

La voie, un ensemble complexe soumis à de multiples contraintes

The track: a complex system

with multiple constraints 1788

Le programme de recherche sur la voie devrait apporter au propriétaire et au gestionnaire délégué du réseau les moyens de mieux connaître le patrimoine et les lois de vieillissement auxquelles il est soumis. Un impératif, compte tenu des enjeux économiques et environnementaux induits par des sollicitations croissantes des circulations. Mais pour y parvenir, il faut considérer une approche globale de la voie depuis les couches d'assise jusqu'au châssis de la voie en passant par le ballast.

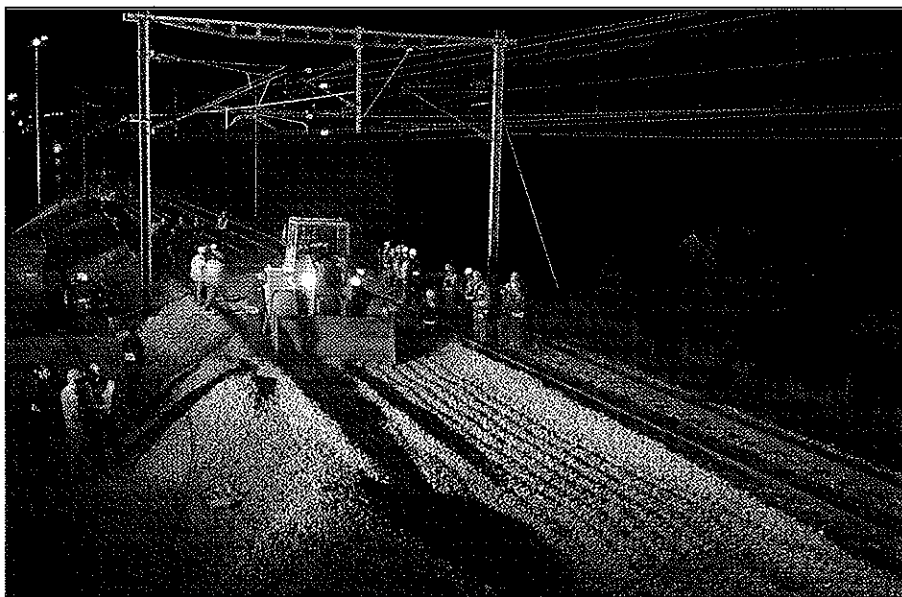
The aim of the track research programme is to give the rail network's owner and manager, RFF, a better understanding of this asset and the laws of ageing affecting it. Such knowledge is essential considering the economic and environmental issues involved as well as the growing physical demands that traffic is placing on it. A global approach, extending from the sub-base layers to the ballast, sleepers and rails must be developed.

La voie, un ensemble complexe soumis à de multiples contraintes

La voie, cette inconnue "Depuis le temps qu'on construit des chemins de fer, on pourrait croire qu'on sait tout sur le comportement de la voie soumise aux sollicitations des véhicules. Il n'en est rien", constate Jean Lux, directeur adjoint du réseau ferré en charge des domaines de l'exploitation et de la maintenance à RFF (Réseau ferré de France). Ainsi, on ne connaît pas les lois de vieillissement du ballast. "Dans ces conditions, comment réaliser une étude économique sur le renouvellement de ce matériau ? Nous n'avons pas les outils pour cela." Autre préoccupation dont l'enjeu est considérable : la tenue du nivellement sur les lignes à grande vitesse. Sur la ligne à grande vitesse, entre Paris et Lyon, là où le ballast a dû être renouvelé, des problèmes subsistent, certes à un moindre degré, mais sans qu'on s'explique bien pourquoi. "Nous avons le sentiment qu'il se passe des choses aux interfaces entre les couches de forme, les sous-couches, le ballast et le châssis de la voie, et qu'il faut prendre en compte la mécanique globale de la voie."

Connaître les lois de vieillissement

Cette perception, partagée par la SNCF, a largement orienté le programme de recherche sur la voie présenté par la direction de la Recherche. Un programme dont la maîtrise d'ouvrage et le financement sont assurés par RFF, aux termes d'une convention annuelle de recherche passée avec la SNCF pour un montant de 5,35 millions d'euros. Les objectifs du propriétaire de l'infrastructure ? "Nous recherchons les moyens de connaître l'état de notre patrimoine et les lois de vieillissement auxquelles il obéit pour anticiper sa dégradation", résume Jean Lux. "Nous y ajoutons la protection de l'environnement : à partir de 2003, il ne devrait



Renouvelé prématurément sur certaines portions de la ligne Paris-Lyon, le ballast est l'un des enjeux économiques de ce programme de recherche sur la voie.

plus être possible de laisser le ballast usagé le long des emprises, d'où l'intérêt accru porté au réemploi de ce ballast pour des renouvellements de voie." "Nos recherches sont destinées à faire évoluer les techniques, ainsi que les méthodes de maintenance, pour faire le meilleur usage de la voie au meilleur coût", estime pour sa part André Le Bihan, responsable de la division "politique de maintenance" du Gestionnaire de l'infrastructure délégué (GID). "La connaissance du fonctionnement du ballast est un souci commun à la SNCF et à RFF", constate-t-il. D'où la place faite à ce thème dans le programme, qui s'intéresse aussi à la définition du domaine d'utilisation du ballast recyclé.

L'assise, cette inconnue

En ce qui concerne les structures d'assise, les actions prévues au programme visent à substituer aux données initiales, extrapolées pour l'essentiel de la construction autoroutière, des données adaptées apportées par une expérimentation ferroviaire en grandeur réelle. "L'assise est un domaine encore mal connu, où les chercheurs ont

de l'avenir", assure André Le Bihan. L'étude de la mécanique globale de la voie devrait permettre d'affiner les modèles et de les faire "tourner". Le programme prévoit par ailleurs l'exploration de pistes comme la voie sans ballast (sur dalle de béton ou sur asphalte). Dans ce domaine, pas d'expérimentation pour l'instant (hormis quelques poses en tunnel), mais une veille technologique active sur les expériences réalisées à l'étranger.

Trois axes de recherche pour le rail

Dernier grand sujet prévu au programme, le rail. Objet de prédilection des chercheurs depuis longtemps, il bénéficie aujourd'hui de trois grandes actions de recherche : "Connaissance du comportement mécanique du rail", "Amélioration des techniques de contrôle en voie", "Développement des systèmes d'aide à la maintenance". Il est vrai que le rail, comme l'ensemble des composants de la voie, subit des contraintes toujours plus fortes : la fréquence des circulations augmente, la vitesse d'exploitation sur la ligne à grande vitesse-Est est prévue à ➤

Demandez le programme européen !

Améliorer les techniques de maintenance des voies ferrées, notamment dans les endroits où les bourrages ne sont plus efficaces, est une préoccupation largement partagée en Europe : l'Espagne, la France, la Suède et la Norvège vont investir 2,8 millions d'euros de 2002 à 2005 dans le programme européen Supertrack. Ce programme, auquel participent l'Ingénierie et la Recherche SNCF, devrait permettre de recenser, sur les réseaux de chaque pays, les techniques d'entretien et de réparation, telles que l'injection de coulis (jet-grouting) sous la voie pour rigidifier les couches d'assise, et de tester leur efficacité *in situ*. Les chercheurs travailleront aussi sur l'adaptation des modèles mathématiques en essayant de calculer les effets de ces réparations.

A "super" European programme

Better maintenance techniques for places where tamping is no longer effective is a concern all across Europe. Between 2002 and 2005, Spain, France, Sweden and Norway are going to conduct a 2.8-million-euro programme called Supertrack, in which the track maintenance and repair techniques used in each country will be catalogued and tested insitu. Researchers will also develop mathematical models by calculating the effects of these repairs. SNCF Research and Engineering Departments will take part in this programme.

➤ 320 kilomètres/heure et les charges à l'essieu, sur lignes classiques, pourraient atteindre 25 tonnes pour du trafic fret.

● Pour mémoire, la convention de gestion passée entre RFF et la SNCF se monte à 2,615 milliards d'euros.

"Considering how long we have been building railways, you might think that we know everything about how tracks behave, but this is simply not the case", says Jean Lux, vice president, Rail Network, at RFF, the owner of the French rail infrastructure. For example, the laws of ageing for ballast are not known. "So how can we do an economic study on replacing it", asks Lux. Another important concern is leveling on the high-speed lines. Ballast has been replaced at some places between Paris and Lyon, but the problem is not completely solved and it is not clear why. "We have a feeling something is happening at the interfaces between the components, so we have to look at the total track structure", says Lux. This belief that a global approach was needed was critical in shaping the track research programme proposed by the SNCF Research Dept., which RFF is financing under an annual contract with SNCF valued at 5.35 million euros. What are RFF's objectives? "To better understand our asset and the laws of ageing affecting it", says Lux, adding that environmental protection is another

factor. "As of 2003, it probably won't be possible to leave old ballast along the right-of-ways any longer, so we're interested in re-using it."

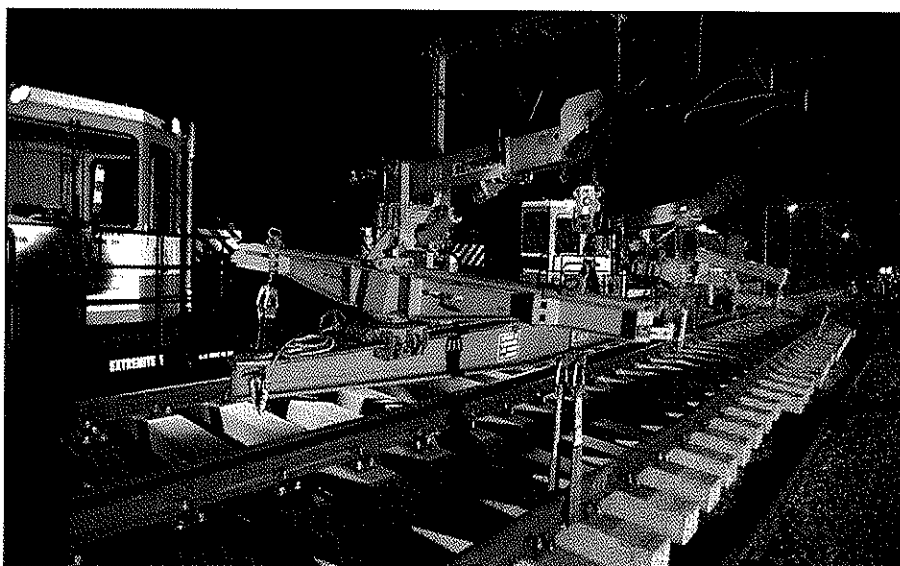
Refining the models

"Our research is aimed at improving maintenance methods to make better, more cost-efficient use of the tracks", explains André Le Bihan, head of the maintenance policy department. How ballast behaves is a common concern, hence its importance in the programme. As for the sub-base layers, initial data, extrapolated mainly from road construction, will be replaced with data from rail

lines. A study of the overall mechanics of track behaviour should help to refine the models. The programme also calls for exploring some new possibilities such as slab tracks, though by monitoring research in other countries rather than with experiments.

The last major subject is the rails. More traffic, higher speeds and heavier axle loads mean ever-greater stress for the rails. There will be extensive research into their mechanical behaviour as well as inspection techniques and maintenance support systems.

● The management contract between RFF and SNCF is valued at 2.615 billion euros.



Le Gestionnaire de l'infrastructure délégué (GID) est l'un des trois maîtres d'œuvre du programme à la SNCF, aux côtés de la Recherche et de l'Ingénierie.

Ballast : un matériau au comportement mystérieux

Ballast: a material with mysterious behaviour

A quoi sert le ballast ? À transmettre et à répartir les charges statiques et dynamiques induites par les circulations ; à assurer un ancrage de la voie dans les trois directions ; à réduire les émissions acoustiques et à amortir les vibrations ; à drainer les eaux pluviales ; à faciliter la maintenance de la voie. Un programme chargé ! Pour améliorer l'efficacité de la maintenance de la voie, pour en optimiser le coût et prévenir les incidents de la circulation, il est donc capital d'étudier le comportement mécanique de ce matériau. Un comportement dont on commence seulement à comprendre à quel point il pourrait se dégrader sous la contrainte de la grande vitesse (lire l'interview du professeur Karam Sab p. 14).

"Le passage des essieux d'un train, c'est un peu comme si on donnait deux coups de marteau sur un tas de cailloux posé sur un matelas. Il faut étudier dans quelles conditions s'opère la désorganisation du milieu résultant de ces phénomènes dynamiques et vibratoires", analyse le professeur Karam Sab, directeur de recherche au Laboratoire central des Ponts et Chaussées de Champs-sur-Marne (LCPC). Une assise de matériau granulaire comme le ballast ne se laisse pas modéliser comme un milieu continu. Explications avec le professeur Jean Jacques Moreau, créateur du Laboratoire de mécanique et génie civil de Montpellier (LMGC) : "Le nombre

restreint de couches de cailloux constituant cette assise fait qu'on doit prendre en compte la dynamique individuelle de chacun d'eux ; cela s'appelle une méthode d'éléments discrets. Leur interaction par des contacts frottants et susceptibles de se rompre à tout instant fait entrer l'étude dans le domaine de la "mécanique non régulière" ou "non lisse" (en anglais : *non-smooth mechanics*), une spécialité montpelliéraine de longue date."

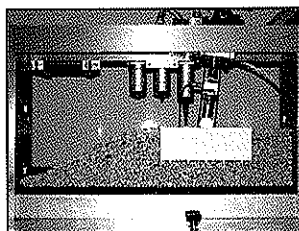
La détérioration de la qualité géométrique

Plusieurs thèses et recherches sur le ballast sont menées par la SNCF en collaboration avec les laboratoires de Montpellier et de Champs-sur-Marne (lire les interviews p. 13 et p. 14). Depuis le début de l'année 2001, Catherine Cholet, chargée de re-

cherche à la direction de la Recherche de la SNCF, pilote une étude sur la détérioration de la qualité géométrique du ballast, utilisant les modèles discrets, qui privilégie une double approche numérique et expérimentale.

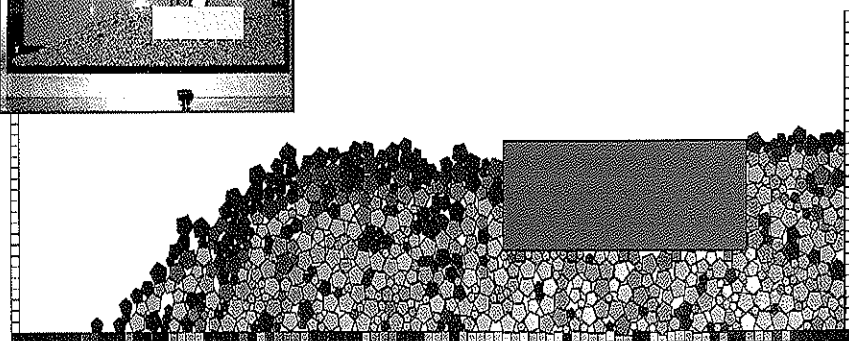
Une expérience a été développée en laboratoire, reproduisant une portion de voie simplifiée. Les résultats obtenus sont comparés avec un modèle numérique. Gilles Saussine, a commencé une thèse, en collaboration avec le LMGC, en octobre 2001, pour développer un code modélisant le ballast en éléments "discrets" tridimensionnels. Cette étude constituera une "première" scientifique compte tenu de la complexité des formes du ballast.

"De nombreuses voies restent à explorer", reconnaît Catherine Cholet. Un exemple ? L'étude des mécanismes



Vue du dispositif expérimental.

Simulations numériques : les grains sur lesquels s'exerce la force de contact la plus importante sont représentés en rouge, la plus faible en bleu.

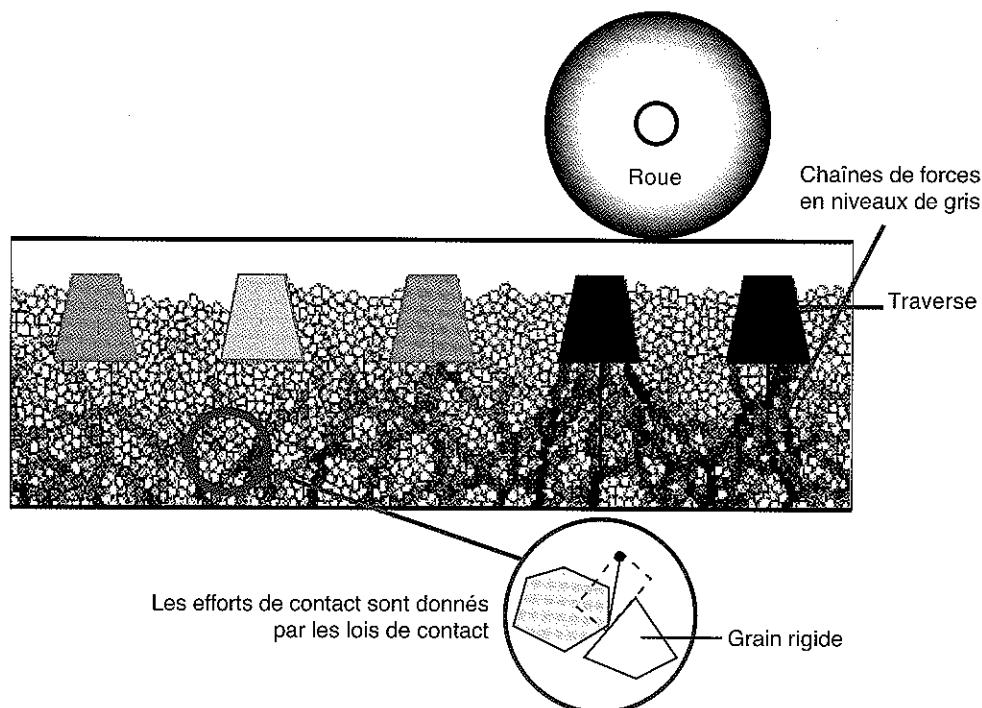


Sources : SNCF - direction de la Recherche et de la Technologie.

de détérioration – l'“attrition”, c'est-à-dire réduction en “fine” (poussière) – des granulats. ○

Ballast serves multiple purposes such as distributing the loading as trains pass, anchoring the tracks, reducing noise and dampening vibration. To improve track maintenance, optimise cost and prevent accidents, it is essential to study its mechanical behaviour. In particular, researchers are only beginning to understand ballast degradation under the forces exerted by high-speed traffic.

“When the axles of a train pass, it's a little like giving two hammer blows to a pile of crushed rock on a mattress. We have to study how the resulting disorganisation occurs”, says Professor Karam Sab, a research director at the Ponts et Chaussées engineering school. A layer of granular material like ballast cannot be modelled in the same way as a continuous medium. Professor Jean Jacques Moreau, creator of a research laboratory at Montpellier, explains: “Since this crushed rock



Représentation des répartitions d'efforts sur le ballast grain par grain (modèle discret). Plus les efforts sont importants, plus les grains sont sombres.

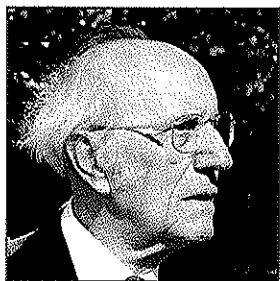
Source : SNCF - direction de la Recherche et de la Technologie.

2 questions à . . . Jean Jacques Moreau,

professeur au Laboratoire de mécanique et génie civil de Montpellier (LMGC).

Rail et Recherche : Quelle place occupe le ballast dans les travaux du LMG ?

Pr Jean Jacques Moreau : L'équipe “Systèmes Multi-Contacts”, qui étudie de nombreux aspects de la mécanique granulaire, est directement en charge du sujet. Mais les granulats sont également présents parmi les thèmes de recherche des équipes “Milieux hétérogènes” et “Thermomécanique des matériaux”. D'autres équipes du LMG s'occupent de la mécanique du bois ou des structures architecturales innovantes, autres occasions de rencontrer des interactions non régulières entre éléments multiples comme les



cellules des tissus ligneux, les tiges, câbles et toiles de certains édifices contemporains.

R & R : Comment le travail de recherche se répartit entre vos équipes et celles de vos partenaires ?

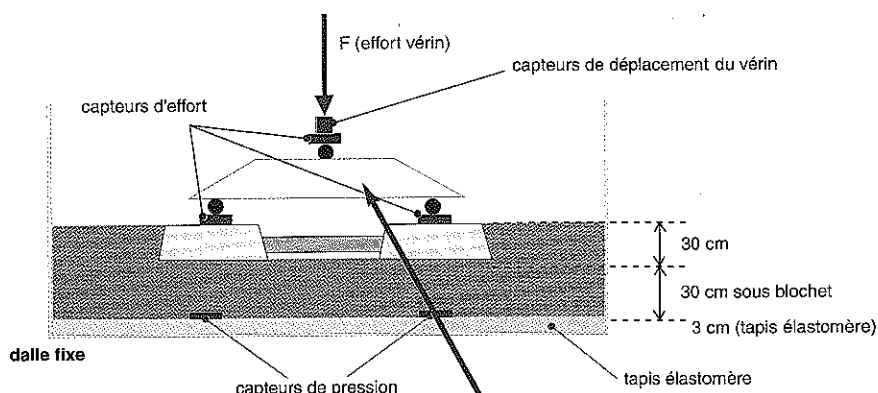
Pr J. J. M. : Le pilotage du programme de recherche en cours, qui doit fournir à terme des logiciels d'aide à la décision pour la maintenance du ballast, incombe naturellement à des gens ayant une pratique ferroviaire. L'expertise du LMG en matière d'analyse numérique des systèmes multi-corps, appuyée par les expériences matérielles conduites chez nos amis du LCPC, s'applique à élaborer certaines pièces centrales de ces futurs logiciels. Plus largement, on attend de cette coopération des réponses aux interrogations fondamentales sur ce qui se passe à l'intérieur d'un tas de cailloux.

La voie, un ensemble complexe soumis à de multiples contraintes

forms a small number of layers, the dynamics of each piece must be taken into account. This is known as the discrete elements method. The interaction of the pieces, which can stop at any moment, places the research in the realm of non-smooth mechanics."

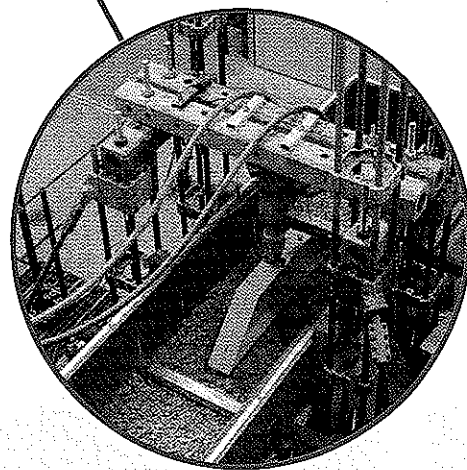
Degradation of the geometry

Since early 2001, Catherine Cholet, an SNCF researcher, has been using discrete element modelling to study how ballast geometry deteriorates. In this project, results in a laboratory experiment on a section of simplified track are compared with a numerical model. Meanwhile, Gilles Saussine has begun writing a dissertation on a code to model ballast as discrete three-dimensional elements. The complex shapes of the ballast make this study a scientific first. ○



Le banc d'essai de Nantes utilisé pour les recherches sur le tassement du ballast. Une version intégrant les couches d'assise sera disponible en 2003.

Source : SNCF - direction de la Recherche et de la Technologie.



2 questions à... Karam Sab, professeur à l'École nationale des

Ponts et Chaussées (ENPC), directeur de recherches au Laboratoire central des Ponts et Chaussées (LCPC).



Rail et Recherche : Le thème du ballast revient souvent dans les thèses que vous avez dirigées. Quels aspects ont été abordés ?

Pr Karam Sab : La première thèse, celle de Nathalie Guérin en 1996, portait sur le tassement vertical du ballast. En 2001, Valérie Bodin a

repris ce sujet en y ajoutant la dimension latérale pour modéliser le comportement du ballast sous la contrainte d'un train pendulaire. Elle a d'ailleurs reçu le prix de la meilleure thèse de l'École des Ponts et Chaussées. La même année, Ximena Oviedo s'est intéressée aux paramètres du bourrage et de la compacité dans la mise en œuvre du ballast, étudiant les effets des vibrations provoquées par la machine et du serrage des bras ("bourroirs"). Une quatrième thèse, celle de Vu Hieu N'guyen en 2002, dirigée par Denis Duhamel, était consacrée à des calculs dynamiques.

R. & R. : Est-il possible de dresser un premier bilan des travaux de votre équipe ?

Pr K. S. : Nous commençons à avancer sérieusement sur la loi de tassement du ballast, c'est-à-dire la relation entre le nombre de cycles, ou nombre de passages, et le tassement. Cette relation, nous l'avons établie par l'expérimentation, elle reste à vérifier par des mesures *in situ*.

Nous avons également mis au point une méthode de calcul permettant d'utiliser cette loi. En ce qui concerne les phénomènes dynamiques, les essais déjà réalisés se plaçaient dans des conditions favorables, c'est-à-dire une vitesse relativement limitée. Or, si la vitesse est portée à 320 kilomètres/heure, l'expérimentation tend à montrer qu'il se produit souvent un mouvement du massif de granulats entraînant un enfoncement de la traverse. Dans les conditions de l'exploitation d'une ligne à grande vitesse, cela signifierait un cycle d'interventions de maintenance très court. ○

Ballast et sol : une modélisation globale

Ballast and soil: global modelling

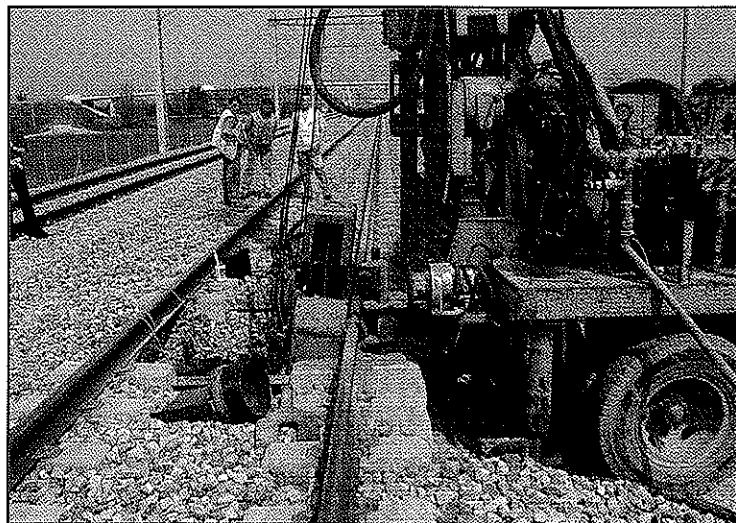
Davantage de mesures scientifiques, moins d'empirisme : l'amélioration des paramètres de pose, mais aussi d'entretien, du ballast passe par l'élaboration de modèles numériques prenant en compte l'ensemble des composantes de la voie.

"Pour déterminer l'épaisseur de la couche de granulats, on a besoin d'étudier leurs interactions avec la plate-forme au sein d'un système unique qu'il faut modéliser de façon globale", indique François Quétin, de la direction de la Recherche SNCF.

On a constaté, en effet, que le comportement du ballast n'est pas homogène sur toute la longueur d'une voie, confirmant l'influence du substrat, c'est-à-dire des couches d'assise (couche de forme et sous-couches). Sur la ligne à grande vitesse Paris-Lyon, à certains endroits, le ballast ne "tient" pas : il pénètre les couches d'assise, dont les matériaux se mélangent aux granulats, et ses performances diminuent ; on parle alors de "ballast contaminé" (lire l'encadré "Supertrack" p. 11). Or, l'augmentation de la vitesse commerciale, de la fréquence des circulations et du poids à l'essieu pourraient accélérer l'apparition de ce phénomène et le rendre plus dangereux.

Vers un véritable banc d'essai ferroviaire

Si la modélisation du ballast réclame un modèle granulaire, ou "discret" (lire p. 12), pour les sols c'est plutôt le modèle "continu" (généralement par éléments finis \bullet), qui convient. À la direction de la Recherche, Laurent Schmitt a pour mission de construire un tel modèle des couches d'assise. "Cette action de recherche prend place dans le projet de modélisation globale de la voie, explique-t-il. Nous voulons définir les condi-



Pour mesurer le tassement de la voie et les différents niveaux de pression, et comprendre comment le sol est sollicité, la SNCF a installé, par un système de forage, des capteurs sur le site de Lapalud.

tions dans lesquelles la modélisation discrète du ballast et la modélisation continue de la plate-forme peuvent être couplées, afin de faire passer les informations d'un modèle à l'autre. Actuellement, on en est à la description des lois de comportement de chacun des deux milieux." Pour les calculs, la direction de la Recherche a fait appel à un jeune "thésard" du LCPC, Laurent Ricci, dont les travaux débutent cet été. Côté expérimentation, les essais conduits en 1996 par Nathalie Guérin à l'ENPC pour définir une loi de tassement vertical du ballast reposaient sur l'hypothèse que les couches inférieures

Comment mesurer la raideur verticale de la voie ?

La dégradation de la géométrie de la voie est d'autant plus préjudiciable au confort des passagers que la vitesse est élevée. Or, cette dégradation est notamment liée à la raideur verticale de la voie. Aussi, la surveillance régulière de l'évolution de cette valeur pourrait déboucher sur une maintenance préventive, c'est-à-dire des interventions visant à rétablir les valeurs normales – elles doivent être non seulement correctes mais homogènes – de la voie avant même l'apparition de défauts.

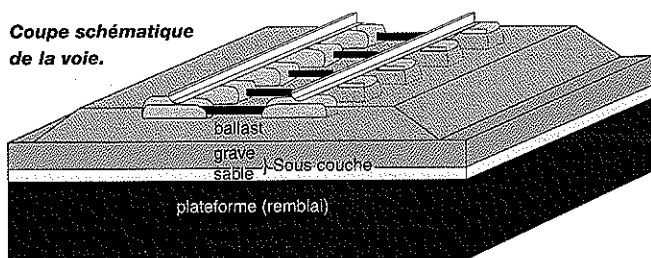
Des essais de mesure ont été effectués par l'Agence d'essais ferroviaires, sur la ligne à grande vitesse Paris-Lille, au moyen de capteurs embarqués à bord d'un véhicule circulant à grande vitesse. Le principe ? Des accéléromètres montés sur les essieux du véhicule mesurent les vibrations générées par un balourd (poids) ajouté sur l'axe de l'essieu et fournissent une estimation de la raideur verticale globale de la voie.

La voie, un ensemble complexe soumis à de multiples contraintes

ne se déforment pas. Pour dépasser cette limite, le projet de modélisation globale prévoit, à partir de 2003, d'inclure les couches d'assise dans les essais. Ainsi, au laboratoire du LCPC de Champs-sur-Marne, le banc d'essai à l'échelle un tiers va être perfectionné par l'incorporation d'une plate-forme (sol, couche de forme et sous-couche) et le passage d'une à trois traverses. À Nantes, il est prévu de construire, en vraie grandeur, une fosse cylindrique composée d'une couche de ballast reposant sur une couche d'assise ferroviaire type, sur lesquels sera appliqué un disque de chargement.

"Ce n'est plus une géométrie ferroviaire, précise Laurent Schmitt, mais les mesures réalisées devraient permettre, d'une part de caler nos modèles, et d'autre part de caractériser les réponses dynamiques de différents sols afin de dimensionner des sols synthétiques équivalents à intégrer dans des essais de géométrie plus réalistes." Une structure qui n'existe pas encore en France. ○

Coupe schématique de la voie.



Source : SNCF - direction de la Recherche et de la Technologie.

① *Modèle par éléments finis* : permet de résoudre des équations de la mécanique (des sols, des fluides), en décrivant le milieu étudié comme un assemblage de petits volumes élémentaires (les "éléments finis")

Improving the laying and maintenance of ballast requires numerical models that take into account all track components. "To decide how thick the layer of aggregates should be, we have to study their interaction with the roadbed in a single system that must be globally modelled", says SNCF researcher François Quélin. Ballast does not behave uniformly over the full length of a rail line, confirming the influence of the substratum. In some places on the Paris-Lyon high-speed line, the ballast has penetrated and been "contaminated" by the sub-base material, diminishing its performance (see the inset "Supertrack"). Higher speeds, frequencies and axle weights could accelerate this phenomenon and make it more dangerous.

Developing comprehensive testing methods

Ballast must be modelled by the discrete elements method (see p. 14), while the finite elements method① is generally used for continuous substances. SNCF researcher Laurent Schmitt's mission is to build a model for the sub-base and capping layers. "We want to be able to combine the modelling of the ballast and the modelling of the roadbed so data can be passed from one to the other", he explains. Earlier experiments to define a vertical settlement law for ballast assumed that underlying layers do not deform. The global modelling project, however, plans to include the sub-base layers in the tests. A new test rig will include a road- ➤

1 question à... Marie-Josèphe Poitout,

adjointe au chef du département Études de lignes, direction de l'Ingénierie (SNCF).

RAIL & RECHERCHE : La direction de l'Ingénierie mène des recherches appliquées sur le ballast, les couches de forme et les sous-couches. Pourquoi ?

Marie-Josèphe Poitout : Pour faire les relations entre les caractéristiques géotechniques des matériaux et leur comportement, comprendre et apporter une solution d'amélioration à des problèmes ponctuels de tenue d'assise, et pour faire baisser les coûts de construction. Les matériaux que nous employons sont "nobles", c'est-à-dire coûteux à l'achat et à la mise en œuvre. Notre premier objectif est donc d'optimiser les caractéristiques et les épaisseurs de ces matériaux. Ensuite, nous devons trouver des réponses à des problèmes récurrents de nivellement. Enfin, il faut envisager le vieillissement des structures d'assise et leur comportement dynamique, préoc-

cupation nouvelle. Parmi les recherches que nous menons, je citerai les tests pour améliorer par traitements le sol naturel sous des assises telles que la craie et le limon et réduire ainsi la couche de forme. Nous soumettons également des structures réelles à des sollicitations cycliques pour évaluer leur évolution. Autre exemple, nous procédons à des essais sur des matériaux géotextiles pour renforcer et réparer les couches d'assise. Avec ces matériaux, on cherche aussi à créer un système de surveillance des déformations d'assise ou d'effondrements : des fils ou nappes métalliques ou des fibres optiques, objet de mesures électriques ou radar, indiqueraient des mouvements du sol. Nos recherches appliquées sont complémentaires de celles, plus théoriques, menées par la direction de la Recherche. ○

► bed (subgrade, capping and sub-base layers) and three sleepers instead of one. There are also plans to build a full-scale cylindrical pit with ballast on a sub-base layer to perform plate-bearing tests. "This is no longer railway geometry", notes Schmitt, "but the measurements should allow us to adjust our models and

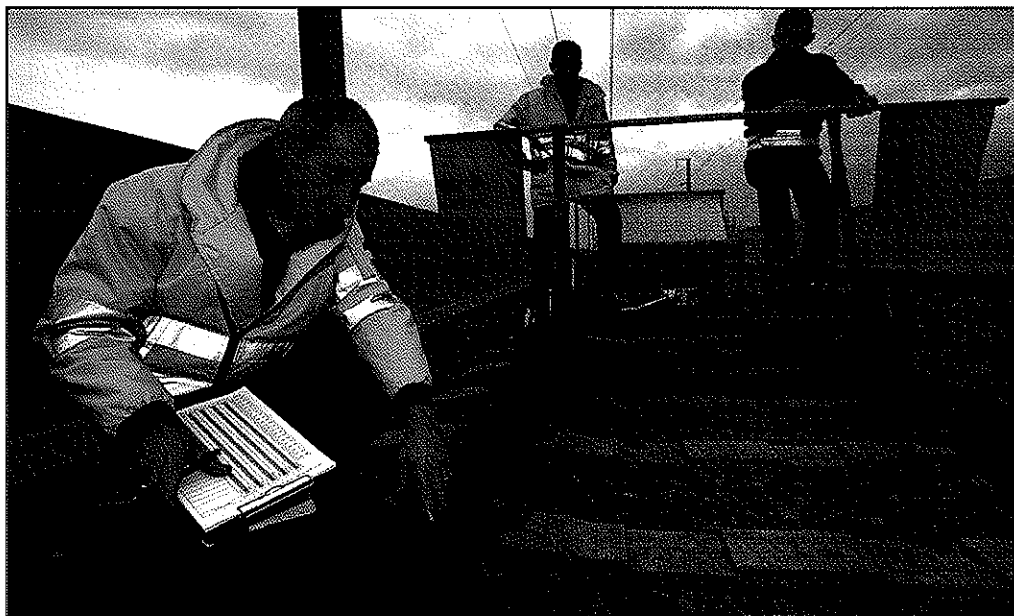
describe the dynamic responses of the different soil types in order to determine synthetic soils for more realistic geometry tests." ○

① Finite elements modelling solves equations in mechanics by describing the milieu being studied as a collection of small elementary volumes (the finite elements).

Le rail : tout se joue dans le contact rail-roue

Rails: the critical rail-wheel interface

Une chute impressionnante ! En une quinzaine d'années, le nombre de ruptures de rails sur le réseau ferré français est passé de 1 000 par an à moins de 600 par an. "Un progrès dû aux recherches et développements menés depuis une vingtaine d'années, assure Louis Girardi, responsable des Rails à la direction de l'Infrastructure. Les recherches ont permis, en particulier, de comprendre beaucoup de choses dans le développement des défauts." Elles se sont traduites par une amélioration de la qualité du matériau, d'une part ; par l'intensification du remplacement préventif des rails défectueux, d'autre part. Sans oublier l'évolution des procédés de soudure. Pourtant, aujourd'hui, il est devenu difficile de progresser. D'autant que ce "patrimoine" n'évolue pas au même rythme que les véhicules, qu'il s'agisse de l'augmentation de la vitesse ou du poids à l'essieu. Il faut donc mieux connaître l'impact des actions subies par le rail pour adapter la politique de maintenance et de régénération. Les recherches actuelles sont consacrées à la modélisation de ces actions, sans délaisser les essais en vraie grandeur. Avec le programme de recherche



Les recherches sur le rail ont permis d'améliorer la qualité du matériau et d'intensifier le remplacement préventif des rails défectueux.

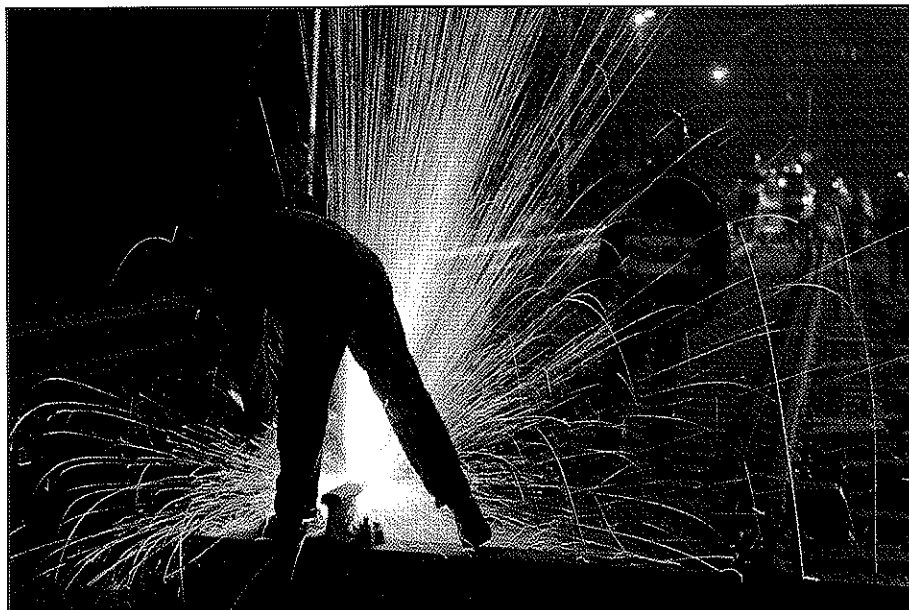
Deufrako ("Nouvelles méthodes de prédiction quantitative de la performance des rails sous l'accroissement des sollicitations de service"), la France et l'Allemagne se sont partagé le travail : modélisation pour le premier partenaire, essais pour le second. La SNCF, la Deutsche Bahn, la RATP, CORUSRAIL et différents laboratoires et instituts de recherche (INSA, INRETS, LMS) sont parties prenantes du programme. Lancés en 2001, les travaux

devraient donner leurs premiers résultats dès cette année. Par ailleurs, la SNCF poursuit aussi des développements pour son propre compte.

Défaut initial, défaut acquis

L'étude du contact rail-roue y joue les vedettes. On sait que le rail, à chaque passage des essieux, est le siège de contraintes ponctuelles. Contraintes au voisinage immédiat du point où se produit le contact, très fortes et tridi-

La voie, un ensemble complexe soumis à de multiples contraintes



mensionnelles. Contraintes affectant le reste du rail, ensuite. D'une intensité beaucoup plus faible, elles n'en "fatiguent" pas moins le produit par leur répétition. Ces phénomènes ne suffisent pas, cependant, à provoquer une fissure ou une rupture. Les ruptures ont pour origine soit un défaut caché à l'intérieur de l'acier, à 7 ou 8 millimètres de profondeur, inclusion minuscule aggravée progressivement par l'application des contraintes ; soit par un défaut de surface dû à l'endommagement du matériau vierge. Ce cas de figure devrait se rencontrer de plus en plus souvent. En effet, l'augmentation de la force de traction suppose une sollicitation plus importante de l'adhérence, par les engins, entraînant une augmentation des forces tangentielles, très nocives pour le rail.

Modéliser le rail est aussi difficile que modéliser l'atmosphère

Les différents programmes de recherche visent donc à quantifier l'ensemble de ces phénomènes, en utilisant des méthodes de calcul modernes, pour prévenir l'apparition de défauts. "Modéliser le rail est aussi difficile que

modéliser l'atmosphère, prévient toutefois M. Girardi : on ne connaît pas l'ensemble des paramètres et, par nature, tous les phénomènes qui se produisent ne sont pas déterministes." C'est le cas du mouvement de la roue, qui peut être qualifié de "chaotique", c'est-à-dire non prévisible à partir de conditions initiales données. Autre difficulté, les chercheurs essaient de tenir compte de l'aspect "système", dans la construction de leurs modèles. À l'heure actuelle, les chercheurs travaillent dans deux directions. D'un côté, ils avancent dans la modélisation des efforts dynamiques qui s'exercent au contact du rail et de la roue. De l'autre, au contraire, ils réintègrent "l'environnement du rail", en s'attachant à construire un "modèle global" dans lequel chacun des trois sous-systèmes, rail, voie et véhicule sont pris en considération. ○

Over the past 15 years, the number of rail failures on the French network each year has fallen from 1,000 to less than 600. "The improvement is due to 20-odd years of research that has helped us understand a lot about why failures occur," says Louis Girardi of the Infrac-

tructure Dept. This research has resulted in improvements in the material as well as more aggressive preventive maintenance. Further progress has become difficult, however, because this asset is not evolving as rapidly as vehicles, which are getting faster and heavier. A better understanding of the stresses on rails is thus needed to adjust the maintenance and renewal strategy.

Current research involves modelling and full-scale trials. In the Deufrako programme, where new quantitative methods for predicting rail performance are being developed, France is working on the modelling and Germany on the physical trials. The first results should be out this year. Meanwhile, SNCF is pursuing its own independent research, too.

Initial defect, permanent defect

This programme's primary focus is the rail-wheel interface. When the axle passes, the load on the rail exerts very strong, three-dimensional stresses, first near the contact point, then in the rest of the rail. The latter, though less intense, still cause fatigue. These phenomena are not sufficient, however, to provoke failures. These are caused by an internal or surface defect in the steel. This will be seen more and more, since greater traction forces will increase the very damaging tangential forces. The researchers' goal is to use the most advanced computational methods to quantify all these phenomena and avert these defects. "Modelling the rail is as difficult as modelling the atmosphere", warns Girardi. "We don't know all the parameters, and all the phenomena that occur are not 'deterministic'." The wheel's movement, for example, is "chaotic", i.e. unpredictable. At present, researchers are working both to improve the modelling of dynamic forces present in the rail-wheel interface and to construct a "global model" that takes into account the complete "rail environment", i.e. the rail, the track and the vehicle. ○

Fontis : des tests grandeur nature

Subsidence: *engineering digs into the problem*

Parallèlement aux projets à long terme menés dans le cadre de la Recherche, du côté de l'Ingénierie on cherche des réponses à des questions parfois urgentes comme l'effondrement de la voie sur la ligne à grande vitesse Paris-Lille.

While the Research Dept. carries out long-term projects, Engineering is looking for answers to more urgent problems, like the collapse of the track on the Paris-Lille high-speed line.

Malgré l'importance des reconnaissances et traitements déjà réalisés, la menace des fontis plane encore sur la ligne du TGV Nord. Sur proposition de la SNCF, une campagne d'expérimentations est financée par RFF, afin de comparer les méthodes et déterminer les moyens les plus efficaces de localiser ces cavités souterraines à l'origine d'effondrements de terrain brutaux. La SNCF en assure la maîtrise d'œuvre. Cette recherche devrait se dérouler de juin 2002 à la fin du premier trimestre 2003, pour un coût total de 644 000 euros. À proximité de la gare de Haute-Picardie, à Ablaincourt (Somme), l'équipe de Marie-Josèphe Poitout, adjointe au chef du département Études de lignes de la direction de l'Ingénierie (SNCF), travaille sur une voie de garage présentant la même structure qu'une voie de circulation. Le projet consiste à reproduire artificiellement deux cavités (l'une à 1,50 mètre de profondeur, l'autre à 3,50 mètres), répliques des "sapes" construites entre 1914 et 1918. Mal comblées après la guerre et difficiles à détecter pendant les travaux de construction de la ligne, ces cavités sont à l'origine de 60 % des fontis sur la ligne à grande vitesse et ses environs.

L'une des principales difficultés est



Un des impératifs de la SNCF sur la LGV Nord : détecter les fontis souvent à l'origine d'effondrements de terrain.

donc, en amont, de détecter ces cavités sous les voies, d'évaluer avec précision leurs dimensions et, après travaux, l'efficacité du comblement. Entre autres techniques de géophysique à tester, la microgravimétrie sera utilisée pour mesurer – depuis la surface – des microvariations de l'accélération de la pesanteur, liées à des déficits de masse. Mais cette

technique a ses limites car cette variation est la même pour une petite cavité proche de la surface ou pour une grande cavité profonde, et la mesure peut indiquer une simple variation de la densité des terrains. L'efficacité du géoradar®, autre méthode de surface, reste elle aussi limitée par la nature des sols limoneux du Nord, très fins et hydrophiles, difficiles à percer par les

La voie, un ensemble complexe soumis à de multiples contraintes

ondes. Il est donc pertinent de compléter ces outils par des techniques "de profondeur", comme le radar en forage, qui fournit une information élargie, plus efficace autour du point de forage, ou encore, la diagraphie de radioactivité naturelle, qui analyse les différences de radiations entre les diverses couches de matériaux. Ces tests en situation et vraie grandeur permettront de lever les incertitudes et valider les différentes méthodes dans le contexte de la LGV Nord. ○

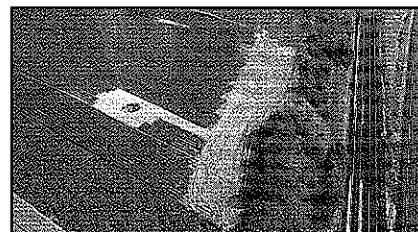
variation. Readings can also reflect a simple difference in soil density. The technique of georadar^① is of limited use because radio waves have difficulty penetrating the alluvial soil in this region. These shortcomings have sparked interest in "deep" techniques like radar drilling or diagraphy^② to analyse variations in natural radiation between layers. This full-scale insitu testing will eliminate uncertainties and validate methods for use on the TGV Nord line. ○

- ① Radar (Radio Detecting and Ranging) : émission d'ondes électromagnétiques très courtes dont l'écho permet de déterminer la direction et la distance d'un objet.
- ② Diagraphie : mesure et enregistrement d'un des paramètres géophysiques des formations traversées par un sondage.

Despite inspections and preventive measures, the threat of subsidence still persists on the TGV Nord line. SNCF is conducting RFF-funded research to determine the best way to locate the underground cavities that cause it. This 644,000-euro project is to run from June 2002 to the end of March 2003.

Near the Ablaincourt station, in north-eastern France, a team headed by Marie-Josèphe Poitout of the Engineering Department's research office is experimenting on a siding that has the same structure as a traffic track. Two cavities similar to World War I trenches are being dug. Such cavities, which were badly filled after the war and are now difficult to detect, are the cause of 60% of the subsidence on the high-speed line.

The main difficulty is to detect these cavities and precisely determine their dimensions so they can be properly filled. Microgravimetry, which measures microvariations in gravity due to deficits of mass, is one geophysical technique being tested. One drawback is that a small cavity near the surface or a large cavity far below it can produce the same



Une élévation du degré d'humidité du sol est propice à la formation de fontis. Forte de cette constatation, la SNCF a mis en place une veille pluviométrique sur 150 kilomètres de ligne nouvelle dans le Nord. À partir des relevés pluviométriques fournis par sept stations de Météo France, le dépassement d'un seuil issu du retour d'expérience déclenche une alerte qui se traduit par l'envoi d'un hélicoptère pour détecter des fontis formés. Si les conditions météorologiques ne permettent pas les vols, une équipe de cheminots à pied prend le relais.

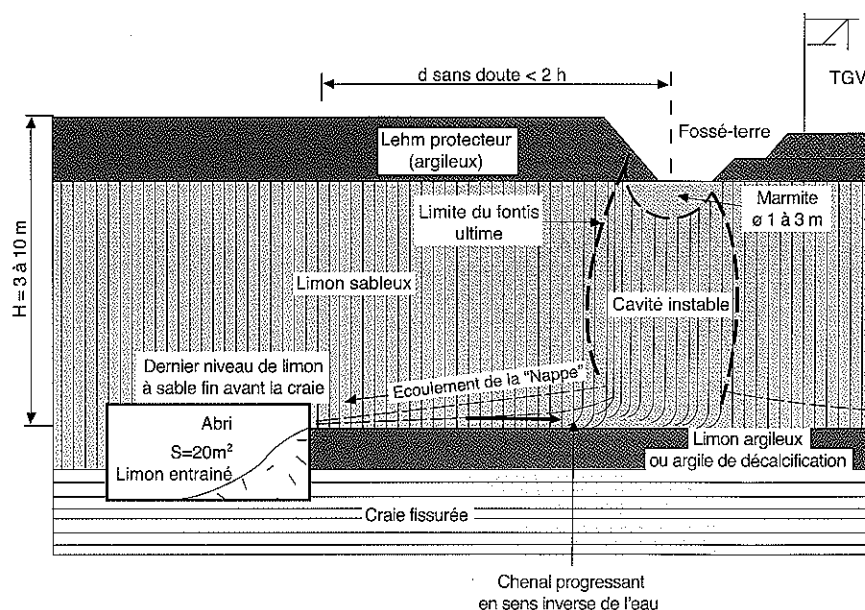


Schéma de principe de la formation de fontis de type 3, par érosion régressive à partir d'une cavité préexistante (qui peut être une sape, une carrière ou un karst).

Source : SNCF - direction de l'Ingénierie.