

COURS DE ROUTE

Hervé BRUNEL

UNIVERSITE D'ORLEANS
I.U.T. DE BOURGES
DEPARTEMENT GENIE CIVIL

Historique

La version originale de ce cours a été publiée par Hervé BRUNEL en 2005. Elle est disponible selon les termes de la GNU Free Documentation Licence version 1.2 ou ultérieure publiée par la Free Software Foundation.

Les version PDF ou Open Document Format sont disponibles sur le site <http://www.brunel-ejm.org>.

Table des matières

.....	6
Préambule.....	7
Chapitre 1 - Généralités.....	8
1.1 Historique des infrastructures routières.....	8
1.2 Fonction économique de la route.....	9
1.3 La route, outil d'aménagement du territoire.....	10
1.4 Problématiques contemporaines des réseaux routiers.....	12
1.4.1 La sécurité routière.....	12
1.4.2 La route dans les politiques de transport.....	13
1.4.3 Les gestionnaires de voirie.....	16
Chapitre 2 – L'organisation des études de projet d'infrastructures routières.....	18
2.1 Particularités des projets d'infrastructures routières.....	18
2.2 Les acteurs du projet et leur collaboration.....	19
2.3 Les étapes de réalisation du projet.....	20
2.3.1 Les études préalables en infrastructure routière.....	20
2.3.2 Les études d'avant projet.....	20
2.3.3 La concertation avec le public.....	21
2.3.4 L'enquête publique et la déclaration d'utilité publique.....	21
2.3.5 Les études de projet.....	23
2.3.6 Les appels d'offres.....	24
2.3.7 L'exécution des marchés.....	25
2.4 Le pilotage du projet.....	25
2.4.1 L'équipe projet.....	25
2.4.2 Les partenaires du projet.....	26
Chapitre 3 – Les référentiels techniques et les champs d'investigations nécessaires à l'élaboration d'un projet routier.....	27
3.1 Les différents types de route.....	27
3.1.1 Le réseau structurant.....	27
3.1.2 Autres voies principales.....	27
3.1.3 Routes secondaires.....	28
3.1.4 Voies urbaines.....	28
3.1.5 Tableau de synthèse.....	28
3.2 Les instructions techniques.....	29
3.2.1 Introduction.....	29
3.2.2 L'exigence de sécurité.....	29
3.2.3 L'adéquation de l'infrastructure aux contraintes dynamiques.....	30
3.2.4 Dimensionnement des raccordements avec introduction progressive de l'accélération transversale.....	37
3.3 Les thématiques de l'étude de tracé routier.....	40
3.3.1 Les études de trafic.....	40
3.3.1.1 Vocabulaire.....	41
3.3.1.2 Les capacités des différents types de voies.....	42
3.3.1.4 La relation entre vitesse et débit.....	43
3.3.1.5 L'étude de circulation.....	43
3.3.2 Les études d'environnement.....	48
3.3.2.1 L'eau.....	49
3.3.2.2 Faune, flore.....	50

3.3.2.3 Impact sur la santé.....	51
3.3.2.4 Le bruit.....	51
3.3.3 Les études d'urbanisme.....	53
3.3.4 Les études géotechniques.....	53
3.3.5 Les études hydrauliques.....	54
3.3.6 Les études économiques.....	54
3.4 Les études de tracé.....	57
3.5 La comparaison des solutions possibles.....	58
3.5.1 L'analyse de la valeur.....	59
3.5.2 L'analyse multicritères.....	59
Chapitre 4 – Les paramètres dimensionnant de la chaussée.....	61
4.1 Éléments de base de la géotechnique applicable aux terrassements.....	61
4.1.1 Rappels.....	61
4.1.2 Comportements des sols.....	61
4.1.3 Paramètres physiques caractéristiques des sols.....	62
4.1.4 Essais d'identification des sols remaniés.....	63
4.1.5 Comportements des sols et emploi en remblai et couche de forme.....	64
4.2 Rôles, caractéristiques et utilisation de la couche de forme.....	65
4.2.1 Définition.....	65
4.2.2 Rôles de la couche de forme.....	66
4.2.3 Conditions de réalisation d'une couche de forme.....	66
4.3 L'eau et le gel dans les chaussées.....	67
4.3.1 L'eau et l'argile.....	67
4.3.2 Les mouvements d'eau dans le sol.....	68
4.3.3 Les effets du gel dans le sol.....	69
4.3.4 Perméabilité et mouvements d'eau.....	69
4.3.5 Applications aux chaussées.....	70
4.4 Le guide technique des terrassements routiers.....	71
Chapitre 5 – La réalisation des terrassements.....	75
5.1 Les terrassements routiers organisation.....	75
5.1.1 Des aléas fortement présents.....	75
5.1.2 Une règle fondamentale l'équilibre déblais - remblais.....	75
5.2 Le compactage.....	76
5.2.1 Effets du compactage sur les sols grenus et sur les sols fins.....	76
5.2.1.1 Effets sur les sols grenus.....	76
5.2.1.2 Effets sur les sols fins.....	77
5.2.2 Les paramètres du compactage.....	77
5.2.3 Les engins de compactage.....	78
5.3 La réalisation des déblais.....	80
5.3.1 L'extraction.....	80
5.3.2 Préparation du chantier de remblai	80
5.3.3 Transports des matériaux.....	80
5.3.4 Écoulement des eaux.....	82
5.3.5 Les talus	83
5.4 La réalisation des remblais.....	83
5.4.1 La préparation de la zone de remblai.....	83
5.4.2 Les traitements du sol.....	84
5.4.2.1 Les liants utilisables.....	84
5.4.2.2 Étude de formulation.....	85
5.4.2.3 Mise en oeuvre des traitements au liant.....	85
5.5 Les contrôles.....	87
Chapitre 6 – Les chaussées.....	88

Cours de route

6.1 Les composantes d'une chaussée.....	88
6.2 Modes d'endommagement des chaussées.....	88
6.3 Les familles de structure de chaussée et leur fonctionnement.....	89
6.4 – Dimensionnement - quelques principes.....	90
6.4.1 Les étapes de dimensionnement d'une chaussée.....	90
6.4.2 Les limites du modèle.....	91
6.4.3 Les outils de dimensionnement des chaussées.....	92
Chapitre 7 – Développement durable et infrastructures routières.....	93
7.1 – Quelques notions de développement durable.....	93
7.2 – Développement durable et infrastructures de transport.....	93
7.3 Développement durable et gestion des infrastructures de transport.....	95
7.4 Développement durable et techniques de construction routière.....	96

Préambule

Ce cours poursuit quelques objectifs simples, ceux de fournir des réponses et des outils pour :

- comprendre pourquoi on construit des routes
 - les infrastructures ont toujours eu une place de choix dans le développement des civilisations, remettre en perspective la dimension technique par rapport à l'histoire, c'est s'approprier la démarche de maîtrise d'ouvrage et comprendre les enjeux sociaux et économiques qui gravitent autour de ce domaine
- comment on étudie les projets
 - l'étude d'un projet routier nécessite la mise en oeuvre de compétences multiples ; il s'agit bien évident du tracé routier , mais en amont du domaine des études préliminaires : études d'environnement, géologiques, hydrauliques et aussi études de trafic, d'urbanisme, économiques. Au final pouvoir étudier un projet, en prenant en compte les contraintes du milieu où il sera implanté et en mesurer l'impact.
- comment on les construit
 - la mise en oeuvre du projet nécessite la connaissance de quelques principes fondamentaux de la géotechnique, des techniques de terrassement, des contrôles à mettre en oeuvre
- mesurer les enjeux et défis que devront intégrer les infrastructures routières demain
 - une prise en compte accrue de l'environnement, des contraintes en matière de limitation de l'émission des gaz à effet de serre, de développement durable. Ce sont des clés qui permettent à un technicien de se positionner dans un domaine en plein mouvement, où la simple connaissance technique n'est pas suffisante.

Chapitre 1 - Généralités

1.1 Historique des infrastructures routières

L'histoire de la route est indubitablement attachée au développement de l'humanité et des civilisations. Bien sur, ce cours est technique et non pas historique, mais comment ne pas parler des voies romaines.

La civilisation romaine a véritablement marquée de son empreinte une partie de l'Europe par l'aménagement d'infrastructures, qu'elles soient viaires ou bien d'adduction d'eau potable. Leur conception leur a permis d'en laisser trace jusqu'à nos jours.

Il est important de noter que l'histoire des routes est aussi liée au volonté d'expansion des nations et donc des besoins de leurs armées. Il est alors nécessaire de pouvoir déplacer des troupes et de l'armement rapidement à travers de nouveaux pays.

Ces voies sont alors assez rapidement marquées par leur capacité à supporter la circulation de chars tirés par des attelages bovins. Il est nécessaire dans ces conditions qu'elles disposent de la résistance mécanique nécessaire. La notion de chaussée est inventée. Les romains utilisent alors des matériaux minéraux durs sous forme de blocs. Les techniques utilisées proviennent de la maçonnerie, on donne alors à la route une forme bombée, ce qui permet le report des efforts sur les bords de chaussée qu'il suffit alors de caler. Cette technique sera utilisée pendant près de 20 siècles.

Il est important de noter que l'histoire nous apporte ensuite la confirmation que de nombreuses civilisations aux visées expansionnistes ont appuyé leur développement sur une maîtrise de la communication en général et des infrastructures routières en particulier.

Plus près de nous, apparaît en France la première trace de l'organisation des infrastructures routières nationales, avec la nomination de Sully, comme Grand Voyer de France (fin du 16ème siècle). Le financement des infrastructures a toujours été le moteur de leur développement. Le moyen-âge malgré la perception d'impôts par les potentats locaux, n'a guère été le témoin de leur réinvestissement sur ce domaine.

Il a fallu attendre le 17ème siècle, avec la nomination de Colbert et la création de celle qu'on peut qualifier d'institution nationale, je veux dire l'administration des Ponts et Chaussées. Un réseau routier national est alors développé en France, l'Etat est centralisé, le pouvoir est implanté à Paris, les routes royales en partiront donc vers la province.

Ainsi avant 1789, 30 000 km de routes ont été construites. Avec une chaussée de 13 m, les routes royales présentent des caractéristiques géométriques importantes. Il n'en est pas de même pour la desserte interne, les routes traversières présentent des dimensions plus modestes: 10 m pour les chemins vicomtiens, 5 m pour les chemins de terroir permettant la liaison d'un « pays » à l'autre, 2,50 m pour les chemins dits de carrière et les sentiers d'une largeur de chaussée de 1,20 m. Devant la difficulté de moderniser ce réseau, les départements créés lors de la révolution, ont, pour certains, rétabli les péages.

La construction et l'entretien des routes posent aussi le problème du mode de financement: fonds privés ou fonds publics et usagers ou contribuables. La France a fait le choix, jusqu'à la reconstruction qui a suivi la deuxième guerre mondiale, du financement public de son réseau routier.

La difficulté est apparue avec le développement important du parc automobile. L'aménagement rapide d'un réseau routier structurant de capacité s'est révélé nécessaire, l'Etat a choisi d'utiliser le principe de la concession pour le mettre en oeuvre. Ainsi, si les caractéristiques de l'autoroute sont déterminées par l'administration technique du ministère de l'Equipeement, sa construction et son exploitation sont prises en charge par une société (publique ou privée) d'autoroute, en contrepartie de la perception des droits de péage. L'application de la directive européenne d'une directive européenne sur la coordination des procédures de passation des marchés publics de travaux, directive interprétée en droit français par la loi Sapin en 1993. Cette loi a entraîné la disparition du système de l'adossment à partir de 1998¹.

Le réseau routier français était composé avant le 1er janvier 2006, outre les autoroutes (10 400 km), des routes nationales (environ 29 000 km), des routes départementales (360 000 km) et des voies communales (610 000 km)².

La loi de décentralisation, votée en 2004, et traduite à la fin de 2005 par un décret précisant la constitution du réseau routier national a modifié ces répartitions, en transférant environ 17 000 km du réseau routier national au réseau routier départemental³.

1.2 Fonction économique de la route

Nous l'avons vu précédemment le développement des infrastructures routières est lié aux politiques d'expansion des nations, d'abord en appui aux nécessités de déplacements militaires, elles ont ensuite permis le développement commercial.

1 <http://www.rhone-alpes.cci.fr/competences/amenager/livre/PDF/110.pdf>

2 <http://www.route.equipement.gouv.fr/RoutesEnFrance/route/p1/1point2.htm>

3 http://www.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/dossier_cle2311e1-2.pdf

Le développement économique et industriel qui a suivi la deuxième guerre mondiale a vu une transformation du paysage industriel, la technique a permis de rationaliser les méthodes de production, ce mouvement était apparu au début du siècle dans les prémices de la construction automobile.

Ce même mouvement de modernisation a touché l'agriculture. On a alors assisté à une migration des campagnes vers les villes. Les régions se sont spécialisées dans des productions complémentaires, la rationalisation des coûts a peu à peu conduit à la diminution des stocks, et à la nécessité de pouvoir approvisionner rapidement des unités de fabrication distantes.

Cette modernisation de la production, en diminuant les coûts de revient, a permis de créer des marchés de masse. La distribution commerciale de plus en plus orientée vers les grandes surfaces de vente nécessitait, et le phénomène ne cesse de croître, des capacités de déplacement rapide au sein des pays occidentaux. En France, la politique des transports a privilégié la route par rapport au chemin de fer.

Les économistes⁴ caractérisent les performances d'une activité par la productivité marginale du capital privé. La qualité des infrastructures de transport impacterait cette productivité. En réduisant les coûts de transports, les réseaux routiers facilitent la mobilité des facteurs de production, diminuent les distances (en facteur temps) et leur impact entre lieux de production et de consommation.

Les études menées sur l'impact des investissements publics en infrastructure routière aboutissent à des taux de rentabilité très élevée. Ces taux atteignent selon leurs auteurs, 60%. Même si cette valeur semble très optimiste, elle illustre bien l'ambiguïté du financement des infrastructures: c'est le contribuable qui les finance, mais l'utilisateur ne les paye pas! Cette ambiguïté a été levée en partie dans le cas des autoroutes concédées. Il reste à prendre en compte un autre coût externe : celui de la pollution. Ce dernier est purement externe.

Il existe une autre fonction économique exercée par la route: l'activité qu'elle génère pour sa construction et son entretien.

1.3 La route, outil d'aménagement du territoire

Nous l'avons mesuré dans le thème précédent, la route a une fonction économique. Il est envisageable de mesurer, à posteriori, l'incidence d'une infrastructure sur un territoire en terme d'économie. Des modèles permettent

4 **Crihfield:** Impacts of concentration in Hog production on economic growth in rural illinois – 1989
C. Mamatzakis: Public Infrastructure, Private Input Demand, and Economic Performance of the Greek Industry

de déterminer la rentabilité de ces investissements.

D'une manière très concrète, la route modifie l'organisation du territoire. Elle modifie les distances entre bassins d'activités et d'habitat.

A l'échelle locale, la présence d'un réseau routier de qualité va développer l'éloignement des zones d'habitat par rapport aux bassins d'activités. Cet éloignement modifie l'équilibre coût et temps de transport, par rapport au coût de l'immobilier. L'incidence des transports individuels est d'autant plus importante, que l'habitat est de faible densité et que l'agglomération qui joue le rôle de pôle d'attraction est de petite taille. Dans les grosses agglomérations ou les mégaloïoles, le poids des transports en commun est dominant, même si la distance entre lieu d'habitat et lieu d'activités ne cesse de s'étendre (cf: aire d'éligibilité des titres de transport en Ile de France).

Dans les départements ruraux, la qualité du réseau routier a une deuxième incidence, elle permet de ralentir l'exode rural en maintenant l'accès aux équipements socio-culturels pour les habitants des villages.

A l'échelle régionale et inter-régionale, l'existence de réseau routier de qualité est un facteur facilitant l'implantation d'activités économiques.

Dans une économie libérale, c'est le marché qui dicte l'organisation de la production. Lorsque le transport routier est dominant, deux données sont importantes, l'implantation sur un itinéraire d'importance transrégionale ou internationale et la distance aux secteurs de consommation. La notion de distance est appréciée selon plusieurs critères, la longueur bien évidemment, mais aussi la fiabilité de la durée de trajet. Ce dernier critère est très favorable à l'utilisation de l'autoroute.

La Délégation à l'aménagement du territoire et des affaires régionales a développé le concept des réseaux de villes, dans une réflexion lancée dans les années 1990. Ce concept a été renforcé par les politiques de transport à l'échelle européenne.

Lorsque la taille des bassins d'habitat et d'activités est insuffisante, l'espace est organisé à l'échelle de plusieurs villes. La logique d'équipement, de services, de coopération économique est alors complémentaire. Elle nécessite pour fonctionner des infrastructures de transport au titre desquelles figurent en bonne place les routes.

1.4 Problématiques contemporaines des réseaux routiers

1.4.1 La sécurité routière

Le trafic routier n'a cessé d'augmenter depuis la période de reconstruction qui a suivi la 2ème guerre mondiale, et avec lui le risque et la réalité des accidents. Ainsi en 1972, le nombre d'accidents atteint 260 000 et le nombre de tués 16 545 personnes.

En près de 30 ans les exigences sociales ont considérablement évolué. Les années 70 ont correspondu, dans le monde occidental, à une mutation sociale. Elle s'est traduite par une émancipation par rapport aux anciens dogmes et aux préceptes traditionnels. Elle s'est poursuivie à partir des années 1990 par un besoin croissant de sécurité. Aujourd'hui, circulent en France environ 29 millions de véhicules particulier et 6 millions de véhicules utilitaires, le niveau des contraintes à appliquer est d'autant plus élevé que le nombre de véhicules en circulation est élevé. Il faut prendre conscience qu'en l'absence de mesures, le nombre de tués aurait continué à croître avec le trafic pour atteindre plus de 45 000 tués par an.

Ainsi la société a peu à peu refusé l'insécurité routière. Ce sujet a pris une dimension politique, et aujourd'hui l'acceptabilité sociale de ce thème a permis la mise en oeuvre d'une politique de répression.

La prise de conscience de l'évolution du poids de l'accidentologie existait, les premières mesures avaient été alors prises, avec la limitation à 60 km/h en agglomération en 1954 et la possibilité de contrôler l'alcoolémie en cas d'accident, la limitation de vitesse sur une partie du réseau en 1961. L'année 1970 a vu l'apparition du premier taux maximum d'alcoolémie, sa valeur était de 0,8 g / l de sang et conduisait à une contravention, la valeur de 1,2 g / l de sang était la limite du délit. Ces valeurs sont respectivement de 0,5g / l et 0,8 g / l de sang.

La mise en oeuvre du permis à points en 1992 correspond à un tournant dans les mesures répressives. Après plusieurs années de stagnation à des valeurs comprises entre 7500 et 8500 morts par an, l'année 2003 a été le témoin d'une baisse spectaculaire de plus de 20 % avec 5700 décès, après une année 2003 où le nombre d'accidents mortels avait déjà diminué. Les mesures répressives ont principalement touché le domaine de la vitesse avec la multiplication des contrôles et la mise en oeuvre des premiers radars automatiques.

La technique automobile a, bien sur, évolué sur la même période. Les véhicules ont intégré des zones de déformation, des ceintures de sécurité avec prétenseurs pyrotechniques, des airbags. Ces dispositifs ont pour but

d'absorber l'énergie cinétique importante mise en jeu lors d'une décélération brutale liée aux chocs accompagnant souvent un accident de voiture. Le système d'anti-blocage de roues, complété par les dispositifs d'E.P.S., a pour but de maintenir la maîtrise de la trajectoire le plus longtemps possible, dans des conditions extraordinaires.

La route est moins souvent responsable des causes que des conséquences de certains accidents.

On sait que le facteur aggravant d'une sortie de route est la « rencontre » d'un obstacle. Si le réseau routier principal a vu les accotements s'élargir, les arbres bordant les chaussées abattus, les busages être sécurisés, il n'en est pas encore de même sur les plus petites routes, où il est matériellement impossible d'élargir l'emprise de la route. Cependant les poteaux électriques ou téléphoniques disparaissent peu à peu, sous l'action concertée menée par les collectivités locales et les concessionnaires publics de réseau (EDF et France-Telecom)⁵.

La technique a considérablement évolué. Les matériaux utilisés pour la fabrication des couches de roulement intègre les résultats de la recherche en matière de liants hydrocarbonés, de composition granulométrique et de caractéristiques intrinsèques des granulats. Ainsi les aléas liés aux intempéries prennent moins d'importance.

1.4.2 La route dans les politiques de transport

Nous avons mesuré précédemment le poids que représentait la route dans l'aménagement du territoire et l'importance économique qu'elle représentait. Nous avons mesuré aussi le poids des collectivités publiques dans la mise en oeuvre des infrastructures.

La route n'est pas la seule infrastructure de transport. Le 19ème siècle a vu le développement d'un réseau important de canaux en France. Le 19ème et le début du 20ème siècle voient la construction d'un réseau de chemin de fer.

La période qui a suivi la seconde guerre mondiale a vu apparaître une organisation économique où la place du transport routier prend une place déterminante. En effet cette période est marquée par la production de masse des biens d'équipement réalisés avec un effort constant pour la maîtrise des coûts de revient. C'est le début du « Just in time ». Le domaine de l'automobile illustre ce propos: les équipementiers produisent les accessoires à la demande des constructeurs automobiles. Cette tendance n'a cessé de s'affirmer après les différentes crises économiques qui ont touché l'occident. C'est le transport routier qui apporte la souplesse et la réactivité à ce mode de fonctionnement.

5 Décret n° 2006-1133 du 8 septembre 2006 relatif au déplacement d'installations et d'ouvrages dans l'intérêt de la sécurité routière et modifiant le code de la voirie routière

En terme de contrainte économique, cette solution est choisie, car l'usage de la route, en dehors des autoroutes n'est pas facturé en France. C'est le contribuable qui finance la construction et l'entretien des routes pas l'utilisateur. Ce qui n'est pas le cas dans tous les pays européens.

Les investissements réalisés dans les infrastructures de transport entre 1950 et 1990 en France:

- autoroutes: 26 M€
- routes nationales: 22 M€
- routes locales: 62 M€
- voies TGV: 5,5 M€
- voies de chemin de fer classiques: 18 M€
- infrastructures du métro parisien: 5,5 M€
- infrastructures des métros de Lyon et Marseille: 1,2 M€
- infrastructures de navigations fluviales et maritimes: 5,5 M€
- Voies navigables: 4,5 M€

Milliard d'euros en valeur 1990.

Plusieurs réflexions ont été lancées sur la politique des transports en France. La loi d'orientation sur les transports intérieurs votée en 1982⁶ avait défini des grands principes sur la complémentarité des moyens des transports, la justification des nouveaux investissements au regard de leur utilité économique et sociale et la prise en compte de l'environnement. Il faut bien admettre que la diversification des moyens de transports soit plus restée un vœu et n'ait pas trouvé de véritable traduction opérationnelle.

Le dernier schéma routier validé en France date de 1992⁷. Il a été remplacé par les schémas de services. Ces documents traduisaient les réflexions sur une réelle prise en compte de l'intermodalité pour la définition des investissements à réaliser en matière d'infrastructure. Ils devaient permettre d'asseoir les nouveaux Contrat de plan Etat Région pour la période 2000-2006.

Les contrats de plan Etat Région définissaient les projets réalisés par l'Etat dans chaque région française dans les domaines de la formation, de la recherche, de l'éducation, des nouvelles technologies, des transports, de l'environnement ... et les modalités de participations financières des signataires du Contrat. Ainsi dans le domaine des infrastructures routières, le choix des investissements sur le réseau routier national était décidé avec les Régions mais aussi les Départements et les agglomérations qui les cofinançaient. A titre d'exemple, dans le domaine urbain l'Etat finançait ses projets d'infrastructures routières à hauteur de 27,5 % et à 50% en inter-urbain. La loi du 13 août 2004 a mis fin à ce type de montage financier des

6 [http://www.legifrance.gouv.fr/WAspad/Ajour?
nor=&num=82-1153&ind=1&laPage=1&demande=ajour](http://www.legifrance.gouv.fr/WAspad/Ajour?nor=&num=82-1153&ind=1&laPage=1&demande=ajour)

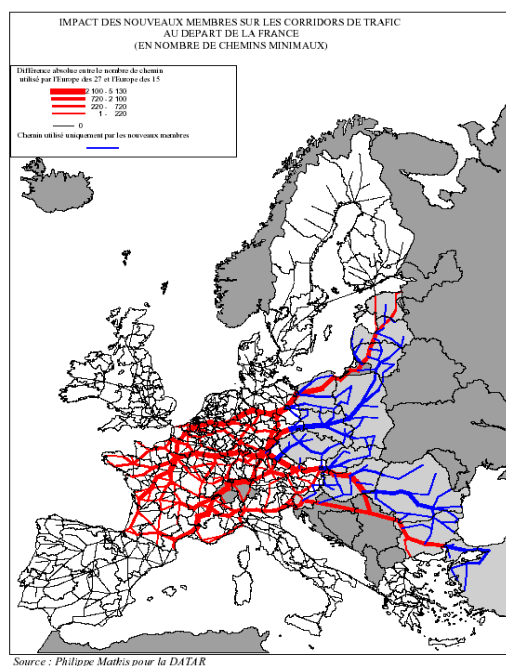
7 <http://www.route.equipement.gouv.fr/RoutesEnFrance/route/p1/9point2.htm>

routes nationales.

La place grandissante de l'Europe dans les décisions publiques a nécessité de redéfinir les politiques en matière de transports à l'échelle des politiques de développement européenne. L'agrandissement de la communauté avec l'arrivée en 2004 de dix nouveaux entrants (Pologne, Hongrie, République tchèque, Lituanie, Estonie, Slovénie, Lettonie, Slovaquie, Chypre et Malte) et en 2007 de la Bulgarie et de la Roumanie, a conduit l'Europe, et en particulier la France, à réfléchir aux moyens de transport et au développement des infrastructures.

A titre d'exemple, la Roumanie ne dispose aujourd'hui que d'un peu plus de 100 km d'une autoroute dont l'état nécessite une réhabilitation lourde. Le développement économique de ces deux nouveaux pays européens nécessite un développement de leur réseau autoroutier.

La DATAR a publié en 2000 une étude « La France en Europe : quelle ambition pour la politique des transports ? » sur laquelle plusieurs CIAT⁸ se sont appuyés pour définir les axes de développement d'une politique des transports en France à l'horizon 2005⁹.



Cette étude conclut à l'importance du transport logistique et de l'impact de l'implantation de nouvelles plate-formes logistiques, à la nécessité de développer l'ouverture des façades maritimes, de développer les couloirs ferroviaires nord-sud et de franchissement des Pyrénées et des Alpes, de contribuer à l'interconnexion des grands aéroports avec les autres réseaux de

8 CIAT: Comité interministériel d'aménagement du territoire

9 [http://www.datar.gouv.fr/Datar_Site/DATAR_Actu.nsf/\\$ID_Dossier/CLAP-5LVC9S](http://www.datar.gouv.fr/Datar_Site/DATAR_Actu.nsf/$ID_Dossier/CLAP-5LVC9S)

transports. Cette étude conclut, comme la LOTI, à la nécessité de justifier les nouveaux aménagements au regard de leur utilité sociale et économique en intégrant les préoccupations de plus en plus fortes de protection de l'environnement.

Ces conclusions diffèrent des axes politiques de la LOTI, dans le sens, où les financements européens ne s'appliqueront qu'aux projets porteurs d'enjeux à l'échelle de l'Europe.

Cette étude se fait aussi l'écho des observations de la Cours des Comptes sur l'insuffisance de l'entretien du réseau routier français. La rareté des fonds publics donne une dimension particulière à ces observations. Le patrimoine routier nécessite pour être conservé la mobilisation de masse financière importante. Les Etats Unis avaient opté pour une politique d'entretien curatif. Le réseau routier très rapidement dégradé, avec une difficulté particulière pour les ouvrages d'art, fait peu à peu reconsidérer cette orientation pour à nouveau considérer tout l'intérêt que représente l'entretien préventif.

1.4.3 Les gestionnaires de voirie

Nous l'avons exposé précédemment, le réseau routier est géré par différents intervenants. Jusqu'à la création des autoroutes ces intervenants étaient de droit public. Il s'agissait de l'Etat pour les routes nationales et les autoroutes non concédées, les départements pour le réseau routier départemental: les routes départementales qui jusqu'à la décentralisation étaient qualifiées de chemins départementaux.

Le gestionnaire de la voirie est responsable de l'ensemble des mesures destinées à assurer la sécurité et la commodité du passage sur la voie publique. En est décliné ainsi un certain nombre d'obligations. Au titre de la principale, celle de l'entretien: le gestionnaire de voirie doit mettre en oeuvre l'ensemble des moyens dont il dispose pour assurer un état permettant une circulation dans des conditions de sécurité adaptées aux caractéristiques de la voie en question. On parle en particulier de défaut normal d'entretien. Cependant, nul n'est tenu à l'impossible, le juge parle de diligence normale de service: l'utilisation optimum des moyens dont le gestionnaire dispose pour maintenir la sécurité sur la voie.

Les risques juridiques sont de plusieurs natures:

- administratif (droit administratif s'applique à la personne morale, c'est le tribunal administratif qui met en jeu ce droit)
- civil (code civil, il peut s'appliquer à la personne physique et morale)
- pénal (code pénal, depuis sa réforme au début des années 1990, il permet la mise en cause des personnes physiques).

En ce qui concerne la voirie nationale, c'est l'organisation du ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durable qui définit les responsabilités. Elle est en majeure partie supportée par les directions interdépartementales de la route (11 en France)¹⁰.

En ce qui concerne les communes et les départements, la responsabilité est exercée par l'autorité désignée au sein de l'organisation mise en place.

En ce qui concerne les autoroutes deux cas de figure sont envisageables: soit il s'agit d'une autoroute non concédée (exemples: A20 pour partie, A75 pour partie) dans ce cas l'entretien est réalisé par un service spécialisé de la direction interdépartementale de la route concernée, soit il s'agit d'une autoroute concédée, et c'est la société concessionnaire qui assure l'entretien pendant toute la durée de la concession qui lui est accordée.

Outre les obligations d'entretien, le gestionnaire de voirie régleme l'usage de la voirie et de ses dépendances. Ainsi il conditionne les usages non ordinaires à la mise en place de mesures de sécurité (exemples: déviation pour une course de vélo, pour des travaux, limitations de vitesse...), il définit les conditions dans lesquelles un gestionnaire de réseau peut implanter des poteaux, des canalisations dans les accotements ou sous la chaussée. Ces conditions peuvent s'appliquer à la technique, mais aussi à la sécurité, les autorisations peuvent être conditionnées au versement de redevance. Elles ont aussi un caractère précaire et révocable.

Après l'application de la nouvelle loi de décentralisation du 13 août 2004, l'Etat a reclassé dans les réseaux routiers départementaux sensiblement les deux tiers du linéaire du réseau routier national, soit environ 20 000 Km sur les 30 000 km qui le composent aujourd'hui.

L'enjeu majeur pour les collectivités résidera dans la définition de politiques d'entretien et d'investissement pertinentes au regard des autres politiques de développement, en particulier économique et sociale.

¹⁰ http://www.route.equipement.gouv.fr/rubrique.php3?id_rubrique=179

Chapitre 2 – L'organisation des études de projet d'infrastructures routières

Tout projet, dans quelque domaine qu'il intervienne, nécessite des études successives dont les portées et les objectifs seront différents et adaptés aux problématiques propres à chaque niveau de définition. Ce chapitre traite des études nécessaires à un projet d'infrastructures routières.

Nous aborderons dans une première partie la particularité du domaine des infrastructures routières. Nous nous attacherons en second lieu à détailler le contenu des études préalables. Nous aborderons les grands principes de la gestion de projet, car elle est totalement liée au contenu de ces études.

Nous aborderons ensuite les différents niveaux d'étude: avant projet sommaire, et avant projet détaillé.

2.1 Particularités des projets d'infrastructures routières

Ces projets sont essentiellement marqués par leur impact sur l'environnement. Il s'agit de nouvelles routes, autoroutes, mais aussi de modernisation d'itinéraires, de création de nouveaux points d'échange (carrefours, giratoires, échangeurs ...). Si une majorité de citoyens est utilisatrice de la route, la même majorité envisage plus difficilement le passage d'une rocade dans le fond de son jardin. C'est le phénomène NIMBY (Not in my back yard).

L'exigence sociale a aussi évolué, des groupes de pression se sont développés dans tous les domaines: l'environnement d'abord, mais aussi des associations de défense de quartier, ou des thématiques plus précises comme la défense de certains oiseaux, reptiles, chyroptères ...

La détermination des solutions dépendra aussi de la prise en compte des contraintes d'environnement de toutes sortes.

A la genèse d'un projet, existent un besoin, un problème, un changement de situation. Il est essentiel de connaître la situation initiale, c'est l'environnement du projet. Il s'agit du contexte, ses dimensions en sont économique, environnementale, politique, sociale. La première des étapes d'un projet, que prendra en charge la gestion de projet, est la connaissance de ce contexte.

2.2 Les acteurs du projet et leur collaboration

Un projet associe un ensemble d'acteurs directement ou indirectement concernés, ils pourront être moteurs, décideurs, mais aussi opposants. On peut pour utiliser un langage propre aux opérations routiers quelques termes qui caractérisent les groupes d'acteurs:

La maîtrise d'ouvrage: c'est l'initiateur du projet et celui qui le commande, il n'étudiera pas le projet, mais par contre il doit en connaître les fonctions, les objectifs. Il définira donc le programme. Le maître de l'ouvrage définit dans le programme les objectifs de l'opération et les besoins qu'elle doit satisfaire, ainsi que les contraintes et exigences de qualité sociale, urbanistique, architecturale, fonctionnelle, technique et économique, d'insertion dans le paysage et de protection de l'environnement, relatives à la réalisation et à l'utilisation de l'ouvrage. (extrait de la loi Maîtrise d'Ouvrage Publique)

<http://www.legifrance.gouv.fr/texteconsolide/UPECZ.htm>

La maîtrise d'oeuvre: c'est l'entité qui étudiera le projet sur la base du programme et se chargera de sa mise en oeuvre. Lorsqu'il s'agit de travaux, la maîtrise d'oeuvre prend en charge le contrôle de l'exécution des travaux. La mission de maîtrise consiste à apporter une réponse architecturale, technique et économique au programme (rappel : le programme est une prérogative de la maîtrise d'ouvrage ; les maîtres d'oeuvre n'ont donc pas à élaborer ni modifier le programme, qui n'entre pas dans leur domaine d'intervention.

Les partenaires: il peut s'agir de cofinanceurs, mais aussi de personnes publiques concernées par le projet (administrations, collectivités locales...)

Les usagers: ce sont les bénéficiaires du projet, lorsqu'il s'agit d'un ouvrage public.

Le public: c'est l'ensemble des personnes qui constituent l'environnement humain du projet.

2.3 Les étapes de réalisation du projet

2.3.1 Les études préalables en infrastructure routière

La particularité de la route est son caractère linéaire et son impact sur des milieux de natures totalement différentes. On peut les inventorier avec un minimum de bon sens. Ainsi nous avons évoqué le domaine foncier donc au sens large la route interagit avec les zones urbaines, qu'elle la traverse, où qu'elle la desserve.

Elle impacte l'environnement, au sens étymologique, donc des écosystèmes définis par leurs composants: eau, air, faune, flore, sol et sous-sol. Les exigences sociales ont peu à peu forgé des outils législatifs et réglementaires qui encadrent ces domaines. La route touche aussi les zones urbaines.

Une nouvelle infrastructure modifiera le développement urbain, mais aussi le développement économique d'un territoire.

Il y a lieu tout d'abord de définir la zone d'étude pertinente pour le projet routier imaginé. Le périmètre de cette zone sera à adapter aux problématiques étudiées. On imagine assez facilement, que l'étude géologique recouvrira une zone différente de celle de l'étude de bruits.

2.3.2 Les études d'avant projet

A ce niveau d'étude, les objectifs principaux sont:

- préciser les fonctions locales de l'aménagement
- définir des possibilités différentes de tracé
- comparer ces possibilités différentes, que l'on qualifiera de variantes, au regard des objectifs de l'aménagement mais aussi au regard des contraintes à prendre en compte
- choisir une variante
- définir son coût d'objectif.

L'échelle de précision permet encore de déplacer le tracé à l'intérieur d'un fuseau, pour les projets importants on parle de bande des 300 m.

Il sera alors possible à ce stade de préparer l'enquête publique.

2.3.3 La concertation avec le public

La LOTI l'avait évoqué, l'émancipation de nos sociétés occidentales par rapport aux pouvoirs l'a confirmé: un projet doit faire preuve d'une acceptabilité sociale.

Le code de l'urbanisme et la loi SRU ont consacré le recours à la concertation avec le public. même lorsqu'elle n'est pas obligatoire, il y a tout intérêt à la mettre en oeuvre¹¹. Cet exercice n'est pas encore naturel pour les maîtres d'oeuvre publics, il l'est plus pour les maîtres d'ouvrage publics.

Cette concertation peut être mise en oeuvre à plusieurs niveaux. Dès les études préliminaires, elle permettra de faire émerger des paramètres de l'environnement qui auraient pu ne pas être détectés. Au stade de l'avant projet, la concertation va permettre de recueillir l'avis de la population sur chaque variante, mais aussi les remarques et aussi les pistes d'améliorations. Le bilan de la concertation guidera le maître d'ouvrage pour le choix de la solution qui sera retenue.

Cette concertation peut prendre plusieurs formes: exposition, plaquettes, réunions. Elle a pour but de réduire la distance qui existe entre les concepteurs et les riverains à qui s'imposera ce projet. Elle permet de faire disparaître les zones d'ombre, les imprécisions pour le public. Elle permet aussi aux maîtres d'ouvrage et d'oeuvre d'intégrer des préoccupations qui n'avaient pas été envisagées.

L'exercice de la concertation met en évidence clairement l'évolution du métier de technicien au sens large. Ce dernier ne doit pas être seulement capable de concevoir un projet, comme simple objet technique, mais il doit savoir le justifier par rapport à son environnement et à une problématique d'aménagement spatial. Il doit ainsi intégrer des compétences économiques, sociologiques, environnementales, autant qu'une véritable capacité de communication.

2.3.4 L'enquête publique et la déclaration d'utilité publique

Le dossier d'enquête publique, qu'il soit préalable ou non à la déclaration d'utilité publique, est établi à partir des études d'avant projet sommaire.

Il comporte une pièce essentielle: l'étude d'impact. Cette dernière est réalisée sur les bases des études d'environnement.

11 « ...jurisprudence, qui a estimé que la concertation peut prendre la forme de réunions publiques, d'expositions de plans et maquettes, d'affichages, de la tenue d'un registre à la disposition du public, etc. Le juge exige toutefois une certaine proportionnalité entre les modalités de la concertation et l'importance des projets soumis à concertation... »

Pour les projets de grande importance, le dossier comprend en outre, une étude socio-économique. C'est la loi d'orientation sur les transports intérieurs qui a défini cette obligation.

Le maître d'ouvrage saisit le préfet qui prend alors l'arrêté de mise à l'enquête publique du projet. Le tribunal administratif complète la démarche en nommant un commissaire enquêteur ou une commission d'enquête si le projet le justifie dans le cadre d'enquêtes publiques préalables à une déclaration d'utilité publique ou de projets ayant un impact sur l'environnement (application de la loi Bouchardeau ¹²).

Dès que le principe de mise à l'enquête est arrêté, le maître d'ouvrage a en charge des mesures de publicité de cette enquête. Des articles doivent être publiés aux rubriques annonces légales de journaux de presse quotidienne régionale, des panneaux doivent indiquer, en périphérie de l'emprise du projet, les dates heures et lieux où le dossier d'enquête sera consultable, ainsi que les horaires de permanence du commissaire enquêteur.

L'enquête publique durera au moins 1 mois. Au cours de cette période, le public peut porter toute remarque, interrogation, contradiction qu'il jugera pertinent par rapport au projet. Le commissaire enquêteur peut recevoir le public et porter lui même les remarques du public.

A l'issue de cette enquête, où il peut être amené à interroger le maître d'ouvrage, le commissaire enquêteur établira son rapport, à l'intérieur duquel, il pourra faire porter ses remarques, ses interrogations. En conclusion, il donnera son avis sur le projet.

Ce rapport et cet avis seront transmis au préfet. Ce dernier décidera alors du caractère d'utilité publique ou non du projet¹³.

L'ensemble de la procédure est la plus délicate juridiquement du projet. En effet elle se conclut par un acte administratif, qui comme tel, est attaquant devant une juridiction administrative: tribunal ou conseil d'Etat.

Les aspects sur lesquels peuvent porter un recours, touchent aussi bien au fond qu'à la forme.

Sur le fond, il s'agit aussi bien de la réponse que le projet apporte à la problématique développée, que de la prise en compte des contraintes ainsi que

12 Loi n° 83-630 du 12 juillet 1983 relative à la démocratisation des enquêtes publiques et à la protection de l'environnement

13 C'est la déclaration d'utilité publique qui permet l'expropriation. En effet c'est la seule possibilité de remise en cause de la propriété protégée par la déclaration des droits de l'homme et du citoyen dans son article 17 - <http://www.justice.gouv.fr/textfond/ddhc.htm>

des mesures compensatoires. L'élément essentiel est l'étude d'impact¹⁴. Elle est rendue obligatoire pour des aménagements dont la liste est définie par décret. D'une manière générale tout aménagement d'un montant supérieur à 1,9 M€ est obligatoirement soumis à enquête publique.

Sur la forme, il s'agit des respects des procédures, des délais, des mesures de publicité....

Le juge peut alors annuler la déclaration d'utilité publique et la procédure doit alors être recommencée, après les éventuels compléments d'étude. Les acquisitions foncières sont alors bloquées en ce qui concerne les procédures d'expropriation. Si des travaux avaient été commencés sur des parcelles que le maître d'ouvrage avait acquis à l'amiable il peut être condamner à remettre les terrains en état.

A contrario, les recours devant une juridiction européenne ne sont pas suspensifs de travaux si le motif n'est pas lié à une dégradation du milieu naturel, mais à la privation de la jouissance du bien.

Ce type de recours est de plus en plus courant. Les particuliers et les associations s'entourent de conseillers juridiques qui analysent en détail le respect des procédures. La seule contrainte pour les requérants aient intérêt à agir.

2.3.5 Les études de projet

Dès que le projet est déclaré d'utilité publique, les études précises pourront alors être lancées. Le tracé sera alors défini précisément, ainsi que l'ensemble de détail de construction.

Parallèlement, l'ensemble des autres enquêtes sera lancé:

- l'enquête parcellaire: elle permettra de connaître précisément les propriétaires de chaque parcelle touchée par le projet. C'est sur sa base que les acquisitions ou le cas échéant, les expropriations auront lieu. Cette enquête peut aussi être réalisée en simultanéité avec l'enquête publique.
- l'enquête loi sur l'eau, sil le projet doit faire l'objet d'une autorisation au titre de la loi sur l'eau.
- les éventuelles enquêtes publiques liées à la mise en compatibilité des

14 http://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do;jsessionid=057CDCE72453AD11154CA3861689BE2B.tpdjo15v_3?idSectionTA=LEGISCTA000006176669&cidTexte=LEGITEXT000006074220&dateTexte=20080302

documents d'urbanisme (SCOT¹⁵ ou PLU¹⁶). En effet l'infrastructure peut être contraire voir interdite par les documents d'urbanisme. Dans ce cas, c'est le document d'urbanisme qui s'adapte.

2.3.6 Les appels d'offres

Une fois le projet parfaitement défini, il y a lieu de passer à son exécution. Le maître d'ouvrage étant public pour le sujet qui nous intéresse, il est astreint au code des marchés publics. Le maître d'oeuvre établit alors un dossier d'appel d'offres. Ce document contiendra tous les éléments techniques qui définiront le projet à réaliser, les référentiels et les normes techniques à prendre en compte. Il définira les conditions économiques et réglementaires de réalisation avec en particulier les modes de rémunération. Le DCE définira les conditions de mise en concurrence, les critères de jugement des offres.

A ce stade, les procédures utilisables sont multiples. Elles répondent à des problématiques différentes. En voici quelques unes:

- la plus connue: l'appel d'offres ouvert. Dans ce cas toutes les entreprises peuvent soumettre une offre au maître d'ouvrage.
- l'appel de candidatures: le maître d'ouvrage annonce l'aménagement à réaliser avec ces caractéristiques générales. Il retient ensuite les candidats qui à partir de référence d'opérations équivalentes et en fonction de critères qualitatifs préalablement définis, qui lui semblent le plus à même de réaliser l'aménagement. Des dossiers de consultation sont alors adressés aux candidats retenus. Leurs offres sont alors analysées comme pour un appel d'offres ouvert.

Dans les deux cas, l'appel d'offres peut être lancé avec ou sans variante. Ainsi dans le cadre des variantes, les caractéristiques techniques ne sont pas figées, les candidats peuvent proposer des solutions. Il existe des formes d'appel d'offres plus incitative à la créativité des entreprises:

- l'appel d'offres sur performance, c'est une forme de variante élargie. Le candidat apporte une réponse à un problème défini par le maître d'ouvrage
- le marché de conception réalisation: le candidat retenu étudiera le projet et le réalisera pour un prix défini au stade de l'appel d'offres.

A l'issue des procédures de mise en concurrence, un candidat est retenu; son offre deviendra le contrat qui le liera avec le maître d'ouvrage.

15 SCOT: schéma de cohérence territoriale, c'est le document de planification qui à l'échelle de plusieurs communes, définit les grandes options d'aménagement. Les autres documents d'urbanisme devront prendre en compte le parti d'aménagement arrêté.

16 PLU: plan local d'urbanisme, c'est le document qui a remplacé le POS, plan d'occupation des sols. C'est un document d'urbanisme réglementaire. Il détermine l'utilisation des sols, la nature des constructions, leur densité

2. 2.3.7 L'exécution des marchés

Nous venons d'indiquer que le marché public est un contrat qui lie le maître d'ouvrage avec l'entreprise retenue. Les deux parties auront, à partir de ce moment, la charge, chacune en ce qui la concerne, d'exécuter le contrat : l'entreprise pour réaliser les travaux et le maître d'ouvrage pour rémunérer l'entreprise en faisant contrôle que le contrat est respecté.

L'évolution du contexte économique a modifié les conditions de réalisations des travaux. La tendance affirmée depuis plusieurs années est une exécution à la lettre du contrat, sur le mode anglo-saxon.

Il arrive souvent pour des marchés de travaux importants, que les candidats aient étudié très finement le DCE pour en déterminer les faiblesses ou les erreurs. Leur offre est alors basée sur la valorisation du DCE en l'état.

En cours d'exécution toute modification du projet et donc des prestations à réaliser, doit alors se traduire par une modification du contrat. Le code des marchés publics le permet au travers des avenants en particulier.

Le maître d'oeuvre est chargé, pour le compte du maître d'ouvrage, de veiller à la bonne exécution du marché. Il dispose d'un arsenal juridique contraignant pour l'entreprise au travers du CCAG¹⁷ travaux.

Les contentieux qui peuvent opposer maître d'ouvrage et entreprises peuvent être réglés à l'amiable¹⁸ ou devant un tribunal administratif.

2.4 Le pilotage du projet

Le projet, à chaque étape de sa réalisation peut être amené à évoluer, à subir des modifications. En tout état de cause, il nécessitera des étapes de validation, des prises de décision. Un comité de pilotage créé à l'origine du projet doit être le garant des engagements validés par le programme par exemple. Il sera composé de représentants de la maîtrise d'ouvrage, du chef de projet, éventuellement de partenaires du projet.

2.4.1 L'équipe projet

C'est la ressource humaine qui par ses compétences pourra réaliser l'étude. Elle peut être formée de personnes d'horizons et de structures différentes. Le fonctionnement en mode projet est qualifié de structure matricielle dans les

17 CCAG: cahier des clauses administratives générales.

18-On parle de procédure transactionnelle relative au développement du recours à la transaction pour régler à l'amiable les conflits - <http://www.dsi.cnrs.fr/RMLR/textesintegraux/volume4/414-cirdu06-02-1995.htm>

modèles d'organisation du travail.

2.4.2 Les partenaires du projet

Il peut s'agir de partenaires financiers. dans le cas de projet d'infrastructures routières, il s'agit de collectivités locales. Leur participation leur donne une forme de pouvoir en matière de choix, de tracé par exemple.

Chapitre 3 – Les référentiels techniques et les champs d'investigations nécessaires à l'élaboration d'un projet routier

En France, la normalisation et la conception des référentiels techniques en matière de route provient de l'administration chargée des transports: le ministère de l'Equipeement et plus particulièrement de la Direction des routes. Ainsi l'ingénierie publique a été dominante en France en ce qui concerne le domaine de la route, jusqu'à nos jours. Cette suprématie a d'ailleurs dépassé nos frontières, elle est une référence quasiment mondiale en la matière.

Ce domaine bénéficie d'un certain nombre de règles facilitant la conception des ouvrages. Elles ont été complétées au fur et à mesure pour prendre en compte l'évolution des techniques et des fonctionnement de la société.

3.1 Les différents types de route

Ils sont définis dans le catalogue des types de routes.

3.1.1 Le réseau structurant

- autoroute de liaison de type L, à deux chaussées séparées par un terre plein central non franchissable, à carrefours dénivelés, isolée de son environnement, sans accès riverain, à trafic élevé et à vitesse limitée à 130 km / h (110 km / h) en site difficile.
- route express: route de transit de type T à une chaussée ou deux chaussées, à carrefours dénivelés, isolée de son environnement, à trafic moyen et à vitesse limitée à 110 km / h pour les routes à chaussées séparées et à 90 km / h pour les routes à chaussée unique .

3.1.2 Autres voies principales

- artère interurbaine: route multi-fonctionnelle de type R à deux chaussées séparées par un terre-plein central infranchissable, à carrefours giratoires ou plan sans traversée du terre plein central, à vitesse limitée à 110 km / h si absence d'accès riverains ou à 90 km / h si accès riverains.
- autre route principale: route multi-fonctionnelle de type R à une chaussée, à carrefours plans ordinaires ou giratoires, à accès riverains, à trafic moyen et à vitesse limitée à 90 km / h.

3.1.3 Routes secondaires

Ce sont des routes de type S possédant les mêmes caractéristiques que les autres routes principales, mais à faible trafic.

3.1.4 Voies urbaines

Elles se décomposent en :

- voies principales urbaines, qui peuvent être à une ou deux chaussées
- voies de desserte d'activités locales à une chaussée.

3.1.5 Tableau de synthèse

Type de route	R (routes multifonctionnelles)		T (transit)	L (Liaison)
	Routes	Artères interurbaines	Routes express	Autoroutes
Nombre de chaussées	1	2	1 ou 2	2
Carrefours	plans ou giratoires	plans ou giratoires, mais sans traversée du TPC	dénivelés	dénivelés
Accès	sans ou avec	si accès, sans traversée du TPC	Sans accès riverains	sans accès riverains
Limitation de vitesse	90 km / h	90 ou 110 km/h	90 ou 110 km/h	130 ou 110 km/h
Traversées d'agglomération	oui, éventuellement		non	non
Catégories possibles	R 60 ou R 80		T80 ou T100	L100 ou L120 ou L80
Domaines d'emploi	fonction de liaison à courte ou moyenne distance		fonction de liaison à moyenne ou grande distance privilégiée	fonction de liaison à moyenne ou grande distance privilégiée
Trafic à terme	trafic moyen (1 chaussée)	fort trafic (2 chaussées)	trafic moyen	fort trafic

3.2 Les instructions techniques

Les conditions techniques dans lesquelles, doivent être aménagées les différentes routes font l'objet de trois instructions ministérielles. Elles s'appliquent selon le type de route considérée:

- l'instruction sur les conditions techniques d'aménagement des autoroutes de liaison (I.C.T.A.A.L.). elle date du 22 mars 1971, elle a été modifiée le 22 décembre 2000. Cette instruction s'applique aux routes de type L
- le guide technique pour l'aménagement des routes principales (A.R.P.). Ce guide s'applique aux routes de type T ou R. Son application est obligatoire pour les routes nationales et de plus en plus systématique pour les routes départementales.
- l'instruction sur les conditions techniques d'aménagement des voies rapides urbaines (I.C.T.A.V.R.U.)

3.2.1 Introduction

Il est impératif de comprendre pour les utiliser la démarche qui a prévalu, à l'élaboration de ces instructions techniques. Elles sont à considérer comme des outils destinés à faciliter la tâche du projeteur et non comme une contrainte de nature à limiter son imagination.

Définir les caractéristiques d'une route, c'est concevoir les trois éléments géométriques simples qui la composent:

- le tracé en plan, projection de la route sur un plan horizontal.
- le profil en long, développement de l'intersection de la surface de la route avec le cylindre à génératrice verticale passant par l'axe de celui-ci.
- le profil en travers, coupe suivant un plan vertical perpendiculaire à l'axe.

Les normes fixent les règles relatives à la construction de ces trois éléments. Les exigences qui ont prévalu à l'élaboration des normes sont de deux ordres: sécurité des usagers et capacité des infrastructures à écouler le trafic qu'elles supportent.

3.2.2 L'exigence de sécurité

Le déplacement d'un véhicule sur une route est, aujourd'hui, l'interaction de trois composantes:

- l'homme, qui à partir de la perception qu'il a des informations qui lui proviennent de son environnement, analyse et décide.
- l'automobile, structure mécanique, en liaison avec la chaussée par des pneumatiques, met directement en oeuvre les décisions prises par le chauffeur. Il y a plus de 10 ans, l'automobile ne disposait pas

d'intelligence permettant d'assister le chauffeur, cette situation a évolué aujourd'hui.

- l'environnement qui fournit une très grande quantité d'informations au chauffeur, et qui interagit avec l'automobile.

L'accident est alors conçu comme un dysfonctionnement rare de la relation entre ces trois types de composants. L'interaction entre l'homme et le véhicule concerne essentiellement le domaine de l'ergonomie. Les interactions entre l'homme et l'environnement et entre le véhicule et l'environnement concernent, pour ce qui nous intéressent, la conception de routes.

L'étude des contraintes dynamiques qui s'appliquent sur un véhicule, et du mode de fonctionnement du couple véhicule-infrastructure permet de fixer les limites des principales caractéristiques du réseau routier.

De plus, pour que l'automobiliste puisse adapter son comportement, il est indispensable qu'il dispose à temps des informations nécessaires: cette contrainte est la visibilité.

3.2.3 L'adéquation de l'infrastructure aux contraintes dynamiques

L'automobile est une structure soumise à un ensemble de forces distinctes:

- les forces naturelles

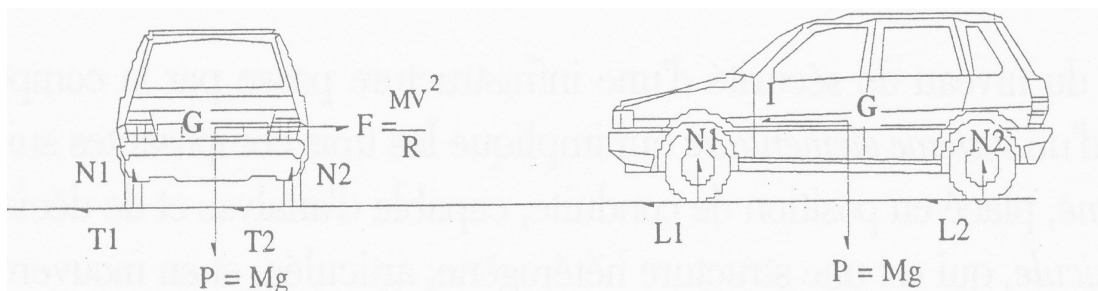
$p = Mg$ attraction terrestre qui accorde au contact sol-pneumatique, sa capacité de guidage et d'adhérence.

$F = \frac{MV^2}{R}$ la force centrifuge qui tend à faire sortir le véhicule de la bande de roulement dans les trajectoires circulaires.

- les forces internes au véhicule

$I = MG$ l'effort de traction ou de freinage pour susciter le mouvement ou l'arrêt du véhicule. Ainsi à l'instant t , le véhicule est caractérisé par sa force d'inertie MG .

- les forces de réaction à l'interface sol-pneumatique. Les composantes tangentielles de ces forces assurent et contrôlent le déplacement du véhicule.



La conception de la géométrie de la route doit être telle qu'elle n'entraîne pas, compte-tenu des performances des véhicules (vitesse, adhérence des pneumatiques, etc...) et de la qualité d'adhérence des revêtements, à une rupture de l'équilibre transversal en courbe, à des accélérations résiduelles ou à des variations d'accélération brutales préjudiciables à la sécurité et au confort des usagers.

La prise en compte de l'équilibre transversal du véhicule dans les normes de tracé en plan se définit à partir du déversement des chaussées, de la déformation, de l'élasticité et de la dérive du pneumatique, des conditions d'équilibre dans les courbes, du rayon de la courbe, de la progressivité de l'accélération transversale.

- 1 - Déversement des chaussées dans les courbes: la prise en compte de la pente de la chaussée est différente selon que le véhicule se déplace en trajectoire droite, en pente à gauche ou à droite.

Avec des valeurs de pente transversale δ sensiblement égale ou inférieure à 7 % (environ 0,07 radian) la valeur de la tangente et du sinus sont sensiblement égales à l'angle lorsqu'il est exprimé en radians.

. en alignement droit, la contrainte tangentielle est égale à: $Tr = Mg\delta$

. en virage à gauche, la contrainte tangentielle devient $Tr = Mg\delta + MV\leq/R$

. en virage à droite, la contrainte tangentielle devient $Tr = -Mg\delta + MV\leq/R$

Le déversement de la chaussée vers l'intérieur de la courbe a pour effet de faire jouer un rôle actif à la pesanteur, la composante du poids du véhicule parallèle au plan de la chaussée compense partiellement la force centrifuge.

La résultante des forces appliquées au centre de gravité du véhicule s'exprime en fonction de la masse et de la vitesse du véhicule, du rayon et du dévers de la route de cette manière:

$$Tr = -Mg\delta + MV\leq/R$$

ainsi $Tr = M (V\leq/R - g\delta)$ ou $\gamma_t = V\leq/R$ est l'accélération transversale

et $\gamma'_t = (V\leq/R - g\delta)$ est l'accélération transversale non reprise par le dévers de la route.

On pourrait ainsi envisager d'annuler complètement l'effet de la force centrifuge en augmentant le dévers de la chaussée. Ainsi à 140 km/h avec un rayon de 1000m, δ devrait être égale à 16%, cette valeur n'est pas admissible pour les véhicules se déplaçant lentement ou par période de verglas.

En limitant la valeur de la pente transversale, c'est la propriété du contact sol-pneumatique qui permet de mobiliser des réactions complémentaires. Il s'agit donc de la qualité des pneumatiques ainsi que de l'adhérence du revêtement (elle sera abordée dans le chapitre chaussée).

- 2 – Élasticité , déformation et dérive du pneumatique

Lorsqu'il est sollicité par un effort tangentiel à son plan de rotation, le pneumatique dérive:

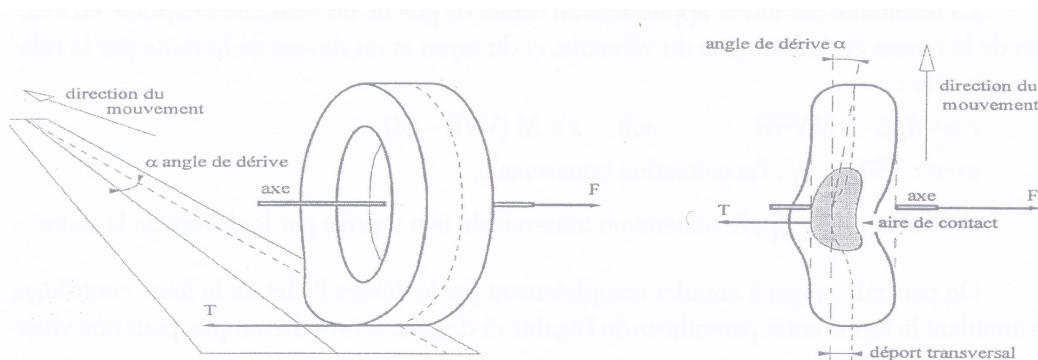
- pendant le mouvement de rotation, sous l'action de la force transversale F , la génératrice médiane du tore qui forme l'enveloppe, se déforme au passage dans l'aire de contact, cette déformation, faible à l'entrée dans l'aire de contact, s'amplifie vers l'arrière car le matériau élastique cède progressivement sous la poussée qu'il reçoit. Les déformations étant plus grandes à l'arrière de l'aire de contact, les réactions transversales élémentaires y sont donc plus fortes; la réaction totale ne passe plus sous le centre de la roue, mais en arrière.

- le pneu, en dérive, est soumis, en plus de la résultante des forces « statiques », à une torsion qui modifie l'oblicité de la surface de contact. Le pneumatique réagit à cette torsion, le couple (F, T) , appelé couple d'auto-alignement, tend à faire tourner le plan équatorial du tore dans le plan vertical de F .

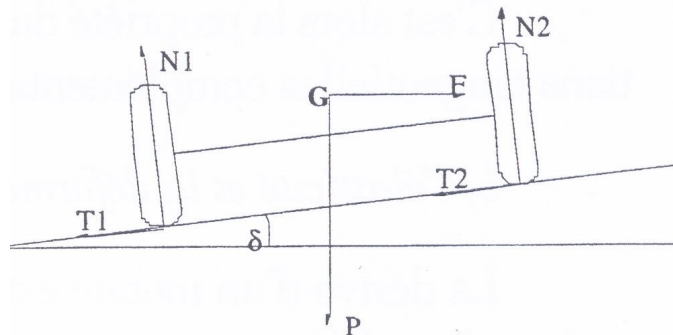
- si on veut maintenir la trajectoire du centre de l'aire de contact telle qu'elle existe en l'absence de force transversale, il faut exercer un couple d'axe vertical égal au couple d'auto-alignement et incliner le plan équatorial de la roue d'un angle α par rapport au plan vertical qui passe par la trajectoire fixée: tout comme un pilote met son avion en dérive pour maintenir son cap.

On peut écrire: $T = K \alpha N$

où α est l'angle de dérive du pneu, K le coefficient d'environnement, N est la charge instantanée de la roue, et T la sollicitation transversale.



On peut alors écrire cinq équations d'équilibre d'un essieu:



- équilibre vertical $N1 + N2 = P + \delta F$
- équilibre transversal $T1 + T2 = F - \delta P$
- non glissement de la roue de gauche $T1 = K \alpha N1$
- non glissement de la roue de droite $T2 = K \alpha N2$
- équilibre en rotation de l'essieu $(N2 - N1)Lde = (F - \delta P)h$
avec Lde = longueur du demi essieu et h hauteur du centre de gravité

A partir de ces équations nous pouvons établir la relation liant les caractéristiques de l'infrastructure

$$T1/N1 = T2/N2 = (T1 + T2)/(N1 + N2) = (F - \delta P)/(P + \delta P) = K\alpha$$

En remplaçant P par Mg et F par MV^2/R on obtient

$$(V^2/R - g\delta)/(g + \delta V^2/R) = K\alpha$$

$$\text{soit } (V^2/gR - \delta)/(1 + \delta V^2/gR) = K\alpha$$

On peut négliger $\delta V^2/gR$ par rapport à 1

$$\text{on obtient donc } V^2/gR - \delta = K\alpha$$

Pour obtenir la valeur du rayon de courbure

$$R = V^2 / g (\delta + K\alpha)$$

- 3 – Valeur du rayon minimum associé au dévers maximum

Nous avons vu précédemment que la relation $T = K \alpha N$ exprime la reprise des efforts transversaux par la déformation des pneumatiques. Il ne s'agit pas de concevoir de routes en prenant comme hypothèse l'équilibre aux limites du pneumatique.

Nous avons établi au paragraphe ci-dessus que $V^2/gR - \delta = K\alpha$

soit $gK\alpha = V^2/R - g\delta$ c'est à dire γ 't l'accélération transversale non reprise par le dévers de la route.

Dans les normes routières, $K\alpha$ correspond à l'accélération centrifuge non reprise par le dévers de la chaussée, exprimée en fraction de g .

Cours de route

Lorsque ce coefficient désigne la part de γ 't qui est admise par les usagers moyens, il est appelé $f(V)$ car il dépend de la vitesse.

La relation rayon-dévers-vitesse du paragraphe précédent devient:

$$R = V^2 / g (\delta + f(V)) \text{ avec } V \text{ en m.s}^{-1}$$

avec V exprimée en km / h, la formule devient:

$$R = V^2 / 127 (\delta + f(V))$$

Il devient alors possible de calculer, pour une vitesse donnée, la valeur du rayon correspondant. Ce rayon, calculé pour de valeurs des paramètres physico-psychologiques acceptables, est le rayon minimum pour la vitesse considérée.

V en km/h	40	60	80	100	120	140
<i>f(V) en fraction de g</i>	0,25	0,16	0,13	0,11	0,1	0,09
<i>dévers δ</i>	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
<i>Rayon minimum R_m</i>	40	120	240	425	665	1000

Les normes prévoient trois rayons minimum en plan:

- 1 – le rayon minimum

Il est calculé pour le dévers maximum. Les dévers maximum dépendent du type de route, et de sa catégorie au sein du type.

Pour les routes du type L (autoroutes):

Catégories	L80	L100	L120
<i>Dévers maxi</i>	7,00%	7,00%	7,00%
<i>Rayon mini</i>	240 m	425 m	665 m

Pour les autres routes type R ou T:

Catégories	R60	R80 ou T80	T100
<i>Dévers maxi</i>	7,00%	7,00%	7,00%
<i>Rayon mini</i>	120 m	240 m	425 m

- 2 – le rayon au dévers minimum

Il est calculé de la même manière que le rayon minimum, pour un dévers de 2,5%, et pour des vitesses plus élevées que les vitesses de référence.

Cours de route

Pour les routes du type L (autoroutes):

Catégories	L80	L100	L120
<i>Rayon au dévers mini</i>	650 m	900 m	400 m

Pour les autres routes type R ou T:

Catégories	R60	R80 ou T80	T100
<i>Rayon au dévers mini</i>	450 m	650 m	900 m

Les courbes dont le rayon est inférieur au rayon au dévers mini sont déversées vers l'intérieur du virage avec une pente transversale dont la valeur est fixée par interpolation linéaire en fonction de $1/R$ entre 2,5 % pour le rayon au dévers mini et 7% pour le rayon mini.

– 3 – le rayon non déversé

C'est le rayon au dessus duquel la chaussée n'a pas à être déversée dans le sens correspondant à la courbure du plan: la chaussée présente alors une ou plusieurs pentes transversales comme en section courante (le plus souvent 2,5% vers l'extérieur de la chaussée).

Pour les routes du type L (autoroutes):

Catégories	L80	L100	L120
<i>Rayon non déversé</i>	900 m	1300 m	1800 m

Pour les autres routes type R ou T:

Catégories	R60	R80 ou T80	T100
<i>Rayon non déversé</i>	600 m	900 m	1300 m

Les courbes dont le rayon est compris entre le rayon non déversé et le rayon au dévers mini sont déversées vers l'intérieur de la courbe avec une pente transversale de 2,5%.

Les tableaux suivants récapitulent les valeurs à donner aux dévers des routes principales.

Route de catégorie R60

<i>Valeur du rayon</i>	<i>Sens du dévers</i>	<i>valeur du dévers en %</i>
R = 120 m	intérieur	7,00%
120 m < R < 450 m	intérieur	$0,86 + 736,4 / R$
R = 450 m	intérieur	2,50%
450 m < R < 600 m	intérieur	2,50%
R > 600 m	en toit	2,50%

Route de catégorie R80 ou T80

<i>Valeur du rayon</i>	<i>Sens du dévers</i>	<i>valeur du dévers en %</i>
R = 240 m	intérieur	7,00%
240 m < R < 650 m	intérieur	$- 0,13 + 1712,2 / R$
R = 650 m	intérieur	2,50%
650 m < R < 900 m	intérieur	2,50%
R > 900 m	en toit	2,50%

Route de catégorie T100

<i>Valeur du rayon</i>	<i>Sens du dévers</i>	<i>valeur du dévers en %</i>
R = 425 m	intérieur	7,00%
425 m < R < 900 m	intérieur	$- 1,53 + 3623,7 / R$
R = 900 m	intérieur	2,50%
900 m < R < 1300 m	intérieur	2,50%
R > 1300 m	en toit	2,50%

Route en relief difficile (comportant des rayons inférieurs à ceux de R60)

<i>Valeur du rayon</i>	<i>Sens du dévers</i>	<i>valeur du dévers en %</i>
R > 40 m	intérieur	6,00%
40 m < R < 250 m	intérieur	$1,83 + 166,7 / R$
R = 250 m	intérieur	2,50%

Valeur du rayon	Sens du dévers	valeur du dévers en %
250 m < R < 400 m	intérieur	2,50%
R > 400 m	en toit	2,50%

3.2.4 Dimensionnement des raccordements avec introduction progressive de l'accélération transversale

Un modèle volontairement très simplifié soumettrait le véhicule quittant un alignement droit pour entrer sur une courbe circulaire adjacente à une variation instantanée d'accélération transversale:

$$y't = (V^2/R - g\delta)$$

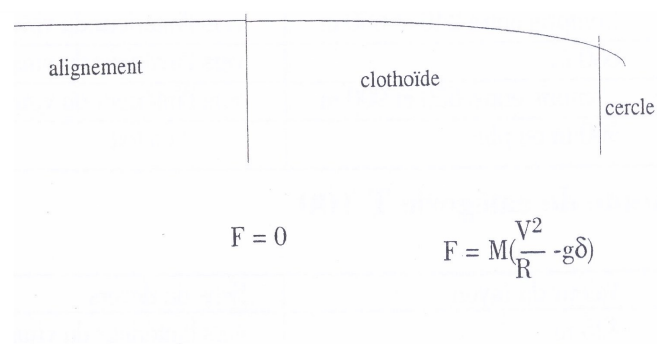
Dans les faits l'automobiliste utilise la largeur de sa voie de circulation pour négocier les virages. Il se définit ainsi une trajectoire à courbure progressive qui répartit sur une certaine longueur la variation d'accélération transversale.

Les normes prévoient des raccordements à courbure progressive qui s'intercalent entre des alignements droits et des courbes circulaires. Ainsi courbure et dévers sont introduits progressivement.

Le calcul des caractéristiques de ces raccordements à courbure progressive permet de respecter les conditions de stabilité du véhicule, et de confort dynamique des usagers. Ces conditions tendent à limiter la variation de sollicitation transversale des véhicules. Dans la pratique, ceci revient à fixer une limite à la variation d'accélération tolérée par seconde.

1 – Choix de la courbe de transition

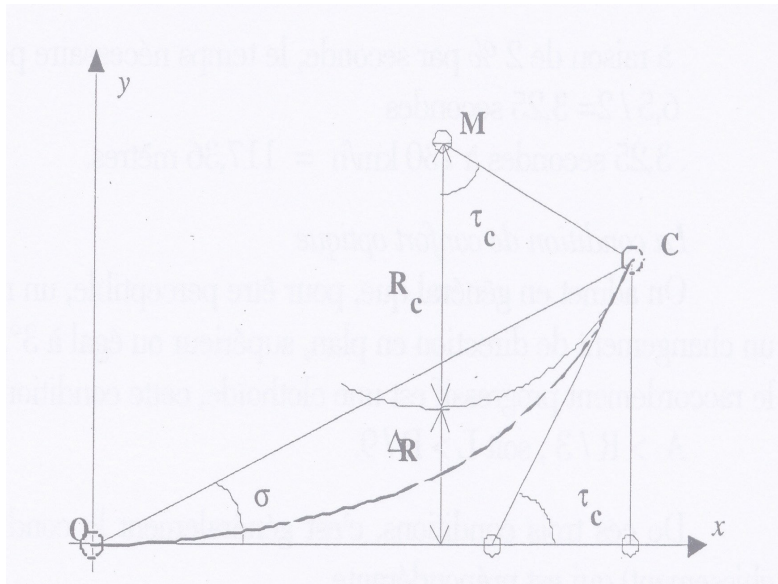
Parmi les courbes susceptibles de satisfaire à cette condition de variation continue du rayon de courbure, c'est la clothoïde qui a été retenue en matière de tracé routier.



Cette courbe est une spirale dont le produit, en chaque point du rayon de courbure par la longueur de l'axe (la développée), a une valeur constante égale à $A \leq$.

L'équation paramétrique de cette courbe est donc $A \leq R \times L$

A est appelé le paramètre de cette clothoïde.



$\tau_c = L / 2R$ ripage du cercle en direction du centre

$\Delta = L^2 / 24 R$

2- Longueur de ces raccordements

La longueur des raccordements progressifs est une combinaison de plusieurs conditions de natures différentes: parmi ces conditions les trois principales sont:

la condition de confort dynamique :

elle permet de limiter la variation de l'accélération transversale:

- pour les autoroutes à $g / 50$ par seconde quelque soit la vitesse
- pour les autres routes à $g / 0,20 V$ par seconde (avec V en km/h)

La longueur de raccordement progressif se calcule de la manière suivante:

$\Delta (y't) / t$ doit être inférieure ou égale à $g / 50$ (cas d'une autoroute par exemple) soit $(y't - y't_0) \leq gt / 50$

comme $y't_0$ est nulle au début du raccordement, en exprimant $y't$ on obtient:

$$V \leq \sqrt{R - g \delta} \leq \sqrt{gt / 50}$$

à la fin du raccordement : $t = L/V$ on a donc;

$$L \geq 50 V \sqrt{R - g \delta}$$

la condition de gauchissement de la chaussée :

Elle correspond à la limitation de la variation du dévers à 2% par seconde de parcours à la vitesse de référence de calcul de l'itinéraire.

Exemple: à 130 km/h, la longueur de la courbe de raccordement devant permettre de passer d'un dévers de -2,5% (pente transversale normale d'une chaussée en alignement, nécessaire pour l'évacuation de l'eau) à 4% (dévers dans une courbe de 1000 m, voir tableau ci-dessus) sera minimum de 117,36 mètres, calculée comme suit:

- variation totale du dévers: 6,5 %
- à raison de 2% par seconde, le temps nécessaire pour assimiler cette variation est:
 $6,5 / 2 = 3,25$ secondes
- 3,25 secondes à 130 km / h = 117, 36 mètres

la condition de confort optique

On admet en général que pour être perceptible, un raccordement doit correspondre à un changement de direction en plan, supérieur ou égal à 3° soit 1/20ème de radian. Comme le raccordement progressif est une clothoïde, cette condition peut s'écrire:
 $A > R / 3$, soit $L > R / 9$

De ces trois conditions, c'est généralement la seconde (condition de gauchissement) qui est prépondérante.

Finalement, on retient aujourd'hui, pour les autoroutes, la règle suivante:

$$L = \sup [R / 9 , 14 | \delta_1 - \delta_0 |]$$

avec L et R en mètre et δ en pourcentage

Par ailleurs il est important de limiter la longueur des clothoïdes pour permettre une meilleure perception de la courbure réelle des courbes en plan (rayon de la partie circulaire). C'est pour cette raison que le document « Aménagement des routes principales » donne des règles plus simples qui permettent de calculer la longueur des raccordements progressifs à appliquer aux routes principales non autoroutières. Le tableau suivant donne les longueurs de raccordement en fonction du nombre de voies:

Profil en travers	Longueur de clothoïde
routes à 2 voies	$L = 6 R^{0,4}$
route à 3 voies	$L = 9 R^{0,4}$
routes à 2 x 2 voies	$L = 12 R^{0,4}$

Ces valeurs peuvent être écrêtées sans inconvénient au niveau de 67 m (routes à 2 voies), 100 m (routes à 3 voies) ou 133 m (routes à deux chaussées de type R).

Règles d'enchaînement des éléments de tracé

Pour les routes neuves, le tracé en plan est constitué d'alignements droits, de courbes circulaires et de courbes de raccordement pour les courbes dont le rayon est inférieur à R_{nd} (clothoïde, dont la courbure varie linéairement).

Les courbes de raccordement ne peuvent être utilisées qu'en tant que raccordement entre un alignement droit et une courbe circulaire, ou entre deux courbes circulaires de sens opposés.

Deux courbes de même sens doivent être séparées par une longueur d'alignement droit (non compris les raccordements progressifs) au moins égale à la distance L parcourue pendant 3 secondes, à la vitesse V_{85} correspondant au plus grand des rayons des deux courbes.

Cette longueur L vaut 3 fois V_{85} avec V_{85} exprimée en mètres par seconde. et L exprimée en mètres. Pour simplifier on prend $L = 75\text{m}$, ce qui correspond à 3 secondes à 80 km / h.

3.3 Les thématiques de l'étude de tracé routier

3.3.1 Les études de trafic

La problématique qui est à la base des projets d'infrastructure routière est souvent liée à l'insuffisance de réseau existant, soit par défaut, soit par insuffisance. Il est alors nécessaire, pour bien cerner cette problématique, d'en préciser les contours, puis pour en dessiner les solutions, d'en quantifier précisément les composantes. C'est le champ des études de circulation.

Nous avons mesuré dans le chapitre précédent que les problématiques liées au transport touchaient en particulier au domaine de l'économie. Il est par contre difficile de se limiter à la seule rentabilité financière. Les infrastructures de transport, et en particulier les routes, doivent présenter une efficacité économique et sociale, au travers des avantages et des coûts sociaux des aménagements réalisés.

Les déplacements représentent une dimension de l'organisation sociale et du rapport entre l'homme et ses espaces de vie.

Il est donc nécessaire d'entreprendre une démarche systématique visant à la connaissance des trafics. Celle-ci commence par un recensement de l'état existant permettant:

- de hiérarchiser le réseau routier par rapport aux fonctions qu'il assure
- de mettre en évidence les difficultés dans l'écoulement des flux (avec leurs conséquences sur les activités humaines).

L'évolution des activités est, elle-même génératrice de trafic. Sa prévision et l'analyse de ses impacts sur les déplacements deviendront des paramètres sur l'organisation de l'urbanisme (PLU et SCOT).

Dans cette logique, l'étude de trafic est une donnée nécessaire aux réflexions sur le développement des infrastructures de transport. Elle impactera directement les caractéristiques des voies à créer ainsi que les caractéristiques des chaussées.

Dans ce registre on peut citer des choix possibles:

- nécessité ou non d'une déviation d'agglomération
- choix du tracé par rapport aux zones bâties
- position des échangeurs
- géométrie des carrefours
- dimensionnement des chaussées en fonction des trafics poids-lourds cumulés.

3.3.1.1 Vocabulaire

Dans le domaine de l'étude des trafics, il est nécessaire de fixer les définitions des termes couramment employés:

- trafic de transit: origine et destination en dehors de la zone étudiée (important pour décider de la nécessité d'une déviation)
- trafic d'échange: origine à l'intérieur de la zone étudiée et destination à l'extérieur de la zone d'échange et réciproquement (important pour définir les points d'échange)
- trafic local: trafic qui se déplace à l'intérieur de la zone étudiée.
- trafic moyen journalier annuel (T.M.J.A.) égal au trafic total de l'année divisé par 365.
- unité de véhicule particulier (U.V.P.) exprimé par jour ou par heure, on tient compte de l'impact plus important de certains véhicules, en particulier les poids lourds en leur affectant un coefficient multiplicateur de deux.
- les trafics aux heures de pointe, avec les heures de pointe du matin HPM, et les heures de pointe du soir HPS.
- le trafic journalier de fin de semaine
- le trafic journalier moyen d'été: important pour les régions estivales

3.3.1.2 Les capacités des différents types de voies

La capacité pratique est le débit horaire moyen à saturation. C'est le trafic horaire au delà duquel le plus petit incident risque d'entraîner la formation de bouchons.

La capacité dépend:

- des distances de sécurité (en milieu urbain ce facteur est favorable, il l'est beaucoup moins en rase campagne, où la densité de véhicules sera beaucoup plus faible)
- des conditions météorologiques
- des caractéristiques géométriques de la route

On peut définir le débit horaire moyen de pointe en fonction de l'historique annuel des trafics. Il apparaît ainsi qu'en classant par ordre décroissant les débits horaires sur une année, la courbe présente la forme d'une fonction du type $1/x$.

On considère que le débit correspondant au changement de pente correspond au débit de pointe normal, c'est à dire le débit maximum qui se reproduit périodiquement hors circonstances particulières (départ en vacances par exemple).

Le changement de pente de la courbe correspond généralement à une plage de données situées entre la 10ème et la 50ème heure, on choisit conventionnellement de prendre en compte la 30ème heure pour caractériser le débit horaire de pointe moyen et de le comparer à la capacité de la voie.

Le débit de la 30ème heure est utilisé pour le dimensionnement des gares de péage par exemple.

Capacités pratiques de route

Ces valeurs sont valables pour des sections en rase campagne, hors zones de carrefour et pour des régions relativement plates.

Type de voie	Seuil de gêne	Seuil de saturation
2 voies	8 500	15 000
3 voies	12 000	20 000
2 x 2 voies	25 000	45 000
2 x 3 voies	40 000	65 000

unité: UVP / jour

Si on raisonne sur les débits horaires les résultats sont les suivants pour une

route à une seule chaussée et à deux voies de 3,50 m.

Seuil	Trafic en UVP / H pour les 2 sens
Seuil de gêne	750
Seuil de circulation dense	1 100
Seuil de risque de congestion	2 000

3.3.1.4 La relation entre vitesse et débit

Il n'est possible d'établir une relation entre vitesse et débit, qu'en situation stable. Cet état n'existe que sur voie express ou sur autoroute.

Plusieurs études ont essayé de modéliser la relation entre ces deux données ¹⁹. Elles permettent de définir une fonction représentée par une ellipse. Si l'on place en abscisse le débit q et en ordonnée la vitesse praticable V . On constate ainsi qu'à un débit faible correspondent deux vitesses praticables très différentes: une élevée et l'autre faible. La concentration correspondante est alors inversement proportionnelle à la vitesse: plus la vitesse est élevée et plus la concentration est faible²⁰. La concentration au maximum de débit, proche de 2000 U.V.P. / heure est d'environ 30 véhicules par km et la vitesse moyenne de l'ordre de 60 km / h.

3.3.1.5 L'étude de circulation

Il est donc nécessaire de quantifier ces déplacements existants et à venir.

La première étape de ce type d'étude est le recensement de l'existant. Ce recensement permettra de hiérarchiser le réseau routier par rapport aux fonctions qu'il assure, et de mettre en évidence les difficultés dans l'écoulement du trafic et de ses conséquences sur l'activité humaine.

Dans le cas particulier de la route, l'étude de circulation s'appuiera essentiellement sur une étude de trafic. Cette étude permettra de définir le type d'aménagement à réaliser (nombre de voies, type d'échanges et aussi

¹⁹ <http://www.afitl.com/CST/Contenu%20des%20pr%C3%A9c%C3%A9dents%20num%C3%A9ros/N34/BERTHI34.PDF>

d'autres études de modélisation ont été utilisées pour des études acoustiques : <http://docinsa.insa-lyon.fr/these/2002/leclercq/chapitre3.pdf>

²⁰ Trafic routier: ondes cinématiques, ondes de choc, ondes de raréfaction : <http://www.f-vandenbrouck.org/trafic.html>

dimensionnement de la chaussée²¹).

L'étude de trafic s'attachera à la connaissance des trafics:

- de transit, lorsqu'il s'agira d'apprécier l'opportunité d'une déviation d'agglomération
- la nature des flux, pour déterminer les points d'échange
- le niveau des trafics et leur évolution pour programmer dans le temps les investissements
- les mouvements directionnels permettent de définir les caractéristiques des échanges.
- le niveau de trafic poids lourds déterminent directement le dimensionnement de la structure de chaussée.

Une étude de trafic se mène en général en cinq étapes:

- la définition du réseau
- l'analyse des trafics existants
- la détermination des conditions de circulation
- l'évaluation de l'évolution des trafics
- l'affectation des trafics

1 – La définition du réseau

Le réseau à étudier est constitué de l'ensemble des tronçons de route existants ou projetés pour lesquels l'une ou l'autre des solutions envisagées dans le cadre du projet est susceptible d'exercer une influence en terme de trafic.

On procède à l'inventaire des flux de trafic concernés, directement ou indirectement, et tout itinéraire susceptible d'être emprunté par l'un d'eux, fera partie du réseau.

Le découpage

On procède au découpage géographique en zones. Ces zones correspondent à des flux de déplacement. Leur détermination permet l'établissement de la matrice origine/destination. Une zone géographique correspond à un ensemble générateur ou récepteur de trafic homogène.

Les zones, issues du découpage, sont choisies de telle sorte que les usagers se rendant d'une zone à une autre, ont et auront le choix entre les mêmes itinéraires.

Plus on s'éloigne du projet, plus les zones seront étendues. Pour les zones extérieures à l'aire d'étude, on pourra, en général, les regrouper par entrées et sorties. Le découpage tiendra compte des spécificités des

²¹ ce point sera particulièrement abordé dans le cours de chaussée, en dimensionnement

générateurs ponctuels de trafic (écoles, zones industrielles, centres commerciaux ...).

Les zones sont donc identifiées pour leur rôle principal (habitat, activités économiques, commerciales, centre-ville, hypercentre ...)

Les caractéristiques du réseau

Tous les éléments composants le réseau et la zone d'étude sont relevés:

- les caractéristiques des voies concernées
- la visibilité sur chaque tronçon
- les caractéristiques du profil en long le cas échéant
- les limitations de vitesse
- les carrefours avec leur régime de priorité
- les points durs générateurs de ralentissement

La mesure des trafics

Cette mesure est réalisée par différents procédés complémentaires:

- comptages manuels
- comptages automatiques

Ces deux types permettent de mesurer le trafic sur un tronçon, en ce qui concerne les compteurs automatiques, les dispositifs ont maintenant la capacité de discriminer véhicules légers et poids lourds.

- les enquêtes de type cordon. Elle permet de distinguer les trafics de transit des trafics locaux, et les origines et destinations de chaque flux.
- les enquêtes qualitatives. Elles permettent de connaître l'appréciation de l'usager par rapport au réseau, les raisons de son déplacement
- les relevés de plaque minéralogique.

A l'issue de ces comptages, le trafic est modélisé. Le réseau routier constitue alors un graphe mathématique composé d'arcs (tronçons de voirie) et de sommets (les carrefours et les échangeurs). Une fois identifiés les itinéraires possibles, la phase la plus délicate est de déterminer l'itinéraire principal pour chaque échange entre zones. On estime pour se faire, que l'usager fait son choix de façon à minimiser le coût du trajet.

Chaque tronçon est évalué en terme de temps de parcours, qu'il s'agisse des zones internes au périmètre d'étude, ou entre les points d'entrée et de sortie de ce périmètre pour les trafics de transit.

2 – L'analyse des trafics existants

Une fois les trafics connus, on étudiera pour chaque tronçon les conséquences de l'augmentation de trafic sur les débits et sur les durées de parcours.

Sont évaluées ensuite les conséquences de solution d'aménagement, qu'il s'agisse de nouvelles infrastructures ou de développement de zones urbaines ou d'activités.

La difficulté réside dans la projection des trafics à l'échelle de 5, 10 15 ans ou plus. En effet, l'augmentation prévue est basée sur le modèle de développement actuel: prédominance des transports individuels pour les agglomérations de taille moyenne en milieu rural, prédominance du transport des marchandises par poids lourds.

De plus l'évolution locale du développement urbain est envisagée sur la base des hypothèses de réflexion prospective, traduites dans les documents d'urbanisme (SCOT, PLU). Cette évolution peut être bouleversée par des modifications du contexte économique liée à des créations ou, au contraire, à des fermetures d'activités économiques.

Il est donc important d'apprécier au stade de l'analyse des trafics existants, les facteurs d'influence et la marge de développement possible à l'intérieur de la zone étudiée. Il est aussi important de prendre en compte des facteurs externes pouvant impacter cette évolution (construction d'une autoroute, d'une ligne de chemin de fer à grande vitesse ...).

3 – La détermination des conditions de circulation

D'autres facteurs que les trafics sont à prendre en compte lors de l'étude de circulation, en particulier ce qui caractérise les conditions de circulation.

En effet la répartition des trafics sur différents itinéraires dépend des conditions de circulation. Cet aspect se traduit pour l'utilisateur en terme de confort (fluidité de circulation, sécurité ...) et en terme économique (temps de parcours, consommation ...). Il se traduit aussi pour la collectivité en terme économique (coût des accidents, consommation, pollution, temps perdu ...).

L'utilisateur prend en compte, consciemment ou inconsciemment trois éléments: la durée du trajet, la liberté de circulation, la sécurité.

La durée du trajet est un élément essentiel pour l'utilisateur, ainsi elle doit être mesurée pour chaque circuit possible. La régularité de ces durées doit aussi être mesurée (elle a aussi une incidence sur le comportement de l'utilisateur).

La liberté de circulation s'apprécie par l'évaluation du temps passé en peloton (véhicules passés en file l'un derrière l'autre). On distingue alors plusieurs seuils:

- le seuil de gêne notable (50 % du temps passé en peloton)
- le seuil de circulation dense (65% du temps passé en peloton)
- le seuil de risque de congestion (80 % du temps passé en peloton) des risques de congestion apparaissent

Il est alors très important de mesurer pour chaque parcours les temps d'attente à chaque carrefour, les longueurs de files d'attente et d'évaluer pour chaque scénario possible l'incidence de l'augmentation du trafic.

4 – L'évaluation de l'évolution des trafics

Le trafic sur l'ensemble du réseau routier français a doublé entre les années 1965 et 1985. Il a poursuivi une croissance très forte depuis.

La direction des routes du ministère de l'Equipement a lancé une étude sur les ménages pour déterminer les conditions de circulation à l'horizon 2015. Cette enquête a pris en compte le parc automobile des ménages, leur revenu moyen, le taux de motorisation, l'évolution prévisible du prix des carburants, la longueur du réseau autoroutier. Cette étude a conclu à l'augmentation continue du trafic jusqu'à cet horizon, sans saturation du parc. Une instruction ministérielle précise la méthode d'évaluation de l'effet de la construction d'infrastructure routière en rase campagne ²²

Hypothèses couramment retenues sur réseau routier principal

- 2,5 % linéaire jusqu'en 2010
- 1,25 % linéaire au delà de 2010

Hypothèses couramment retenues sur réseau autoroutier

- 3,5 % linéaire de 2000 à 2010
- 1,5 % au-delà de 2010

Ainsi en l'absence de donnée plus précises, il est admis sur le réseau principal d'utiliser la formule suivante pour déterminer le trafic à l'année n:

$$\text{trafic à l'année } n = \text{trafic à l'année } 0 \times 1,025^n$$

²² <http://www.route.equipement.gouv.fr/RoutesEnFrance/circulaire/ree/instruct.htm>

5 – L'affectation des trafics

Affecter le trafic entre 2 points consiste à répartir les courants de circulation sur les itinéraires parallèles (et concurrents entre ces deux points). Dans le cas d'itinéraires existants entre 2 villes par exemple, l'affectation permet de reconstituer la situation actuelle et de caler le modèle d'affectation utilisé.

Cette méthode est surtout efficace pour un tracé neuf doublant un ou plusieurs itinéraires existants. Elle offrira l'occasion d'évaluer l'intérêt de l'aménagement selon les variantes de tracé ainsi que les types et le nombre de raccordements avec le réseau routier existant.

En matière d'affectation, on se limite au seul mode de transport routier. La répartition entre les différents modes de transport fait l'objet d'autres règles et d'autres modèles.

L'affectation prend en compte une dimension économique: chaque itinéraire est évalué en terme de coût pour l'utilisateur. Une règle définit le lien entre coût et trafic:

$$T1 / T2 = (C1 / C2)^{10}$$

Ainsi, un faible écart sur les coûts de circulation se traduit par une forte répercussion sur les trafics. En fait, si l'écart de trafic est important, l'itinéraire le plus chargé risque de devenir le moins attractif au profit de l'itinéraire le moins chargé. Il y a lieu de suivre l'évolution des trafics de manière itérative. Le modèle s'équilibre à terme.

Cette modélisation est utilisée pour les études économiques liées à la construction d'une infrastructure routière.

3.3.2 Les études d'environnement

Le terme "environnement" est à prendre ici au sens large. Ce domaine rassemblera toutes les thématiques qui décrivent les lieux de vie des espèces animales et végétales.

Le code de l'environnement créé en 2000 a peu à peu défini des règles qui se sont imposées aux projets d'infrastructures routières. Ce code a rassemblé un ensemble de textes législatifs.

Réglementairement, la réalisation ou la modernisation d'une infrastructure dont le coût de projet est supérieur à 1,8 M€ doit faire l'objet d'une étude d'impact.

Pour réaliser cette étude d'impact, il faut aborder l'ensemble des thématiques directement liées à l'environnement (eau, air, faune, flore), mais aussi sur l'environnement de l'être humain. Le code de l'environnement a été récemment introduit l'obligation d'y ajouter l'évaluation de l'impact du projet sur la santé de l'homme.

Il sera alors nécessaire pour chaque thème étudié, de définir le périmètre pertinent. Les effets spatiaux sont différents en fonction du paramètre affecté. et des effets indirects en raison des relations fonctionnelles entre les divers compartiments du milieu.

Le périmètre des zones d'influence pourra être défini en fonction des conditions aux limites (unité biogéographique, ou bassin versant pour le milieu terrestre. Il peut aussi dépendre des relations fonctionnelles entre milieu.

Ainsi pour chaque périmètre seront définies les caractéristiques à l'origine, et les impacts du projet pour chaque solution envisagée.

La réalisation de ces études est confiée à des bureaux d'étude spécialisée qui rassemble en particulier des compétences avérées (qualifications universitaires) dans les domaines étudiés.

Le maître d'oeuvre du projet définit par contre le cahier des charges de ces études. Il doit donc disposer du minimum de compétences dans le domaine. A ce titre, il peut imposer les méthodes d'investigation à mettre en oeuvre. (inventaires biologiques ou listes de paramètres à évaluer, stations à mesurer, intervalles de temps entre les mesures, méthodes d'exploitation des données, forme de la présentation des résultats).

3.3.2.1 L'eau

La loi sur l'eau a renforcé les obligations des maîtres d'ouvrage en matière de précaution et de protection de cette ressource dont on mesure de plus en plus la valeur.

En ce qui concerne les infrastructures routières, les eaux de ruissellement se chargent d'apports provenant des gaz d'échappement, de l'usure des chaussées et des pièces des véhicules (plaquettes de frein, pneumatiques par exemple).

A titre d'exemple les apports annuels sur une route à deux voies supportant un trafic de 10 000 véhicules par jour s'élèvent à:

- matières en suspension: 200 à 1200 kg / km
- demande chimique en oxygène (DCO) 230 à 400 kg / km

- Plomb 0,9 à 1,3 kg / km²³
- Zinc 1,5 à 2,5 kg / km
- Hydrocarbures 5 kg / km

Il est ainsi nécessaire de prévoir des dispositifs permettant de récupérer les eaux superficielles provenant d'une plate-forme routière. L'importance qui sera donnée à ce thème dépendra bien sûr de la sensibilité du milieu récepteur. Les équipements à mettre en oeuvre seront très limités lorsque les sols seront imperméables, en dehors du lieu d'exutoire. A contrario, ils devront être sophistiqués pour des zones très perméables et situées au dessus d'une nappe d'eau souterraine. Il est ainsi d'en certains cas, nécessaire d'imperméabiliser totalement l'emprise de la route, y compris les accotements. Dans ce dernier cas il est même nécessaire de mettre en oeuvre des dispositifs empêchant le renversement des véhicules hors emprise (talus de terre par exemple).

Il est nécessaire de prendre en compte les contraintes d'exploitation de l'infrastructure. C'est la viabilité hivernale qui est la plus significative à ce stade. Les polluants sont dans le cas le plus général le chlorure de sodium, mais aussi le chlorure de calcium et le chlorure de magnésium. Ces derniers sont des fondants efficaces à des températures inférieures à -5°.

Autre donnée à prendre en compte, la pollution accidentelle. Elle est liée aux accidents. Les matières principalement incriminées dans ce cas sont les hydrocarbures. Ils ne sont pas miscibles dans l'eau, ils ont un pouvoir polluant très important. La protection contre ce genre de pollution est réalisée par des bassins séparateurs qui permettent d'isoler les hydrocarbures de l'eau, très souvent par des parois siphonnées.

3.3.2.2 Faune, flore

L'impact sur les milieux naturels doit être apprécié sur l'ensemble d'un biotope ou d'une zone écologique dès lors que l'équilibre de la flore et de la faune est menacé. Les zones sensibles sont de plus en plus délimitées et protégées par des classements réglementant les usages et les équipements réalisables à leur abord. Il s'agit des ZNIEFF²⁴, des ZICO²⁵ et maintenant des zones protégées dans le cadre de la directive européenne sur l'habitat des espèces naturelles²⁶.

Les zones humides, marais et berges, constituent des biotopes riches en flore et en faune, d'intérêt élevé et en régression. Ces zones sont

23 Ces chiffres ont été évalués lors d'une étude réalisée par le Setra en 1987, ces valeurs ont chuté pour le plomb avec la mise en vente des carburants sans plomb

24 ZNIEFF: zone naturelle d'intérêt écologique faunistique et floristique

25 ZICO: zone importante pour la conservation des oiseaux

26 Natura 2000

biologiquement très riches. De plus elles contribuent à l'absorption du gaz carbonique contenu dans l'air, leur production végétale est le premier élément de la chaîne alimentaire des insectes et des oiseaux.

L'étude portera aussi sur les couloirs de migration des animaux. Cet aspect sera étudié tant en ce qui concerne les dispositifs à mettre en oeuvre pour maintenir ces migrations (exemple de l'autoroute A4 dans le parc des Vosges) qu'en terme de sécurité pour les usagers de la route.

3.3.2.3 Impact sur la santé

Les contraintes de protection de la santé s'imposent maintenant aux projets routiers²⁷. Cette thématique doit être développée dans les études d'impact, et les mesures compensatoires ou préventives doivent être mises en oeuvre par le maître d'ouvrage.

Le volet santé de l'étude d'impact doit en particulier évaluer l'état initial en terme de mortalité et de morbidité sur une zone d'étude pertinente. Il doit ensuite évaluer l'incidence de l'aménagement sur ces données.

Ainsi des zones de passage pourront être totalement condamnées si des mesures de protection ne sont pas réalisables. Exemple extrême, le passage de la nationale 1 à Paris (passage totalement couvert).

3.3.2.4 Le bruit

La loi sur le bruit du 31 décembre 1992²⁸ et le décret d'application du 5 mai 1995 ont sérieusement modifié les réglementations précédentes. Ces textes ont en particulier pris en compte les bruits nocturnes et l'usage qui est fait des locaux.

Usage et nature des locaux	De 1983 à 1995	depuis 1995	
	Laeq de 8h à 20h	Laeq de 6h à 22h	Laeq de 22h à 6h
Établissement de santé	65 dBA	< 60 dBA	< 55 dBA
Établissement d'enseignement	65 dBA	< 60 dBA	
Logement en zone d'ambiance sonore modérée	65 dBA	< 60 dBA	< 55 dBA
Autres logements	65 dBA	< 65 dBA	< 60 dBA

²⁷ Circulaire du 17 février 1998 <http://aida.ineris.fr/textes/circulaires/text0113.htm>

²⁸ <http://aida.ineris.fr/textes/lois/text0276.htm>

L'unité de mesure du bruit ou niveau sonore, est le décibel A dBA, l'indice A signifie que les différentes fréquences présentes dans le signal sonore font l'objet d'une pondération. Le niveau sonore à un moment donné est insuffisant pour rendre compte de la nuisance sonore à laquelle peuvent être soumis les riverains d'une infrastructure de transport. Des indicateurs plus représentatifs ont été élaborés. Il s'agit des niveaux sonores équivalents pendant une certaine période (Leq(A) ou Laeq mesurés en dB(A).

L'évolution de la législation conduit à un recul d'environ 100 m de la source de bruit pour passer de l'isophone 65 dBA à l'isophone 60 dBA. Les études de bruit doivent désormais prendre en compte un certain nombre de nouveaux paramètres qui ont une grande influence sur la transmission du bruit, en particulier les conditions météorologiques.

La différence de bruit mesuré à 200m peut varier de 15 dBA suivant que les conditions sont favorables ou non. Les conditions les plus favorables ont lieu la nuit avec l'inversion des températures et par vent portant.

Le bruit routier provient du bruit des moteurs et de roulement.

La législation a aussi modifié les niveaux sonores maximum d'un véhicule.

	Niveau sonore maximum autorisé au passage d'un véhicule à 7,50 m (norme Iso R362)	
	Véhicules légers	Poids lourds
1972	82 dBA	91 dBA
à partir de 1989	77 dBA	84 dBA
depuis 1995	74 dBA	80 dBA

Les évolutions réglementaires et techniques ont permis de diminuer considérablement les bruits des moteurs. Le bruit lié au roulement est devenu la source principale émise par les véhicules en circulation pour des vitesses supérieures à 50 km/h et à partir de 70 km/h pour les PL.

Deux facteurs sont bien évidemment à l'origine de ce bruit: le revêtement routier et le pneumatique. Les progrès réalisés dans le domaine des enrobés a permis de diminuer ce bruit: particulièrement pour les enrobés à faible granulométrie (0/6).

Les moyens pour lutter contre le bruit dans un projet routier peuvent prendre plusieurs formes:

- réduction de la vitesse
- implantation de la voie par rapport aux zones bâties (niveau de bruit

moyen diminue de 3 dB chaque fois que la distance est doublée)

- construction de buttes de terre
- baisse du profil en long par rapport au terrain naturel
- murs anti-bruit
- isolation des bâtiments

3.3.3 Les études d'urbanisme

Les études d'urbanisme sont fondamentales pour l'étude d'une infrastructure de transport en zone agglomérée ou péri agglomérée.

Ces études mettront en évidence l'affectation des zones à l'intérieur du périmètre d'étude (zone d'activités économiques, zones commerciales, zones d'habitat en distinguant habitat collectif, habitat individuel densité de population ...). Il sera pris en compte les projets de développement inscrits dans les différents documents de planification comme les S.C.O.T., les P.L.U., les Z.A.C., mais aussi les projets de développement particuliers.

Les informations permettant d'alimenter la réflexion sont disponibles dans les mairies, les communautés d'agglomération ou de communes, les D.D.E., les chambres de commerce

Il sera alors nécessaire de définir les besoins d'échange de ces zones entre elles, mais aussi avec les communes, les régions voisines. Ces données alimenteront aussi les études de circulation. Elles permettront aussi de positionner les points d'échange et leur nature.

Comme nous l'avons indiqué pour les autres thématiques et dès que le projet sera défini, il sera aussi nécessaire d'étudier l'impact de l'infrastructure sur le développement des zones concernées.

3.3.4 Les études géotechniques

Ces études sont nécessaires pour mesurer dès l'avant projet sommaire, l'incidence des choix de profil en long et d'une manière générale du tracé en terme de coût.

Nous l'étudierons plus en détail dans le chapitre terrassement, la nature des matériaux sera déterminante pour les techniques à mettre en oeuvre pour réaliser les chaussées mais aussi les ouvrages d'art.

Il sera alors évalué le coût de réalisation des terrassements, ainsi que des traitements éventuels, de la nécessité de recourir aux matériaux d'apport ...

Il est aussi intégré à ce niveau d'étude la prise en compte des données

hydrogéologiques.

Le résultat de ces études sera pris en compte pour la comparaison des variantes.

3.3.5 Les études hydrauliques

Les études hydrauliques inventorient l'existence de cours d'eau et d'une manière générale des écoulements d'eau en surface.

Ces études détermineront ensuite l'incidence du projet sur ces écoulements et les équipements à prendre en compte pour maintenir ces écoulements.

Les obligations issues de la loi sur l'eau peuvent conduire à la modélisation de la zone d'étude impactée particulièrement lorsqu'il s'agit de cours d'eau.

Le modèle permettra de déterminer, lorsque l'infrastructure est construite dans le lit majeur d'un cours d'eau ou lorsque l'infrastructure peut modifier l'écoulement des eaux, la dimension des transparence hydraulique à maintenir.

A ce titre ces résultats dimensionneront la portée des ouvrages de franchissement des cours d'eau.

Ces études peuvent faire l'objet avec le projet d'enquête hydraulique au titre de la loi sur l'eau. Elles sont bien sur intégrées à l'étude d'impact.

3.3.6 Les études économiques

Nous l'avons abordé au chapitre sur les politiques de transport, il y a lieu d'apprécier la rentabilité des projets.

Les études économiques en la matière ne sont pas aisées. En effet, un projet routier, en dehors des autoroutes à péage, est réalisé en milieu ouvert. De plus, l'estimation des gains ne peut être réalisée que sur la base d'hypothèses. On ne peut en effet mesurer le gain pour chaque usager.

Les études économiques peuvent avoir aussi une autre portée. Elles permettent d'évaluer l'intérêt de phaser le projet. Ce phasage peut être réalisé de plusieurs manières:

- phasage longitudinal (réalisation par section)
- phasage transversal (réalisation en 2 voies en première phase et en 2 x 2voies en deuxième phase par exemple)

- phasage des couches de roulement (on réalise les couches de roulement avec des hypothèses de trafic à 5 ou dix ans à la place des 20 ou 30 ans, la chaussée est renforcée lorsque le trafic utilisé comme hypothèse de calcul est atteint.

Deux difficultés principales apparaissent dans ces études :

l'actualisation :

Si T est le taux d'actualisation, 1 €uro à l'année zéro vaut $(1+T)$ €uros à l'année 1 et $(1+T)^n$ €uros à l'année n.

Inversement, une somme S dépensée à l'année n , et calculée sans tenir compte de l'érosion monétaire, équivaut à $S / (1+T)^n$ à l'année zéro.

Cette quantité est appelée "valeur actuelle" de S à l'année 0 et $1 / (1+T)^n$ est le facteur d'actualisation.

La quantification et la conversion des avantages en termes monétaires .

Définitions

- Opération :

Ensemble des travaux aboutissant à la mise en service d'un aménagement donné.

- Séquence :

Succession dans un ordre donné, des différentes opérations coordonnées relatives à une même liaison en vue d'aboutir à un aménagement final.

- Bénéfice actualisé de l'opération :

Différence entre la somme des avantages annuels que procure l'opération actualisée à l'année de référence et le coût économique de cette opération actualisé lui aussi à l'année de référence.

$$B = \sum_{i=0}^n \frac{A_i}{(1+T)^i} - \sum_{i=0}^n \frac{E_i}{(1+T)^i} - I$$

avec I = Investissement à l'année 0 ; A = Avantages ; E = coût Economique

- Taux de rentabilité immédiate à une année donnée t

C'est le rapport entre les avantages procurés par l'opération à l'année t et le coût économique de l'opération

$$r_t = A_t / (I + \sum_{i=0}^{t-1} E_i / (1+T)^i)$$

Ce taux est généralement calculé à l'année de mise en service

- Taux de rentabilité interne

C'est le taux d'actualisation r qui rendrait nul le bénéfice actualisé de l'opération

$$\sum_{i=0}^T A_i / (1+r)^i - \sum_{i=0}^T E_i / (1+r)^i - I = 0$$

- Bénéfice actualisé d'une séquence :

C'est la somme des bénéfices actualisés des opérations que comporte cette séquence, en considérant

- que ces bénéfices actualisés sont calculés dans l'ordre de prévision de réalisation de la séquence ;
- que les opérations précédentes auront toutes été réalisées ;
- que l'opération considérée est la dernière.

Les coûts généralisés

Ils comprennent le coût moyen ressenti par l'utilisateur pour un trajet donné et le coût économique que cela représente pour la collectivité. Ces deux coûts sont en fait un amalgame de dépenses réelles et d'éléments non monétaires (carburant, entretien du véhicule, péages, risque d'accident, sécurité, temps passé,...)

Le calcul des avantages

Les avantages sont de deux sortes :

- *les avantages directs*, qui concernent principalement tous les usagers de la route : gain de temps, de confort, de sécurité et économie de fonctionnement des véhicules. Ils peuvent être mesurés en unités physiques (heures, nombre d'accidents, de morts de blessés, journées d'hospitalisation, carburants, ...)
- *les avantages indirects*, qui ne concernent pas directement les usagers de la route, mais la politique des transports et plus généralement, le développement économique national ou local et l'aménagement du territoire.

Le principe de base du calcul des avantages est d'attribuer à l'utilité d'un trajet une valeur égale au coût ressenti maximum que l'utilisateur serait prêt à subir pour effectuer ce trajet (l'utilité d'un trajet est en principe en relation avec l'utilité de l'activité humaine qu'il permet). Et donc exercer l'activité correspondante.

3.4 Les études de tracé

Nous avons vu précédemment que des normes et des principes définissent les règles à mettre en oeuvre pour étudier le tracé de l'infrastructure.

L'élaboration du tracé s'appuiera sur les études précédentes. Les données recueillies au cours des études d'environnement sous forme de contraintes.

Différentes considérations à prendre en compte

Autrefois, le tracé d'une route n'était arrêté qu'en fonction des normes de l'époque et de la topographie. Puis la recherche de l'équilibre des terres déblais remblais a été intégrée. Depuis la guerre 39-45, la qualité des sols est prise en compte. Puis le trafic, l'économie.

Aujourd'hui, c'est l'environnement : faune, flore, sources, forêts, esthétique, bruit.

Toutes ces **considérations** sont à prendre en compte **dès le début de l'étude**, ce qui conduit à travailler par **approches successives**, en **affinant les échelles** au fur et à mesure des dossiers, depuis l'inscription jusqu'au projet détaillé.

De ces éléments se dégagent 5 aspects essentiels :

- l'Aspect **Génie Civil** : c'est l'art du Volume ;
- l'Aspect **Fonctionnel** : art de la Surface ;
- l'Aspect **Économique** : art du Compromis ;
- l'Aspect **Environnement** : art de l'Ouverture ;
- l'Aspect **Politique** : art du Réalisme.

~ L'ASPECT GENIE CIVIL ou ART DU VOLUME

C'est **l'intégration dans** le milieu **NATUREL** d'un Volume **ARTIFICIEL** = la route. L'Art consiste à réaliser des **ouvrages équilibrés, stables** et dont la **pérennité** ne saurait être menacée par les éléments extérieurs ou les forces internes.

~ L'ASPECT FONCTIONNEL ou ART DE LA SURFACE

L'Art consiste à réaliser des **ouvrages** dont les caractéristiques géométriques et l'état de la surface **assureront l'écoulement du trafic** dans les meilleures conditions de **confort** et de **sécurité** pour les **personnes** et les **biens** transportés.

~ L'ASPECT ECONOMIQUE ou ART DU COMPROMIS

L'Art consiste à rechercher le **projet** ayant les **caractéristiques** les plus **larges** possibles en **grevant** le **moins** le **coût** - et en veillant à ce que la solution technique ne soit pas sacrifiée à la recherche absolue du moins coûteux.

~ L'ASPECT ENVIRONNEMENT ou ART DE L'OUVERTURE

En plus de l'usager, le **riverain** est pris **en considération**. L'Art consiste à prendre en compte l'**impact** de l'infrastructure **sur l'aménagement régional**, le **respect du cadre de vie**, **l'intégration au paysage**.

~ L'ASPECT POLITIQUE ou ART DU REALISME

L'Art consiste à **exposer** les **Avantages** et les **Inconvénients** des différentes solutions pour aider le décideur dans son choix. Le **réalisme** repose sur la nécessité de bien **signaler** les **inconvénients** les plus graves.

3.5 La comparaison des solutions possibles

3.5.1 L'analyse de la valeur²⁹

Ce mode d'analyse s'appuie sur l'analyse fonctionnelle du projet. On évalue la valeur financière de chacune des fonctions du projet pour chacune des variantes étudiées.

Cette méthode s'appuie sur une démarche participative et pluridisciplinaire. L'estimation financière des fonctions du projet peut alors être menée comme dans un calcul de rentabilité classique et être comparée au coût du projet.

²⁹ http://www.efii.com/ANFH/cadre/gmweb/cadre_GM_Analyse_valeur.htm

3.5.2 L'analyse multicritères

L'analyse multicritères permet de dépasser le cadre de la rentabilité économique pour essayer d'atteindre l'efficacité économique et sociale.

Dix critères, différents selon que les projets sont en rase campagne ou en milieu urbain, permettent d'obtenir une évaluation de cette efficacité.

Chaque critère est apprécié, de manière quantitative ou qualitative, selon une grille :

++	très favorable
+	favorable
	neutre
-	défavorable
--	très défavorable

En milieu urbain, les indicateurs de chaque critère sont évalués pour l'année de mise en service et vingt ans après. Les critères sont :

1. Continuité d'itinéraire
2. Amélioration du fonctionnement de l'agglomération
3. Sécurité
4. Satisfaction de l'usager
5. Environnement
6. Caractère exceptionnel de l'état initial
7. Emploi
8. Réduction de la dépendance énergétique
9. Aménagement du territoire et développement régional
10. Coûts

En rase campagne, les dix critères pour l'évaluation d'un projet sont analysés plus ponctuellement :

Critères	Points d'analyse
1. Développement économique et aménagement du territoire <ul style="list-style-type: none">• Développement économique :• Aménagement du territoire :	Nbre de communes et population Taux moyen des primes de l'Etat
2. Sécurité	Nbre d'accidents évités par an Nbre de tués évités par an Nbre de blessés graves évités/an
3. Avantages pour les usagers	<ul style="list-style-type: none">• Temps : heures gagnées et F.• Frais de fonctionnement

Cours de route

4. Environnement	Favorable, neutre, défavorable
5. Situation initiale exceptionnellement défavorable	Nbre d'encombrements Risques d'interruption du trafic Nbre de points noirs sécurité Nbre de points noirs bruit
6. Incidence sur les autres modes	Variation de recettes des modes concurrents
7. Emploi	Nbre d'emplois liés à l'investissement, l'entretien et l'exploitation
8. Energie	Bilan énergétique (T.E.P.) Rendement énergétique
9. Bilan financier pour la puissance publique	Coût économique d'investissement Coût économique global Variation des recettes fiscales
10. Bilan coût-avantages monétarisables	Avantages actualisés globaux Bénéfice propre Bénéfice actualisé Taux de rentabilité immédiate

Chapitre 4 – Les paramètres dimensionnant de la chaussée

4.1 Éléments de base de la géotechnique applicable aux terrassements

4.1.1 Rappels

Un sol est le produit de décomposition mécanique ou physico-chimique de roches. C'est le mélange d'une fraction granulaire plus ou moins importante et d'une fraction argileuse plus ou moins importante.

Un sol est composé de trois éléments différents:

- le gaz, contenu dans les vides entre les particules, est souvent de l'air lorsque le sol est sec ou un mélange d'air et de vapeur d'eau lorsque le sol est humide. Lorsque tous les vides sont remplis d'eau, le sol est saturé.
- l'eau, on distingue plusieurs catégories d'eau dans le sol. L'eau libre peut circuler entre les grains, l'eau adsorbée constitue un film autour de chaque grain. Elle joue le rôle de lubrifiant entre les grains. Nous détaillerons son rôle dans un paragraphe suivant.
- le squelette solide. Il est composé de particules issues de décomposition physique et chimique de roches mères. Les grains peuvent être de taille très fine ou être recristallisés. L'assemblage des différentes tailles de grains déterminera pour partie le comportement du sol.

Ce sol se déforme par glissement des particules qui le composent. Il résiste par frottement et/ou par attraction inter-particulaire (c'est la cohésion).

Ainsi l'action de terrasser consiste à manipuler des sols et à les utiliser comme matériaux.

4.1.2 Comportements des sols

Le comportement des sols varie en fonction de ses composants:

- 1 – Cas des sols régis par les fractions granulaires
 $0\% < Q \text{ matériaux inf à } 80\mu\text{m} < 12\%$

Ces matériaux résistent au cisaillement suivant la loi suivante:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg}(\phi)$$

avec σ = contrainte normale admissible

$\text{tg}(\phi)$ = coefficient de frottement interne

ϕ est fonction de la granularité, de la distribution granulaire et de la compacité. La pente des talus devra être inférieure à cette valeur. ϕ peut varier de 30 à 60°.

Ces matériaux sont plutôt perméables, en général non gélif, ils n'ont aucune résistance en traction, plus ou moins traficables, leur portance est élevée, ils sont plus ou moins érodables.

2 – Cas des sols régis par leur fraction argileuse

Q matériaux inf à 80 μm > 12%

Ces matériaux se caractérisent par leur cohésion. L'argile y joue le rôle de « ciment ». Leur résistance au cisaillement s'exprime ainsi:

$\tau = C + \sigma \text{tg}(\phi)$ avec C: valeur représentant la cohésion argileuse. ϕ peut varier de 0 à 20°.

C est fonction de l'état hydrique, de la compacité et de la nature minéralogique de l'argile. Cette nature minéralogique dépend de la roche mère à partir de laquelle l'argile s'est formée et de sa structure cristalline à l'origine. Elle se présente sous forme de feuillets ou plaquettes. Chaque feuillet résulte de la superposition de couches tétraédriques de silice et de couches octaédriques d'alumine.

C peut varier de quelques Pa à plusieurs Mpa.

La portance et la traficabilité de ces matériaux dépend de leur teneur en eau. Ils sont quasiment imperméables. Leur gélivité dépend de leur teneur en argile.

Ainsi très peu de sols se présentent sous la forme d'une seule fraction granulaire (grave alluvionnaire, argile des Flandres ...). La plupart sont des mélanges de deux fractions. Leur comportement est donc complexe.

Le but des essais d'identification est d'analyser la part relative des deux fractions pour préjuger du comportement du sol dans sa globalité. Il est parfois nécessaire de réaliser des essais de comportement.

4.1.3 Paramètres physiques caractéristiques des sols.

Les sols sont composés de grains solides, d'eau et d'air.
On distingue:

- la masse volumique des grains solides γ_s = masse grains / volume grains
- la masse volumique du sol humide γ = masse totale / volume total
- la masse volumique du sol sec γ_d = masse sol sec / volume total
- la porosité n = volume air + eau / volume total
- indice des vides e = volume air + eau / volume grains

- % des vides d'air n_a = volume d'air / volume total
- degré de saturation S_r = volume d'eau / volume air + eau
- teneur en eau pondérale w = volume d'eau / volume des grains
- teneur en eau volumique w_v = volume d'eau / volume totale

4.1.4 Essais d'identification des sols remaniés

Des essais caractérisent la nature des sols. La granulométrie est réalisée par analyse granulométrique par tamisage pour $D > 100 \mu\text{m}$ et par sédimentométrie pour $D < 100 \mu\text{m}$. La mesure d'argilosité est réalisée soit par la mesure des limites d'Atterberg³⁰, soit par la mesure de l'équivalent de sable³¹, soit par essai au bleu de méthylène³².

Des essais caractérisent l'état des matériaux. La mesure de la teneur en eau par comparaison avec des critères spécifiques au matériau permet de définir la quantité d'eau correspondant à la résistance maximum.

Des essais caractérisent le comportement du sol au compactage. On recourt le plus souvent à l'essai Proctor normal ou modifié.

Des essais déterminent le comportement mécanique du sol sous le trafic. Il s'agit de l'essai CBR³³ (immédiat et après immersion), de l'essai à la

³⁰ Les limites d'ATTERBERG : En fonction de la teneur en eau, un sol remanié se présente suivant des consistances variables pour lesquelles on peut distinguer quatre états : liquide, plastique, solide avec retrait et solide sans retrait.

En réalité, le sol passe graduellement d'un état à l'autre et les frontières respectives ne sont définies que conventionnellement par la limite d'ATTERBERG.

Les essais sont effectués sur la fraction du matériau passant au tamis 0.42mm.

Limite de liquidité WL, entre l'état liquide et l'état plastique

Limite de plasticité Wp, entre l'état plastique et l'état solide avec retrait

Limite de retrait Ws, teneur en eau juste suffisante pour remplir les vides du sol au moment où il atteint par séchage son volume minimal

Indice de plasticité Ip, différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité:

³¹ <http://lyc-du-batiment-saint-lambert.scola.ac-paris.fr/gendrones.htm>

³² Cet essai s'effectue sur la fraction granulométrique 0/5mm. Ce sont principalement les éléments inférieurs à 2mm qui contiennent la fraction argileuse. Cette fraction donne l'essentiel de la réaction au bleu de méthylène et donc quantifie la sensibilité du sol à l'eau. On prélève 30g de fraction 0/5mm sèche que l'on met à tremper dans 200ml d'eau déminéralisée. Attention le mélange est maintenue à l'aide de l'agitateur à ailette. Une fois cette procédure effectuée on passe au test de la tache. Ce test consiste à injecter, successivement des dosages précis de bleu de méthylène jusqu'à avoir saturation des particules d'argiles. L'avantage avec ce test est que l'instant de cette saturation peut être répété. Pour ce faire, on prélève une goutte de liquide dans le bécher contenant le sol imbibé de bleu ; cette goutte est, à l'aide de la baguette de verre déposée sur le papier filtre. On obtient un dépôt de diamètre compris entre 8 et 12mm. Suite à cela, 2 résultats sont possibles : La goutte centrale bleue est encerclée d'une zone incolore avec ce résultat le test est négatif. La goutte centrale bleue est encerclée d'une zone teintée de bleu plus claire, avec ce résultat, le test est positif.

³³ CBR Californian Bearing Ratio

plaque, de l'essai à la dynaplaque et de l'essai de déflexion sous jumelage.

Des essais caractérisent le comportement vis à vis des agressions mécaniques. Il s'agit principalement de la mesure de la fragmentabilité: essai micro-deval³⁴ et Los Angeles³⁵.

Des essais caractérisent le comportement vis à vis des agressions physico-chimiques. Il s'agit d'essai d'altérabilité.

Des essais caractérisent le comportement vis à vis du gel. Il s'agit en particulier de l'essai de gonflement au gel³⁶ et de l'essai de gélifraction.

Des essais caractérisent le comportement du sol vis à vis de l'eau. Il s'agit plus particulièrement de mesurer les phénomènes de circulation, d'emprisonnement de l'eau à l'intérieur du sol. L'essai de succion met en évidence cette caractéristique. Nous traiterons au paragraphe suivant l'incidence de l'eau dans les sols.

4.1.5 Comportements des sols et emploi en remblai et couche de forme

Les aspects à considérer systématiquement pour étudier les capacités de réemploi des sols sont les suivants:

- aptitude à la densification
- aptitude à supporter la circulation (caractéristique importante en phase de chantier)
- aptitude au traitement à la chaux ou au ciment
- caractère évolutif

D'autres aspects sont à considérer en fonction du contexte:

- la gélivité

34 Des fragments de roche cassée avec des arêtes vives sont enfermés dans un cylindre mis en rotation; les arêtes des fragments sont usées par frottements et chocs modérés. On pèse les fragments arrondis à la fin de l'essai. La perte de masse est proportionnelle à la fragilité de la roche.

35 Le principe est le même que l'essai Micro-Deval, mais on ajoute des boulets d'acier de 47 mm de diamètre; on tamise à la fin de l'essai. La taille du cylindre, le nombre de boulets, le nombre de tours/minute et la durée de l'essai sont normalisés.

36 Pour caractériser la sensibilité au gel des matériaux, ceux-ci peuvent être soumis à l'essai de gonflement (NF P 98-234-2). Représentatif du phénomène, il consiste à mesurer, à intervalle régulier, l'allongement d'une éprouvette cylindrique du sol à tester maintenue à une température négative sur sa face supérieure et mise à sa base au contact d'une eau distillée. L'essai de gonflement met en évidence la relation sensiblement linéaire reliant l'allongement de l'éprouvette ce que l'on désigne comme étant la quantité de gel transmise à cette dernière et dont la valeur est à chaque instant égale à la racine carrée du produit de la température négative maintenue en partie supérieure de l'éprouvette par le temps écoulé d'exposition au gel de celle-ci.

- l'érodabilité
- la capillarité

aptitude des sols à la densification:

Cette aptitude sera déterminée par la distribution pondérale des différentes particules (analyse granulométrique), par l'argilosité (Limites d'Atterberg et valeur au bleu), en fonction de l'angularité et en fonction de l'évolution de densité en fonction de la teneur en eau (essai Proctor). Ce dernier critère est le plus significatif.

aptitude des sols à supporter la circulation:

Cette aptitude est importante en phase chantier, elle est aussi déterminante pour la stabilité des plateformes. Elle se mesurera par la possibilité de niveler la partie supérieure des terrassements. Cette capacité au nivellement est déterminée par le Dmax et par la distribution pondérale des particules (analyse granulométrique). Elle se mesure aussi par la possibilité du sol à supporter des efforts tangentiels (analyse granulométrique, limites d'Atterberg ou valeur au bleu). La glissance de surface marquera la qualité du sol à supporter le trafic de chantier en sécurité, mais aussi sa capacité à « ancrer » les couches supérieures. Dernier aspect de cette aptitude: la sensibilité à l'eau. On mesurera l'évolution de la portance en fonction de la teneur en eau (mesure de l'indice de portance immédiat I.P.I.).

aptitude au traitement à la chaux, au ciment ou au liants routiers:

Cette aptitude devient de plus en plus importante, dans le cadre d'une meilleure utilisation des ressources naturelles et de l'économie des matériaux rares (matériaux alluvionnaires de lit mineur).

caractère évolutif:

Ce caractère prend deux dimensions différentes, pour l'utilisation en remblai ou en couche de forme. En remblai, il sera important de connaître le comportement du matériau sous les contraintes de mise en oeuvre et dans l'ouvrage en service (mesure de la masse volumique des blocs et essais de fragmentabilité), mais aussi le comportement du matériau sous des variations de régime hydrique. En utilisation en couche de forme, il sera nécessaire de connaître le comportement du matériau aux chocs et à l'attrition³⁷ en présence d'eau causés par la circulation des engins (essais Los-Angeles, Micro-Deval humide, essai de friabilité).

4.2 Rôles, caractéristiques et utilisation de la couche de forme

La couche de forme est une technique spécifiquement française. Utilisée par de nombreux pays, elle n'y est utilisée que pour opérer de

³⁷ attrition: production de particules fines par usure des matériaux

corrections géométriques de la partie supérieure des terrassements.

4.2.1 Définition

C'est une structure plus ou moins complexe qui sert à adapter les caractéristiques aléatoires et dispersées des matériaux de remblai ou de terrain naturel aux caractéristiques mécaniques, géométriques et thermiques requises pour optimiser les couches de chaussée.

4.2.2 Rôles de la couche de forme

La couche de forme facilite la traficabilité du chantier, elle protège ainsi l'arase terrassement en évitant qu'elle subisse des modifications physiques, qu'il s'agisse de sa géométrie ou de sa portance. Ces performances mécaniques ($EV2 > 50 \text{ Mpa}$ et $\text{déflexion} < 0,02$) facilitent la mise en oeuvre des couches de fondation et leur compactage.

Par sa plus grande facilité à maîtriser et à régler sa surface, elle permet de dimensionner plus précisément les couches de fondation et de chaussée.

A long terme, la couche de forme permet d'élever et d'homogénéiser la portance de la plateforme support de chaussée. Elle assure la protection contre le gel (et contre les effets des cycles gel/dégel) en écartant de la chaussée les matériaux sensibles à l'eau (matériaux de la partie supérieure des terrassements).³⁸

4.2.3 Conditions de réalisation d'une couche de forme

La couche de forme doit être composée de matériaux insensibles à l'eau et dont la composition granulométrique lui permet de conserver une traficabilité élevée ($D_{\max} < 80 \text{ mm}$, avec une courbe granulométrique continue pour éviter l'effet « balast »). Le dimensionnement de la couche de forme doit permettre de satisfaire son rôle à court terme, mais aussi à long terme pour sa prise en compte dans le dimensionnement des couches de chaussée.

Son épaisseur sera d'autant plus élevée que la portance de la partie supérieure des terrassements sera d'autant plus faible. Le guide pour les terrassements routiers préconise cependant des valeurs minimum de portance de l'arase supportant la couche de forme:

³⁸ Optimisation des plates formes support de chaussées autoroutières en fonction des conditions de chantier et du bilan technico-économique global (chaussées + couche de forme) - Yves GUERPILLON

<http://c.f.m.s2.free.fr/exposes041020/optimisationplateformesguerpillon.pdf>

- 35 Mpa pour des couches de forme traitées
- 15 à 20 Mpa pour les couches de forme non traitées.

A titre d'exemple, une chaussée de type TC5₃₀ (trafic de 6 millions de poids lourds en 30 ans) sera composée de:

- 36 cm de matériaux hydrocarbonés pour une plateforme de 50 Mpa
- 31 cm de matériaux hydrocarbonés pour une plateforme de 120 Mpa

La granularité sera optimisée: la fraction la plus fine (0/d) sera éliminée par criblage pour supprimer la sensibilité à l'eau, la fraction la plus importante, surtout si elle est grossière, sera concassée pour faciliter la mise en oeuvre et la traficabilité de cette couche de forme.

La teneur en eau sera maintenue par arrosage pendant la mise en oeuvre, pour obtenir une densité optimum et donc de bonnes performances mécaniques. Les caractéristiques du matériau utilisé pour élaborer la couche de forme peuvent être améliorées par correction:

- apport de liant hydraulique (chaux, ciment)
- correction granulaire
- les deux

Enfin la couche de forme peut être améliorée en surface par apport de matériaux extérieurs fins qui en faciliteront le réglage. Elle sera protégée par un enduit de cure.

4.3 L'eau et le gel dans les chaussées

4.3.1 L'eau et l'argile

L'importance de l'eau dans les sols est liée à la présence d'argile. Les argiles, comme nous l'avons indiqué ci-avant, forment des structures tétraèdres et octaèdres assemblées en feuillets. Selon la nature des composants, la distance des feuillets est plus ou moins importantes laissant une place plus ou moins importante en contact avec le milieu extérieur: c'est la surface spécifique du matériau.

Exemples: la Montmorillonite 600 m² / g
la kaolinite 20 m² / g

La sensibilité à l'eau en sera affectée d'autant.

La relation entre argile et eau est liée aux caractéristiques électriques de l'argile en surface:

La particule d'argile présente un déficit de charge à sa périphérie, la molécule d'eau présente elle une charge positive, elle répond en partie au déficit de la particule d'argile. Il existe une liaison très forte, de plusieurs dizaine de Mpa, appelée couche de Stern, dont la densité est de 1,5 très difficile à supprimer. Le bleu de méthylène, utilisé lors de l'essai VBS vient se caler aux alentours de la couche de Stern, il caractérise bien la surface spécifique.

La mesure de la teneur en eau n'affecte que très peu la couche de Gouy³⁹. Il existe une différence de potentiel entre la couche de Gouy et la couche de Stern. La pureté de l'eau joue un rôle important sur la valeur de cette d.d.p. : plus cette eau est minéralisée plus la d.d.p. est faible.

Cette organisation à l'échelle macroscopique interfère à une échelle plus grande de la manière suivante:

- l'argile perd peu d'eau par drainage gravitaire
- la perméabilité à l'eau est d'autant plus importante que le sol est saturé en eau.

4.3.2 Les mouvements d'eau dans le sol

La loi de Darcy⁴⁰ a défini que la vitesse de l'eau est proportionnelle au gradient hydraulique⁴¹. Les différences de perméabilité génèrent des phénomènes d'imperméabilité:

- si deux couches perméables présentent des perméabilités de même ordre, la couche de relative moindre perméabilité se comporte temporairement comme un matériau imperméable.

39 http://www.ulg.ac.be/urap/cours/argiles/Argiles-chap_4.pdf

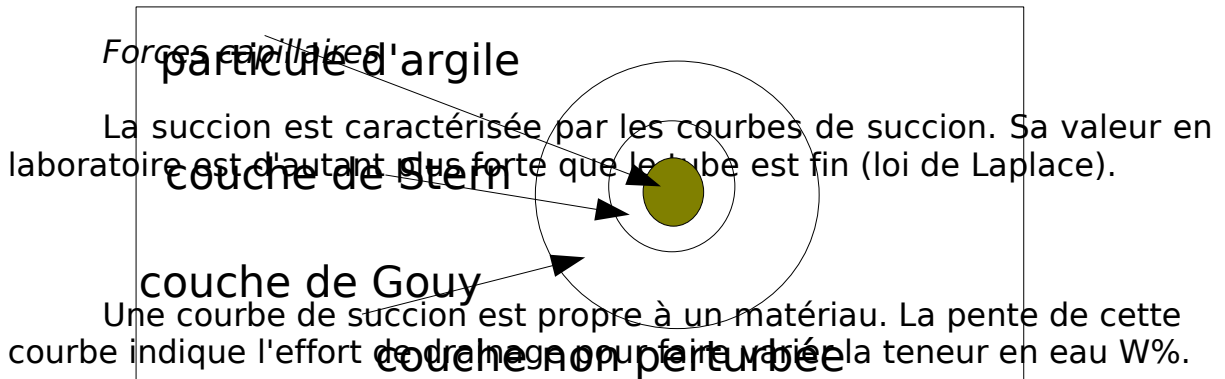
40 http://www.mines.inpl-nancy.fr/~fourar/enseignement/projets/Ecoulement_monophasique/rapport.htm

41 http://www.enpc.fr/cereve/HomePages/gaume/courshydro/fasc_51.pdf

- ces différences de perméabilité génèrent des circulations d'eau horizontale.

La succion

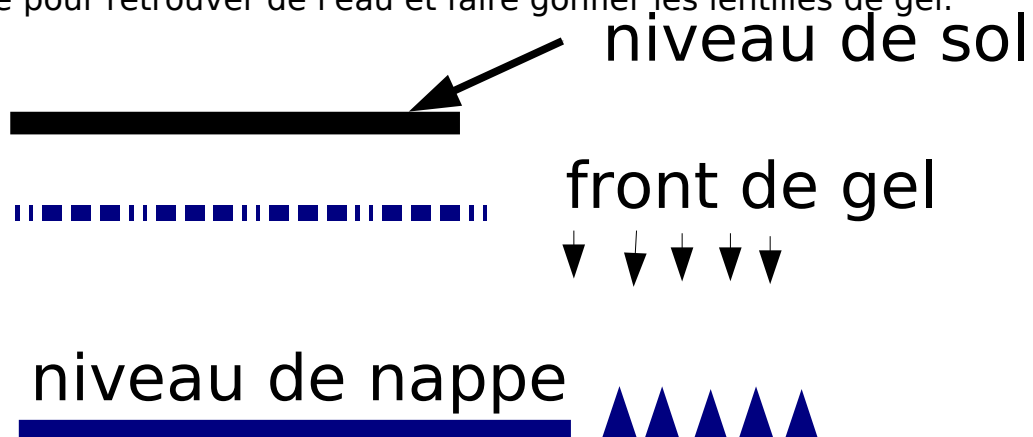
Une pression plus faible que celle de l'air qui s'exerce sur l'eau à l'intérieur des grains conduit à des mouvements de l'eau. Ce phénomène permet à l'eau de s'élever à une hauteur supérieure à celle de l'état naturel.



La détermination de la courbe de succion est réalisée dans une chambre à dépression.

4.3.3 Les effets du gel dans le sol

L'isotherme zéro reste stable dans le sol tant que les forces de succion font transiter de l'eau vers le front de gel. Cet isotherme descend ensuite pour retrouver de l'eau et faire gonfler les lentilles de gel.



4.3.4 Perméabilité et mouvements d'eau

Un sol totalement sec perd sa perméabilité. Le traitement du sol avec des liants hydrauliques modifie sa perméabilité. L'aération par une machine à disques ou par ripage augmente la perméabilité des sols, et facilite l'évaporation.

4.3.5 Applications aux chaussées

Le maximum de portance sera obtenu pour une plateforme avec la plus petite teneur en eau (ce qui n'indique pas que la teneur en eau doit être nulle). Il y a lieu d'interposer une couche drainante sous les couches de chaussées, si l'arase de terrassement risque de présenter une teneur en eau élevée (variation du niveau d'eau en zone de profil rasant et en terrain argileux par exemple).

La couche drainante exerce un rôle de château d'eau, si elle subit des effets de succion vis à vis du sol support (sol argileux). Il y a lieu de dimensionner la couche de forme pour supprimer les remontées capillaires dans la chaussée. On détermine la teneur en eau en fonction de la valeur donnée par l'essai Proctor. Après mesure on détermine la courbe de succion du matériau. On peut alors calculer l'épaisseur de la couche de forme pour éviter la remontée d'eau par capillarité.

Il est aussi important de veiller au drainage de l'arase terrassement, pour limiter les remontées d'eau dans les couches supérieures. Cette précaution est aussi bien valable dans les zones de déblai que dans les zones de remblai.

Dans le même registre, la pente transversale de l'arase terrassement sera soignée, pour des matériaux fins, sa valeur devra être égale à 4%. En remblai, l'interface entre matériau sera soignée pour toujours maintenir des pentes vers l'extérieur et ne pas bloquer de zones de rétention d'eau. Le « gras de talus » devra faire l'objet d'une attention particulière, il doit être réalisé avec des matériaux perméables.

Les fossés ont pour rôle d'assainir l'arase terrassement, leur côte de fil d'eau doit donc être inférieure à cet arase, si la profondeur des fossés est limitée par l'emprise de la route, les fonctions de recueil d'eau de surface et d'assainissement de l'arase doivent être séparées. On implante alors des drains routiers, recouverts de matériaux drainants en partie supérieure.

4. 4.4 Le guide technique des terrassements routiers

Le guide des terrassements routiers a pour but l'élaboration d'une classification des sols spécifique à leur emploi en remblai et en couche de forme. Cette classification prend en compte les conditions météorologiques.

La classification de ce guide répartit les matériaux en trois types:

- les sols
- les matériaux rocheux
- les sous produits industriels

Les sols sont classés en fonction de leur granularité.

- les sols dont le D_{max} est inférieur à 50 mm sont considérés comme sols fins et graveleux et sont notés A ou B
- les sols dont le D_{max} est supérieur à 50 mm sont considérés comme grossiers et blocailleux et sont notés C et D
- si la fraction de matériaux inférieurs à $80\ \mu m$ est supérieure à 35% les sols sont considérés comme fins et sont notés A
- si la fraction de matériaux inférieurs à $80\ \mu m$ est comprise entre 12% et 35% les sols sont considérés comme fins et sont notés B
- si la fraction de matériaux inférieurs à $80\ \mu m$ est inférieure à 12% les sols sont considérés comme granulaires et sont notés D et C1.

Les sols sont classés en fonction de leur argilosité.

Le seuil de plasticité est utilisé pour caractériser l'argilosité des sols. Son interprétation est d'autant plus fiable, que la proportion pondérale de la fraction $0 / 400\ \mu m$ (fraction utilisée pour l'essai) contenue dans le sol étudié est importante et que l'argilosité de cette fraction est grande.

Au delà d'une proportion de 50% de cette fraction et d'une valeur de 12, l'interprétation de l' I_p est simple, mais elle devient quasiment impossible lorsque cette proportion chute en dessous de 35 % et la valeur de l' I_p en dessous de 7.

La valeur de bleu de méthylène VBS permet de caractériser l'argilosité d'un sol. Ce paramètre représente la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et internes des particules de sol. C'est une grandeur liée à la surface spécifique du sol. On peut considérer que la valeur au bleu du sol exprime globalement la quantité et la qualité de l'argile contenue dans le sol. La VBS s'exprime en grammes de bleu pour 100g de sol.

Les sols sont classés en fonction de leur comportement mécanique.

Ces paramètres ne sont pris en considération que pour juger de l'utilisation possible des sols en couche de forme (résistance au trafic, fragmentation). Les paramètres de comportement considérés dans la classification sont le Los Angeles et Micro-Deval.

Seuils retenus:

- pour les valeurs de LA et MDE: 45
- pour la friabilité du sable: 60

Les paramètres d'état sont pris en compte:

Il s'agit essentiellement de l'état hydrique pour les sols meubles sensibles à l'eau. Cinq états ont ainsi été retenus:

- état très humide
- état humide
- état d'humidité moyenne
- état sec
- état très sec

L'état hydrique d'un sol est évalué en fonction de :

- la position de la teneur en eau naturelle de la fraction 0/20 par rapport à la teneur en eau de l'optimum Proctor.
- la position de la teneur en eau naturelle par rapport aux limites d'Atterberg qui s'exprime par l'indice de consistance I_c avec $I_c = (W - W_n) / I_p$
- l'indice portant immédiat (IPI) exprime la valeur de l'indice CBR immédiat mesuré sans surcharge, ni immersion sur une éprouvette de sol compacté à l'énergie normale et à sa teneur en eau naturelle. L'IPI est le paramètre à privilégier pour caractériser les états humide et très humide. Il traduit les difficultés de circulation des engins. Il n'a pas de signification pour les états secs et très secs.

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN REMBLAI

C₂A₂, C₂A₃ et C₂B₆ (états th, h, m, s et ts) - C₂B₁ et C₂B₃

Sol	Observations générales	Situation météorologique	Conditions d'utilisation en remblai	Code E G W T R C H
C ₂ A ₂ th C ₂ A ₃ th C ₂ B ₆ th	Soils normalement inutilisables en l'état L'argilosité des sols de ces classes ne permet pas d'espérer sur le climat français de pouvoir les reclasser en l'état (h) par un drainage préalable ou une mise en dépôt provisoire			NON
C ₂ A ₂ h C ₂ A ₃ h C ₂ B ₆ h	Le fort pourcentage de gros éléments anguleux présents dans ces sols leur procure en général une assez bonne stabilité qui permettra le plus souvent d'éviter de recourir au traitement à la chaux vive pour les mettre en œuvre. Le compactage et/ou la circulation des engins de transport devra être interrompue dès l'apparition du matelassage	+	pluie faible Situation ne permettant pas la mise en remblai avec des garanties de qualité suffisantes	NON
		=	ni pluie, ni évaporation importante C : compactage faible H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	0 0 0 0 0 3 2
		-	évaporation importante W : réduction de la teneur en eau par aération R : couches minces C : compactage moyen	0 0 1 0 2 2 0
C ₂ A ₂ m C ₂ A ₃ m C ₂ B ₆ m	Les sols de cette classe constituent des matériaux de choix pour la construction des remblais étant donné leurs caractéristiques mécaniques et leur facilité de mise en œuvre	++	pluie forte Situation ne permettant pas la mise en remblai avec des garanties de qualité suffisantes	NON
		+	pluie faible C : compactage moyen H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	0 0 0 0 0 2 2
		=	ni pluie, ni évaporation importante C : compactage moyen	0 0 0 0 0 2 0
		-	Solution 1 : utilisation en l'état C : compactage intense	0 0 0 0 0 1 0
			Solution 2 : maintien de l'état W : arrosage pour maintien de l'état C : compactage moyen	0 0 3 0 0 2 0
C ₂ A ₂ s C ₂ A ₃ s C ₂ B ₆ s	La faible teneur en eau de ces sols et leur fort pourcentage de gros éléments anguleux nécessitent d'avoir recours à un compactage intense si l'on veut les réutiliser dans l'état. L'humidification dans la masse pour changer l'état de ces sols est toujours une opération délicate : présence des blocs empêchant le malaxage intense du sol avec l'eau, argilosité importante imposant des délais d'imbibition longs (quelques heures à quelques jours) grandes quantités d'eau nécessaires	++	pluie forte Situation ne permettant pas la mise en remblai avec des garanties de qualité suffisantes	NON
		+	pluie faible E : extraction en couches C : compactage intense	1 0 0 0 1 1 0
		=	Solution 1 : utilisation en l'état C : compactage intense H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	0 0 0 0 0 1 2
			Solution 2 : humidification W : humidification pour changer l'état R : couches moyennes C : compactage intense	0 0 4 0 2 1 0
		-	Solution 1 : maintien de l'état W : arrosage pour maintien de l'état R : couches moyennes C : compactage intense H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	0 0 3 0 2 1 2
			Solution 2 : humidification W : humidification pour changer l'état R : couches moyennes C : compactage intense	0 0 4 0 2 1 0
C ₂ A ₂ ts C ₂ A ₃ ts C ₂ B ₆ ts	Soils normalement inutilisables en l'état L'humidification pour changer l'état de ces sols est en général trop difficile pour rester acceptable économiquement			NON
C ₂ B ₁ C ₂ B ₃	Le faible pourcentage de la fraction granulométrique inférieure à 80 μm présente dans ces sols les rend insensibles aux variations de situation météorologique	++ + = -	toutes situations météorologiques C : compactage moyen	0 0 0 0 0 2 0

Les conditions d'utilisation en remblai sont précisées dans la dernière colonne. Les sept rubriques sont représentées par une lettre:

- E pour l'extraction, avec les valeurs
 - 0 pas de condition à recommander
 - 1 extraction en couches (10 à 30 cm)
 - 2 extraction frontale pour $h > 1$ ou 2 m
- G action pour la granularité, avec les valeurs
 - 0 pas de condition à recommander
 - 1 élimination des éléments > 800 mm
 - 2 élimination des éléments > 250 mm pour traitement
 - 3 fragmentation complémentaire après extraction
- W action pour la teneur en eau
 - 0 pas de condition à recommander
 - 1 réduction de la teneur en eau par aération
 - 2 essorage par mise en dépôt provisoire
 - 3 arrosage pour maintien de l'état
 - 4 humidification pour changer l'état
- T traitement
 - 0 pas de condition à recommander
 - 1 traitement avec un additif ou un réactif adapté
 - 2 traitement à la chaux seule
- R réglage
 - 0 pas de condition à recommander
 - 1 couches minces 20 à 30 cm
 - 2 couches moyennes 30 à 50 cm
- C compactage
 - 1 compactage intense
 - 2 compactage moyen
 - 3 compactage faible
- H hauteur des remblais
 - 0 pas de condition à recommander
 - 1 remblai de hauteur faible ≤ 5 m
 - 2 remblai de hauteur moyenne ≤ 10 m

Le GTR détaille ensuite l'énergie de compactage à mettre en oeuvre en fonction du matériau, de son état et de l'objectif poursuivi. Cette énergie est exprimée sous la forme Q / S , ce qui se traduira directement sur le chantier par le nombre de passes à réaliser par le compacteur en fonction de sa puissance (voir le classement des compacteurs).

Le GTR explicite les conditions d'emploi des sols en couche de forme.

Le GTR classe les arases terrassements (AR) et les plates-forme (PF) en fonction de leur performance mécanique.

Chapitre 5 – La réalisation des terrassements

5.1 Les terrassements routiers organisation

Terrasser, c'est extraire

" " transporter

" " mettre en dépôt ou en remblai.

C'est un poste très important de la réalisation d'un chantier :

5.1.1 Des aléas fortement présents

En matière d'Ouvrages d'Art ou de Chaussées, la réalisation correspond en général aux prévisions. Il y a peu d'écart dans les dépenses.

En matière de terrassement, en revanche, les aléas sont plus sensibles. En effet la connaissance du contexte n'atteint pas un niveau de précision absolue. Les travaux sont parfois différents du projet. De plus les conditions météorologiques impactent directement les conditions de réalisation. Nous l'avons vu précédemment la variation de la teneur en eau modifie le comportement des matériaux fins.

C'est un poste important aussi par la part qu'il représente :

- pour faire 1 kilomètre d'autoroute, il y a entre 75 000 et 200 000 m³ de terrassement.

- dans le coût d'une autoroute, la part des terrassements varie entre 1/5 et 1/3.

C'est aussi au sujet des terrassements que les litiges entre Maîtres d'ouvrage et entreprises sont les plus nombreux et les plus importants.

5.1.2 Une règle fondamentale l'équilibre déblais - remblais

Autrefois, le terrassement était effectué manuellement et le transport par chariots à traction animale. Les projeteurs recherchaient donc le plus petit volume à terrasser et la distance la plus courte pour le transport. Les études cherchaient à faire "coller" le projet au terrain. Il paraissait intéressant d'équilibrer les déblais avec les remblais, c'est à dire d'avoir des volumes égaux.

Aujourd'hui, ces notions d'équilibre et de minimisation des transports restent valables, mais passent au second plan, après le tableau de correspondance. Les matériaux ne sont plus découverts au fur et à mesure de l'extraction.

Grâce aux études géologiques, aux sondages, la nature des sols est connue et utilisée judicieusement.

5.2 Le compactage



Afin que les matériaux mis en oeuvre supportent les charges routières, il est nécessaire d'en améliorer la résistance au cisaillement:

- en resserrant les grains solides les uns contre les autres
- en diminuant le Volume des Vides par expulsion de l'air, par le compactage.

La diminution des vides conduit à réduire les entrées d'eau ultérieures, dont nous avons vu les effets néfastes.

Elle réduit également les causes de l'attrition, et donc l'attrition.

5.2.1 Effets du compactage sur les sols grenus et sur les sols fins

5.2.1.1 Effets sur les sols grenus

Pour un sol grenu, le compactage, c'est à dire l'augmentation du poids volumique sec γ_d , améliore toutes les propriétés physiques. Par ailleurs, la teneur en eau n'a pratiquement aucune influence sur le compactage.

Pour l'indice de densité I_d est élevé, plus la résistance au cisaillement du sol est élevée et plus les déformations sont faibles.

Le compactage est facilité par des grains de forme arrondie et par une granulométrie étalée. Sur le chantier, on utilise généralement des rouleaux à pneus ou des engins vibrants.

5.2.1.2 Effets sur les sols fins

Le compactage des sols fins agit sur leur résistance au cisaillement et leur déformation, la compressibilité, la perméabilité.

A forte teneur en eau, le compactage n'a pratiquement aucune influence sur la résistance au cisaillement; par contre, à faible teneur en eau cette résistance augmente avec l'énergie de compactage.

Si l'on veut améliorer la résistance au cisaillement d'un sol fin, il y a donc intérêt à compacter à faible teneur en eau. Les résultats sont analogues si l'on s'intéresse aux déformations qui, dans une chaussée comme dans un remblai, ne doivent dépasser des valeurs limites.

Il en est de même pour la compressibilité. Le sol le plus compressible est celui dont la teneur en eau est la plus forte.

En ce qui concerne la perméabilité dans le sol compacté, celle ci est d'autant plus faible que la teneur en eau est élevée. Aux faibles teneurs en eau, les particules d'argile ont une structure flocculée, alors qu'aux fortes teneurs en eau, les particules sont plus orientées. Dans les travaux routiers, contrairement aux travaux de barrage, on recherche une forte perméabilité facilitant le drainage. On compacte donc les sols fins à l'état plutôt sec.

5.2.2 Les paramètres du compactage

Trois facteurs influent le compactage:

- les forces appliquées par le compacteur
- la capacité du sol à évacuer l'air
- la quantité d'eau contenue dans le sol.

Nous allons examiner ces 3 facteurs successivement :

Les forces appliquées par l'engin de compactage

plus les forces sont élevées, plus rapidement se fait le réarrangement des grains.

La capacité du sol à évacuer l'air :

- pour un sol granulaire, les vides sont jointifs, l'air n'a aucune difficulté à s'évacuer ;
- pour un sol argileux, en revanche, les vides sont microscopiques et l'air s'évacuera difficilement.

La quantité d'eau contenue dans le sol :

Elle réduit la résistance au cisaillement, c'est à dire qu'elle réduit la contrainte de cisaillement sur le plan de rupture. Il y a rupture, lorsque la contrainte de cisaillement ne dépend que de la contrainte normale agissant sur ce plan.

Considérons un sol fin. L'engin de compactage exerce une contrainte:

- si le sol est très drainant, il ne contient plus d'eau :

La pression intersticielle μ est égale à 0. Le compactage n'est pas complet.

- si le sol est peu drainant et contient un peu d'eau :

Les contraintes totales augmentent. La pression intersticielle favorise le compactage.

- si le sol est non drainant, ou peu drainant et contient beaucoup d'eau, ou si la contrainte du compacteur augmente, la pression intersticielle devient très élevée. L'air et l'eau ne pouvant s'échapper, ils repoussent le sol latéralement. C'est le "matelassage" (ou "coussin de caoutchouc").

5.2.3 Les engins de compactage

Les engins de compactage les plus utilisés sont classés en 3 catégories :

- les rouleaux à pneus,
- les rouleaux vibrants,
- les rouleaux à pieds dameurs.

Les rouleaux à pneus :

C'est la charge par roue qui conditionne l'efficacité en profondeur, la pression de contact conditionne l'efficacité superficielle.

Ils sont classés en 3 types :

P1 dont la charge par roue est de 2,5 à 4 T

P2 " " " " " " 4 à 6 T

P3 " " " " " " > 6 T

. Les rouleaux vibrants :

Les plus répandus, car polyvalents.

Le caractère vibrant donne une grande efficacité en profondeur, ainsi que pour les assises de chaussées à éléments très anguleux. Ils sont classés en fonction de la charge statique appliquée par unité de largeur de cylindre vibrant.

* V1	:	charge statique par unité de largeur compactée de 15 à 25 Kg/cm	
* V2	"	"	" de 25 à 35 Kg/cm
* V3	"	"	" de 35 à 45 Kg/cm
* V4	"	"	" > 45 Kg/cm

A l'intérieur de ces classes, il y a des sous-classes a, b, c, d en fonction des caractéristiques dynamiques de l'engin. Ils sont également classés en fonction de leur morphologie :

- rouleau vibrant MONOAXE TRACTE

1 seul cylindre vibrant

1 châssis avec un attelage à chaque extrémité

1 moteur pour la vibration.

Très efficace dans les remblais rocheux.

- rouleau vibrant MONOCYLINDRE AUTOMOBILE

1 seul cylindre vibrant, automoteur

1 seul moteur pour la traction et la vibration.

Très maniable et très confortable.

- rouleau vibrant TANDEM TRANSVERSAL

2 cylindres vibrants dans un même axe,

1 seul moteur pour la traction (assurée par les cylindres) et pour la vibration.

9/10 du poids sur les cylindres qui peuvent tourner à des vitesses différentes --> virages.

2 roues de stabilité.

- le rouleau vibrant TANDEM LONGITUDINAL

Les deux cylindres (1 ou 2 vibrants) sont parallèles ;

- le rouleau mixte CYLINDRE-PNEUS

Association d'un cylindre vibrant et d'un rouleau à pneus.

Surtout utilisé pour les graves-émulsion.

Les rouleaux à pieds dameurs :

Ce sont les descendants directs des rouleaux à pieds de moutons qui reproduisaient l'empreinte de ces animaux qui compactaient très bien les pistes en herbe des aérodromes de la 1ère moitié du siècle.

La surface du cylindre est garnie de plots en acier qui se dégagent en remontant sans arracher le sol.

Très adapté pour les sols fins plastiques.

Classés en deux catégories, en fonction de la charge statique par unité de largeur de cylindre : (- d° - rouleaux vibrants).

PD1 : charge moyenne de 30 à 60 Kg/cm

PD2 : " " > 60 Kg/cm

Autre engin utilisé pour le compactage : c'est l'arroseuse : sa capacité doit être en rapport avec le chantier.

5.3 La réalisation des déblais

L'exécution des déblais doit intégrer les contraintes propres à chaque phase de leur exécution:

- extraction
- préparation du chantier de remblai
- transport des matériaux

Les contraintes essentielles à prendre en compte sont la gestion de l'écoulement de l'eau et la réalisation des talus.

5.3.1 L'extraction

Celle-ci se réalise suivant les modalités du GTR qui pour un type de matériau donné: banc rocheux, sols meubles et compacts..., conseille un type d'extraction.

5.3.2 Préparation du chantier de remblai

Une fragmentation des bancs rocheux peut s'avérer nécessaire. Elle est réalisée par l'emploi éventuel du ripper, de l'explosif... et en achevant la fragmentation du remblai par l'utilisation d'un compacteur spécialisé (grid-roller ou rouleau à pointes ou encore kanding).

La maîtrise de la teneur en eau, en s'assurant de la sensibilité à l'eau des matériaux, en évitant les ornières ou cuvettes en aménageant des pentes suffisantes (10%) et en s'assurant qu'il existe un dispositif complet d'évacuation d'eau.

Dans les zones de forte pente, il peut être nécessaire de réaliser des redans qui permettront d'augmenter et d'assurer la stabilité des remblais, leur dimension et plus particulièrement le rapport hauteur sur largeur, dépendra des caractéristiques mécaniques des matériaux du sol de la zone support de remblai.

5.3.3 Transports des matériaux

Terrasser, c'est déplacer le sol et donc transporter. La phase du transport est donc importante et va conditionner le coût de l'opération.

Cours de route

Pour transporter, les engins retenus doivent présenter des caractéristiques adaptées aux cadences et aux distances:

- pour une distance comprise entre 0 et 50 m environ, on utilise le bulldozer. Les matériaux sont poussés par la lame.



- pour des distances comprises entre 50 m et 2000 m environ, on utilise très souvent le scraper (décapeuse) automoteur, bi-moteur fonctionnant seuls ou en duo (push-pull) ou avec l'aide d'un bulldozer. Les matériaux sont transportés dans la benne du scraper à vitesse moyenne (de 30 à 50 km/h). Pour obtenir un meilleur rendement, les pistes sont larges (10 m) et aménagées pour résister aux pressions engendrées par les essieux pesant plus de 50 tonnes.



- pour des distances comprises entre 2000 et 10000 m les scrapers cèdent le terrain aux tombereaux. Le chargement est réalisé à l'aide d'une pelle ou avec un gros chargeur à pneus. La piste sera encore plus soignée car la vitesse des tombereaux sera plus élevée (60km/h).



- pour des distances supérieures à 10 000 m , les camions routiers sont employés (6x4, semi-remorques ou double semi-remorques). La piste devient alors une véritable chaussée.
- la niveleuse est utilisée pour le fin réglage particulièrement pour les sols fins. Cet engin entretient de plus sans cesse les pistes de chantier.



5.3.4 Écoulement des eaux

L'écoulement d'eau sur un chantier de terrassement représente la difficulté à éviter. Il peut condamner l'activité du chantier. L'écoulement des eaux doit être pris en compte dans la préparation et tout au long du chantier.

L'écoulement des eaux trouve deux origines: les eaux superficielles liées aux intempéries et les eaux souterraines.

Si le terrain, avant exécution du déblai est parcouru par un écoulement souterrain ou par une nappe souterraine, les travaux peuvent être perturbés par l'écoulement des eaux. Les pistes deviendront rapidement impraticables.

Plusieurs solutions peuvent être mises en oeuvre, elles seront

adaptées à l'importance du problème:

- rabattre la nappe par tranchée drainante ou par pompage
- pose de drains horizontaux
- masque drainant: réalisé avec des matériaux écrêtés au D min, il assure à la fois le rôle de drain et de stabilisateur au remblai.
- réalisation de fossés, maintien de pentes transversales et entretien des pistes

5.3.5 Les talus

Les talus de remblais sont réalisés par apport excédentaire de matériaux. Ils ne sont supprimés par terrassement par une pelle hydraulique que lorsque les couches de remblai ont été parfaitement compactées.

Leur stabilité dépend de l'angle de frottement du matériaux qui les composent. Il est de plus nécessaire qu'ils présentent un aspect suffisamment grenus pour pouvoir supporter la terre végétale mise en oeuvre après leur réglage.

5.4 La réalisation des remblais

5.4.1 La préparation de la zone de remblai

Nous l'avons évoqué en partie dans les paragraphes précédents. La zone de remblai devra être au préalable débarrassée de tous les éléments qui ne sont pas minéraux:

- végétations (arbres, arbustes, cultures ...)
- terre végétale (elle sera mise en cordon ou en stock)
- constructions ou zones de chaussée si les épaisseurs de remblai sont faibles.

Elle sera éventuellement nivelée, des nappes géotextiles peuvent être implantées si la portance du sol est insuffisante. Ces matériaux ont pour effet de transformer en efforts transversaux les efforts nominaux liés au poids du remblai.

Dans les zones compressibles (tourbes par exemple), si l'épaisseur des matériaux compressibles est trop importante pour qu'ils soient purgés, des drains verticaux peuvent être mis en oeuvre. Un réseau de

drains horizontaux sera alors implanté sur la surface supérieure.

D'autres techniques peuvent être mises en oeuvre comme les colonnes ballastées. La technique s'apparente à celle des pieux: des colonnes par introduction d'une aiguille vibrante. Dans les sols fins, la vibration conduira à une liquéfaction et à une consolidation dans la zone d'action de l'aiguille. Dans les sols granulaires, le passage de l'aiguille laissera place à un cylindre qui sera comblé par des matériaux graveleux (à fort coefficient de frottement).

5.4.2 Les traitements du sol

L'impossibilité en l'état de réaliser des remblais avec des matériaux de déblai conduit à l'utilisation de matériaux d'apport. Cette démarche est coûteuse, d'une part au regard du prix de fourniture et du coût du transport. Les matériaux apparemment inaptes à leur réutilisation peuvent voir leurs caractéristiques modifiées permettant ainsi de les employer en remblai. Qu'il s'agisse de l'état hydrique ou de leur argilosité. Des liants offrent des possibilités d'amélioration des matériaux naturels.

5.4.2.1 Les liants utilisables

Deux types de liant peuvent être utilisés séparément ou simultanément pour modifier le comportement des sols il s'agit:

- de la chaux: la chaux modifie l'état hydrique du sol.
 $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$ + réaction exothermique . La chaux modifie les caractéristiques de la fraction argileuse. En modifiant les champs électriques autour de la particule d'argile par échange de cations, cette réaction chimique provoque la floculation du sol. A long terme, la chaux fait augmenter le Ph du mélange et conduit à la dissolution des silicates d'alumine contenus dans l'argile. La cristallisation est lente.
- des liants hydrauliques et pouzzolaniques: ils modifient faiblement l'état hydrique du sol. Par contre à moyen et long terme, ils conduisent à la formation de silicates et d'aluminates de calcium hydratés. Cette réaction favorisent l'agglomération des particules de sol par des liaisons cristallines. Le durcissement du mélange dépend de la nature et du dosage du liant, de l'état hydrique et de la compacité du mélange, du degré d'intimité du mélange, de la nature plus ou moins argileuse du sol, de la présence de certains composés chimiques (certains oxydes bloquent la réaction chimique à moyen terme et peuvent provoquer des réactions de gonflement).

5.4.2.2 Étude de formulation

L'étude de formulation doit permettre d'une part de vérifier la compatibilité du sol avec le produit de traitement envisagé, d'établir l'abaque teneur en eau / teneur en liant et d'identifier le produit de traitement.

Avant d'estimer la quantité de liant à utiliser, il est fondamental de vérifier la compatibilité chimique du liant avec le sol. La présence d'oxyde, même en très faible quantité dans le sol peut conduire à des réactions de gonflement à moyen terme (jusqu'à 90 jours). C'est la raison pour laquelle des études de compatibilité sont réalisées.

Paramètre considéré		Type de traitement	
		Traitement à la chaux seule	Traitement avec un liant hydraulique
Gonflement volumique	≤ 5	Apte	Apte
	$5 < Gv \leq 10$	Douteux	Douteux
	> 10	Inapte	Inapte
Résistance en compression diamétrale Rtb(MPa)	$\geq 0,2$	Paramètre non considéré pour ce type de traitement	Apte
	$0,1 \leq Rtb < 0,2$		Douteux
	$< 0,1$		Inapte

D'une manière empirique, les dosages de chaux varient de 2 à 6 %, les dosages en traitement mixte correspondent souvent à 4 à 5 % de chaux avec 1 à 2% de ciment.

Les liants hydrauliques ne sont pas utilisables à des températures inférieures à 0° (comme les bétons). Des liants routiers ont été mis au point (Lygex, Arc-Gs ...). Ils présentent de capacités, non validées par les fournisseurs à reprendre leur prise après de courtes périodes de froid.

5.4.2.3 Mise en oeuvre des traitements au liant

Les liants sont mis en oeuvre sur des surfaces de matériaux déjà réglées et en légère sur-épaisseur. Le liant est mis en oeuvre avec un épandeur. La prise en compte des conséquences dommageables des liants auprès des cultures, des zones humides, de la végétation et des hommes a conduit à disposer sur ces engins, de jupes qui permettent de limiter l'envol des produits autour de la zone traitée.



Après le passage de l'épandeur, un pulvimixer assure le mélange du liant avec le matériau à traiter sur une profondeur variable, en général de 20 à 30 cm. Certains modèles de pulvi mixer peuvent atteindre 40 cm de profondeur.



Il y a lieu de tarer dès le début du chantier la densité de liant au m^2 . A cet effet une bâche d'un mètre carré est étendue au sol, il suffit de peser la quantité de liant qu'elle contient après le passage de l'épandeur.

La réussite du traitement est liée à la teneur en eau du mélange. Elle doit bien évidemment être conforme à l'étude. Ainsi, le jour du traitement cette teneur en eau est mesurée sur place et corrigée si nécessaire par une arroseuse. De nouveaux types de matériel permettent d'apporter de l'eau à l'intérieur même du matériau, sur toute la profondeur à traiter. Des rampes d'arrosage sont fixées sur des socles qui pénètrent dans le sol.

La zone traitée est alors réglée à la niveleuse et compactée au nouvel optimum calculé avec le GTR.

L'efficacité du traitement est mesurée à l'échéance de la prise, par une mesure de déflexions et de portance.

5.5 Les contrôles

Les contrôles réalisés sur un chantier de terrassement sont de plusieurs natures:

- géométriques, c'est la vérification que l'ouvrage exécuté est conforme aux prescriptions du maître d'ouvrage. Ce point est important, car tant les côtes altimétriques que de tracé ont été déterminées, comme nous l'avons vu dans le chapitre des études, pour prendre en compte des contraintes fortes.
- mécaniques: il y a lieu de vérifier que la plate-forme livrée, ainsi que la couche de forme présentent des performances mécaniques conformes au cahier des charges et surtout aux hypothèses qui ont été prises pour le calcul de la chaussée à supporter. Les contrôles sont réalisés par le maître d'oeuvre. Il s'agit essentiellement de mesures de déflexion, et de portance.

On parle souvent de rapport $EV2/EV1 < 2$ et de déflexion.

Chapitre 6 – Les chaussées

6.1 Les composantes d'une chaussée

Les chaussées sont assimilables à une structure multi-couches. Elles sont mises en oeuvre sur une plateforme support, en général surmontée d'une couche de forme.

Nous l'avons mesuré dans le chapitre précédent, la couche de forme a plusieurs rôles : protection du sol support, homogénéisation et amélioration des caractéristiques et des performances de la plate-forme support, traficabilité des pistes de chantier pour la construction des chaussées.

L'assise de la chaussée peut être composée de 2 couches :

- la couche de fondation,
- surmontée de la couche de base.

Elle apporte à la chaussée la résistance aux couches verticales et répartit les pressions sur la plateforme support.

Enfin la couche de surface est constituée de :

- la couche de roulement supportant les agressions du trafic et des variations climatiques
- la couche de liaison entre la couche de roulement et les couches d'assise

6.2 Modes d'endommagement des chaussées

Les chaussées subissent les agressions combinées des efforts mécaniques et des variations de climat. Les dégradations les plus couramment rencontrées sont :

sur la couche de roulement :

- usure due aux efforts tangentiels exercées par les charges roulantes
- orniérage par fluage (conditions extrêmes de température et trafic)
- fissuration de fatigue par manque d'adhérence de la couche de surface sur l'assise
- fissuration par remontée des fissures de la couche d'assise
- fissuration par fatigue thermique suite à un vieillissement du bitume

sur les couches d'assise traitées :

- fissuration de fatigue due à la répétition des efforts de traction par flexion
- fissuration de prise et de retrait thermique des graves traitées aux liants hydrauliques
- fissuration due au gradient thermique des dalles de béton
- pompage et décalage de dalle dans les couches présentant des fissures de retrait ou de joint

sur les couches d'assise non liée et support de chaussée :

- déformation permanente de la structure due au cumul de déformation plastique.

6.3 Les familles de structure de chaussée et leur fonctionnement

- **les chaussées souples** : couche de matériaux bitumineux inférieure à 15 cm, parfois limitée à un enduit, sur une assise composée d'une ou de plusieurs couches de matériaux granulaires non traitées (épaisseur de 30 à 60 cm). Les sollicitations dues au trafic se répercutent sur les couches d'assise avec une faible dispersion horizontale. Les efforts conduisent à la déformation de la couche d'assise non liée et à celle de la couche de roulement. Les conditions d'environnement pèsent sur l'intensité des déformations, en effet les variations hydriques d'assises mal drainées favorisent le gonflement en période humide et les fissures de retrait en période sèche.
- **les chaussées bitumineuses épaisses** : couche de roulement bitumineuse sur des couches de chaussée composées de matériaux traités aux liants hydrocarbonés. L'épaisseur des couches facilite la diffusion des efforts verticaux en les atténuant dans les couches d'assise. Les efforts de traction-flexion sont repris dans les couches d'assise liées. Le collage des couches y est très important, en effet il permet la transmission des efforts et les allongements maximaux à la base des couches les plus profondes de la chaussée. Une absence ou un mauvais collage des couches conduit à une sollicitation de chacune de celles-ci en traction et à une usure très prématurée de la chaussée.
- **les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques** : assise traitée aux liants hydrauliques de 20 à 50 cm avec une couche de roulement en matériaux hydrocarbonés, ces chaussées sont qualifiées de semi-rigide. La grande rigidité des couches d'assise traitée limite les contraintes transmises aux couches de chaussée, elles sont par contre soumises à des contraintes de traction-flexion déterminantes pour leur dimensionnement.
- **les chaussées à structure mixte** : couche de roulement et couche de base en matériaux hydrocarbonés (10 à 20 cm), couche de fondation traitée aux liants hydrauliques (20 à 40 cm). La couche de matériau traité aux liants hydrauliques placée en fondation, diffuse et atténue, du fait de sa raideur élevée, les efforts transmis au sol support. Elle constitue un support de faible déformabilité pour les couches supérieures de matériaux bitumineux. La faiblesse de ces structures tient dans la sensibilité des interfaces aux dilatations différentielles, les couches peuvent alors se décoller et les couches supérieures supporter des contraintes qui produisent leur destruction.
- **les chaussées à structure inverse** : couche de matériaux bitumineux (environ 15 cm) sur une couche de matériaux granulaires non traités

(d'environ 12 cm) reposant sur une couche de matériaux traités aux liants hydrauliques (épaisseur totale de la structure 60 à 80 cm). La couche intermédiaire en matériaux granulaires non traités est relativement déformable dans le sens horizontal, elle a pour fonction de limiter les fissures. Ces structures se déforment dans le temps par des orniérages limités et des fissures transversales de fatigue. La mise en oeuvre est plus sensible aux imperfections que celles pourvues de couche collées, elles sont particulièrement sensibles à l'eau. En effet, la circulation de l'eau dans la couche intermédiaire conduit rapidement à la ruine des couches supérieures.

- **les chaussées à béton de ciment** : ces structures comportent une couche de béton de 15 à 40 cm, éventuellement recouverte d'une couche d'enrobés mince. La couche de béton peut être continue avec un renforcement longitudinal (béton armé continu) ou discontinue avec ou sans éléments de liaison aux joints. Au regard du module d'élasticité élevé du béton armé, les sollicitations déterminantes sont celles de traction par flexion dans la dalle. Ces structures sont sensibles à la fissuration produite essentiellement par retrait. Elles supportent mal les conséquences de l'évolution des points d'appui aux angles et au droit des fissures qui produisent, à terme, des effets de pompage. La dalle se déséquilibre et bouge au passage du trafic, ce qui amplifie le phénomène.

6.4 – Dimensionnement - quelques principes

La France a fait un choix résolument déterminé de méthode de dimensionnement au sortir de l'hiver 1962-1963 particulièrement rigoureux et qui avait mis à mal le réseau routier. Avant les années 1960, les structures de chaussées avaient peu évolué alors que le trafic poids lourds était en plein développement.

La méthode de calcul a pris en compte l'évolution des techniques et les capacités d'auscultation des chaussées, la « standardisation » des matériaux, la maîtrise de leurs caractéristiques et le travail sur les outils de calcul.

Un premier catalogue des structures mi-empirique, mi-calculé est publié en 1971, le catalogue entièrement calculé paraît en 1977.

6.4.1 Les étapes de dimensionnement d'une chaussée

La 1ère étape : vérification mécanique

On vérifie à ce stade, qu'une structure mécanique retenue sur la base de matériaux, de type et d'épaisseur permet le passage d'un trafic cumulé de poids lourds pour une durée et pour un sol donnés.

Les données :

- trafic poids lourds cumulé avec l'essieu de référence à 13T
- caractérisation élastique linéaire des matériaux
- fissuration par fatigue si matériau lié, déformation permanente si matériau non lié
- choix d'un risque de ruine total avant le terme de la durée de calcul

La 2ème étape : vérification au gel/dégel

On vérifie à ce stade que la structure déterminée ci-avant peut résister à des dégels successifs sans désordres majeurs. On procède alors par ajustement de la couche de forme ou de la structure.

Méthode :

Caractérisation de la conductivité gelée et non gelée des matériaux
Vérification de la gélivité du sol en place
Application de la méthode de Fourier

6.4.2 Les limites du modèle

Le modèle s'appuie sur plusieurs principes théoriques :

1- les couches de matériaux sont linéaires, élastiques et isotropes : en réalité la plupart des matériaux n'ont pas un comportement élastique linéaire sous des charges roulantes et ceci pour plusieurs raisons :

- les matériaux et sols non traités ont un comportement élastique non linéaire voir plastique
- les matériaux bitumineux ont un comportement élastique variable en fonction de la température
- seuls les matériaux traités aux liants hydrauliques ont un comportement sensiblement conforme au modèle

La conséquence principale est une mauvaise prise en compte des phénomènes d'orniérage des couches de surface, de la déformation permanente des couches non liées,

2 – Les interfaces entre couches, le modèle les considère comme collées ou glissantes : ainsi il y a une mauvaise prise en compte des mécanismes de décollement d'une interface, du phénomène de soulèvement d'une dalle rigide sous gradient thermique.

3 – Le modèle considère que les couches sont infinies en plan : les structures rigides et semi-rigides présentent des discontinuités (fissures, joints)

déterminantes sur leur comportement (augmentation ponctuelles de contraintes). Ainsi le modèle prend mal en compte les structures discontinues, la prise en compte de l'apparition et de la propagation des fissures.

6.4.3 Les outils de dimensionnement des chaussées

La méthode de dimensionnement est décrite dans le guide technique de conception et dimensionnement des structures de chaussée éditée par le SETRA et le LCPC.

Le catalogue des structures est une application de ce guide, il permet de réaliser, sur la base d'un trafic cumulé de poids lourds et du choix des matériaux, un prédimensionnement des structures.

Ce même catalogue présente une méthode de vérification au gel/dégel de la structure retenue.

Le SETRA a, dans le même ordre, édité un logiciel de dimensionnement : il s'agit d'ALIZE-LCPC Routes. Ce logiciel est publié par la société ITECH.

Chapitre 7 – Développement durable et infrastructures routières

7.1 – Quelques notions de développement durable

« Le développement durable est un mode de développement qui répond aux besoins des générations présentes, sans compromettre la capacité des générations futures de satisfaire les leurs. » C'est la définition qu'en a donnée à l'ONU en 1987 Giro Harlem Bruntland⁴².

On retient essentiellement cette déclaration comme étant la naissance du développement durable. C'est surtout l'aboutissement d'une première étape de la prise en compte du caractère fini de l'environnement terrestre.

D'autres éléments ont concouru à la prise en compte de ce phénomène, plusieurs rendez-vous mondiaux, les changements climatiques, la baisse très sensible de la biodiversité, la raréfaction des énergies fossiles.

Il n'est plus question de phénomène de mode aujourd'hui, mais d'inscription de ces principes dans les politiques nationales et internationales. Comment parler de mondialisation, de rapport nord-sud, sans les traiter dans le cadre du développement durable. En effet, ce principe n'est pas synonyme seulement d'écologie, il intègre la prise en compte nécessaire du développement humain en général.

Ainsi de nouveaux outils ont été mis en oeuvre suite à cette prise de conscience : les agendas 21, le protocole de Kyoto, la responsabilité sociétale des entreprises⁴³, le quatri.

Ce mouvement ne cache pas ses difficultés d'application et ses contradictions en particulier dans les rapports nord-sud. Il est cependant acquis que le développement sans limite n'est plus possible, il reste cependant à traduire efficacement ses principes dans les fonctionnements économiques, politiques et sociaux des pays de la planète.

7.2 – Développement durable et infrastructures de transport

L'économie mondialisée se traduit en particulier par une spécialisation des régions et des pays et donc par un développement accru des transports. Nous avons pu déterminer que la politique en la matière a conduit et conduit au développement de certaines infrastructures par rapport à d'autres. En France, le transport routier depuis la fin du XXème siècle est prédominant.

⁴² Rapport Bruntland, *Notre avenir à tous*

⁴³ De l'anglais Corporate Social Responsibility

La réflexion portera de plus en plus sur l'intermodalité et sur l'adaptation des infrastructures aux besoins économiques et sociaux. L'inévitable rationalisation des moyens qui accompagnera la décentralisation ne démentira pas ce principe.

Il y a lieu pour les gestionnaires de voirie que sont les Départements et les Communes, collectivités locales intervenant sur d'autres champs sociaux et économiques, de les intégrer dans la définition de véritables politiques de transport.

Ainsi la route ne représente plus une politique à part entière mais un élément contribuant à ces réflexions nécessaires, il est alors évident d'aborder ces thèmes transversalement :

- urbanismes et déplacements
- activités économiques et échanges avec les territoires de leurs marchés
- politiques sociales et accès aux services publics
- « rurbanisation »⁴⁴ et impact sur la consommation d'énergie

Des démarches initiées, comme celles de l'ARENE⁴⁵ en Ile de France, montrent qu'une rationalisation des moyens de déplacement peut être étudiée sans sacrifier une dimension de la problématique.

Ex : Démarche globale de prise en compte de l'environnement dans les déplacements et les aménagements de voirie – Paris rive gauche de la Seine

La gestion de l'espace, la congestion des infrastructures routières conduisent à réduire la place de la voiture dans les déplacements de proximité.

Les actions mises en oeuvre sont de plusieurs types :

- urbanismes : mixité des fonctions urbaines (habitat, activités, commerces) pour réduire ce type de déplacement
- dessertes en bus avec rabattement sur les gares SNCF et RER
- insertion de circulations douces lors de la création ou la réhabilitation de quartiers
- réduction de capacité des artères routières lorsque d'autres moyens de transport sont implantés
- mise en place de centrale de mobilité

On mesure bien que ces actions s'inscrivent et qu'elles ne peuvent être efficaces que dans la durée. Elles doivent donc être portées par des politiques d'aménagement pérennes pour ne pas être victimes de phénomènes de mode. La pertinence de l'expérience de l'ARENE paraît évidente au regard des incidences économiques et financières dans des secteurs urbains très denses. Les réflexions peuvent être menées hors des grandes zones urbaines pour les mêmes motifs mais pour des raisons d'origines différentes.

44 <http://www.urbanisme.equipement.gouv.fr/cdu/accueil/bibliographies/periurb/periurb2.htm>

45 Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies -

<http://www.areneidf.com/transport/index.html>

Les régions essentiellement rurales sont souvent marquées par une désertification qui sera d'autant plus prégnantes qu'elle sera amplifiée par le vieillissement de la population et les effets de la diminution du soutien public à l'activité agricole (mutation de la politique agricole commune).

L'Etat et les collectivités concernées devront rapidement réfléchir sur un nouvel aménagement des territoires où les politiques en matière d'infrastructures routières auront toute leur place.

7.3 Développement durable et gestion des infrastructures de transport

Le développement durable peut prendre toute sa dimension dans les modes d'exploitation et d'entretien des réseaux routiers.

En ce qui concerne la gestion des trafics⁴⁶, l'introduction des technologies de l'information et de la communication permet et permettra d'utiliser les réseaux routiers existants à des niveaux optimums de trafic⁴⁷.

On sait en effet que les consommations optimums d'énergie correspondent à des vitesses de référence, les trafics y sont liés⁴⁸. En deçà de certains seuils, il y a saturation du trafic mais aussi pic de pollution, d'autant plus élevé que les conditions météorologiques y sont favorables (haute pression par exemple).

La connaissance en temps réel des trafics, le moyen de communiquer avec les usagers⁴⁹ (RDS par exemple) permet alors de moduler les vitesses maximum, de mettre en oeuvre des systèmes de délestage et globalement d'élever la capacité d'utilisation du réseau.

En ce qui concerne l'entretien des réseaux routiers des démarches qualité ont été expérimentés par les services du ministère des transports. Il s'agit de DEQUADE Environnement.

La méthode⁵⁰ s'appuie sur :

- une analyse complète des activités d'entretien
- l'identification, pour chaque activité, des impacts et les risques environnementaux, sur la sécurité et la santé
- la hiérarchisation et la définition d'actions prioritaires visant à stabiliser et à diminuer l'impact négatif de ces activités.

46 Capacité et gestion des trafics :

www2.equipement.gouv.fr/recherche/incitatif/predit/telechargeable/ref_apr_predit_ydavid.rtf

47 Théorie des flux de trafic : <http://www.tfhr.gov/its/tft/toc.pdf>

48 Ecoulement du trafic http://www.entpe.fr/Dr/Licit/Niveau3/Recherche/Ecoulement_du_trafic.htm

49 L'information routière en temps réel :

<http://www.autoroutes.fr/upload/institutionnelle/infotrafficFr.pdf>

50 Méthode d'analyse environnementale des activités d'entretien et d'exploitation de la route :

http://www.certu.fr/doc/env/dd/doc/fichesAPDD/f9_dem_qual_expl_entr_rte_envir.pdf

Les prestations liées à l'entretien et à l'exploitation de la route ont été étudiées différemment sur les champs de la réalisation (fauchage, viabilité hivernale, ramassage des déchets, traitement des eaux de ruissellement, réparation des chaussées ...) et de la gestion des ressources nécessaires à la réalisation (entretien des centres d'exploitation, choix des véhicules et engins dédiés à l'entretien ...).

7.4 Développement durable et techniques de construction routière

Le dernier champ sur lequel peut porter le développement durable en matière d'infrastructures routières est liée à leur conception.

Avant la phase de réalisation, les différentes étapes sont autant d'occasion de mettre en oeuvre les principes du développement durable et en premier lieu la concertation. Nous avons pu mesurer dans les chapitres précédents ce qu'apportaient chacune des phases dans l'élaboration d'un projet. Des études préalables qui permettent d'identifier la problématique et le contexte du projet, de l'avant projet sommaire qui compare les solutions et retient celle qui sera réalisée, au projet qui la détaille, chaque étape est l'occasion d'associer le public. Qu'il s'agisse des usagers, des riverains du projet ou tout simplement du citoyen la prise en compte des remarques, des oppositions, des propositions enrichit le projet. La concertation fera désormais partie intégrante de l'élaboration et de la mise en oeuvre des projets d'infrastructures.

Au delà des traditionnelles études d'impact ou de d'incidence, l'étude d'un projet devra de plus en plus prendre en compte, la mesure des coûts externes : impact sur la santé, impact sur l'économie, mais aussi entretien et fonctionnement. Le chemin est certes encore long, des lois, des réglementations seront nécessaires, mais il n'est plus concevable de s'arrêter, pour le choix d'une solution au seul coût d'investissement : aujourd'hui lorsqu'on achète une voiture la consommation énergétique est un des critères de choix.

Après les phases d'étude, le projet est enfin mis en oeuvre, ce sont les phases de chantier après la mise en concurrence. Si les appels d'offres peuvent définir la technique, ils peuvent aussi encourager la créativité des entreprises, en ouvrant les offres à variante. C'est alors l'occasion pour les prestataires de proposer des solutions alternatives.

Ces solutions existent à tous les niveaux de construction : terrassement, ouvrages d'art et chaussées. Nous avons choisi pour illustrer notre propos deux exemples : les enrobés recyclés et les matériaux issus d'ordures ménagères.

Les enrobés recyclés :

Deux techniques différentes existent le recyclage à froid ou l'utilisation des fraisats comme granulats. Le recyclage à froid permet la réalisation sur place des travaux de chaussée, il s'agit de réhabilitation de chaussée en place. La couche de roulement, ainsi que les couches de fondation sont rabotées, une émulsion de

bitume pur ainsi qu'un fluxant sont injectés à l'intérieur du fraisat, le mélange est ensuite malaxé en place. Cette technique est adaptée pour des routes à faible trafic. En ce qui concerne l'introduction de produits de fraisage en substitution de granulats, la technique est tout à fait similaire à la fabrication d'enrobés classiques. Elle nécessite une maîtrise de la granulométrie des fraisats, et aussi de leur origine : il faut en particulier connaître le liant d'origine, pour vérifier sa compatibilité chimique avec le liant qui sera injecté. Cette technique est de mieux en mieux maîtrisée. Cependant l'introduction des produits recyclés est limitée à 25 % pour les couches d'assise (essentiellement des graves bitume) et 10 % pour les couches de roulement). Cette technique est cependant proscrite pour les chaussées à fort trafic.

Les enrobés tièdes⁵¹ :

La technique mise en oeuvre visent à réduire la température de fabrication et de mise en oeuvre des enrobés. Le résultat est une baisse de la quantité de CO₂ produite pour une même quantité d'enrobés produite.

Les méthodes de fabrication sont multiples : bitume avec plastifiant, moussabilité à chaud avec ou sans ajout double enrobage à chaud et à la mousse, enrobage séquentiel.

Les mâchefers issus d'ordures ménagères :

En France deux filières techniques permettent principalement le traitement des ordures ménagères : l'enfouissement et l'incinération. A titre d'illustration, en Ile de France, ce sont plus de 3,5 millions de tonnes d'ordures ménagères par an qui sont incinérées. Près d'un million de tonnes de mâchefer, principal résidu de cette incinération, sont produits par an.

Les mâchefers sont principalement composés d'eau, de sels, de calcaire et de chaux, de silice et d'alumine et de métaux lourds. Les mâchefers sont classifiés selon l'importance respective de leurs constituants. Ainsi une réglementation élaborée par le ministère de l'environnement⁵² retient trois classes de mâchefers : les mâchefers de type V, directement valorisables, les mâchefers de type M, valorisables après maturation, les mâchefers de type S, stockables. Ils sont évolutifs, ils peuvent passer d'un état à l'autre par maturation et devenir ainsi valorisables. De nombreuses polémiques sur leur toxicité, en particulier avec la présence de métaux lourds, ont ralenti le développement de leur utilisation. La normalisation des tests de lixiviation⁵³ a levé une partie de ces inquiétudes.

Les mâchefers de type V peuvent être utilisés comme des matériaux de remblai, mais aussi pour élaborer des couches de forme traitées ou non. Le guide pour la réalisation des remblais et des couches de forme les a pris en compte. Ils sont classés en sols organiques de type sous-produits industriels. Le laboratoire central des ponts et chaussées a élaboré un document de référence⁵⁴ sur les MIOM, l'UNICEM – Ile de France a publié un guide technique pour l'utilisation des MIOM.

51 On parle aussi d'enrobés basse énergie EBE ou low energie asphalt LEA

52 Circulaire du 9 mai 1994 :

53 NFX 31-211

54 http://ofrir.lcpc.fr/article_produit/61/0/225/article_initial.doc

Ces matériaux rencontrent maintenant un véritable succès en Ile de France, au regard de la rareté des granulats. Réservés aux petits aménagements, ils sont maintenant utilisés sur des chantiers autoroutiers.

Qu'il s'agisse des enrobés recyclés ou bien des MIOM, ces matériaux alternatifs ont encore des difficultés à s'imposer, leur utilisation est en but aujourd'hui au prix encore faibles des granulats naturels. On peut imaginer une évolution différente à terme, la protection des ressources non renouvelables pourrait en outre se traduire par une augmentation très sensible de leur prix.