaduc des Angles	$u_{lim} = 67$ km/h	$u_{lim} = 80$ km/h	$u_{lim} = 100$ km/h
Sol Plan	$u_{lim} = 113$ km/h	$u_{lim} = 132$ km/h	$u_{lim} = 182$ km/h

## Stratégies de protection

En considérant les données météorologiques sur les années 1996 à 1999, près de 18 000 cas de vents forts ont été simulés par la société Aria (voir figure 5).

Sur chacun des sites (pas d'1 km pour les sites non critiques et pas de 100 m pour les sites critiques), l'ensemble des événements simulés sur la période 1996-1999 a été confronté aux abaques de vitesse limite.

La courbe rouge correspond à l'abaque de fonctionnement limite à 300 km/h.

La courbe verte correspond à l'abaque de fonctionnement limite à 170 km/h.

La courbe bleue correspond à l'abaque de fonctionnement limite à 80 km/h.

En fonction du dévers, de l'évolution des coefficients aérodynamiques, il est possible d'avoir des portions de

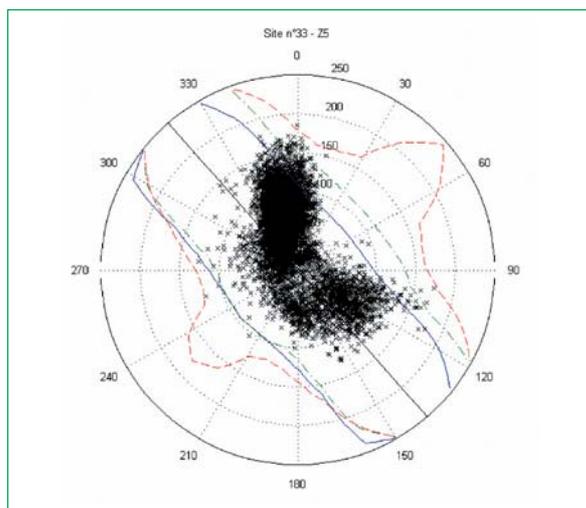


Figure 5 : Intensité des vents de 1996 à 1999 représentée en polaire

courbes à 300 km/h plus pénalisantes qu'à 170 km/h. C'est l'enveloppe la plus pénalisante qui est alors conservée.

À partir de ces résultats, il a été décidé la pose de protections anti-vent sur les sites qui nécessiteraient des réductions de vitesse inférieures à 80 km/h. Quelques autres sites ont été protégés afin de respecter les normes Neige et Vent (NV ou Eurocode) associées au vent « cinquantenaire ». Enfin, dans un objectif d'améliorer la qualité d'exploitation, les zones faisant l'objet d'un ralentissement fréquent à 170 km/h ont été protégées.

De plus, un réseau de surveillance de la ligne a été implanté. Ce réseau est découpé en douze zones équipées chacune d'une station anémométrique. Chaque station est capable d'établir une prédiction météorologique à 5 minutes à partir de la mesure du vent. Ces prédictions sont comparées aux courbes limites spécifiques à chaque zone. Une réduction de vitesse est envoyée au poste de conduite du TGV, si nécessaire, via la signalisation embarquée.

Dans le cadre de la conception de travaux pratiques en ligne, la station anémométrique utilisée est placée dans le secteur du viaduc des Angles. Elle utilise exactement le même matériel que celui qui avait été implanté par la Direction de la Recherche et de l'Innovation de la SNCF. Pour plus de renseignements, reportez-vous au site <http://www.tpline.net>

### ➔ Protection passive

Le choix des protections anti-vent s'est porté sur des écrans pleins d'une hauteur de 1,5 m par rapport au rail. Pour deux sites particuliers (le viaduc des Angles et le site de Courtine), des protections spécifiques ont été installées. Ainsi le viaduc des Angles est équipé d'un écran poreux de 3,5 m de même atténuation que l'écran plein de 1,5 m (voir figure 6). Des essais en soufflerie et acoustiques ainsi qu'une analyse architecturale et de résistance du tablier du pont ont conduit à choisir ce type de protection.

### ➔ Protection active

Outre les protections « passives », la sécurité de la ligne est garantie par un réseau de surveillance de 12 stations anémométriques (station DVL : Détection des Vents Latéraux) localisées du viaduc de la Drôme, sur la ligne Lyon-Marseille, jusqu'au viaduc de la Roubine sur la ligne Montpellier-Marseille.

Les sites des 12 stations anémométriques ont été choisis pour être en zone particulièrement ventée, être en même temps représentatifs de la zone surveillée et former un réseau correctement réparti.

Les conditions de circulation sont définies par tronçons de ligne qu'on appelle « zones de protection anémométrique ». Chaque zone de protection anémométrique est



**Figure 6 :** Images d'un pare-vent poreux (a) et d'un mur plein (b)

liée aux mesures effectuées à la station DVL correspondante.

Étant donné la répartition des stations DVL sur la ligne, les « zones de protection anémométrique » n'excèdent pas 18 km. Chaque zone de protection est découpée en sites élémentaires auxquels sont associés deux abaques de vitesses limites de vents instantanées pour des circulations à 300 km/h et à 170 km/h.

Un travail de prédiction important est nécessaire tant sur le plan temporel afin d'établir une prédiction à 5 minutes de l'intensité et de la direction moyenne du vent, que sur le plan spatial afin de transporter les mesures effectuées par la station en tout point de la zone anémométrique.

Ainsi, connaissant les abaques de circulation limites sur un site élémentaire, il est possible de remonter au vent moyen au droit de la station qui occasionnerait un dépassement de vitesse sur le site élémentaire. Une analyse équivalente sur l'ensemble des sites permet de construire deux abaques de zone, caractérisant les vitesses moyennes admissibles au niveau de la station. Ces abaques sont construits en conservant à chaque fois la situation la plus pénalisante.

Ces deux abaques limites sont :

- la courbe limite à 300 km/h correspondant au seuil de déclenchement associé à une prévision à 5 minutes de l'alerte 170 ;
- la courbe limite à 170 km/h correspondant au seuil de déclenchement associé à une prévision à 5 minutes de l'alarme 80 ;

La détection d'un seuil (alerte ou alarme) se traduit par l'application d'une limitation de vitesse correspondante (170 ou 80 km/h) automatiquement sur chaque voie de l'ensemble de la zone concernée.

Une alarme provoque une action immédiate de limitation de vitesse, une alerte provoque une action différée en présence de trains sur la zone. Les actions résultant

d'un seuil sont temporisées de 15 minutes après disparition des conditions déclenchantes.

Ainsi, à partir de l'évolution des vitesses et des directions instantanées mesurées par les girouettes anémomètres, les stations effectuent une prédiction de la vitesse moyenne et de la direction moyenne du vent à 5 minutes. Ces prédictions sont positionnées par rapport aux deux abaques. En cas de dépassement, un signal de réduction de vitesse est envoyé au poste de conduite des rames via le système de signalisation embarquée (SEI) et les informations sont centralisées et stockées à la gare Saint-Charles de Marseille.

### ➔ Le système DVL (Détection des Vents Latéraux)

Chaque station DVL mesure la vitesse des vents, leur direction, déclenche l'alerte ou les alarmes, les communique aux installations de signalisation locales via le système SEI, et au poste central DVL de Marseille.

Les défauts DVL tant des stations que du poste central sont répercutés au centre de maintenance (centre de supervision).

Alors que les stations utilisées en phase de recherche étaient des stations Campbell équipées de modules de vent Young, les stations qui bordent aujourd'hui la ligne LN5 ont été développées et installées par la société Schneider Electric (pour des raisons de redondance des informations, et donc de sécurité, apportées par les programmes des automates Premium) et suivies par la direction technique de l'ingénierie SNCF et la direction LN5. Le système DVL est constitué des équipements suivants :

#### Les postes de mesure

Chaque poste acquiert les mesures (vitesse et incidence) de vent relatives à un site et les transmet au poste de trai-

tement. Les postes de mesures sont installés en bord de voie.

Chaque poste de mesure est constitué de :

- deux mâts escamotables, supportant chacun deux capteurs ;
- un coffret de télécommunication dont le rôle est d'alimenter les capteurs, d'interfacier les capteurs avec les unités de traitement et de donner une image de son état de fonctionnement au poste de traitement.



Figure 7 : Exemple d'une station anémométrique

### Les postes de traitement

Chaque poste de traitement acquiert les mesures de vent mises à disposition par un poste de mesure. En se basant sur ces mesures, il calcule et émet des alertes et alarmes à destination du système SEI. Les postes de traitement sont installés dans des bâtiments SEI, situés en bord de voie.

Chacun des postes de traitement est basé sur une architecture en redondance massive et active. Le poste de traitement est constitué :

- d'une baie qui contient deux Unités de Traitement, UT (automates) dont le rôle est de calculer les alertes et alarmes de vent en fonction des mesures réalisées par les capteurs. Les deux UT sont actives (il ne s'agit pas d'un fonctionnement en normal secours), elles implémentent le même programme ;
- des moyens de communication avec le poste central de Marseille et avec le poste de mesure (modems...) ;

- des deux commutateurs d'inhibition de chaque Unité de traitement (UT), à des fins de maintenance ;
- des relais d'interface qui permettent de transmettre et de recevoir des informations isolées aux systèmes SEI ;
- un PC portable peut être raccordé à chaque UT afin de réaliser les fonctions nécessitant une interface homme-machine, liées à l'exploitation des données ou à la maintenance.

### Le poste central

Situé à la gare de Marseille Saint-Charles, le poste central est constitué de deux baies qui contiennent 2 PC industriels redondants (PC DVL) jouant chacun le rôle de poste central.

Chaque PC industriel dispose de ses propres périphériques qui sont déportés à une distance maximale de 30 mètres de l'unité centrale. Ces deux PC sont équipés du logiciel de supervision, des moyens de communications avec les 12 postes de traitement (modems et convertisseurs RS485, RS232) et d'un réseau Ethernet de communication de synchronisation des 2 PC-DVL et de communication avec 1 poste de télé-surveillance.

### ➔ Le système de signalisation embarquée (SEI)

Les informations sont transmises électriquement par l'intermédiaire des rails (signal de 4V-1500 Hz). Ce signal est capté par le nez de la motrice et l'information recueillie permet au conducteur du TGV de réguler sa vitesse. Plus d'informations sont disponibles sur le site <http://www.tpline.net>.

### Conclusion

En offrant aux enseignants de sciences industrielles pour l'ingénieur la possibilité de travailler sur la problématique des vents traversiers, la SNCF a ouvert un éventail très large d'études envisageables avec nos élèves tant sur le plan mécanique que sur le plan mesure et transmissions des informations.

Les deux parties de l'article avaient pour objectif de présenter dans les grandes lignes les différents thèmes d'études nécessaires à la résolution de cette problématique. Il est important de rappeler que chaque thème a fait l'objet d'une expertise importante tant par la SNCF que par les partenaires extérieurs associés. Les domaines des essais aérodynamiques, de la prévision météorologique sont caractéristiques.

Enfin, l'ordonnement des travaux proposés dans l'article ne saurait être un ordonnancement chronologique. Toutes les activités ont été menées en parallèle avec des interactions fortes et continues entre les différents acteurs du projet.

En ce qui concerne l'élaboration de travaux pratiques en ligne sur cette problématique, des travaux pratiques de

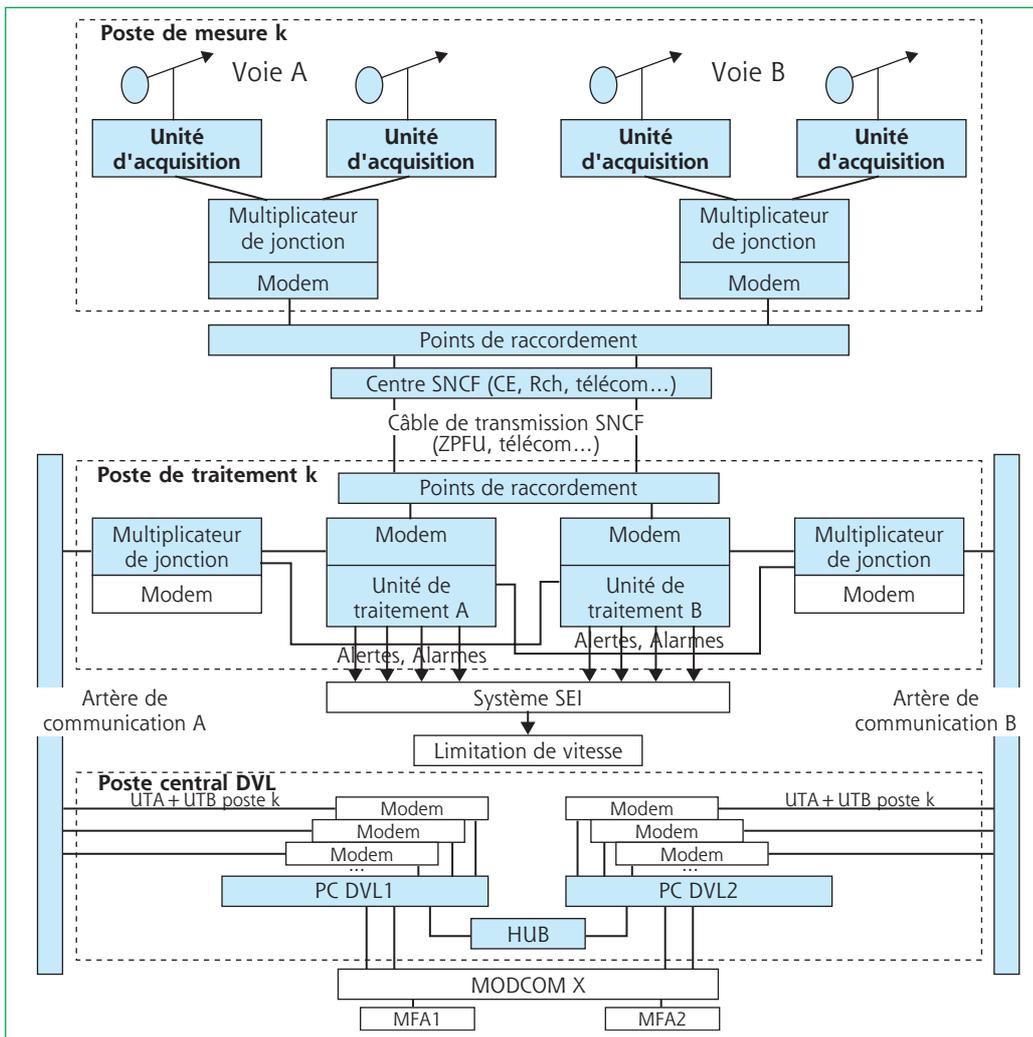


Figure 8 : Architecture des dispositifs communicants

différents niveaux (prépas, bac, collège) devraient être disponibles (prévision fin juin 2007 sur TPLLine) afin de reproduire la méthodologie développée par la SNCF au niveau bac + 1 et bac + 2 (classes préparatoires), et également afin d'introduire un aspect temps réel sur un système motivant pour les élèves de collège (en classe de 6<sup>e</sup>, le thème retenu concerne les transports). À cette fin, l'équipement d'un mât de mesure du vent qui envoie à intervalles réguliers les mesures faites de la direction et de la force du vent, au point kilométrique PK 602.7 de la LN5, au lieu dit des Angles est installé. Ainsi, l'élève a accès 24h/24 gratuitement aux données de mesures de la station météo, ainsi qu'à une base de données technique et multimédia.

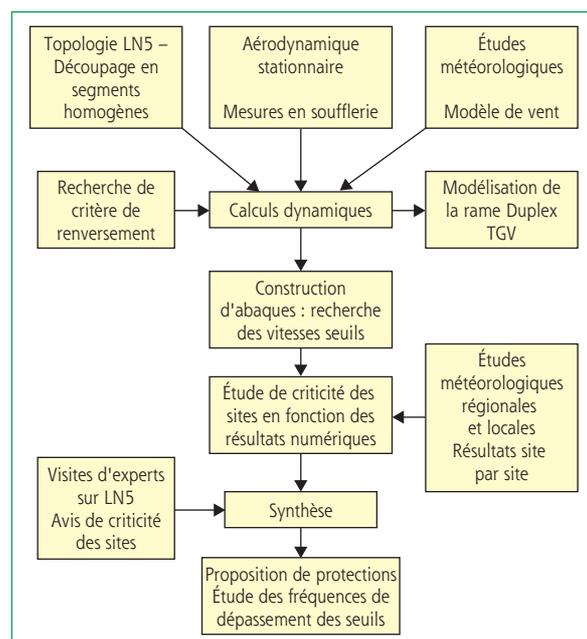


Figure 9 : Synthèse de la démarche industrielle