

Aérodynamique des navettes ferroviaires du tunnel sous la Manche

# Cas concret d'application de l'analyse numérique

Patrick Haas, ingénieur ETS, M. Sc. A.

Le tunnel sous la Manche est l'un des chantiers les plus excitants du siècle. Il fut imaginé en 1750 par un ingénieur français, mais ne verra son aboutissement que dans quelques mois. Il permettra à quelque 40 millions de passagers de rallier annuellement l'Angleterre au continent par voie terrestre et placera Londres à environ trois heures de Paris par TGV. Sa part du trafic transmanche total de passagers devrait se situer entre 35 et 40%.

**B**ien que nous sachions depuis longtemps faire circuler des trains en tunnel, ce problème n'en demeure pas moins un défi technologique considérable, notamment du point de vue

aérodynamique. Compte tenu du fort rapport de blocage existant (section du train par rapport à la section du tunnel), ces questions prennent une place importante dans son développement.

L'aérodynamique d'un train en tunnel est à la base de nombreuses données. Parmi celles-ci on peut citer les suivantes :

- puissance des locomotives;
- stabilité aux vents latéraux;
- cas de chargement aérodynamique de la structure (pressions différentielles);
- bruit généré par l'écoulement;
- échauffement de l'air contenu dans le tunnel (système de refroidissement);
- confort des passagers (variation de la pression intérieure).

Le calcul de ces grandeurs a été réalisé en employant différentes approches. Notons que l'expérimentation a joué un rôle



Fig. 1. - Maquette des navettes ferroviaires permettant le transport des véhicules routiers. (Photo QA.)



Fig. 2. – Maquette du tunnel. On distingue, au fond, le rameau d'antipistonnement. (Photo QA.)

important, mais que la *simulation numérique* a pris une place rarement, voire peut-être jamais, rencontrée dans l'industrie ferroviaire. L'efficacité de cette approche, dont le potentiel est encore important, a été clairement démontrée, comme c'est d'ailleurs le cas dans l'industrie aéronautique depuis longtemps.

#### Calcul de la traînée et des cas de chargement aérodynamique

Le calcul de la traînée des navettes et de l'évolution de la pression sur les faces de celles-ci a été réalisé à l'aide d'un modèle numérique unidimensionnel basé sur la méthode des caractéristiques. L'écoulement à résoudre est de type non permanent, visqueux et compressible. Par la suite, et compte tenu de l'étanchéité des wagons (joints, système de climatisation, orifices divers...), l'évolution des pressions à l'intérieur de ces derniers a pu être appréhendée afin de déterminer les

pressions différentielles agissant sur leur structure. Ces pressions, obtenues dans les conditions d'exploitation normales et d'urgence, permettent de définir les cas de chargement que les navettes doivent être à même de supporter.

Les calculs susmentionnés ont permis d'établir également, pour chaque scénario envisagé, la puissance dissipée dans l'air par le matériel roulant ainsi que les vitesses de l'écoulement en tout point des tunnels. Les puissances dissipées ont été évaluées, selon les scénarios envisagés, entre 8 et 12 MW par train. Compte tenu de la fréquence élevée des passages (jusqu'à 3 minutes entre deux trains), la puissance totale dissipée dans les tunnels sera voisine de 140 MW. Une telle valeur a nécessité la conception d'un système de refroidissement de l'air contenu dans les tunnels permettant de maintenir sa température dans une marge acceptable. Le dimensionnement de ce système a été réalisé en tenant compte de la quantité de chaleur pouvant être évacuée par convection à la surface du tunnel, puis par conduction dans les

couches de roche, de l'échauffement de la masse des trains, ainsi que du système de ventilation.

Dans le but de diminuer la traînée des trains, des rameaux d'antipistonnement, permettant à l'air de passer vers la région en aval du train via l'autre tunnel, ont été installés (fig. 2). La résolution de l'écoulement, généré par le mouvement des navettes, a prouvé que des vitesses de 50 à 60 m/s seront présentes en cas d'exploitation normale, et que celles-ci atteindront 70 m/s en cas d'urgence (freinage en tunnel...). Ces vitesses correspondent à des débits d'air compris entre 160 et 220 m<sup>3</sup>/s (190 à 260 kg/s). Un jet d'air d'un diamètre de 2 m, à de telles vitesses, et se produisant 200 fois par aller simple, a des conséquences dramatiques sur la durée de vie des wagons. Les faces latérales importantes de ceux-ci (fig. 6) donnent lieu, lorsqu'elles sont soumises à ces jets, à des moments de flexion particulièrement importants au niveau de la jonction des poteaux de face et du brancard. Il est intéressant de noter que ces jets d'air puissants ont

Bombardier Mass Transit Division - Euroshuttle DDL Car Tipover Analyses

## 2-D Pressure Distribution

DDL Wagon With A 300mm Radius Top Side Corner, Freestream Velocity = 45 m/sec

Below	-3.	-4.	-3.	-2.	-1.	0.	1.	2.	3.	Above	$\sim H_2O$
-5.	-4.	-3.	-2.	-1.	0.	1.	2.	3.	3.		

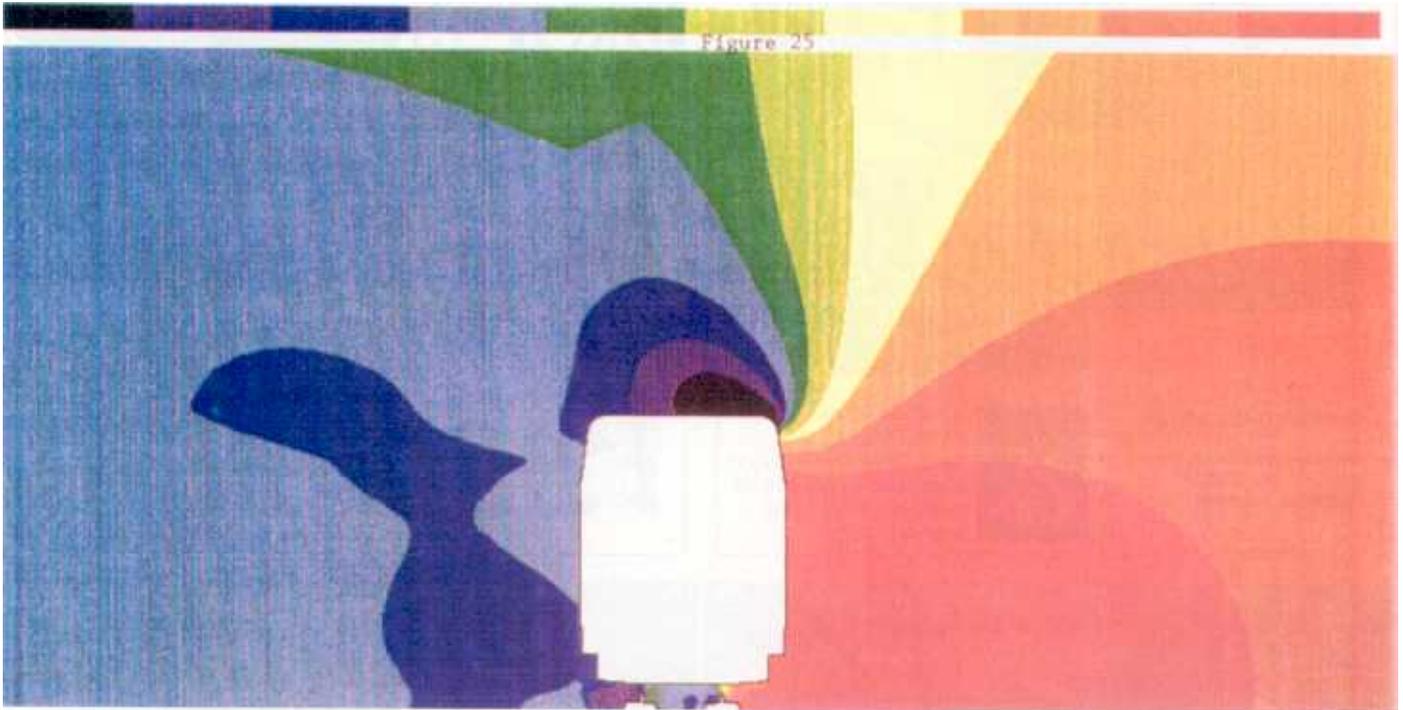


Fig. 3. - Résolution de l'écoulement généré par le vent latéral. Ce modèle en volumes finis de quelque 80 000 éléments a nécessité près de 80 heures de calcul sur HP 9000. (Airflow Sciences Corp.)

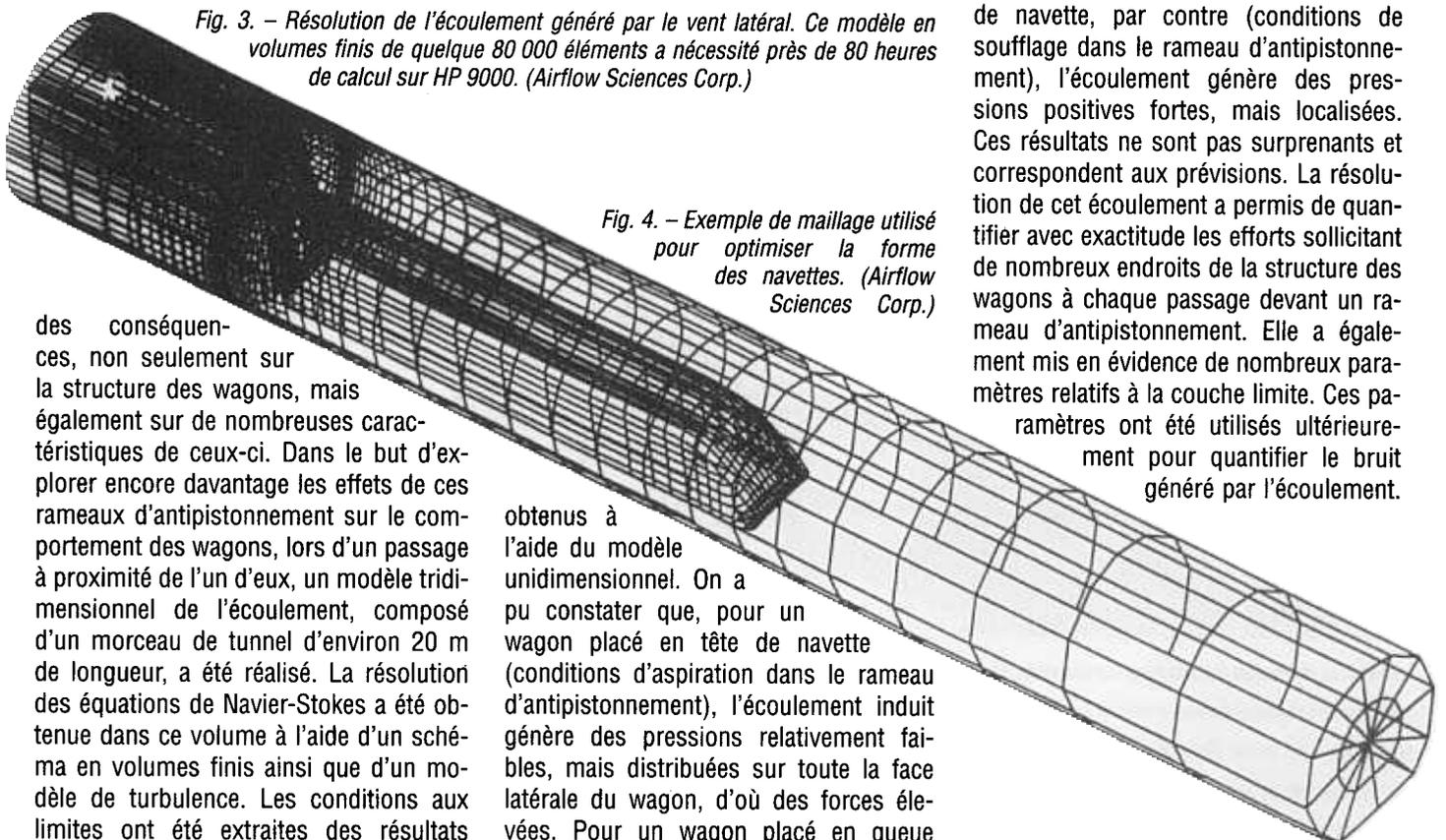


Fig. 4. - Exemple de maillage utilisé pour optimiser la forme des navettes. (Airflow Sciences Corp.)

des conséquences, non seulement sur la structure des wagons, mais également sur de nombreuses caractéristiques de ceux-ci. Dans le but d'explorer encore davantage les effets de ces rameaux d'antipistonement sur le comportement des wagons, lors d'un passage à proximité de l'un d'eux, un modèle tridimensionnel de l'écoulement, composé d'un morceau de tunnel d'environ 20 m de longueur, a été réalisé. La résolution des équations de Navier-Stokes a été obtenue dans ce volume à l'aide d'un schéma en volumes finis ainsi que d'un modèle de turbulence. Les conditions aux limites ont été extraites des résultats

obtenus à l'aide du modèle unidimensionnel. On a pu constater que, pour un wagon placé en tête de navette (conditions d'aspiration dans le rameau d'antipistonement), l'écoulement induit génère des pressions relativement faibles, mais distribuées sur toute la face latérale du wagon, d'où des forces élevées. Pour un wagon placé en queue

de navette, par contre (conditions de soufflage dans le rameau d'antipistonement), l'écoulement génère des pressions positives fortes, mais localisées. Ces résultats ne sont pas surprenants et correspondent aux prévisions. La résolution de cet écoulement a permis de quantifier avec exactitude les efforts sollicitant de nombreux endroits de la structure des wagons à chaque passage devant un rameau d'antipistonement. Elle a également mis en évidence de nombreux paramètres relatifs à la couche limite. Ces paramètres ont été utilisés ultérieurement pour quantifier le bruit généré par l'écoulement.

*Un seuil d'étanchéité minimal élevé garantit un confort acceptable*

### Rôle de l'étanchéité des wagons

L'étanchéité des wagons est une grandeur extrêmement délicate à appréhender dans un tel projet. Elle est intimement liée, d'une part, aux charges aérodynamiques et, d'autre part, au confort des passagers. Les variations importantes de la pression générées autour des navettes lors d'une entrée ou d'un croisement en tunnel, ont conduit au choix d'un seuil d'étanchéité minimal élevé, afin de pouvoir garantir un confort acceptable durant ces événements. Ce seuil minimal a généré par contre des cas de chargement (pressions différentielles) élevés sur la structure. La valeur maximale de l'étanchéité des wagons a été choisie arbitrairement, de façon à laisser une marge acceptable entre celle-ci et la valeur minimale définie par le confort. Cette marge devait être suffisamment grande pour pouvoir inclure les différences éventuelles d'étanchéité intervenant entre les dif-

férents wagons de la production. La mesure de l'étanchéité a été ensuite réalisée sur un wagon représentatif de l'ensemble de la production, de façon à démontrer la validité des cas de chargement retenus, ainsi que le respect des objectifs de confort fixés par le maître de l'ouvrage.

### Stabilité des navettes aux vents latéraux

L'étude de la stabilité des navettes aux vents latéraux a été sans aucun doute l'une des recherches les plus intéressantes. *Un travail traitant du sujet a été réalisé en soufflerie sur un modèle.* Les difficultés liées à ce type de tests sont les nombres de Reynolds élevés à atteindre, la simulation de la couche limite terrestre et le niveau de turbulence important du vent. Les mesures obtenues lors de cette étude ont conduit à *deux conclusions: premièrement*, la stabilité aux vents des navettes se situerait dans une marge de valeurs proche de celles de nombreux trains passagers, *deuxièmement*, elles ont montré qu'une réduction sensible de la force latérale pouvait être obtenue en augmentant le rayon des coins de caisse supérieurs de 300 mm (valeur actuelle) à 500 mm. La première de ces conclusions nous a amené à douter sérieusement des

résultats obtenus. Quant à la deuxième conclusion, elle était d'une grande importance pour les constructeurs des navettes. *Il a donc été décidé d'approfondir l'analyse de l'écoulement créé par le vent latéral par le biais d'un calcul.* Une première étude a consisté à évaluer numériquement les caractéristiques de la couche limite dans la région du coin de caisse supérieur. Celle-ci a montré que les comportements de cette couche étaient sensiblement identiques pour les deux rayons envisagés. Il y avait donc tout lieu de croire que le rayon critique était atteint avec 300 mm, et que le fait de passer à 500 mm ne permettait pas de réduire la force latérale de la quantité envisagée. Une seconde étude a par la suite été réalisée. Son objectif était d'évaluer la distribution de pression autour des wagons ainsi que les résultantes des forces et les moments appliqués, cela à nouveau par une approche numérique. Un écoulement de type visqueux, bidimensionnel et permanent, a été résolu à l'aide d'un modèle du même type que celui utilisé pour résoudre l'écoulement tridimensionnel déjà cité (fig. 3). Les vitesses et les dimensions présentes dans ce problème ont nécessité des éléments particulièrement petits. Le nombre de ceux-ci a été de l'ordre de 80 000 et le volume important des itérations ont conduit à un temps de calculs compris entre 50 et 80 heures (ordinateur HP 9000). Cette analyse a permis d'évaluer la distribution de la pression autour des navettes et d'estimer ainsi le déchargement des roues côté

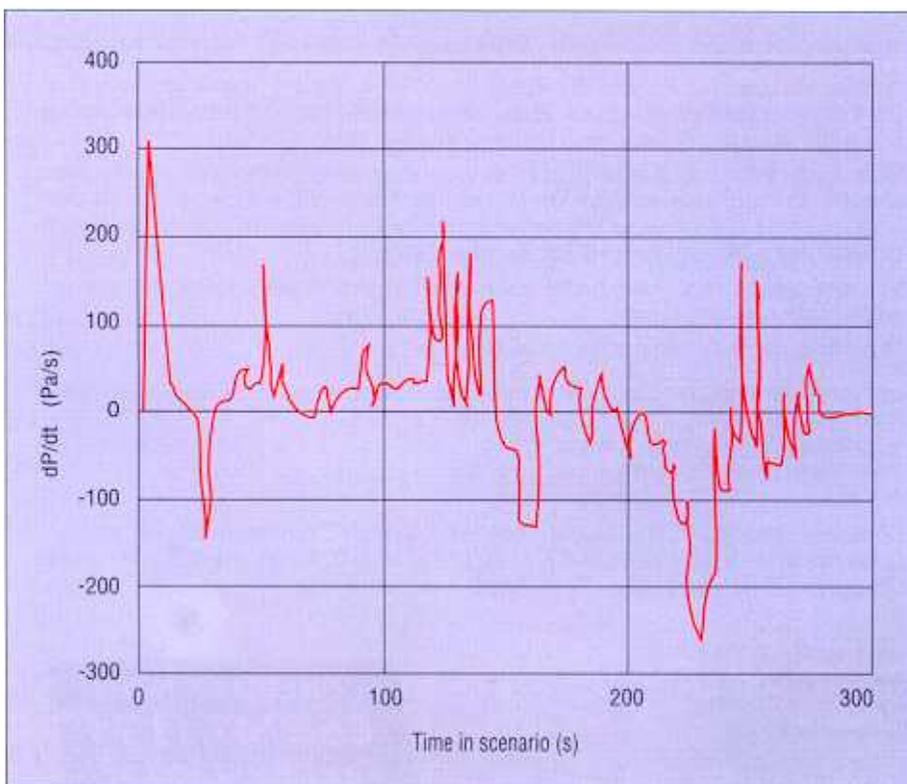


Fig. 5. - Evolution typique de la vitesse de variation de la pression intérieure lors d'une entrée en tunnel. (Alizés Recherche et Développement.)

**Interrupteurs de sécurité**

**elobau**

Homolo-gations:  
CNA  
TÜV  
et BIA

*Sécurité contre les manipulations interdites!*

- système magnétique codé sans contact
- protégé contre les encrassements (boîtier scellé)
- beaucoup de variantes

*La méthode moderne pour garantir la sécurité!*

**BIBUS SA**

8126 Zumikon    2017 Boudry  
Tel. 01/918 95 11    Tél. 038/42 57 84

E 103

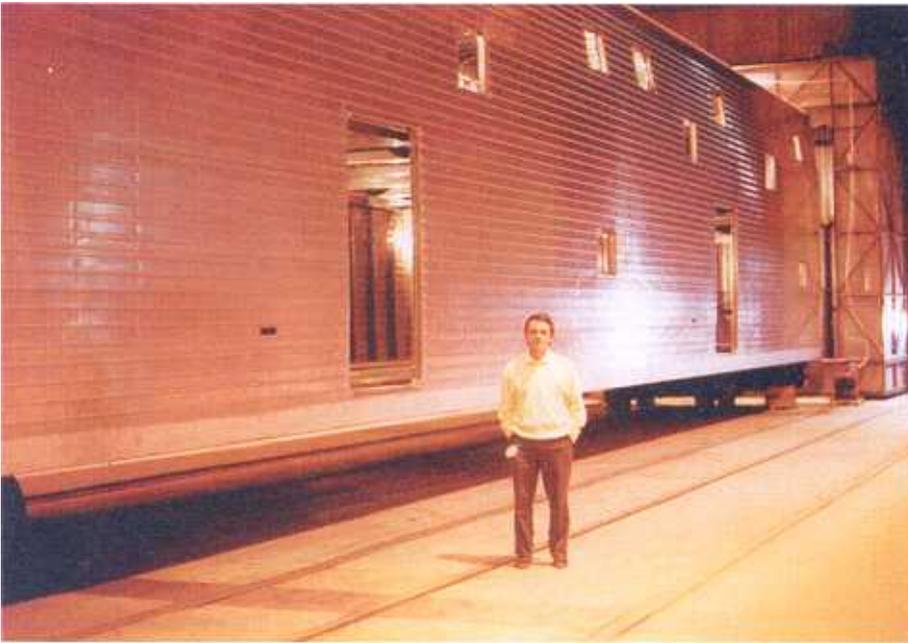


Fig. 6. - Patrick Haas devant un wagon. On peut remarquer les dimensions importantes de celui-ci.

amont en fonction de la vitesse du vent. Elle a montré que la stabilité au vent des navettes était bien inférieure à celle d'un train pour passagers. Compte tenu de la hauteur importante des véhicules (5,6 m), ce résultat apparaît comme raisonnable et prévisible.

### Conclusion

De nombreuses analyses ont été réalisées afin d'évaluer les effets de l'écoulement autour des navettes ferroviaires du tunnel sous la Manche. Les approches choisies ont été bien différentes en fonction de l'état de la connaissance et des objectifs à atteindre (exactitude, délais et coûts). Tout au long des études réalisées, on a pu montrer clairement que les modèles numériques sont des outils puissants, permettant de résoudre des problèmes complexes. Dans l'analyse de la

stabilité des navettes au vent latéral, une approche numérique a fourni des valeurs dont la crédibilité n'a jamais été mise en doute alors que des problèmes ont été rencontrés avec des résultats d'origine expérimentale. Dans bien des domaines autres que celui de la dynamique des fluides, les méthodes numériques prouvent également leur efficacité. Notons ici qu'une étude du comportement dynamique des navettes passant devant un rameau d'antipistonnement, incluant toutes les caractéristiques de la suspension et des bogies, a été réalisée sur la base des résultats fournis par l'analyse de l'écoulement tridimensionnel déjà cité. Elle a ainsi permis de déterminer les accélérations latérales qui seront vécues par les passagers lors de tels événements, cela bien avant qu'aucune pièce ne soit produite.

Le choix de l'approche d'une analyse, quelle qu'elle soit, doit être considéré bien au-delà des questions matérielles et d'habitudes. Il doit être le reflet d'une décision réfléchie et discutée, le déroulement d'un développement efficace y étant fortement rattaché.

I+T/RTS (92051)

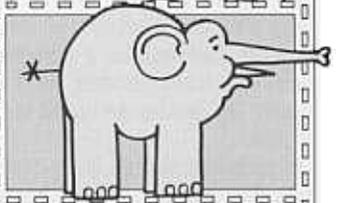
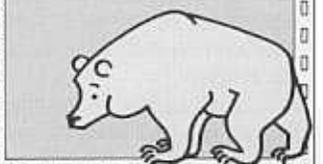
#### Les entreprises suivantes ont contribué à ces études:

- Bombardier Inc. (Canada);
- David D. Taylor Inc. (Canada);
- Alizés Recherche et Développement (Suisse);
- Airflow Sciences Corp. (USA);
- Mott, Hay & Anderson (UK);
- British Rail (UK);
- SNCF (France);
- Pininfarina (Italia);
- British Marine Technology (UK);
- IAT (France).

#### Renseignements:

Alizés Recherche et Développement,  
Plan-les-Ouates, tél. 022/771 30 26,  
fax 022/771 22 33.

Allenspach & Cie SA  
1806 St. Léger  
Tél. 021 943 18 47



GABS  
Installations d'entreposage  
Allenspach & Cie SA  
4612 Wangen près d'Olten  
Tél. 062 32 58 85-88  
Fax 062 32 16 52

POUR TOUS LES POIDS

LE G E R S ET  
T. O U R D S.

Il est possible de placer des rayonnages en hauteur tous les 50 mm.

Rayonnages en système modulaire. Avec garantie longue durée. Il suffit de demander la documentation.

