

## Le VAL fait son trou

2142



A Lille, la construction de la ligne 1 bis du VAL a vu la mise en oeuvre de techniques nouvelles et performantes de forage qui, en dépit des difficultés du terrain, ont permis d'achever les travaux avec plusieurs semaines d'avance.

Ainsi, aujourd'hui, est-il permis de penser, selon Bernard Guillemot, directeur général des services techniques de la Communauté urbaine de Lille, que "certaines agglomérations ont décidé le VAL parce que la technique des tunneliers a maintenant fait ses preuves".

Une technique qu'il nous présente ici.

**L**e réseau VAL de la Communauté Urbaine de Lille (CUDL) se tisse progressivement : la ligne n° 1 a été mise en service en 1983, la ligne n° 1 bis, en travaux, sera mise en service début 1989, la ligne n° 2, reliant Lille à Roubaix et Tourcoing, a été décidée par le Conseil de Communauté.

Parallèlement au développement du système automatique, la construction des lignes donne lieu à la mise en oeuvre de différentes techniques de génie civil, dont traite l'article qui suit.

### LES TECHNIQUES DE LA LIGNE N°1

La ligne n° 1 (13 km, 18 stations) relie Villeneuve d'Ascq au Centre Hospitalier Régional, en passant par l'est et le centre de Lille. Elle est en viaduc à ses extrémités, en tranchée couverte à l'est, et en tunnel foré au centre de Lille. Les travaux de gros oeuvre ont été réalisés entre 1979 et 1982.

Les viaducs ont été exécutés en poutre caisson, avec précontrainte "classique", les câbles passant à l'intérieur du béton.

Les tranchées couvertes ont été réalisées à l'aide de parois berlinoises.

Les tunnels forés ont été construits dans la craie fracturée, baignée par une nappe phréatique puissante. Des injections de bentonite ciment ont donc été nécessaires pour boucher les fissures et étancher le terrain. Le creusement s'est ensuite effectué à l'aide de machines à attaque

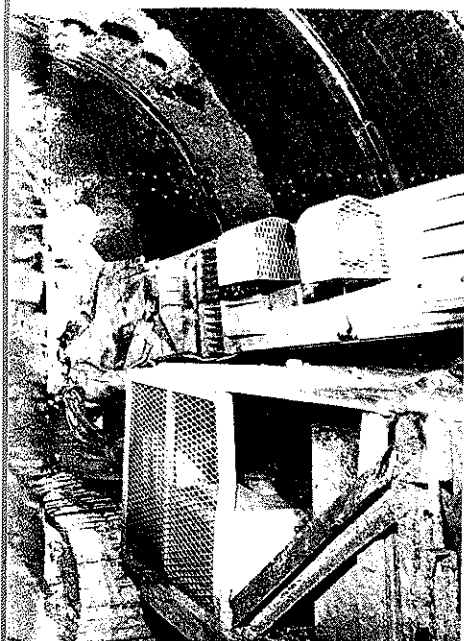
ponctuelle, sortes de grosses fraises de dentiste grignotant la craie. Sur deux lots, un précédé-coupage de voûte, permettant de créer une précoque en béton, protégeant le chantier de terrassement, a été mis en oeuvre.

### HUIT LOTS POUR LA LIGNE 1 BIS

Le Conseil de Communauté a décidé la construction de la ligne n° 1 bis (12 km, 18 stations) en février 1984, pour une mise en service prévue cinq ans plus tard. Les travaux de gros oeuvre se sont déroulés de 1985 à 1987, et ont bénéficié des évolutions importantes survenues dans différents domaines des travaux publics, depuis les travaux de la ligne n° 1.

La ligne n° 1 bis relie la gare de Lille aux communes de Lambersart et Lomme, à l'Ouest de Lille, en contournant le centre, et en recoupant la ligne n° 1 en deux stations : "Gares" et "Porte des Postes". Elle comporte des parties en viaduc, en tranchée couverte, et en tunnel foré. La géologie qu'elle traverse est plus complexe que celle rencontrée par la ligne n° 1 : dans Lille, elle retrouve la craie fracturée, bien connue sur la ligne n° 1 : à l'Ouest de Lille, sur la rive gauche de la Deûle, le terrain change totalement. Sur près de quatre kilomètres, c'est un mélange de sables, de silts et d'argile, gorgé d'eau, avant d'arriver, en extrémité de ligne, à l'argile des Flandres.

Les travaux de gros oeuvre ont été découpés en huit lots en fonction de la géologie et au



profil en long.

Les lots 1 et 6 sont des viaducs d'environ trois kilomètres de longueur, d'aspect similaire à ceux de la ligne n°1. En réalité, leur technique de construction a été tout à fait différente : la précontrainte est extérieure. Cela signifie que les câbles de précontrainte sont extérieurs au béton, à l'intérieur du caisson visitable. Cette nouvelle technique permet une économie importante de béton, et rend l'ouvrage plus facile à surveiller.

Le lot 2, de près d'un kilomètre de long, est en majeure partie un tunnel creusé dans l'argile des Flandres. Le fluage et la relaxation de cette argile ont conduit à avoir un terrassement totalement manuel, avec recompression systématique du terrain à l'aide de vérins, pour limiter les tassements.

Le lot 3 sera décrit ci-dessous.

Le lot 4 est un tunnel d'un kilomètre de longueur, foré dans la craie fracturée. La technique utilisée a été semblable à celle de la ligne n°1 : injections préalables, puis terrassement à l'aide de machines à attaque ponctuelle. La principale évolution est apparue dans le transport des déblais. Sur la ligne n°1, les déblais étaient transportés par chargeur sur pneus en galerie, remontés par benne, stockés en trémie ouverte, puis conduits aux décharges par camion. Or, la manipulation de la craie gorgée d'eau crée des problèmes : boue crayeuse en galerie, dans laquelle patinent les engins, eau de pompage chargée de craie engorgeant des égouts, salissures de la voirie.

Sur le lot 4, le groupement Fougerolle-SOGEA a utilisé le transport par pompage : grâce à un broyeur-malaxeur, la craie était transformée en une sorte de pâte dentifrice immédiatement derrière le front de taille, et transportée dans une canalisation par pompage, jusque dans une trémie en surface, d'où elle était reprise par des camions à benne étanche. Tout le monde y a trouvé son compte : meilleur confort en tunnel et en surface, et vitesse de creusement plus rapide, car ne dépendant plus de la vitesse de rotation des chargeurs sur pneus de la ligne n°1.

Le lot 5 est une tranchée couverte d'environ un kilomètre de long, construite à l'aide de parois berlinoises et de parois au coulis. Il comprend également la station de correspondance construite autour de la station «Porte des Postes» de la ligne n°1 en activité.

Le lot 7 est une tranchée couverte de transition entre viaduc et tunnel, construite à l'aide de parois préfabriquées formant ouvrage définitif.

Le lot 8 est décrit ci-dessous.

## UN TUNNEL DANS DU "YAOURT"

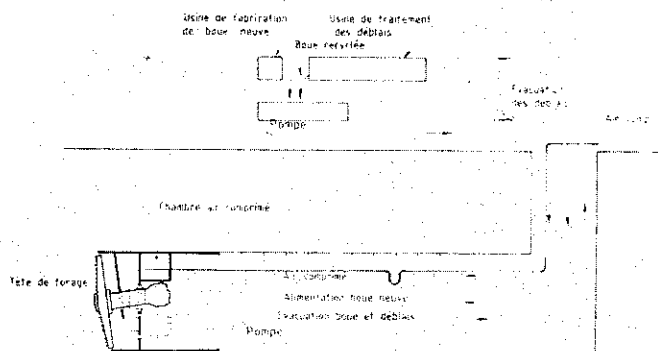
Le lot 3 se développe sur 3,6 km le long de l'avenue de Dunkerque, axe de liaison entre Lille, Lomme et Lambersart. Les terrains rencontrés sont de qualité très médiocre, mélanges de sables, d'argile et de silts gorgés d'eau. La réalisation de la ligne en tranchée couverte était difficilement envisageable, compte tenu de la largeur limitée de la rue, et de l'encombrement important du sous-sol en réseaux divers. Il fallait passer en tunnel foré, mais comment creuser un tunnel dans du "yaourt" ?

La granulométrie très fine du terrain rendait inopérantes les injections qui auraient permis l'utilisation de machines à attaque ponctuelle. Ainsi, l'utilisation d'un bouclier à pression de boue apparut la seule méthode techniquement et économiquement possible.

En prenant comme exemple le matériel utilisé sur le lot 3, un bouclier à pression de boue est un cylindre métallique creux, d'un diamètre fonction du tunnel à creuser, équipé à l'avant d'un plateau rotatif qui grignote

**Ci-contre :**  
une machine à attaque ponctuelle terrassant la craie.

**Principe de fonctionnement d'un bouclier à pression de boue.**





**Tunnelier du lot 3 :  
introduction  
du bouclier.**

le terrain. Immédiatement derrière ce plateau se trouve un écran étanche, traversé par trois canalisations : une canalisation d'amenée de boue bentonitique noyant l'ensemble du front de taille, une canalisation de sortie de la boue bentonitique chargée des déblais de creusement, et une canalisation d'air comprimé qui permet de contrôler et d'équilibrer en permanence la pression de la boue par rapport au terrain et à la nappe phréatique. Derrière l'écran étanche, à l'abri du cylindre, se trouve le dispositif de pose des voussoirs, éléments de tunnels en béton préfabriqué, et des vérins qui permettent au bouclier de progresser en s'appuyant sur le dernier anneau de voussoir posé. Ainsi, quelques mètres derrière le front de taille et le terrain initial se trouve un tunnel terminé, prêt à recevoir les équipements de voie. Le bouclier, équipé de son train suiveur, portant le reste des auxiliaires, constitue le tunnelier.

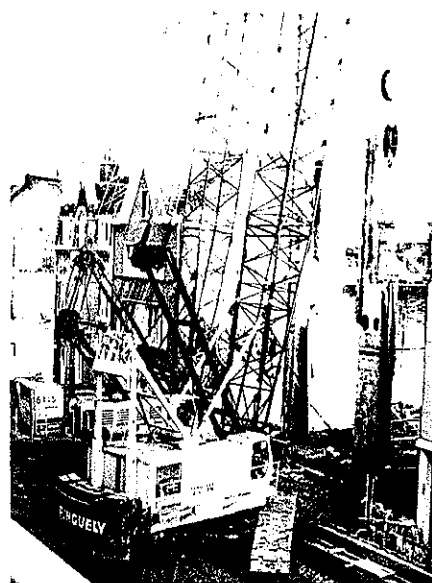
La boue bentonitique joue un rôle essentiel dans ce genre d'engin :

- elle équilibre la pression du terrain et de la nappe,
- elle empêche l'effondrement du front de taille par l'effet de croûte qu'elle crée en imprégnant le terrain,
- elle sert à transporter les déblais par canalisation, jusqu'en surface, à plusieurs kilomètres du front de taille où une usine de traitement sépare les déblais de la boue bentonitique, qui est recyclée et renvoyée par canalisation au front de taille.

Cette technique, particulièrement adaptée aux terrains meubles et aquifères, s'est surtout développée au Japon et en Allemagne, et commence à s'introduire en France.

### **235 METRES PAR MOIS**

Dans le cas du lot 3, c'est après appel d'offres, le groupement constitué par Montcocol, Urbaine de travaux, Société des grands travaux du nord et l'entreprise allemande Wayss und Freytag, qui a reçu mission de forer au bouclier 3 300 mètres de tunnel, et de construire six stations de 52 mètres de long. Le scénario, d'exécution retenu a consisté à introduire le tunnelier (construit pour le chantier) par une station d'extrémité du lot 3,



**Construction des stations :  
enfilage des panneaux  
préfabriqués.**

à proximité de la Deûle. Ainsi, l'installation de l'usine de traitement de la boue à proximité du canal a permis de reprendre les déblais directement dans des péniches. Aucun camion n'a été utilisé pour transporter les terrains provenant du creusement de 3 300 mètres de tunnel !

Les six stations ont été construites à ciel ouvert, par phases successives compatibles avec les déviations des réseaux enterrés et les impératifs de circula-



tion. Les parois des stations sont constituées de panneaux préfabriqués de 32 tonnes, qui servent d'enceinte étanche et de structure définitive, recevant l'habillage final. La manipulation de ces panneaux à quelques dizaines de centimètres des façades fut particulièrement spectaculaire ! Compte tenu du délai de construction de la première station, point d'introduction du tunnelier, et du délai de mise en place du tunnelier au front de taille, il était nécessaire, pour la tenue du planning, que les cinq stations que le tunnelier devait traverser soient construites et terrassées préalablement à son passage. Pour chaque station, l'approche, l'entrée, le transfert des 300 tonnes du tunnelier, et le redémarrage, furent des opérations délicates, le bouclier passant de la pression de boue à la seule pression atmosphérique.

Globalement, le tunnelier a parcouru ses 3 550 mètres en 19 mois (de juin 86 à janvier 88). Sur ces 19 mois cinq ont été consacrés à la traversée des cinq stations, et aux travaux effectués sur le tunnelier à l'occasion de ces traversées. Ainsi, le bouclier a creusé 3 300 mètres (hors station) en 14 mois, la vitesse moyenne étant donc de 235 mètres par mois, chaque pose d'anneau de voussoirs permet-

tant de progresser de 1,2 mètre.

En fait, la vitesse de progression a été très variable, en fonction de la granulométrie du terrain, dans des proportions auxquelles personne ne s'attendait ; la progression a été seulement de quelques mètres par jour dans les terrains à très faible granulométrie ; on a rencontré là un phénomène de pâte à modeler colmatant la chambre d'attaque. Par contre, dans les terrains plus sableux, la vitesse a atteint jusqu'à 25 mètres par jour, 156 mètres la meilleure semaine, et plus de 400 mètres le dernier mois. Après une analyse extrêmement poussée, une corrélation précise a pu être établie entre la vitesse du tunnelier et la teneur du terrain en éléments inférieurs à 20 microns (argile + fraction fine des silts).

Grâce aux modifications apportées à la machine au fur et à mesure de la compréhension du phénomène, et grâce au travail en continu 7 jours sur 7, le retard de livraison du tunnel du lot 3 aux poseurs de voie a pu être limité, et rester sans conséquences sur le délai global de la ligne 1 bis.

### UNE "PREMIERE" FRANCAISE

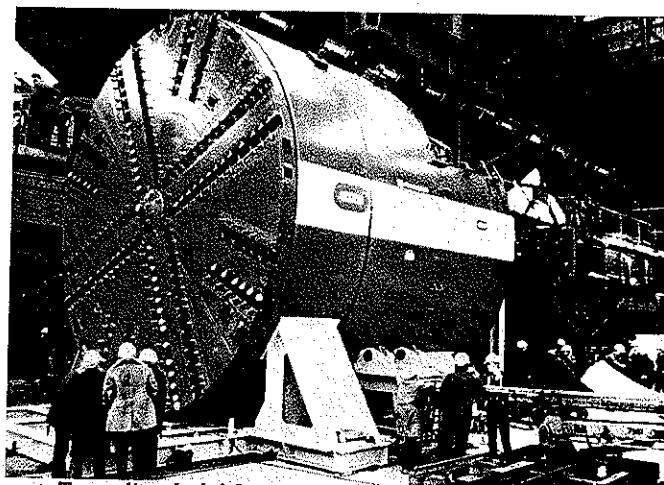
Le lot 8 est essentiellement constitué par un tunnel d'environ 900 mètres, à construire dans la craie fracturée. La solution de base, soumise à l'appel d'offres, était donc la méthode traditionnelle : injections préalables, puis creusement par machine à attaque ponctuelle.

Le groupement Bouygues-Norpac, moins disant en solution de base, a proposé en variante et pour un prix équivalent, l'utilisation d'un bouclier à front pressurisé, pour la réalisation des 780 mètres de souterrain profond dans la craie.

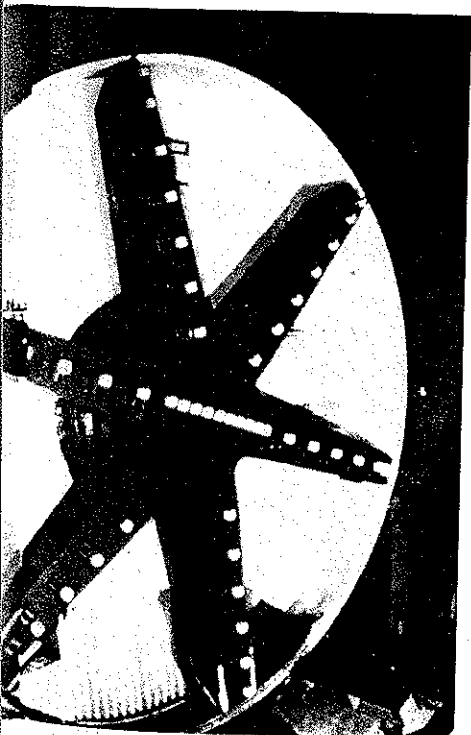
C'était l'occasion pour Bouygues d'acquérir une première expérience dans une technique porteuse d'avenir, et utilisée en partie, par exemple, sur le chantier de creusement du tunnel sous la Manche.

C'était également l'occasion pour un industriel français (Fives-Cail Babcock), en s'appuyant sur un brevet Kawasaki, de construire le premier bouclier à front pressurisé français.

La diminution des travaux en surface autorisée par cette variante, et les garanties excep-

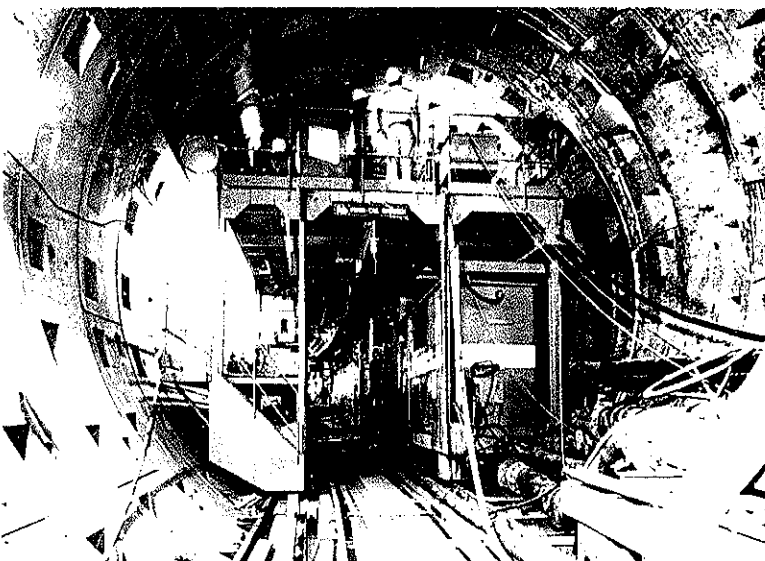


Tunnelier du lot 8 avec son train suiveur.



Ci-contre : avant du tunnelier du lot 3.

Arrière du tunnelier :  
à remarquer le tunnel  
terminé et l'assemblage  
des voussoirs.



POTEAU

## LIGNE 1 : 120 000 VOYAGEURS PAR JOUR

Dès la mise en service, le trafic de la ligne n°1 dépassa le niveau escompté, et incita la Communauté Urbaine de Lille à commander des rames supplémentaires. Ce trafic continue à croître, et atteint maintenant, les jours pleins, 120 000 voyageurs.

Sur l'ensemble de l'agglomération, le nombre de voyageurs dans les transports collectifs urbains est de 64 % supérieur à son niveau avant métro. Pourquoi ce succès ? Parce que la clientèle trouve dans le métro de la Communauté Urbaine de Lille ce qui a justifié le choix du VAL : fréquence, rapidité, sécurité, agrément.

- **Fréquence** : entre 5 h 12 le matin et 0 h 30 le soir, la fréquence de passage des rames ne descend jamais en dessous de 6 minutes. En semaine, la fréquence ne descend pas en dessous de 3' entre 6 heures et 19 heures, avec des pointes à 1'12" (1' possible). Cette fréquence a généré un trafic d'heure creuse inattendu.

- **Rapidité** : la vitesse commerciale sur la ligne n°1 est de 35 km/h. Cette vitesse commerciale a justifié la restructuration de l'ensemble du réseau d'autobus et d'autocars, autour de la "colonne vertébrale métro". Une réforme tarifaire cohérente avec la restructuration, donnant la correspondance gratuite entre métro, tramway, bus, autocars, a été mise en place. Le ticket-plus, équivalent de la carte orange, sur une zone unique de 600 km², donne également la correspondance gratuite avec la SNCF-banlieue dans la cinquantaine de gares SNCF ouvertes aux voyageurs sur le territoire de la Communauté

Urbaine de Lille. Ainsi, près de la moitié des voyageurs de la ligne n°1 du métro est en correspondance avec un autre système de transport collectif.

- **Sécurité** : la forte fréquence de passage des rames et la conception architecturale des stations sont facteurs de sécurité, mais un élément parfois jugé secondaire est apparu comme ayant une grande importance : les portes palières. Leur impact psychologique est considérable : toute chute est impossible, on peut lâcher la main des enfants sur les quais du métro. Les personnes se déplaçant en fauteuil roulant ne courent aucun risque. Combien le confort apporté par ce "détail" génère-t-il de voyageurs, pour un investissement de moins de 1 % du coût total ?

- **Agrément** : l'effort architectural consenti par la Communauté Urbaine de Lille exposait le maître d'ouvrage à une critique potentielle du type : "mais pourquoi ces dépenses de décoration pour ce qui n'est, en fait, qu'un moyen de transport ?" En fait, les réactions furent inverses : le principal sujet d'étonnement et d'admiration fut, non pas l'automatisme intégral, qui passa immédiatement inaperçu, mais les décorations et oeuvres d'art. Les "citoyens-citadins" ont été très sensibles au fait que le métro n'ait pas été exclusivement prévu pour les "usagers" mais aussi pour des "clients". Aujourd'hui, le quart des voyageurs du métro pourrait se déplacer en voiture, comme passagers ou conducteurs. Le principe de compétition avec la voiture, à l'origine de la conception du VAL, est donc vérifié.

tionnelles de bonne fin souscrites par l'entreprise Bouygues, permirent à la Communauté Urbaine d'accepter cette variante.

Les difficultés acceptées par l'entreprise étaient considérables :

- le tracé très sinueux (rayons de moins de 150 mètres) n'était pas favorable à la progression d'un tunnelier ;
- l'épaisseur du terrain au dessus du tunnelier n'était que de 4 mètres à l'extrémité du lot ;
- il n'y avait pas d'expérience de ce type de tunnelier dans la craie à silex.

La machine fut spécialement conçue pour ce type de terrain : plateau circulaire équipé de nombreux couteaux et molettes de concassage, dispositif de surcoupe, concasseur à silex en sortie de chambre d'abattage, etc.

Au niveau du principe de fonctionnement, le bouclier du lot 8 est semblable à celui décrit pour le lot 3 : la boue utilisée au départ a été un simple mélange d'eau et de craie, qui avait l'inconvénient de ne pas créer d'effet de croûte au front de taille ; c'est pourquoi la boue bentonitique a été utilisée ensuite.

Les voussoirs en béton armé ont 35 centimètres d'épaisseur, comme sur le lot 3, et forment des anneaux de 1,12 m ou 0,85 m de longueur (des anneaux courts sont nécessaires pour franchir les courbes de faible rayon).

Le tunnelier a commencé son creusement en juin 1986 et est arrivé dans son puits de sortie en février 1987, avec plusieurs semaines d'avance sur le planning initial. Malgré les difficultés rencontrées, cette expérience a donc été parfaitement maîtrisée par le groupement d'entreprises.

## DE L'ARTISANAT A L'INDUSTRIE

Les deux chantiers de tunnel de la ligne 1 bis ayant mis en oeuvre des tunneliers à front pressurisé ont montré que ces techniques permettaient de faire passer la construction des tunnels du stade artisanal au stade industriel. A condition de disposer d'un chantier d'une longueur suffisante pour amortir le tunnelier, il est possible de construire des tunnels profonds, sans éventration du sol, à des prix compétitifs avec les tranchées couvertes, souvent traumatisantes pour la surface.

Il est d'ailleurs significatif que les nombreux visiteurs, qui viennent à Lille pour examiner le système automatique VAL, s'intéressent également de très près à la technique du tunnelier à front pressurisé, permettant de construire des tunnels étanches dans des sols de médiocre qualité, gorgés d'eau, à des prix acceptables, avec une gêne limitée en surface. Il est même permis de penser que certaines agglomérations ont décidé le VAL, parce que la technique des tunneliers a maintenant fait ses preuves.

En ce qui concerne Lille, le Conseil de Communauté a décidé, au vu de l'expérience de la ligne 1 bis, que la ligne 2 (18 km, 24 stations) serait réalisée essentiellement à l'aide de tunneliers : les études sont en cours pour préciser les caractéristiques des tunneliers nécessaires, en fonction des différents terrains qui seront traversés.

